

УДК 624.012.25: 539.319.00.24

**УТОЧНЕНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ ПРОСТОРОВИХ ПЕРЕРІЗІВ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРЯМОКУТНОГО ПРОФІЛЮ З ПОДВІЙНИМ АРМУВАННЯМ ПРИ ЗГІНІ З КРУЧЕННЯМ НА ОСНОВІ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ**

**УТОЧНЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СЕЧЕНИЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ С ДВОЙНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

**SPECIFIED METHOD OF CALCULATION OF DURABILITY OF SPATIAL SECTIONS OF PRELIMINARY TENSE 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, м. Кременчук)

**Клюка Е.Н., к.т.н., доц.** (Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг)

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

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

Исходя из анализа собственных исследований предложена уточненная методика определения прочности пространственных сечений предварительно напряженных железобетонных элементов прямоугольного профиля с двойным армированием при изгибе с кручением на основе деформационной модели.

**Coming from the analysis of own researches the specified methodology of determination of durability of spatial sections of preliminary tense reinforced-concrete elements of rectangular profile is offered with double re-enforcement at a bend with twisting on the basis of deformation model.**

**Ключові слова:**

Міцність, згин з крученням, попереднє напруження, подвійне армування, деформаційна модель.

Прочность, изгиб с кручением, предварительное напряжение, двойное армирование, деформационная модель.

Strength, bending with torsion, preliminary tension, double reinforcement, deformation model.

**Вступ.** Виконані радянськими вченими в 50-70-х роках минулого століття в науково-дослідному інституті бетону і залізобетону (НДІБЗ) під керівництвом проф. О.О. Гвоздева експериментально-теоретичні дослідження залізобетонних елементів прямокутного поперечного перерізу, що працюють в умовах сумісної дії згинаючого та крутного моментів, дозволили, в першому наближенні, встановити схему їх руйнування (стиснута зона бетону розташовується по лінії, що з'єднує кінці похилої тріщини руйнування на протилежних гранях поперечного перерізу) та запропонувати розрахункові формули для визначення несучої здатності (враховувалась поздовжня робоча арматура та тільки три гілки поперечної арматури, перетнуті тією ж тріщиною), які були внесені в чинний на той час нормативний документ [1], який, на основі наступних досліджень елементів різних форм поперечного перерізу, після певних коригувань, залишався чинним в Україні до середини 2011 року [2].

**Аналіз останніх досліджень.** Виконані в подальшому експериментально-теоретичні дослідження [3-5] в Полтавському інженерно-будівельному інституті під керівництвом проф. М. С. Торяника звичайно армованих та попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного, таврового та двотаврового поперечних перерізів як з одиночним, так і з подвійним армуванням, при більш складному (косий згин з крученням) напруженому стані дозволи уточнити схему розташування стиснутої зони бетону під певним кутом  $\alpha$  до поздовжньої вісі елемента, величина якого залежить тільки від співвідношення діючих крутного та згинаючого моментів  $\psi = T:M_d$  і визначається за залежністю

$$\alpha = \arctan(1+1/5\psi). \quad (1)$$

Що стосується величини напружень у верхній горизонтальній гілці поперечної арматури, розташованій в стиснутій зоні бетону, то, як показали експериментальні дані [3-5], в момент руйнування вони не досягали межі плинності, але були близькі до неї. Тому ця гілка поперечної арматури в розрахункові формули не включалася (відносилася до запасу міцності).

В роботі [6] запропонована методика розрахунку звичайно армованих елементів прямокутного профілю при згині з крученням, а в роботі [7] запропонована уточнена методика визначення несучої здатності просторових перерізів попередньо напружених елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням при сумісній дії згинаючого та крутного моментів з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури на основі деформаційної моделі.

**Постановка задачі досліджень.** Розробка уточненої методики визначення несучої здатності просторових перерізів попередньо напружених елементів прямокутного профілю з подвійним армуванням при згині з крученням з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури.

**Методика досліджень.** Слід зазначити, що в згинальних елементах, при наявності крутих моментів, обов'язково необхідно влаштувати закриті хомути для створення внутрішнього крутного моменту для сприйняття розтягуючи напружень від крутного моменту, викликаного зовнішнім навантаженням. Внутрішній крутий 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, перед автором цієї роботи постало завдання скорегувати методик, запропоновану в [7], для визначення несучої здатності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з подвійним армуванням, що зазнають згину з крученням, на основі деформаційної моделі. Вона базується на розрахунковій схемі (рис. 1, 2), в якій криволінійна епюра напружень в стиснутому бетоні висотою  $x_f$  замінюється прямокутною епюрою з умовною висотою  $x \leq x_f \leq x_{fR}$ , де  $x_{fR}$  – гранична висота стиснутої частини перерізу, і рівномірно розподіленим напруженням в бетоні  $f_{cd}$ .

Рівнодіючу в стиснутому бетоні при прямокутній епюрі напружень пропонується визначати за скорегованою для згину з крученням формулою (28) [8]

$$N_{cd} = f_{cd} b_f / \sin \alpha d \zeta_R, \quad (2)$$

де  $\zeta_R$  – відносна гранична висота вкороченої стиснутої зони  $x$ , що обчислюється за формулою (29) [8]

$$\zeta_R = \zeta_{fR} \{ L_1 / \varepsilon'_{cu} + [D_0 + D_1 \varepsilon'_{cu} / 2 + D_2 (\varepsilon'_{cu})^2 / 3] - L_2 / \varepsilon'_{cu} \} / f_{cd}. \quad (3)$$

У цій формулі  $\zeta_{fR}$  – відносна гранична висота стиснутого перерізу, визначається за формулою (4.12) [9]

$$\zeta_{fR} = \varepsilon'_{cu} / (\varepsilon_{su} + \varepsilon'_{cu}), \quad (4)$$

де  $\varepsilon'_{cu}$  – гранична крайова деформація бетону стиснутої зони, яка визначається в процесі ітераційного пошуку як значення, при якому згинаючий момент  $M_{dR}$ , що сприймається поперечним перерізом, досягає максимуму;

$\varepsilon_{su} = f_{yd} / E_s$  – гранична відносна деформація розтягнутої арматури.

Значення  $L_i$  обчислюються за формулами (3.6) і (3.7) [9]:

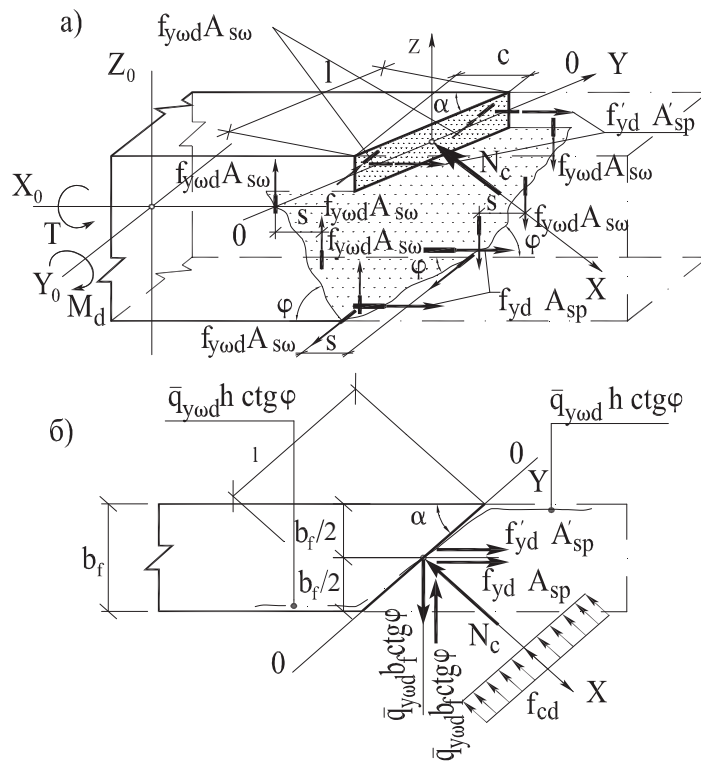


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення несучої здатності поперечно напруженого залізобетонного елемента прямокутного профілю з подвійною арматурою при згині з крученням на основі деформаційної моделі:  
 а – аксонометричний вигляд розрахункової схеми;  
 б – горизонтальна проекція залізобетонного елемента.

$$L_1 = C_1 \varepsilon_{bR}^2 / 2 + C_2 \varepsilon_{bR}^3 / 3 + C_3 \varepsilon_{bR}^4 / 4; \quad (5)$$

$$L_2 = D_0 \varepsilon_{bR} + D_1 \varepsilon_{bR}^2 / 2 + D_2 \varepsilon_{bR}^3 / 3. \quad (6)$$

Зазначені в цих залежностях сплайн-функції  $C_i$  знаходяться відповідно залежностям (1.9) – (1.11) [9]:

$$C_1 = E_{cm}; \quad (7)$$

$$C_2 = (3 f_{cd} - 2 E_{cm} \varepsilon_{bR}) / \varepsilon_{bR}^2; \quad (8)$$

$$C_3 = (E_{cm} \varepsilon_{bR} - 2 f_{cd}) / \varepsilon_{bR}^3. \quad (9)$$

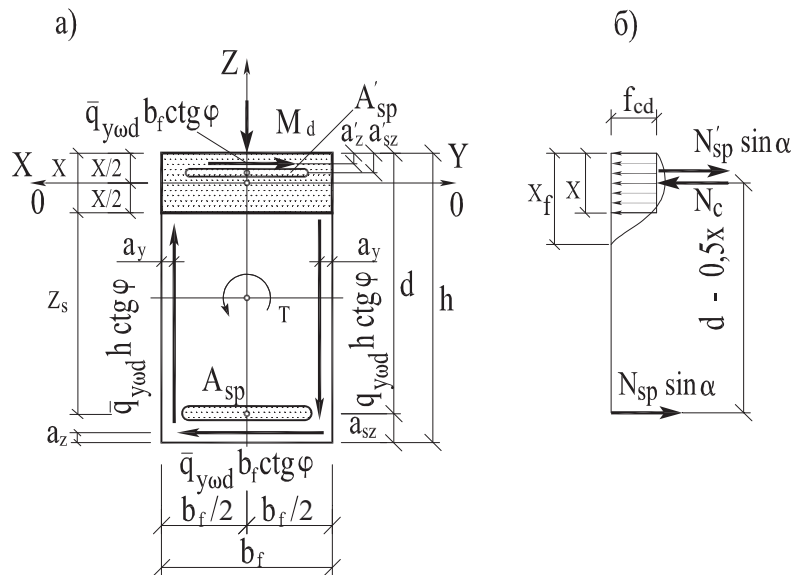


Рис. 2. До розрахункової схеми для визначення несучої здатності попередньо напруженого залізобетонного елемента прямокутного профілю з подвійною арматурою при згині з крученням на основі деформаційної моделі:  
 а – поперечний переріз залізобетонного елемента;  
 б – епюра внутрішніх зусиль в поперечному перерізі.

Параметри  $D_i$  визначаються за формулами (1.12) – (1.14) [9]:

$$D_0 = f_{cd} [\alpha_R \varepsilon_{bR}^2 - 2 \varepsilon_{bR} \varepsilon_{cu} + (\varepsilon_{cu}')^2] / (\varepsilon_{bR} - \varepsilon_{cu}')^2; \quad (10)$$

$$D_1 = 2 f_{cd} (1 - \alpha_R) \varepsilon_{bR} / (\varepsilon_{bR} - \varepsilon_{cu}')^2; \quad (11)$$

$$D_2 = f_{cd} (\alpha_R - 1) / (\varepsilon_{bR} - \varepsilon_{cu}')^2. \quad (12)$$

Використаний у цих формулах параметр  $\alpha_R$  визначається за співвідношенням (12) [8]

$$\alpha_R = f_{cd} / f_{cdu}, \quad (13)$$

де  $f_{cdu}$  – залишкова міцність бетону, що визначається, згідно з рекомендаціями [10], за формулою

$$f_{cdu} = (k n - n^2) f_{cd} / [1 + (k - 2) n]. \quad (14)$$

Наведені в цій формулі параметри  $n$  і  $k$  визначаються за формулами (14) і (15) [17]

$$n = \varepsilon_{cu}' / \varepsilon_{bR}; \quad (15)$$

$$k = E_{cm} \varepsilon_{bR} / f_{cd}. \quad (16)$$

В (15) і (16)  $\varepsilon_{bR}$  – критична деформація бетону на вершині повної діаграми деформування, визначається за запропонованою в [6,7] експериментальною залежністю

$$\varepsilon_{bR} = 0,00074 f_{cd}^{0,31}. \quad (17)$$

Для визначення місця розташування нейтральної вісі використовують умову  $\sum X = 0$ , де  $\sum X$  – сума проекцій усіх зусиль на вісь, що проходить через центр ваги стиснутої зони бетону нормально її площині. Ця умова для даного розрахункового випадку в розгорнутому вигляді записується таким чином:

$$(f_{yd} A_{sp} + f'_{yd} A'_{sp}) \sin \alpha - f_{cd} b_f x / \sin \alpha = 0. \quad (18)$$

Звідси висоту стиснутої від згину зони бетону визначають за наступною формулою

$$x = (N_{sp} + N'_{sp}) \sin^2 \alpha / f_{cd} b_f, \quad (19)$$

в якій

$$N_{sp} = f_{yd} A_{sp}; \quad (20)$$

$$N'_{sp} = f'_{yd} A'_{sp}. \quad (21)$$

Після цього визначають відносну висоту стиснутої зони бетону

$$\xi = x / d \leq \xi_R, \quad (22)$$

де  $\xi_R$  – гранична відносна висота стиснутої зони бетону, що визначається за таблицею 1 [8].

Якщо умова (22) виконується, то за розгорнутою формою умови граничної рівноваги  $\sum M_{o-o} = 0$ , де  $\sum M_{o-o}$  – сума моментів всіх зовнішніх і внутрішніх зусиль відносно вісі  $O - O$ , що проходить через точку прикладення рівнодіючої стискуючих зусиль у бетоні паралельно нейтральній вісі, що лежить у площині стиснутої зони бетону, яка має наступний вигляд

$$M_d \sin \alpha + T \cos \alpha = f_{yd} A_{sp} \sin \alpha (d - 0,5x) - f'_{yd} A'_{sp} (0,5x - a'_{sz}) + \bar{q}_{ywd} b_f \operatorname{ctg} \varphi \cos \alpha (h - a_z - a'_z) - \bar{q}_{ywd} h^2 \operatorname{ctg} \varphi \sin \alpha, \quad (23)$$

визначають несучу здатність просторового перерізу елемента за формулою

$$M_d = (M_{sp} - M'_{sp} + M_{sob} \operatorname{ctg} \alpha - M_{soh}) / (1 + \psi \operatorname{ctg} \alpha), \quad (24)$$

в якій:

$$M_{sp} = N_{sp} (d - 0,5x), \quad (25)$$

$$M'_{sp} = N'_{sp} (0,5x - a'_{sz}), \quad (26)$$

$$M_{sob} = N_{sob} x_{sob}, \quad (27)$$

$$N_{sob} = \bar{q}_{ywd} b_f \operatorname{ctg} \varphi, \quad (28)$$

$$\bar{q}_{ywd} = f_{ywd} A_{sw} / s, \quad (29)$$

$$x_{sob} = h - a_z - a'_z, \quad (30)$$

$$M_{soh} = N_{soh} b_{soh}, \quad (31)$$

$$N_{soh} = \bar{q}_{ywd} h \operatorname{ctg} \varphi, \quad (32)$$

$$b_{soh} = h \sin \alpha. \quad (33)$$

Після цього, виходячи із залежності  $\psi = T : M_d$ , на підставі визначеного за формулою (24) значення згинаючого моменту  $M_d$  обчислюють величину крутного моменту  $T$ , що сприймається просторовим перерізом, за формулою

$$T = \psi M_d. \quad (34)$$

При цьому, кут нахилу похилих тріщин руйнування до поздовжньої вісі елемента  $\varphi$  при сумісній дії крутного  $T$  та згинаючого  $M_d$  моментів, за експериментальними даними автора цієї роботи, складає близько  $45^\circ$ .

Якщо умова (22) не виконується, то приймають  $\zeta = \zeta_R$  і розрахунок повторюють за вище наведеною методикою.

**Висновок.** Розроблена уточнена методика дозволяє виконувати розрахунок міцності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з подвійним армуванням з урахуванням як поздовжньої так і всієї поперечної арматури при сумісній дії крутного та згинаючого моментів на основі деформаційної моделі.

1. СНиП II-V.1-62. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. – М. 1962.
2. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. – М., 1986. – 79 стр.
3. Фалеев Л. В. Экспериментально-теоретические исследования несущей способности железобетонных балок прямоугольного и таврового сечений, работающих на кривой изгиб с кручением. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Полтава, 1968. – 301 стр.
4. Кузьменко А. М. Экспериментально-теоретические исследования несущей способности предварительно напряженных железобетонных элементов прямоугольного сечения при косом изгибе с кручением. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Полтава, 1972. – 230 стр.
5. Жорняк Н. С. Экспериментально-теоретические исследования несущей способности предварительно напряженных железобетонных элементов таврового и двутаврового поперечных сечений на кривой изгиб с кручением. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Полтава, 1973. – 170 стр.
6. Жорняк М. С. Розрахунок несучої здатності залізобетонних елементів при згині з крученням / М.С. Жорняк, О.М. Клюка, С.І. Роговий // Будівельні конструкції. – К.: Будівельник, 2007. – Вип. 67. – С. 336 – 343.
7. Клюка О. М. Уточнений метод розрахунку міцності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі / О.М. Клюка, М.С. Жорняк // Науково-технічний збірник «Містобудування та територіальне планування». Київ-КНУБА, 2014. – Вип. 54. – С. 193 – 200.
8. Роговий С. І. Посібник із розрахунку міцності нормальних перерізів елементів залізобетонних конструкцій на основі деформаційної розрахункової моделі / С.І. Роговий // Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 42 с.
9. Роговой С. И. Нелинейное деформирование в теории железобетона и расчет прочности нормальных сечений / С.И. Роговой // Полтава: ПолтНТУ, 2002. – 183 стр.
10. КОДЕКС–ОБРАЗЕЦ ЕКБ–ФИП для норм по железобетонным конструкциям. Том II. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР. – 285 стр.