

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ СТАЛЕВИХ ЦЕНТРОВО-СТИСНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ

М. Г. Братусь, к. т. н., доц., М. В. Костенко, студ.

Ключові слова: сталеві стрижні, площа перерізу, питомий радіус інерції, квадратні труби, кутики, сталі підвищеної міцності

Актуальність. Для техніко-економічного обґрунтування проектних рішень бажано мати залежність маси (або площі) елементів сталевих конструкцій від величини зусиль, типу профілю та його тонкостінності, розрахункових довжин і міцності сталі.

Сутність проблеми. Аналіз конструктивних рішень сталевих центрово-стиснутих елементів зручно виконати за допомогою прямого методу підбору площі перерізу [2]. На стадії варіантного проектування для попереднього визначення площі поперечного перерізу центрово-стиснутих стрижнів працях [1; 2] коефіцієнт поздовжнього згину φ з обґрунтуванням межі використання за нормами [3] обчислюється за формулою:

$$\varphi = 1 - b_r \left(\frac{\lambda}{100} \right)^2, \quad (1)$$

$$\text{де: } b_r = 0,39 \cdot \frac{R_y}{21 \text{ кН} / \text{см}^2},$$

λ – гнучкість стрижня; R_y – розрахунковий опір сталі.

Відносно «старих норм» сталевих конструкцій [3], у ДБН [4] коефіцієнт φ (формула 1.4.4) враховує вплив форми поперечного перерізу більш уточнено з використанням трьох типів кривих стійкості a , b і c . У зв'язку з цим для використання прямого методу підбору площі перерізу [2] необхідно виконати корегування формули (1) та встановити межу її використання.

Обґрунтування розрахункових параметрів для використання прямого методу підбору площі. Виконані нами розрахунки показали, що для прямого методу підбору площі центрово-стиснутих стрижнів можна використати формулу (1), а типи кривих стійкості врахувати сталими коефіцієнтами k_0 . При цьому формула (1) для коефіцієнта φ набуває вигляду:

$$\varphi_H = \frac{1}{k_0} \left[1 - b_r \left(\frac{\lambda}{100} \right)^2 \right], \quad (2)$$

де: коефіцієнт $k_0 = 0,939$ і $k_0 = 1,12$ для типів кривих «а» і «с» відповідно.

Для гнучкостей $\lambda = 10 \dots 110$ і сталей С245...С375 похибки величини коефіцієнта φ , обчисленого за формулою (2) та за формулою 1.4.4 ДБН [4], наведено у таблиці 1.

Аналіз даних таблиці 1 показує, що формула (2) має достатню для практики точність у межах гнучкостей від $\lambda = 25$ до $\lambda = 85 \dots 105$ для сталей С245...С375. Межа використання формули (2) зменшується зі збільшенням міцності сталі.

Формула прямого методу підбору площі поперечного перерізу центрово-стиснутих стрижнів [2] з урахуванням одержаного коефіцієнта k_0 у формулі (2) набуває вигляду:

$$A = \frac{k_0 \cdot N \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c} + b_r \frac{l_{ef}^2}{\bar{i}^2} \quad (3)$$

де: l_{ef} – розрахункова довжина,

$\bar{i} = i / \sqrt{A}$ – питомий радіус інерції, i – радіус інерції.

Похибки (%) величини коефіцієнта φ для сталей С245...С375

λ	Тип кривої стійкості							
	«а»				«с»			
	С 245	С275	С345	С375	С 245	С275	С345	С375
10	4,89	4,96	5,10	5,15	-10,41	-10,20	-9,79	-9,61
15	5,39	5,46	5,58	5,62	-8,74	-8,45	-7,89	-7,65
20	5,69	5,73	5,77	5,79	-7,21	-6,85	-6,18	-5,89
25	5,78	5,77	5,71	5,67	-5,80	-5,40	-4,62	-4,29
30	5,69	5,62	5,41	5,30	-4,51	-4,06	-3,20	-2,83
35	5,43	5,28	4,90	4,72	-3,30	-2,81	-1,87	-1,46
40	5,03	4,79	4,23	3,99	-2,17	-1,63	-0,62	-0,18
45	4,50	4,18	3,45	3,15	-1,09	-0,52	0,57	1,04
50	3,88	3,47	2,61	2,27	-0,06	0,55	1,69	2,18
55	3,19	2,72	1,78	1,43	0,92	1,56	2,72	3,20
60	2,47	1,97	1,00	0,67	1,85	2,50	3,59	4,00
65	1,77	1,26	0,31	-0,01	2,71	3,33	4,21	4,45
70	1,10	0,60	-0,35	-0,72	3,46	3,99	4,43	4,37
75	0,50	0,01	-1,11	-1,68	4,04	4,38	4,08	3,51
80	-0,06	-0,60	-2,19	-3,23	4,37	4,39	2,92	1,61
85	-0,64	-1,34	-3,95	-5,80	4,36	3,87	0,72	-1,65
90	-1,34	-2,41	-6,76	-9,85	3,86	2,66	-2,82	-6,58
95	-2,33	-4,07	-11,05	-15,87	2,76	0,56	-7,98	-13,56
100	-3,83	-6,60	-17,23	-24,32	0,88	-2,61	-15,07	-22,93
105	-6,06	-10,30	-25,72	-35,68	-1,93	-7,09	-24,43	-35,07
110	-9,27	-15,47	-36,94	-50,43	-5,86	-13,09	-36,38	-50,38

Відповідні розрахунки з використанням сортamentів рівнополічних кутиків та квадратних труб показали, що величина питомого радіуса інерції \bar{i} здебільшого залежить від «тонкостінності» профілю k_W , тобто:

$$\bar{i} = k \cdot k_W, \quad (4)$$

де: $k_W = h_0 / t_W$ (рис. 1);

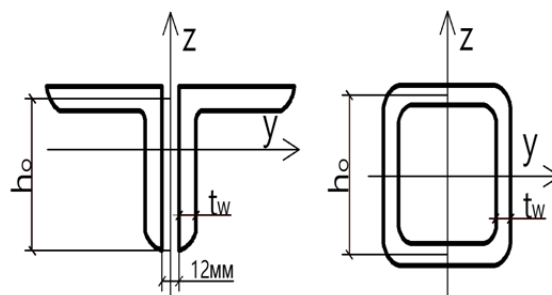


Рис. 1. Параметри поперечного перерізу

Наприклад, для перерізу з парних рівнополічних кутиків:

$$\bar{i}_Y^2 = 0,0255 \cdot k_W; \quad (5)$$

$$\bar{i}_Z^2 = 0,055 \cdot k_W; \quad (6)$$

Для перерізу з квадратної труби:

$$\bar{i}_Y^2 = \bar{i}_Z^2 = 0,042 \cdot k_W; \quad (7)$$

Порівняльні розрахунки величини питомого радіуса інерції \bar{i} показали, що похибка коефіцієнта k у формулі (4) порівняно з даними сортаменту не перевищує:

- для кутиків відносно осі y – 1,5 %;
- для кутиків відносно осі z – 5 % в межах кутиків із шириною полиць 63...125 мм, та в окремих випадках до 12 % (товщина фасонки прийнята умовно 12 мм);
- для квадратної труби відносно осей y і z – 2,3 %.

Аналіз сортаменту рівнополичних кутиків за ГОСТ 8509-86 з шириною полиць від 50 мм до 250 мм показує, що параметр k_W знаходиться у межах $k_W = 7...16$. Для квадратної труби за ТУ 36-2287-80 параметр k_W змінюється в межах $k_W = 15...40$. Квадратні труби з товщиною стінки 5...6 мм, як правило, використовуються для основних елементів (параметр $k_W = 20$), для другорядних елементів використовують труби з товщиною стінки 3...4 мм (параметр $k_W = 30$).

Розв’язання задачі. Розглянемо, з використанням прямого методу підбору (3), залежність величини площі перерізу від поздовжнього зусилля, типу профілю та його тонкостінності, розрахункових довжин і міцності сталі.

Перевага квадратних труб порівнянню з парними кутиками. На рисунку 2 наведено порівняння величини площі поперечних перерізів елементів із парних рівнополичних кутиків та квадратних труб. Розрахункова довжина призначена $l_{ef,y} = 3$ м як для верхнього поясу крокв’яних ферм типових серій, а параметр $k_W = 14$ як для кутиків типової серії 1.460.2-10.

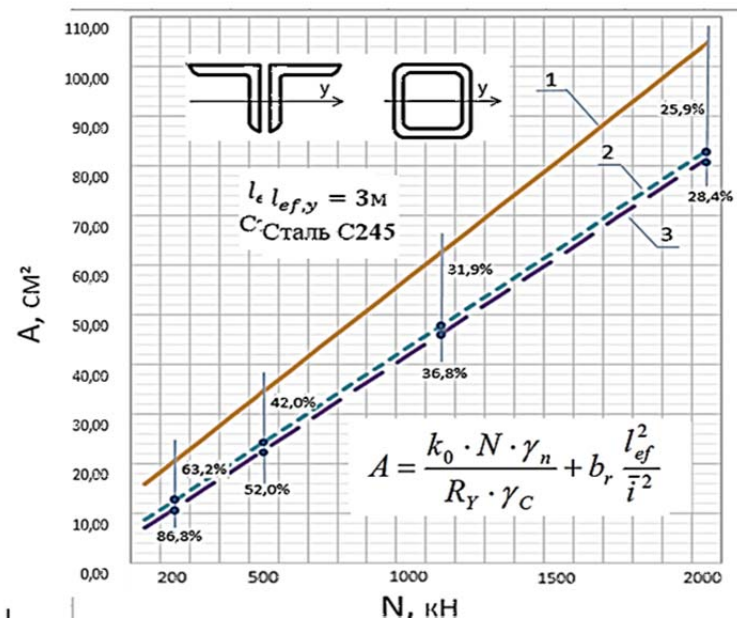

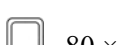

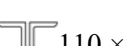

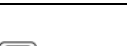
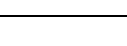

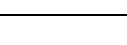
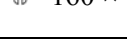


Рис. 2. Площа перерізу кутиків і квадратних труб та переваги Π , % квадратних труб:
 1 – рівнополичні кутики $k_W = 14$, $k_0 = 1,12$, 2 – квадратні труби $k_W = 20$, $k_0 = 0,939$,
 3 – квадратні труби $k_W = 30$, $k_0 = 0,939$

Для підтвердження правильності одержаних порівняльних результатів, виконаних за формулою (3) та наведених на рисунку 2, виконаємо приклади підбору площі перерізу за нормами [4] з використанням сортаментів кутиків та труб.

Приклади підбору площі центрово-стиснутих стрижнів $l_{ef,y} = 3$ м та переваги Π , %
квадратних труб

N, кН	Переріз	$\frac{A_{TP}}{k_W}$	$\frac{A, \text{см}^2}{i, \text{см}}$	$\frac{\lambda}{\bar{\lambda}}$	φ	$\frac{N}{A}$	$\varphi \cdot R_Y,$ кН/см ²	$\Pi,$ %
200	 90 × 6	$\frac{20,56}{14,5}$	$\frac{21,2}{2,78}$	$\frac{107,9}{3,67}$	0,450	9,43	10,8	
	 80 × 5	$\frac{15,0}{15}$	$\frac{15,36}{3,07}$	$\frac{97,7}{3,33}$	0,631	13,02	15,14	38
	 100 × 3	$\frac{11,0}{32,0}$	$\frac{11,64}{3,96}$	$\frac{75,7}{2,58}$	0,788	17,18	18,91	82
500	 110 × 8	$\frac{34,45}{13,25}$	$\frac{34,4}{3,39}$	$\frac{88,5}{3,04}$	0,560	14,5	13,3	
	 125 × 8	$\frac{34,45}{15,1}$	$\frac{39,4}{3,87}$	$\frac{77,5}{2,64}$	0,628	12,6	15,07	
	 120 × 6	$\frac{24,32}{19,0}$	$\frac{27,36}{4,66}$	$\frac{64,4}{2,19}$	0,852	18,27	20,44	44
	 140 × 5	$\frac{22,73}{27,0}$	$\frac{27,0}{5,51}$	$\frac{54,4}{1,86}$	0,893	18,51	21,43	46
1000	 140 × 10	$\frac{57,78}{13,5}$	$\frac{54,6}{4,33}$	$\frac{69,33}{2,36}$	0,679	18,31	16,29	
	 160 × 10	$\frac{57,78}{15,5}$	$\frac{62,8}{4,96}$	$\frac{61,5}{2,06}$	0,734	15,9	17,61	
	 160 × 8	$\frac{51,43}{19,0}$	$\frac{48,64}{6,21}$	$\frac{48,3}{1,64}$	0,916	20,6	21,98	29

Приклад обчислення збільшення площі перерізу кутиків покажемо при зусиллі $N = 200$ кН:

- квадратна труба 80 × 5мм, $k_W = 15,0$; $\Pi = \frac{21,2 - 15,36}{15,36} \cdot 100 \% = 38 \%$;
- квадратна труба 100 × 5мм, $k_W = 32,0$; $\Pi = \frac{21,2 - 11,64}{11,64} \cdot 100 \% = 82 \%$;

Градація сортаменту дає деякі відхилення від запланованого на рисунку 2 параметра тонкостінності k_W .

Переваги використання сталей підвищеної міцності. Розрахунки за формулою (3) дозволяють попередньо оцінити доцільність застосування сталей підвищеної міцності, результати таких розрахунків для сталей С245, С275 та С345 при зусиллях 200...2000 кН наведено на рисунку 3.

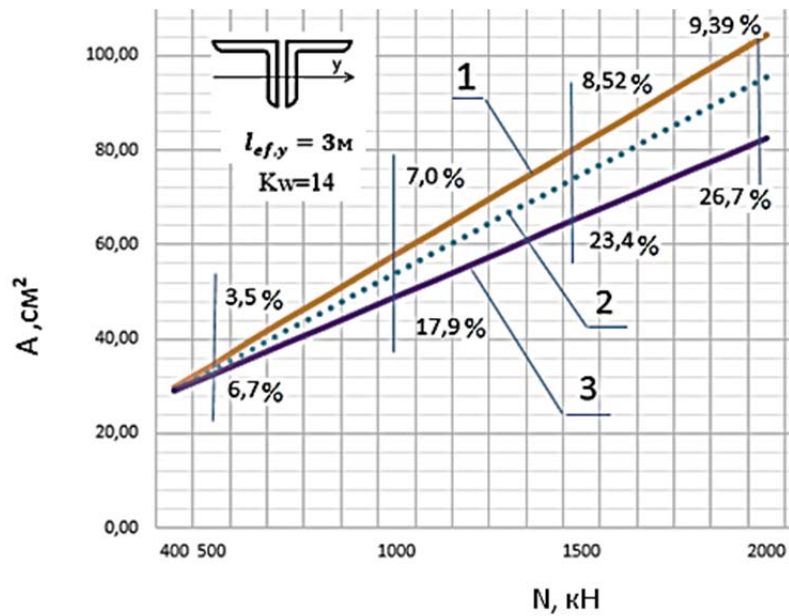


Рис. 3. Залежність величини площі поперечного перерізу від міцності сталі та зусиль N :
 1 – сталь С245; 2 – сталь С275; 3 – сталь С 345

Видно, що ефективність сталей підвищеної міцності зростає зі збільшенням міцності та поздовжнього зусилля. Наприклад, при зусиллі 1000 кН площа поперечного перерізу кутиків зі сталі С245 буде більшою, ніж зі сталі С345 на 18 %. Проте остаточно економічну доцільність установлюють з урахуванням ціни прокату, вартості виготовлення, технологічних умов, умов експлуатації тощо.

Вплив параметра тонкостінності k_w на величину площі поперечного перерізу рівнополічних кутиків. Розглянемо, як впливає параметр тонкостінності k_w на величину площі поперечного перерізу. На рисунку 4 за допомогою формули (3) наведено приклад обчислення площі стрижнів із парних кутиків із розрахунковою довжиною $l_{ef,y} = 3\text{ м}$. Вплив параметра k_w на збільшення площі наведено у відсотках відносно кутиків з $k_w = 16$.

Видно, що при зусиллі більше 1 000 кН тонкостінність кутика мало впливає на величину площі поперечного перерізу, а при невеликих зусиллях, наприклад 200 кН і $k_w = 10$, площа поперечного перерізу буде вже більшою на 20 – 40 % порівняно з тонкостінними кутиками.

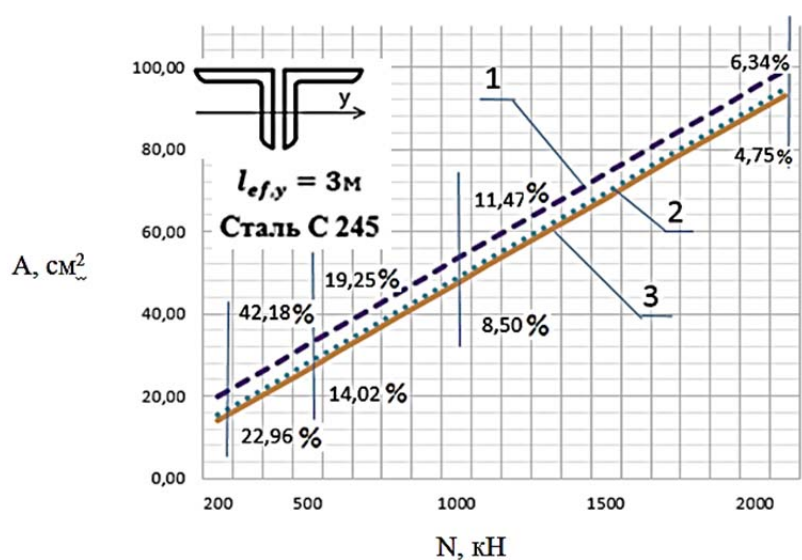


Рис. 4. Залежність величини площі поперечного перерізу від тонкостінності k_w та зусилля N : 1 – $k_w = 10$; 2 – $k_w = 14$; 3 – $k_w = 16$

Висновки. 1. Аналіз конструктивних рішень сталевих центрово-стинутих стрижнів виконано з використанням прямого методу підбору площі. Виконані розрахунки на прикладі панелі верхнього поясу кроквяної ферми з розрахунковою довжиною $l_{ef,y} = 3$ м дають можливість установити таке:

- ефективність квадратних труб відносно до рівнополічних кутиків залежить від величини зусилля N і збільшується зі зменшенням величини зусилля, наприклад, за зусилля 200 кН площа кутиків збільшується на 60...80 %.

- сталі з підвищеною міцністю, наприклад С345, слід використовувати за поздовжніх зусиль N більших, ніж 1 000 кН.

- для кутиків вплив параметра тонкостінності k_{σ} на величину площі перерізу проявляється за зусиль менших, ніж 1 000 кН.

2. Для використання прямого методу підбору площі виконано корегування формули для обчислення коефіцієнта поздовжнього згину φ . Обґрунтовано, відповідно до діючих Норм сталевих конструкцій, числове значення коефіцієнтів корегування k_0 для двох типів кривих стійкості «а» та «с».

3. Одержаний нами коефіцієнт k_0 показує, що переріз із рівнополічних кутиків, підібраний за нормами [3], матиме на 10 % меншу несучу здатність, ніж за Нормами [4].

4. На основі аналізу сортаменту квадратних труб одержано числове значення коефіцієнта $k = 0,042$ у формулі (4) для питомого радіусу інерції.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Лихтарников Я. М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – М. : Стройиздат, 1979. – 319 с.
2. Братусь Н. Г. Закономерности изменения массы несущих конструкций покрытия и их элементов / Н. Г. Братусь // Вісник Придніпр. держ. акад. будівн. та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2004. – № 9. – С. 15 – 22.
3. Стальные конструкции. СНиП II – 23 – 81* – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
4. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. ДБН В.2.6-163:2010. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 14 с.

SUMMARY

Relevance. Weight (or area) of the steel elements of constructs is the main criterion for substantiation of the design decision.

Essence of the problem and substantiation of the design decision. Analysis of constrictive solutions of centrally-compressed elements fulfilled by using the method of direct selection of cross-sectional area with correction of the known formula for longitudinal bending coefficient calculation. Approved that for flexibility $\lambda = 10...115$ and steel C245...C375 the corrected formula of longitudinal bending coefficient is sufficient accuracy within the limits from $\lambda = 25$ to $\lambda = 85...105$ for steel C245...C375. By using the analysis of assortment of stiffeners and square tubes fulfilled approximate formulas for the specific radius of gyration calculation.

Research objective. By using the formula of the direct method for selecting the area of the centrally-compressed steel rods fulfilled the analysis of the advantages of square tubes in comparison to coupled stiffeners, the steels of additional strength have been provided efficient as well as the usage of the stiffeners with the high degree of wall thinness. Calculation were made for the centrally-compressed steel rods under computation length $l_{ef,y} = 3$ m and elongated efforts $N = 200...2000$ kN, appropriate diagrams were shown.

Conclusion. By using the practice of the direct method for selecting the area the fulfilled calculation gave an opportunity to make such point as:

- The advantages of square tubes in comparison to coupled stiffeners depend on elongated efforts N and increasing by amount of efforts decreasing, for example, under the efforts 200 kN the cross-sectional area of coupled stiffeners increases by 60...80 %;

- The steels of additional strength have to be used under elongated efforts N more than 1000 kN;
- The influence of the wall thickness parameter on the stiffeners can be significant under the elongated efforts less than 1000 kN.

REFERENCES

1. Lihtarnikov Y. M. Variantnoe proektyrovanye y optymizatsiya stalnykh konstruktsyya. – M. : Storoysdat, 1979. – 319 с.
2. Bratys N. G. Zakonomernosty yzmenenya masy nesychykh konstryksyy pokrytya y ih elementov / N. G. Bratys // Vysnyk Prudnipr. derg. akad. bydivn. ta arhitektyry. – D. :PDABA, 2004. – № 9. – S. 15 – 22.
3. Stalnyy konstryksyy. SNyP II – 23 – 81*. – M. : TSYTP, Hosstroya SSSP, 1990. – 96 s.
4. Stalevy konstryksyy. Normy proektyrovanya, vyhotovlannya y montagy. DBN V.2.6-163:2010. – K. : Mynrehyonbyd Ukrainy, 2011. – 14 s.