

УДК 624.012.25: 539.319.00.24

ДО ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ПРОСТОРОВИХ ПЕРЕРІЗІВ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРЯМОКУТНОГО ПРОФІЛЮ З ПОДВІЙНИМ АРМУВАННЯМ ПРИ ЗГІНІ З КРУЧЕННЯМ НА ОСНОВІ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОЧНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СЕЧЕНИЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ С ДВОЙНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

BY DETERMINING THE STRENGTH OF THE SPATIAL SECTION OF PRESTRESSED CONCRETE RECTANGULAR PROFILE CELL DOUBLE REINFORCEMENT IN BENDING AND TORSION-BASED MODEL OF DEFORMATION

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

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

L. Kluka, cand.tehn.nauk., associate professor, N. Zhornyak, cand.tehn.nauk., associate professor (Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University)
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine

Виходячи з аналізу власних досліджень запропонована 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 методика определения прочности пространственных сечений предварительно напряженных железобетонных элементов прямоугольного профиля с двойным армированием при изгибе с кручением на основе деформационной модели.

Based on the analysis of their own research the technique of determining the strength of spatial sections of pre-stressed concrete elements rectangular profile with double reinforcement bending and torsion-based deformation model.

Ключові слова:

Міцність, просторовий переріз, попереднє напруження, прямокутний профіль, подвійне армування, деформаційна модель.

Прочность, пространственное сечение, предварительное напряжение, прямоугольный профиль, двойное армирование, деформационная модель.

The strength, the spatial section, prestress, rectangular profile, dual reinforcement deformation model.

Вступ. В реальній практиці проектування залізобетонних елементів, що зазнають сумісної дії згинаючих та крутних моментів в несприятливих умовах експлуатації (підвищена вологість, шкідливі вологісні технологічні виділення і т. ін.) та при значних зовнішніх навантаженнях, щоб уникнути появу тріщин для армування нормальних перерізів замість звичайної використовують попередньо напружену поздовжню робочу арматуру. При значній кількості останньої та при пониженій міцності бетону, в передексплуатаційній стадії в таких елементах можуть з'являтися нормальні тріщини в стиснутій (в стадії експлуатації) зоні. Для запобігання цього неприємного явища досить часто виникає необхідність (при обмежених розмірах поперечного перерізу або недостатній міцності бетону) підсилення стиснутої зони бетону за рахунок розташування в ній попередньо напруженої поздовжньої арматури.

Аналіз останніх досліджень. До недавнього часу (середина 2011 р.) в Україні розрахунок залізобетонних конструкцій, незалежно від умов силового впливу, форми поперечного перерізу та способу армування, виконувався за методикою радянських норм [1], при якій напруження в стиснутій зоні бетону, при наявності останньої, розподілялись за її висотою за прямокутним законом, що явно не відповідає фактичному напруженому стану поперечного перерізу. В той же час в Європі ще в 1984 р. з'явилися нові міжнародні [2], у 2002 р. білоруські [3], а в 2003 р. нові російські [4] нормативні документи, які рекомендують виконувати 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, Лише після введення в дію з 1.07.2011р. нового українського нормативного документу [5], вітчизняні проектувальники перейшли на розрахунок залізобетонних конструкцій за деформаційною схемою.

На протязі останніх років українські вчені запропонували методи розрахунку елементів залізобетонних конструкцій, що працюють в умовах згину [6], косого згину [7], центрального та позацентрального стиску [8], на основі деформаційної моделі. Ці вагомо аргументовані наукові методи базуються на універсальних фізичних та теоретичних розрахункових схемах, що враховують реальний напружений стан поперечного перерізу

залізобетонних елементів залежно від характеру впливу зовнішнього навантаження.

На основі деформаційної моделі авторами робіт [9, 10] запропоновані методики визначення несучої здатності звичайно армованих елементів прямокутного профілю з одиночним та подвійним армуванням при згині з крученням. В роботах [11, 12] запропоновані методики визначення несучої здатності попередньо напружених елементів прямокутного профілю з одиночним та подвійним армуванням при згині з крученням. Автори робіт [13, 14] запропонували методики визначення несучої здатності звичайно армованих елементів таврового профілю з одиночним та подвійним армуванням при згині з крученням. В основу розрахунків покладена методика визначення критичної деформації бетону ε_{cl} в граничній стадії, розроблена на основі виконаних власних експериментально-теоретичних досліджень.

Матеріал і результати дослідження. В роботі [15] для визначення величини напружень за висотою стиснутої зони бетону запропоновано поліном п'ятого ступеню у вигляді

$$y_c = f_{cd} \sum_{i=1}^5 \alpha_k \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k. \quad (1)$$

З урахуванням цієї залежності автори робіт [16-18] розробили методику визначення несучої здатності просторового перерізу звичайно армованих елементів прямокутного профілю з одиночною та подвійною арматурою, а також попередньо напружених з одиночною арматурою.

Для попередньо напруженого прямокутного перерізу з поздовжньою робочою арматурою, розташованою як в розтягнутій, так і в стиснутій зонах (рис. 1), умови рівноваги зусиль в просторовому, нормальному до площини стиснутої зони бетону, перерізі запишуться таким чином:

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

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

де ΣM_{O-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:

$$M_d \sin \alpha + T \cos \alpha = N_{ydp} \sin \alpha (d - x) - N'_{ydp} \sin \alpha (x - a'_{spz}) + N_{swb} \cos \alpha (h - a_z - x) - N_{swh} h \sin \varphi + 0,5 N_c x. \quad (4)$$

В цій формулі:

$$N_{swb} = \bar{q}_{ywd} b \operatorname{ctg} \varphi; \quad (5)$$

$$N_{swh} = \bar{q}_{ywd} h \operatorname{ctg} \varphi, \quad (6)$$

де $\bar{q}_{ywd} = f_{ywd} A_{sw} s$ – погонне зусилля в поперечних стрижнях (рис. 2), віднесене до одиниці довжини елемента; на початковому етапі розрахунку діаметр і крок поперечної арматури приймаються конструктивно залежно від розмірів поперечного перерізу згинального елемента, які потім уточнюються при перевірці несучої здатності елемента на дію крутного моменту;

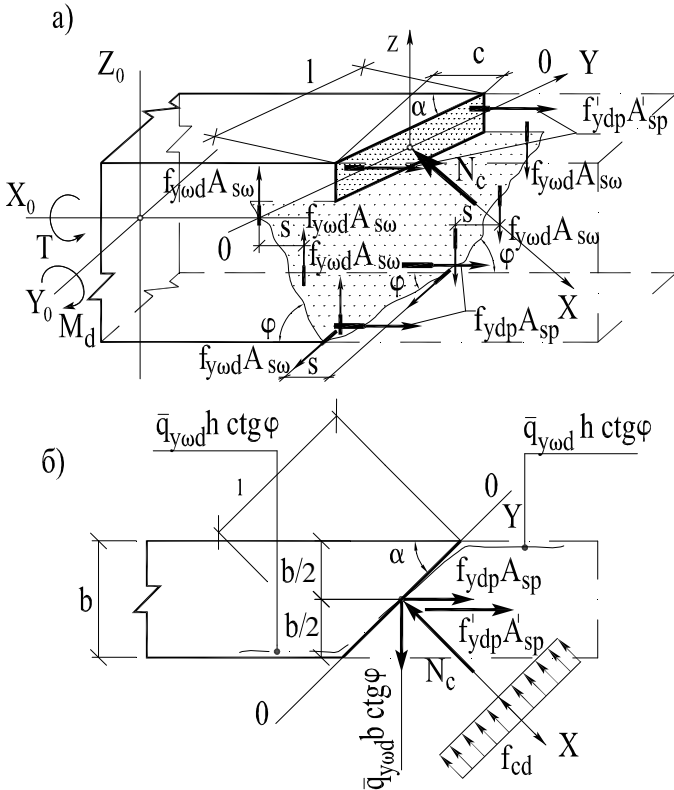


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення несучої здатності попередньо напруженого залізобетонного елемента прямокутного профілю з подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі:

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

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

$$N_c = \int_0^x \sigma_c dA_c = b \int_0^x \sigma_c dx = b \int_0^{\varepsilon_c} \sigma_c d\varepsilon, \quad (7)$$

де ε_c – відносна деформація крайнього верхнього стиснутого волокна бетону;
 ΣX – сума проєкцій всіх внутрішніх і зовнішніх зусиль на вісь, що проходить через точку перетину вертикальної осьової лінії Z із нейтральною лінією $O-O$ перпендикулярно площині стиснутої зони бетону:

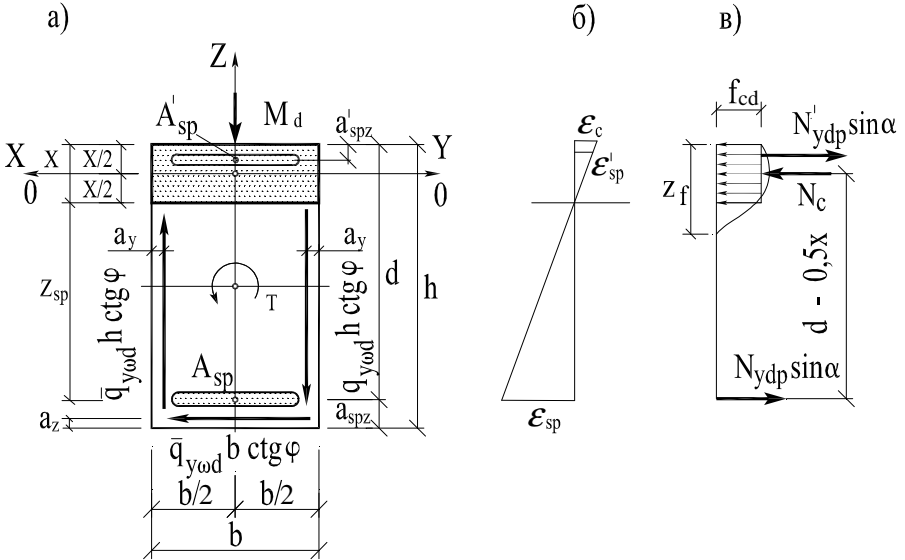


Рис. 2. До розрахункової схеми для визначення несучої здатності попередньо напруженого залізобетонного елемента прямокутного профілю з подвійною арматурою при згині з крученням на основі деформаційної моделі:

- а – поперечний переріз залізобетонного елемента;
 б – епюра деформацій; в – епюра внутрішніх зусиль у поперечному перерізі

$$\Sigma X = (N_{ydp} + N'_{ydp}) \sin \alpha + N_{swb} \cos \alpha - N_c = 0, \quad (8)$$

де

$$N_{ydp} = f_{ydp} A_{sp} = E_s \varepsilon_{sp} A_{sp}; \quad (9)$$

$$N'_{ydp} = f'_{ydp} A'_{sp} = E_s \varepsilon'_{sp} A'_{sp}; \quad (10)$$

ε_{sp} – відносна деформація крайнього волокна попередньо напруженої арматури, розташованої в розтягнутій зоні поперечного перерізу,
 ε'_{sp} – те ж, в стиснутій зоні.

З використанням залежності « $\sigma_c - \varepsilon_c$ » у вигляді (1) формула (7) набуває вигляду:

$$N_c = f_{cd} b x$$

$$\times \left(\alpha_1 \frac{\varepsilon_c}{2\varepsilon_{cl}} + \alpha_2 \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_{cl}^2} + \alpha_3 \frac{\varepsilon_c^3}{4\varepsilon_{cl}^3} + \alpha_4 \frac{\varepsilon_c^4}{5\varepsilon_{cl}^4} + \alpha_5 \frac{\varepsilon_c^5}{6\varepsilon_{cl}^5} \right), \quad (11)$$

де α_k – коефіцієнти, що визначаються згідно з [15].

З урахуванням (9 – 11) складові рівняння (8) набувають вигляду:

$$N_{ydp} = E_s A_{sp} \times \frac{\varepsilon_c}{x} (d - x); \quad (12)$$

$$N'_{ydp} = E_s A'_{sp} \times \frac{\varepsilon_c}{x} (x - a'_{spz}); \quad (13)$$

$$N_c = f_{cd} b x \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k. \quad (14)$$

Моменти, які сприймаються нижньою M_{ydp} і верхньою напруженою M'_{ydp} , поперечною M_{swb} і M_{swh} арматурою та стиснутою зоною бетону M_c відносно нейтральної осі $O - O$ просторового перерізу, визначаються за формулами:

$$M_{ydp} = f_{ydp} A_{sp} z_{sp} = E_s \varepsilon_{sp} A_{sp} z_{sp} = E_s A_{sp} \frac{\varepsilon_c}{x} (d - x); \quad (15)$$

$$M'_{ydp} = f'_{ydp} A'_{sp} (x - a'_{spz}) = E_s \varepsilon'_{sp} A'_{sp} (x - a'_{spz}) = E_s A'_{sp} \frac{\varepsilon_c}{x} (x - a'_{spz}); \quad (16)$$

$$M_{swb} = N_{swb} \cos \alpha (h - a_z - x); \quad (17)$$

$$M_{swh} = N_{swh} h \sin \varphi; \quad (18)$$

$$M_c = \int_0^x \sigma_c x dA_c = b \int_0^x \sigma_c x dx = b \int_0^{\varepsilon_c} \sigma_c d\varepsilon. \quad (19)$$

З урахуванням виразу (1) формула (19), за якою визначається згинаючий момент M_c , що сприймає стиснута зона бетону, набуває вигляду:

$$M_c = f_{cd} b x^2 \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k. \quad (20)$$

Сумарний згинаючий момент, що сприймається напруженою нижньою M_{ydp} і верхньою M'_{ydp} та поперечною M_{swb} і M_{swh} арматурою, визначається за формулою:

$$M_{ydp} - M'_{ydp} + M_{swb} - M_{swh} = E_s A_{sp} \frac{\varepsilon_c}{x} (d - x)^2 - E_s A'_{sp} \frac{\varepsilon_c}{x} (x - a'_{spz})^2 + \\ + N_{swb} \cos \alpha (h - a_z - x) - N_{swh} h \sin \varphi. \quad (21)$$

Підставляючи вирази (20) і (21) у (4), отримаємо

$$M_d \sin \alpha + T \cos \alpha = E_s A_{sp} \frac{\varepsilon_c}{x} (d-x)^2 - E_s A'_{sp} \frac{\varepsilon_c}{x} (x - a'_{spz})^2 + N_{swb} \cos \alpha (h - a_z - x) + N_{swh} h \sin \varphi + f_{cd} b x^2 \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k \quad (22)$$

Розв'язуючи це рівняння відносно M_d з урахуванням того, що $\psi = T : M_d$, отримуємо розрахункову формулу для визначення міцності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з подвійною арматурою при згині з крученням

$$M_d = \frac{1}{\sin \alpha + \psi \cos \alpha} \times \left\{ E_s A_{sp} \frac{\varepsilon_c}{x} (d-x)^2 - E_s A'_{sp} \frac{\varepsilon_c}{x} (x - a'_{spz})^2 + N_{swb} \cos \alpha (h - a_z - x) - N_{swh} h \sin \varphi + f_{cd} b x^2 \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k \right\} \quad (23)$$

в якій критична деформація бетону ε_{cl} визначається за запропонованою авторами робіт [9-14] формулою

$$\varepsilon_{cl} = 0,00074 f_{cd}^{0,31}, \quad (24)$$

отриману на підставі виконаних власних експериментально-теоретичних досліджень.

В формулі (23) параметр x визначається методом поступового наближення до досягнення достатньої точності не нижче 5 %.

Після цього за формулою

$$T = \psi M_d \quad (25)$$

визначають величину крутного моменту T , що сприймається просторовим перерізом попередньо напруженого елемента прямокутного профілю з подвійною арматурою при згині з крученням.

Висновок. Отримані рівняння дозволяють виконувати розрахунок міцності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з подвійним армуванням при сумісній дії згинаючого та крутного моментів на основі деформаційної моделі.

SUMMARY

The equations allow you to calculate the strength of spatial cross sections of prestressed concrete elements rectangular profile with double reinforcement at the joint action of bending and twisting moments based deformation model.

1. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР, - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. - 77 с. 2. Кодекс – образец ЕКБ–ФИП для норм по железобетонным конструкциям (русский перевод). –М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1984. –284с. 3. СНБ 5.03.01-02. Конструкции бетонные и железобетонные. Нормы проектирования. – Мн., 2002. – 217с. 4. СП 52-101-03. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. М., 2003. Госстрой России, 125 стр. 5. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні

конструкції. Основні положення проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 98 с. **6.** Роговий С.І. Посібник із розрахунку міцності нормальних перерізів елементів залізобетонних конструкцій на основі деформаційної розрахункової моделі./ С.І. Роговий // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – Вип. 11. – 42 С. **7.** Павліков А.М. Напружено-деформований стан навскісно завантажених залізобетонних елементів у за критичній стадії: автореф. дис. на здобуття наук. ступ. докт. техн. наук за спец. 05.23.01–будівельні конструкції, будівлі та споруди. / А.М. Павліков – Полтава, 2008.– 40с. **8.** Бамбура А.Н. Методические рекомендации по уточненному расчету железобетонных элементов с учетом полной диаграммы сжатия бетона. / А.Н. Бамбура, В.Я. Бачинский, Н.В. Журавлева, И.Н. Пешкова – К.: 1987. – 24 с. **9.** Жорняк М. С., Роговий С. І., Клюка О.М. Розрахунок несучої здатності залізобетонних елементів при згині з крученням на основі деформаційної моделі. / Будівельні конструкції. Збірник наукових праць. – К.: Будівельник, 2007. – Вип. 67. – С. 336 – 343. **10.** Роговий С. І., Клюка О. М. Розрахунок несучої здатності залізобетонних елементів із подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі. / Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. Вип. 5/2007 (46). Частина 1. – Кременчук. – 2007. – С. 8 – 12. **11.** Клюка Е. Н., Жорняк Н. С. 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. **12.** Клюка Е. Н., Жорняк Н. С. 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. **13.** Розрахунок міцності звичайно армованих залізобетонних елементів таврового перерізу з одиночним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі. / Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. Випуск 6/2011 (71). – С. 161 – 164. **14.** Розрахунок міцності просторових перерізів залізобетонних елементів таврового профілю з подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі. / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 23. Збірник наукових праць, Рівне, 2012. – С. 261 – 268. **15.** 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. **16.** До визначення міцності просторових перерізів звичайно армованих елементів прямокутного профілю з одиночною арматурою при згині з крученням на основі деформаційної моделі. / Матеріали Міжнародної конференції «Структурутворення, міцність та руйнування композиційних матеріалів і конструкцій», Одеса, 2012. – С. 148 – 153. **17.** До визначення міцності просторових перерізів звичайно армованих елементів прямокутного профілю з подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі. / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 24. Збірник наукових праць, Рівне, 2012. – С. 153 – 159. **18.** До визначення міцності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночною арматурою при згині з крученням на основі деформаційної моделі. / Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. Спецпроект: аналіз наукових досліджень, К., 2012 р. У семи томах. Том 5. – С. 68 – 73.