

**РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПІДКРАНОВИХ БАЛОК ПРИ КОСОМУ ЗГИНІ**

Канд. техн. наук. О. В. Гарькава, маг. Б. А. Барыляк (ПолтНТУ)

**РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ**

Канд. техн. наук. О. В. Гарькавая, маг. Б. А. Барыляк (ПолтНТУ)

**BEARING CAPACITY CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE CRANE BEAMS UNDER BIAXIAL BENDING**

Cand. of techn. sciences O. V. Harkava, mast. B. A. Barilyak (PoltNTU)

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127166

*Розроблено методику розрахунку несучої здатності в нормальному перерізі косоизгнутих залізобетонних підкранових балок таврового профілю на основі спрощеної деформаційної моделі з прямокутним розподілом напружень у стиснутій зоні бетону. Методика пропонується для розрахунку балок з трапецієподібною формою стиснутої зони бетону, враховує всі положення чинних нормативних документів і, на відміну від існуючих, дозволяє виконувати обчислення без застосування чисельних методів.*

**Ключові слова:** залізобетон, балка, косий згин, несуча здатність, розрахунок.

*Разработана методика расчета несущей способности в нормальном сечении косоизогнутых железобетонных подкрановых балок таврового профиля на основе упрощенной деформационной модели с прямоугольным распределением напряжений в сжатой зоне*

бетона. Методика пропонується для розрахунку балок з трапецієвидною формою стисненої зони бетону, враховує всі положення діючих нормативних документів і, на відміну від існуючих, дозволяє виконувати обчислення без застосування чисельних методів.

**Ключеві слова:** залізобетон, балка, косою вигин, несуча здатність, розрахунок.

*The method of calculating the bearing capacity in the normal section of biaxial bended reinforced concrete T-section crane beams is developed. The problem of difficulty applying the deformation model in the study of biaxial deformed elements is successfully solved by the introduction of the rectangular stress distribution in a concrete compressed area and deformative criterion of strength. Analytical formulas are derived for the determination of all unknown parameters when calculating for biaxial bending: the neutral axis depth, the angle of inclination of the neutral axis, and the internal bending moment. The method is proposed for calculating beams with a trapezoidal shape of the concrete compressed area, taking into account all provisions of the effective normative documents and, unlike the existing ones, allows performing calculations without the use of numerical methods. The developed method of calculating provides the necessary accuracy of the calculations and can be implemented in the form of an engineering algorithm.*

**Key words:** reinforced concrete, beam, biaxial bending, bearing capacity, calculation.

**Вступ.** Залізобетонні підкранові балки широко застосовуються у виробничих будівлях багатьох промислових підприємств, у тому числі на залізниці: у вагонних депо, тепловозоремонтних заводах, збиральних цехах. Таке широке використання цих конструкцій у різних галузях господарства вимагає ретельного підходу до їх проектування. Крім того, з огляду на вичерпані приблизні терміни експлуатації виробничих будівель і споруд, збудованих за часів Радянського Союзу, виникла необхідність розроблення підсилення або заміни їхніх несучих конструкцій, у тому числі й підкранових балок. При цьому відомі серійні рішення підкранових залізобетонних балок вже не відповідають вимогам чинних нормативних документів [1–3], а тому потребують удосконалення. Отже, проектування залізобетонних підкранових балок на сьогодні є актуальним завданням.

Від дії кранових навантажень у вертикальній і горизонтальній площинах підкранові балки зазнають косою вигину. Однак через недостатню вивченість і велику трудомісткість розрахунку на дійсний напружений стан його тривалий час спрощували шляхом виконання

обчислень на плоский вигин окремо у двох взаємно перпендикулярних площинах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробленню методів розрахунку несучої здатності залізобетонних елементів, що зазнають косою вигину, на основі нелінійної деформаційної моделі присвячено роботи [4–8] та ін. Зокрема у працях [7–8] розв'язуються задачі розрахунку косозігнутих елементів таврового профілю на основі використання дволінійних діаграм деформування бетону й арматури, але викладені пропозиції не приведені до рівня інженерного застосування. У роботах зарубіжних вчених [9–12] проблеми розрахунку несучої здатності косозігнутих і косостиснутих елементів вирішуються у загальному вигляді для перерізів довільної конфігурації з отворами та без них, але такий підхід є складним для практичної реалізації, а запропоновані спрощення у вигляді графіків і діаграм є дуже наближеними. Таким чином, існує об'єктивна необхідність у розробленні методики розрахунку підкранових залізобетонних балок таврового профілю на косою вигин, що забезпечить необхідну точність обчислень і може бути реалізована у вигляді інженерного алгоритму.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою є розроблення на основі спрощеної деформаційної моделі методики розрахунку несучої здатності косозігнутих залізобетонних підкранових балок у нормальному перерізі, що враховує повною мірою всі положення чинних нормативних документів та є достатньо зручним у практичному застосуванні.

**Основна частина дослідження.** Розв'язується задача отримання аналітичних формул для визначення всіх невідомих параметрів при розрахунку несучої здатності в нормальному перерізі косозігнутої залізобетонної підкранової балки таврового профілю з трапецієподібною формою стиснутої зони бетону. В основу теоретичних досліджень покладено передумови розрахунку за

нормами [1]. При цьому для описання роботи стиснутого бетону прийнято прямокутний характер розподілу напружень за рис. 3.5 [1]. Зв'язок між напруженнями і деформаціями в попередньо напруженій арматурі описується дволінійною діаграмою з горизонтальною верхньою гілкою без необхідності перевірки граничної деформації за рис. 3.10 [1].

Для розв'язання поставленої задачі використана розрахункова схема (рис. 1), вихідними величинами є розміри нормального перерізу балки  $b$ ,  $b_{eff}$ ,  $h$  та  $h_{eff}$ ; площа поперечного перерізу попередньо напруженої арматури  $A_p$  в розтягнутій зоні; характеристики арматури  $f_{pd}$ ,  $E_p$  та бетону  $f_{cd}$ ,  $E_{cd}$ ,  $\epsilon_{c3,cd}$ ,  $\epsilon_{cu3,cd}$ .

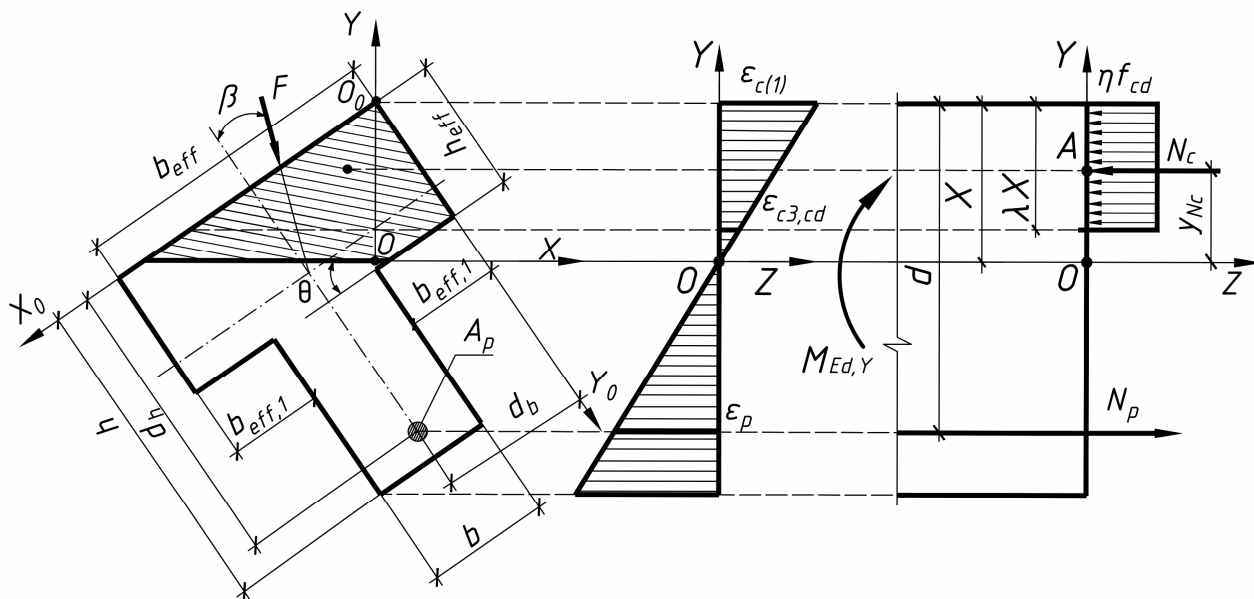


Рис. 1. Розрахункова схема нормального перерізу для розрахунку несучої здатності косозігнутої залізобетонної балки при трапецієподібній формі стиснутої зони бетону

При розрахунку сумарна площа попередньо напруженої арматури  $A_p$  в розтягнутій зоні розглядається розташованою в точці прикладання рівнодійної зусиль у дискретно розташованих розтягнутих стрижнях.

Невідомими величинами вважаються висота  $X$  стиснутої зони, кут  $\theta$  нахилу нейтральної лінії, значення внутрішнього згинального моменту  $M_{Rd,Y}$  в площині координатної осі  $Y$  (рис. 1).

Для виведення розрахункових формул використані загальні рівняння рівноваги. Ураховуючи викладені вище передумови,

розрахункові рівняння рівноваги в площині координатної осі  $Y$  перпендикулярної до нейтральної лінії, записані у вигляді

$$\sum Z = 0: N_p - N_c = 0; \quad (1)$$

$$\sum M_A = 0: N_p (d - X + y_{N_c}) - M_{Ed,Y} = 0, \quad (2)$$

де  $N_p, N_c$  – рівнодійні зусиль відповідно в розтягнутій попередньо напруженій арматурі та стиснутому бетону;

$d, X, y_{N_c}$  – відповідно робоча висота перерізу, висота стиснутої зони бетону та координата точки прикладання зусилля  $N_c$  в координатній площині  $XOY$ .

Для спрощення рівнянь рівноваги спочатку отримані вирази для визначення рівнодійної  $N_c$  та її координати  $y_{N_c}$ . Одержані вирази при трапецієподібній формі стиснутої зони бетону (рис. 1) мають такий вигляд:

$$N_c = \frac{\eta f_{cd} h_{eff}}{2 \sin \theta} (2\lambda X - h_{eff} \cos \theta); \quad (3)$$

$$y_{N_c} = \frac{3X^2(2\lambda - \lambda^2) - h_{eff} \cos \theta(3X - h_{eff} \cos \theta)}{3(2\lambda X - h_{eff} \cos \theta)}, \quad (4)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт, що приймається за залежностями (3.21) – (3.22) [1];

$\lambda$  – рівень пластичності бетону, що приймається за залежностями (3.19), (3.20) [1];

$\theta$  – кут нахилу нейтральної лінії.

За умови, що деформації  $\varepsilon_p$  попередньо напруженої арматури в момент руйнування задовольняють нерівність

$$\frac{f_{pd}}{E_p} \leq \varepsilon_p = \frac{(d - X) \varepsilon_{c(1)}}{X}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon_{c(1)}$  – відносні деформації бетону найбільш стиснутого ребра балки, рівнодійна зусиль в арматурі визначається за залежністю

$$N_p = f_{pd} A_p. \quad (6)$$

На основі прийнятого деформаційного критерію руйнування відносні деформації бетону найбільш стиснутого ребра балки (рис. 1) приймаються за рівністю

$$\varepsilon_{c(1)} = \varepsilon_{cu3,cd}. \quad (7)$$

Після підстановки формул (3), (4) та (6) у рівняння рівноваги (1), (2) при трапецієподібній формі стиснутої зони отримані формули для визначення висоти  $X$  стиснутої зони бетону та граничного значення моменту  $M_{Rd,Y}$  в площині координатної осі  $Y$  (рис. 1):

$$X = \frac{h_{eff} \cos \theta}{2\lambda} + \frac{f_{pd} A_p \sin \theta}{\eta f_{cd} \lambda h_{eff}}; \quad (8)$$

$$M_{Rd,Y} = f_{pd} A_p \left( d - \frac{3X^2 \lambda^2 - h_{eff}^2 \cos^2 \theta}{3(2\lambda X - h_{eff} \cos \theta)} \right), \quad (9)$$

де

$$d = d_b \sin \theta + d_h \cos \theta. \quad (10)$$

Для одержання залежності  $\theta = f(\beta)$ , за допомогою якої можна обчислити кут  $\theta$  нахилу нейтральної лінії, застосована

умова про паралельність площин дії внутрішнього  $M_{Rd}$  та зовнішнього  $M_{Ed}$  моментів (рис. 2).

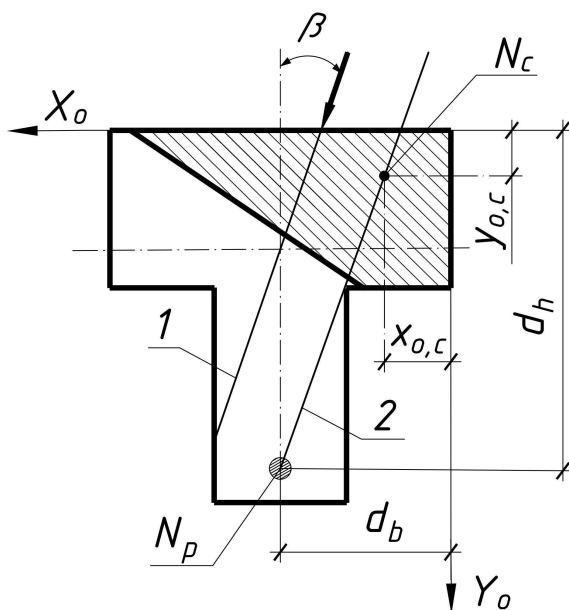


Рис. 2. Розташування зовнішньої (1) і внутрішньої (2) силових площин у тавровому перерізі косозігнутої балки

У системі координат  $X_0O_0Y_0$  отримано, що

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{d_b - x_{0,c}}{d_h - y_{0,c}}, \quad (11)$$

де  $\beta$  – кут нахилу зовнішньої силовій площини;

$d_b, d_h$  – робочі висоти поперечного перерізу косозігнутої залізобетонної балки в напрямку осей  $X_0$  і  $Y_0$  відповідно;

$x_{0,c}, y_{0,c}$  – координати точки прикладання рівнодійної  $N_c$  в бетоні стиснутої зони в системі координат  $X_0O_0Y_0$ ,

$$x_{0,c} = \frac{3\lambda X (\lambda X - 3h_{eff} \cos \theta) + h_{eff}^2 \cos^2 \theta}{3 \sin \theta (2\lambda X - h_{eff} \cos \theta)}, \quad (12)$$

$$y_{0,c} = \frac{h_{eff}}{3} \cdot \frac{3\lambda X - 2h_{eff} \cos \theta}{2\lambda X - h_{eff} \cos \theta}. \quad (13)$$

Після підстановки виразів (12) і (13) у вираз (11) отримаємо квадратне рівняння відносно  $ctg\theta$ , розв'язком якого буде формула, що дозволяє обчислювати кут  $\theta$  нахилу нейтральної лінії для трапецієподібної форми стисної зони бетону при повному вичерпанні міцності бетону на стиск:

$$ctg \theta = -tg \beta \pm \sqrt{tg^2 \beta + \frac{24tC}{h_{eff}^2}}, \quad (14)$$

де

$$t = d_b - \frac{C}{2} - tg \beta \left( d_h - \frac{h_{eff}}{2} \right); \quad C = \frac{f_{pd} A_p}{\eta f_{cd} h_{eff}}.$$

Таким чином, у результаті теоретичних досліджень отримано аналітичні залежності (8), (9), (14) для визначення всіх невідомих параметрів ( $\theta$ ,  $X$ ,  $M_{Rd,y}$ ) при розв'язанні задач міцності косозігнутих балок таврового профілю для трапецієподібної форми стиснутої зони бетону.

**Висновки.** Розроблена методика розрахунку несучої здатності косозігнутих підкранових балок у нормальному перерізі за спрощеною деформаційною моделлю дозволяє виконувати розрахунки з інженерною простотою та повною мірою відповідає вимогам чинних нормативних документів [1–3].

### Список використаних джерел

1. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд [Текст] : ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. – К. : Мінрегіонбуд України, 2012. – 312 с.
2. Конструкції будинків та споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст] : ДБН В.2.6-98:2009 / Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
3. Конструкції будинків та споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст] : ДСТУ Б В.2.6-156:2010 / Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.
4. Павліков, А. М. Нелінійна модель напружено-деформованого стану косозавантажених залізобетонних елементів у закритичній стадії [Текст] : монографія / А. М. Павліков. – Полтава, 2007. – 320 с.
5. Бойко, О. В. Оцінка міцності навскісно зігнутих балок на основі дволінійних діаграм деформування бетону та арматури [Текст] : дис... канд. техн. наук: спец. 05.32.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / О. В. Бойко. – Полтава, 2010. – 232 с.
6. Кочкар'єв, Д. В. Проектування залізобетонних елементів прямокутного профілю за косоного згину на основі методу розрахункових опорів залізобетону [Текст] / Д. В. Кочкар'єв, В. І. Бабич // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки». – Рівне, 2015. – Вип. 3 (71). – С. 171–175.
7. Павліков, А. М. Розмежування форм стиснутої зони бетону в перерізі косозігнутих балок таврового профілю [Текст] / А. М. Павліков, О. В. Бойко, М. О. Харченко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса : ОДАБА, 2012. – Вип. 47, Ч. 1. – С. 255–260.
8. Павліков, А. М. Міцність косозігнутих залізобетонних балок таврового профілю за умови дволінійної роботи бетону та арматури [Текст] / А. М. Павліков, О. В. Бойко,

М. О. Харченко // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. праць. – Полтава : ПолтНТУ, 2011. – Вип. 2 (30). – С.33–37.

9. Rodrigues, R. Vaz. A new technique for ultimate limit state design of arbitrary shape RC sections under biaxial bending [Text] / R. Vaz Rodrigues // Engineering Structures, 2015. – Vol. 104. – P. 1–17.

10. Sfakianakis, M. G. Biaxial bending with axial force of reinforced, composite and repaired concrete sections of arbitrary shape by fiber model and computer graphics [Text] / M. G. Sfakianakis // Advances in Engineering Software. – 2002. – Vol. 33. – Issue 4. – P. 227–242.

11. Bonet, J. L. A fast stress integration algorithm for reinforced concrete sections with axial loads and biaxial bending [Text] / J. L. Bonet, M. L. Romero, P. F. Miguel, M. A. Fernandez // Computers & Structures. – 2004. – Vol. 82. – Issues 2–3. – P. 213–225.

12. Bonet, J. L. Comparative study of analytical and numerical algorithms for designing reinforced concrete sections under biaxial bending [Text] / J. L. Bonet, M.H.F.M. Barros, M. L. Romero // Computers & Structures. – 2006. – Vol. 84. – Issues 31–32. – P. 2184–2193.

---

Гарькава Ольга Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського Національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Тел.: (067) 450-0-370. E-mail: olga-boiko@ukr.net.

Барил'як Богдан Андрійович, магістр, здобувач кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського Національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (095) 928-30-75. E-mail: barylyak\_bogdan@ukr.net.

Гарькава Ольга Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций и сопротивления материалов Полтавского Национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел. : (067) 450-0-370. E-mail: olga-boiko@ukr.net.

Барил'як Богдан Андреевич, магистр, соискатель кафедры железобетонных и каменных конструкций и сопротивления материалов Полтавского Национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел.: (095) 928-30-75. E-mail: barylyak\_bogdan@ukr.net.

Harkava Olha, Cand. of techn. sciences, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures and Strength of Materials of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel.: (067) 450-0-370. E-mail: olga-boiko@ukr.net.

Barylyak Bogdan, Master, Applicant of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures and Strength of Materials of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel.: (095) 928-30-75. E-mail: barylyak\_bogdan@ukr.net.

Статтю прийнято 24.02.2018 р.