

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.014

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/33>**Білик С.І.**

Київський національний університет будівництва та архітектури

Юрченко В.В.

Київський національний університет будівництва та архітектури

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІРІВ ВІДГИНІВ, ЩО ПІДКРІПЛЮЮТЬ ПОЛИЦІ, ДЛЯ СТЕРЖНЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ

У статті розглядається задача оптимізації розміру одинарного відгину, що підкріплюють полиці, в стержневих елементах конструкцій із холодногнутих профілів. Як критерій оптимальності використана лінійна згортка критерію мінімізації розрахункової площі відгину та критерій максимізації редукованої площі відгину, що визначає його пониженою (за рахунок втрати стійкості за згинальною формою випучування) несучою здатністю. Результати виконаних досліджень служать рекомендаціями для компаній, що виготовляють холодногнуті профілі, а також рекомендаціями для створення національного сортаменту ефективних холодногнутих профілів, що сприятиме ширшому впровадженню цього класу конструкцій у практику будівництва.

Ключові слова: несуча здатність, холодногнутий профіль, задача оптимізації, одинарний відгин, елемент жорсткості, втрата стійкості форми перерізу, лінійна згортка критеріїв.

Постановка проблеми. Раніше використання холодноформованих тонкостінних профілів обмежувалося випадками, коли зниження ваги конструкції було першочерговою задачею, як, наприклад, у авіаційній або автомобільній промисловості. Проте завдяки розвитку технології виробництва, захисту від корозії, доступності продукції, а також розумінню поведінки конструкції та удосконаленню технічних норм розрахунку тонкостінних елементів використання холодноформованих елементів конструкцій, зокрема холодногнутих профілів, поступово розширюється.

Нині на український ринок металоконструкцій активно імпортуються різноманітні конструктивні системи із тонкостінних холодногнутих профілів, які знайшли широке застосування у будівельній індустрії. Впровадження у практику будівництва конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів є актуальним та економічно обґрунтованим у тій галузі використання, де їх ефективність є найвищою [3]. Проте широке використання конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів вітчизняного виробництва затримується передусім недосконалістю нормативної бази та недостатністю вітчизняного досвіду економічного та надійного проектування таких конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Деформування та розподіл напружень у тонкостінних стержнях відкритого профілю суттєво відрізняється від звичайних суцільних стержнів, адже не виконуються (повністю або частково) гіпотеза плоских перерізів Ейлера-Бернуллі та принцип локальності дії взаємно врівноваженої системи сил Сен-Венана. У тонкостінних стержнях відкритого профілю відбувається значна депланація перерізів, що суттєво відображається на умовах їх роботи під навантаженням.

Повною мірою питання розрахунку та проектування тонкостінних стержневих елементів із холодногнутих профілів відображені у європейських нормах проектування, імплементованих на території України [1; 2]. Окрім місцевої та загальної форм втрати стійкості (за згинальною та згинально-крутильною формами), у цих нормах розглядається також *втрата стійкості форми поперечного перерізу* тонкостінного стержня (тобто втрата стійкості внаслідок викривлення поперечного перерізу). Втрата стійкості форми поперечного перерізу є характерною для тонкостінних стержнів відкритого профілю і викликана їх депланацією. Вона відбувається тоді, коли кінцеві елементи жорсткості (відгини) або проміжні елементи жорсткості не в змозі

чинити опір локальному зміщенню вузлів спряжень елементів перерізу.

Загальний алгоритм побудови (нормативного розрахунку) редукованого поперечного перерізу тонкостінного стержня із холодногнутого профілю включає два етапи.

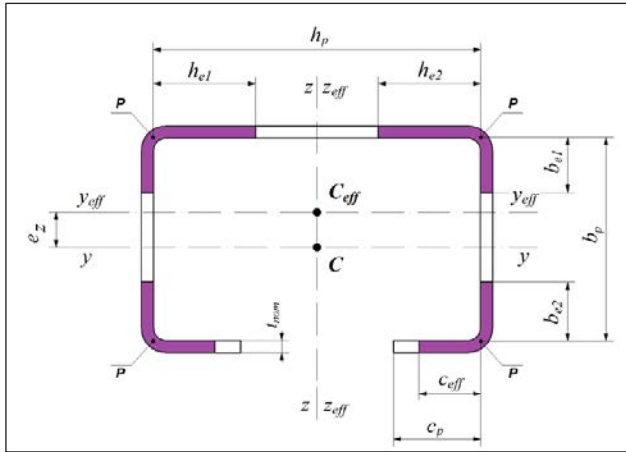


Рис. 1. До нормативного розрахунку редукованого поперечного перерізу стержня із С-подібного холодногнутого профілю – перший етап

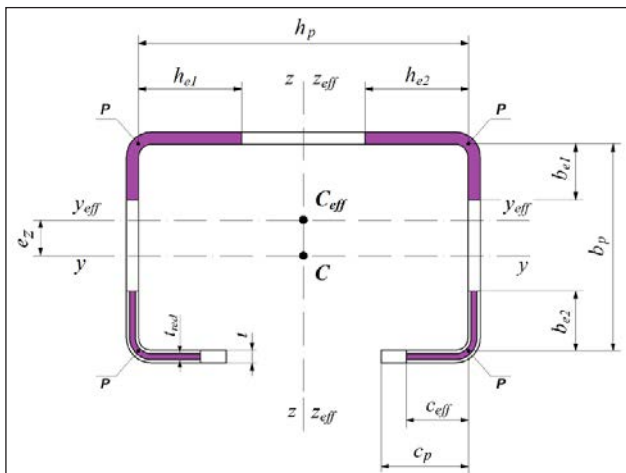


Рис. 2. До нормативного розрахунку редукованого поперечного перерізу стержня із С-подібного холодногнутого профілю – другий етап

На першому етапі виконують розрахунок редукованих ширин стиснутих елементів перерізу, що враховує місцеву втрату стійкості стиснутих елементів перерізу. Іншими словами, коли у розглядуваному перерізі за результатами розрахунку елементи перерізу – полички, стінки – втратили стійкість (випучились), це враховується у перевірочних розрахунках вирахуванням тих ділянок перерізу, що втратили місцеву стійкість (рис. 1).

На другому етапі виконують розрахунок редукованих (зменшених) товщин елементів перерізу, що враховують втрату стійкості форми поперечного перерізу (або втрату стійкості внаслідок викрив-

лення перерізу). Іншими словами, коли в розглядуваному перерізі за результатами розрахунків відбулась втрата стійкості тих стиснутих елементів перерізу, які спричинили (спровокували) втрату стійкості форми перерізу, це враховується у перевірочних розрахунках зменшенням товщин саме цих елементів перерізу. При цьому редуковані товщини елементів перерізу обчислюються після розрахунку редукованих ширин (рис. 2).

Надалі виконують розрахунок несучої здатності тонкостінних стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів із використанням отриманих геометричних характеристик, обчислених для побудованих редукованих поперечних перерізів.

Постановка завдання. Розглянемо задачу пошуку оптимальних розмірів одинарного відгину, що підкріплює поличці, в центрально-стиснутих стержневих елементах конструкцій із холодногнутих профілів (рис. 3).

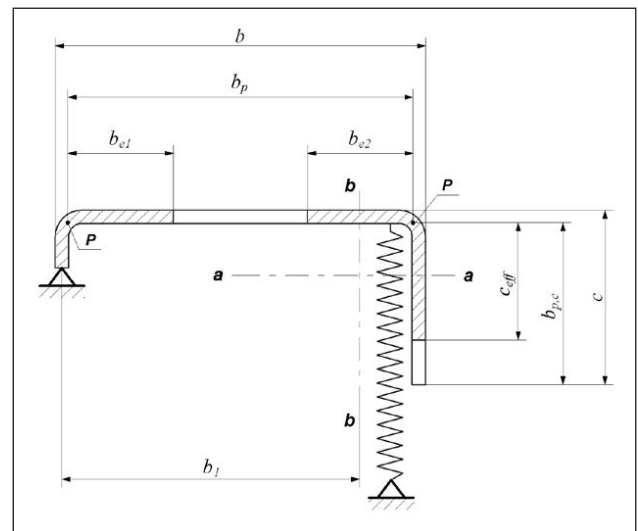


Рис. 3. Одинарний відгин, що підкріплює плоский елемент перерізу (поличку) (ширина полички b не має перевищувати 60 t, t – товщина профілю)

Вихідними даними для оптимізаційного розрахунку служать: габаритні розміри С-подібного холодногнутого профілю: висота стінки h , ширина поличці b , товщина профілю t , внутрішній радіус спряження елементів перерізу $r = 1,5t$; базова межа текучості сталі f_{yb} , МПа; E – модуль пружності сталі, МПа.

Як змінну проектування розглядатимемо габаритний розмір одинарного відгину c (див. рис. 3).

Виклад основного матеріалу дослідження. Розрахункові розміри плоских елементів перерізу С-подібного або Z-подібного холодногнутих профілів, що розглядаються як змінні стану задачі оптимізації, обчислюються залежно від габаритних розмірів профілю h і b , внутрішнього

радіусу $r = 1,5t$ та товщини профілю t як:

– розрахункова висота стінки профілю:

$$h_p = h - 2,5t;$$

– розрахункова ширина полиці профілю:

$$b_p = b - 2,5t;$$

– розрахунковий розмір одинарного відгину:

$$c_p = c - 1,25t.$$

Гнучкість полиці шириною b_p , яку підкріплює одинарний відгін, обчислюється за [1; 2] як:

$$\bar{\lambda}_{pb} = \frac{b_p}{28,4t\sqrt{k_{\sigma 1,jkm}}} \sqrt{\frac{f_{yb}}{235}} = \frac{b_{pb}}{56,8t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{235}}.$$

Поличка профілю із гнучкістю $\bar{\lambda}_{pb}$ працює в закритичній стадії роботи (після втрати місцевої стійкості) у випадку, коли $\bar{\lambda}_{pb} > 0,673$ або

$$\frac{b_p}{56,8t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{235}} > 0,673,$$

або

$$b_p > 38,2264t \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}}.$$

При цьому редукована ширина полиці b_{eff} визначається за [1; 2] як:

$$b_{eff} = \frac{b_p}{\bar{\lambda}_{pb}} \left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_{pb}} \right) = 56,8t \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \left(1 - \frac{12,496t}{b_p} \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \right),$$

і частина редукованої ширини полиці b_{e2} , що залучається до сумісної роботи з одинарним відгином для розрахунку його загальної стійкості за згинальною формою випучування, визначається відповідно до [1; 2] як:

$$b_{e2} = 0,5b_{p,eff} = \frac{b_p}{2\bar{\lambda}_{pb}} \left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_{pb}} \right) = 28,4t \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \left(1 - \frac{12,496t}{b_p} \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \right). \quad (1.1)$$

У разі, коли явище втрати місцевої стійкості полицки не відбулось, тобто коли $\bar{\lambda}_{pb} \leq 0,673$ або

$$b_p \leq 38,2264t \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}},$$

до сумісної роботи з одинарним відгином для розрахунку його загальної стійкості за згинальною формою випучування залучається вся розрахункова ширина полицки b_p :

$$b_{e2} = b_{eff} = b_p.$$

Гнучкість одинарного відгину із розрахунковою шириною c_p , який підкріплює полицю, визначається відповідно до [1; 2] як:

– для коротких одинарних відгинів (при $c_p \leq 0,35b_p$):

$$\bar{\lambda}_{pc} = \frac{c_p}{28,4t\sqrt{0,5}} \sqrt{\frac{f_{yb}}{235}} = 0,0498 \frac{c_p}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{235}};$$

– для довгих одинарних відгинів (при $0,35b_p < c_p \leq 0,6b_p$):

$$\bar{\lambda}_{pc} = \frac{c_p}{28,4t\sqrt{0,5 + 0,83\left(\frac{c_p}{b_p} - 0,35\right)^{\frac{2}{3}}}} \sqrt{\frac{f_{yb}}{235}}.$$

Для одинарного відгину із розрахунковою шириною c_p явище втрати місцевої стійкості відбувається, коли $\bar{\lambda}_{pc} > 0,748$ або

– для коротких одинарних відгинів (при $c_p \leq 0,35b_p$):

$$\bar{\lambda}_{pc} = \frac{c_p}{28,4t\sqrt{0,5}} \sqrt{\frac{f_{yb}}{235}} = 0,0498 \frac{c_p}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{235}} > 0,748;$$

звідки

$$c_p > 15,02121t \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}};$$

– для довгих одинарних відгинів (при $0,35b_p < c_p \leq 0,6b_p$):

$$\bar{\lambda}_{pc} = \frac{c_p}{28,4t\sqrt{0,5 + 0,83\left(\frac{c_p}{b_p} - 0,35\right)^{\frac{2}{3}}}} \sqrt{\frac{f_{yb}}{235}} > 0,748;$$

звідки

$$c_p > 21,2432t \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \sqrt{0,5 + 0,83\left(\frac{c_p}{b_p} - 0,35\right)^{\frac{2}{3}}}.$$

Для одинарного відгину, що працює в закритичній стадії роботи (після втрати місцевої стійкості), редукована ширина c_{eff} визначається відповідно до [1; 2] як:

– при $\bar{\lambda}_{pc} > 0,748$ і $c_p \leq 0,35b_p$:

$$c_{eff} = \frac{t}{0,0498} \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \left(1 - 3,7754 \frac{t}{c_p} \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \right); \quad (1.2)$$

– при $\bar{\lambda}_{pc} > 0,748$ і $0,35b_p < c_p \leq 0,6b_p$:

$$c_{eff} = 28,4t \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \sqrt{0,5 + 0,83\left(\frac{c_p}{b_p} - 0,35\right)^{\frac{2}{3}}} \times \left(1 - 5,3392 \frac{t}{c_p} \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \sqrt{0,5 + 0,83\left(\frac{c_p}{b_p} - 0,35\right)^{\frac{2}{3}}} \right). \quad (1.3)$$

У разі, коли явище втрати місцевої стійкості одинарного відгину не відбулось, тобто коли $\bar{\lambda}_{pc} \leq 0,748$ або

– для коротких одинарних відгинів (при $c_p \leq 0,35b_p$):

$$c_p \leq 15,02121t \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}};$$

– для довгих одинарних відгинів (при $0,35b_p < c_p \leq 0,6b_p$):

$$c_p \leq 21,2432t \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \sqrt{0,5 + 0,83 \left(\frac{c_p}{b_p} - 0,35 \right)^2},$$

редукована ширина одинарного відгину c_{eff} приймається рівною його розрахунковій ширині:

$$c_{eff} = c_p.$$

Гнучкість одинарного відгину для розрахунку його стійкості за згинальною формою випучування обчислюється відповідно до [1; 2] як:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb} A_s}{2 \sqrt{KEI_s}}} = \sqrt{\frac{f_{yb} t (c_{eff} + b_{e2})}{\sqrt{KEI_s} \left(\frac{1}{3} + \frac{b_{e2}}{c_{eff} + b_{e2}} \right)}}; \quad (7.1.4)$$

тут A_s і I_s – геометричні характеристики розрахункового перерізу одинарного відгину; K – жорсткість лінійної пружини, за допомогою якої моделюється часткове підкріплення плоского елемента перерізу (полічки) одинарним відгином, обчислюватиметься як для центрально-стиснутих поперечних перерізів холодногнутих профілів, симетричних відносно головної осі інерції, перпендикулярної до площини стінки, з полічками, підкріпленими одинарними відгинами, відповідно до [1; 2] як:

$$K = \frac{E}{3,64} \cdot \frac{t^3}{\left(b_p - \frac{0,5(b_{e2})^2}{c_{eff} + b_{e2}} \right)^2 \left(1,5h_p + b_p - \frac{0,5(b_{e2})^2}{c_{eff} + b_{e2}} \right)}$$

Залежно від значення умовної гнучкості $\bar{\lambda}_d$ елемента жорсткості (одинарного чи подвійного відгину) визначається понижуючий коефіцієнт втрати стійкості елемента жорсткості за згинальною формою його випучування (або коефіцієнт втрати стійкості форми перерізу) як:

$$\chi_d = \Xi(\bar{\lambda}_d);$$

де функціональна залежність Ξ визначається відповідно до [1; 2] як:

$$\Xi(\bar{\lambda}_d) = \begin{cases} 1,0 & \text{при } \bar{\lambda}_d \leq 0,65; \\ 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d & \text{при } 0,65 < \bar{\lambda}_d \leq 1,38; \\ 0,66\bar{\lambda}_d^{-1} & \text{при } \bar{\lambda}_d > 1,38. \end{cases} \quad (1.5)$$

Зазначимо, що при $\bar{\lambda}_d \leq 0,65$ явище втрати стійкості форми поперечного перерізу відсутнє.

Залежно від значення коефіцієнта стійкості χ_d обчислюється редукована площа розрахункового перерізу елемента жорсткості (одинарного відгину), що визначає його пониженою (за рахунок втрати стійкості за згинальною формою випучування) несучою здатністю як:

$$A_{s,red} = \chi_d A_s. \quad (1.6)$$

Понижена (за рахунок втрати стійкості за згинальною формою випучування) несуча здатність елемента жорсткості враховується в розрахунок шляхом рівномірного зменшення товщини розрахункового перерізу елемента жорсткості:

$$t_{red} = t \frac{A_{s,red}}{A_s}.$$

Виконаний аналіз побудованих границь області несучої здатності перерізів стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів засвідчив стрибкоподібне зменшення їх несучої здатності у випадках, коли переріз переходить до закритичної стадії роботи, яка характеризується настанням явища втрати місцевої стійкості елементів перерізу та/або втрати стійкості форми перерізу. Окрім того, такий аналіз показав збільшення їх несучої здатності у разі збільшення поздовжньої сили розтягу, що пояснюється збільшенням геометричних характеристик редукованого перерізу за рахунок зменшення розмірів (ширини) тих ділянок перерізу, що працюють у закритичній стадії.

Наведені міркування спонукають розглянути як функцію мети для задач оптимізації розмірів поперечних перерізів стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів критерій мінімізації різниці між редукованими поперечними перерізами та поперечними перерізами брутто:

$$\mathbf{FES}_A = A_s - A_{s,red} \rightarrow \min;$$

або з урахуванням (1.6):

$$\mathbf{FES}_A = A_s - A_{s,red} = A_s - \chi_d A_s = A_s (1 - \chi_d) \rightarrow \min;$$

$$\mathbf{FES}_A(c) = t(c_{eff} + b_{e2})(1 - \chi_d(\bar{\lambda}_d)) \rightarrow \min; \quad (1.7)$$

тут c_{eff} , b_{e2} і $\bar{\lambda}_d$ визначаються відповідно за (1.2), (1.3), (1.1) і (1.4) та залежать від розмірів поперечного перерізу h , b , t та змінного розміру одинарного відгину c , а функціональна залежність $\chi_d(\bar{\lambda}_d)$ визначається відповідно до (1.5).

Запропонований критерій оптимальності одинарного відгину (1.7), що підкріплює поліці в стержневих елементах конструкцій із холодногнутих профілів, фактично являє собою лінійну згортку (за однакових вагових коефіцієнтів) двох критеріїв:

1) мінімізація розрахункової площі поперечного перерізу елемента жорсткості A_s , що забезпечує мінімальні витрати матеріалу під час виготовлення перерізу;

2) максимізація редукованої площі поперечного перерізу одинарного відгину $A_{s,red}$, що визначає його пониженою (за рахунок втрати стійкості за згинальною формою випучування) несучою здатністю, іншими словами, максимізація несучої здатності одинарного відгину.

Таблиця 1.1

Результати оптимізаційного розрахунку для С-подібних холодногнутих профілів групи компаній "Blachy Pruszyński"

Профіль, мм	Вихідне проектне рішення				Оптимальне проектне рішення за критерієм				
					$A_s - A_{s,red} \rightarrow \min$				$A_{s,red} \rightarrow \max$
	с, мм	χ_d	t_{red} , мм	$A_{s,red}$, мм ²	c_{min}^{opt} , мм	χ_d	t_{red} , мм	$A_{s,red}$, мм ²	c_{max}^{opt} , мм
100×48×1,5	18	0,968	1,452	87,66	20,5	1,0	1,5	94,31	28,4
100×48×2,0	18	1,0	2,0	117,0	15,7	1,0	2,0	112,40	28,3
100×48×2,5	18	1,0	2,5	141,56	13,3	1,0	2,5	129,81	28,1
100×48×3,0	18	1,0	3,0	164,25	12,0	1,0	3,0	146,25	28,0
150×48×1,5	18	0,921	1,381	83,36	24,5	1,0	1,5	100,31	28,5
150×48×2,0	18	0,996	1,993	116,56	18,3	1,0	2,0	117,6	28,3
150×48×2,5	18	1,0	2,5	141,56	15,2	1,0	2,5	134,56	28,2
150×48×3,0	18	1,0	3,0	164,25	13,5	1,0	3,0	150,75	28,1
200×48×1,5	18	0,883	1,324	79,95	28,3	1,0	1,5	106,01	28,5
200×48×2,0	18	0,964	1,927	112,73	20,7	1,0	2,0	122,4	28,3
200×48×2,5	18	1,0	2,5	141,56	16,9	1,0	2,5	138,81	28,2
200×48×3,0	18	1,0	3,0	164,25	14,8	1,0	3,0	154,65	28,1
250×48×1,5	19	0,869	1,304	80,02	28,5	0,976	1,464	103,66	28,5
250×48×2,0	19	0,952	1,904	113,30	22,9	1,0	2,0	126,80	28,3
250×48×2,5	19	1,0	2,5	144,06	18,4	1,0	2,5	142,5625	28,2
250×48×3,0	19	1,0	3,0	167,25	15,9	1,0	3,0	157,95	28,1
280×48×1,5	19	0,853	1,279	78,51	28,5	0,963	1,444	102,25	28,5
280×48×2,0	19	0,938	1,876	111,62	24,1	1,0	2,0	129,2	28,3
280×48×2,5	19	0,996	2,491	143,52	19,3	1,0	2,5	144,8125	28,2
280×48×3,0	19	1,0	3,0	167,25	16,6	1,0	3,0	160,05	28,1
300×49×1,5	18	0,813	1,220	74,84	29,1	0,951	1,427	103,32	29,1
300×49×2,0	18	0,903	1,805	107,40	25,8	1,0	2,0	134,60	28,9
300×49×2,5	18	0,964	2,409	138,83	20,5	1,0	2,5	150,31	28,8
300×49×3,0	18	1,0	3,0	167,25	17,5	1,0	3,0	165,75	28,7
100×60×1,5	19	0,880	1,321	96,90	30,0	1,0	1,5	125,77	35,7
100×60×2,0	19	0,960	1,921	137,33	21,9	1,0	2,0	148,80	35,5
100×60×2,5	19	1,0	2,5	174,06	18,1	1,0	2,5	171,81	35,4
100×60×3,0	19	1,0	3,0	203,25	15,9	1,0	3,0	193,95	35,3
150×60×1,5	19	0,827	1,240	90,97	35,7	0,979	1,469	127,27	35,7
150×60×2,0	19	0,913	1,826	130,58	25,9	1,0	2,0	156,80	35,5
150×60×2,5	19	0,972	2,430	169,20	21,0	1,0	2,5	179,06	35,4
150×60×3,0	19	1,0	3,0	203,25	18,1	1,0	3,0	200,55	35,3
200×60×1,5	22	0,837	1,256	95,92	35,7	0,947	1,420	123,06	35,7
200×60×2,0	22	0,924	1,848	137,64	29,4	1,0	2,0	163,8	35,5
200×60×2,5	22	0,983	2,457	178,46	23,5	1,0	2,5	185,31	35,4
200×60×3,0	22	1,0	3,0	212,25	20,1	1,0	3,0	206,55	35,3
250×60×1,5	22	0,804	1,206	92,11	35,7	0,919	1,379	119,51	35,7
250×60×2,0	22	0,895	1,790	133,33	32,8	1,0	2,0	170,6	35,5
250×60×2,5	22	0,957	2,392	173,74	25,8	1,0	2,5	191,0625	35,4
250×60×3,0	22	1,0	3,0	212,25	21,8	1,0	3,0	211,65	35,3
280×60×1,5	22	0,786	1,179	90,07	35,7	0,905	1,357	117,61	35,7
280×60×2,0	22	0,879	1,759	131,03	34,8	1,0	2,0	174,60	35,5
280×60×2,5	22	0,943	2,358	171,22	27,2	1,0	2,5	194,56	35,4
280×60×3,0	22	0,990	2,970	210,14	22,8	1,0	3,0	214,65	35,3
300×60×1,5	21	0,757	1,136	85,62	35,7	0,896	1,34	116,42	35,7
300×60×2,0	21	0,854	1,708	125,50	35,5	0,997	1,99	175,51	35,5
300×60×2,5	21	0,920	2,299	164,66	28,0	1,0	2,5	196,56	35,4
300×60×3,0	21	0,968	2,904	202,58	23,4	1,0	3,0	216,75	35,3
350×60×1,5	23	0,766	1,150	88,94	35,7	0,874	1,312	113,67	35,7
350×60×2,0	23	0,863	1,725	130,24	35,5	0,980	1,9595	172,43	35,5
350×60×2,5	23	0,928	2,321	170,86	30,2	1,0	2,5	202,06	35,4
350×60×3,0	23	0,977	2,931	210,29	25,1	1,0	3,0	221,55	35,3
400×60×1,5	22	0,726	1,089	83,19	35,7	0,855	1,283	111,19	35,7
400×60×2,0	22	0,827	1,655	123,26	35,5	0,964	1,928	169,66	35,5
400×60×2,5	22	0,896	2,241	162,73	32,2	1,0	2,5	207,06	35,4
400×60×3,0	22	0,947	2,842	201,06	26,6	1,0	3,0	226,05	35,3
280×75×1,5	24	0,728	1,092	58,43	44,7	0,835	1,253	79,625	44,7
280×75×2,0	24	0,792	1,584	144,94	44,5	0,962	1,923	211,06	44,5
280×75×2,5	24	0,864	2,159	193,50	38,8	1,0	2,5	261,06	44,4
280×75×3,0	24	0,916	2,749	241,22	32,0	1,0	3,0	287,25	44,3
350×75×1,5	20	0,615	0,923	45,68	44,7	0,803	1,204	76,54	44,7
350×75×2,0	20	0,674	1,347	117,86	44,5	0,935	1,870	205,18	44,5
350×75×2,5	20	0,754	1,886	161,50	43,4	1,0	2,5	272,56	44,4
350×75×3,0	20	0,814	2,441	204,41	35,4	1,0	3,0	297,45	44,3
400×75×1,5	20	0,589	0,883	43,72	44,7	0,782	1,173	74,59	44,7
400×75×2,0	20	0,648	1,296	113,40	44,5	0,918	1,836	201,46	44,5
400×75×2,5	20	0,732	1,829	156,58	44,4	0,990	2,475	272,25	44,4
400×75×3,0	20	0,792	2,377	199,10	37,7	1,0	3,0	304,35	44,3

Результати оптимізаційного розрахунку для С-подібних холодногнутих профілів компанії «БФ ЗАВОД»

Профіль, мм	Вихідне проектне рішення				Оптимальне проектне рішення за критерієм				
					$A_s - A_{s,red} \rightarrow \min$				$A_{s,red} \rightarrow \max$
	c , мм	χ_d	t_{red} , мм	$A_{s,red}$, мм ²	c_{\min}^{opt} , мм	χ_d	t_{red} , мм	$A_{s,red}$, мм ²	c_{\max}^{opt} , мм
100×48×2,0	20	1,0	2,0	121,0	15,7	1,0	2,0	112,40	28,3
150×48×2,0	20	1,0	2,0	121,0	18,3	1,0	2,0	117,6	28,3
100×60×2,0	20	0,975	1,951	141,44	21,9	1,0	2,0	148,80	35,5
150×60×2,0	20	0,930	1,859	134,80	25,9	1,0	2,0	156,80	35,5
150×60×2,5	20	0,988	2,469	174,35	21,0	1,0	2,5	179,06	35,4
200×60×2,0	20	0,893	1,787	129,52	29,4	1,0	2,0	163,8	35,5
200×60×2,5	20	0,955	2,387	168,56	23,5	1,0	2,5	185,31	35,4
200×60×3,0	20	1,0	3,0	206,22	20,1	1,0	3,0	206,55	35,3
200×65×1,5	–	–	–	–	38,7	0,926	1,390	84,30	38,7
200×65×2,0	–	–	–	–	33,5	1,0	2,0	182,0	38,5
200×65×2,5	20	0,917	2,292	173,35	26,5	1,0	2,5	205,31	38,4
200×65×3,0	–	–	–	–	22,5	1,0	3,0	228,75	38,3
250×60×2,0	20	0,863	1,725	125,09	32,8	1,0	2,0	170,6	35,5
250×60×2,5	20	0,927	2,318	163,69	25,8	1,0	2,5	191,06	35,4
250×60×3,0	20	0,975	2,924	201,00	21,8	1,0	3,0	211,65	35,3
250×65×1,5	–	–	–	–	38,7	0,899	1,349	81,83	38,7
250×65×2,0	20	0,820	1,639	127,03	37,5	1,0	2,0	190,0	38,5
250×65×2,5	–	–	–	–	29,3	1,0	2,5	212,31	38,4
250×65×3,0	–	–	–	–	24,6	1,0	3,0	235,05	38,3
250×70×1,5	–	–	–	–	41,7	0,875	1,312	81,64	41,7
250×70×2,0	–	–	–	–	41,5	0,995	1,989	206,55	41,5
250×70×2,5	20	0,848	2,120	170,93	32,9	1,0	2,5	233,81	41,4
250×70×3,0	20	0,901	2,701	212,73	27,5	1,0	3,0	258,75	41,3
300×60×3,0	20	0,953	2,858	196,47	23,4	1,0	3,0	216,75	35,3
300×70×1,5	–	–	–	–	41,7	0,850	1,275	79,35	41,7
300×70×2,0	–	–	–	–	41,5	0,974	1,949	202,34	41,5
300×70×2,5	20	0,821	2,052	165,48	35,9	1,0	2,5	241,31	41,4
300×70×3,0	20	0,876	2,627	206,85	29,7	1,0	3,0	265,35	41,3

Таким чином, задача оптимізації поперечних перерізів стержневих елементів із холодногнутих профілів формулюється як задача пошуку оптимального розміру одинарного відгину c за мінімізації визначеного детермінованого критерію якості (1.7) із врахуванням змінних стану, що визначаються відповідно до (1.1)–(1.6).

Результати оптимізаційного розрахунку одинарного відгину для сортаменту холодногнутих профілів С-подібного перерізу [4], які виготовляються групою компаній “Blachy Pruszyński”, наводяться у табл. 1.1, для сортаменту холодногнутих профілів С-подібного перерізу, які виготовляються компанією «БФ ЗАВОД», – у табл. 1.2, для сортаменту холодногнутих профілів С-подібного перерізу, які виготовляються компанією “STEELCO”, – у табл. 1.3.

Висновки. У роботі сформульована та вирішена задача оптимізації розміру одинарного відгину, що

підкріплюють полиці в стержневих елементах конструкцій із холодногнутих профілів. При цьому як критерій оптимальності розглянута лінійна згортка двох критеріїв: критерію мінімізації розрахункової площі поперечного перерізу елемента жорсткості, що забезпечує мінімальні витрати матеріалу під час виготовлення перерізу, а також критерію максимізації редукованої площі поперечного перерізу одинарного відгину, що визначає його понижено (за рахунок втрати стійкості за згинальною формою випучування) несучу здатність, іншими словами, критерію максимізації несучої здатності одинарного відгину.

Результати виконаних досліджень можуть служити рекомендаціями для компаній, що виготовляють холодногнуті профілі, а також рекомендаціями для створення національного сортаменту ефективних холодногнутих профілів, що сприятиме ширшому впровадженню цього класу конструкцій у практику будівництва.

Таблиця 1.3

Результати оптимізаційного розрахунку для С-подібних холодногнутих профілів компанії "STEELCO"

Профіль, мм	Вихідне проектне рішення				Оптимальне проектне рішення за критерієм				
					$A_s - A_{s,red} \rightarrow \min$				$A_{s,red} \rightarrow \max$
	c , мм	χ_d	t_{red} , мм	$A_{s,red}$, мм ²	c_{min}^{opt} , мм	χ_d	t_{red} , мм	$A_{s,red}$, мм ²	c_{max}^{opt} , мм
60×60×0,8	20	0,695	0,556	17,98	35,8	0,790	0,632	23,51	35,8
60×60×1,0	20	0,819	0,916	31,34	35,8	0,902	0,902	40,08	35,8
60×60×1,2	20	0,904	1,085	47,00	35,7	0,979	1,175	59,77	35,7
60×60×1,4	20	0,946	1,325	60,54	25,3	1,0	1,4	71,40	35,7
80×40×0,8	20	0,894	0,715	23,20	23,8	0,913	0,730	24,77	23,8
80×40×1,0	20	0,982	0,982	54,89	23,4	1,0	1,0	57,61	23,8
80×40×1,2	20	1,0	1,2	66,6	17,5	1,0	1,2	63,60	23,7
80×40×1,4	20	1,0	1,4	76,65	15,0	1,0	1,4	69,65	23,7
100×40×0,8	20	0,867	0,693	22,51	23,8	0,887	0,710	24,06	23,8
100×40×1,0	20	0,958	0,958	53,55	23,8	0,979	0,979	56,57	23,8
100×40×1,2	20	1,0	1,2	66,6	19,3	1,0	1,2	65,76	23,7
100×40×1,4	20	1,0	1,4	76,65	16,4	1,0	1,4	71,61	23,7
150×50×0,8	20	0,683	0,547	17,81	29,7	0,747	0,597	21,41	29,8
150×50×1,0	20	0,808	0,808	30,79	29,8	0,864	0,864	36,63	29,8
150×50×1,2	20	0,883	1,059	44,17	29,7	0,946	1,135	54,28	29,7
150×50×1,4	20	0,913	1,279	82,79	28,4	1,0	1,4	102,41	29,7
150×50×1,5	–	–	–	–	26,2	1,0	1,5	105,86	29,7
150×50×2,0	20	1,0	2,0	125,0	19,5	1,0	2,0	124,0	29,5
150×50×2,5	–	–	–	–	16,1	1,0	2,5	141,81	29,4
150×50×3,0	–	–	–	–	14,2	1,0	3,0	158,85	29,3
200×50×0,8	20	0,633	0,506	16,50	29,8	0,701	0,560	20,11	29,8
200×50×1,0	20	0,765	0,765	29,16	29,8	0,825	0,825	34,98	29,8
200×50×1,2	20	0,844	1,013	42,25	29,7	0,912	1,094	52,33	29,7
200×50×1,4	20	0,876	1,226	79,37	29,7	0,974	1,364	100,74	29,7
200×50×1,5	–	–	–	–	29,7	0,995	1,493	110,49	29,7
200×50×2,0	20	0,976	1,952	121,97	22,0	1,0	2,0	129	29,5
200×50×2,5	20	1,0	2,5	151,56	17,9	1,0	2,5	146,31	29,4
200×50×3,0	20	1,0	3,0	176,25	15,6	1,0	3,0	163,05	29,3
250×50×1,4	20	0,844	1,181	76,49	29,7	0,948	1,327	98,02	29,7
250×50×1,5	–	–	–	–	29,6	0,970	1,455	107,64	29,6
250×50×2,0	20	0,949	1,898	118,64	24,4	1,0	2,0	133,8	29,5
250×50×2,5	20	1,0	2,5	151,56	19,6	1,0	2,5	150,57	29,4
250×50×3,0	20	1,0	3,0	176,25	16,9	1,0	3,0	166,95	29,3
300×87×1,5	–	–	–	–	51,9	0,768	1,152	76,19	51,9
300×87×2,0	18	0,595	1,190	65,42	51,7	0,911	1,822	147,59	51,7
300×87×2,5	19	0,653	1,633	157,75	51,5	1,0	2,5	322,81	51,6
300×87×3,0	21	0,769	2,306	223,12	41,8	1,0	3,0	352,65	51,5
350×67×2,0	13	0,507	1,013	73,47	39,7	0,964	1,928	191,21	39,7
350×67×2,5	14	0,642	1,604	114,86	36,0	1,0	2,5	234,06	39,6
350×67×3,0	15	0,742	2,227	157,52	29,7	1,0	3,0	256,35	39,5
350×67×4,0	18	0,911	3,644	255,09	23,0	1,0	4,0	300,0	39,2
400×90×1,5	–	–	–	–	53,7	0,707	1,061	70,74	53,7
400×90×2,0	16	0,462	0,925	49,57	53,5	0,863	1,726	141,43	53,5
400×90×2,5	17	0,494	1,236	120,67	53,4	0,959	2,396	318,13	53,4
400×90×3,0	19	0,639	1,918	187,46	50,8	1,0	3,0	388,65	53,3
400×90×4,0	23	0,833	3,334	326,68	37,4	1,0	4,0	449,61	53,0

Список літератури:

1. ДСТУ-Н Б 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, Мінрегіонбуд України, 2012.
2. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012 ЄВРОКОД 3: Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-5. Пластинчасті конструктивні елементи (EN 1993-1-5:2005, IDT). Київ, Мінрегіонбуд України, 2012.
3. Белов І.Д. Розробка та впровадження ефективних конструкцій будівель із тонкостінних холодногнутих профілів: сучасний стан проблеми та програма досліджень / І.Д. Белов, В.В. Юрченко. Збірник наукових праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», Вип. 20. Рівне, 2010. С. 364–369.
4. Сортамент холодноформованих профілей для легких сталевих тонкостінних конструкцій виробників України. УЦСС-014-16, 2016. 32 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ ОТГИБОВ, ПОДКРЕПЛЯЮЩИХ ПОЛКИ, В СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

В статье рассматривается задача оптимизации размера одинарного отгиба, подкрепляющего полки, в стержневых элементах конструкций из холодногнутого профиля. В качестве критерия оптимальности использована линейная свертка критерия минимизации расчетной площади отгиба и критерия максимизации редуцированной площади отгиба, определяющей его пониженную (за счет потери устойчивости при изгибном выпучивании) несущую способность. Результаты выполненных исследований служат рекомендациями для компаний-изготовителей холодногнутого профиля, а также рекомендациями для создания национального сортамента эффективных холодногнутого профиля, что будет способствовать более широкому внедрению исследуемого класса конструкций в практику строительства.

Ключевые слова: несущая способность, холодногнутый профиль, задача оптимизации, одинарный отгиб, элемент жесткости, потеря устойчивости формы сечения, линейная свертка критериев.

SIZE OPTIMIZATION OF SINGLE EDGE FOLD FOR COLD-FORMED STRUCTURAL MEMBERS

Optimization problem for single edge fold size in cold-formed structural members has been considered by the paper. Linear convolution of criteria, namely minimization criterion of design area of stiffener cross-section and maximization criterion effective area of stiffener cross-section which defines its reduced load-bearing capacity due to distortional buckling has been used as optimization criterion. Results of performed study can be served as design recommendations for companies-manufacturers of cold-formed profiles as well as recommendations in scope of elaboration national standard – assortments of effective cold-formed profiles. It will favour wider implementation of cold-formed building structures in building practice.

Key words: load-bearing capacity, cold-formed profile, optimization problem, single edge fold, stiffener, distortional buckling, linear convolution of criteria.