



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Кафедра промислового, цивільного будівництва
та інженерних споруд

03-01- 26

Методичні вказівки

до виконання індивідуального завдання
з навчальної дисципліни «Будівельні конструкції»
для здобувачів вищої освіти першого
(бакалаврського) рівня за спеціальністю
192 «Будівництво та цивільна інженерія»
всіх форм навчання

Розрахунок елементів на розтяг, стиск, згин

Рекомендовано науково-
методичною комісією за
спеціальністю 192 «Будівництво та
цивільна інженерія»
Протокол № 7 від 31 травня 2018 р.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рівне–2018

Методичні вказівки до виконання індивідуального завдання з навчальної дисципліни «Будівельні конструкції» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» всіх форм навчання. Розрахунок елементів на розтяг, стиск, згин./Романюк В.В. – Рівне: НУВГП, 2018.– 37 с.

Укладач В.В. Романюк, кандидат технічних наук, професор кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд.

Відповідальний за випуск: Є.М. Бабич, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

© Романюк В.В., 2018

© Національний університет
водного господарства та
природокористування, 2018



Зміст

Вступ	4
1. Приклади розрахунку центрально-розтягнутих і центрально-стиснутих елементів	5
Приклад 1	5
Приклад 2	12
Приклад 3	18
Приклад 4	23
2. Приклади розрахунку згинальних елементів	25
Приклад 1	25
Приклад 2	28
Приклад 3	31
Приклад 4	34
Література	37





Вступ

В індивідуальному завданні з дисципліни «Будівельні конструкції» (розділ «Металеві конструкції») студенти виконують чотири задачі на такі теми:

- 1) розрахунок центрально-розтягнутих і центрально-стиснутих елементів (задача №1);
- 2) розрахунок згинальних елементів (задача №2);
- 3) розрахунок зварних з'єднань (задача №3);
- 4) розрахунок болтових з'єднань (задача №4).

Дані методичні вказівки регламентують виконання задач №1 і №2.

Індивідуальне завдання виконується на аркушах формату А4 через 1,5 інтервали і містить усі необхідні розрахунки, схеми та рисунки до кожної із задач. Скановані рисунки та формули не допускаються.

Пропонується використовувати текстовий редактор “Word”, редактор формул “Microsoft Equation”, шрифт “Times New Roman” 14 пт.

Завдання для виконання розрахунково-графічної роботи студенти денної і заочної форм навчання отримують на кафедрі промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд.

Виконана студентом розрахунково-графічна робота представляється до захисту і оцінюється у сумі від 12 до 20 балів, тобто від 3 до 5 балів за кожну із задач, включаючи її виконання і захист.

В методичних вказівках наведено приклади розв'язання задач з усіма необхідними поясненнями та посиланнями на нормативну та довідково – інструктивну літературу.



1. Приклади розрахунку центрально-розтягнутих і центрально-стиснутих елементів

Приклад 1

Підібрати перерізи елементів стержневої конструкції, зображеної на рис. 1, за такими вихідними даними:

1) характеристичне значення зосередженої сили $F_0 = 1500$ кН, коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_{f_m} = 1,1$.

2) геометричні параметри системи: $l = 3,5$ м, $h_1 = 1$ м, $h_2 = 6$ м;

3) форма перерізу елементів: AB – за рис. 2, $t = 10$ мм; BC – за рис. 3, $t = 8$ мм;

4) матеріал елементів: елемент AB зі сталі класу С255, елемент BC зі сталі класу С235.

5) клас відповідальності будівлі – СС1; категорія відповідальності конструкції А; усталена розрахункова ситуація.

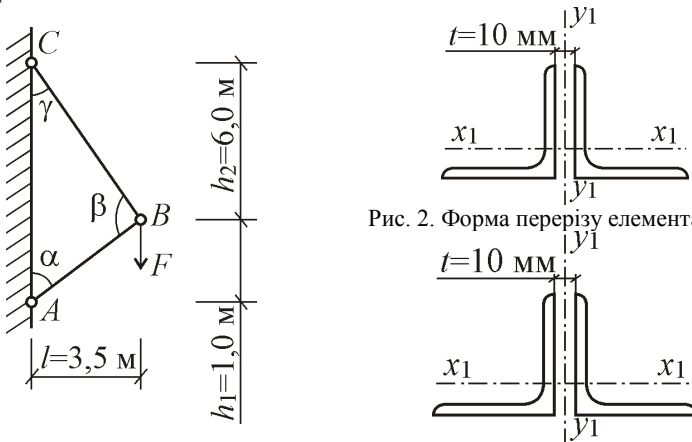


Рис. 2. Форма перерізу елемента AB



Розв'язок задачі

1) Обчислюємо довжини елементів AB і BC:

$$l_{AB} = \sqrt{l^2 + h_1^2} = \sqrt{3,5^2 + 1^2} = 3,64 \text{ м};$$

$$l_{BC} = \sqrt{l^2 + h_2^2} = \sqrt{3,5^2 + 6^2} = 6,95 \text{ м}.$$

2) Обчислюємо значення кутів α , β і γ :

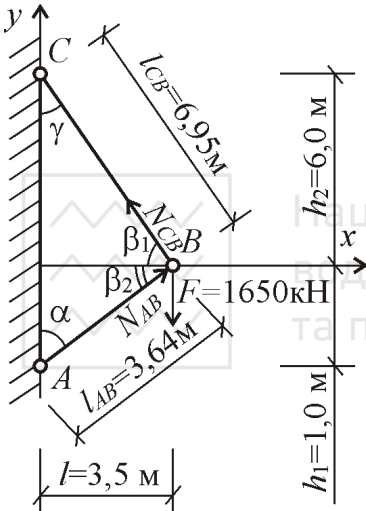


Рис. 4. Розрахункова схема конструкції

$$\cos \alpha = \frac{h_1}{l_{AB}} = \frac{1}{3,64} = 0,2747 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \alpha = \arccos 0,2747 = 74,1^\circ;$$

$$\cos \gamma = \frac{h_2}{l_{BC}} = \frac{6}{6,95} = 0,8633 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \gamma = \arccos 0,8633 = 30,3^\circ;$$

$$\beta = 180^\circ - (\alpha + \gamma) = 180^\circ - (74,1^\circ + 30,3^\circ) = 75,6^\circ;$$

$$\beta_1 = 180^\circ - (\gamma + 90^\circ) = 180^\circ - (30,3^\circ + 90^\circ) = 59,7^\circ;$$

$$\beta_2 = 180^\circ - (\alpha + 90^\circ) = 180^\circ - (74,1^\circ + 90^\circ) = 15,9^\circ.$$

3) Визначаємо граничне розрахункове навантаження

$$F = F_0 \cdot \gamma_{f_m} = 1500 \cdot 1,1 = 1650 \text{ кН}.$$

4) Обчислюємо значення зусиль в елементах AB і BC.

$$\sum F_{ix} = 0; N_{AB} \cdot \cos \beta_2 - N_{BC} \cdot \cos \beta_1 = 0;$$

$$N_{AB} = N_{BC} \cdot \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2} = N_{BC} \cdot \frac{\cos 59,7^\circ}{\cos 15,9^\circ} = 0,52 N_{BC}.$$

$$\sum F_{iy} = 0; N_{AB} \cdot \cos \alpha - N_{BC} \cdot \cos \gamma - F = 0.$$



Оскільки $N_{AB} = 0,52N_{BC}$, то останній вираз можна записати

$$0,52N_{BC} \cdot \cos \alpha + N_{BC} \cdot \cos \gamma - F = 0;$$

$$N_{BC}(0,52 \cos \alpha + \cos \gamma) - F = 0;$$

$$N_{BC} = \frac{F}{0,52 \cos \alpha + \cos \gamma} = \frac{1650}{0,52 \cdot \cos 74,1^\circ + \cos 30,3^\circ} = 1640,4 \text{ кН};$$

$$N_{AB} = 0,52N_{BC} = 0,52 \cdot 1640,4 = 853 \text{ кН}.$$

5) За табл. Г.2 [6] визначаємо значення R_y для елементів AB і BC , попередньо прийнявши товщину прокату для елемента AB $t = 30$ мм і для елемента BC $t = 30$ мм, оскільки ці значення є найбільшими для рівнополицевих кутиків:

а) для стиснутого елемента AB зі сталі класу С255
 $R_y = 230$ МПа;

б) для розтягнутого елемента BC зі сталі класу С235
 $R_y = 220$ МПа.

б) Визначаємо необхідну площу поперечного перерізу розтягнутого елемента BC із умови міцності

$$A_{nec} = \frac{N_{BC} \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{1640,4 \cdot 1 \cdot 10}{220 \cdot 1} = 74,56 \text{ см}^2,$$

де $\gamma_c = 1$ – коефіцієнт умов роботи згідно з табл. 5.1 [6];
 $\gamma_n = 1$ – згідно з табл. 5 [1] для класу відповідальності будівель і споруд СС1, категорія А, усталена розрахункова ситуація.

Оскільки переріз елемента BC складається з двох кутиків, то необхідна площа перерізу одного кутика

$$A_{nec_1} = \frac{A_{nec}}{2} = \frac{74,56}{2} = 37,28 \text{ см}^2.$$

7) Із сортамента рівнополицевих кутиків приймаємо профіль, площа перерізу якого дорівнює або незначно



перевіщує необхідну, і виписуємо необхідні геометричні характеристики.

Приймаємо кутик 160×12 , для якого $A = 37,4 \text{ см}^2$,
 $I_x = 913 \text{ см}^4$, $i_x = 4,94 \text{ см}$, $z_0 = 4,39 \text{ см}$.

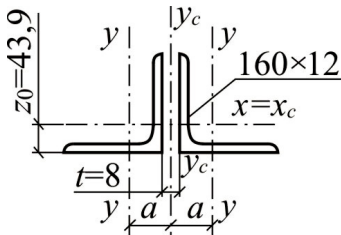


Рис. 5. Переріз елемента BC

8) Оскільки переріз складається з двох кутиків, то необхідно обчислити геометричні характеристики складеного перерізу (рис. 5):

$$A = 37,2 \cdot 2 = 74,8 \text{ см}^2;$$

$$I_x = I_{x_1} + I_{x_2} = 913 + 913 = 1826 \text{ см}^4;$$

$$I_{y_c} = 2(I_y + a^2 A) = 2 \cdot (913 + 4,79^2 \cdot 37,4) = 3542,2 \text{ см}^4,$$

де $I_y = I_x = 913 \text{ см}^4$; $a = z_0 + \frac{t}{2} = 4,39 + \frac{0,8}{2} = 4,79 \text{ см}$.

Радіуси інерції

$$i_x = \sqrt{\frac{I_{x_c}}{A}} = \sqrt{\frac{1826}{37,4 \cdot 2}} = 4,94 \text{ см}; \quad i_y = \sqrt{\frac{I_{y_c}}{A}} = \sqrt{\frac{3542,2}{37,4 \cdot 2}} = 6,88 \text{ см}.$$

9) Оскільки відома товщина прокату $t = 12 \text{ мм}$ (кутик 160×12), уточнюємо значення R_y за табл. Г.2 [6]. Для сталі класу С235 товщиною прокату від 2 до 20 мм $R_y = 230 \text{ МПа}$.

10) Виконуємо перевірку міцності центрально-розтягнутого елемента BC за формулою

$$\sigma = \frac{N_{BC}}{A_n} = \frac{1640,0 \cdot 10}{74,8} = 219,3 \text{ МПа} <$$

$$< R_y \gamma_c / \gamma_n = 230 \cdot 1/1 = 230 \text{ МПа}.$$

11) Перевіряємо гнучкості елемента BC:

$$\lambda_x = \frac{l_{efx}}{i_x} = \frac{695}{4,94} = 140,7 < \lambda_u = 400; \quad \lambda_y = \frac{l_{efy}}{i_y} = \frac{695}{6,88} = 101 < \lambda_u = 400,$$



λ_x і λ_y – гнучкості елемента відповідно у площині конструкції $x-x$ та із площини конструкції $y-y$; l_{ef_x} і l_{ef_y} – розрахункові довжини елемента BC відповідно у площинах $x-x$ та $y-y$:

$$l_{ef_x} = \mu_x \cdot l_{BC} = 1 \cdot 695 = 695 \text{ см}; \quad l_{ef_y} = \mu_y \cdot l_{BC} = 1 \cdot 695 = 695 \text{ см},$$

тут μ_x і μ_y – коефіцієнти приведення розрахункової довжини стержня BC відповідно у площинах $x-x$ і $y-y$, $\mu_x = \mu_y = 1$, оскільки закріплення кінців стержня шарнірне; $\lambda_{li} = 400$ – гранична гнучкість розтягнутих елементів згідно з табл. 13.10 [6].

12) Недонапруження становить

$$\frac{R_y \gamma_c - \sigma}{R_y \gamma_c} \cdot 100\% = \frac{230 \cdot 1 - 219,3}{230 \cdot 1} \cdot 100\% = 4,65\% < 5\%.$$

Переріз підібраний раціонально.

13) Визначаємо необхідну площу поперечного перерізу стиснутого елемента AB із умови стійкості за формулою

$$A_{nee} = \frac{N_{AB} \gamma_n}{\varphi R_y \gamma_c}.$$

Дійсне значення коефіцієнта стійкості φ на даному етапі розрахунку визначити неможливо, оскільки його величина залежить від умовної гнучкості $\bar{\lambda}$, яка у свою чергу залежить не тільки від відомого значення розрахункового опору сталі R_y , а і від невідомого значення гнучкості елемента λ , яка визначається з урахуванням геометричних характеристик перерізу. Окрім того, для обчислення значення φ необхідно попередньо обчислити коефіцієнти α і β , які залежать від типу поперечного перерізу та типу кривої стійкості. Оскільки переріз невідомий, то попередньо



приймають умовну гнучкість елемента $\bar{\lambda} = 2,5...3$, а потім визначають попереднє значення φ^* .

Приймаємо $\bar{\lambda} = 2,6$. Згідно з табл. 8.1 [6] і Ж.1 [6] для таврового поперечного перерізу та типу кривої стійкості c $\varphi^* = 0,635$.

$$A_{nec} = \frac{N_{AB} \gamma_n}{\varphi^* R_y \gamma_c} = \frac{853 \cdot 1 \cdot 10}{0,635 \cdot 230 \cdot 1} = 58,4 \text{ см}^2.$$

Оскільки переріз елемента AB складається з двох кутиків, то необхідна площа перерізу одного кутика

$$A_{nec1} = A_{nec} / 2 = 58,4 / 2 = 29,2 \text{ см}^2.$$

14) Визначаємо необхідні радіуси інерції перерізу

$$i_{x_{nec}} = \frac{l_{efx}}{\lambda^*} = \frac{364}{77,8} = 4,68 \text{ см}; \quad i_{y_{nec}} = \frac{l_{efy}}{\lambda^*} = \frac{364}{77,8} = 4,68 \text{ см},$$

де l_{efx} і l_{efy} – розрахункові довжини елемента AB відповідно у площинах $x-x$ і $y-y$:

$$l_{efx} = \mu_x \cdot l_{AB} = 1 \cdot 364 = 364 \text{ см}; \quad l_{efy} = \mu_y \cdot l_{AB} = 1 \cdot 364 = 364 \text{ см},$$

тут μ_x і μ_y – коефіцієнти приведення розрахункової довжини стержня AB відповідно у площинах $x-x$ і $y-y$, $\mu_x = \mu_y = 1$ – оскільки закріплення кінців стержня шарнірне;

$$\lambda^* = \bar{\lambda} / \sqrt{R_y / E} = 2,6 / \sqrt{230 / 2,06 \cdot 10^5} = 77,8.$$

15) За значеннями A_{nec1} , $i_{x_{nec}}$ та $i_{y_{nec}}$ із сортамента рівнополицевих кутиків приймаємо рівнополицевий кутик 160×10 , для якого $A = 31,4 \text{ см}^2$; $I_x = 774 \text{ см}^4$; $i_x = 4,96 \text{ см}$; $z_0 = 4,3 \text{ см}$.

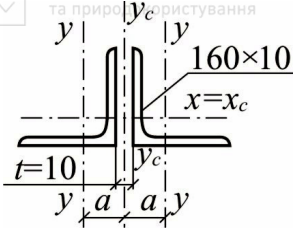


Рис. 6. Переріз елемента *AB*

16) Оскільки переріз складається з двох кутиків, то необхідно обчислити геометричні характеристики складеного перерізу (рис. 6).

Площа перерізу

$$A = 31,4 \cdot 2 = 62,8 \text{ см.}$$

Моменти інерції:

$$I_{x_c} = I_{x_1} + I_{x_2} = 774 + 774 = 1548 \text{ см}^4;$$

$$I_{y_c} = 2(I_y + a^2 \cdot A) = 2(774 + 4,8^2 \cdot 31,4) = 2994,9 \text{ см}^4,$$

де $I_y = I_x = 774 \text{ см}^4$; $a = z_0 + \frac{t}{2} = 4,3 + \frac{1}{2} = 4,8 \text{ см.}$

Радіуси інерції:

$$i_x = \sqrt{\frac{I_{x_c}}{A}} = \sqrt{\frac{1548}{62,8}} = 4,96 \text{ см}; \quad i_y = \sqrt{\frac{I_{y_c}}{A}} = \sqrt{\frac{2994,9}{62,8}} = 6,91 \text{ см.}$$

17) Оскільки відома товщина прокату $t = 10 \text{ мм}$ (кутик 160×10), уточнюємо значення R_y за табл. Г.2 [6]. Для сталі класу С255 товщиною прокату понад 4 до 10 мм включно $R_y = 250 \text{ МПа.}$

18) Визначаємо дійсне значення коефіцієнта φ .
Гнучкості:

$$\lambda_x = \frac{l_{ef_x}}{i_x} = \frac{364}{4,8} = 75,8; \quad \lambda_y = \frac{l_{ef_y}}{i_y} = \frac{364}{6,91} = 52,7.$$

$$\bar{\lambda} = \lambda_{\max} \sqrt{R_y / E} = 75,8 \cdot \sqrt{250 / 2,06 \cdot 10^5} = 2,64.$$

З табл. Ж.1 [6] шляхом інтерполяції обчислюємо значення $\varphi = 0,647$.

19) Перевіряємо гнучкість елемента *AB*.



Гранична гнучкість стиснутого елемента AB стержневої конструкції, яка розглядається, визначається згідно з п. 1 табл. 13.1 [6] за формулою

$$\lambda = 180 - 60\alpha = 180 - 60 \cdot 0,84 = 129,6,$$

$$\text{де } \alpha = \frac{N_{AB} \gamma_n}{\varphi A R_y \gamma_c} = \frac{853 \cdot 1 \cdot 10}{0,647 \cdot 62,8 \cdot 250 \cdot 1} = 0,84.$$

Таким чином, $\lambda_{\max} = \lambda_x = 75,8 < \lambda_u = 129,6$.

20) Виконуємо перевірку стійкості центрально-стиснутого елемента AB за формулою

$$\sigma = \frac{N_{AB}}{\varphi A} = \frac{853 \cdot 10}{0,647 \cdot 62,8 \cdot 1} = 209,9 \text{ МПа} < R_y \gamma_c / \gamma_n = 250 \cdot 1 / 1 = 250 \text{ МПа}.$$

21) Недонапруження становить

$$\frac{R_y \gamma_c - \sigma}{R_y \gamma_c} \cdot 100\% = \frac{250 \cdot 1 - 209,9}{250 \cdot 1} = 16\% > 5\%,$$

але використання кутиків меншого перерізу призводить до перенапруження перерізу.

Приклад 2

Визначити несучу здатність стержневої конструкції, зображеної на рис. 1, за такими вихідними даними:

1) геометричні параметри системи: $l = 4,3 \text{ м}$, $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 70^\circ$, $\gamma = 50^\circ$;

2) форма перерізу елементів: AB – за рис. 2, $t = 8 \text{ мм}$; BC – за рис. 3, $t = 10 \text{ мм}$;

3) матеріал елементів: AB – зі сталі марки О9Г2, BC – зі сталі марки ВСтЗпсб-2;

4) коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_{f_m} = 1,17$;



5) клас відповідальності будівлі – СС1; категорія відповідальності конструкції А; усталена розрахункова ситуація.

Розв'язок задачі

1) Обчислюємо геометричні довжини елементів AB і BC :

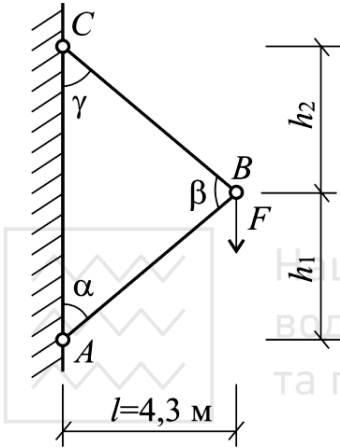


Рис. 1. Схема конструкції

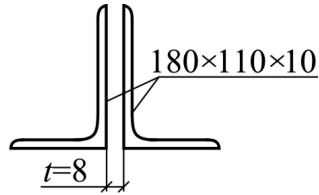


Рис. 2. Форма перерізу елемента AB

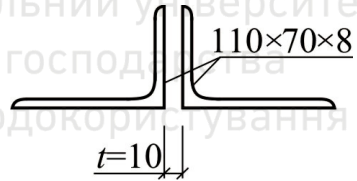


Рис. 3. Форма перерізу елемента BC

$$l_{AB} = \frac{l}{\sin \alpha} = \frac{4,3}{\sin 60^\circ} = 4,97 \text{ м}; \quad l_{BC} = \frac{l}{\sin \gamma} = \frac{4,3}{\sin 50^\circ} = 5,61 \text{ м}.$$

2) Обчислюємо значення кутів β_1 і β_2 (рис. 4):

$$\beta_1 = 180^\circ - (\gamma + 90^\circ) = 180^\circ - (50^\circ + 90^\circ) = 40^\circ;$$

$$\beta_2 = 180^\circ - (\alpha + 90^\circ) = 180^\circ - (60^\circ + 90^\circ) = 30^\circ.$$

3) Обчислюємо геометричні характеристики перерізів елементів AB і BC (рис. 5 і рис. 6).

Із сортамента нерівнополицевих кутиків виписуємо геометричні характеристики кутиків $180 \times 110 \times 10$ і $110 \times 70 \times 8$.

$$\text{L}180 \times 110 \times 10: \quad A = 28,3 \text{ см}^2; \quad y_0 = 5,88 \text{ см}; \quad x_0 = 2,44 \text{ см};$$

$$I_x = 952 \text{ см}^4; \quad i_x = 5,8 \text{ см}; \quad I_y = 276 \text{ см}^4; \quad i_y = 3,12 \text{ см}.$$



$L_{110 \times 70 \times 8} = 13,9 \text{ см}^2$; $y_0 = 3,61 \text{ см}$; $x_0 = 1,64 \text{ см}$;

$I_x = 172 \text{ см}^4$; $i_x = 3,51 \text{ см}$; $I_y = 54,6 \text{ см}^4$; $i_y = 1,98 \text{ см}$.

Для складеного перерізу елемента AB :

а) площа перерізу $A = 28,3 \cdot 2 = 56,6 \text{ см}^2$;

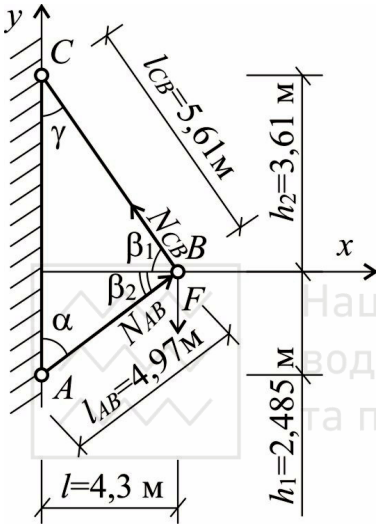


Рис. 4. Розрахункова схема конструкції

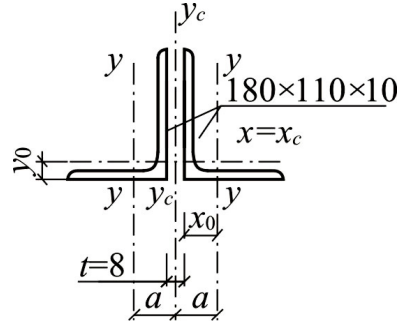


Рис. 5. Поперечний переріз елемента AB

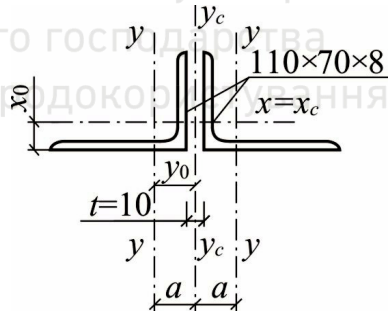


Рис. 6. Поперечний переріз елемента BC

б) моменти інерції: $I_x = I_{x_1} + I_{x_2} = 952 + 952 = 1904 \text{ см}^4$;

$I_{y_c} = 2(I_y + a^2 A) = 2(276 + 2,88^2 \cdot 28,3) = 1021,5 \text{ см}^4$,

де $a = x_0 + \frac{t}{2} = 2,44 + \frac{0,8}{2} = 2,88 \text{ см}$;

в) радіуси інерції:

$i_x = \sqrt{\frac{I_{x_c}}{A}} = \sqrt{\frac{1904}{56,6}} = 5,8 \text{ см}$; $i_y = \sqrt{\frac{I_{y_c}}{A}} = \sqrt{\frac{1021,5}{56,6}} = 4,25 \text{ см}$.



Для складеного перерізу елемента BC :

а) площа перерізу $A = 13,9 \cdot 2 = 27,8 \text{ см}^2$;

б) моменти інерції:

$$I_{xc} = I_{x_1} + I_{x_2} = 54,6 + 54,6 = 109,2 \text{ см}^4,$$

де $I_{x_1} = I_{x_2} = I_y$ (із сортамента) $= 54,6 \text{ см}^4$, оскільки в даному перерізі відбувся поворот осей;

$$I_{y_c} = 2(I_y + a^2 A) = 2(172 + 4,11^2 \cdot 13,9) = 813,6 \text{ см}^4,$$

де $a = y_0 + \frac{t}{2} = 3,61 + \frac{1}{2} = 4,11 \text{ см}$;

$I_y = I_x$ (із сортамента) $= 172 \text{ см}^4$, оскільки відбувся поворот осей;

в) радіуси інерції:

$$i_x = \sqrt{\frac{I_{x_c}}{A}} = \sqrt{\frac{109,2}{27,8}} = 1,98 \text{ см}; \quad i_y = \sqrt{\frac{I_{y_c}}{A}} = \sqrt{\frac{813,6}{27,8}} = 5,41 \text{ см}.$$

4) Обчислюємо гнучкості елементів AB і BC .

Елемент AB :

$$\lambda_x = \frac{l_{ef_x}}{i_x} = \frac{497}{5,8} = 85,7 < \lambda_u = 120; \quad \lambda_y = \frac{l_{ef_y}}{i_y} = \frac{497}{4,25} = 117 < \lambda_u = 120,$$

де $l_{ef_x} = l_{ef_y} = \mu_x \cdot l_x = \mu_y \cdot l_y = 1 \cdot 497 = 497 \text{ см}$,

тут $l_x = l_y = l_{AB} = 497 \text{ см}$; $\mu_x = \mu_y = 1$ – оскільки закріплення кінців стержня шарнірне.

Елемент BC :

$$\lambda_x = \frac{l_{ef_x}}{i_x} = \frac{561}{1,98} = 283,3 < \lambda_u = 400; \quad \lambda_y = \frac{l_{ef_y}}{i_y} = \frac{561}{5,41} = 103,7 < \lambda_u = 400,$$

де $l_{ef_x} = l_{ef_y} = \mu_x \cdot l_x = \mu_y \cdot l_y = 1 \cdot 561 = 561 \text{ см}$,

тут $l_x = l_y = l_{BC} = 561 \text{ см}$; $\mu_x = \mu_y = 1$ – оскільки закріплення кінців стержня шарнірне.



5) За табл. Г.2 [6] визначаємо значення R_y для елементів AB і BC .

Елемент AB складається з двох кутиків $180 \times 110 \times 10$, тобто товщина прокату $t = 10$ мм. Задана марка сталі 09Г2 згідно з табл. Г.5 [6] відповідає класу сталі С345.

Елемент BC складається з двох кутиків $110 \times 70 \times 8$, тобто товщина прокату $t = 8$ мм. Задана марка сталі ВСт3пс6-2 згідно з табл. Г.5 [6] відповідає класу сталі С275.

Таким чином, згідно з табл. Г.2 [6] для елемента AB зі сталі класу С345 товщиною прокату $t = 10$ мм $R_y = 335$ МПа, а для елемента BC зі сталі класу С275 товщиною прокату $t = 8$ мм $R_y = 270$ МПа.

6) Для стиснутого елемента AB умовна гнучкість

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y / E} = 117 \sqrt{335 / 2,06 \cdot 10^5} = 4,72.$$

З табл. Ж.1 [6] для типу кривої стійкості c шляхом інтерполяції визначаємо коефіцієнт стійкості $\varphi = 0,316$.

7) Визначаємо несучу здатність стиснутого елемента AB із умови стійкості

$$N_{AB} = \varphi A R_y \gamma_c / \gamma_n = 0,316 \cdot 56,6 \cdot 335 \cdot 1 / 1 \cdot 10^{-1} = 599,2 \text{ кН.}$$

8) Визначаємо несучу здатність розтягнутого елемента BC із умови міцності

$$N_{BC} = A_n R_y \gamma_c / \gamma_n = 27,8 \cdot 270 \cdot 1 / 1 \cdot 10^{-1} = 750,6 \text{ кН.}$$

9) Зусилля $N_{AB} = 599,2$ кН і $N_{BC} = 750,6$ кН є максимально можливими у відповідних елементах з зазначеними перерізами. Граничний стан стержневої конструкції буде досягнутий у випадку виникнення максимально можливого значення зусилля в одному з елементів. При цьому в іншому елементі зусилля буде менше за максимально можливе для даного елемента.

Оскільки система повинна знаходитись у рівновазі, тобто суми проекцій всіх сил на вісь x і вісь y повинні



дорівнювати нулю, то обчислюємо зусилля в стержні BC із умови, що $N_{AB} = 599,2$ кН.

$$\sum F_{ix} = 0; N_{AB} \cdot \cos \beta_2 - N_{BC}^* \cdot \cos \beta_1 = 0;$$

$$N_{BC}^* = N_{AB} \cdot \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1} = 599,2 \cdot \frac{\cos 30^\circ}{\cos 40^\circ} = 677,4 \text{ кН.}$$

Обчислюємо зусилля в стержні AB із умови, що $N_{BC} = 750,6$ кН.

$$\sum F_{ix} = 0; N_{AB}^* \cdot \cos \beta_2 - N_{BC} \cdot \cos \beta_1 = 0;$$

$$N_{AB}^* = N_{BC} \cdot \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2} = 750,6 \cdot \frac{\cos 40^\circ}{\cos 30^\circ} = 663,9 \text{ кН.}$$

Отже, якщо $N_{AB} = 599,2$ кН, то $N_{BC}^* = 677,4$ кН, а, якщо $N_{BC} = 750,6$ кН, то $N_{AB}^* = 663,9$ кН. Комбінація зусиль $N_{AB} = 599,2$ кН і $N_{BC}^* = 677,4$ кН є реальною, оскільки значення зусиль в елементах не перевищують максимальних, а комбінація зусиль $N_{BC} = 750,6$ кН і $N_{AB}^* = 663,9$ кН є неможливою, оскільки $N_{AB}^* = 663,9$ кН більше за максимальне значення $N_{AB} = 599,2$ кН.

Таким чином, фактичні зусилля в елементах у граничному стані можуть бути $N_{AB} = 599,2$ кН і $N_{BC}^* = 677,4$ кН.

10) Обчислюємо розрахункове значення сили F , яка прикладена у т. B .

$$\sum F_{iy} = 0; N_{BC} \cos \gamma + N_{AB} \cos \alpha - F = 0;$$

$$F = N_{BC} \cos \gamma + N_{AB} \cos \alpha = 677,4 \cdot \cos 50^\circ + 599,2 \cdot \cos 60^\circ = 735 \text{ кН.}$$

11) Визначаємо характеристичне значення

$$F_0 = F / \gamma_{f_m} = 735 / 1,17 = 628,2 \text{ кН.}$$



Приклад 3

Підібрати переріз суцільної центрально-стиснутої колони середнього ряду $K-1$ (рис. 1) за такими вихідними даними:

1) характеристичне навантаження на перекриття $g_0 = 20 \text{ кН/м}^2$, коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_{f_m} = 1,1$;

2) крок розташування колон: $B_1 = 6 \text{ м}$, $B_2 = 6 \text{ м}$;

3) довжина колони $l = 5,2 \text{ м}$;

4) закріплення кінців колони: верхній – шарнірно, нижній – жорстко (рис. 2);

5) матеріал колони – сталь марки 09Г2С, переріз – із прокатних профілів;

6) клас відповідальності будівлі – СС1, категорія відповідальності конструкції В, усталена розрахункова ситуація;

7) будівля громадського призначення.

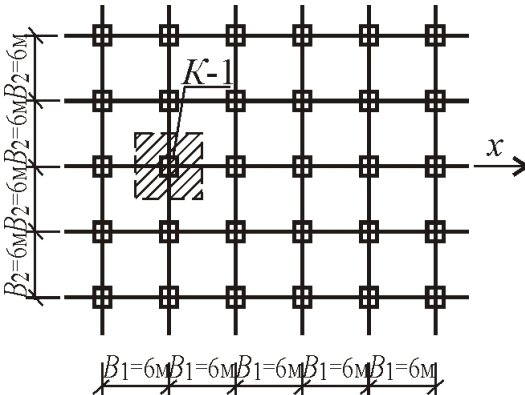


Рис. 1. Розташування колони на плані

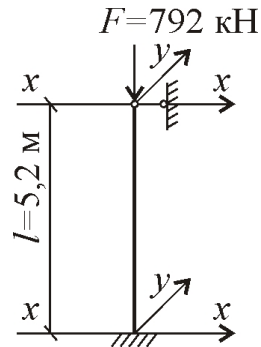


Рис. 2. Розрахункова схема колони



1) Обчислюємо величину розрахункового зосередженого навантаження F , яке прикладається вздовж осі колони

$$F = g_0 \gamma_{f_m} B_1 B_2 = 20 \cdot 1,1 \cdot 6 \cdot 6 = 792 \text{ кН},$$

де $B_1 \times B_2 = 6 \times 6 = 36 \text{ м}^2$ – вантажна площа, з якої збирається навантаження на колону середнього ряду $K-1$.

2) Визначаємо розрахункові довжини колони:

$$l_{ef_x} = \mu_x l_x = 0,7 \cdot 5,2 = 3,64 \text{ м}; \quad l_{ef_y} = \mu_y l_y = 0,7 \cdot 5,2 = 3,64 \text{ м};$$

де l_{ef_x} і l_{ef_y} – розрахункові довжини колони відповідно у площинах $x-x$ і $y-y$; μ_x і μ_y – коефіцієнти приведення розрахункової довжини колони $K-1$ відповідно у площинах $x-x$ і $y-y$, згідно з умовами закріплення приймаємо $\mu_x = \mu_y = 0,7$ (табл. 13.7 [6]); $l_x = 5,2 \text{ м}$ – геометрична довжина колони у площині $x-x$; $l_y = 5,2 \text{ м}$ – геометрична довжина ділянки колони, яка закріплена від переміщення у площині $y-y$, оскільки додаткових точок закріплення стержня колони немає.

3) Для визначення значення R_y необхідно перейти від марки сталі до класу сталі. Згідно з табл. Г.5 [6] марці сталі 09Г2С відповідає клас сталі С345, для якого згідно з табл. Г.2 [6] на першому етапі приймаємо $R_y = 315 \text{ МПа}$ для товщини прокату $t = 11 \dots 20 \text{ мм}$.

4) Визначаємо необхідну площу поперечного перерізу стержня колони із умови стійкості з урахуванням класу відповідальності споруди за формулою

$$A_{nec} = \frac{N \gamma_n}{\varphi^* R_y \gamma_c} = \frac{792 \cdot 0,95 \cdot 10}{0,683 \cdot 315 \cdot 0,95} = 36,8 \text{ см}^2,$$



де $N = F = 792 \text{ кН}$; $\varphi^* = 0,683$ – попереднє значення коефіцієнта стійкості, яке прийняте з табл. Ж.1 [6] для $\bar{\lambda} = 2,8$ та типу кривої стійкості b (оскільки переріз невідомий, то на першому етапі задаються значенням $\bar{\lambda} = 2,5 \dots 3,0$); $\gamma_n = 0,95$ – згідно з табл. 5 [1] для класу відповідальності будівель і споруд СС1, категорія В, ustalена розрахункова ситуація; $\gamma_c = 0,95$ – згідно з п. 2 табл. 5.1 [6].

5) Для стержня колони приймаємо прокатний двотавр № 27, для якого $A = 40,2 \text{ см}^2$; $i_x = 11,92 \text{ см}$; $i_y = 2,54 \text{ см}$, і визначаємо гнучкості колони у площинах $x-x$ і $y-y$:

$$\lambda_x = \frac{l_{efx}}{i_x} = \frac{364}{11,92} = 30,54 < \lambda_u = 120;$$

$$\lambda_y = \frac{l_{efy}}{i_y} = \frac{364}{2,54} = 143,31 > \lambda_u = 120,$$

де $\lambda_u = 180 - 60\alpha = 180 - 60 \cdot 1 = 120$ – згідно з п. 4 табл. 13.1 [6] (приймаємо $\alpha = 1$, оскільки таке значення коефіцієнта ϵ найневигоднішим для визначення граничної гнучкості λ_u).

Гнучкість $\lambda_{max} = \lambda_y = 143,31 > \lambda_u = 120$, тому необхідно збільшити номер двотавра або змінити форму перерізу.

Збільшення номеру двотавра, тобто збільшення площі поперечного перерізу, пов'язане з додатковими витратами матеріалу. Тому краще змінити форму перерізу і прийняти його складеним з двох швелерів № 18У (рис. 3), які мають такі геометричні характеристики: $A_{\Gamma} = 20,7 \text{ см}^2$; $I_x = 1090 \text{ см}^4$; $i_x = 7,24 \text{ см}$; $I_y = 86 \text{ см}^4$; $i_y = 2,04 \text{ см}$; $z_0 = 1,94 \text{ см}$; $b_f = 7,0 \text{ см}$; $t_f = 0,87 \text{ см}$.



Геометричні характеристики складеного перерізу:

а) $i_{x_c} = i_x = 7,24 \text{ см};$

б) $I_{y_c} = (I_y + (b_f - z_0)^2 A) \cdot 2 = (86 + (7,0 - 1,94)^2 \cdot 20,7) \cdot 2 = 1232 \text{ см}^4;$

в) $i_{y_c} = \sqrt{\frac{I_{y_c}}{2 \cdot A_{\Gamma}}} = \sqrt{\frac{1232}{2 \cdot 20,7}} = 5,45 \text{ см};$

г) $A = 2A_{\Gamma} = 2 \cdot 20,7 = 41,4 \text{ см}^2.$

Визначаємо фактичні гнучкості:

$$\lambda_x = \frac{l_{efx}}{i_{x_c}} = \frac{364}{7,24} = 50,3 < \lambda_u = 120; \lambda_y = \frac{l_{efy}}{i_{y_c}} = \frac{364}{5,45} = 66,8 < \lambda_u = 120.$$

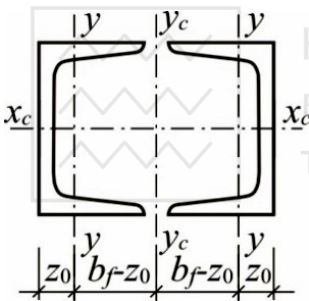


Рис. 3. Переріз стержня колони

б) Приймаємо точне значення R_y , оскільки вже відома товщина прокату — для $t_f = 8,7 \text{ мм}$

$R_y = 335 \text{ МПа}$ (див. п.3 даної задачі).

7) Умовна гнучкість $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y/E} = 66,8 \sqrt{335/2,06 \cdot 10^5} = 2,69$ і з табл. Ж.1 [6] шляхом інтерполяції наведених значень визначаємо точне значення коефіцієнта стійкості $\varphi = 0,704$.

8) Перевіряємо стійкість центрально-стиснутої колони за формулою

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} = \frac{792 \cdot 10}{0,704 \cdot 41,4} = 271,7 \text{ МПа} < < R_y \gamma_c / \gamma_n = 335 \cdot 0,95 / 0,95 = 335 \text{ МПа}.$$

Недонапруження перерізу становить



$$\frac{R_y \gamma_c - \sigma}{R_y \gamma_c} \cdot 100\% = \frac{335 - 271,7}{335} \cdot 100\% = 18,9\% > 5\%.$$

Оскільки недонапруження перерізу значне, приймаємо колону з двох швелерів №16У і виконуємо необхідні розрахунки. Із сортамента $A_{\Gamma} = 18,1 \text{ см}^2$; $I_x = 747 \text{ см}^4$; $i_x = 6,42 \text{ см}$; $I_y = 63,3 \text{ см}^4$; $i_y = 1,87 \text{ см}$; $z_0 = 1,8 \text{ см}$; $b_f = 6,4 \text{ см}$; $t_f = 0,84 \text{ см}$.

Геометричні характеристики перерізу:

а) $i_{x_c} = i_x = 6,42 \text{ см}$;

б) $I_{y_c} = (I_y + (b_f - z_0)^2 A) = (63,3 + (6,4 - 1,87)^2 \times$
 $\times 18,1) \cdot 2 = 892,6 \text{ см}^4$;

в) $i_{y_c} = \sqrt{\frac{I_{y_c}}{A}} = \sqrt{\frac{892,6}{36,2}} = 4,97 \text{ см}$,

де $A = 2A_{\Gamma} = 2 \cdot 18,1 = 36,2 \text{ см}^2$.

Визначаємо гнучкості:

$$\lambda_x = \frac{l_{ef_x}}{i_{x_c}} = \frac{364}{6,42} = 56,7 < \lambda_u = 120; \lambda_y = \frac{l_{ef_y}}{i_{y_c}} = \frac{364}{4,97} = 73,2 < \lambda_u = 120.$$

Умовна гнучкість

$$\bar{\lambda} = 73,2 \sqrt{335 / 2,06 \cdot 10^5} = 2,95$$

і з табл. Ж.1 [5] $\varphi = 0,653$.

Перевіряємо стійкість

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} = \frac{792 \cdot 10}{0,653 \cdot 36,2} = 335,05 \text{ МПа} > R_y \gamma_c / \gamma_n = 335 \text{ МПа}.$$

Оскільки умова стійкості елемента для перерізу з двох швелерів №16У не виконується, то остаточно переріз колони приймаємо з двох швелерів №18У.



Приклад 4

Визначити несучу здатність суцільної центрально-стиснутої колони крайнього ряду $K-2$ (рис. 1) за такими вихідними даними:

- 1) геометрична довжина колони $l = 5,5$ м;
- 2) переріз колони – прокатний двотавр № 30;
- 3) закріплення кінців колони: верхній – жорстко, нижній – жорстко (рис. 2);
- 4) крок розташування колон: $B_1 = 6$ м, $B_2 = 3$ м;
- 5) матеріал колони – сталь класу С275;
- 6) коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_{f_m} = 1,15$;
- 7) клас відповідальності будівлі – СС1, категорія відповідальності конструкції В, перехідна розрахункова ситуація.

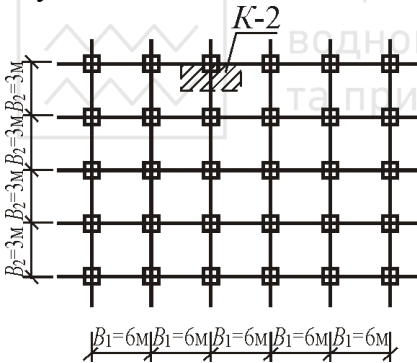


Рис. 1. Розташування колони на плані

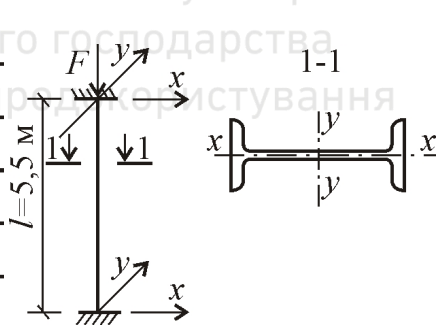


Рис. 2. Розрахункова схема колони

Розв'язок задачі

- 1) Визначаємо розрахункові довжини колони:

$$l_{ef_x} = \mu_x l_x = 0,5 \cdot 5,5 = 2,75 \text{ м;}$$

$$l_{ef_y} = \mu_y l_y = 0,5 \cdot 5,5 = 2,75 \text{ м,}$$



де l_{efx} і l_{efy} – розрахункові довжини колони відповідно у площинах $x-x$ і $y-y$; μ_x і μ_y – коефіцієнти приведення розрахункової довжини колони $K-2$ відповідно у площинах $x-x$ і $y-y$, згідно з умовами закріплення приймаємо $\mu_x = \mu_y = 0,5$ (табл. 13.7 [6]); $l_x = 5,5$ м – геометрична довжина колони у площині $x-x$; $l_y = 5,5$ м – геометрична довжина ділянки колони, яка закріплена від переміщення у площині $y-y$, оскільки додаткових точок закріплення стержня колони немає.

2) Випишуємо із сортамента геометричні характеристики двотавра № 30, з якого складається стержень колони: $A = 46,5$ см²; $i_x = 12,3$ см; $i_y = 2,69$ см; $t_f = 10,2$ мм.

3) Визначаємо гнучкості колони у площинах $x-x$ і $y-y$:



$$\lambda_x = \frac{l_{efx}}{i_x} = \frac{275}{12,3} = 22,4 < \lambda_u = 120;$$

$$\lambda_y = \frac{l_{efy}}{i_y} = \frac{275}{2,69} = 102,2 < \lambda_u = 120,$$

де $\lambda_u = 180 - 60\alpha = 180 - 60 \cdot 1 = 120$ – згідно з п. 4 табл. 13.1 [6] (приймаємо $\alpha = 1$, оскільки таке значення коефіцієнта є найневигоднішим для визначення граничної гнучкості λ_u і тому, що значення поздовжньої сили N ще невідоме).

4) З табл. Г.2 [6] для сталі класу міцності С275 товщиною прокату $t_f = 10,2$ мм визначаємо $R_y = 270$ МПа.

5) Умовна гнучкість

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y / E} = 102,2 \sqrt{270 / 2,06 \cdot 10^5} = 3,7$$

і з табл. Ж.1 [6] шляхом інтерполяції визначаємо значення коефіцієнта стійкості $\varphi = 0,505$.

6) Визначаємо несучу здатність колони за формулою



$$N = \varphi AR_y \gamma_c / \gamma_n = 0,505 \cdot 46,5 \cdot 270 \cdot 0,95 \cdot 10^{-1} / 0,9 = 669,3 \text{ кН},$$

де $\gamma_c = 1$ – згідно з табл. 5.1 [6]. для колон громадських будівель; $\gamma_n = 0,9$ – згідно з табл. 5 [1] для класу відповідальності будівель і споруд СС1, категорія відповідальності конструкції В, перехідна розрахункова ситуація.

7) Колона К-2 розташована у крайньому поздовжньому ряді колон. Величина вантажної площі, з якої збирається навантаження на цю колону, $A_{в.н.} = B_1 \frac{B_2}{2} = 6 \frac{3}{2} = 9 \text{ м}^2$ (див. рис. 1). Коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_{f_m} = 1,15$. Тоді характеристичне навантаження на 1 м^2 вантажної площі становить

$$g_0 = \frac{N}{A_{в.н.} \cdot \gamma_{f_m}} = \frac{669,3}{9 \cdot 1,15} = 64,67 \text{ кН/м}^2.$$

2. Приклади розрахунку згинальних елементів

Приклад 1

Підібрати переріз прокатної балки настилу робочого майданчика за такими даними: балка однопролітна на двох опорах; характеристичне навантаження $g_0 = 25 \text{ кН/м}^2$; проліт балки $l = 6,2 \text{ м}$; крок розташування балок $a = 1,7 \text{ м}$; коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_{f_m} = 1,13$; відносний граничний прогин $f_u / l = 1/200$; матеріал балки – сталь марки ВСт3пс6-2; клас відповідальності споруди – СС1, категорія відповідальності конструкції В. Розрахунок виконати з урахуванням пружно-пластичної роботи матеріалу.



Розв'язок задачі

1) Визначаємо величини згинаючого моменту та поперечної сили, які виникають в балці від прикладеного навантаження:

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{48,03 \cdot 6,2^2}{8} = 230,78 \text{ кНм};$$

$$Q = \frac{ql}{2} = \frac{48,03 \cdot 6,2}{2} = 148,89 \text{ кН},$$

де $q = g_0$ а $\gamma_{f_m} = 25 \cdot 1,7 \cdot 1,13 = 48,03 \text{ кН/м}$.

2) Згідно з табл. Г.5 [6] марці сталі ВСтЗпс6-2 відповідає клас сталі С275, для якого згідно з табл. Г.2 [6] $R_y = 270 \text{ МПа}$ (приймаємо для товщини прокату до 20 мм).

3) На першому етапі розрахунку задаємося значеннями коефіцієнтів $c_x = 1,1$ і $\beta = 1$ та визначаємо необхідний момент опору прокатного профілю

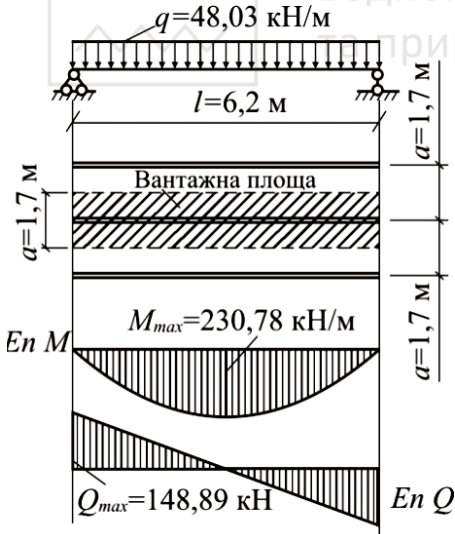


Рис. 1. Розрахункова схема балки

$$W_{нес} = \frac{M}{c_x \beta R_y \gamma_c / \gamma_n} = \frac{230,78 \cdot 10^3}{1,1 \cdot 1 \cdot 270 \cdot 1,0 / 0,90} = 699,3 \text{ см}^3,$$

де $\gamma_c = 1,0$ – згідно з табл. 5.1 [6], оскільки конкретні умови застосування балки робочого майданчика не обумовлені; $\gamma_n = 0,90$ – згідно з табл. 5 [1] для класу відповідальності споруди СС1, категорія В, перехідна розрахункова ситуація.



4) З сортаменту двотаврових балок приймаємо двотавр № 36, для якого: $W_x = 743 \text{ см}^3$; $S_x = 423 \text{ см}^3$; $I_x = 13380 \text{ см}^4$; $h = 36 \text{ см}$; $b_f = 14,5 \text{ см}$; $t_f = 1,23 \text{ см}$; $t_w = 0,75 \text{ см}$.

5) Визначаємо дотичні напруження за формулою

$$\tau = \frac{Q}{t_w h_w} = \frac{148,89}{0,75 \cdot 33,54} = 59,2 \text{ МПа} < R_s \gamma_c / \gamma_n = 0,58 R_y \gamma_c / \gamma_n = 0,58 \cdot 270 \cdot 1,0 / 0,9 = 174 \text{ МПа},$$

де $h_w = h - 2t_f = 36 - 2 \cdot 1,23 = 33,54 \text{ см}$.

Оскільки $\tau = 59,2 \text{ МПа} < 0,5 R_s = 0,5 \cdot 174 = 87 \text{ МПа}$, то $\beta = 1$.

6) Обчислюємо співвідношення

$$\alpha = \frac{A_f}{A_w} = \frac{17,835}{25,155} = 0,71,$$

де $A_f = b_f t_f = 14,5 \cdot 1,23 = 17,835 \text{ см}^2$;

$$A_w = t_w h_w = 0,75 \cdot 33,54 = 25,155 \text{ см}^2.$$

7) З табл. М.1 [6] для типу перерізу 1 для співвідношення $A_f / A_w = 0,71$ шляхом інтерполяції визначаємо точне значення коефіцієнта c_x , яке становить $c_x = 1,099$.

8) Виконуємо перевірки міцності:

$$\sigma = \frac{M}{c_x \beta W} = \frac{230,78 \cdot 10^3}{1,099 \cdot 1 \cdot 743} = 282,62 \text{ МПа} < R_y \gamma_c / \gamma_n = 270 \cdot 1,0 / 0,9 = 300 \text{ МПа};$$

$$\tau = \frac{QS_x}{I_x t_w} = \frac{148,89 \cdot 423 \cdot 10}{13380 \cdot 0,75} = 62,76 \text{ МПа} < R_s \gamma_c / \gamma_n = 174 \text{ МПа}.$$

Недонапруження становить



$$\frac{R_y \gamma_c - \sigma}{R_y \gamma_c} \cdot 100\% = \frac{312,63 - 282,62}{312,63} \cdot 100\% = 9,59\% > 5\%.$$

Недонапруження перевищує 5%, але використання меншого профілю, тобто двотавра № 33, неможливе, оскільки у цьому випадку $\sigma > R_y \gamma_c / \gamma_n$.

9) Перевіряємо жорсткість балки

$$\frac{f}{l} = \frac{5}{384} \frac{q_e l^3}{EI_x} = \frac{5}{384} \cdot \frac{42,5 \cdot 6,2^3 \cdot 10^5}{2,06 \cdot 10^5 \cdot 13380} = \frac{1}{209} < \frac{f_u}{l} = \frac{1}{200},$$

де $q_e = g_0 a \gamma_{f_e} = 25 \cdot 1,7 \cdot 1 = 42,5 \text{ кН/м}$.

10) Перевірку місцевої стійкості поясів і стінки балки не виконуємо, оскільки вона забезпечується прийнятими товщинами елементів під час прокатування профілів.

Приклад 2

Перевірити несучу здатність, жорсткість і загальну стійкість прокатної балки, виконаної з двотавра № 45, за такими даними: балка консольна; характеристичне навантаження $F_{01} = 50 \text{ кН}$ прикладене до кінця консолі; виліт консолі $l = 4,3 \text{ м}$; крок балок $a = 1,5 \text{ м}$; коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_{f_m} = 1,2$; відносний граничний прогин $f_u / l = 1/150$; матеріал – сталь класу С255; клас відповідальності споруди – СС1, категорія відповідальності конструкції Б, перехідна розрахункова ситуація. Розрахунок виконати з урахуванням пружної роботи матеріалу.

Розв'язок задачі

1) Визначаємо величину згинаючого моменту та поперечної сили, які виникають в балці від прикладеного навантаження:



$$M = F_1 \cdot l = 60 \cdot 4,3 = 258 \text{ кНм}; \quad Q = F_1 = 60 \text{ кН},$$

$$\text{де } F_1 = F_{01} \cdot \gamma_{f_m} = 50 \cdot 1,2 = 60 \text{ кН}.$$

2) Перевіряємо міцність балки:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = \frac{258 \cdot 10^3}{1231} = 209,6 \text{ МПа} < R_y \gamma_c / \gamma_n = 240 \cdot 1 / 0,9 = 266,7 \text{ МПа};$$

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{QS_x}{I_x t_w} = \frac{60 \cdot 708 \cdot 10}{27696 \cdot 0,9} = 17,04 \text{ МПа} < R_s \gamma_c / \gamma_n = \\ &= 0,58 R_y \gamma_c / \gamma_n = 0,58 \cdot 240 \cdot 1 / 0,9 = 154,7 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

де $W_x = 1231 \text{ см}^3$; $S_x = 708 \text{ см}^3$; $I_x = 27696 \text{ см}^4$; $t_w = 0,9 \text{ см}$ – геометричні характеристики та розміри двотавра № 45; $R_y = 240 \text{ МПа}$ – для сталі класу С255 згідно з табл. Г.2 [6]; $\gamma_c = 1,0$ – згідно з табл. 5.1 [6]; $\gamma_n = 0,9$ – згідно з табл. 5 [1] для класу відповідальності будівлі СС1, категорія відповідальності конструкції В, перехідна розрахункова ситуація.

3) Перевіряємо жорсткість балки

$$\frac{f}{l} = \frac{1}{3} \frac{F_{el} l^2}{EI_x} = \frac{1}{3} \cdot \frac{50 \cdot 430^2}{2,06 \cdot 10^4 \cdot 27696} = \frac{1}{185} < \frac{f_u}{l} = \frac{1}{150},$$

$$\text{де } F_{el} = F_{01} \cdot \gamma_{f_e} = 50 \cdot 1 = 50 \text{ кН}.$$

Виконані розрахунки засвідчили, що міцність і жорсткість балки забезпечені.

4) Для перевірки загальної стійкості балки обчислюємо:

а) коефіцієнт

$$\alpha_t = 1,54 \frac{I_t}{I_y} \left(\frac{l_{ef}}{h} \right)^2 = 1,54 \frac{54,7}{808} \left(\frac{430}{45} \right)^2 = 9,52,$$



де $I_t = 54,7 \text{ см}^4$ – момент інерції перерізу у разі кручення;

$I_y = 808 \text{ см}^4$; $l_{ef} = l = 430 \text{ см}$ – оскільки закріплень від поперечних зміщень немає; $h = 45 \text{ см}$ – висота балки;

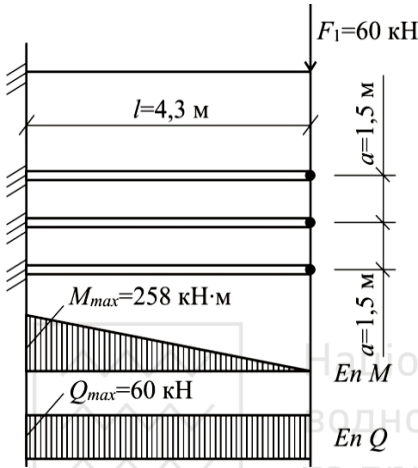


Рис. 1. Розрахункова схема балки

б) коефіцієнт ψ з

табл. Н.2 [5]

$$\psi = 1 + 0,16 \alpha_t = 1 + 0,16 \cdot 9,52 = 2,52;$$

в) коефіцієнт

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \psi \frac{I_y}{I_x} \left(\frac{h}{l_{ef}} \right)^2 \frac{E}{R_y} = \\ &= 2,52 \frac{808}{27696} \left(\frac{45}{430} \right)^2 \frac{2,06 \cdot 10^5}{240} = \\ &= 0,69. \end{aligned}$$

Оскільки $\varphi_1 = 0,69 < 0,85$, то $\varphi_b = \varphi_1 = 0,69$.

Виконуємо перевірку загальної стійкості

$$\sigma = \frac{M}{\varphi_b W_x} = \frac{258 \cdot 10^3}{0,69 \cdot 1231} = 303,7 \text{ МПа} > R_y \gamma_c / \gamma_n = 266,7 \text{ МПа},$$

де $W_c = W_x = 1231 \text{ см}^3$ – момент опору для стиснутого поясу.

Невиконання умови свідчить про те, що балку необхідно розкріплювати від поперечних зміщень в'язями або іншими елементами.



Приклад 3

Визначити характеристичне навантаження g_o (кН/м²) на перекриття за такими даними: балка – однопролітна на двох опорах; переріз балки швелер № 30У; навантаження – рівномірно розподілене на половині прольоту зліва; проліт $l = 5,4$ м; крок розташування балок $a = 1,4$ м; коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_{f_m} = 1,2$; відносний граничний прогин $f_u / l = 1/190$; матеріал – сталь марки 09Г2С; клас відповідальності споруди – СС2, категорія відповідальності конструкції В, усталена розрахункова ситуація. Розрахунок виконати з урахуванням пружної роботи матеріалу.

Розв'язок задачі

1) Характеристичне навантаження на балку можна обчислити, використовуючи формули для визначення нормальних і дотичних напружень, а також формулу для визначення відносного прогину:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n; \quad \tau = \frac{QS_x}{I_x t_w} \leq R_s \gamma_c / \gamma_n; \quad \frac{f}{l} = \frac{M_e l}{10EI_x} \leq \frac{f_u}{l}.$$

З цих виразів знаходимо M , Q і M_e :

$$M = \frac{W_x R_y \gamma_c}{\gamma_n}; \quad Q = \frac{I_x t_w R_s \gamma_c}{S_x \gamma_n}; \quad M_e = \frac{10EI_x f_u / l}{l}.$$

З іншого боку, значення M , Q і M_e можна визначити залежно від схеми навантаження, прольоту балки та кроку розташування балок.

2) Визначаємо реакції R_A і R_B (рис. 1). Суми моментів всіх сил, прикладених до балки, відносно точок A і B дорівнюють нулю:

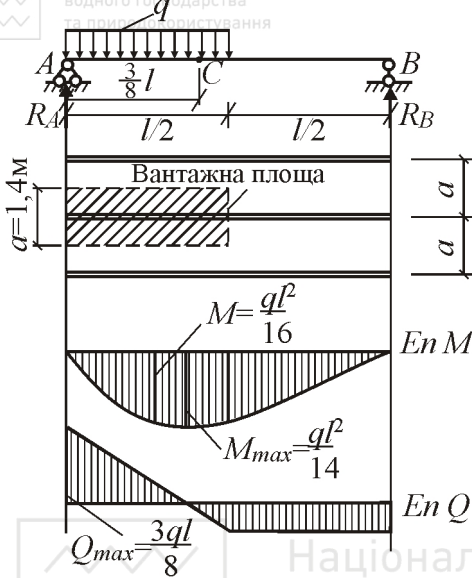


Рис. 1. Розрахункова схема балки

$$а) R_B l - q \frac{l}{2} \frac{l}{4} = 0;$$

$$R_B = \frac{ql}{8};$$

$$б) R_A l - q \frac{l}{2} \frac{3l}{4} = 0$$

$$; R_A = \frac{3ql}{8};$$

3) Визначаємо

M , Q і M_e .

Максимальний

згинаючий момент

виникає в т. С, яка

розташована на відстані

$3/8l$ від опори А.

$$M_{max} = \frac{3ql}{8} \cdot \frac{3l}{8} - \frac{q \cdot 3l}{8} \cdot \frac{3l}{16} = \frac{9ql^2}{128} \approx \frac{ql^2}{14};$$

$$Q_{max} = R_A = \frac{3ql}{8}; M_e \approx \frac{q_e l^2}{14}.$$

4) Прирівнюємо праві частини виразів для визначення M , Q і M_e :

$$\frac{ql^2}{14} = \frac{W_x R_y \gamma_c}{\gamma_n}; \frac{3ql}{8} = \frac{I_x t_w R_s \gamma_c}{S_x \gamma_n}; \frac{q_e l^2}{14} = \frac{10EI_x f_u / l}{l}.$$

Враховуємо, що $q = g_o a \gamma_{f_m}$ і $q_e = g_o a \gamma_{f_e}$.

$$\frac{(g_o a \gamma_{f_m}) l^2}{14} = \frac{W_x R_y \gamma_c}{\gamma_n}; \frac{3(g_o a \gamma_{f_m}) l}{8} = \frac{I_x t_w R_s \gamma_c}{S_x \gamma_n};$$

$$\frac{(g_o a \gamma_{f_e}) l^2}{14} = \frac{10EI_x f_u / l}{l}.$$



3 трьох останніх виразів:

$$g_o = \frac{14W_x R_y \gamma_c}{a \gamma_{f_m} l^2 \gamma_n}; g_o = \frac{8I_x t_w R_s \gamma_c}{3a \gamma_{f_m} l S_x \gamma_n}; g_o = \frac{140EI_x f_u / l}{al^3 \gamma_{fe}}$$

5) Обчислюємо значення g_o із формули для визначення нормальних напружень

$$g_o = \frac{14W_x R_y \gamma_c}{a \gamma_{f_m} l^2 \gamma_n} = \frac{14 \cdot 387 \cdot 31,5 \cdot 1,0}{140 \cdot 1,2 \cdot 540^2 \cdot 1,0} = 0,0035 \text{ кН/см}^2 = 35 \text{ кН/м}^2,$$

де $W_x = 387 \text{ см}^3$ – для швелера № 30У; $R_y = 315 \text{ МПа} = 31,5 \text{ кН/см}^2$ – для сталі марки 09Г2С (класу сталі С345 згідно з табл. Г.5 [6]) згідно з табл. Г.2 [6]; $\gamma_c = 1,0$ – згідно з табл. 5.1 [6]; $\gamma_n = 1$ – згідно з табл. 5 [1] для класу відповідальності будівлі СС2, категорія відповідальності конструкції В, усталена розрахункова ситуація.

6) Обчислюємо значення g_o із формули для визначення дотичних напружень

$$g_o = \frac{8I_x t_w R_s \gamma_c}{3a \gamma_{f_m} l S_x \gamma_n} = \frac{8 \cdot 5810 \cdot 0,65 \cdot 18,27 \cdot 1,0}{3 \cdot 140 \cdot 1,2 \cdot 540 \cdot 224 \cdot 1,0} = 0,0091 \text{ кН/см}^2 = 91 \text{ кН/м}^2,$$

де $I_x = 5810 \text{ см}^4$; $t_w = 0,65 \text{ см}$; $S_x = 224 \text{ см}^3$ – для № 30У;

$$R_s = 0,58 R_y = 0,58 \cdot 315 = 182,7 \text{ МПа} = 18,27 \text{ кН/см}^2.$$

7) Обчислюємо значення g_o із формули для визначення граничного прогину

$$g_o = \frac{140EI_x f_u / l}{al^3 \gamma_{fe}} = \frac{140 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 5810 \cdot 1 / 190}{140 \cdot 540^3 \cdot 1} = 0,004 \text{ кН/см}^2 = 40 \text{ кН/м}^2,$$



де $E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа} = 2,06 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$ – модуль пружності сталі.

8) Максимальним характеристичним навантаженням на перекриття є значення, у разі використання якого виконуються умови міцності за нормальними та дотичними напруженнями, а також умова жорсткості. Таким значенням є менше з трьох обчислених. Остаточню $g_o = 35 \text{ кН/м}^2$.

Приклад 4

Визначити максимальний крок a (м) розташування балок робочого майданчика за такими даними: балка – однопролітна на двох опорах; переріз балки – двотавр № 27; характеристичне навантаження – рівномірно розподілене на перекритті $g_o = 23 \text{ кН/м}^2$; проліт балки $l = 4,5 \text{ м}$; коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_{fm} = 1,16$; відносний граничний прогин $f/l = 1/150$; матеріал – сталь класу С285; клас відповідальності споруди – СС1, категорія відповідальності конструкції А, перехідна розрахункова ситуація. Розрахунок виконати з урахуванням пружної роботи матеріалу.

Розв'язок задачі

1) Максимальний крок розташування балок робочого майданчика можна обчислити, використовуючи формули для визначення нормальних і дотичних напружень, а також формулу для визначення відносного прогину:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n; \tau = \frac{QS_x}{I_x t_w} \leq R_s \gamma_c / \gamma_n; \frac{f}{l} = \frac{M_e l}{10EI_x} \leq \frac{f_u}{l}.$$

Із цих виразів обчислюємо M , Q і M_e :



$$M = \frac{W_x R_y \gamma_c}{\gamma_n}; Q = \frac{I_x t_w R_s \gamma_c}{S_x \gamma_n}; M_e = \frac{10 E I_x f_u / l}{l}.$$

З іншого боку, значення M , Q і M_e визначають залежно від схеми навантаження, прольоту балки та кроку розташування балок.

2) Визначаємо зусилля в балці, враховуючи, що $q = g_o a \gamma_{f_m}$ і $q_e = g_o a \gamma_{f_e}$:

$$M_{max} = \frac{ql^2}{8} = \frac{(g_o a \gamma_{f_m}) l^2}{8}; Q_{max} = \frac{ql}{2} = \frac{(g_o a \gamma_{f_m}) l}{2};$$

$$M_e = \frac{q_e l^2}{8} = \frac{(g_o a \gamma_{f_e}) l^2}{8}.$$

3) Прирівнюємо праві частини виразів для визначення M , Q і M_e :

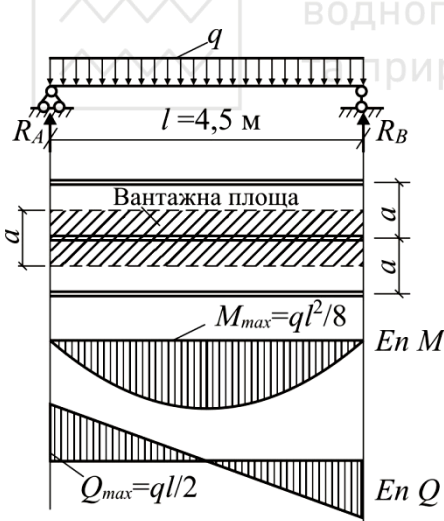


Рис. 1. Розрахункова схема балки

$$\frac{(g_o a \gamma_{f_m}) l^2}{8} = \frac{W_x R_y \gamma_c}{\gamma_n};$$

$$\frac{(g_o a \gamma_{f_m}) l}{2} = \frac{I_x t_w R_s \gamma_c}{S_x \gamma_n};$$

$$\frac{(g_o a \gamma_{f_e}) l^2}{8} = \frac{10 E I_x f_u / l}{l}.$$

З останніх трьох виразів:

$$a = \frac{8 W_x R_y \gamma_c}{g_o \gamma_{f_m} l^2 \gamma_n};$$

$$a = \frac{2 I_x t_w R_s \gamma_c}{g_o \gamma_{f_m} l S_x \gamma_n};$$

$$a = \frac{80 E I_x f_u / l}{g_o \gamma_{f_e} l^3}.$$



4) Знаходимо значення a із формули для визначення нормальних напружень

$$a = \frac{8W_x R_y \gamma_c}{g_o \gamma_{f_m} l^2 \gamma_n} = \frac{8 \cdot 371 \cdot 27 \cdot 1,0}{0,0023 \cdot 1,16 \cdot 450^2 \cdot 0,95} = 156,13 \text{ см,}$$

де $W_x = 371 \text{ см}^3$ – для двотавра № 27; $R_y = 270 \text{ МПа} = 27 \text{ кН/см}^2$ – для сталі класу С285 згідно з табл. Г.2 [6]; $\gamma_c = 1,0$ – згідно з табл. 5.1 [6]; $\gamma_n = 0,95$ – згідно з табл. 5 [1] для класу відповідальності будівлі СС1, категорія відповідальності конструкції А, перехідна розрахункова ситуація; $l = 4,5 \text{ м} = 450 \text{ см}$; $g_o = 23 \text{ кН/м}^2 = 0,0023 \text{ кН/см}^2$.

5) Обчислюємо значення a із формули для визначення дотичних напружень

$$a = \frac{2I_x t_w R_s \gamma_c}{g_o \gamma_{f_m} l S_x \gamma_n} = \frac{2 \cdot 5010 \cdot 0,6 \cdot 15,66 \cdot 1,0}{0,0023 \cdot 1,16 \cdot 450 \cdot 210 \cdot 0,95} = 393,07 \text{ см,}$$

де $I_x = 5010 \text{ см}^4$; $t_w = 0,6 \text{ см}$; $S_x = 210 \text{ см}^3$ – для двотавра № 27;

$$R_s = 0,58 R_y = 0,58 \cdot 270 = 156,6 \text{ МПа} = 15,66 \text{ кН/см}^2.$$

6) Обчислюємо значення a із формули для визначення граничного прогину

$$a = \frac{80 E I_x f_u / l}{g_o \gamma_{f_e} l^3} = \frac{80 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 5010 \cdot 1 / 150}{0,0023 \cdot 1 \cdot 450^3} = 262,62 \text{ см,}$$

де $E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа} = 2,06 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$ – модуль пружності сталі.

7) Максимальним кроком розташування балок є значення, у разі використання якого виконуються умови міцності за нормальними та дотичними напруженнями, а також умова жорсткості. Таким значенням є менше з трьох обчислених. Остаточоно $a = 156,13 \text{ см}$.



Література

1. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст] : ДБН В.1.2-14-2009. – [офіц. вид.]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с. – (Нормативний документ Мінрегіонбуду України. Норми проектування).
2. Навантаження і впливи [Текст] : ДБН В.1.2 – 2:2006. – [офіц. вид.]. – К. : Сталь, 2006. – 59 с. – (Нормативний документ Мінбуду України. Норми проектування).
3. Прогини і переміщення. Вимоги проектування [Текст] : ДСТУ Б В.1.2 – 3:2006. – [офіц. вид.]. – К. : Сталь, 2006. – 10 с. – (Нормативний документ Мінбудархітектури України. Національний стандарт України).
4. Романюк В.В. Робочі майданчики виробничих будівель : навч. посіб. / В. В. Романюк. – Рівне : НУВГП, 2007. – 281 с.
5. Романюк В. В. Металеві конструкції. Розрахунок елементів і з'єднань : навч. посіб. / В. В. Романюк. – Рівне : НУВГП, 2014. – 449 с.
6. Сталеві конструкції [Текст] : ДБН В.2.6 – 198:2014. – [офіц. вид.]. – К. : ДП «Укрархбудінформ», 2014. – 199 с. – (Нормативний документ Мінрегіонбуду України. Норми проектування).