

УДК 624.012.45:624.072.2:624.046.2

**ПЕРЕВІРКА МІЦНОСТІ ПОЗАЦЕНТРОВО СТИСНУТИХ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ ДВОЛІНІЙНИХ
ДІАГРАМ СТАНУ БЕТОНУ Й АРМАТУРИ**

**ПРОВЕРКА ПРОЧНОСТИ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВАНИИ
ДВУХЛИНЕЙНЫХ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ БЕТОНА И
АРМАТУРЫ**

**THE STRENGTH CHECK OF ECCENTRICALLY LOADED REINFORCED
ELEMENTS ON THE BASIS OF TWO-LINEAR STRENGTH-STRAIN
DIAGRAMS OF CONCRETE AND REINFORCEMENT**

Павліков А.М., д.т.н., проф., Гарькава О.В., к.т.н., ст. викладач
(Полтавський національний технічний університет імені
Юрія Кондратюка, м. Полтава)

Павликов А.Н., д.т.н., проф., Гарькавая О.В., к.т.н., ст. преподаватель
(Полтавский национальный технический университет имени Юрия
Кондратюка, г. Полтава)

**Pavlikov A.M., doctor of technical sciences, professor, Garkava O.V.,
candidate of technical sciences, senior lecturer** (Poltava National Technical
University named after Yuriy Kondratiuk, Poltava)

**Наведені пропозиції щодо виконання інженерних розрахунків міцності
позацентрово стиснутих залізобетонних елементів з симетричним
армуванням на основі деформаційної моделі з використанням
дволінійних діаграм деформування матеріалів.**

**Изложены предложения по выполнению инженерных расчетов
прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов с
симметричным армированием на основе деформационной модели с
использованием двухлинейных диаграмм деформирования материалов.**

**The proposals for engineering strength calculations of eccentrically loaded
reinforced elements are offered on the basis of deformation model. The two-
linear strength-strain diagrams of concrete and reinforcement are used.**

Ключові слова:

Залізобетон, стиск, міцність, розрахунок.

Железобетон, сжатие, прочность, расчет.
Reinforced concrete, compression, strength, calculation.

Постановка проблеми. Розрахунок міцності позacentрово стиснутих залізобетонних елементів на основі нелінійної деформаційної моделі за нормами [1, 2] з використанням дволінійних діаграм стану бетону й арматури виконати без спеціальних комп'ютерних програм досить складно. Крім того, практична реалізація нормативного методу розрахунку утруднюється ще й тим, що для позacentрово стиснутих елементів не наведено залежностей для однозначного визначення форми рівноваги перерізу. Між тим, як показує практика, такі залежності можна отримати, тим самим надавши зручності використанню нормативної методики при виконанні інженерних розрахунків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми. Пропозиції щодо напрямів подолання зазначених недоліків методики [1, 2] розрахунку міцності позacentрово стиснутих залізобетонних елементів викладені у роботах [3 – 6]. Для елементів, що зазнають згинання, задача розробки інженерного методу перевірки міцності на основі нелінійної деформаційної моделі розв'язана в роботах [7 – 9]. Отже, розробка інженерної методики перевірки міцності позacentрово стиснутих залізобетонних елементів на основі положень діючої нормативної бази є актуальною задачею.

Мета і задачі досліджень. Отримати аналітичні залежності для виконання інженерних розрахунків міцності позacentрово стиснутих залізобетонних елементів на основі нелінійної деформаційної моделі з використанням дволінійних діаграм деформування бетону й арматури.

Виклад основного матеріалу. Для розв'язання поставленої задачі розглядається гранична рівновага позacentрово стиснутого залізобетонного елемента прямокутного профілю з симетричним армуванням, зосередженим біля граней елемента (рис. 1).

Перевірка міцності такого елемента виконується на основі передумов, прийнятих у діючих нормах [1, 2]. Виведення розрахункових формул здійснюється на основі дволінійних діаграм деформування бетону та арматури.

На основі розрахункової схеми (рис. 1) загальні рівняння рівноваги записані таким чином:

$$\sum X = 0; \quad N - N_c - N'_s + N_s = 0; \quad (1)$$

$$\sum M_{O_1} = 0; \quad N_c (d - x + y_{Nc}) + N'_s (d - a') - Ne = 0, \quad (2)$$

в котрих N – зовнішня поздовжня сила; N_c, N'_s, N_s – рівнодійні напружень відповідно в бетоні, стиснутій та розтягнутій арматурі; d, x, y_{Nc} – відповідно робоча висота, висота стиснутої зони поперечного перерізу, відстань від нейтральної лінії до точки прикладання зусилля N_c ; a' – відстань від

стиснутої грані перерізу до центра ваги стиснутої арматури; $e = e_0 + h/2 - a$ – ексцентриситет сили N відносно точки прикладання рівнодійної N_s .

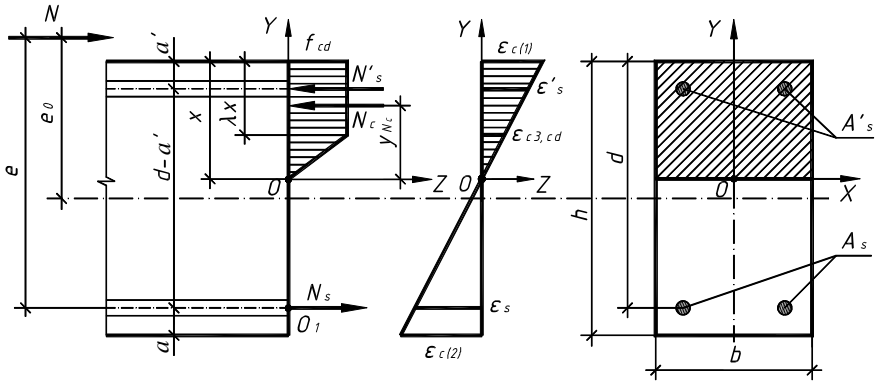


Рис. 1. Розрахункова схема напружень і деформацій у нормальному перерізі позакентровано стиснутого елемента при $x \leq h$

Вирази для визначення рівнодійної N_c напружень у бетоні стиснутої зони та координати y_{N_c} точки її прикладання при дволінійній епюрі напружень в бетоні стиснутої зони для прямокутного перерізу були отримані в роботі [9]:

$$N_c = f_{cd} b x \omega; \quad (3)$$

$$y_{N_c} = x \frac{\varphi}{\omega}, \quad (4)$$

де ω , φ – відповідно коефіцієнти повноти епюри напружень у стиснутому бетоні та статичного моменту цієї епюри, що визначаються за формулами:

$$\omega = \frac{1 + \lambda}{2}, \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{2 + 2\lambda - \lambda^2}{6}, \quad (6)$$

λ – коефіцієнт пластичності бетону

$$\lambda = 1 - \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{c3,cd}}. \quad (7)$$

В (1) та (2) рівнодійні напружень в стиснутій та розтягнутій арматурі

$$N'_s = \sigma'_s A'_s, \quad (8)$$

$$N_s = \sigma_s A_s. \quad (9)$$

Перевірка міцності позацентрово стиснутого елемента проводиться залежно від висоти x стиснутої зони бетону. Якщо $\sigma'_s = f_{yd}$ та $\sigma_s = f_{yd}$ за умови симетричного армування висота стиснутої зони бетону визначатиметься з (1) за такою залежністю:

$$x = \frac{N}{f_{cd} b \omega}. \quad (10)$$

Якщо $x \leq \bar{\xi}_R d$, то міцність елемента в нормальному перерізі слід перевіряти за отриманою з (2) умовою

$$N e \leq f_{cd} b x \omega (d - \chi x \omega) + f_{yd} A'_s (d - a'), \quad (11)$$

в якій

$$\chi = \frac{\omega - \varphi}{\omega^2}. \quad (12)$$

Використовуючи гіпотезу плоских перерізів, отримано, що гранична відносна висота стиснутої зони бетону

$$\bar{\xi}_R = \frac{1}{1 + \frac{f_{yd}}{\varepsilon_{cu3,cd} E_s}}. \quad (13)$$

Оскільки критерієм вичерпання міцності залізобетонного елемента згідно з [1] є досягнення в найбільш стиснутій фібрі бетону граничних значень відносних деформацій стиску, тому при розрахунку приймаємо, що

$$\varepsilon_{c(1)} = \varepsilon_{cu3,cd}. \quad (14)$$

Таким чином параметри λ , ω , φ , χ залежать тільки від значень $\varepsilon_{cu3,cd}$ відносних граничних деформацій стиску бетону, котрі згідно з [1] нормуються для кожного класу бетону. На основі даних ([1], табл. 3.1) за формулами (5) – (7) та (12) значення параметрів λ , ω , φ , χ протабульовані залежно від класу бетону (табл. 1).

Якщо $x > \bar{\xi}_R d$, тобто $\sigma_s = E_s \varepsilon_s < f_{yd}$, то при використанні (11) значення x необхідно визначати з рівняння (1), перетвореного до вигляду:

$$N - f_{cd} b x \omega - f_{yd} A'_s + E_s \varepsilon_s A_s = 0, \quad (15)$$

де згідно з гіпотезою плоских перерізів

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{c(1)} (d - x)}{x}. \quad (16)$$

Таблиця 1

Значення параметрів λ , ω , φ , χ залежно від класу бетону

Клас бетону	λ	ω	φ	χ
C8/10	0,858	0,929	0,497	0,501
C12/15	0,844	0,922	0,496	0,501
C16/20	0,820	0,910	0,495	0,502
C20/25	0,797	0,898	0,493	0,502
C25/30	0,773	0,887	0,491	0,503
C30/35	0,743	0,871	0,489	0,504
C32/40	0,708	0,854	0,486	0,505
C35/45	0,661	0,831	0,481	0,507
C40/50	0,628	0,814	0,477	0,509
C45/55	0,584	0,792	0,471	0,511
C50/60	0,529	0,765	0,463	0,516

Після розв'язання рівняння (15) з урахуванням (16) отримано, що висота $x = \bar{\xi}d$, де

$$\bar{\xi} = \frac{\bar{\alpha}_n - \bar{\alpha}'_s - \bar{\alpha}_s}{2} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\alpha}_n - \bar{\alpha}'_s - \bar{\alpha}_s}{2}\right)^2 + \bar{\alpha}_s}, \quad (17)$$

$$\bar{\alpha}_n = \frac{N}{f_{cd}bd\omega}; \quad \bar{\alpha}'_s = \frac{f_{yd}A_s}{f_{cd}bd\omega}; \quad \bar{\alpha}_s = \frac{E_s \varepsilon_{cu3,cd} A_s}{f_{cd}bd\omega}.$$

Таким чином, міцність елемента при $x > \bar{\xi}_R d$ слід перевіряти за умовою (11), використовуючи значення x , обчислене із застосуванням (17). При цьому повинна задовольнятися умова $x \leq h$.

Якщо $x > h$, тобто весь переріз елемента буде стиснутим, у такому випадку розрахункова схема нормального перерізу позакентровано стиснутого елемента матиме вигляд, зображений на рис. 2.

На основі розрахункової схеми (рис. 2) рівняння рівноваги записані таким чином:

$$\sum X = 0; \quad N - N_c - N'_s - N_s = 0; \quad (18)$$

$$\sum M_{O_1} = 0; \quad N_c(d - x + y_{Nc}) + N'_s(d - a') - Ne = 0, \quad (19)$$

в котрих складові відповідають позначенням у рівняннях (1) та (2), окрім N_s – рівнодійної напружень в менш стиснутій арматурі.

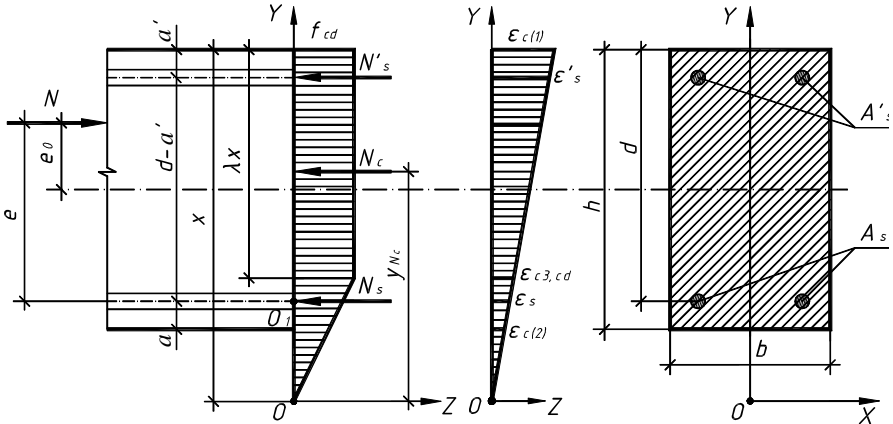


Рис. 2. Розрахункова схема напружень і деформацій у нормальному перерізі позациентрово стиснутого елемента при $x > h$

Рівнодійна N_c та її координата y_{N_c} при повністю стиснутому перерізі позациентрово стиснутого елемента визначаються за наступними залежностями:

$$N_c = f_{cd} b \left(\frac{h(2x-h) - \lambda^2 x^2}{2x(1-\lambda)} \right); \quad (20)$$

$$y_{N_c} = \frac{2h^3 + 6hx(x-h) - x^3 \lambda^2 (3-\lambda)}{3h(2x-h) - 3\lambda^2 x^2}. \quad (21)$$

В (18) та (19) рівнодійна напружень в стиснутій арматурі визначається за (8). Рівнодійна напружень в менш стиснутій арматурі на основі дволінійної діаграми деформування визначається за такою залежністю:

$$N_s = E_s \varepsilon_s A_s, \quad (22)$$

де згідно з гіпотезою плоских перерізів

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{c(1)}(x-d)}{x}. \quad (23)$$

Після розв'язання рівняння (18) з урахуванням (20) та (22) отримано, що для повністю стиснутого перерізу висота $x = \bar{\xi} d$, де

$$\bar{\xi} = \frac{\bar{\alpha}_n - \bar{\alpha}'_s + \bar{\alpha}_s + 2k}{2} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\alpha}_n - \bar{\alpha}'_s + \bar{\alpha}_s + 2k}{2} \right)^2 - \bar{\alpha}_s - k^2 \lambda^2}, \quad (24)$$

$$\bar{\alpha}_n = \frac{N}{f_{cd} b d \psi}; \quad \bar{\alpha}'_s = \frac{f_{yd} A_s}{f_{cd} b d \psi}; \quad \bar{\alpha}_s = \frac{E_s \varepsilon_{cu3,cd} A_s}{f_{cd} b d \psi};$$

$$\psi = \frac{\lambda^2}{2(\lambda - 1)}; k = \frac{h}{d\lambda^2}.$$

Міцність елемента при $x > h$ слід перевіряти за отриманою з (19) з урахуванням (20) та (21) умовою

$$Ne \leq f_{cd} b \left(d - \frac{h^2(2h - 3x) + \lambda^3 x^3}{3h(h - 2x) + 3\lambda^2 x^2} \right) + f_{yd} A'_s (d - a'), \quad (25)$$

користуючись значенням x , обчисленим із застосуванням (24).

Таким чином, отримані залежності (11) та (25) дозволяють виконувати перевірку міцності позацентрово стиснутих елементів при різних формах рівноваги перерізу (рис. 1 – 2). При цьому визначення форми рівноваги здійснюється шляхом порівняння висоти x стиснутої зони з висотою h перерізу елемента.

Висновок. Запропоновану методику розрахунку міцності позацентрово стиснутих залізобетонних елементів, розроблену з урахуванням нелінійних властивостей бетону та відповідно до вимог сучасної нормативної бази [1, 2], можна використовувати в інженерних розрахунках.

1. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення : ДБН В.2.6-98:2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 97 с. **2.** Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування : ДСТУ Б В.2.6-156:2010. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с. **3.** Щелкунов В.Г. Розрахунок міцності позацентрово стиснутих залізобетонних елементів і пошук варіантів мінімальної вартості: навч. посібник / В.Г. Щелкунов. – К.: НОК ВО, 1992. – 87 с. **4.** Байков В.Н. Определение предельного состояния внецентренно сжатых элементов по неупругим зависимостям напряжения – деформации бетона и арматуры/ В.Н. Байков, С.В. Горбатов // Бетон и железобетон. – 1985. – №6. – С. 13 – 14. **5.** Павліков А.М. Нелінійна модель напружено-деформованого стану косозавантажених залізобетонних елементів у закритичній стадії : монографія / А.М. Павліков. – Полтава, 2007. – 320 с. **6.** Павліков А.М. Застосування нелінійної деформаційної моделі в розрахунках міцності позацентрово стиснутих залізобетонних елементів при плоскому та косому деформуванні / А.М. Павліков, О.В. Бойко, Д.Ф. Федоров // Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2011. – Вип. 22. – С. 444 – 451. **7.** Павліков А.М. Розрахунок міцності нормальних перерізів балкових елементів за нелінійною деформаційною моделлю (на основі ДБН В.2.6-98:2009) : навчальний посібник / А.М. Павліков, О.В. Бойко. За ред. А.М. Павлікова. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – 85 с. **8.** Кочкар'єв Д.В. Практичний розрахунок згинальних залізобетонних елементів за міцністю на основі нелінійного деформування матеріалів / Д.В. Кочкар'єв, В.І. Бабич // Бетон и железобетон в Украине. – 2011. – №5. – С. 22 – 26. **9.** Павліков А.М. Розв'язання задач міцності залізобетонних елементів у нормальному перерізі на основі дволінійних діаграм стану бетону та арматури / А.М. Павліков, О.В. Бойко // Галузеве машинобудування, будівництво: зб. наук. праць. – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – Вип. 2(27). – С. 18 – 22.