

УДК 624.014.2

В.О.СЕМКО, канд. техн. наук, Д.А.ПРОХОРЕНКО
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

ДО РОЗРАХУНКУ СТИСНУТИХ ТОНКОСТІННИХ ГНУТИХ МЕТАЛЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Проведено порівняння розрахунків центрально-стиснутих тонкостінних гнутих металевих елементів за методиками, наведеними в проекті ДСТУ-Н Б А.2.2 та європейських нормах EN 1993-1-3 на прикладі розрахунку короткої стійки із С-подібного профілю.

Проведено сравнение расчетов центрально-сжатых тонкостенных гнутых металлических элементов по методикам, представленным в проекте ДСТУ-Н Б А.2.2 и евро-нормах EN 1993-1-3 на примере расчета короткой стойки из С-образного профиля.

Comparison of calculations central-compressed thin-walled cold-formed metal elements is performed in the article. Techniques are presented in project DSTU-N A.2.2 and euronorms EN 1993-1-3. Calculation is executed on an example of a short rack of the C-shaped profile.

Ключові слова: тонкостінні конструкції, стійки.

Сьогодні в Україні збільшується кількість європейських та вітчизняних виробників холодногнутих і холоднокатаних сталевих конструкцій. Але їх застосування у якості несучих конструкцій у більшості випадків є неможливим через відсутність в державі норм, що регламентують їх розрахунок.

В країнах Заходу даний тип конструкцій має широке впровадження і відображений в євронормах [1, 2]. Відомі праці з порівняння методів проектування холодноформованих конструкцій за європейськими та американськими нормами [6]. В Росії дослідження легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК) проводиться за рахунок виробників цих конструкцій зі створенням рекомендацій або стандартів організацій. Досить суттєвий вклад у розвиток ЛСТК в Росії роблять дослідники ЦНДІПСК (м.Москва) [5] і СПДАБУ (м.Санкт-Петербург) [4]. В Україні також розпочинається процес нормоутворення із залученням компаній-виробників ЛСТК [3].

Проект ДСТУ [3], розроблений фахівцями НДІБК, за своєю формою в частині розрахунку конструкцій повністю відтворює рекомендації [4]. Основним недоліком обох документів є те, що вони створені під конкретні профілі одного виробника і не містять вказівок, щодо використання профілів інших виробників. Особливою проблемою є методика визначення редуктованих характеристик перерізів.

Метою даної статті є розрахунок редуктованих площ деяких С-профілів, наведених в [3], за методикою євронорм [1, 2] та виконати порівняння несучої здатності коротких С-профілів за методиками, на-

веденими в [1, 3].

Робота виконана шляхом порівняння теоретичних способів розрахунку несучої здатності центрово-стиснутих елементів з урахуванням можливості втрати місцевої стійкості за [1, 3] і розрахунку реальної С-подібної короткої стійки із тонкостінного профілю

Згідно з [1], розрахунок на міцність елементів із профілів на центральний стиск слід виконувати за формулою

$$\frac{N}{A_c} \leq R_y \gamma_c, \quad (1)$$

де N – величина центрово-прикладеної сили; $\gamma_c = 0,75$ – коефіцієнт умов роботи; A_c – редукована (зменшена) площа перерізу профілю за таблицями А.2-А.5 [3]; R_y – розрахунковий опір металу елемента на стиск за межею текучості.

За [1], існує два випадки розрахунку стиснутих елементів ЛСТК на міцність:

- при зменшеному внаслідок місцевої та/або повної втрати стійкості перерізі:

$$\frac{N}{A_{eff}} \leq \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}}, \quad (2)$$

де A_{eff} – ефективна площа перерізу профілю, що визначається згідно [1]; γ_{M0} – коефіцієнт надійності, що рекомендовано приймати рівним 1,00 або згідно національних стандартів;

- якщо ефективна площа перерізу дорівнює зменшеній (за винятком можливості втрати місцевої або загальної стійкості):

$$\frac{N}{A_g} \leq f_{yb} + \left(f_{yb} + (f_{ya} - f_{yb}) 4 \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{eff}} \right) \right) / \gamma_{M0}, \quad (3)$$

де A_g – повна площа перерізу профілю, що визначається згідно з [1]; f_{yb} – умовна межа текучості металу елемента; f_{ya} – середнє значення межі текучості після холодного формування, що визначається в результаті натурних випробувань після холодного формування або, як альтернатива, за формулою

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \frac{k \cdot n \cdot t^2}{A_g}, \text{ але } f_{ya} \leq \frac{(f_u + f_{yb})}{2}, \quad (4)$$

де f_u – межа міцності металу профілю на розтяг; k – коефіцієнт, що залежить від виду формування: $k=7$ – для формування при прокатуванні, $k=5$ – для інших видів формування; n – кількість згинів на 90° з

внутрішнім радіусом $r \leq 5t$ у поперечному перерізі (якщо кут гину не дорівнює 90° , то згин враховується як пропорційна частка від гину на 90°); t – розрахункова товщина сталі до холодного формування, не враховуючи металеве та органічне покриття; λ – гнучкість елемента, що відповідає найбільшому відношенню λ / λ_{el} :

- для плоских елементів $\lambda = \bar{\lambda}_p$ і $\lambda_{el} = 0,673$, де $\bar{\lambda}_p$ – умовна гнучкість плоского елемента, визначається згідно з [1];

- для елементів, посилені елементами жорсткості $\lambda = \bar{\lambda}_d$ і $\lambda_{el} = 0,65$, де $\bar{\lambda}_d$ – умовна гнучкість елемента жорсткості, визначається згідно з [1].

Визначення геометричних характеристик та характеристик гнучкості ефективної зони перерізу згідно з [1] проводиться в три етапи.

1 *етап*: визначається початковий ефективний переріз елемента жорсткості з використанням ефективних довжин, які визначаються з урахуванням припущення, що елемент жорсткості має повне защемлення і

$$\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0}, \quad (5)$$

де $\sigma_{com,Ed}$ – нормальні напруження від стиску в елементі.

Згідно з [1], для стінки та полицки перерізу (рис.1-3):

$$b_{e1} = b_{e2} = \rho \cdot b_p / 2, \quad c_{e1} = c_{e2} = c_{eff} / 2 = \frac{\rho \cdot b_{p,c}}{2}, \quad (6)$$

де ρ – коефіцієнт, що враховує втрату стійкості плоского елемента і залежить від його умовної гнучкості $\bar{\lambda}_p$;

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ при } \bar{\lambda}_p > 0,673, \text{ коли } (3 + \psi) \geq 0,$$

$$\text{або } \rho = 1 \text{ при } \bar{\lambda}_p \leq 0,673;$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b} / t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}, \quad (7)$$

де \bar{b} – розрахункова ширина розглядуваного елемента (згідно з [1]); t – товщина стінки; k_σ – коефіцієнт втрати стійкості, що залежить від пропорційності напруг ψ та граничних умов за табл.4.1 (для стінки та полицки) і табл.4.2 [1] (для розрахунку крайового звису);

$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}. \quad (8)$$

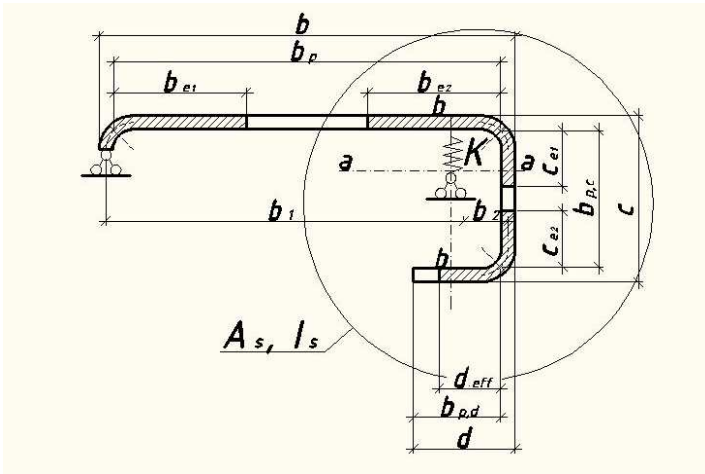


Рис.1 – Розрахункова схема перерізу

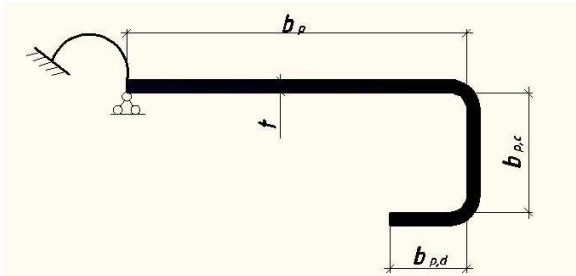


Рис.2 – Повний поперечний переріз та граничні умови

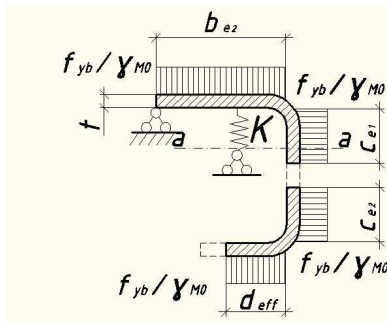


Рис.3 – Ефективний поперечний переріз та епюра нормальних напружень при $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0}$

При центральному стиску (навантаження вважаємо рівномірно розподіленим по всій площі перерізу стійки) $\psi = 1$.

Ефективна ширина крайового звису:

$$d_{\text{eff}} = \rho \cdot b_{p,d}, \quad (9)$$

де $\rho = \frac{\lambda_p - 0,0188}{\bar{\lambda}_p^2}$ при $\bar{\lambda}_p > 0,748$, коли $(3 + \psi) \geq 0$,

або $\rho = 1$ при $\bar{\lambda}_p \leq 0,748$.

$\bar{\lambda}_p$ – визначається аналогічно, як для полицки та стінки, коефіцієнт k_σ потрібно приймати за табл.4.2 з [1].

2 етап: для визначення початкового значення коефіцієнта χ_d зниження несучої здатності з урахуванням втрати стійкості форми перерізу (згинальна форма втрати стійкості крайового елемента жорсткості) використовується початковий ефективний переріз елемента жорсткості та припущення про неперервну пружно-податливу опору.

$$\chi_d = 1,0 \text{ при } \bar{\lambda}_d \leq 0,65, \quad (10)$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d \text{ при } 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38, \quad (11)$$

$$\chi_d = 0,66 / \bar{\lambda}_d \text{ при } \bar{\lambda}_d \geq 1,38. \quad (12)$$

Для випадку розрахунку стійки із С-подібного профілю

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}}, \quad (13)$$

де $\sigma_{cr,s}$ – критичне напруження нижче межі пружності (межа текучості) крайового звису профілю, що визначається за [1] залежно від форми перерізу профілю (рис.4).

Для С-подібного профілю:

$$\sigma_{cr,s} = (2\sqrt{KEI_s}) / A_y, \quad (14)$$

де K – жорсткість в'язи на одиницю довжини, визначається за [1], для випадків, коли елементи жорсткості являють собою відгини С-подібних або Z-подібних профілів, жорсткість K визначається за формулою

$$K = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f}, \quad (15)$$

де $E=2,1 \times 10^5$ Н/мм² – модуль пружності металу профілю; $\nu=0,3$ – коефіцієнт Пуассона; b_1 – відстань від перетину стінки та полиці до центру ваги ефективної площі крайового відгину (включаючи ефекти-

вну частину полиці b_{e2}), для полиці 1; b_2 – відстань від перетину стінки та полиці до центру ваги ефективної площі крайового відгину (включаючи ефективну частину полиці), для полиці 2; при центральному стиску, $b_1=b_2$; h_w – висота стінки; k_f – коефіцієнт, що враховує симетричність прикладання навантаження відносно поздовжньої осі, для випадку центрального стиску $k_f=1$; I_s – ефективний момент інерції відгину, визначений за ефективною площею A_s відносно центральної осі $a-a$ ефективного поперечного перерізу

$$A_s = t(b_{e2} + c_{e2} + c_{e1} + d_{eff}). \quad (16)$$

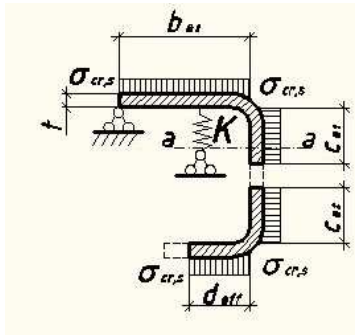


Рис. 4 – Критичні напруження $\sigma_{cr,s}$ в пружній стадії для ефективної площі A_s елемента жорсткості з етапу 1

3 етап: для ітераційного уточнення коефіцієнта χ_d зниження несучої здатності з урахуванням втрати стійкості форми перерізу (згинальна форма втрати стійкості крайового елемента жорсткості – рис.5), приймають:

$$\sigma_{com,Ed,i} = \chi_{d,(i-1)} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0}. \quad (17)$$

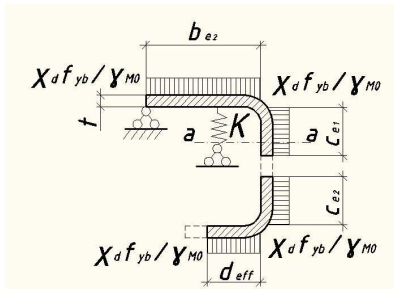


Рис.5 – Знижена міцність $\chi_d \cdot f_{yb} / \gamma_{M0}$ елемента жорсткості для першої ітерації

Далі ведуть розрахунок відповідно до етапів 1 і 2. При цьому у випадку $\chi_{d,1} < 1,0$ визначаючи значення коефіцієнта ρ , для визначення зменшеної ширини елементів, умовну гнучкість плоского елемента $\bar{\lambda}_p$ заміняють на

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}}, \quad (18)$$

тобто

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d}. \quad (19)$$

Ітерація проводиться, поки $\chi_{d,n} \approx \chi_{d,(n-1)}$, але $\chi_{d,n} < \chi_{d,(n-1)}$ (рис.6).

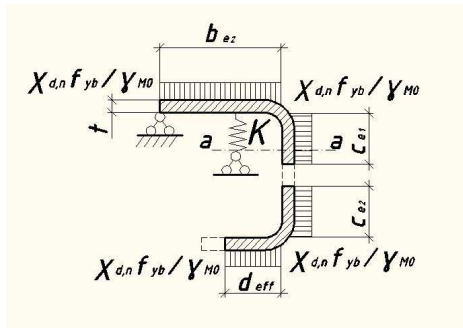


Рис.6 – Знижена міцність $\chi_{d,n} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0}$ елемента жорсткості після останньої ітерації

Зменшена ефективна площа елемента жорсткості визначається за результатами останньої ітерації:

$$A_{s,red} = \chi_d \cdot A_s \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}}. \quad (20)$$

Визначається зменшена товщина всіх складових елемента жорсткості (рис.7)

$$t_{red} = t \frac{A_{s,red}}{A_s}. \quad (21)$$

Остаточо

$$A_{eff} = 2t_{red} (b_{e1} + b_{e2} + c_{e1} + c_{e2} + d_{eff}), \quad (22)$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}}. \quad (23)$$

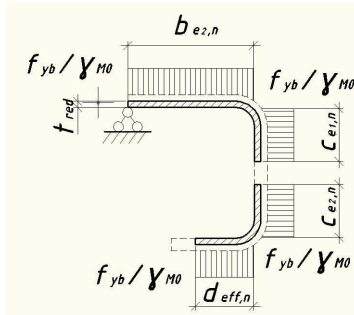


Рис.7 – Эффективный поперечный переріз та зменшена товщина перерізу

Для виконання порівняння несучої здатності елементів були обрані профілі типу ПГС із геометричними характеристиками представленими в табл.А.5 [3]. Для розрахунку за методикою [1] значення редукованих площ були обраховані за наведеною вище методикою. При розрахунку за методикою [3] всі геометричні характеристики приймалися відповідно табл.А.5 [3]. Результати розрахунку представлені в таблиці.

Результати розрахунку С-подібних профілів за [1, 3]

Профіль	Товщина, мм	Площа редукована			Несуча здатність		
		за [1], см ²	за [3], см ²	[1] до [3], %	за [1], кН	за [3], кН	[1] до [3], %
ПГС-70	1,5	2,10	2,50	-18,92	79,89	71,25	10,81
ПГС-95	1,5	2,16	2,50	-15,98	81,91	71,25	13,01
ПГС-100	1,5	2,16	2,50	-15,59	82,19	71,25	13,31
ПГС-150	1,0	1,14	1,00	-12,49	43,42	28,50	34,37
	1,5	2,21	2,49	-12,77	83,91	70,97	15,43
	2,0	4,29	3,40	20,79	125,17	96,90	40,59
ПГС-200	1,0	1,15	1,40	-21,48	43,67	39,90	8,62
	1,5	2,23	2,90	-30,03	84,75	82,65	2,48
	2,0	3,35	3,40	-1,56	127,22	96,90	23,83

Порівнюючи отримані значення редукованих площ розглядуваних перерізів, можна відмітити досить суттєву різницю між результатами, отриманими відповідно до [1] і наведеними в [3], причому значення, отримані згідно з європейськими нормами, мають менші величини в середньому на 20%. В той же час несуча здатність елементів, розрахованого згідно з Єврокодом 3-1-3, більша в середньому на 10%, що можна пояснити наявністю коефіцієнта умов роботи 0,75 в проекті

ДСТУ [3]. Все це дозволяє зробити висновок, що створення норм для розрахунку легких сталевих конструкцій в Україні ще на самому початку і потребує більш детальних експериментальних та теоретичних досліджень.

1.EN 1993-1-3:2004. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. – Brussels: CEN, 2004. – 125 p.

2.EN 1993-1-5:2004. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements. – Brussels: CEN, 2004. – 53 p.

3.Проект ДСТУ - Н Б А.2.2-XXX-200X. Настанова з проектування конструкцій будинків із застосуванням сталевих тонкостінних профілів. – К.: НДБК, 2009. – 73 с.

4.Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутих профилей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23. – СПб.: СПГАСУ, 2006. – 24 с.

5.Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутих стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балт - Профиль». – М.: ЦНИИПСК, 2006. – 69 с.

6.Gherzi A., Landolfo R. and Mazzolani F.M. Design of Metallic Cold-formed Thin-walled Members. – New York: Spoon Press, 2002. – 174 p.

Отримано 23.11.2009

УДК 624.012

О.І.ЛАПЕНКО, канд. техн. наук

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

СТИСНУТІ ЕЛЕМЕНТИ ЗІ СТАЛЕВИХ ДВОТАВРІВ ІЗ БОКОВИМИ ПОРОЖНИНАМИ, ЗАПОВНЕНИМИ ПРИКЛЕСНИМ ДО СТАЛІ БЕТОНОМ

Наведено результати експериментальних досліджень стиснутих елементів із сталевих двотаврів з боковими порожнинами, заповненими під час виготовлення приклеєним до сталі бетоном. Зроблено висновок про сумісну роботу бетону і сталі в конструкції на всіх етапах завантаження.

Приведены результаты экспериментальных исследований сжатых элементов из стальных двутавров с боковыми пустотами, заполненными во время изготовления приклеенным к стали бетоном. Сделан вывод о совместной работе бетона и стали в конструкции на всех этапах загрузки.

The results of experimental research of compressed elements made of steel double T beams with side hollows filled with concrete glued to steel in the process of production have been given.

Ключові слова: сталезалізобетонні конструкції, двотаври, стиснуті елементи, несуча здатність, акриловий клей.

Останнім часом широкого розповсюдження в будівництві отримали сталезалізобетонні конструкції [2, 3]. Однак для забезпечення сумісної роботи бетону і сталі застосовують складні анкерні засоби, які