

. Розрахунок кроквяної ферм

1. Постановка задачі. За нормами [1] снігове навантаження на покриття будівель збільшилося. Схему сталеві ферми наведено на рис. 3.4.

Матеріал конструкції — сталь марки ВСт3пс6-1 з розрахунковим опором $f_{y0}=240\text{МПа}$. Ферма виконана із парних кутників. На ферму діє постійне навантаження та навантаження від ваги снігового покриву.

Під час обстеження не виявлено недопустимих відхилень від проекту, дефектів та пошкоджень.

Статичний розрахунок ферми показав, що зусилля у верхньому поясі ферми від дії постійного навантаження $N_1=560\text{кН}$, від розрахункового снігового навантаження відповідно до діючих норм [1] $N_2= 152\text{кН}$.

Верхній пояс ферми виконано із двох рівнополичкових кутників 125x9мм; товщина фасонки $t=10\text{мм}$. Коефіцієнт умови роботи стержня $\gamma_c = 0,95$.

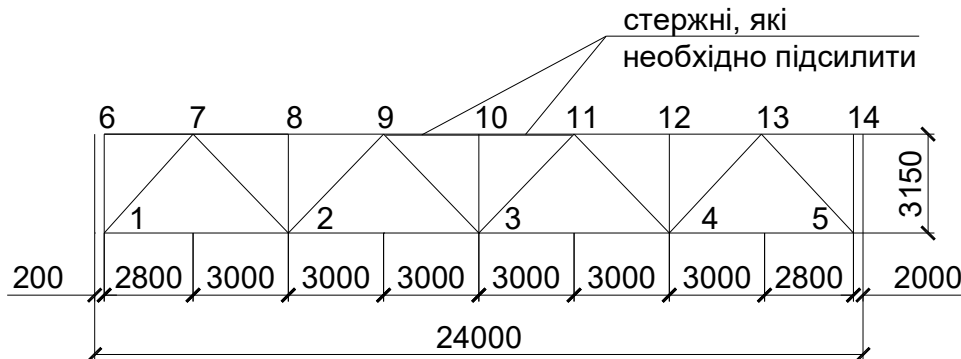


Рисунок 3.4 – Схема кроквяної ферми

Необхідно підсилити середні панелі верхнього пояса.

2. Геометричні характеристики перерізу, який підсилюється. Переріз верхнього пояса — два кутники $B_0 \times t_0 = 125 \times 9\text{мм}$. Розміри перерізу та його геометричні характеристики наведені в табл. 3.3, яку складено відповідно до табл. В.1, додаток В.

3. Обґрунтування необхідності підсилення стрижня. У табл. 3.4 наведено перевірку стійкості стержня від сумарного зусилля, яке складається із зусилля від постійного навантаження та зусилля від снігового навантаження за чинними нормами $N=560+152=712\text{кН}$.

Перевірка виконується за формулою (3.42):

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A_0} \leq f_y \gamma_c \quad (3.42)$$

Із таблиці видно, що напруження в стрижні $\sigma=23,45\text{кН/см}^2$ більше за добуток $f_y \gamma_c=22,8\text{кН/см}^2$.

Значення коефіцієнта $\gamma_c=0,95$ (см. табл. Б.5, додаток Б).

$23,45 \text{ кН/см}^2 > 22,8 \text{ кН/см}^2$.

Стрижень потребує підсилення.

Таблиця 3.3

Розміри та геометричні характеристики стрижня 9-10 верхнього пояса, його гнучкості до підсилення

№ з/п	Позначення	Обчислення	Од. вим.	Значення
1	h_0	сортамент	см	12,5
2	t_0	сортамент	см	0,9
3	z_{00}	сортамент	см	3,4
4	t_1	за призначенням	см	1,0
5	x_0	$1/2 + 3,4$	см	3,9
6	A_0	$2 \cdot A = 2 \cdot 22$	см^2	44
7	I_{x0}	$2 \cdot I_0 = 2 \cdot 327$	см^4	654
8	i_{x0}	сортамент	см	3,8
9	i_{y0}	сортамент	см	5,48

10	W_{01}	$\frac{I_{x0}}{z_{00}} = \frac{654}{3,4}$	см ³	192
11	W_{02}	$\frac{I_{x0}}{h_0 - z_{00}} = \frac{654}{12,5 - 3,4}$	см ³	71,9
12	ρ_{01}	$\frac{W_{01}}{A_0} = \frac{192}{44}$	см	4,36
13	ρ_{02}	$\frac{W_{02}}{A_0} = \frac{71,9}{44}$	см	1,63
14	l_{efx}	$l_0 \cdot \mu_1 = 300 \cdot 1$	см	300
15	l_{efy}	$l_0 \cdot \mu_2 = 300 \cdot 1$	см	300
16	λ_x	$\frac{l_{efx}}{i_{x0}} = \frac{300}{3,8}$	—	79
17	λ_y	$\frac{l_{efy}}{i_{y0}} = \frac{300}{5,48}$	—	54,7
18	φ_0	Додаток 7 [4], $\lambda=79, f_{y0}=240\text{МПа}$	—	0,69

Таблиця 3.4

Перевірка стійкості стрижня

Зусилля, кН	Пере- різ	A_0 см ²	$\frac{l_{efx}}{l_{efy}}$	$\frac{i_{x0}}{i_{y0}}$	$\frac{\lambda_{x0}}{\lambda_{y0}}$	λ_u	φ	γ_c	σ , кН/см ²	$f_y \gamma_c$, кН/см ²
712	2L 125x9	44	$\frac{300}{300}$	$\frac{3,86}{5,48}$	$\frac{79}{54,7}$	120	0,69	0,95	23,45	22,8

4. Вибір режиму підсилення. Підсилення стрижнів будемо виконувати при частковому розвантаженні — за відсутності снігового навантаження. Тоді початкове (на момент підсилення) зусилля в стрижні $N_r=152\text{кН}$. Повне навантаження $N=712\text{кН}$.

5. Визначення початкових напружень в стрижні. Початкові напруження визначаються від зусилля N_0 , при цьому враховують випадковий ексцентриситет e_0 та початковий прогин f_0 , які можливі як у додатному (вгору), так і у від'ємному

(вниз) напрямках (рис. 3.5). Обчислення початкових напружень σ_{01} та σ_{02} відповідно у точках 1 і 2 перерізу наведені у табл. 3.5.

Отримані напруження у крайніх фібрах основного перерізу не перевищують значення $f_{y0}\gamma_c$, що дорівняю $24 \cdot 1 = 24 \text{ кН/см}^2$.

Коефіцієнт $\beta_0 < 0,8$, отже додаткове розвантаження елементів перед підсиленням не потрібне.

6. Перевірка стійкості стрижня перед підсиленням.

$$\sigma = \frac{N_0}{\varphi_0 A_0} \leq f_{y0} \gamma_c; \quad (3.43)$$

$$\sigma = \frac{560}{0,69 \cdot 44} = 18,12 \text{ кН/см}^2 < 24 \cdot 0,95 = 22,8 \text{ кН/см}^2.$$

Стійкість стрижня на момент підсилення забезпечена.

7. Вибір схеми підсилення стержня, матеріалу для елементі підсилення.

Для підсилення стисненого верхнього пояса приймаємо схему В.1.1 із використанням двох кутників $B \times t = 90 \times 7 \text{ мм}$. Елементи підсилення проектуємо із сталі марки С255 з розрахунковим опором $f_{yr} = 250 \text{ МПа}$ (табл. Б.1, додаток Б).

Коефіцієнт $\alpha = f_{yr}/f_{y0} = 250/240 = 1,04$. Оскільки $\alpha = 1,04 < 1,15$, то розрахунковий опір $f_{y,ef}$, який використовують у розрахунках підсилених стержнів, приймається рівним f_{y0} , тобто $f_{y,ef} = f_{y0} = 240 \text{ МПа}$.

Таблиця 3.5

Початкові напруження у перерізі

№ з/п	Позначення	Обчислення	Од. вим.	Значення
1	m_0	графік рис. В.1 додаток В $\lambda_x = 79$	—	0,13
2	e_{01}	$m_0 \rho_{01} = 0,13 \cdot 4,36$	см	0,57
3	e_{02}	$m_0 \rho_{02} = 0,13 \cdot 1,63$	см	-0,21

4	N_{0e}	$\frac{\pi^2 EI_{x0}}{l_{efx}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 654}{300^2}$	кН	1505
5	f_{01}	$\frac{N_0 \cdot e_{01}}{N_{0e} - N_0} = \frac{560 \cdot 0,57}{1505 - 560}$	см	0,34
6	f_{02}	$\frac{N_0 \cdot e_{02}}{N_{0e} - N_0} = \frac{560 \cdot 0,21}{1505 - 560}$	см	-0,12
7	σ_{01}	$\frac{N_0}{A_0} + \frac{N_0(e_{01} + f_{01})}{W_{01}} = \frac{560}{44} + \frac{560(0,57 + 0,34)}{192}$	кН/см ²	15,38
8	σ_{02}	$\frac{N_0}{A_0} + \frac{N_0(e_{02} + f_{02})}{W_{02}} = \frac{560}{44} + \frac{560(0,21 + 0,12)}{71,9}$	кН/см ²	15,29
9		$f_{y0} \cdot \gamma_c = 24 \cdot 1$	кН/см ²	24
10	β_0	$\sigma_{\max} / f_{y0} = 15,38 / 24$	—	0,64

8. Геометричні характеристики підсиленого перерізу. У табл. 3.6 наведені геометричні підсиленого перерізу стержня та його гнучкості. Таблицю складено відповідно до табл. В.1.1 додатка В.

Таблиця 3.6

Геометричні характеристики підсиленого перерізу стержня

№ з/п	Позначення	Обчислення	Од. вим.	Значення
1	h_r	сортамент	см	9,0
2	t_r	сортамент	см	0,7
3	z_{0r}	сортамент	см	2,47
4	A	сортамент	см ²	12,3
5	I_x	сортамент	см ⁴	94,3
6	i_{xr}	сортамент	см	2,77
7	A_r	$2A = 2 \cdot 12,3$	см ²	24,6

8	I_{xr}	$2I_x = 2 \cdot 94,3$	см ⁴	188,6
9	A_n	$A_0 + A_r = 44 + 24,6$	см ²	68,6
10	y_0	$\frac{A_r(z_{00} + z_{0r})}{A_n} = \frac{24,6(3,4 + 2,47)}{68,6}$	см	2,1
11	y_r	$z_{00} + z_{0r} - y_0 = 3,4 + 2,47 - 2,1$	см	3,77
12	I_{xn}	$I_{x0} + A_0 \cdot y_0^2 + I_{xr} + A_r \cdot y_r^2 =$ $= 654 + 44 \cdot 2,1^2 + 188,6 + 24,6 \cdot 3,77^2$	см ⁴	1478,34
13	x_l	призначається	см	2,0
14	x_r	$x_1 + h_r - z_{0r} = 2 + 9 - 2,74$	см	8,26
15	x_0	$z_{00} + t_1/2 = 3,4 + 0,5$	см	3,9
16	I_{yn}	$I_{x0} + A_0 \cdot x_0^2 + I_{xr} + A_r \cdot x_r^2 =$ $= 654 + 44 \cdot 3,9^2 + 188,6 + 24,6 \cdot 8,26^2$	см ⁴	3295,64
17	y_l	$z_{00} - y_0 = 3,4 - 2,1$	см	1,3
18	h_l	$h_r + y_1 = 9 + 1,3$	см	10,3
19	h_2	$h_0 - y_1 = 12,5 - 1,3$	см	11,2
20	W_{n1}	$I_{xn}/h_1 = 1478,34/10,3$	см ³	143,5
21	W_{n2}	$I_{xn}/h_2 = 1478,34/11,2$	см ³	132
22	ρ_{n1}	$W_{n1}/A_n = 143,5/68,6$	см	2,09
23	ρ_{n2}	$W_{n2}/A_n = 132/68,6$	см	1,92
24	i_{xn}	$\sqrt{I_{xn}/A_n} = \sqrt{1478,34/68,6}$	см	4,64
25	i_{yn}	$\sqrt{I_{yn}/A_n} = \sqrt{3295,64/68,6}$	см	6,93
26	λ_{xn}	$l_{efx}/i_{xn} = 300/4,64$	—	64,7

Продовження таблиці 3.6

27	λ_{yn}	$l_{efy}/i_{yn} = 300/6,93$	—	43,3
28	φ_n	Додаток 7 [4], $\lambda=64,7, f_{y,ef}=240$ МПа	—	0,783

9. Розрахунок приєднання елементів підсилення до основного стержня. Для зварювання використовують електроди Е42. При ручному зварюванні небезпечною є площа $f \cdot f$; розрахунок виконують за металом шва, $R_{wf}=180$ МПа, $\beta_f=0,7$. Катети кутових швів приймаються мінімальними (табл. Б.3, додаток Б). Якщо товщина більш товстого елемента $t_0=9$ мм (товщина кутника основного перерізу), приймаємо $k_f=5$ мм. Приварювання елементів підсилення виконуємо

переривчастими (шпонковими) швами, довжина безперервних ділянок l_w повинна бути не менш, ніж 50мм.

Розрахунок приєднання елементів підсилення до основного перерізу наведено у табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Розрахунок приєднання елементів підсилення

№ з/п	Позначення	Обчислення	Од. вим.	Значення
1	k_f	Табл. Б.3 додатка Б		
2	n	кількість швів за кресленням	—	4
3	a_w	$40 \cdot i_{xr} = 40 \cdot 2,77 = 111 \text{ см}$, приймаємо $a_w = 60 \text{ см}$	см	60
4	Q_{fic}	$7,15 \cdot 10^{-6} \left(2330 - \frac{E}{f_{y0}} \right) \cdot \frac{N}{\varphi_n} =$ $= 7,15 \cdot 10^{-6} \left(2330 - \frac{2,1 \cdot 10^5}{240} \right) \frac{712}{0,783}$	кН	9,45
5	S_r	$A_r \cdot y_r = 24,6 \cdot 3,77$	см ³	92,74
6	T	$\frac{Q_{fic} \cdot S_r \cdot a_w}{I_{xn}} = \frac{9,45 \cdot 92,74 \cdot 60}{1478,34}$	кН	35,57

Продовження таблиці 3.7

7	l_w	$\frac{T}{n\beta f^k f R_{wf} \gamma_w \gamma_c} + 1 \text{ см} =$ $= \frac{35,57}{4 \cdot 0,7 \cdot 0,5 \cdot 18} + 1 \text{ см} = 2,4 \text{ см}$ <p>Приймаємо $l_w = 5 \text{ см}$</p>	см	5
8	N'_r	$N_r \cdot A_r / A_n = 152 \cdot 24,6 / 68,6$	кН	54,5
9	l_{wk}	$\frac{T + N'_r}{n\beta f^k f R_{wf} \gamma_w \gamma_c} + 1 \text{ см} =$ $= \frac{35,57 + 54,5}{4 \cdot 0,7 \cdot 0,5 \cdot 18} + 1 \text{ см} = 4,57$	см	5

		Приймаємо $l_{wk}=5\text{см}$		
10	χ	$l_w/a_w = 5/60$	—	0,083

10. Визначення погину f_l , який виникає від приєднання елементів підсилення до поверхонь, що мають незначні початкові викривлення.

Значення f_{01} у додатньому напрямку та f_{02} у від'ємному напрямку наведені у табл. 3.5. Обчислення значень f_{11} та f_{12} наведено у табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Визначення прогинів f_{11} та f_{12}

№ з/п	Позначення	Обчислення	Од. вим.	Значення
1	f_{01}	Табл. 3.5	см	0,34
2	f_{02}	Табл. 3.5	см	-0,12
3	N_{en}	$\frac{\pi^2 EI_{xn}}{l_{efx}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 1478,34}{300^2}$	кН	3401,03
4	α_n	$\frac{N_e}{N_e - N} = \frac{3401,4}{3401,4 - 712}$	—	1,26
5	f_{11}	$f_{01} \cdot \frac{1 - \alpha_x I_{xr}}{I_{x0} + I_{xr}} = 0,34 \cdot \frac{1 - 1,26 \cdot 188,6}{654 + 188,6}$	см	0,24
6	f_{12}	$f_{02} \cdot \frac{1 - \alpha_n I_{xr}}{I_{x0} + I_{xr}} = -0,12 \cdot \frac{1 - 1,26 \cdot 188,6}{654 + 188,6}$	см	-0,10

11. Визначення залишкового зварювального прогину f_w , що виникає від приварювання елементів підсилення. Елементи підсилення приварюються переривчастими швами; число швів $n=4$; коефіцієнт переривчастості шва $\chi=0,083$ (табл. 3.7).

Значення прогину f_{w1} визначається при додатньому напрямку випадкового ексцентриситету, f_{w2} — при від'ємному. Визначення залишкового зварювального прогину f_{wi} наведено у табл. 3.9.

Таблиця 3.9

Визначення прогину f_w

№ з/п	Позначення	Обчислення	Од. вим.	Значення
1	V	$0,04k_f^2 = 0,04 \cdot 0,5^2$	см ⁴	0,01
2	C_1	$\frac{\alpha_N \cdot V \cdot \chi \cdot \lambda_{xn}^2}{8A_n} = \frac{1,26 \cdot 0,01 \cdot 0,083 \cdot 64,7^2}{8 \cdot 68,6}$	$\frac{1}{\text{см}^2}$	$7,95 \cdot 10^{-3}$
3	y_1	$z_{00} - y_0 = 3,4 - 2,1$	см	1,3
4	σ_{w1}	$\frac{N_0}{A_0} + \frac{N_0(e_{01} + f_{11})}{I_{x0}} \cdot y_1 = \frac{560}{44} + \frac{560(0,57 + 0,24)}{654} \cdot 1,3$	$\frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	13,63
5	ξ_1	$\sigma_{w1}/R_{y0} = 13,63/24$	—	0,57
6	n_1	$1 - \frac{0,5 \ln(1 - \xi_1)}{\ln 2} = 1 - \frac{0,5 \ln(1 - 0,57)}{\ln 2}$	—	1,59
7	σ_{w2}	$\frac{N_0}{A_0} + \frac{N_0(e_{02} + f_{12})}{I_{x0}} \cdot y_1 = \frac{560}{44} - \frac{560(0,21 + 0,10)}{654} \cdot 1,3$	$\frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	12,39
8	ξ_2	$\sigma_{w2}/R_{y0} = 12,39/24$	—	0,52
9	n_2	$1 - \frac{0,5 \ln(1 - \xi_2)}{\ln 2} = 1 - \frac{0,5 \ln(1 - 0,52)}{\ln 2}$	—	1,53
10	f_{w1}	$C_1 \sum n_{1i} y_i = 7,95 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 1,3 \cdot 1,59$	см	0,07
11	f_{w2}	$C_1 \sum n_{2i} y_i = 7,95 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 1,3 \cdot 1,53$	см	0,06

12. Визначення розрахункового еквівалентного ексцентриситету. Розрахунковий еквівалентний ексцентриситет визначається за формулою (3.44):

$$e_{fi} = e_i + f_{li} + k_w f_{wi}, \quad (3.44)$$

де $e_i = e_{0i} - y_0$; (3.45)

y_0 - зміщення вісі центра ваги перерізу при підсиленні, приймається зі своїм знаком. Для запропонованої схеми підсилення $y_0 > 0$. Якщо випадковий ексцентриситет має додатній напрямок, то

$$e_1 = e_{01} - y_0 = 0,57 - 2,1 = -1,53 \text{ см};$$

якщо від'ємний напрямок

$$e_2 = e_{02} - y_0 = -0,21 - 2,1 = -2,31 \text{ см}.$$

Розрахунковий еквівалентний ексцентриситет у додатному напрямку

$$e_{f1} = e_1 + f_{11} + k_w f_{w1} = -1,53 + 0,24 + 0,5 \cdot 0,07 = -1,26 \text{ см}.$$

Розрахунковий еквівалентний ексцентриситет у від'ємному напрямку

$$e_{f2} = e_2 + f_{12} + k_w f_{w2} = -2,31 - 0,09 + 0,5 \cdot 0,06 = -2,37 \text{ см}.$$

13. Перевірка стійкості підсиленого стержня як позацентрово стисненого елемента

Розрахунки із перевірки стійкості стержня наведено у таблиці 3.10. Перевірку необхідно виконувати для еквівалентного ексцентриситету додатного напрямку (e_{f1}), і для еквівалентного ексцентриситету від'ємного напрямку (e_{f2}).

Із таблиці бачимо, що умови стійкості стиснених елементів верхнього пояса в площині ферми виконуються. Перевірку стійкості стержнів із площини ферми виконувати необов'язково, оскільки $I_{yn} > I_{xn}$.

Таблиця 3.10

Перевірка стійкості стержня як позацентрово стисненого елемента

№ з/п	Позначення	Обчислення	Од. вим.	Значення
1	m_{x1}	$e_{f1} / \rho_{n1} = 1,26 / 2,09$	—	0,6
2	$\overline{\lambda}_x$	$\lambda_{xn} \sqrt{R_{y0} / E} = 64,7 \sqrt{240 / 2,1 \cdot 10^5}$	—	2,18

3	η_1	$(0,25 + 0,15m_{x1}) + 0,03(5 - m_{x1})\bar{\lambda}_x =$ $= (0,25 + 0,15 \cdot 0,6) + 0,03(5 - 0,6) \cdot 2,18$	—	0,63
4	m_{ef1}	$m_{x1} \cdot \eta = 0,6 \cdot 0,63$	—	0,38
5	φ_{e1}	$\bar{\lambda} = 2,18; m_{ef}=0,38, \text{ додаток 8 [4]}$	—	0,674
6	σ_1	$\frac{N}{\varphi_{e1} A_n} = \frac{712}{0,674 \cdot 68,6}$	$\frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	15,4
7	m_{x2}	$e_{f2} / \rho_{n2} = 2,37 / 1,92$	—	1,23
8	η_2	$(0,25 + 0,15m_{x2}) + 0,03(5 - m_{x2})\bar{\lambda}_x =$ $= (0,25 + 0,15 \cdot 1,23) + 0,03(5 - 1,23) \cdot 2,18$	—	0,68
9	m_{ef2}	$m_{x2} \cdot \eta_2 = 1,23 \cdot 0,68$	—	0,84
10	φ_{e2}	$\bar{\lambda} = 2,18; m_{ef}=0,84, \text{ додаток 8 [11]}$	—	0,548
11	σ_2	$\frac{N}{\varphi_{e2} A_n} = \frac{712}{0,548 \cdot 68,6}$	$\frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	18,94
12	R_{y0}^*	$R_{y0}^* = R_{y0} (\alpha < 1,15)$	$\frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	24,0
13		$R_{y0}^* \cdot \gamma_c = 24 \cdot 0,95$	$\frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	22,8