

ДО РОЗРАХУНКУ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

CALCULATION OF SLOPING CROSS-SECTIONS OF BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Ужегова О.А., к.т.н., доцент, Ротко С.В., к.т.н., доцент, Задорожнікова І.В., к.т.н., доцент, Ужегов С.О., асистент, (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)

Uzhegova O.A., candidate of technical sciences, associate professor, Rotko S.V., candidate of technical sciences, associate professor, Zadorozhnikova I.V., candidate of technical sciences, associate professor, Uzhegov S.O., assistant, (Lutsk National Technical University, Lutsk)

У статті наведені деякі положення щодо проектування похилих перерізів залізобетонних елементів на основі деформаційної моделі, відповідно до чинних будівельних норм України, гармонізованих до Eurocode-2.

Calculation of sloping cross-sections of bending elements performed on the basis of general deformation model in accordance with applicable building codes of Ukraine harmonized to Eurocode-2. It perform in order to determine the need to install the transverse reinforcement or to determine the collar's step and diameter. Resistance of sloping cross-section of reinforced concrete element with joint action of bending moment and transverse force is determined from equilibrium conditions, joint deformations and diagrams of concrete deformation considering plane and stressed state.

In this article presented the complex algorithm for calculating sloping cross-sections and an example of beam calculation and design using transverse reinforcement.

Ключові слова: залізобетон, деформаційна модель, похилі перерізи, міцність, робоча арматура.

Keywords: reinforced concrete, deformation model, sloping cross-sections, strength, working reinforcement.

Розрахунок похилих перерізів згинальних елементів здійснюють на основі загальної деформаційної моделі з метою визначення необхідності встановлення поперечної арматури або для визначення кроку та діаметра хомутив.

Опір похилого перерізу залізобетонного елемента спільній дії згинального моменту та поперечної сили визначають з умов рівноваги, спільних деформацій та діаграми деформування бетону з урахуванням плоского напруженого стану. Критерієм вичерпання несучої здатності похилого перерізу є досягнення деформаціями стиснутого бетону над похилою тріщиною в напрямку головних стискуючих напружень граничних значень.

Опір похилого перерізу з поперечним армуванням V_{Rd} визначається із застосуванням таких величин [1, п. 6.2]:

$V_{Rd,c}$ – розрахункове значення поперечної сили, яку може сприйняти похилий переріз без армування (бетон) – розрахунковий опір бетону зсуву;

$V_{Rd,s}$ – розрахункове значення поперечної сили, яку може сприйняти поперечна арматура на межі текучості;

$V_{Rd,max}$ – розрахункове значення поперечної сили, яку може сприйняти похилий переріз, обмежене руйнуванням умовної стиснутої смуги;

V_{Ed} – розрахункове значення поперечної сили у певному перерізі (рис.1) від дії зовнішнього навантаження і попереднього напруження, якщо таке є.

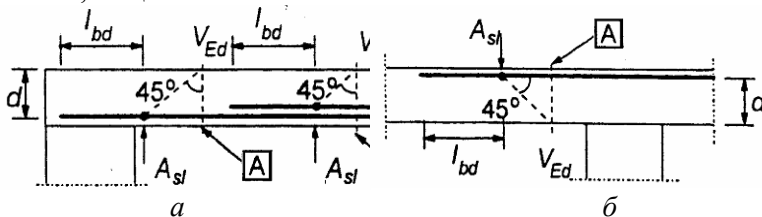


Рис. 1. До розрахунку похилих перерізів: *a* – за умови вільного опирання; *б* – для проміжних опор нерозрізних балок

Для елементів з похилими поясами додатково вводять величини:

V_{ccd} – розрахункове значення компонента зсуву зусилля стиску за наявності похилих стиснутих поясів;

V_{td} – розрахункове значення компонента зсуву зусилля у розтягнутій арматурі за наявності похилих розтягнутих поясів.

Якщо виконується умова $V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$, то це означає, що лише бетонний переріз цілком сприймає внутрішні поперечні зусилля і абсолютно нема потреби ставити поперечну арматуру за розрахунком. У цьому випадку повинна бути встановлена мінімальна кількість поперечної арматури за мінімальним відсотком поперечного армування [1, п. 6.2]:

$$\rho_{w,min} = \frac{0,08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}.$$

Розрахункову величину опору зсуву бетону ребра перерізу $V_{Rd,c}$ визначають за умовою [2, п. 4.6.2]:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_I \sigma_{cp}] b_w d \geq (V_{min} + k_I \sigma_{cp}) b_w d,$$

Н,

де $C_{Rd,c}$ – рекомендується приймати рівним $0,18 / \gamma_c$;

f_{ck} – характеристичне значення міцності бетону на стиск, МПа;

k – емпіричний коефіцієнт, $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0$, тут d в мм;

ρ_l – коефіцієнт армування перерізу поздовжньою розтягнутою арматурою A_{sl} у перерізі, де визначають силу V_{Ed} , (рис. 1);

$$\rho_l = A_{sl} / (b_w d) \leq 0,02;$$

A_{sl} – площа розтягнутої поздовжньої арматури, яка подовжується на відстань не меншу від $(l_{bd} + d)$ за переріз, що розглядається (рис. 1);

b_w – найменша ширина поперечного перерізу у розтягнутій зоні;

σ_{cp} – середнє напруження від обтиску перерізу поздовжньою силою N від зовнішніх навантажень або силою натягу P попередньо напруженої арматури, МПа,

$$\sigma_{\bar{n}\bar{\delta}} = N_{Ed} / A_c < 0,2 f_{cd};$$

N_{Ed} – осьова сила у поперечному перерізі, викликана навантаженням або попереднім напруженням, Н ($N_{Ed} > 0$ при стиску). Впливом прикладених деформацій на N_{Ed} можна знехтувати;

A_c – площа поперечного перерізу бетону, мм²;

k_I – коефіцієнт, $k_I = 0,15$; $V_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$.

Якщо згинальний елемент без попередньо напруженої арматури і поздовжня сила N відсутня, то наведена формула дещо спрощується, тому поперечна сила, яку сприймає переріз

залізобетонного елемента без поперечної арматури визначається з умови:

$$V_{Rd,c} = 0,12k(100\rho_l f_{ck})^{1/3} b_w d \geq V_{min}, N.$$

Якщо умова $V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$ не виконується, то це означає, що в похилих перерізах утворюватимуться тріщини. Щоб цього уникнути, розтягуючі зусилля має сприймати поперечна арматура вертикальна або похила (відігнуті стержні). При великих значеннях V_{Ed} доводиться одночасно встановлювати і вертикальні і похилі стержні. Смуга бетону між сусідніми похилими тріщинами працює на стиск. Кут нахилу стиснутих смуг ϵ в межах $21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ (за таких умов $0,4 \leq \tan\theta \leq 1$; $2,5 \geq \cot\theta \geq 1$).

Для розрахунку елементів із поперечною арматурою разом із загальною деформаційною моделлю норми [1, 2] рекомендують використовувати "фермову" модель (рис. 2). Це пояснюється тим, що у згинальному елементі існують горизонтальні стиснуті (вгорі) та розтягнуті (внизу) смуги, стиснуті похилі смуги (кісці) між похилими тріщинами (розтягнутими ділянками). Зусилля в елементах "фермової" моделі визначають за правилами будівельної механіки.

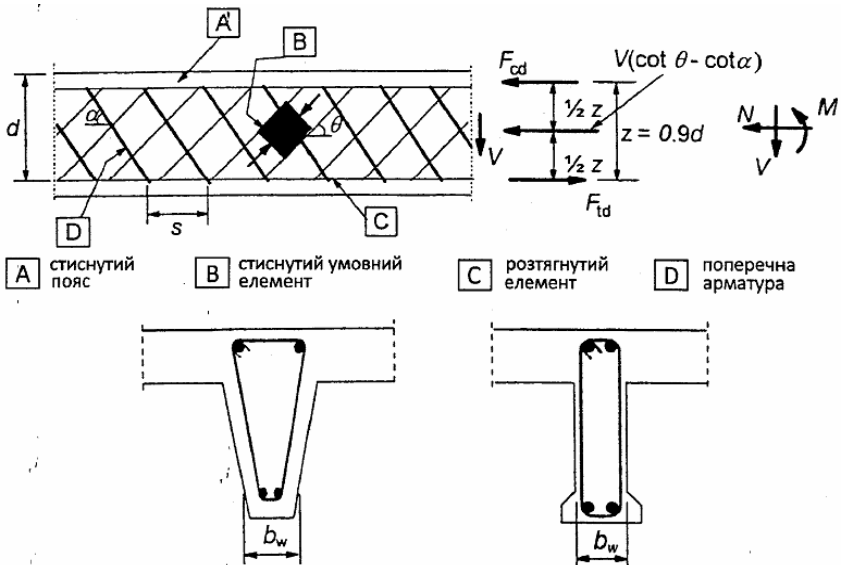


Рис. 2. Застосування "фермової" моделі до розрахунку похилих перерізів

На рис. 2 позначено α – кут між поперечною арматурою і віссю балки, перпендикулярної до поперечної сили;

θ – кут між стиснутим бетонним умовним елементом і віссю балки, перпендикулярної до поперечної сили (кут нахилу стиснутої смуги); граничні величини $\cot \theta$ обмежують $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$;

F_{td} – розрахункова величина зусилля розтягу у поздовжній арматурі;

F_{cd} – розрахункова величина зусилля стиску бетону в напрямку поздовжньої осі елемента;

b_w – мінімальна ширина між розтягнутим і стиснутим поясами;

z – плече внутрішньої пари сил для елемента з постійною висотою перерізу, яка відповідає згинальному моменту в елементі. При розрахунку на зсув залізобетонних елементів за відсутності осьової сили приймають $z = 0,9d$.

Для елементів з вертикальною поперечною арматурою опір зсуву перерізу визначають за формулами [2, п. 4.6.3], причому, приймають менше з отриманих значень:

$$V_{Rd,w} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta ; \quad V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} ,$$

де A_{sw} – площа поперечного перерізу поперечної арматури;

s – крок поперечних стержнів;

f_{ywd} – розрахунковий опір текучості поперечної арматури;

v_1 – коефіцієнт зменшення міцності бетону з тріщинами при зсуві, який визначають за виразом: $v_1 = 0,6 (1 - f_{ck} / 250)$, f_{ck} в МПа;

α_{cw} – коефіцієнт, що враховує рівень напружень у стиснутому поясі.

Якщо розрахункові напруження у поперечній арматурі становлять менше 80% від характеристичних напружень текучості f_{yk} , то v_1 можна приймати: $v_1 = 0,6$ для бетону з $f_{ck} \leq 60$ МПа.

Рекомендована величина α_{cw} є наступною:

$$\alpha_{cw} = 1 + \sigma_{cp} / f_{cd} \quad \text{при } 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25f_{cd};$$

$$\alpha_{cw} = 1,25 \quad \text{при } 0,25f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5f_{cd};$$

$$\alpha_{cw} = 2,5(1 - \sigma_{cp} / f_{cd}) \quad \text{при } 0,5f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 1,0f_{cd},$$

де σ_{cp} – середнє напруження стиску, прийняте зі знаком " + " у бетоні, викликане осьовою силою.

Якщо $V_{Rd,max} \geq V_{Ed}$, то площу вертикальної поперечної арматури можна обчислити за формулою $A_{sw} = \frac{V_{Ed} \cdot s}{0,8 f_{ywk} z \cdot \cot \theta}$.

Максимальну приведену площу перерізу поперечної арматури $A_{sw,max}$ при $\cot \theta = 1$ визначають за умовою:

$$\frac{A_{sw,max} f_{ywd}}{b_w s} \leq \frac{1}{2} \alpha_{cw} \nu_1 f_{cd}.$$

Мінімальне значення площі поперечного перерізу поперечної арматури

$$A_{sw,min} = \frac{0,08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} s_w b_w.$$

Максимальне значення площі поперечного перерізу поперечної арматури

$$A_{sw,max} \leq \frac{0,5 \alpha_{cw} \nu_1 f_{cd} b_w s}{f_{yd}}.$$

Рекомендовані кроки поперечної вертикальної арматури – 100, 125, 150, 200, 250 мм. Максимальний крок поперечної вертикальної арматури $s_{w,max} = 0,75 d$, мм.

Розглянемо приклад розрахунку на основі викладеної теорії.

Підібрати поперечне армування (діаметр та крок поперечної вертикальної арматури) зі стержнів класу А400С ($f_{ywd} = 285$ МПа; $f_{ywk} = 310$ МПа); у нерозрізній балці таврового профілю $b_w \times h = 300 \times 500$ мм у перерізах в межах проміжної опори. Балка виготовлена з бетону класу С20/25, $f_{cd} = 14,5$ МПа; $f_{ck} = f_{ck,prism} = 18,5$ МПа; армована поздовжньою ненапруженою арматурою 4Ø25А400С ($f_{yd} = 365$ МПа) в нижній частині перерізу у прольотах, а у верхній частині балки на опорі арматура 2Ø22А400С + 2Ø25А400С (рис. 3). Максимальна поперечна сила у розрахунковому перерізі $V_{Ed} = 250$ кН. З урахуванням захисного шару бетону: $a = 25 + 25/2 = 38$ мм. Площа робочої поздовжньої арматури опорної ділянки 2Ø22А400С + 2Ø25А400С за сортаментом становитиме

$$A_s = 759,9 + 981,3 = 1741,2 \text{ мм}^2; \sigma_{cp} = 0; \alpha_{cw} = 1.$$

1.	$d = h - a = 500 - 38 = 462 \text{ мм}$
2.	$\rho_l = A_{sl} / b_w d = 1741,2 / (300 \times 462) = 0,0126$
3.	$\rho_l = 0,0126 < 0,02$, умова виконується
4.	$\sigma_{cp} = 0$
5.	$k_I = 0,15$
6.	$k = 1 + \sqrt{200/d} = 1 + \sqrt{200/462} = 1,66$
7.	$k = 1,66 < 2,0$, умова виконується
8.	$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_I \sigma_{cp}] b_w d =$ $= 0,1385 k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} b_w d =$ $= 0,1385 \cdot 1,66 \cdot (100 \cdot 0,0126 \cdot 18,5)^{1/3} \cdot 300 \cdot 462 =$ $= 91026,6 \text{ Н} = 91,03 \text{ кН}.$
9.	$V_{Ed} = 250 \text{ кН} \geq V_{Rd,c} = 91,03 \text{ кН}$, умова виконується. Отже, потрібен розрахунок поперечної арматури.
10.	$v = 0,6 (1 - f_{ck} / 250) = 0,6 (1 - 18,5 / 250) = 0,556 < 0,6$
11.	Задаються найменшим кутом нахилу стиснутих смуг $\theta = 21,8^\circ$. Тоді $\tan \theta = 0,4$, а $\cot \theta = 2,5$ і $\cot^2 \theta = 6,25$
12.	$z = 0,9d = 0,9 \cdot 462 = 415,8 \text{ мм}$
13.	$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} =$ $= \frac{1 \cdot 300 \cdot 415,8 \cdot 0,556 \cdot 14,5}{2,5 + 0,4} = 346777 \text{ Н} = 346,8 \text{ кН}$
14.	Умова $V_{Rd,max} \geq V_{Ed}$ виконується, бо $346,8 \text{ кН} > 250 \text{ кН}$.
15.	Призначаємо крок поперечної арматури з конструктивних міркувань: $s \leq 0,5h$; $s \leq 150 \text{ мм}$; $s \leq s_{w,max} = 0,75 d$ мм. Отже, $s = 150 \text{ мм}$
16.	$A_{sw} = \frac{V_{Ed} \cdot s}{0,8 f_{yw} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{250 \cdot 10^3 \cdot 150}{0,8 \cdot 310 \cdot 415,8 \cdot 2,5} = 145,5 \text{ мм}^2$

17.	$A_{sw,min} = \frac{0,08\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} s_w b_w = \frac{0,08\sqrt{18,5}}{400} 150 \cdot 300 = 38,7 \text{ мм}^2$
18.	$A_{sw,max} = \frac{0,5\alpha_{cw} \cdot \nu \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot s}{f_{yd}} =$ $= \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 0,556 \cdot 14,5 \cdot 300 \cdot 150}{365} = 497 \text{ мм}^2$
19.	$A_{sw,min} \leq A_{sw} \leq A_{sw,max}$, умова виконується, бо $38,7 \text{ мм}^2 < 145,5 \text{ мм}^2 < 497 \text{ мм}^2$
20.	Підбір поперечної арматури за $A_{sw} = 145,5 \text{ мм}^2$ 4Ø8A400C $A_{sw,факт} = 201 \text{ мм}^2$. Конструювання перерізу виконане на рис. 3.

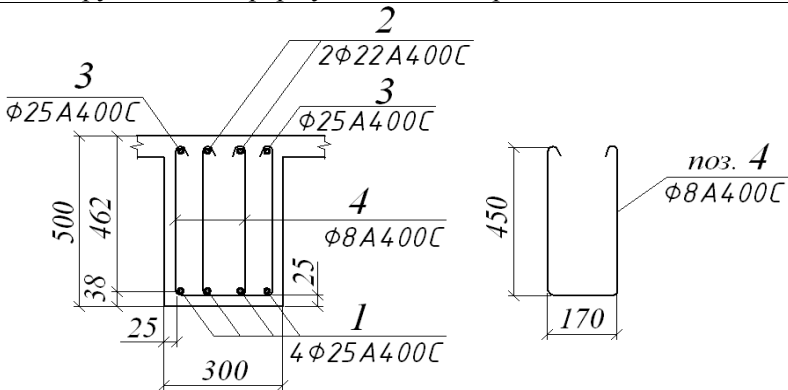


Рис. 3. Арматування перерізу балки поперечною вертикальною арматурою: 1, 2, 3 – поздовжня арматура; 4 – поперечна арматура

5. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення / Мінрегіонбуд України: ДБН В.2.6-98:2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.

6. ДСТУ Б В.2.6.-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування / Мінрегіонбуд України. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с.

7. Eurocode-2: Design of concrete structures. – Part 1-1: General rules and rules for building: EN 1992-1-1. – [Final draft, december, 2004]. – Brussels: CEN, – 2004. – 225 p. – Європейський стандарт.

8. Мурашко Л.А., Колякова В.М., Сморгалов Д.В. Розрахунок за міцністю перерізів, нормальних та похилих до поздовжньої осі, згинальних залізобетонних елементів за ДБН В.2.6-98:2009. – К.: КНУБА, 2012. – 62 с.