

УДК 624.014.2

ДО РОЗРАХУНКУ ЗГИННИХ ХОЛОДНОФОРМОВАНИХ СТАЛЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

К РАСЧЕТУ ИЗГИБАЕМЫХ ХОЛОДНОФОРМОВАННЫХ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

TO THE QUESTION OF COLD-FORMED STEEL FLEXURAL ELEMENTS DESIGN

Семко В.О., к.т.н., Прохоренко Д.А., аспірант (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка)

Семко В.А., к.т.н., Прохоренко Д.А., аспирант (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка)

Semko V., PhD, Prokhorenko D., postgraduate student (Poltava national technical Yuri Kondratyuk university)

У роботі запропоновано спрощену інженерну методику попереднього визначення міцності перерізів холодноформованих сталевих профілів при згині в усіх площинах на основі аналізу емпіричних залежностей їх ефективних геометричних характеристик від параметрів перерізу.

В работе предложена упрощенная инженерная методика предварительного определения прочности сечений холодноформованных стальных профилей при изгибе во всех плоскостях на основе анализа эмпирических зависимостей их эффективных геометрических характеристик от параметров сечения.

In the paper a simplified approach for rough design of cold-formed steel sections under bending is proposed. The method is based on the analysis of the empirical dependences of sections' effective geometrical characteristics on their parameters.

Ключові слова:

Холодноформовані сталеві профілі, Єврокод, спрощений розрахунок.
Холодноформованные стальные профили, Еврокод, упрощенный расчет.
Cold-formed steel profiles, Eurocode, simplified design.

Постановка проблеми у загальному вигляді та аналіз стану питання.
Легкі сталеві тонкостінні конструкції (ЛСТК) отримують все більш широке

застосування в практиці будівництва України. Також, на сьогодні вже зведено значну кількість об'єктів, у зв'язку з чим все частіше постає необхідність в їх обстеженнях та ремонтах. У той же час, ще недавно в нашій країні не було нормативного документу з розрахунку елементів [1] та проектування ЛСТ конструкцій, що часто призводило до ігнорування проектувальниками та будівельниками особливостей розрахунку, конструювання та монтажу таких конструкцій. Тому все частіше виникають випадки [2], коли крім проектування нових об'єктів, необхідно проводити оцінку міцності та деформативності елементів існуючих конструкцій.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Під терміном "ЛСТК" прийнято вважати сталеві профілі, утворені методом холодного прокатування або гину тонкої сталевий стрічки. Розрахунок таких елементів ґрунтується на використанні замість повних перерізів профілів так званих "ефективних перерізів", в яких відсутні ті частини перерізу, які можуть втратити місцеву стійкість. Алгоритм визначення параметрів таких перерізів є достатньо складним та потребує значних витрат часу [3, 4]. Визначення ефективного перерізу кожного окремо взятого тонкостінного профілю при згині та/або стисканні вимагає обчислення декількох десятків величин.

При проектуванні чи перевірочних розрахунках ЛСТ профілів часто необхідно підбирати значну кількість перерізів профілів. При цьому може виникати необхідність у зміні конструктивної схеми, підборі і порівнянні декількох варіантів, оптимізації конструктивного рішення і так далі. Це призводить до зміни параметрів профілів (довжини, умов закріплення, наявності зв'язків тощо) і навантажень, і, внаслідок цього, до необхідності нового підбору перерізів.

Також, після врахування можливості втрати місцевої стійкості елементів перерізу профілю, його геометричні характеристики можуть сильно змінюватися. У результаті цього несуча здатність та/або жорсткість профілю може виявитися недостатньою для заданих умов, або запас міцності профілю виявиться занадто великим, що призведе до нераціональних витрат сталі.

Методика та результати досліджень. Рішенням такої проблеми може бути розрахунок декількох перерізів профілів і вибору оптимального варіанту. Але в силу відсутності загальноприйнятого сортаменту, а також наявності технологічної можливості створення майже необмеженої кількості типорозмірів профілів, така задача суттєво ускладнюється. Так, для найбільш поширених С-подібних профілів, можна варіювати товщину листа, висоту стінки, ширину полиць, ширину бокових загинів, радіус гину і марку сталі. Тобто, для наближення до оптимального варіанту перерізу профілю необхідно багаторазово виконати трудомісткий розрахунок.

Для полегшення цієї задачі за допомогою методу багатофакторної регресії було виконано дослідження залежностей ефективних характеристик перерізів профілів від їх основних параметрів з метою отримання інженерної методики наближеного визначення ефективних характеристик.

Була поставлена задача встановити емпіричні залежності ступеня ефективності перерізу (з урахуванням можливості втрати локальної стійкості і стійкості форми перерізу) від геометричних і міцнісних характеристик повного перерізу С-подібних профілів, що згинаються відносно горизонтальної та вертикальної осей.

З метою спрощення розрахунку вихідних даних, в рамках роботи було розроблено програмний комплекс для розрахунку ефективних характеристик перерізів тонкостінних профілів при згині відносно горизонтальної та вертикальної (при стиснутих бокових загинах та при стиснутій стінці) осей за методикою ДСТУ (Єврокод) [1]. Для подальшої роботи було введено поняття "коефіцієнтів ефективності", що відображають співвідношення ефективної площі перерізу сталевих холодноформованих профілів до повних:

– коефіцієнт ефективності при згині відносно осі у-у, перпендикулярній стінці профілю $\beta_{Wy} = W_{y,eff}/W_{y,g}$; (1)

– коефіцієнт ефективності при згині відносно осі z-z, паралельній стінці профілю:

– при стиснутих бокових загинах та розтягнутій стінці $\beta_{Wz1} = W_{z1,eff}/W_{z1,g}$; (2)

– при розтягнутих бокових загинах та стиснутій стінці $\beta_{Wz2} = W_{z2,eff}/W_{z2,g}$. (3)

В розрахунок бралися найбільш часто використовувані в будівництві профілі С-подібного перерізу. Досліджувалася сукупність профілів з геометричними розмірами, діапазон яких обмежувався в основному граничними співвідношеннями, наведеними в таблиці 5.1 [1] (для яких можливий розрахунок за даним нормативом), а також логічними умовами. Так як обчислення вихідних даних і коефіцієнтів регресії виконувався за допомогою програмного комплексу, були прийняті в розрахунок наступні діапазони параметрів профілів:

– товщина профілю: $0,3\text{мм} \leq t \leq 13,0\text{мм}$; (4)

– висота стінки профілю по зовнішньому обміру: $20\text{мм} \leq h_g \leq 750\text{мм}$, але $10t \leq h_g \leq 300t$; (5)

– ширина полиць по зовнішньому обміру: $10\text{мм} \leq b_g \leq 400\text{мм}$, але $10t \leq b_g \leq 60t$, $b_g \leq h_g$; (6)

– ширина крайових відгинів полиць по зовнішньому обміру: $5\text{мм} \leq c_g \leq 200\text{мм}$, але: $0,2b_g \leq c_g \leq 0,6b_g$, $c_g \leq 0,5h_g$; (7)

– радіус вигину: $5\text{мм} \leq r \leq 35\text{мм}$, але: $r \leq c_g - t/2$, $r \leq (b_g - t)/2$, $r < 8400t/f_{yb}$ (при $E = 2,1 \times 10^6 \text{МПа}$); (8)

– базовий межа плинності стали: $200\text{МПа} \leq f_{yb} \leq 750\text{МПа}$. (9)

У результаті для кожного коефіцієнту було складено матриці типу:

$$\left(\begin{array}{ccccccc}
 \beta_1 & t_1 & h_{g,1} & b_{g,1} & c_{g,1} & r_1 & f_{yb,1} \\
 \beta_2 & t_2 & h_{g,2} & b_{g,2} & c_{g,2} & r_2 & f_{yb,2} \\
 \beta_3 & t_3 & h_{g,3} & b_{g,3} & c_{g,3} & r_3 & f_{yb,3} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \beta_i & t_i & h_{g,i} & b_{g,i} & c_{g,i} & r_i & f_{yb,i} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \beta_{1120890} & t_{1120890} & h_{g,1120890} & b_{g,1120890} & c_{g,1120890} & r_{1120890} & f_{yb,1120890}
 \end{array} \right) \quad (10)$$

де β_i – коефіцієнт ефективності ($\beta_A, \beta_{Wy}, \beta_{Wz1}, \beta_{Wz2}$) для i -го випадку;
 $t_i, h_{g,i}, b_{g,i}, c_{g,i}, r_i, f_{yb,i}$ – параметри i -го профілю.

Попередні розрахунки рівнянь регресій показали, що найбільші похибки отриманих залежностей проявляються при граничних значеннях окремих факторів (на кордонах їх діапазону). Тому для дослідження законів зміни коефіцієнтів ефективності використовувалася вибірка з дещо розширеними інтервалами параметрів профілів. Загальна кількість типорозмірів профілів, для яких визначалися коефіцієнти ефективності, склала 1120890 штук. Після отримання коефіцієнтів регресій при подальшому аналізі розглядалися профілі, що входять в діапазон, наведений вище (всього 579550 спостережень).

Для отриманих матриць за допомогою програмного комплексу Statistica [5] складалися рівняння багатофакторної регресії декількох типів, з яких вибирався варіант, що дає найменші максимальні відхилення від теоретичних значень коефіцієнтів ефективності.

Аналіз залежностей середніх значень абсолютних відхилень коефіцієнтів від теоретичних показав, що такі відхилення значно більше для випадків з малими (до 4 мм) значеннями товщини профілю. Тому вирішено було розглянути різні варіанти звуження діапазонів параметрів для зменшення максимальних і мінімальних похибок. В результаті звуження діапазонів, характеристики точності регресій значно покращилися. Так, різниця між максимальними і мінімальними значеннями абсолютних відхилень скоротилася для всіх варіантів з 0,59-0,69 до 0,33-0,13, коефіцієнт варіації склав 1,7-4,9%, а середня відносна похибка не перевищувала 5,3%.

Однак діапазони застосування отриманих залежностей не дозволяли розраховувати профілі товщиною 0,5-4,0 мм. Тому аналогічним чином було розглянуто окремо залежності для профілів товщиною 0,5-4,0 мм, що задовольняють заданим на початку дослідження параметрам.

Грунтуючись на отриманих залежностях, була запропонована спрощена інженерна методика попереднього визначення ефективних геометричних характеристик холодноформованих стиснутих профілів С-подібного перерізу. Методику пропонується використовувати для «експрес» підбору перерізів ЛСТ профілів та/або попередньої оцінки несучої здатності холодноформованих елементів при заданих рівнях навантаження.

Несуча здатність холодноформованого сталевого С-профілю, що згинається відносно однієї з головних осей та має неповністю ефективний переріз, геометричні розміри якого задовольняють вимоги [1] та таблиці 1, поперечно визначається згідно формули:

$$M_{c,Rd} = W'_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0}, \quad (11)$$

де W'_{eff} – попередня ефективна площа перерізу,

$$W'_{eff} = (\beta_W - \Delta) W_g, \text{ де } 0 \leq \beta_W \leq 1: \quad (12)$$

– при згині відносно осі у-у, що паралельна стінці профілю:

$$\beta_W = \beta_{Wy}^I \text{ при } 0,7\text{мм} \leq t < 4,0\text{мм}, \quad (13)$$

$$\beta_W = \beta_{Wy}^{II} \text{ при } 4,0\text{мм} \leq t \leq 13,0\text{мм};$$

$$\beta_{Wy}^I = 0,994 + \left(\begin{array}{l} 207347t - 17731t^2 - 911,6h_g - \\ - 3497b_g + 4440c_g - 837,7f_{yb} + 2918r \end{array} \right) \times 10^{-6} + \quad (14)$$

$$+ (39,66h_g^2 + 601,4b_g^2 - 2437c_g^2 + 41,46f_g^2 - 2938r^2) \times 10^{-8};$$

$$\beta_{Wy}^{II} = 0,913 + (123c_g + 169r) \times 10^{-5} + \quad (15)$$

$$+ f_{yb} (911t - 12,5h_g - 43,6b_g + 0,0411h_g b_g) \times 10^{-7}.$$

– при згині відносно осі відносно осі z-z, що перпендикулярна стінці профілю (при стиснутих бокових загинах та розтягнутій стінці):

$$\beta_W = \beta_{Wz1}^I \text{ при } 0,5\text{мм} \leq t < 3,5\text{мм}, \quad (16)$$

$$\beta_W = \beta_{Wz1}^{II} \text{ при } 3,5\text{мм} \leq t \leq 13\text{мм};$$

Таблиця 1

Діапазони застосування регресій

Параметр	Діапазон при:					
	згині відносно осі у-у		згині відносно осі z-z (розтяг у стінці)		згині відносно осі z-z (стиск у стінці)	
t, мм	0,7..4,0	4,0..13,0	0,5..3,5	3,5..13,0	0,5..3,5	3,5..13,0
h _g , мм	50..475	50..475	50..475	50..475	40..750	50..475
h _g /t	10..250	10..300	10..250	10..250	10..300	10..300
b _g , мм	30..200	50..400	30..150	50..350	10..150	50..400
c _g , мм	10..100	10..200	10..80	10..80	5..80	10..80
f _{yb} , МПа	200..450					
r, мм	1..35	1..15	1..35	1..15	1..35	1..15

$$\beta_{Wz1}^I = 1,028 + \left(\begin{array}{l} 226110t - 23360t^2 - 561,7h_g - \\ - 6840b_g + 9258c_g - 861f_{yb} + 5290r \end{array} \right) \times 10^{-6} + \quad (17)$$

$$+ (35,51h_g^2 + 1465b_g^2 - 6161c_g^2 + 32,46f_g^2 - 7795r^2) \times 10^{-8};$$

$$\beta_{Wz1}^{II} = 1,041 - \left[\begin{array}{l} 82736b_g - 235746c_g + \\ + 49,4f_{yb} (951,09 - 168,72t + 3,87b_g + h_g) \end{array} \right] \times 10^{-8}. \quad (18)$$

– при згині відносно осі z-z, що перпендикулярна стінці профілю (при розтягнутих бокових загинах та стиснутій стінці):

$$\beta_W = \beta_{Wz2}^I \text{ при } 0,5\text{мм} \leq t < 3,5\text{мм}, \quad (19)$$

$$\beta_W = \beta_{Wz2}^{II} \text{ при } 3,5\text{мм} \leq t \leq 11\text{мм};$$

$$\beta_{Wz2}^I = 0,971 + \left(\begin{array}{l} 142128t - 15780t^2 - 367,5h_g - \\ - 1600b_g - 554,2c_g - 326,1f_{yb} + 208,9r \end{array} \right) \times 10^{-6} + \quad (20)$$

$$+ (26,59h_g^2 + 332,3b_g^2 - 577,5c_g^2 + 14,15f_g^2 + 1573r^2) \times 10^{-8};$$

$$\beta_{Wz2}^{II} = 1,025 - [8827c_g(12,5 - t) + 22,1f_{yb}(723,21 - 152,26t + 2,78b_g + h_g)] \times 10^{-8}. \quad (21)$$

Δ – коефіцієнт, що приймається за таблицею 2;

W_g – момент опору повного перерізу відносно відповідної осі, визначений для ідеалізованого перерізу з урахуванням кутів гину згідно п.5.1

Коефіцієнт Δ може прийматися за двома варіантами розрахунку: при необхідності точного розрахунку (вар.1), $\Delta = 0$, при цьому для деяких випадків можливі відхилення попередньо визначеної площі перерізу в небезпечну сторону. Також можливо, щоб уникнути можливості отримання значної похибки в небезпечну сторону, приймати Δ за варіантом 2. У другому випадку, значення ефективної площі перерізу профілю можна розрахувати з запасом від -5% до +7,5..32,4% (див. табл. 2).

Таблиця 2

Підбір значення коефіцієнту Δ

	Згин відносно осі:					
	y-y		z-z (розтяг у стінці)		z-z (стиск у стінці)	
Товщина t, мм	0,7..4,0	4,0..13,0	0,5..3,5	3,5..13,0	0,5..3,5	3,5..13,0
Варіант 1, Δ:	0		0		0	
при інтервалі похибок: «-» в запас	-0,217	-0,195	-0,164	-0,177	-0,091	-0,075
«+» небезпечні	0,157	0,095	0,206	0,096	0,146	0,05
Варіант 2, Δ:	0,107	0,045	0,156	0,046	0,096	0

при інтервалі похибок: «-» в запас	-0,324	-0,24	-0,32	-0,223	-0,187	-0,075
«+» небезпечні	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Тобто, значення коефіцієнту при розрахунку за 2-им варіантом обрано таким чином, щоб змістити загальну похибка не більше рівня інженерної точності (5%) в небезпечну сторону.

У випадку, коли коефіцієнт $\beta_W = 1,0$, тобто переріз є повністю ефективним, несуча здатність визначається згідно п.6.1.4 [1] на основі повного моменту опору профілю W_g , визначеного для ідеалізованого перерізу з урахуванням кутів гину згідно п.5.1.

З метою оцінки точності запропонованої методики, був виконаний розрахунок значень ефективного моменту опору для перерізів ЛСТ профілів кількох типорозмірів (за варіантом 1) і проведено порівняння отриманих результатів з теоретичними за методикою [1] (табл. 3). Як видно з таблиці, запропонована методика дозволяє досить точно попередньо визначати значення ефективного моменту опору перерізу розглянутих часто застосовуваних ЛСТ профілів.

Таблиця 3

Порівняння результатів розрахунку за пропонованою методикою з теоретичними

t, мм	h_g , мм	b_g , мм	c_g , мм	f_{yb} , МПа	$W_{y,eff}$, відносно осі у-у			$W_{z1,eff}$, відносно осі z-z (розтяг у стінці)			$W_{z2,eff}$, відносно осі z-z (стиск у стінці)		
					метод.	теор.	$\frac{\text{метод}}{\text{теор}}$	метод.	теор.	$\frac{\text{метод}}{\text{теор}}$	метод.	теор.	$\frac{\text{метод}}{\text{теор}}$
0,9	90	35	12	320	3537	4366	81,0	1074	1190	90,2	1201	1325	90,6
1,2	120	50	17	350	8652	9736	88,9	2841	3105	91,5	3254	3618	89,9
1,5	150	60	15	280	16428	15888	103,4	4446	4597	96,7	5138	5547	92,6
1,7	200	75	21	245	32131	31934	100,6	8450	9145	92,4	9636	10498	91,8
2,2	225	90	28	350	53650	52236	102,7	15812	16949	93,3	18513	20456	90,5
2,6	275	100	32	320	90996	92802	98,1	24148	26170	92,3	27470	30065	91,4
3,2	300	110	37	255	146534	147575	99,3	40063	44274	90,5	42651	45320	94,1
4,7	350	130	42	270	283496	288858	98,1	78861	87789	89,8	87860	87860	100,0
5,2	400	140	47	320	387006	399760	96,8	100344	111086	90,3	114623	114623	100,0
7,0	450	175	52	235	733356	715147	102,5	203219	221121	91,9	222187	221121	100,5

За результатами виконаної роботи можна зробити наступні висновки:

1. Розроблено програмний комплекс, який реалізує методику Єврокод за розрахунком ефективних геометричних характеристик стиснутих ЛСТ профілів С- і Z-образного перерізу.

2. Досліджено емпіричні залежності геометричних характеристик ефективних перерізів холодноформованих сталевих профілів від їх параметрів.

3. Розроблена спрощена інженерна методика попереднього розрахунку ефективних геометричних характеристик ЛСТ профілів С-подібного перерізу при згині у всіх напрямках. Максимальні відхилення отриманих співвідношень ефективного моменту опору до теоретичних значень складали від +5% до -32,4%.

1. ДСТУ-Н EN 1993-1-3:2012. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Загальні правила. Додаткові правила для холодноформованих елементів і профільованих листів (EN 1993-1-3:2006 IDT). – Київ : Мінрегіон, 2012. – 220 с.
2. Пичугин С.Ф. Анализ причин отказов несущих каркасов из стальных холодноформованных профилей / С.Ф. Пичугин, В.А. Семко, Д.А. Прохоренко // Современные строительные конструкции из металла и древесины. Сб. науч. тр. – Одесса : ООО "Внешрекламсервис", 2014. – Вып. 18. – С. 154–158.
3. Ghersi A. Design of Metallic Cold-formed Thin-walled Members / A. Ghersi, R. Landolfo, F. M. Mazzolani. – New York: Spoon Press, 2002. – 174 p.
4. Yu W.-W. Cold-formed steel design : fourth edition / Wei-Wen Yu, R.A. LaBoube. – New York : John Wiley & Sons Inc., 2010. – 491 p.
5. Боровиков В.П. STATISTICA – Статистический анализ и обработка данных в среде Windows / Боровиков В.П., Боровиков И.П. – М., 1998. – 592 с.

УДК 624.016 : 69.059

**АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕ-
ТОННИХ БАЛОК З ВИНЕСЕНИМ РОБОЧИМ АРМУВАННЯМ НА
ЗГИН**

**АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕ-
ТОННЫХ БАЛОК С ВЫНЕСЕННЫМ РАБОЧИМ АРМИРОВАНИЕМ
НА ИЗГИБ**

**ANALYSIS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATION CONCRETE BEAMS
WITH WORKING REINFORCEMENT CARRIED OFF ON A BEND**

**Стороженко Л.І. д.т.н., проф., Муравльов В.В. к.т.н., Мурза С.О. к.т.н.,
Школяр Ф.С. асп. (Полтавський національний технічний університет імені
Юрія Кондратюка, м. Полтава)**

**Стороженко Л.И. д.т.н., проф., Муравлёв В.В. к.т.н., Мурза С.А., Шко-
ляр Ф.С. асп. (Полтавский национальный технический университет имени
Юрия Кондратюка, г. Полтава)**