УДК 624.014 DOI: 10.31650/2415-377X-2019-77-115-125

ПОШУК ОПТИМАЛЬНИХ РОЗМІРІВ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ С-ПОДІБНОГО ХОЛОДНОГНУТОГО ПРОФІЛЮ, ЩО ПРАЦЮЄ В УМОВАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО СТИСКУ

Юрченко В. В., к.т.н., доцент,
Київський національний університет будівництва та архітектури
НВ ТОВ «СКАД Софт»
vitalina@scadsoft.com, ORCID: 0000-0003-4513-809X

Анотація. У статті розглядається задача параметричної оптимізації розмірів поперечного перерізу С-подібного холодногнутого профілю, що працює в умовах центрального стиску. В якості критерію оптимальності приймався критерій максимізації несучої здатності профілю на втрату загальної стійкості при центральному стискові, представлений у формі лінійної згортки несучих здатностей, що враховують згинальне, крутильне та згинально-крутильне випучування стержневого елемента, визначені відповідно до вимог ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 та ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012. Пошук оптимальних розмірів реалізований з врахуванням закритичної роботи тонкостінного холодногнутого профілю, що характеризується місцевою втратою стійкості та втратою стійкості форми перерізу.

Результати виконаних оптимізаційних розрахунків дозволяють розробити рекомендації стосовно оптимального розподілу матеріалу в перерізах несучих елементів досліджуваного класу конструкцій та служать базою для створення ефективних національних сортаментів стандартних гнутих профілів.

Ключові слова: холодногнутий профіль, несуча здатність, місцева втрата стійкості, втрата стійкості форми перерізу, параметрична оптимізація, градієнтний метод.

Введення. Сьогодні на український ринок металоконструкцій активно імпортуються різноманітні конструктивні системи із тонкостінних холодногнутих профілів, які знайшли широке застосування у будівельній індустрії [1]. Характерними рисами легких сталевих тонкостінних конструкцій є: мала металомісткість, висока технологічність та пристосованість для виготовлення на потокових автоматизованих лініях, для транспортування, а також для конвеєрно-блочних та інших швидкісних методів монтажу; високий ступінь заводської готовності, можливість комплектної поставки цілих будівель-модулів та їх несучих конструкцій.

Впровадження у практику будівництва несучих конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів є актуальним та економічно обґрунтованим [2]. Питання їх розрахунку та проектування відображені у європейських нормах проектування [4, 5], а також у нормах проектування [6, 7], імплементованих на території України.

Економія різних типів ресурсів при проектуванні каркасів із холодногнутих профілів можлива шляхом розвитку теорії та провадження в практику методів оптимального проектування, які набувають особливого значення при широкому застосуванні систем автоматизованого проектування. На сьогодні методи оптимізації використовуються обмежено і потребують подальшого розвитку з врахуванням наближення їх до практичного попиту [3].

Мета та завдання. Для ширшого впровадження ефективних конструкцій каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів вітчизняного виробництва необхідно розробити ефективні національні сортаменти стандартних холодногнутих профілів, що було висунуто за мету дослідження. Досягнення поставленої мети здійснюється на основі вирішення таких задач досліджень: розробити методику пошуку оптимальних розмірів поперечних перерізів тонкостінних стержневих елементів із холодногнутих профілів; виконати числові дослідження для виявлення закономірностей формоутворення оптимальних

поперечних перерізів тонкостінних стержневих елементів із холодногнутих профілів; розробити рекомендації стосовно оптимального розподілу матеріалу в перерізах несучих елементів із холодногнутих профілів

Матеріали та методика дослідження. З огляду на особливості розрахунку та конструювання, а також з врахуванням практичного попиту, сформулюємо задачу параметричної оптимізації розмірів поперечних перерізів холодногнутих профілів як: при заданих ширині та товщині заготовки для виготовлення холодногнутого профілю, а також типі поперечного перерізу визначити його оптимальні розміри з врахуванням закритичної роботи та конструктивних вимог.

Невідомі розміри поперечного перерізу холодногнутого профілю знаходяться у нелінійній залежності один від одного. Орієнтація на числові методи математичного програмування дозволяє зберегти загально прийнятий підхід до проектування і достатньо точно описати умови роботи профілю в складі тонкостінної стержневої конструкції.

Вимоги, які висуваються до розмірів поперечного перерізу С-побідного холодногнутого профілю при його оптимальному проектуванні, врахуємо комплексно за допомогою математичної моделі. Математична модель задачі параметричної оптимізації об’єднує критерій якості, множину незалежних змінних проектування та обмеження, які відображають у загальному випадку нелінійні взаємозв’язки між змінними. Рівень достовірності моделі визначимо відповідністю її структури нормативним вимогам і можливістю реалізації практичного досвіду проектування даного класу конструкцій [8].

Сформульовану задачу представимо як багатопараметричну у вигляді задачі нелінійного програмування, а саме задачі пошуку таких значень невідомих параметрів системи:

$$\vec{X} = \{X_i\}^T,\ i = \overline{1, N_X}\ , \tag{1}$$

які забезпечують найменше (або найбільше) значення вибраного (детермінованого) критерію оптимальності:

$$f^* = f(\vec{X}^*) = \min_{\vec{X} \in \mathbf{D}} f\left(\vec{X}\right), \tag{2}$$

в області допустимих проектних рішень $\mathbf{D}$, окресленій системою обмежень-нерівностей:

$$\boldsymbol{\varphi}\left(\vec{X}\right) = \left\{\ \phi_\eta(\vec{X}) \le 0 \,|\, \eta = \overline{N_{EC}+1, N_{IC}}\right\}, \tag{3}$$

де $\vec{X}$ – вектор змінних проектування (шуканих параметрів конструкції); N_X – кількість невідомих параметрів системи (змінних проектування); $\vec{X}^*$ – оптимальний розв’язок задачі; f^* – найменше значення критерію оптимальності.

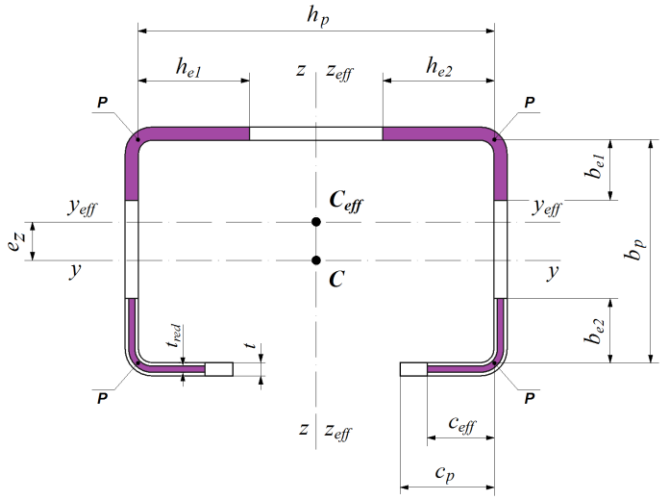

Рис. 1. До задачі оптимізації розмірів перерізу С-подібного холодногнутого профілю

В якості змінних проектування (1) розглядатимемо габаритні розміри С-подібного холодногнутого профілю: висота стінки h, ширина полиці b та довжина відгину c (рис. 1). Вихідними даними для оптимізаційного розрахунку служать: товщина профілю t, внутрішній радіус спряження елементів перерізу $r = 1{,}5t$; базова межа текучості сталі f_{yb}, МПа; E – модуль пружності сталі, МПа; розрахункові довжини стержневого елемента, що відповідають втраті загальної стійкості за згинальними $l_{ef,y}$, $l_{ef,z}$ та крутильною $l_{ef,T}$ формами випучування.

Розрахункові розміри плоских елементів перерізу (рис. 1) С-подібного холодногнутого профілю, що розглядаються як змінні стану задачі оптимізації, обчислюються залежно від змінних проектування h, b і c, внутрішнього радіусу $r = 1,5t$ та товщини профілю t як: $h_p = h - 2,5t$; $b_p = b - 2,5t$; $c_p = c - 1,25t$; тут h_p – розрахункова висота стінки профілю, b_p – розрахункова ширина полиці профілю, c_p – розрахунковий розмір одинарного відгину.

Геометричні характеристики поперечного перерізу профілю брутто визначаються у залежності від змінних проектування та змінних стану як:

$$A_g = t\left(h_p + 2b_p + 2c_p\right);$$

$$z = \frac{1}{A}\left(tb_p^2 + 2tc_p b_p\right);$$

$$I_y = \frac{th_p^3}{12} + \frac{b_p t^3}{6} + 0,5b_p th_p^2 + \frac{tc_p^3}{6} + 0,5tc_p\left(h_p - c_p\right)^2;\ i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}};$$

$$I_z = \frac{h_p t^3}{12} + th_p z^2 + \frac{tb_p^3}{6} + 2tb_p\left(0,5b_p - z\right)^2 + \frac{c_p t^3}{6} + 2c_p t\left(b_p - z\right)^2;\ i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}.$$

тут A_g – площа поперечного перерізу брутто; I_y, I_z – моменти інерції відносно головних осей інерції перерізу; i_y, i_z – радіуси інерції поперечного перерізу; z – відстань, що визначає розташування центру ваги перерізу.

Гнучкості стінки $\bar{\lambda}_{ph}$ та полиці $\bar{\lambda}_{pb}$ профілю з розрахунковими розмірами h_p і b_p та гнучкість одинарного відгину $\bar{\lambda}_{pc}$ із розрахунковим розміром c_p обчислюються відповідно як [5, 7]:

$$\bar{\lambda}_{ph} = \frac{h_p}{28,4t\sqrt{k_{\sigma 1,\,jkm}}}\sqrt{\frac{f_{yb}}{235}} = \frac{h_p}{56,8t}\sqrt{\frac{f_{yb}}{235}}; \tag{4}$$

$$\bar{\lambda}_{pb} = \frac{b_p}{28,4t\sqrt{k_{\sigma 1,\,jkm}}}\sqrt{\frac{f_{yb}}{235}} = \frac{b_p}{56,8t}\sqrt{\frac{f_{yb}}{235}}; \tag{5}$$

$$\bar{\lambda}_{pc} = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr}}} = \frac{b_{pc}}{28,4t\sqrt{k_{\sigma c}}}\sqrt{\frac{f_{yb}}{235}} = \frac{b_{pc}}{28,4t\varepsilon\sqrt{k_{\sigma c}}}; \tag{6}$$

тут $k_{\sigma c}$ – коефіцієнт стійкості, що залежить від розрахункових ширин (розмірів) одинарного відгину b_{pc} та того плоского елементу перерізу, який ним підкріплюється (полички) b_{pb} [4, 6]:

– для коротких одинарних відгинів ($b_{pc} \le 0,35b_{pb}$): $k_{\sigma c} = 0,5$;

– для довгих одинарних відгинів при ($0,35b_{pb} < b_{pc} \le 0,6b_{pb}$):

$$k_{\sigma c} = 0,5 + 0,83\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}} - 0,35\right)^{\frac{2}{3}}.$$

При орієнтації на розв’язок задачі параметричної оптимізації градієнтним методом пропонується для обчислення коефіцієнту стійкості $k_{\sigma c}$, що залежить від відношення b_{pc}/b_{pb}, використовувати єдину апроксимацію поліноміальною залежністю, визначену на області варіації значень аргументу $0,05 < b_{pc}/b_{pb} \le 0,6$:

$$k_{\sigma c}\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}}\right) = \sum_{i=0}^{6} a_i\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}}\right)^i = a_6\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}}\right)^6 + a_5\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}}\right)^5 + a_4\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}}\right)^4 + a_3\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}}\right)^3 + a_2\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}}\right)^2 + a_1\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}}\right) + a_0; \tag{7}$$

тут коефіцієнти поліному $a_6 = 910,227213092148$; $a_5 = -1767,14304974302$;

$a_4 = 1298,86943370057$; $a_3 = -449,402084568981$; $a_2 = 76,1019907432876$; $a_1 = -5,89875484033565$; $a_0 = 0,661274391280184$, а залишкова дисперсія складає $R = 0,995$.

Тоді умовна гнучкість одинарного відгину $\bar{\lambda}_{pc}$ при $0,05 < b_{pc}/b_{pb} \le 0,6$ обчислюватиметься як:

$$\bar{\lambda}_{pc} = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr}}} = \frac{b_{pc}}{28,4t\sqrt{k_{\sigma c}}}\sqrt{\frac{f_{yb}}{235}} = \frac{b_{pc}}{28,4t\varepsilon\sqrt{\mathbf{k}_{\sigma c}\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}}\right)}}. \quad (8)$$

Понижуючі коефіцієнти ρ_h і ρ_b, що визначають втрату місцевої стійкості полички та стінки профілю, а також понижуючий коефіцієнт ρ_c, що визначає втрату місцевої стійкості одинарного відгину, обчислюються відповідно як [5, 7]:

$$\rho_h = \frac{h_{eff}}{h_p} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{ph}}\left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_{ph}}\right) \le 1,0; \quad (9)$$

$$\rho_b = \frac{b_{eff}}{b_p} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{pb}}\left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_{pb}}\right) \le 1,0; \quad (10)$$

$$\rho_c = \frac{c_{eff}}{c_p} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{pc}}\left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_{pc}}\right) \le 1,0. \quad (11)$$

Поличка та стінка профілю працюють у закритичній стадії роботи (після втрати місцевої стійкості) у випадку, коли $\bar{\lambda}_{ph} > 0,673$ і/або $\bar{\lambda}_{pb} > 0,673$. При цьому редуковані ширини стінки та полиці h_{eff} і b_{eff} визначаються з врахуванням (9), (10) та (4), (5) відповідно як [5, 7]:

$$h_{eff} = \frac{h_p}{\bar{\lambda}_{ph}}\left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_{ph}}\right) = 56,8t\sqrt{\frac{235}{f_{yb}}}\left(1 - \frac{12,496t}{h_p}\sqrt{\frac{235}{f_{yb}}}\right); \quad (12)$$

$$b_{eff} = \frac{b_p}{\bar{\lambda}_{pb}}\left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_{pb}}\right) = 56,8t\sqrt{\frac{235}{f_{yb}}}\left(1 - \frac{12,496t}{b_p}\sqrt{\frac{235}{f_{yb}}}\right). \quad (13)$$

Одинарний відгин перерізу працює у закритичній стадії (після втрати місцевої стійкості) у випадку, коли $\bar{\lambda}_{pc} > 0,748$. При цьому редукована ширина відгину c_{eff} обчислюється з врахуванням (11) і (6) як [5, 7]:

$$c_{eff} = 28,4t\varepsilon\sqrt{\mathbf{k}_{\sigma c}\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}}\right)}\left(1 - \frac{5,3392t\varepsilon}{b_{pc}}\sqrt{\mathbf{k}_{\sigma c}\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}}\right)}\right), \quad (14)$$

тут $\mathbf{k}_{\sigma c}\left(\frac{b_{pc}}{b_{pb}}\right)$ – коефіцієнт стійкості, що обчислюється з використанням запропонованої поліноміальної залежності за (7).

Геометричні характеристики розрахункового поперечного перерізу елемента жорсткості (рис. 2), що складається з одинарного відгину з редукованою шириною c_{eff} разом із частиною поперечного перерізу плоского елементу перерізу (полички), який він підкріплює, з редукованою шириною $0,5b_{eff}$ обчислюватимуться як [4, 6]:

$$A_s = t\left(c_{eff} + 0,5b_{eff}\right); \quad (15)$$

$$I_s = \frac{tc_{eff}^3}{4}\left(\frac{1}{3} + \frac{0,5b_{eff}}{c_{eff} + 0,5b_{eff}}\right), \tag{16}$$

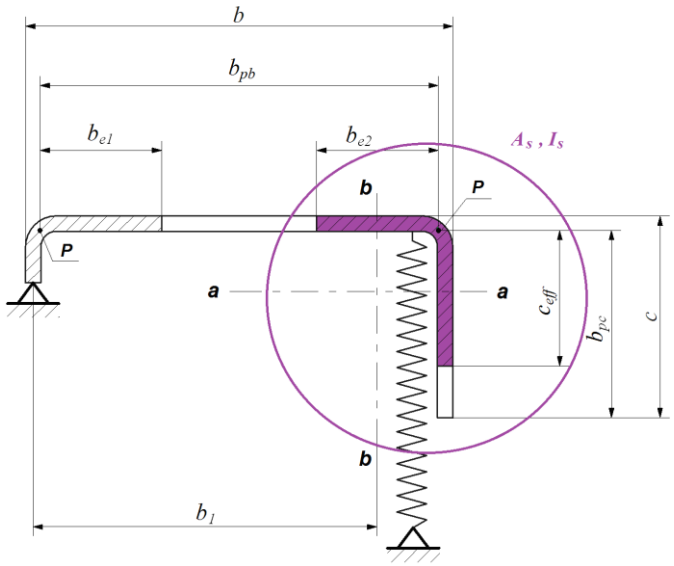

Рис. 2. Одинарний відгин, що підкріплює плоский елемент перерізу (полицю)

тут A_s і I_s – площа і момент інерції розрахункового поперечного перерізу елемента жорсткості (рис. 2).

Жорсткість лінійної пружини K, за допомогою якої моделюється часткове підкріплення плоского елементу перерізу (полички), для центрально-стиснутих поперечних перерізів холодногнутих профілів, симетричних відносно головної осі інерції, перпендикулярної до площини стінки, з поличками, підкріпленими одинарними або подвійними відгинами, визначається відповідно до [4, 6] як:

$$K = \frac{E}{3,64}\cdot\frac{t^3}{\left(b_p - \frac{0,5\left(0,5b_{eff}\right)^2}{c_{eff} + 0,5b_{eff}}\right)^2\left(1,5h_p + b_p - \frac{0,5\left(0,5b_{eff}\right)^2}{c_{eff} + 0,5b_{eff}}\right)}. \tag{17}$$

Тоді умовна гнучкість $\bar{\lambda}_d$ одинарного відгину, що відповідає втраті його стійкості за згинальною формою випучування, обчислюватиметься за [4, 6] як:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}A_s}{2\sqrt{KEI_s}}}. \tag{18}$$

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

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

де функціональна залежність Ξ визначається відповідно до [4, 6] як:

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

При орієнтації на розв’язок задачі параметричної оптимізації градієнтним методом пропонується замість трьох залежностей, наведених вище, для коефіцієнту коефіцієнт втрати стійкості форми перерізу χ_d від $\bar{\lambda}_d$ використовувати їх єдину апроксимацію поліноміальною залежністю:

$$\chi_d = \Xi\left(\bar{\lambda}_d\right) = \sum_{i=0}^{6} a_i\left(\bar{\lambda}_d\right)^i = a_6\left(\bar{\lambda}_d\right)^6 + a_5\left(\bar{\lambda}_d\right)^5 + a_4\left(\bar{\lambda}_d\right)^4 + a_3\left(\bar{\lambda}_d\right)^3 + a_2\left(\bar{\lambda}_d\right)^2 + a_1\bar{\lambda}_d + a_0; \tag{19}$$

тут коефіцієнти поліному $a_6 = 0,224518105436346$; $a_5 = -1,81140384686515$; $a_4 = 5,45071010301213$; $a_3 = -7,29749759236533$; $a_2 = 3,88283814058589$; $a_1 = -0,731477932171104$; $a_0 = 1,03122861927553$; та залишкова дисперсія $R = 0,999$.

Редукована товщина t_{red} розрахункового поперечного перерізу одинарного відгину, що враховує пониження його несучої здатності за рахунок втрати стійкості за згинальною формою випучування, обчислюється відповідно до [4, 6] як:

$$t_{red} = t\frac{A_{s,red}}{A_s} = t\frac{\chi_d A_s}{A_s} = \chi_d t\,. \tag{20}$$

Площа редукованого поперечного перерізу визначатиметься як:

$$A_{eff} = t\left(h_{eff} + b_{eff}\right) + t_{red}\left(b_{eff} + 2c_{eff}\right). \tag{21}$$

В якості критерію оптимальності (2) розглядатимемо критерій максимізації несучої здатності профілю на втрату загальної стійкості, представлений у формі лінійної згортки відповідних несучих здатностей з однаковими ваговими коефіцієнтами як:

$$N_{bRd\Sigma} = N_{byRd} + N_{bzRd} + N_{bT,Rd} + N_{bTF,Rd} \to \max;$$

тут $N_{by,Rd}$, $N_{bz,Rd}$, $N_{bT,Rd}$, $N_{bTF,Rd}$ – несучі здатності стержневого елемента на втрату загальної стійкості за відповідно згинальною формою втрати стійкості відносно осі $y-y$, згинальною формою втрати стійкості відносно осі $z-z$, крутильною та згинально-крутильною формами втрати стійкості, які обчислюються відповідно за [4, 6]. Тоді критерій оптимальності запишеться як:

$$N_{bRd\Sigma} = \frac{A_{eff} f_{yb}}{\gamma_{M1}}\left(\chi_y + \chi_z + \chi_T + \chi_{TF}\right) \to \max; \tag{22}$$

тут χ_y , χ_z, χ_T , χ_{TF} – коефіцієнти стійкості, що враховують втрату загальної стійкості за згинальною, крутильною та згинально-крутильною формами випучування та обчислюються як для кривої стійкості *b* за [4, 6]:

$$\chi^b = \left(0,466 + 0,17\bar{\lambda} + 0,5\bar{\lambda}^2 + \sqrt{\left(0,466 - 0,83\bar{\lambda} + 0,5\bar{\lambda}^2\right)\left(0,466 + 1,17\bar{\lambda} + 0,5\bar{\lambda}^2\right)}\right)^{-1} \le 1,0; \tag{23}$$

із підстановкою умовних гнучкостей $\bar{\lambda}_y$, $\bar{\lambda}_z$, $\bar{\lambda}_T$, $\bar{\lambda}_{TF}$, що відповідають розглядуваним формам втрати стійкості та обчислюються з врахуванням розмірів редукованого поперечного перерізу стержневого елементу відповідно до [4, 6] як:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A_{eff} f_{yb}}{N_{cr,y}}}; \quad \bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A_{eff} f_{yb}}{N_{cr,z}}}; \quad \bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} f_{yb}}{N_{cr,T}}}; \quad \bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_{yb}}{N_{cr,TF}}};$$

де $N_{cr,y,j}$, $N_{cr,z,j}$, $N_{cr,T,j}$ і $N_{cr,TF,j}$ – пружні критичні сили, які визначають з врахуванням геометричних характеристик поперечного перерізу брутто за [4, 6].

До системи обмежень (3) сформульованої задачі залучимо:

– обмеження на периметр профілю (ширину заготовки):

$$\frac{h + 2b + 2c}{P_{\max}} - 1 \le 0; \tag{24}$$

– обмеження, що відображають вимоги норм (див. табл. 5.1 [4]) щодо граничної гнучкості елементів перерізу С-подібного холодногнутого профілю, полиці якого підкріплені одинарними відгинами:

$$\frac{h}{500t} - 1 \le 0; \tag{25}$$

$$\frac{b}{60t} - 1 \le 0; \tag{26}$$

$$\frac{c}{50t} - 1 \le 0; \tag{27}$$

– обмеження на мінімальний просвіт $d_{\min}$ між торцями відгинів з умови забезпечення необхідного доступу до внутрішньої поверхні профілю (наприклад, з метою організації болтового з'єднання по поличкам профілю):

$$\frac{h-2c}{d_{\min}}-1\le 0\,. \tag{28}$$

Таким чином, задача оптимізації розмірів поперечного перерізу С-подібного холодногнутого профілю формулюється як: при заданих ширині $P_{\max}$ та товщині t заготовки (штрипси) визначити оптимальні розміри профілю (висоту стінки h, ширину полиці b та довжину відгину c), які забезпечують найбільше значення критерію оптимальності (22) в області допустимих рішень, окресленій системою обмежень-нерівностей (24) – (28).

Сформульована задача параметричної оптимізації вирішена із застосуванням програми OptCAD [10, 11], в якій реалізовано метод проекції градієнта функції мети на поверхню активних обмежень з одночасною ліквідацією нев'язок в порушених обмеженнях [9].

Результати досліджень. В результаті оптимізаційного розрахунку отримані С-подібні холодногнуті профілі (табл. 1), які при одній і тій самій ширині заготовки характеризуються більшою несучою здатністю на втрату стійкості при центральному стиску порівняно з холодногнутими профілями вітчизняних виробників холодногнутих профілів (групи компаній «Blachy Pruszyński», компаній БФ ЗАВОД та STEELCO [12]). Так, наприклад, при одній і тій самій ширині заготовки розміром 25,8 см отримано С-подібний холодногнутий профіль з оптимальними розмірами h = 8,914см, b = 6,171см, c = 2,272см або 88×62×23×1,5, який характеризується несучою здатністю $N_{bRd,\min}=N_{bTF,Rd}=8{,}093$ кН, що на 9,67% більша, за несучу здатність $N_{bRd,\min}=N_{bTF,Rd}=7{,}373$ кН вихідного профілю з розмірами 100×60×19×1,5, який виробляється компанією «Blachy Pruszyński» (табл. 2).

Результати оптимізаційних розрахунків дозволили розробити рекомендації стосовно оптимального розподілу матеріалу в перерізах несучих елементів досліджуваного класу конструкцій та служать базою для створення ефективних національних сортаментів стандартних гнутих профілів.

Таблиця 1 – Результати оптимізаційного розрахунку

t, см	Оптимальні розміри перерізу профілю, см	ρ_h	ρ_b	χ_d	A_{eff}, мм^2	$P_{\max}$, см	$N_{bTF,Rd}$, кН
0,1	8,960×9,040×1,480	0,481	0,477	0,379	1,061	30,0	8,652
0,12	9,548×8,452×1,774	0,535	0,597	0,478	1,575	30,0	10,828
0,14	10,104×7,896×2,052	0,584	0,721	0,615	2,235	30,0	12,538
0,15	10,386×7,614×2,193	0,606	0,786	0,685	2,612	30,0	13,119
0,17	7,848×11,069×2,507	0,845	0,639	0,587	3,182	35,0	21,483
0,18	11,263×9,237×2,632	0,661	0,779	0,694	3,757	35,0	24,643
0,20	11,970×8,531×2,985	0,686	0,896	0,815	4,765	35,0	25,827
0,21	12,141×10,859×3,070	0,707	0,774	0,700	5,104	40,0	41,498
0,22	12,442×10,558×3,221	0,720	0,821	0,749	5,663	40,0	43,201
0,23	12,796×10,205×3,398	0,729	0,871	0,799	6,255	40,0	44,404
0,24	13,019×12,481×3,509	0,745	0,771	0,705	6,654	45,0	64,687
0,25	13,315×12,185×3,658	0,756	0,811	0,747	7,287	45,0	67,494
0,26	13,648×11,852×3,824	0,765	0,853	0,790	7,951	45,0	69,837
0,28	14,190×13,810×4,095	0,787	0.804	0,747	9,113	50,0	99,368
0,30	14,894×13,106×4,447	0,799	0,881	0,823	10,625	50,0	106,2197

Таблиця 2 – Порівняння оптимальних проектних рішень С- подібних холодногнутих профілів із профілями групи компаній-виробників «Blachy Pruszyński»

Розміри профіля, см	ρ_h	ρ_b	χ_d	A_{eff} , мм^2	$P_{\max}$, см	$N_{bTF,Rd}$, кН
Вихідний профіль: 10,0×6,0×1,9×0,15	0,626	0,937	0,809	2,573	25,8	7,373
Оптимальні розміри: h = 8,914 b = 6,171 c = 2,272 t = 1,5	0,691	0,919	0,839	2,698	25,8	
Оптимальний профіль: 8,8×6,2×2,3×0,15						**8,159**

Усі оптимальні рішення поперечних перерізів С-подібних холодногнутих профілів, що працюють в умовах центрального стиску, працюють у закритичній стадії, що характеризується явищем втрати місцевої стійкості стінки та полички профілю, а також втратою стійкості форми поперечного перерізу при забезпеченні місцевої стійкості одинарного відгину. Для всіх оптимальних рішень поперечних перерізів є визначальною несуча здатність С-подібного холодногнутого профілю на втрату стійкості за згинально-крутильною формою.

Вперше виявлено, що розмір одинарного відгину чинить визначальну роль на несучу здатність перерізу С-подібного холодногонутого профілю, що працює в умовах центрального стиску. У всіх оптимальних проектних рішення оптимальний розмір одинарного відгину був більшим, порівняно до розмірів відгинів С-подібних холодногонутих профілів, що виготовляються компаніями-виробниками «STEELCO», «БФ ЗАВОД» та групою компаній «Blachy Pruszyński». При цьому явище втрати місцевої стійкості одинарного відгину у всіх оптимальних рішеннях було відсутнім. Це дозволяє обґрунтовано рекомендувати призначати одинарні відгини з умови забезпечення відсутності явища втрати його місцевої стійкості відгину.

При зменшенні розміру необхідного просвіту між торцями відгинів з умови забезпечення необхідного доступу до внутрішньої поверхні профілю несуча здатність профілю збільшується.

Висновки. Реалізований пошук оптимальних розмірів поперечних перерізів стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів з врахуванням їх закритичної роботи (місцевої втрати стійкості та втрати стійкості форми перерізу). Результати виконаних оптимізаційних розрахунків дозволяють розробити рекомендації стосовно оптимального розподілу матеріалу в перерізах несучих елементів досліджуваного класу конструкцій та служать базою для створення ефективних національних сортаментів стандартних гнутих профілів.

Література

1. Schueremans, L. FRISOMAT – steel innovator in cold-rolled buildings / L. Schueremans, A. C. Furtado // Steel Construction, 9 (2016), No. 3. – P. 255 – 258.

2. Бєлов І. Д. Розробка та впровадження ефективних конструкцій будівель із тонкостінних холодногнутих профілів: сучасний стан проблеми та програма досліджень / І. Д. Бєлов, В. В. Юрченко // Збірник наукових праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», Вип. 20. – Рівне, 2010. – С. 364 – 369.

3. Пелешко І. Д. Оптимальне проектування металевих конструкцій на сучасному етапі (огляд праць) / І. Д. Пелешко, В.В. Юрченко // Металеві конструкції. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 13–21.

4. 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.

5. EN 1993-1-5:2006. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: General rules – Plated structural elements – Brussels: CEN, 2006. – 53 p.

6. 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. – 121 с.

7. 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. – 91 с.

8. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций [Пермяков В. А., Перельмутер А. В., Юрченко В. В.] – К.: ТОВ «Издательство «Сталь», 2008. – 538 с.: ил.

9. Peleshko I.D. An optimum structural computer-aided design using update gradient method / I. D. Peleshko, V. V. Yurchenko // Proceedings of the 8th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques” (Lithuania, Vilnius, May 19-21, 2004), Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University. – P. 860 – 865.

10. Пелешко І. Д. Програма для оптимізації стрижневих металевих систем / І. Д. Пелешко, В. В. Юрченко // VI Міжнародна наукова конференція “Актуальні проблеми будівництва та інженерії довкілля” Львів-Кошице-Жешув: Збірник матеріалів конференції. – Ч.1 – Будівництво. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2001. – С. 176 – 182.

11. Peleshko I. D. Computer-aided design and optimization of steel structural systems / I. D. Peleshko, V. V. Yurchenko, N. A. Beliaev // Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej “Budownictwo i inżynieria środowiska”, Nr. 264. – 2009. – z. 52. – Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowkiej, 2009. – P. 145 – 154.

12. Сортамент холодноформованных профилей для легких стальных тонкостенных конструкций производителей Украины. УЦСС-014-16, 2016. – 32 с.

References

[1] L. Schueremans, A.C. Furtado, FRISOMAT – steel innovator in cold-rolled buildings, *Steel Construction*, 9, no. 3, pp. 255 – 258, 2016.

[2] I. D. Bielov, V. V. Yurchenko, "Rozrobka ta vprovadzhennja efektyvnyh konstrukcij budivel iz tonkostinnyh holodnognutyh profiliv: suchasnyj stan problemy ta programa doslidzhen", *Zbirnyk naukovyh prac «Resursoekonomni materially, konstrukciji, budivli ta sporudy»*, Rivne, vol. 20, pp. 364 – 369, 2010.

[3] I. D. Peleshko, V. V. Yurchenko, "Optymalne proektuvannia metalevykh konstruktsii na suchasnomu etapi (ohliad prats) ", *Steel structures*, Vol. 15, no. 1, pp. 13–21, 2009.

[4] 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.

[5] EN 1993-1-5:2006. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: General rules - Plated structural elements – Brussels: CEN, 2006.

[6] DSTU-N B EN 1993-1-3:2012 EUROKOD 3. Proektuvannya stalevyh konstruktsiy. Chastyna 1-3. Zagalni pravyla. Dodatkovi pravyla dlya holodnoformovanyh elementiv i profilovanih lystiv (EN 1993-1-3:2006, IDT). Kyiv, Minregionbud Ukrainy, 2012.

[7] DSTU-N B EN 1993-1-5:2012 EUROKOD 3: Proektuvannya stalevyh konstruktsiy. Chastyna 1-5. Plastinchasti konstruktyvni elementy (EN 1993-1-5:2005, IDT). Kyiv, Minregionbud Ukrainy, 2012.

[8] V. A. Permyakov, A. V. Perelmuter, V. V. Yurchenko, *Optymalnoe proektyrovanye stalnykh sterzhnevykh konstruktsyi*, Kyiv, Publisher STAL Ltd., 2008.

[9] I. D. Peleshko, V. V. Yurchenko, "An optimum structural computer-aided design using update gradient method", *Proceedings of the 8th International Conference «Modern Building*

Materials, Structures and Techniques», Vilnius Gediminas Technical University, pp. 860 – 865, 2004.

[10] I. D. Peleshko, V. V. Yurchenko, "Prohrama dlia optymizatsii stryzhnevykh metalevykh system", *Proceedings of the VI international scientific conference "Actual problems of construction and environmental engineering" Lviv-Košice-Rzeszów,* part 1, Construction, Lviv: National University "Lviv Polytechnic", pp. 176 – 182, 2001.

[11] I. D. Peleshko, V. V. Yurchenko, N. A. Beliaev, "Computer-aided design and optimization of steel structural systems", *Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej "Budownictwo i inżynieria środowiska"*, Nr. 264, z. 52, Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowkiej, pp. 145 – 154, 2009.

[12] *Sortament kholodnoformovannykh profylei dlia lehkykh stalnykh tonkostennykh konstruktsyi proyzvodytelei Ukrayny*. UCSC-014-16, 2016.

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ С-ОБРАЗНОГО ХОЛОДНОГНУТОГО ПРОФИЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО СЖАТИЯ

Юрченко В. В., к.т.н., доцент,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры
НП ООО «СКАД Софт»
vitalina@scadsoft.com, ORCID: 0000-0003-4513-809X

Аннотация. В статье рассмотрена задача параметрической оптимизации размеров поперечного сечения С-образного холодногнутого профиля, работающего в условиях центрального сжатия. Задача параметрической оптимизации размеров поперечных сечений холодногнутых профилей формулировалась как: при заданных ширине и толщине заготовки (штрипсы) для изготовления холодногнутого профиля, а также типе поперечного сечения определить его оптимальные размеры с учетом закритической работы и конструктивных требований.

В качестве критерия оптимальности принимался критерий максимизации несущей способности профиля на потерю общей устойчивости при центральном сжатии, который представлялся в форме линейной свертки несущих способностей, учитывающих изгибное, крутильное и изгибно-крутильное выпучивание стержневого элемента, вычисленные в соответствии с требованиями ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 и ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012. Поиск оптимальных размеров реализован с учетом возможной закритической работы тонкостенного холодногнутого профиля, характеризующейся местной потерей устойчивости и потерей устойчивости формы сечения.

Сформулированная задача параметрической оптимизации решена с использованием программы OptCAD, в которой реализован метод проекции градиента функции цели на поверхность активных ограничений при одновременной ликвидации невязок в нарушенных ограничениях.

В результате оптимизационного расчета получены С-образные холодногнутые профили, которые при одной и той же ширине заготовки характеризуются большей несущей способностью на потерю устойчивости при центральном сжатии по сравнению с холодногнутыми профилями отечественных производителей. При этом, для всех оптимальных решений поперечных сечений определяющей была несущая способность С-образного холодногнутого профиля на потерю устойчивости по изгибно-крутильной форме выпучивания.

Результаты выполненных оптимизационных расчетов позволяют разработать рекомендации относительно оптимального распределения материала в сечениях несущих элементов исследуемого класса конструкций и служат базой для создания эффективных национальных сортаментов стандартных гнутых профилей.

Ключевые слова: холодногнутый профиль, несущая способность, местная потеря устойчивости, потеря устойчивости формы сечения, параметрическая оптимизация, градиентный метод.

SEARCHING FOR OPTIMUM CROSS-SECTIONAL SIZES OF COLD-FORMED C-PROFILES SUBJECTED TO CENTRAL COMPRESSION

Yurchenko V. V., PhD, Associate Professor
Kyiv National University of Construction and Architecture
Scientific and Production Company «SCAD Soft» Ltd
vitalina@scadsoft.com, ORCID: 0000-0003-4513-809X

Abstract. Parametric optimization problem of cross-sectional sizes for cold-formed C-profile subjected to central compression has been considered in the paper. Parametric optimization problem for cross-sectional sizes of cold-formed C-profiles has been formulated as follow: to define optimum cross-sectional sizes taking into account post-buckling behavior and structural requirements when stripe width and thickness as well as type of the cold-formed profile are constant and defined by the designer.

Criterion of the profile load-bearing capacity maximization has been assumed as purpose function. The latter has been presented in the form of linear convolution of the resistance to central compression taking into account flexural, torsional and torsional-flexural buckling of thin-walled structural member determined according to the requirements EN 1993-1-3:2012 and EN 1993-1-5:2012. Searching for the optimum cross-sectional sizes has been performed taking into account a possibility of post-critical buckling behavior of the structural member based on the local buckling of the web and flanges and/or distortional buckling of the edge fold stiffeners.

Formulated parametric optimization problem has been solved using software OptCAD. Update gradient method of the purpose function projection on the active constraints hyperplanes with simultaneous liquidations of the residuals in the constraints has been implemented by the software.

As optimization results cold-formed C-profiles have been obtained. With the same stripe width optimum profiles have higher load-bearing capacity level taking into account buckling resistance under central compression comparing with the cold-formed C-profiles proposed by Ukrainian manufacturers. Besides, torsional-flexural buckling resistance of the cold-formed C-profile is determinative for all optimum cross-sectional decisions.

Presented results of the performed calculation allow developing guides for designers relating to the optimum material distribution in the cross-sections of the thin-walled cold-formed structural members as well as are the base to develop effective national ranges of assortments of cold-formed profiles.

Key words: cold-formed profile, load-bearing capacity, local buckling, distortional buckling, parametric optimization, gradient method.

Стаття надійшла 27.08.2019