УДК 624.012.25: 539.319.00.24

СКОРЕГОВАНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ ПРОСТОРОВИХ ПЕРЕРІЗІВ ЗВИЧАЙНО АРМОВАНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРЯМОКУТНОГО ПРОФІЛЮ З ПОДВІЙНИМ АРМУВАННЯМ ПРИ ЗГИНІ З КРУЧЕННЯМ НА ОСНОВІ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

ADJUSTED METHOD OF CALCULATION OF DURABILITY OF SPATIAL CUTS OF THE USUALLY REINFORCED REINFORCE-CONCRETE ELEMENTS OF RECTANGULAR PROFILE WITH DOUBLE RE-ENFORCEMENT AT BEND WITH TWISTING ON BASIS OF DEFORMATION MODEL

Клюка О.М., к.т.н., доц. (Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського)

Kluka L., cand. tehn. nauk., associate professor, (Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University)

Виходячи з аналізу власних досліджень запропонована скорегована методика визначення міцності просторових перерізів звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного профілю з подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі.

This article presents a critical analysis of the previous publications of the author related to the determination of the bearing capacity of course reinforced concrete elements of rectangular cross-section with single and double reinforcement on their own methodology taking into account only the three branches of transverse reinforcement, peresta inclined crack fracture. It is noted that the flexible elements in the presence of torques, it is necessary to arrange the closed clamps to create the internal torque for the perception of tensile stresses from the torque due to external load. Based on these considerations, the proposed adjusted method of determining the bearing capacity of reinforced concrete elements of rectangular section with double reinforcement with all four branches of the transverse reinforcement.

Ключові слова: міцність, згин з крученням, подвійне армування, деформаційна модель.

Keywords: durability, bending with torsion, double reinforcement, deformation model.

Україна виявилася останньою із держав бувшого СНД, яка перейшла на розрахунок міцності поперечних перерізів залізобетонних елементів під дією зовнішнього навантаження на основі деформаційної моделі, згідно з якою напруження за висотою стиснутої зони бетону розподіляються за криволінійним законом [1]. Що стосується розрахунку несучої здатності залізобетонних елементів, що працюють в умовах сумісної дії крутного та згинаючого моментів, українські норми, по аналогії з білоруськими та російськими, зберегли схему розташування стиснутої зони бетону по лінії, що з'єднує кінці похилої тріщини руйнування, розташовані на протилежних гранях поперечного перерізу, а також рекомендують враховувати поздовжню робочу арматуру та тільки одну гілку поперечної арматури, розташовану біля грані, протилежної розташуванню стиснутої зони бетону.

В роботі [2] запропонована методика визначення несучої здатності звичайно армованих елементів прямокутного поперечного перерізу з одиночним та подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі. В основу розрахунку покладена власна методика визначення критичної деформації бетону ε_{cl} в граничній стадії, розроблена на основі виконаних експериментально-теоретичних досліджень. В роботі [3] запропоновано уточнений метод розрахунку міцності просторових перерізів звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням з урахуванням трьох гілок поперечної арматури, пересічених похилою тріщиною руйнування, а також верхньої гілки поперечної арматури, розташованої в стиснутій від згину зоні бетону, напруження в якій були розтягуючі, викликані крутним моментом, при згині з крученням на основі деформаційної моделі.

В роботі [4] запропонована методика визначення міцності просторових перерізів звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням з урахуванням трьох гілок поперечної арматури, пересічених похилою тріщиною руйнування, при згині з крученням, на основі

деформаційної моделі, за умови визначення величини напружень за висотою стиснутої зони бетону поліномом п'ятого ступеню у вигляді

$$\sigma_c = f_{cd} \sum_{i=1}^{5} \alpha_k \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k, \qquad (1)$$

як це запропоновано авторами роботи [5], а в роботі [6] – те ж саме, але з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури.

Скорегувати методику розрахунку міцності просторових перерізів звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного профілю з подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури та визначенням величини напружень за висотою стиснутої зони бетону поліномом п'ятого ступеню у вигляді (1).

Слід зазначити, що в згинальних елементах, при наявності крутних моментів, обов'язково необхідно влаштовувати закриті хомути для створення внутрішнього крутного моменту для сприйняття розтягуючих напружень від крутного моменту, викликаного зовнішнім навантаженням. Внутрішній крутний момент повинен складатися із двох пар зусиль в стрижнях як вертикальних, так і горизонтальних гілок поперечної арматури, симетрично розташованих відносно центру кручення, який у прямокутному перерізі співпадає з його геометричним центром. Виходячи з цих міркувань, метою даної роботи є корекція розрахункових формул, запропонованих в роботі [6] для визначення несучої здатності просторових перерізів звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням, що зазнають згину з крученням, на основі деформаційної моделі з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури. Ця методика розрахунку базується на розрахунковій схемі (рис. 1, 2), в якій криволінійна епюра напружень в стиснутій зоні бетону висотою z_f замінюється прямокутною епюрою з умовною висотою $z \leq z_f \leq z_{fl}$, де z_{fl} – гранична висота стиснутої частини перерізу з рівномірно розподіленим напруженням в бетоні f_{cd}.

Для звичайно армованого прямокутного перерізу з поздовжньою робочою арматурою, розташованою як в розтягнутій, так і в стиснутій зонах бетону (рис. 1), умови рівноваги зусиль в

просторовому, нормальному до площини стиснутої зони бетону, перерізі запишуться таким чином:

$$\Sigma M_{O\text{-}O} = 0; \quad (2)$$

$$\Sigma X = 0, \quad (3)$$

де $\Sigma M_{O\text{-}O}$ – сума моментів всіх внутрішніх і зовнішніх зусиль відносно нейтральної лінії *O-O*, що проходить через нижню межу стиснутої зони бетону і лежить в її площині:

$$M_d \sin\alpha + T\cos\alpha = N_s \sin\alpha\,(d - z) - N'_s \sin\alpha\,(z - a'_{sz}) + $$
$$+ N_{s\omega b}\cos\alpha\,(h - a_z - a'_z) - N_{s\omega h}\, h\, ctg\varphi\, \sin\alpha + N_c\, 0{,}5z. \quad (4)$$

В цій формулі:

$$N_s = f_{yd} A_s\,; \quad (5)$$

$$N'_s = f''_{yd} A'_s\,; \quad (6)$$

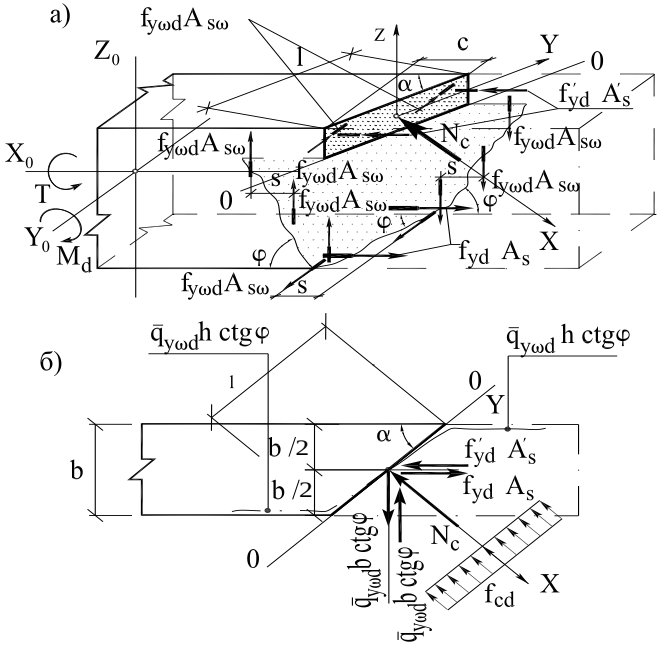

Рис. 1. Розрахункова схема для визначення несучої здатності звичайно армованого залізобетонного елемента прямокутного поперечного перерізу з подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури:
а – аксонометричний вигляд розрахункової схеми;
б – горизонтальна проекція залізобетонного елемента

$$N_{s\omega b} = \bar{q}_{y\omega d}\, b \;\; ctg\varphi \; ; \qquad (7)$$

$$N_{s\omega h} = \bar{q}_{y\omega d}\; h \;\; ctg\varphi \; ; \qquad (8)$$

де $\bar{q}_{y\omega d} = f_{y\omega d}\; A_{s\omega} \;/\; s$ – погонне зусилля в поперечних стрижнях (рис. 2), віднесене до одиниці довжини елемента; на початковому етапі розрахунку крок s та діаметр d_ω поперечних стрижнів приймаються конструктивно залежно від розмірів поперечного перерізу згинального елемента при поки що невідомому діаметрі поздовжньої робочої арматури, які потім можливо коригуються при перевірці несучої здатності елемента на дію крутного моменту;

N_c – нормальне до площини стиснутої зони бетону зусилля, що сприймається стиснутим бетоном просторового перерізу. Величина цього зусилля (рис. 2) визначається за формулою:

$$N_c = \int_0^z \sigma_c dA = b\int_0^z \sigma_c dz = b\int_0^{\varepsilon_c} \sigma_c d\varepsilon_c \, , \qquad (9)$$

де ε_c – відносна деформація крайнього верхнього стиснутого волокна бетону;

ΣX – сума проекцій всіх внутрішніх зусиль на вісь, що проходить через точку перетину вертикальної осьової лінії Z із нейтральною лінією O-O перпендикулярно площині стиснутої зони бетону:

$$\Sigma X = N_s \, sin\alpha - N'_s \, sin\alpha + N_{s\omega b} \, cos\alpha - N_c = 0, \qquad (10)$$

де:

$$N_s = \sigma_s A_s = E\, \varepsilon_s A_s \; ; \qquad (11)$$

ε_s – деформація крайнього волокна поздовжньої розтягнутої арматури;

$$N'_s = \sigma'_s A'_s = E\, \varepsilon'_s A'_s \; ; \qquad (12)$$

ε'_s – деформація крайнього волокна поздовжньої стиснутої арматури.

З використанням залежності *“*$\sigma_c - \varepsilon_c$*”* у вигляді (1) формула (9) набуває вигляду:

$$N_c = f_{cd}\, b\, z \;\times \left(\alpha_1 \frac{\varepsilon_c}{2\varepsilon_{cl}} + \alpha_2 \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_{cl}^2} + \alpha_3 \frac{\varepsilon_c^3}{4\varepsilon_{cl}^3} + \alpha_4 \frac{\varepsilon_c^4}{5\varepsilon_{cl}^4} + \alpha_5 \frac{\varepsilon_c^5}{6\varepsilon_{cl}^5} \right), \qquad (13)$$

де α_k – коефіцієнти, що визначаються згідно з [5].

З урахуванням (11), (12) і (13) складові рівняння (10) набувають вигляду:

$$N_s = E A_s \times \frac{\varepsilon_c}{z} (d - z); \qquad (14)$$

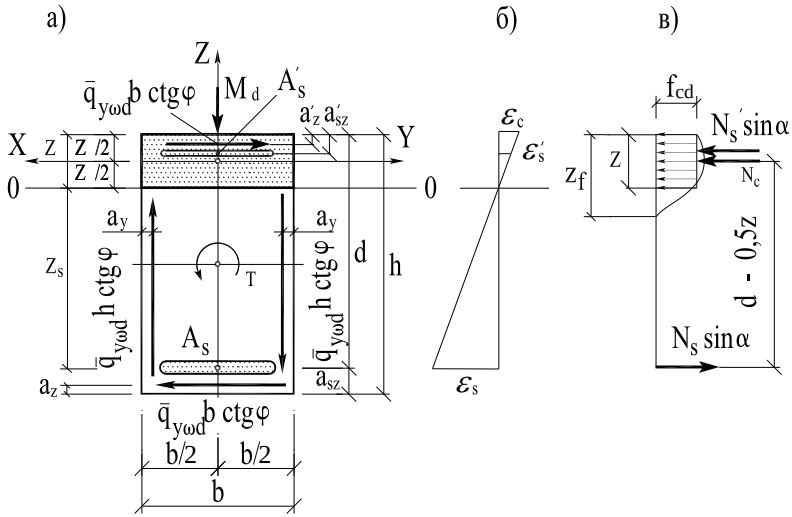

Рис. 2. До розрахункової схеми для визначення несучої здатності звичайно армованого залізобетонного елемента прямокутного профілю з подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури:
а – поперечний переріз залізобетонного елемента; б – епюра деформацій; в – епюра внутрішніх зусиль в поперечному перерізі

$$N'_s = E A'_s \times \frac{\varepsilon_c}{z}(z - a'_{sz}); \tag{15}$$

$$N_c = f_{cd}\, b\, z \sum_{k=1}^{5} \frac{\alpha_k}{k+1}\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}}\right)^k. \tag{16}$$

Моменти, які сприймаються поздовжньою розтягнутою (M_s), поздовжньою стиснутою (M'_s) і поперечною ($M_{s\omega b}$ і $M_{s\omega h}$) арматурою та стиснутою зоною бетону M_c відносно нейтральної осі $O - O$ просторового перерізу, визначаються за формулами:

$$M_s = \sigma_s A_s z_s = E\ \varepsilon_s A_s z_s = E A_s \frac{\varepsilon_c}{z}(d - z)^2; \tag{17}$$

$$M'_s = \sigma'_s A'_s z'_s = E\ \varepsilon'_s A'_s z'_s = E A'_s \frac{\varepsilon_c}{z}(z - a'_{sz})^2; \tag{18}$$

$$M_{s\omega b} = N_{s\omega b} \cos\alpha\, (h - a_z - z); \tag{19}$$

$$M_{s\omega h} = N_{s\omega h}\, h\, ctg\varphi\, \sin\alpha; \tag{20}$$

$$M_c = \int_o^z \sigma_c z\, dA_c = b\int_o^z \sigma_c dz = b\int_o^{\varepsilon_c} \sigma_c d\varepsilon_c\,. \tag{21}$$

З урахуванням виразу (1) формула (21), за якою визначається згинаючий момент, що сприймає стиснута зона бетону, набуває вигляду:

$$M_c = f_{cd}\, b\, z^2 \sum_{k=1}^{5} \frac{\alpha_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k . \qquad (22)$$

Сумарний згинаючий момент, що сприймається поздовжньою розтягнутою і стиснутою та всіма стрижнями поперечної арматури, визначається за формулою:

$$M_s + M'_s + M_{s\omega b} + M_{s\omega h} = E\, A_s \frac{\varepsilon_c}{z} (d - z)^2 + E\, A'_s \frac{\varepsilon_c}{z} (z - a'_{sz})^2 +$$

$$+ N_{s\omega b} \cos\alpha\, (h - a_z - z) - N_{s\omega h}\, h\, ctg\varphi\, \sin\alpha. \qquad (23)$$

Підставляючи вирази (22) і (23) у (4), отримаємо

$$M_d \sin\alpha + T \cos\alpha = E\, A_s \frac{\varepsilon_c}{z} (d - z)^2 + E\, A'_s \frac{\varepsilon_c}{z} (z - a'_{sz})^2 +$$

$$+ N_{s\omega b} \cos\alpha\, (h - a_z - z) - N_{s\omega h}\, h\, ctg\varphi\, \sin\alpha + f_{cd}\, bz^2 \sum_{k=1}^{5} \frac{\alpha_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k . \qquad (24)$$

Розв'язуючи це рівняння відносно M_d з урахуванням того, що $\psi = T : M_d$, отримуємо розрахункову формулу для визначення міцності просторових перерізів звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного профілю з подвійною арматурою з урахуванням всіх гілок поперечної арматури та визначенням величини напружень за висотою стиснутої зони бетону поліномом п'ятого ступеню (1) при згині з крученням, у вигляді

$$M_d = \frac{1}{\sin\alpha + \psi \cos\alpha} \times \left\{ E\, A_s \frac{\varepsilon_c}{z} (d - z)^2 + E\, A'_s \frac{\varepsilon_c}{z} (z - a'_{sz})^2 + N_{s\omega b} \cos\alpha\, h - \right.$$

$$\left. - a_z - z) - N_{s\omega h}\, h\, ctg\varphi\, \sin\alpha + f_{cd}\, bz^2 \sum_{k=1}^{5} \frac{\alpha_\kappa}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k \right\}, \qquad (25)$$

в якій критична деформація бетону ε_{cl} визначається за запропонованою автором роботи [2] формулою

$$\varepsilon_{cl} = 0{,}00074\, f_{cd}^{0{,}31}, \qquad (26)$$

отриманою на підставі виконаних власних експериментально-теоретичних досліджень.

В формулі (25) параметр z визначається методом поступового наближення до досягнення необхідної точності не нижче 5 %.

Після цього за формулою

$$T = \psi M_d \qquad (27)$$

визначають величину крутного моменту T, що сприймається просторовим перерізом елемента прямокутного перерізу з одиночною арматурою при згині з крученням.

Висновки.

1. У зв'язку з наявністю крутного моменту, викликаного зовнішнім навантаженням, в роботі аргументована необхідність влаштування закритих хомутів в поперечному перерізі звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного поперечного перерізу з подвійним армуванням, що працюють в умовах сумісної дії згинаючого та крутного моментів.

2. Отримані рівняння дозволяють виконувати розрахунок міцності просторових перерізів звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного перерізу з подвійним армуванням при сумісній дії згинаючого та крутного моментів на основі деформаційної моделі з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури та визначенням величини напружень за висотою стиснутої зони бетону поліномом п'ятого ступеню у вигляді (1).

1. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 98 с. **2.** Клюка О.М. Розрахунок міцності нормальних перерізів залізобетонних елементів при згині з крученням на основі нелінійної деформаційної моделі. Дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук за спец. 05.23.01– будівельні конструкції, будівлі та споруди / Полтава: Полтавський НТУ ім. Ю. Кондратюка, 2010. – 163 с. **3.** Клюка О. М., Жорняк М. С. Уточнений метод розрахунку міцності просторових перерізів звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі. / Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельні конструкції», випуск 78, книга 1. – К.: ДП НДІБК – 2013. – С. 558-564. **4.** Клюка О. М., Жорняк М. С. До визначення міцності просторових перерізів звичайно армованих елементів прямокутного профілю з одиночною арматурою при згині з крученням на основі деформаційної моделі / Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, випуск № 47. – Одеса – 2012. – С. 148-153. **5.** Бамбура А.Н., Гурковский А.Б. К построению деформационной теории железобетона стержневых систем на экспериментальной основе / Збірник наукових праць. – К.: НДІБК, 2003. – Випуск 59. – Книга 1. – С. 121-130. **6.** Клюка О. М. Скорегований метод розрахунку міцності

просторових перерізів звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі. / Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельне виробництво». – К.: НДІБВ, 2016, №60. – С. 47-52.

УДК 624.012.25:539.431

ВИЗНАЧЕННЯ ЗУСИЛЬ В ДВОШАРНІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АРКАХ З ВРАХУВАННЯМ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ЗУСИЛЬ ПРИ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

DETERMINATION OF EFFORTS IN TWO-HINGED REINFORCED-CONCRETE ARCHS TAKING INTO ACCOUNT REDISTRIBUTION OF EFFORTS AT THE REPEATED LOADINGS

Кислюк Д.Я. к.т.н., доцент (Луцький НТУ, м. Луцьк)

Kyslyuk D.Ya. Ph.D., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, (Lutsk National Technical University, Lutsk)

Наведено методику розрахунку двохшарнірних залізобетонних арок із врахуванням перерозподілу зусиль при повторних навантаженнях. Результати дослідження роботи арок при різних режимах одноразового та малоциклового навантаження.

Concrete arches are widely used in the construction of various buildings. There are fixed arches, two-hinged arches, and three-hinged arches. The horizontal arch thrust is perceived with the tie, but also it can be transmitted on the other constructions such as frames and foundations. Arches which are used in industrial and civil building coverings and also in structures can be subjected to repeated loadings and sometimes to over-loadings which significantly influence on stress-deformation state of the arch sections and ties. There can be the redistribution of efforts between the upper zone arch and tie in two-hinged arches and it affects its hardness and strength. The influence of repeated loadings and possible redistribution of efforts in the arches calculations are not considered as current regulations. And the methodology of arches