

УДК 624.012.25:539.319.00.24

к.т.н., доцент Клюка О.М.,
к.т.н., доцент Жорняк М.С.,
Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського, м. Кременчук

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

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

Ключові слова: *міцність, просторовий переріз, попереднє напруження, прямокутний профіль, одиночне армування, згин з крученням, деформаційна модель.*

Аналіз останніх досліджень. Перші експериментально-теоретичні дослідження [1, 2] залізобетонних елементів, що працюють в умовах сумісної дії згинаючого та крутного моментів, виконані в середині минулого століття в науково-дослідному інституті бетону і залізобетону (НИИЖБ), дозволили, в першому наближенні, встановити схему їх руйнування та запропонувати розрахункові формули для визначення несучої здатності, які були внесені в чинний на той час нормативний документ [3]. Після певних коригувань [4], він залишався чинним в Україні до середини 2011 року, коли був введений в дію український нормативний документ [5]. При цьому вважалось, що нейтральна вісь розташовується біля стиснутої від згину грані по лінії, що з'єднує кінці похилої тріщини руйнування на протилежних гранях поперечного перерізу. В розрахункових формулах враховувалась поздовжня робоча арматура та тільки три гілки поперечної арматури, перетнуті руйнівною тріщиною.

Виконані в подальшому експериментально-теоретичні дослідження [6, 7] звичайно армованих та попередньо напружених залізобетонних елементів різних форм поперечного перерізу при більш складному (косий згин з крученням) напруженому стані дозволи уточнити схему розташування стиснутої зони бетону: вона розташовується не по лінії, що з'єднує кінці похилої тріщини руйнування на протилежних гранях перерізу (пряма залежність від розмірів поперечного перерізу), а під певним кутом α до

поздовжньої вісі елемента, величина якого залежить тільки від співвідношення діючих крутного та згинаючого моментів $\psi = T : M_d$ і визначається за залежністю [6, 7]

$$\alpha = \text{arc tg}(1+1/5 \psi). \quad (1)$$

Що стосується величини напружень у верхній горизонтальній гілці поперечної арматури, то, як показали експериментальні дані [6, 7], 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).

Стан проблеми. Враховуючи вище викладене виникла необхідність розробки методики визначення несучої здатності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням при згині з крученням з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури.

Актуальність проблеми. В роботах [8, 9] запропоновані основні передумови і методика розрахунку міцності просторових перерізів звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням, що зазнають згину з крученням, на основі деформаційної моделі. При цьому розташування стиснутої зони бетону визначається залежністю (1) і враховується як поздовжня арматура, так і три гілки поперечної арматури, пересіченої похилою тріщиною руйнування.

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 роботах [10, 14] для визначення несучої здатності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням, що зазнають згину з крученням, на основі деформаційної моделі. Ця методика розрахунку 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} .

Особистий вклад авторів. Рівнодіючу в стиснутому бетоні при прямокутній епюрі напружень пропонується визначати за скорегованою для згину з крученням формулою (28) [15]

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

де ξ_R – відносна гранична висота вкороченої стиснутої зони x , що обчислюється за формулою (29) [15]

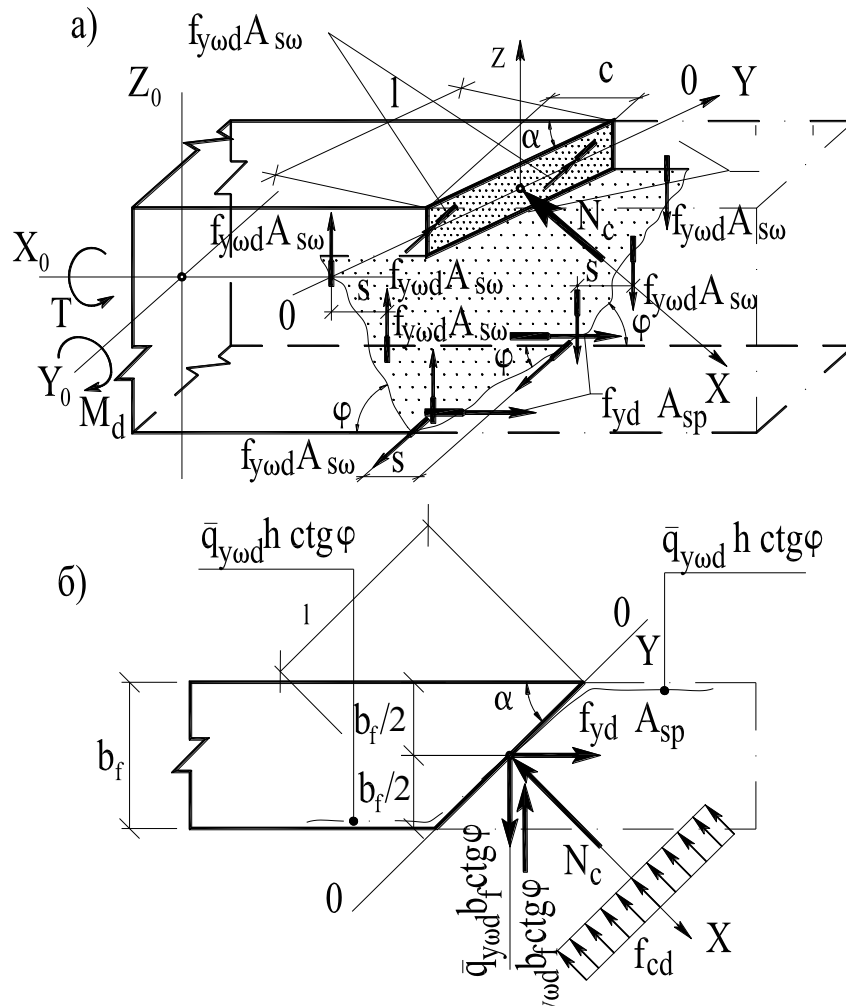


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення несучої здатності попередньо напруженого залізобетонного елемента прямокутного профілю з одиночною арматурою при згині з крученням на основі деформаційної моделі:

- а – аксонометричний вигляд розрахункової схеми;
- б – горизонтальна проекція залізобетонного елемента

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

В цій формулі ξ_{fR} – відносна гранична висота стиснутого перерізу, визначається за формулою (4.12) [16]

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

де ε'_{cu} – гранична крайова деформація бетону, яка визначається в процесі ітераційного пошуку як значення, при якому згинаючий момент M_{dR} , що сприймається стиснутим бетоном, досягає максимуму;

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

Значення L_i обчислюються за формулами (3.6) і (3.7) [16]:

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

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

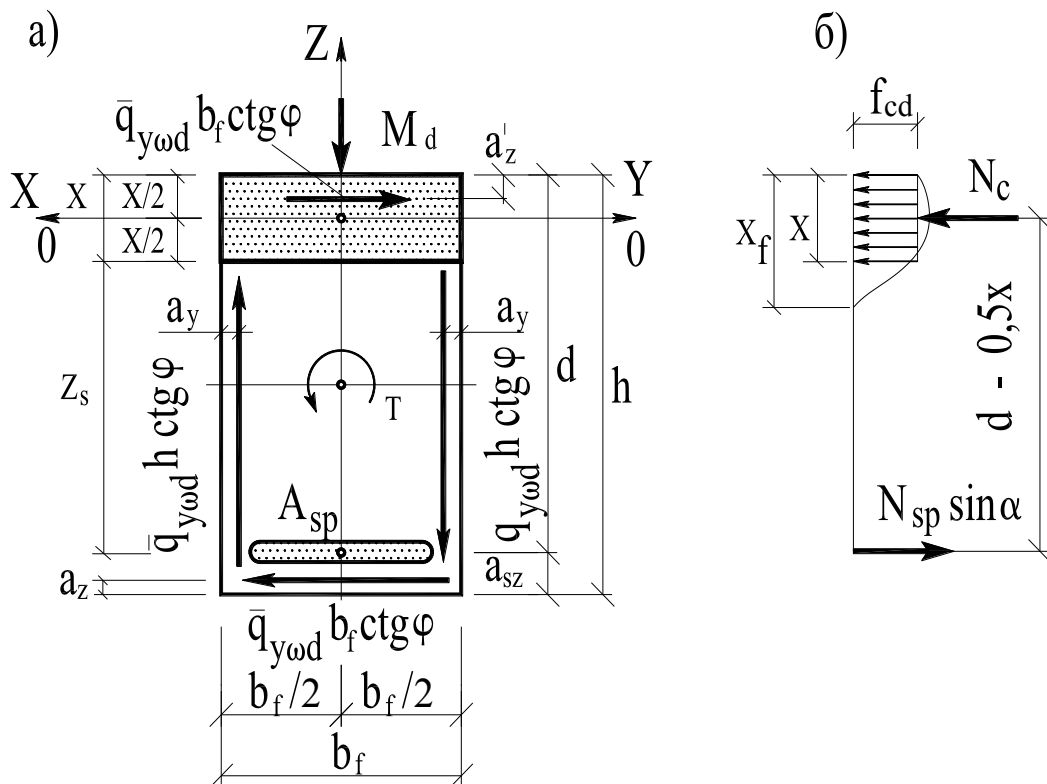


Рис. 2. До розрахункової схеми для визначення несучої здатності попередньо напруженого залізобетонного елемента прямокутного профілю з одиночною арматурою при згині з крученням на основі деформаційної моделі:

а – поперечний переріз залізобетонного елемента;

б – епюра внутрішніх зусиль в поперечному перерізі

Зазначені в цих залежностях сплайн-функції C_i знаходяться відповідно залежностям (1.9) – (1.11) [16]:

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

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

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

Параметри D_i визначаються за формулами (1.12) – (1.14) [16]:

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

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

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

Використаний у цих формулах параметр α_R визначається за співвідношенням (12) [15]

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

де f_{cdu} – залишкова міцність бетону, що визначається, згідно з рекомендаціями [17], 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) [15]

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

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

В цих залежностях ε_{bR} – критична деформація бетону на вершині повної діаграми деформування, визначається за запропонованою авторами цієї роботи експериментально-теоретичною 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 проєкцій 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:

$$f_{yd} A_{sp} \sin \alpha - f_{cd} b_f x / \sin \alpha = 0, \quad (18)$$

і висоту стиснутої від згину зони бетону визначають за наступною формулою

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

в якій

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

Після цього визначають відносну висоту стиснутої зони бетону

$$\xi = x / d \leq \xi_R, \quad (21)$$

де ξ_R – гранична відносна висота стиснутої зони бетону, визначається за таблицею 1 [15].

Якщо умова (21) виконується, то за розгорнутою формою умови граничної рівноваги $\sum M_{o-o} = 0$, де $\sum M_{o-o}$ – сума моментів 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

$$\begin{aligned} \overline{M}_d \sin \alpha + T \cos \alpha &= f_{yd} A_{sp} \sin \alpha (d - 0,5x) + \\ + \overline{Q}_{ywd} b_f \operatorname{ctg} \varphi \cos \alpha (h - a_z - a'_z) - \overline{q}_{ywd} h^2 \operatorname{ctg} \varphi \sin \alpha, \end{aligned} \quad (22)$$

визначають несучу здатність просторового перерізу елемента за формулою

$$M_d = [M_{sp} + M_{sob} \operatorname{ctg} \alpha - M_{soh}] / (1 + \psi \operatorname{ctg} \alpha), \quad (23)$$

в якій:

$$M_{sp} = N_{sp} (d - 0,5x), \quad (24)$$

$$M_{sob} = N_{sob} x_{sob}, \quad (25)$$

$$N_{sob} = \bar{q}_{ywd} b_f ctg\varphi, \quad (26)$$

$$\bar{q}_{ywd} = f_{ywd} A_{sw} / s, \quad (27)$$

$$x_{sob} = h - a_z - a'_z, \quad (28)$$

$$M_{soh} = N_{soh} b_{soh}, \quad (29)$$

$$N_{soh} = \bar{q}_{ywd} h ctg\varphi, \quad (30)$$

$$b_{soh} = h \sin\alpha. \quad (31)$$

Після цього, виходячи із залежності $\psi = T:M_d$, на підставі визначеного за формулою (23) значення згинаючого моменту M_d обчислюють величину крутного моменту T , що сприймається просторовим перерізом, за формулою

$$T = \psi M_d \quad (32)$$

При цьому кут нахилу похилих тріщин руйнування до поздовжньої вісі елемента φ при сумісній дії крутного T та згинаючого M_d моментів, за експериментальними даними авторів цієї роботи, складає близько 45° .

Якщо умова (21) не виконується, то приймають $\zeta = \zeta_R$ і розрахунок повторюють за вище наведеною методикою.

Висновок. Розроблена авторами методика дозволяє виконувати розрахунок міцності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням з урахуванням як поздовжньої, так і всіх чотирьох гілок поперечної арматури при сумісній дії крутного та згинаючого моментів на основі деформаційної моделі.

Список використаних джерел

1. Чиненков Ю.В. Исследование работы железобетонных элементов прямоугольного сечения, работающих на изгиб с кручением. /Ю.В. Чиненков // Исследование прочности элементов железобетонных конструкций// выпуск 5. – М.: НИИЖБ, 1959.
2. Лессиг Н.Н. Определение несущей способности железобетонных элементов прямоугольного сечения, работающих на изгиб с кручением. / Н.Н. Лессиг // Исследование прочности элементов железобетонных конструкций – М.: НИИЖБ, 1959.
3. СНиП II-V.1-62. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. – М. 1962.
4. СНиП 2.03.01-84*.Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. – М., 1986. – 79 стр.

5. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положенн. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
6. 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.
7. Жорняк Н. С. Экспериментально-теоретические исследования несущей способности предварительно напряженных железобетонных элементов таврового и двутаврового поперечных сечений на косоу изгиб с кручением. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Полтава, 1973. – 170 стр.
8. Жорняк М. С., Клюка О. М. Основні передумови розрахунку міцності нормальних перерізів залізобетонних конструкцій прямокутного поперечного перерізу, що зазнають згину з крученням, на основі нелінійної деформаційної моделі. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 15. Збірник наукових праць. Рівне, 2007. – С. 161 – 167.
9. Жорняк М. С., Клюка О. М., Роговий С. І. Розрахунок несучої здатності залізобетонних елементів при згині з крученням. Будівельні конструкції. – К.: Будівельник, 2007. – Вип. 67. – С. 336 – 343.
10. Жорняк Н. С., Клюка Е. Н. Расчет несущей способности преднапряженных железобетонных элементов прямоугольного сечения с одиночной арматурой при изгибе с кручением на основе деформационной модели. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 17. Збірник наукових праць. Рівне, 2008. – С. 156 – 162.
11. Жорняк Н. С., Клюка Е. Н. Расчет несущей способности преднапряженных железобетонных элементов прямоугольного сечения с двойной арматурой при изгибе с кручением на основе деформационной модели. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 18. Збірник наукових праць. Рівне, 2009. – С. 207 – 214.
12. Жорняк М. С., Клюка О. М. Алгоритм розрахунку міцності просторових перерізів залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 20. Збірник наукових праць. Рівне, 2010. – С. 225 – 232.
13. Жорняк М. С., Клюка О. М., Роговий С. І. Блок схема та алгоритм розрахунку міцності просторових перерізів залізобетонних елементів прямокутного профілю з подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі. Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. Випуск 2/2010 (61). Частина 1. – С. 97 – 103.

14. Жорняк М. С., Клюка О. М. Блок схема та алгоритм розрахунку міцності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі. Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. Випуск 1/2011 (66). Частина 1. – С. 98 – 104.
15. Роговий С. І. Посібник із розрахунку міцності нормальних перерізів елементів залізобетонних конструкцій на основі деформаційної розрахункової моделі. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 42 с.
16. Роговой С. И. Нелинейное деформирование в теории железобетона и расчет прочности нормальных сечений. – Полтава: ПолтНТУ, 2002. – 183 стр.
17. СЕВ – FIP MODEL CODE 1990. DESIGN CODE.

АННОТАЦИЯ

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

Ключевые слова: прочность, пространственное сечение, предварительное напряжение, прямоугольный профиль, одиночное армирование, изгиб с кручением, деформационная модель.

ANNOTATION

Based on the analysis of their research suggested a refined technique for determining the strength of the spatial sections of prestressed concrete elements of a rectangular profile with a single reinforcement in bending with torsion on the basis of the deformation model.

Keywords: strength, spatial section, prestressing, rectangular profile, single reinforcement plies with twisting, deformation model.