. Приклади розрахунку підсилення конструкцій згідно з EN 1993 Єврокод 3: Проектування сталевих конструкцій

Приклад 1. Розрахунок підсилення прокатної балки настилу робочого майданчика

Постановка задачі. Через зміну технологічного процесу під час реконструкції цеха характеристичне значення тривалого (від обладнання) навантаження на робочий майданчик з металевим настилом товщиною t_1=10мм та розміром комірки 12х6м (рис. 3.1) збільшується на 25%, тобто q_0 замість 20кН/м² становитиме 25кН/м². Балки настилу виконані з прокатного двотавра №30, головні балки – із широкополичкового двотавра №70Ш1, крок балок настилу a=1м. Матеріал конструкції – С235 згідно ДСТУ EN-10025-2 із розрахунковим опором f_{yo}= 235МПа (фасон).

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

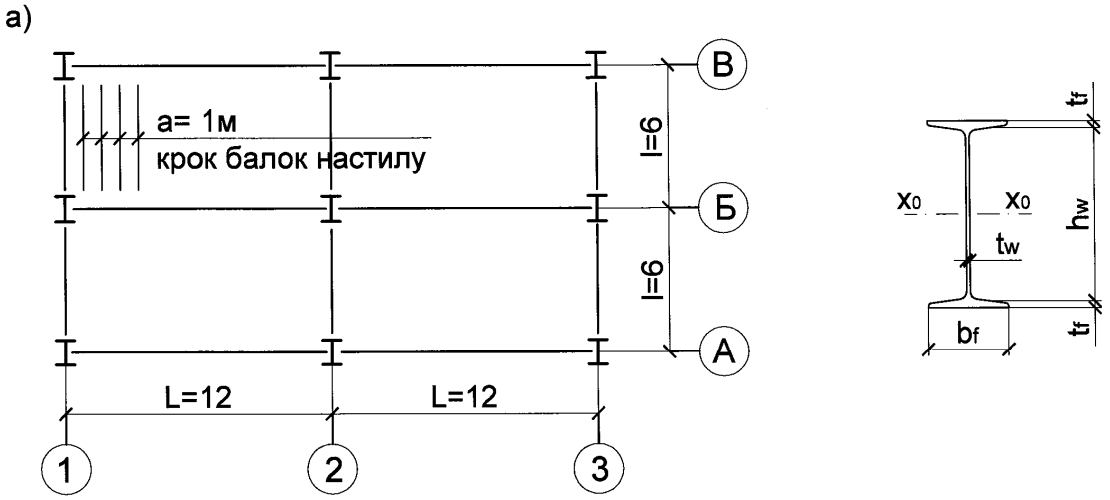

Рисунок 3.1 – Робочий майданчик: а) план; б) переріз балки настилу

Новий технологічний процес вимагає улаштування монолітної залізобетонної плити товщиною t_2=60мм. Запропоновано існуючий сталевий настил не демонтувати, а використати його як опалубку при бетонуванні плити та включити в роботу плити в якості зовнішнього армування. Навантаження, що діє на майданчик, статичне. Коефіцієнт надійності за призначенням споруди γ_n=0,95, коефіцієнт умов роботи балок γ_c=1.

Необхідно підсилити балку настилу.

2. Геометричні характеристики балки настилу. У таблиці 3.1 наведено розміри перерізу балки, яку необхідно підсилити. Балку виконано із двотавра №30. Таблицю 3.1 складено відповідно до таблиці А.1 додатка А.

3. Обґрунтування необхідності підсилення балки настилу. Розрахункову схему балки наведено на рисунке 3.2.

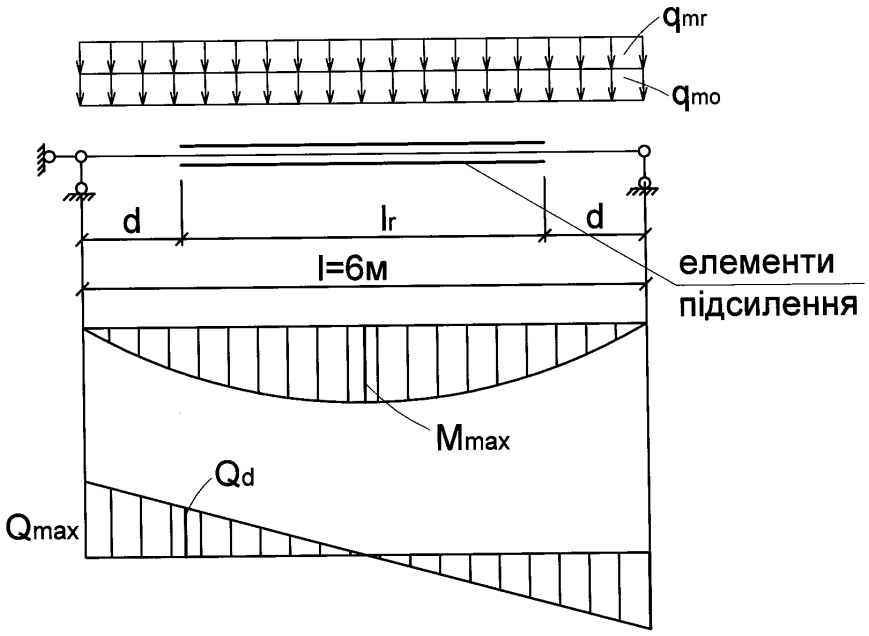

Рисунок 3.2 – Схема підсилення балки та зусилля в ній

Навантаження від власної ваги існуючого сталевого настилу формула (3.1):

$$q_1 = t_1 \cdot \rho_1; \quad (3.1)$$

$q_1 = 0{,}01 \cdot 7{,}85 \cdot 10 = 0{,}785 кН/м^2$.

навантаження від власної ваги доданого залізобетонного настилу формула (3.2)

$$q_2 = t_2 \cdot \rho_2; \quad (3.2)$$

$q_2 = 0{,}06 \cdot 2{,}5 \cdot 10 = 1{,}5 кН/м^2$.

де $\rho 1$ і $\rho 2$ – густина (т/м³) відповідно сталі та залізобетону.

Геометричні характеристики підсилюваного двотавра приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Геометричні характеристики підсилюваного двотавра

№ з/п	Позначення	Формула	Од.вим.	Значення
1	*h*	сортамент	см	30
2	*bf*	сортамент	см	13,5
3	*tf*	сортамент	см	1,02
4	*tw*	сортамент	см	0,65
5	*hw*	$h-2t_f$	см	27,96
6	*Af*	$b_f t_f$	см²	13,77
7	*Aw*	$t_w h_w$	см²	18,17
8	*A0*	сортамент	см²	46,5
9	*Wxo*	сортамент	см³	472
10	*Ixo*	сортамент	см⁴	7080
11	*yo*	$\frac{\frac{A_w}{2}\left(\frac{h_w}{4}+t_f\right)+A_f\frac{t_f}{2}}{\frac{A_w}{2}+A_f}$	см	3,48
12	*m*	сортамент	кг/м	36,5

Граничне розрахункове значення навантаження на балку настилу:

$$q_m = \left(q_1 \cdot \gamma_{fm1} + q_2 \cdot \gamma_{fm2} + q_0 \cdot \gamma_{fm3} \right) \cdot a \cdot \gamma_n; \quad (3.3)$$

$$q_m = (0{,}785 \cdot 1{,}05 + 1{,}5 \cdot 1{,}3 + 25 \cdot 1{,}2) \cdot 1 \cdot 0{,}95 = 31{,}14 кН/м$$

Згинальний момент у балці формула (3.4):

$$M_{\max} = \frac{q_m \cdot l^2}{8}; \quad (3.4)$$

$$M_{\max} = \frac{31{,}14 \cdot 6^2}{8} = 140{,}13 кНм$$

Перевірку міцності балки настилу виконують за формулою (3.5):

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{c_x \cdot W_{xo}} \le f_{yo} \cdot \gamma_c, \quad (3.5)$$

де W_{xo}=472см³ – момент опору перерізу (таблиця 3.1);

cx =1,12 – коефіцієнт, який враховує пластичну роботу матеріалу.

$$\sigma_{\max} = \frac{140{,}13 \cdot 100}{1{,}12 \cdot 472} = 26{,}5 кН/см^2;$$

$$f_{yo} \cdot \gamma_c = 23{,}5 \cdot 1 = 23{,}5 кН/см^2;$$

26,5кН/см²>23,5кН/см².

Умова міцності не виконується. Необхідне підсилення балки, яке виконаємо методом збільшення перерізу.

4. Навантаження, що діють на балку до та після підсилення. Підсилення балки будемо проводити при частковому розвантаженні – за відсутності змінного тривалого навантаження на перекриття (обладнання). Монолітну залізобетонну плиту улаштовують після підсилення балок. Навантаження, що діють на момент

підсилення, буде складатись із власної ваги сталевого настилу та власної ваги самих балок настилу. Лінійна густина двотавру №30 m=36,5кг/м=0,365кН/м (таблиця 3.1).

Граничне розрахункове значення навантаження на балку настилу на момент підсилення:

$$q_{mo} = q_1 \cdot a \cdot \gamma_{fm1} \cdot \gamma_n + m \cdot \gamma_{fm1} \cdot \gamma_n; \tag{3.7}$$

$$q_{mo} = 0{,}785 \cdot 1 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}95 + 0{,}365 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}95 = 1{,}15 кН/м.$$

Граничне розрахункове навантаження на балку, що прикладається після підсилення:

$$q_{mr} = \left(q_2 \cdot \gamma_{fm2} + q_0 \cdot \gamma_{fm3} \right) \alpha \cdot \gamma_n; \tag{3.8}$$

$$q_{mr} = (1{,}5 \cdot 1{,}3 + 25 \cdot 1{,}2) \cdot 1 \cdot 0{,}95 = 30{,}35 кН/м.$$

Для розрахунку балок за деформаціями визначаємо експлуатаційне значення розрахункових навантажень, що діють на балку до та після підсилення:

$$q_{eo} = q_1 \cdot a \cdot \gamma_{fe1} \cdot \gamma_n + m \cdot \gamma_{fe1} \cdot \gamma_n; \tag{3.9}$$

$$q_{eo} = 0{,}785 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}95 + 0{,}365 \cdot 1 \cdot 0{,}95 = 1{,}09 кН/м.$$

$$q_{er} = \left(q_2 \cdot \gamma_{fe2} + q_0 \cdot \gamma_{fe3} \right) a \cdot \gamma_n; \tag{3.10}$$

$$q_{er} = (1{,}5 \cdot 1 + 25 \cdot 1) \cdot 1 \cdot 0{,}95 = 26{,}44 кН/м.$$

5. Схема підсилення балок, матеріал для елементів підсилення. Для підсилення балки настилу робочого майданчика використаємо схему, що наведена на рис. 3.3. Для підсилення стисненої верхньої зони перерізу балки

використовуються два кутники *bxt*=50х5мм, для підсилення розтягненої зони – лист *bxt*=150х8мм.

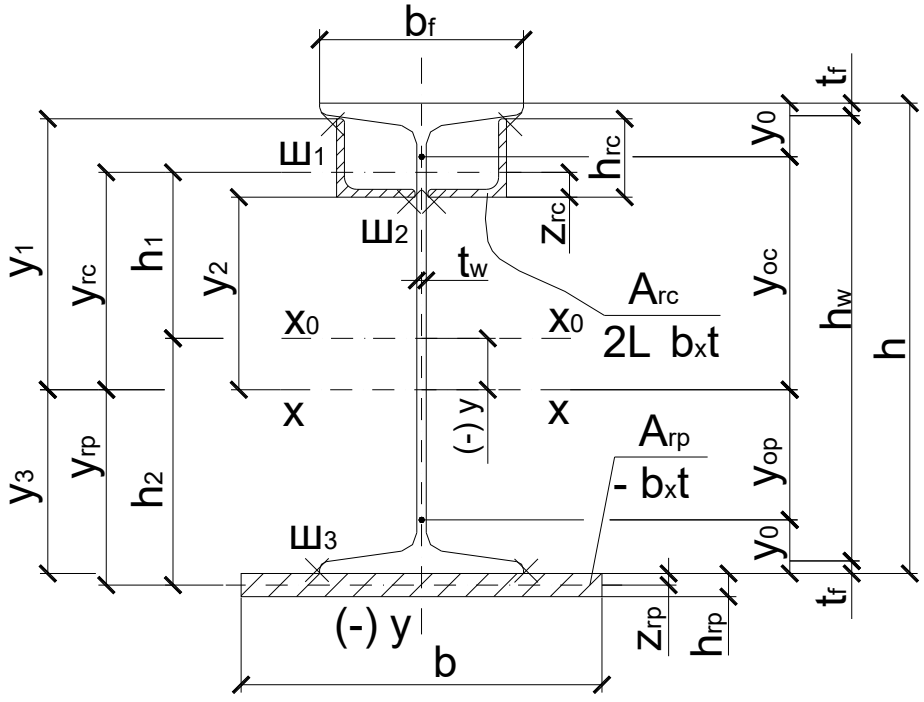

Рисунок 3.3 – Схема підсилення балки

Довжина елементів підсилення *lr* складає приблизно (2/3)*l*, де *l*=6м – прольот балки (рис. 3.2), *lr*=(2/3)·6=4м. Відстань від опори до початку елементів підсилення *d=(l-lr)/2*=1м.

Елементи підсилення проектуємо із сталі марки С245 із розрахунковим опором f_{yr}=240МПа.

Коефіцієнт α визначаємо за формулою (3.11):

$$\alpha = \frac{f_{yr}}{fyo}; \tag{3.11}$$

$\alpha = 240/235 = 1{,}02.$

Геометричні характеристики елементів підсилення та підсиленого перерізу балки наведено в таблиці 3.2, яку складено відповідно до табл. А.2 додатка А.

6. Зусилля в балці до та після підсилення. Епюри згинальних моментів та поперечних сил у балці на двох опорах наведені на рисунке 3.2.

Максимальні моменти у балці до та після підсилення від граничних значень навантажень визначаються за формулами 3.12 – 3.14:

$$M_0 = \frac{q_{mo} \cdot l^2}{8}, \tag{3.12}$$

$$M_r = \frac{q_{mr} \cdot l^2}{8}, \tag{3.13}$$

$$M_0 = \frac{1{,}15 \cdot 6^2}{8} = 5{,}18 кНм;$$

$$M_r = \frac{30{,}35 \cdot 6^2}{8} = 136{,}58 кНм;$$

Повний момент у балці:

$$M = M_o + M_r; \tag{3.14}$$

$$M = 5{,}18 + 136{,}58 = 141{,}76 кНм.$$

Максимальна поперечна сила в підсиленому перерізі балки, визначається за формулою (3.15):

$$Q_d = \left(q_{mo} + q_{mr}\right)\left(\frac{l}{2} - d\right); \tag{3.15}$$

$$Q_d = (1{,}15 + 30{,}35) \cdot (6/2 - 1) = 63{,}0 кН.$$

7. Напруження в балці та коефіцієнти, які характеризують їх рівень до та після підсилення. Визначаємо максимальні нормальні напруження в балці до підсилення за формулою (3.16):

$$\sigma o = \frac{Mo}{W_{xo}};$$ (3.16)

$$\sigma_0 = \frac{5{,}18 \cdot 100}{472} = 1{,}10 кН/см^2.$$

і значення коефіцієнта β_0, що характеризує рівень напруженості конструкції до підсилення та визначається за формулою (3.17):

$$\beta_0 = \frac{\sigma_0}{f_{y0}};$$ (3.17)

$$\beta_0 = \frac{1{,}10}{23{,}5} = 0{,}046.$$

За формулою (3.18) визначаємо максимальні дотичні напруження в підсиленому перерізі балки:

$$\tau_d = \frac{1{,}5 Q_d}{t_w \cdot h_w}$$ (3.18)

$$\tau_d = \frac{1{,}5 \cdot 63{,}0}{0{,}65 \cdot 27{,}96} = 5{,}20 кН/см^2,$$

де t_w=0,65см і h_w=27,96см – відповідно товщина та висота стінки балки (таблиця 3.1).

За формулою (3.19) визначаємо значення коефіцієнта η:

$$\eta = \frac{\tau_d}{R_{s,0}};$$ (3.19)

$$\eta = \frac{5{,}2}{0{,}58 \cdot 23{,}5} = 0{,}38.$$

Оскільки η<0,4 коефіцієнт $c\tau$=1.

8. Перевірка міцності підсиленої балки. Залежно від умов експлуатації та допустимості пластичних деформацій конструкція, що підсилюється, – прокатна балка робочого майданчика – належить до IV класу. Пластичні деформацій враховуються відповідно до критерія розвинених пластичних деформацій (РПД). Пластичну роботу враховують коефіцієнтом γ_M. У нашому випадку $A_{rp} > A_{rc}$, значення коефіцієнта обчислюється за формулою (3.20):

$$\gamma_M = 0{,}95 - 0{,}1(\alpha + \beta_0 - 1); \tag{3.20}$$

$$\gamma_M = 0{,}95 - 0{,}1(1{,}02 + 0{,}046 - 1) = 0{,}943.$$

Перевірку міцності підсиленої балки виконують за формулою (3.21):

$$M \le [M] \cdot c_\tau \cdot \gamma_c; \tag{3.21}$$

де M=141,76кНм, $c\tau$=1, γc=1.

$$[M] = \left(A_{oc} \cdot y_{oc} + A_{op} \cdot y_{op} + \alpha \cdot \left(A_{rc} \cdot y_{rc} + A_{rp} \cdot y_{rp} \right) \right); \tag{3.22}$$

$$[M] = (24{,}474 \cdot 12{,}32 + 22{,}026 \cdot 10{,}72 + 1{,}02(9{,}6 \cdot 9{,}6 + 12 \cdot 16{,}2)) \cdot 23{,}5 \cdot 0{,}943 =$$
$$= 18430{,}7 кНсм = 184{,}31 кНм$$

Остаточно маємо:

141,76кНм<184,31кНм.

Умова міцності виконується.

9. Розрахунок зварних швів, які прикріплюють елементи підсилення. Приварювання елементів підсилення рекомендується виконувати переривчастими (шпонковими) швами. Катети швів приймаємо мінімальними (таблиця Б.3 додаток Б). При товщині зварюваних елементів 5…10мм приймаємо катет швів k_f=5мм.

Відстань між шпонками у стисненій зоні балки:

$$a_{wc} = 40 i_{rc}; \tag{3.23}$$

$$a_{wc} = 40 i_{rc} = 40 \cdot 1{,}42 = 56{,}80 см$$

Приймаємо a_{wc}=50см. Радіус інерції iгс та статичний момент S_{rc} елементів підсилення, розміщених у стисненій зоні наведені в таблиці 3.2.

Зсувна сила у зварних швах стисненої зони:

$$T_{rc} = \frac{Q_d \cdot S_r}{I_{xn}} \cdot a_w; \qquad (3.24)$$

$$T_{rc} = \frac{63 \cdot 107{,}5}{11166{,}82} \cdot 50 = 30{,}3 кН.$$

Максимальну довжину безперервної ділянки зварювального шва (шпонки) визначають за формулою (3.25):

$$l_{wc} = \frac{T}{n \cdot \beta_f \cdot k_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c} + 1 см, \qquad (3.25)$$

де n – число швів, які приварюють елементи підсилення; n=4 для елементів підсилення з площею A_{rc} і n=2 для елементів підсилення з площею A_{rp} (рисунок 3.3); k_f – катет шва, який рекомендується приймати мінімальним (таблиця Б.3 додатока Б); β_f – коефіцієнт глибини провару; для ручного зварювання β_f=0,7; R_{wf} – розрахунковий опір металу шва, приймається залежно від типу електрода (таблиця Б.2 додаток Б).

$$l_{wc} = \frac{30{,}3}{4 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 18 \cdot 1 \cdot 1} + 1 = 2{,}2 см.$$

Приймаємо довжину шпонкового шва l_{wc}=50мм.

Умовна осьова сила:

$$N_{fic} = 0{,}5 \cdot A_{rc} \cdot R_{yr}; \qquad (3.26)$$

$$N_{fic} = 0{,}5 \cdot 9{,}6 \cdot 24 = 115{,}2 кН.$$

Довжину кінцевих ділянок шпонкових швів визначають за формулою (3.27):

$$l_{wk} = \frac{\left(T + N_{fic}\right)}{n \cdot \beta_f \cdot k_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c} + 1см \quad , \tag{3.27}$$

$$l_{wk} = \frac{26 + 115{,}2}{4 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 18 \cdot 1 \cdot 1} + 1 = 6{,}6см.$$

Приймаємо довжину кінцевої ділянки шва l_{wk} =70мм.

Відстань між шпонками у розтягненій зоні:

$$a_{wp} = 80 \cdot i_{rp}; \tag{3.28}$$

$$a_{wp} = 80 \cdot 0{,}23 = 18{,}4см.$$

Приймаємо a_{wp}=18см. Радіус інерції iгр та статичний момент S_{rp} елементів підсилення, розміщених у розтягненій зоні наведені в таблиці 3.2.

Зсувна сила в зварних швах розтягненої зони:

$$T_{rp} = \frac{Q_d \cdot S_{rp}}{I_{xn}} \cdot a_{wp}; \tag{3.29}$$

$$T_{rp} = \frac{63 \cdot 175{,}2}{11166{,}82} \cdot 18 = 17{,}8кН.$$

Довжина ділянки шва (шпонки):

$$l_{wp} = \frac{T_{rp}}{n \cdot \beta_f \cdot k_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c} + 1см \tag{3.30}$$

$$l_{wp} = \frac{17{,}8}{2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 18 \cdot 1 \cdot 1} + 1 = 2{,}6см \quad .$$

Приймаємо довжину шпонкового шва l_{wp}=50мм.

Умовна осьова сила:

$$N_{fic} = 0{,}5 \cdot A_{rp} \cdot R_{yr}; \tag{3.31}$$

$$N_{fic} = 0{,}5 \cdot A_{rp} \cdot R_{yr} = 0{,}5 \cdot 12 \cdot 24 = 144кН.$$

Довжина кінцевої ділянки шва:

$$l_{wp1} = \frac{T_{rp} + N_{fic}}{n \cdot \beta_f \cdot k_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c} + 1см; \quad (3.32)$$

$$l_{wp1} = \frac{17{,}8 + 144}{2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 18 \cdot 1 \cdot 1} + 1 = 14см.$$

10. Прогин балки від навантаження, що діє до та після підсилення. Оскільки при натурному обстеженні балок початковий прогин не виявлено, деформації балок від навантаження, що діяло до підсилння, визначається за формулою (3.33):

$$f_0 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{e0} \cdot l^4}{E \cdot I_{x0}}; \quad (3.33)$$

$$f_0 = \frac{5}{384} \cdot \frac{1{,}09 \cdot 10^{-2} \cdot 6^4 \cdot 10^8}{2{,}1 \cdot 10^4 \cdot 7080} = 0{,}12см.$$

де q_{e0} – експлуатаційне розрахункове значення навантаження до підсилення; Е=2,1·104кН/см² – модуль пружності сталі; I_{x0} – момент інерцій двотавра, що підсилюється (рисунок 3.1).

Прогин балки від навантаження, прикладеного після підсилення визначається за формулою (3.34):

$$f_g = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{er} \cdot l^4}{E \cdot I_{xn}}; \quad (3.34)$$

$$f_g = \frac{5}{384} \cdot \frac{26{,}44 \cdot 10^{-2} \cdot 6^4 \cdot 10^8}{2{,}1 \cdot 10^5 \cdot 11166{,}82} = 1{,}9см.$$

де q_{er} – експлуатаційне значення навантаження, що діє після підсилення; I_{xn} – момент інерції підсиленого перерізу балки (таблиця 3.2).

12. Прогин балки від приварювання елементів підсилення. Значення цього прогину визначається за формулою (3.35):

$$f_w = C \sum n_i \cdot y_i \cdot \alpha_i. \quad (3.35)$$

Параметр повздовжнього скорочення елементів від накладання шва:

$$V = 0{,}04 \cdot k_f^2; \tag{3.36}$$

$V = 0{,}04 \cdot 0{,}5^2 = 0{,}01;$

де kf=5мм – прийнятий катет кутового шва.

Коефіцієнт С визначається за формулою (3.37):

$$C = \frac{l_r(2l - l_r) \cdot V}{8 \cdot I_{xn}}, \tag{3.37}$$

де l – довжина балки; lr – довжина елементів підсилення (рисунок 3.1);

V – параметр повздовжнього зменшення елемента від накладання шва.

$$C = \frac{400(2 \cdot 600 - 400) \cdot 0{,}01}{8 \cdot 11166{,}82} = 0{,}0358.$$

Значення коефіцієнта α для швів, які прикріплюють елементи підсилення в стисненій зоні по формулі (3.38):

$$\alpha_c = \frac{l_{wc}}{a_{wc}}; \tag{3.38}$$

$$\alpha_c = \frac{5}{50} = 0{,}1.$$

Теж саме для швів у розтягненій зоні по формулі (3.39):

$$\alpha_p = \frac{l_{wp}}{a_{wp}}; \tag{3.39}$$

$$\alpha_p = \frac{5}{18} = 0{,}28.$$

Значення ni та yi наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Геометричні характеристики елементів підсилення та підсиленого перерізу балки

№ з/п	Позна-чення	Обчислення	Од. вим.	Значення
1	Arc	$2A_{y2} = 2 \cdot 4{,}8$	см²	9,6
2	Arp	$b \cdot t = 15 \cdot 0{,}8$	см²	12,0
3	hrc	$B_{y2} = 5$	см	5
4	hrp	$t = 0{,}8$	см	0,8
5	zrc	$z_{0y2} = 1{,}42$	см	1,42
6	zrp	$\frac{t}{2} = \frac{0{,}8}{2}$	см	0,4
7	Irc	$2I_{xy2} = 2 \cdot 11{,}2$	см⁴	22,4
8	Irp	$\frac{bt^3}{12} = \frac{15 \cdot 0{,}8^3}{12}$	см⁴	0,64
9	irc	$i_{rc} = 1{,}42$	см	1,42
10	irp	$\sqrt{\frac{I_{rp}}{A_{rp}}} = \sqrt{\frac{0{,}64}{12}}$	см	0,23
11	h1	$\frac{h_w}{2} - h_{rc} + z_{rc} = \frac{27{,}96}{2} - 5 + 1{,}42$	см	10,4
12	h2	$\frac{h}{2} + z_{rp} = \frac{30}{2} + 0{,}4$	см	15,4
13	y	$\frac{9{,}6 \cdot 12{,}4 - 12 \cdot 15{,}4}{46{,}5 + 9{,}6 + 12}$	см	0,8
14	yrc	$h_1 + y = 10{,}4 + 0{,}8$	см	11,2
15	yrp	$h_2 - y = 15{,}4 - 0{,}8$	см	14,6
16	yoc	$\frac{h}{2} - y_0 + y = \frac{30}{2} - 3{,}48 + 0{,}8$	см	12,32
17	yop	$\frac{h}{2} - y_0 - y = \frac{30}{2} - 3{,}48 - 0{,}8$	см	10,72

Продовження таблиці 3.2

18	Aос	$0,5(46,5-1,02(9,6-12))$	см²	24,474
19	Aор	$0,5(46,5+1,02(9,6-12))$	см²	22,026
20	Src	$A_{rc}\cdot y_{rc}=9,6\cdot 11,2$	см³	107,5
21	Srp	$A_{rp}\cdot y_{rp}=12,0\cdot 14,6$	см³	175,2
22	Ixn	$I_{x0}+A_0\cdot y^2+I_{rc}+A_{rc}\cdot y_{rc}^2+I_{rp}+A_{rp}\cdot y_{rp}^2=$ $7080+46,5\cdot 0,8^2+22,4+9,6\cdot 9,6^2+0,64+12\cdot 16,2^2$	см⁴	11166,82
23	y1	$y_{rc}+h_{rc}-z_{rc}=11,2+5-1,42$	см	14,78
24	y2	$y_{rc}-z_{rc}=11,2-1,42$	см	9,78
25	y3	$y_{rp}-z_{rp}=14,6-0,4$	см	14,2
26	ξ1	$\frac{M_0\cdot y_1}{I_{x0}\cdot R_{y0}}=\frac{3,69\cdot 100\cdot 14,78}{7080\cdot 23,5}$	—	0,033
27	ξ2	$\frac{M_0\cdot y_2}{I_{x0}\cdot R_{y0}}=\frac{3,69\cdot 100\cdot 9,78}{7080\cdot 23,5}$	—	0,022
28	ξ3	$\frac{M_0\cdot y_3}{I_{x0}\cdot R_{y0}}=\frac{3,69\cdot 100\cdot 14,2}{7080\cdot 23,5}$	—	0,032
29	n1	$1-\frac{1\cdot\ln(1-\xi_1)}{\ln 2}=1-\frac{1\cdot\ln(1-0,033)}{\ln 2}$	—	1,048
30	n2	$1-\frac{1\cdot\ln(1-\xi_2)}{\ln 2}=1-\frac{1\cdot\ln(1-0,022)}{\ln 2}$	—	1,032
31	n3	$1-\frac{1\cdot\ln(1-\xi_3)}{\ln 2}=1-\frac{1\cdot\ln(1-0,032)}{\ln 2}$	—	1,047

Прогин від приварювання елементів підсилення за формулою (3.35):

$$f_w=C\sum n_i\cdot y_i\cdot\alpha_i$$

$$f_w=0,0358\cdot(2\cdot 1,048\cdot 14,78\cdot 0,1+2\cdot 1,032\cdot 9,78\cdot 0,1-2\cdot 1,047\cdot 14,2\cdot 0,28)=-0,11.$$

Прогин від приварювання елементів підсилення виявився протилежного знака відносно до прогинів від дії навантажень.

13. Перевірка жорсткості підсиленої балки. Сумарний прогин визначається за формулою (3.40):

$$f = f_0 + f_g + f_w \ ; \tag{3.40}$$

$f = 0{,}12 + 1{,}9 - 0{,}11 = 1{,}91 см$.

Жорсткість балки перевіряється за формулою (3.41):

$$\frac{f}{l} \le \left[\frac{f}{l}\right]; \tag{3.41}$$

$\frac{f}{l} = \frac{1{,}91}{600} = 0{,}00317$.

Граничний відносний прогин *[f/l]* для балки настилу становить 1/250=0,004. Відносний прогин балки менший за граничний; отже, умова міцності виконується.