УДК 624.014 DOI: 10.31650/2415-377X-2021-85-28-42

АНАЛІЗ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЦЕНТРАЛЬНО-СТИСНУТИХ СТЕРЖНЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ

Перельмутер А.В., д.т.н., с.н.с.,
avp@scadsoft.com, ORCID: 0000-0001-9537-2728
НПО «СКАД Софт»
вул. Освіти, 3А, оф.2, м. Київ, 03037, Україна
Юрченко В.В., д.т.н., професор,
vitalina@scadsoft.com, ORCID: 0000-0003-4513-809X
Київський національний університет будівництва та архітектури
просп. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03680, Україна

Анотація. У зв'язку з імплементацією на території України норм проектування, що регламентують розрахунок і проектування несучих елементів конструкцій із холодногнутих профілів, метою досліджень висувався детальний аналіз та перевірка несуперечності, узгодженості та повноти цих нормативних вимог. У статті розглядається та досліджується несуча здатність стержневих елементів із холодногнутих профілів, що перебувають в умовах центрального стиску. Представлена система обмежень, в якій сформульовані умови міцності та загальної стійкості таких стержневих елементів з врахуванням їх можливої закритичної роботи, а саме здатності чинити опір зовнішнім навантаженням і після виникнення явищ втрати місцевої стійкості елементів перерізу та/або втрати стійкості форми перерізу.

Виконані дослідження несучої здатності продемонстрували, що для моносиметричних холодногнутих профілів втрата стійкості за згинально-крутильною формою є визначальною. Для таких перерізів оцінено вплив співвідношення габаритних розмірів (ширини полиці до висоти стінки) на несучу здатність холодногнутих профілів. Показано, що при одній і тій самій площі поперечного перерізу несучу здатність холодногнутого профілю на дію поздовжньої сили стиску можна значно підвищити за допомогою призначення оптимального співвідношення ширини полиці до висоти стінки профілю.

Представлені результати розрахунку несучої здатності стержневих елементів із холодногнутих профілів на дію поздовжньої сили стиску, обчислені за нормами проектування ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 та за нормами проектування ДБН В.2.6-198:2014. Показано, що в окремих випадках різниця в оцінці несучої здатності стержневих елементів із холодногнутих профілів досягала 25%.

Виконано порівняння несучої здатності на дію поздовжньої сили стиску для стержневих елементів із С-подібного профілю та із складеним перерізом із двох С-подібних профілів. Показано, що несуча здатність стержневого елемента складеного перерізу перевищує несучу здатність елемента з поодинокого профіля більш ніж у тричі, водночас площі поперечного перерізу цих елементів відрізняються лише вдвічі.

Ключові слова: несуча здатність, міцність, стійкість, тонкостінний стержень, холодногнутий профіль.

Вступ. Раніше використання холодноформованих тонкостінних профілів обмежувалось 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.

Незважаючи на те, що у нас в країні ринок легких сталевиих тонкостінних конструкцій (ЛСТК) ще остаточно не сформований і далекий від насичення, кількість прихильників цієї

інноваційної технології в Україні зростає достатніми темпами. На цей час тільки кількість компаній-виробників холодногнутих профілів налічує понад 20, не кажучи про будівельні компанії, що задіяні в імпорті таких конструкцій.

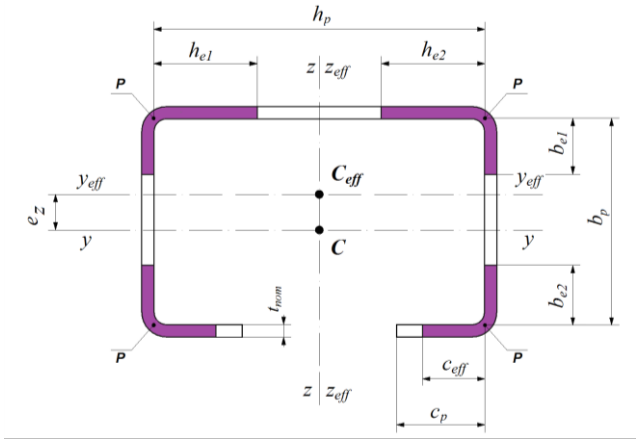
На український ринок металоконструкцій активно імпортуються різноманітні конструктивні системи із тонкостінних холодногнутих профілів, які знайшли широке застосування у будівельній індустрії. Характерними рисами легких сталевих тонкостінних конструкцій є: мала металомісткість, висока технологічність 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 [1-3]. Впровадження у практику будівництва конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів є актуальним та економічно обґрунтованим.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання розрахунку та проектування тонкостінних стержневих елементів із холодногнутих профілів відображені у європейських нормах проектування [4, 5]. На сьогодні теорія поведінки тонкостінного профілю достатньо добре відпрацьована. Особливу увагу у науково-дослідній роботі приділяють прикладним дослідженням поведінки різних типів конструкцій, виконаних із тонкостінних профілів (стійки, ферми, прогони тощо) з метою розробки достовірних методик їх перевірного розрахунку та проектування. Слід відмітити роботи Э. Л. Айрумяна [1], Г. І. Бєлого [6], Манєвіча А. І., Ракши С. В. [7] Проблемі чисельного моделювання поведінки тонкостінних стержневих конструкцій із холодногнутих профілів присвячені праці В. І. Слівкера [8], А. Р. Тусніна [9], В. В. Лаліна [10], В. А. Рибакова [11], А. В. Осокіна [12], Т. В. Назмеєвої [13].

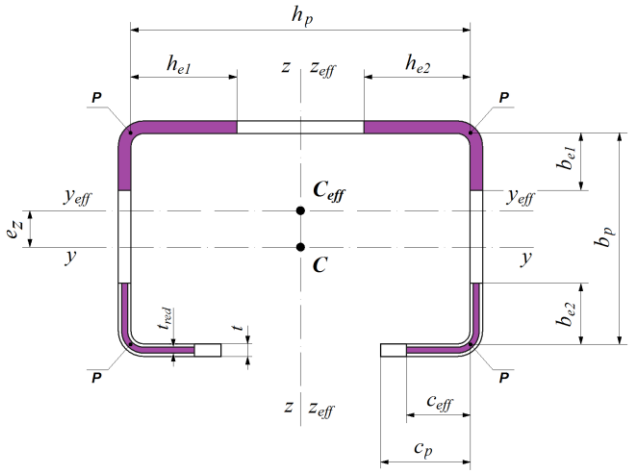
Мета та завдання. У зв'язку з імплементацією на території України норм проектування [4, 5], що регламентують розрахунок і проектування несучих елементів конструкцій із холодногнутих профілів, метою досліджень є детальний аналіз та перевірка несуперечності, узгодженості та повноти цих нормативних вимог. Однією із задач на шляху досягнення поставленої мети є детальний аналіз несучої здатності стержневих елементів із холодногнутих профілів, зокрема таких, що перебувають в умовах центрального стиску.

Матеріали та методика дослідження. Нормативні вимоги щодо забезпечення необхідної несучої здатності стержневих елементів із холодногнутих профілів, що висуваються до деякого розрахункового перерізу конструкції, можна записати у вигляді деякого набору обмежень-нерівностей, які описують несучу здатність досліджуваного класу конструкцій щодо втрати міцності та загальної стійкості. До системи перевірок несучої здатності стержневих конструкцій із холодногнутих профілів, що перебувають в умовах центрального стиску, включимо обмеження (нерівності) міцності та загальної стійкості, регламентовані будівельними нормами [4, 5].

Загальний алгоритм побудови (нормативного розрахунку) редукованого поперечного перерізу тонкостінного стержня із холодногнутого профілю включає два етапи. 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, *а*). На другому етапі виконують розрахунок редукованих (зменшених) товщин елементів перерізу, що враховують втрату стійкості форми поперечного перерізу (або втрату стійкості внаслідок викривлення перерізу). Іншими словами, коли в розглядуваному перерізі за результатами розрахунків відбулась втрата стійкості тих стиснутих елементів перерізу, які спричинила (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. 1, *б*). У подальшому виконують розрахунок несучої здатності тонкостінних стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів із використанням отриманих геометричних характеристик, обчислених для побудованих редукованих поперечних перерізів.



а)



б)

Рис. 1. До нормативного розрахунку редукованого поперечного перерізу:
а – перший етап; *б* – другий етап

Для стержневих елементів конструкцій із холодногнутих *профілів обмеження міцності при центральному стиску* запишуться у формі перевірки нормальних напружень від дії поздовжньої сили стиску N. Для тих розрахункових поперечних перерізів стержневих елементів, що зазнали втрати місцевої стійкості або втрати стійкості форми перерізу, тобто коли $A_{eff} < A_g$, обмеження міцності при дії у перерізі рівномірного стиску запишуться як:

$$\frac{N\gamma_{M0}}{A_{eff}\, f_{yb}} \le 1; \tag{1}$$

тут γ_{M0} – коефіцієнт надійності при перевірних розрахунках міцності, який визначається відповідно до [4]; A_g – площа поперечного перерізу стержня брутто (повна площа); A_{eff} – площа «ефективного» поперечного перерізу стержня при центральному стискові; f_{yb} – базова межа текучості матеріалу.

Для тих розрахункових поперечних перерізів стержневих елементів, що не зазнали втрати місцевої стійкості або втрати стійкості форми перерізу, тобто коли $A_{eff} = A_g$, обмеження міцності при дії у перерізі рівномірного стиску запишуться як:

$$\frac{N\gamma_{M0}}{A_g\left(f_{yb} + 4\left(f_{ya} - f_{yb}\right)\left(1 - \wp_\lambda\right)\right)} \le 1; \tag{2}$$

$$\frac{N\gamma_{M0}}{A_g\, f_{ya}} \le 1; \tag{3}$$

тут f_{ya} – усереднена (підвищена) межа текучості матеріалу; $\wp_\lambda = \frac{\bar{\lambda}_{e,\max}}{\bar{\lambda}_{e0,cor}}$; $\bar{\lambda}_{e,\max}$ – умовна гнучкість того елементу перерізу (стінки, полиці чи елемента жорсткості), для якого відношення $\frac{\bar{\lambda}_e}{\bar{\lambda}_{e0}}$ має найбільше значення, при цьому $\bar{\lambda}_{e,\max} = \bar{\lambda}_e$; $\bar{\lambda}_{e0,cor}$ – гранична умовна гнучкість елементу перерізу, що відповідає $\bar{\lambda}_{e,\max}$, $\bar{\lambda}_{e0,cor} = \bar{\lambda}_{e0}$. У працях [14, 15] наводяться аналітичні вирази для обчислення параметру $\wp_\lambda$ для плоских підкріплених з обох боків елементів перерізу (стінок), для плоских підкріплених з одного боку елементів перерізу (полиць) за відсутності підкріплень відгинами, для плоских елементів перерізу (полиць), підкріплених з одного боку та напівпідкріплених з іншого боку (за наявності підкріплень одинарним відгином), а також для елементів жорсткості перерізу – одинарного відгину.

Обмеження загальної стійкості при центральному стискові запишуться у формі *перевірки загальної стійкості при згинальному випучуванні* стержня відносно двох головних осей інерції перерізу. Для тих розрахункових поперечних перерізів стержневих елементів, що зазнали втрати місцевої стійкості або втрати стійкості форми перерізу, тобто коли $A_{eff} < A_g$, обмеження загальної стійкості при згинальному випучуванні стержня запишуться як:

$$\frac{N\gamma_{M1}}{\tilde{\chi}_y A_{eff} f_{yb}} \le 1; \tag{4}$$

$$\frac{N_c\gamma_{M1}}{\tilde{\chi}_z A_{eff} f_{yb}} \le 1; \tag{5}$$

тут γ_{M1} – коефіцієнт надійності при перевірних розрахунках на стійкість, який визначається відповідно до [4]; $\chi_{y,eff}$ і $\chi_{z,eff}$ – коефіцієнти стійкості для згинального випучування стержня відносно осей $y-y$ і $z-z$ відповідно, що обчислюються згідно з [4] залежно від відповідних умовних гнучкостей стержня $\bar{\lambda}_{y,eff}$ і $\bar{\lambda}_{z,eff}$. Умовні гнучкості $\bar{\lambda}_{y,eff}$ і $\bar{\lambda}_{z,eff}$, що відповідають втраті стійкості за згинальною формою випучування при згині відносно осей $y-y$ і $z-z$ відповідно, обчислюються з врахуванням розмірів «ефективного» поперечного перерізу стержневого елементу як:

$$\bar{\lambda}_{y,eff} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_{yb}}{N_{cr,y}}} = \frac{l_{ef,y}}{\pi i_y}\sqrt{\frac{f_{yb}}{E}\frac{A_{eff}}{A_g}};$$

$$\bar{\lambda}_{z,eff} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_{yb}}{N_{cr,z}}} = \frac{l_{ef,z}}{\pi i_z}\sqrt{\frac{f_{yb}}{E}\frac{A_{eff}}{A_g}};$$

тут $N_{cr,y}$ і $N_{cr,z}$ – пружні критичні сили втрати стійкості за згинальною формою випучування при згині стержневого елемента відносно осей $y-y$ і $z-z$ відповідно, які визначають з врахуванням геометричних характеристик повного поперечного перерізу стержневого елементу як:

$$N_{cr,y} = \pi^2 E \frac{i_y^2}{l_{ef,y}^2} A_g;$$

$$N_{cr,z} = \pi^2 E \frac{i_z^2}{l_{ef,z}^2} A_g;$$

тут $l_{ef,y}$ і $l_{ef,z}$ – розрахункові довжини стержневого елемента при його згині відносно головних осей інерції перерізу $y-y$ і $z-z$ відповідно; i_y і i_z – радіуси інерції поперечного перерізу стержня брутто відносно головних осей інерції перерізу $y-y$ і $z-z$ відповідно; E – модуль пружності сталі.

Для тих розрахункових поперечних перерізів стержневих елементів, що не зазнали втрати місцевої стійкості або втрати стійкості форми перерізу, тобто коли $A_{eff} = A_g$,

обмеження загальної стійкості при згинальному випучуванні стержня запишуться як:

$$\frac{N\gamma_{M1}}{\chi_y A_g f_{ya}} - 1 \le 0; \tag{6}$$

$$\frac{N\,\gamma_{M1}}{\chi_z A_g f_{ya}} - 1 \le 0; \tag{7}$$

тут χ_y і $\chi_{z,j}$ – коефіцієнти стійкості для згинального випучування стержня відносно осей $y-y$ і $z-z$ відповідно, що обчислюються згідно з [4] залежно від відповідних умовних гнучкостей стержня $\bar{\lambda}_{y,j}$ і $\bar{\lambda}_{z,j}$. Умовні гнучкості $\bar{\lambda}_{y,j}$ і $\bar{\lambda}_{z,j}$, що відповідають втраті стійкості за згинальною формою випучування при згині відносно осей $y-y$ і $z-z$ відповідно, обчислюються з врахуванням геометричних розмірів поперечного перерізу стержневого елементу як:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A_g f_{ya}}{N_{cr,y}}} = \frac{l_{ef,y}}{\pi\, i_y}\sqrt{\frac{f_{ya}}{E}};$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A_g f_{ya}}{N_{cr,z}}} == \frac{l_{ef,z}}{\pi\, i_z}\sqrt{\frac{f_{ya}}{E}}.$$

тут пружні критичні сили $N_{cr,y,j}$ і $N_{cr,z,j}$ визначають з врахуванням геометричних характеристик повного поперечного перерізу стержневого елементу як:

$$N_{cr,y} = \pi^2 E \frac{i_y^2}{l_{ef,y}^2} A_g;$$

$$N_{cr,z} = \pi^2 E \frac{i_z^2}{l_{ef,z}^2} A_g.$$

Відповідно до вимог [4] стержневі елементи відкритого перерізу за відсутності планок чи ґраток, що підкріплюють його по довжині (рис. 2), необхідно також перевіряти на втрату загальної стійкості за згинально-крутильною формою.

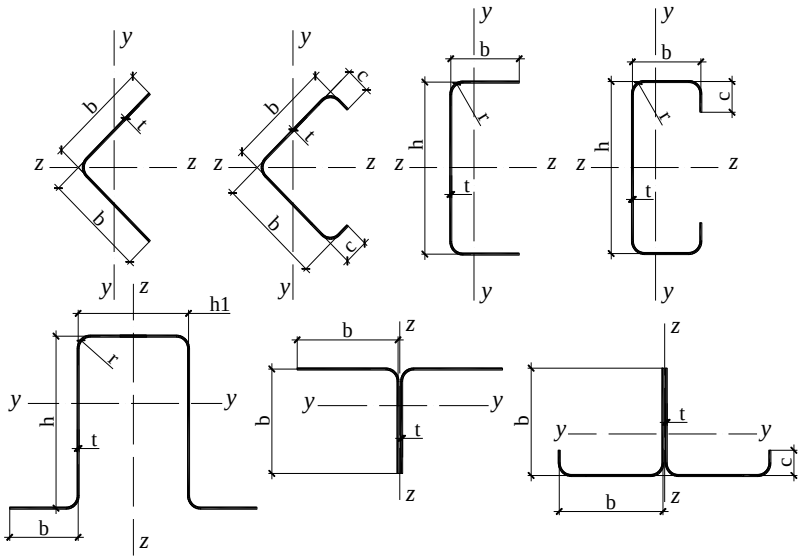


Рис. 2. Типи поперечних перерізів стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів, що підлягають втраті стійкості зі згинально-крутильним випучуванням при центральному стискові

Обмеження загальної стійкості при центральному стискові запишуться також у формі *перевірки загальної стійкості при крутильному та згинально-крутильному випучуванні* стержневого елемента. Для тих розрахункових поперечних перерізів стержневих елементів, що зазнали втрати місцевої стійкості або втрати стійкості форми перерізу, тобто коли

$A_{eff} < A_g$, обмеження загальної стійкості при крутильному та згинально-крутильному випучуванні запишуться як:

$$\frac{N\gamma_{M1}}{\chi_{T,eff} A_{eff} f_{yb}} - 1 \le 0; \quad (8)$$

$$\frac{N\gamma_{M1}}{\chi_{TF,eff} A_{eff} f_{yb}} - 1 \le 0; \quad (9)$$

тут $\chi_{T,eff}$ і $\chi_{TF,eff}$ – коефіцієнти стійкості відповідно для крутильного та згинально-крутильного випучування стержневого елементу, що обчислюються згідно з [4] залежно від відповідних умовних гнучкостей стержня $\bar{\lambda}_{T,eff}$ і $\bar{\lambda}_{TF,eff}$. Умовні гнучкості $\bar{\lambda}_{T,eff}$ і $\bar{\lambda}_{TF,eff}$, що відповідають втраті стійкості за крутильною та згинально-крутильною формами випучування відповідно, обчислюються з врахуванням розмірів «ефективного» поперечного перерізу стержневого елементу як:

$$\bar{\lambda}_{T,eff} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_{yb}}{N_{cr,T}}};$$

$$\bar{\lambda}_{TF,eff} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_{yb}}{N_{cr,TF}}};$$

тут $N_{cr,T,j}$ і $N_{cr,TF,j}$ – пружні критичні сили втрати стійкості стержневого елемента за крутильною та згинально-крутильною формами випучування відповідно, які визначають з врахуванням геометричних характеристик повного поперечного перерізу стержневого елементу. Пружна критична сила $N_{cr,T}$ для крутильної форми втрати стійкості розраховується згідно:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2}\left(GI_t + \frac{\pi^2 EI_\omega}{l_{ef,T}^2}\right);$$

де $l_{ef,T}$ – розрахункова довжина стержневого елемента для крутильної форми втрати стійкості; G – модуль зсуву; I_t – момент інерції вільного кручення для поперечного перерізу стержня брутто; I_ω – момент інерції стисненого кручення для поперечного перерізу стержня брутто; $i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2$; тут y_0 і z_0 – відстані від центру ваги поперечного перерізу брутто стержневого елементу до центру його згину вздовж осей $y-y$ і $z-z$ відповідно.

Для поперечних перерізів стержневих елементів із холодногнутих профілів з однією віссю симетрії $z-z$ (рис. 2), тобто коли $y_0 = 0$, пружна критична сила $N_{cr,TF}$ для згинально-крутильної форми втрати стійкості обчислюється як:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,z} i_0^2}{2\left(i_0^2 - z_0^2\right)}\left(1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,z}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,z}}\right)^2 + 4\left(\frac{z_0}{i_0}\right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,z}}}\right).$$

Для тих перерізів стержневих елементів, що не зазнали втрати місцевої стійкості або втрати стійкості форми перерізу, тобто коли $A_{eff} = A_g$, обмеження загальної стійкості при крутильному та згинально-крутильному випучуванні запишуться як:

$$\frac{N_c\gamma_{M1}}{\chi_T A_g f_{ya}} - 1 \le 0; \quad (10)$$

$$\frac{N_c\gamma_{M1}}{\chi_{TF} A_g f_{ya}} - 1 \le 0; \quad (11)$$

тут χ_T і χ_{TF} – коефіцієнти стійкості відповідно для крутильного та згинально-крутильного випучування стержневого елементу, що обчислюються згідно з [4] залежно від відповідних умовних гнучкостей стержня $\bar{\lambda}_T$ і $\bar{\lambda}_{TF}$. Умовні гнучкості $\bar{\lambda}_T$ і $\bar{\lambda}_{TF}$, що відповідають втраті стійкості відповідно за крутильною та згинально-крутильною формами випучування,

обчислюються з врахуванням геометричних розмірів поперечного перерізу стержневого елементу як:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_g f_{ya}}{N_{cr,T}}};$$

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_g f_{ya}}{N_{cr,TF}}}.$$

Для тих розрахункових поперечних перерізів стержневих елементів із холодногнутих профілів, що зазнали втрати місцевої стійкості (полички та/або стінки) або втрати стійкості форми перерізу (елемента жорсткості), розташування центра мас редукованого поперечного перерізу може не співпадати з розташуванням центра мас поперечного перерізу брутто. У такому випадку при формулюванні системи обмежень необхідно враховувати зміщення e_z центру мас редукованого поперечного перерізу по відношенню до центру мас поперечного перерізу брутто (див. рис. 1, *б*) шляхом врахування згинального моменту $\tilde{M}_y = Ne_z$.

У випадку, коли розрахункове поздовжнє зусилля, що діє у перерізі, викликає нормальні напруження стиску, *обмеження міцності при одночасній дії поздовжньої сили стиску та згинального моменту* запишуться як лінійна апроксимація їх напруженого стану. Для тих розрахункових поперечних перерізів стержнів, що зазнали втрати місцевої стійкості або втрати стійкості форми перерізу, тобто коли $W_{y,eff} < W_{y,el}$, обмеження міцності та загальної стійкості при одночасній дії поздовжньої сили стиску N та згинального моменту $\tilde{M}_y = Ne_z$ запишуться як:

$$\frac{N\gamma_{M1}}{A_{eff} f_{yb}} + \frac{Ne_z\gamma_{M1}}{W_{y,eff} f_{yb}} \le 1; \tag{12}$$

$$\left(\frac{N\gamma_{M1}}{\chi_{\min,eff} A_{eff} f_{yb,}}\right)^{0,8} + \left(\frac{Ne_z\gamma_{M1}}{\chi_{LT,eff} W_{y,eff} f_{yb}}\right)^{0,8} \le 1; \tag{13}$$

тут $W_{y,el}$ – мінімальний пружній момент опору поперечного перерізу стержня брутто відносно головної осі інерції перерізу $y-y$; $W_{y,eff}$ – мінімальний пружній момент опору «ефективного» поперечного перерізу, побудованого з міркування, що у перерізі діє лише згинальний момент відносно головної осі інерції перерізу $y-y$; $\chi_{\min,eff} = \min\left\{\chi_{y,eff}, \chi_{z,eff}, \chi_{T\,eff}, \chi_{TF\,eff}\right\}$; $\chi_{LT,eff}$ – коефіцієнт втрати стійкості плоскої форми згину, що обчислюється залежно від відповідної умовної гнучкості стержня $\bar{\lambda}_{LT,eff}$.

Умовна гнучкість $\bar{\lambda}_{LT,eff}$, що відповідає втраті стійкості плоскої форми згину, обчислюються з врахуванням розмірів «ефективного» поперечного перерізу стержневого елементу, побудованого з міркування, що у перерізі діє лише згинальний момент, як:

$$\bar{\lambda}_{LT,eff} = \sqrt{\frac{W_{y,eff} f_{yb}}{M_{cr,y}}};$$

тут пружний критичний момент $M_{cr,y,j}$ визначається з урахуванням геометричних характеристик поперечного перерізу брутто стержневого елементу залежно від форми епюри згинальних моментів, різноманітних умов закріплення кінців, розкріплення елементу від викривлення, кривизну стержневого елемента в плані до втрати стійкості плоскої форми згину, а також від місця прикладення навантаження відповідно до [4].

Для тих розрахункових поперечних перерізів стержнів, що не зазнали втрати місцевої стійкості або втрати стійкості форми перерізу, тобто коли $W_{y,eff} = W_{y,el}$, обмеження міцності та загальної стійкості при одночасній дії поздовжньої сили стиску N та згинального моменту $\tilde{M}_y = Ne_z$ запишуться як:

$$\frac{N}{A_{eff} f_{yb}} + \frac{Ne_z}{W_{y,el} f_{yb}} \le 1; \tag{14}$$

$$\left(\frac{N\gamma_{M1}}{\chi_{\min,eff}A_{eff}f_{yb}}\right)^{0,8}+\left(\frac{Ne_z\gamma_{M1}}{\chi_{LT}W_{y,el}f_{yb}}\right)^{0,8}\le 1; \qquad (15)$$

тут χ_{LT} – коефіцієнт втрати стійкості плоскої форми згину, що обчислюється залежно від відповідної умовної гнучкості стержня $\bar{\lambda}_{LT}$. Умовна гнучкість $\bar{\lambda}_{LT}$, що відповідає втраті стійкості плоскої форми згину, обчислюються з врахуванням розмірів поперечного перерізу брутто стержневого елементу як:

$$\bar{\lambda}_{LT}=\sqrt{\frac{W_{y,el}f_{yb}}{M_{cr,y}}}.$$

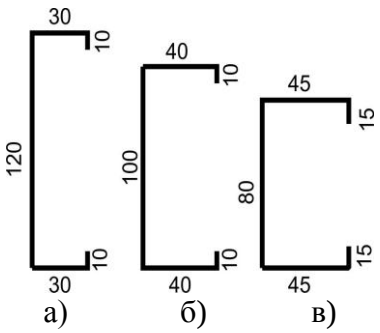


Рис. 3. Тип і розміри поперечних перерізів досліджуваних стержневих елементів із С-подібного холодногнутого профілю: а – С120×30×10×1; б – С100×40×10×1; в – С80×45×15×1

Результати досліджень. Перевірний розрахунок несучої здатності стержневих елементів із холодногнутих профілів відповідно до вимог [4, 5] реалізований у програмі MAGNUM (https://scadsoft.com/products/Magnum). За допомогою цієї програми був виконаний порівняльний аналіз несучої здатності трьох центрально-стиснутих стержнів С-подібного перерізу, розміри яких показані на рис. 3. Приймалися матеріал профілів – сталь класу С235, товщина профілю – 1 мм.

Площа поперечного перерізу для всіх досліджуваних стержневих елементів є однаковою, а от співвідношення розмірів і, що найголовніше, гнучкостей стінки і поличок досить помітно відрізняються. Як результат, отримали розбіжність у значенні максимально можливої сили поздовжнього стиску. Порівняльні графіки, що демонструють залежність несучої здатності досліджуваних стержневих елементів на дію поздовжньої сили стиску від довжини стержня, подані на рис. 4.

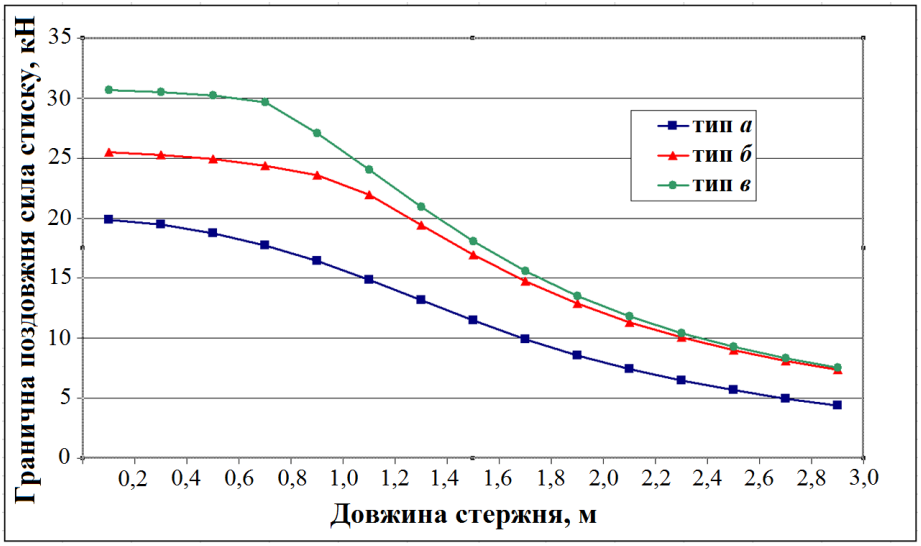


Рис. 4. Порівняння несучої здатності досліджуваних стержневих елементів на дію поздовжньої сили стиску:
тип а – для стержня із перерізом С120×30×10×1; *тип б* – для стержня із перерізом С100×40×10×1; *тип в* – для стержня із перерізом С80×45×15×1

Як видно з представленого графіку найбільшою несучою здатністю на дію поздовжньої сили стиску характеризується стержень С-подібного профілю С80×45×15×1 (висотою 80 мм та шириною полиці 45мм). При чому, при одній і тій самій площі поперечного перерізу несуча

здатність С-подібного профілю С80×45×15×1 при довжині 0,2 м у 1,54 рази виявилась вищою за несучу здатність профілю С120×30×10×1 тієї ж довжини та у 1,2 рази вищою за несучу здатність профілю С100×40×10×1. Несуча здатність С-подібного профілю С80×45×15×1 при довжині 3,0 м виявилась у 1,71 рази вищою за несучу здатність профілю С120×30×10×1 тієї ж довжини та у 1,02 рази вищою за несучу здатність профілю С100×40×10×1 тієї ж довжини.

Виконані дослідження показали, що для С-подібних холодногнутих профілів, що є моносиметричними, втрата стійкості за згинально-крутильною формою є визначальною. Тому найбільшою несучою здатністю на дію поздовжньої сили стиску характеризувався стержень із найбільшим значенням інерційних характеристик відносно осі $z-z$, що не є віссю симетрії. Окрім того, оцінено вплив співвідношення габаритних розмірів перерізу (ширини полиці до висоти стінки) на несучу здатність холодногнутих профілів. Показано, що при одній і тій самій площі поперечного перерізу несучу здатність холодногнутого профілю на дію поздовжньої сили стиску можна значно підвищити (в окремих випадках до 1,7 раз), якщо співвідношення ширини полиці до висоти стінки профілю прийняти близьким до оптимального [16].

На рисунках 3–5 подані результати розрахунків несучої здатності стержнів на дію поздовжньої сили стиску, обчислені за нормами проектування як для холодногнутих профілів [4, 5] і за нормами проектування звичайних сталевих конструкцій [17]. При цьому несуча здатність розглянутих С-подібних холодногнутих профілів визначалась відповідно до вимог [4, 5] з врахуванням обмежень міцності при дії поздовжньої сили стиску (1) – (3), обмежень стійкості при дії поздовжньої сили за згинальною формою випучування (4) – (7) та за згинально-крутильною формою випучування (8) – (11), обмежень міцності (12), (14) та стійкості (13), (15) при одночасній дії поздовжньої сили і згинального моменту.

Довжина стержнів змінювалась від 0,2 м до 3,0 м. В усіх розглянутих випадках при розрахунку відповідно до вимог [4, 5] спостерігалась втрата стійкості стінки профілю, а також втрата стійкості форми перерізу (втрата стійкості одинарного відгину, що підкріплює полички перерізу за згинальною формою випучування). Результати обчислень представлені на рис. 5 – 7.

Додатково обчислювалась несуча здатність розглянутих профілів відповідно до вимог [17] з врахуванням коефіцієнту поздовжнього згину $\varphi_{\min} = \{\varphi_y,\ \varphi_z\}$, який відповідає згинальним формам втрати стійкості стержня при центральному стискові, а також з врахуванням коефіцієнту φ_c, що враховує згинально-крутильну форму втрату стійкості центрально-стиснутого стержня відкритого профілю. Зазначимо, що для розглянутих профілів обмеження місцевої стійкості стінки та поличок перерізу відповідно до вимог [17] не виконувались, тому обмеження загальної стійкості за згинальною та згинально-крутильною формами випучування формулювались залежно від розрахункової зменшеної площі поперечного перерізу A_d, яка обчислювалась відповідно до Додатку Л [17] як для елементів з гнучкою стінкою. Необхідно зазначити, що при цьому умовна гнучкість стінки перерізів в багатьох випадках перевищувала граничну умовну гнучкість стінки, обчислену відповідно до вимог [17] більше, ніж у 2 рази. Так, для С-подібного холодногнутого профілю С120×30×10×1 коефіцієнт використання обмеження місцевої стійкості стінки змінювався в діапазоні 3.88…2.43 відповідно до довжини стержня 0.2…3.0 м; для С-подібного холодногнутого профілю С100×40×10×1 коефіцієнт використання обмеження місцевої стійкості стінки змінювався в діапазоні 3.2…2.01 відповідно до довжини стержня 0.2…1.8 м; для С-подібного холодногнутого профілю С80×45×15×1 коефіцієнт використання обмеження місцевої стійкості стінки змінювався в діапазоні 2.53…2.09 відповідно до довжини стержня 0.2…1.0 м. Тому формально на цих діапазонах довжин стержнів вимоги норм [17] не дотримані. Результати обчислень представлені на рис. 5– 7.

Для С-подібного холодногнутого профілю висотою С120×30×10×1 на малих довжинах (до 1,2 м) несуча здатність, обчислена відповідно до вимог [17] є вищою (на 22.7% для довжини стержня 0,2 м і цей відсоток плавно спадає до 3.7% для довжини стержня 1,2 м) порівняно до несучої здатності, обчисленої відповідно до вимог [4, 5]. Для цього ж стержня на більших його довжинах (більше 1,2 м) несуча здатність, обчислена відповідно до вимог [4, 5] є вищою (на 18.75% для довжини стержня 3,0 м і цей відсоток плавно спадає до 1.7% для довжини стержня 1,4 м) порівняно до несучої здатності, обчисленої відповідно до вимог [17].

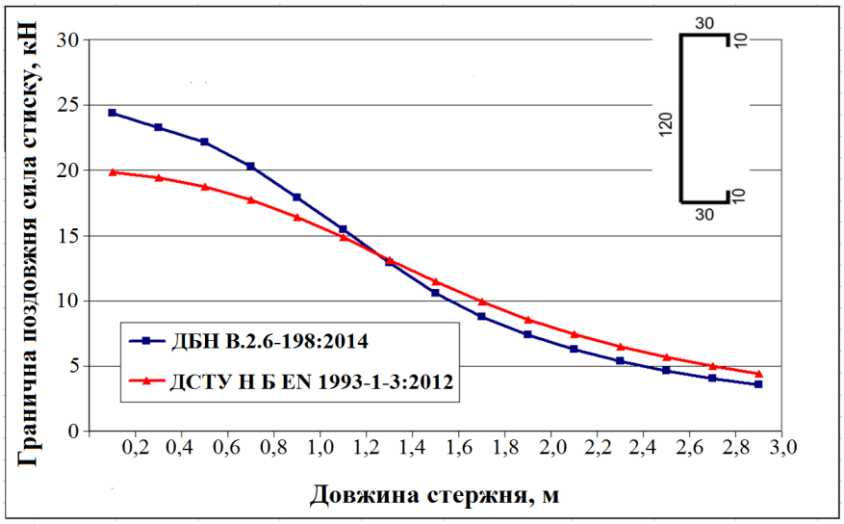


Рис. 5. Несуча здатність стержневого елементу С-подібного профілю С120×30×10×1, обчислена за нормами проектування [17] (синім кольором) і [4] (червоним кольором)

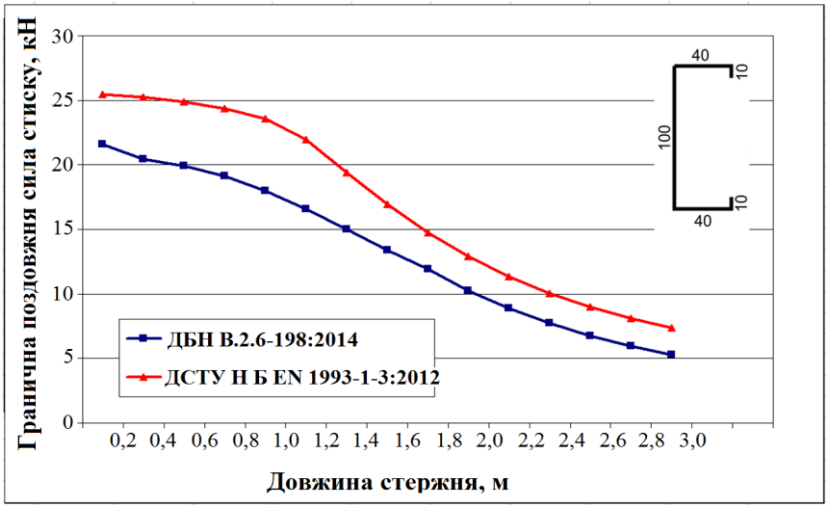


Рис. 6. Несуча здатність стержневого елементу С-подібного профілю С100×40×10×1, обчислена за нормами проектування [17] (синім кольором) і [4] (червоним кольором)

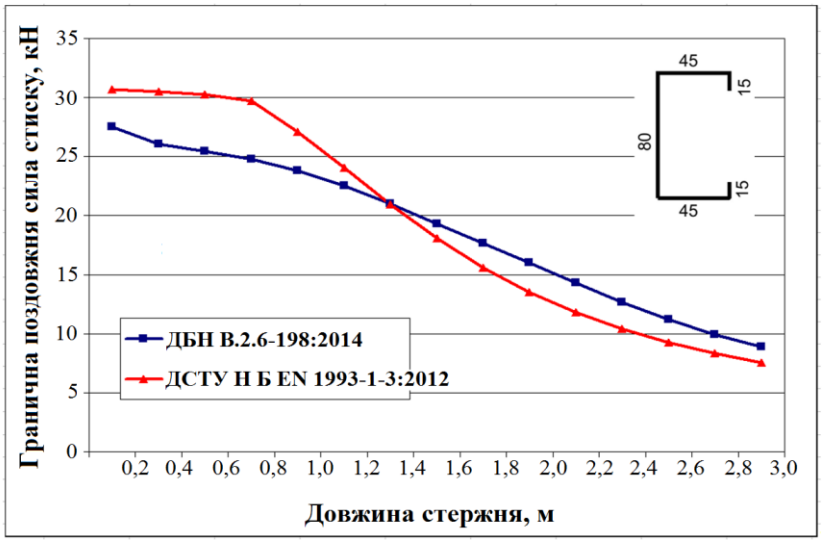


Рис. 7. Несуча здатність стержневого елементу С-подібного профілю С80×45×15×1, обчислена за нормами проектування [17] (синім кольором) і [4] (червоним кольором)

Для С-подібного холодногнутого профілю С100×40×10×1 несуча здатність, обчислена відповідно до вимог [4, 5] є вищою (у середньому на 22%) порівняно до несучої здатності, обчисленої відповідно до вимог [17] на всьому діапазоні довжин стержня.

Для С-подібного холодногнутого профілю С80×45×15×1 на малих довжинах (до 1,2 м) несуча здатність, обчислена відповідно до вимог [4, 5] є вищою (на 10.3% для довжини стержня 0,2 м і цей відсоток плавно спадає до 6.4% для довжини стержня 1,2 м) порівняно до несучої здатності, обчисленої відповідно до вимог [17]. Для цього ж стержня на більших його довжинах (більше 1,2 м) несуча здатність, обчислена відповідно до вимог [17], є вищою (на 18% для довжини стержня 3,0 м і цей відсоток плавно спадає до 6.88% для довжини стержня 1,6 м) порівняно до несучої здатності, обчисленої відповідно до вимог [4, 5].

У подальшому виконувалось порівняння несучих здатностей на дію поздовжньої сили стиску двох стержневих елементів, переріз яких приймався із С-подібного холодногнутого профілю і складеним із двох С-подібних холодногнутих профілів. На рис. 8 представлені результати такого порівняння. Як видно з наведених графіків несуча здатність стержневого елемента складеного перерізу є суттєво вищою (у 3.75 раз – при довжині стержня 0.2 м і у 3.1 раз – при довжині стержня 3.0 м) за несучу здатність стержневого елементу з перерізом з поодинокого С-подібного профілю, хоча площа поперечних перерізів розглянутих стержнів відрізняється лише вдвічі.

Виявлений ефект має такі пояснення. По-перше, для стержневих елементів складеного перерізу, симетричного відносно двох головних осей інерції, не притаманна втрата стійкості при центральному стискові за згинально-крутильною формою випучування. А несуча здатність стержневого елемента з перерізом із поодинокого С-подібного профілю обмежується саме несучою здатністю на втрату стійкості за цією формою випучування. По-друге, стержневі елементи обох перерізів через значну тонкостінність підлягають втраті місцевої стійкості та втраті стійкості форми перерізу, внаслідок чого при перевірці їх несучої здатності використовуються геометричні характеристики «ефективного» перерізу, побудованого при дії центрального стиску. Оскільки поодинокий С-подібний холодногнутий профіль є моносиметричним, відбувається зміщення центру ваги «ефективного» перерізу по відношенню до центру ваги перерізу брутто. Це обумовлює виникнення додаткового згинального моменту, що діє відносно осі, яка не є віссю симетрії профілю. Стержень починає працювати як позацентрово-стиснутий, несуча здатність якого є нижчою за рахунок наявності додаткової компоненти напруженого стану.

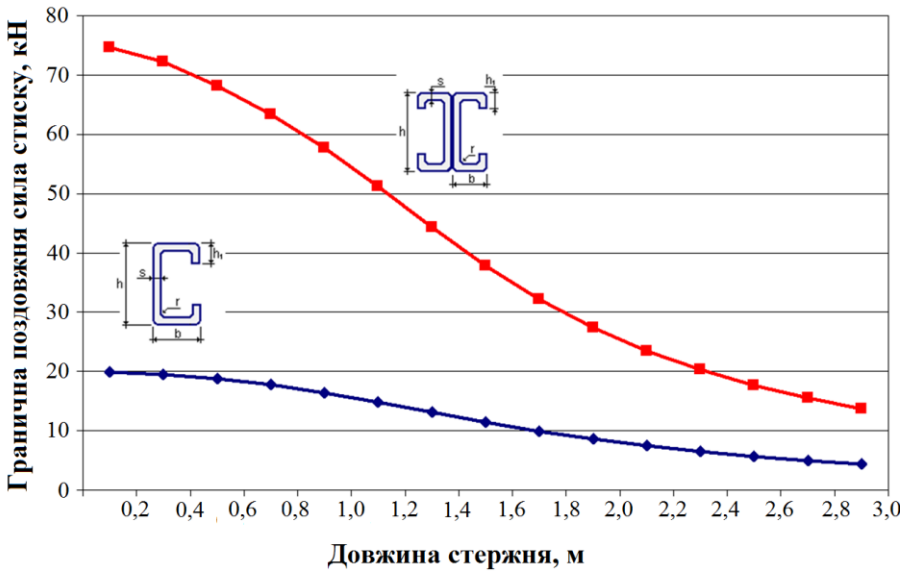


Рис. 8. Порівняння несучої здатності на дію поздовжньої сили стиску стержнів з поодиноким і складеним перерізом із С-подібного холодногнутого профілю

Висновки. Виконані дослідження показали, що для С-подібних холодногнутих профілів, що є моносиметричними, втрата стійкості за згинально-крутильною формою є визначальною. Для таких перерізів оцінено вплив співвідношення габаритних розмірів (ширини полиці до висоти стінки) на несучу здатність холодногнутих профілів. Показано, що при одній і тій самій площі поперечного перерізу несучу здатність холодногнутого профілю на дію поздовжньої сили стиску можна значно підвищити (в окремих випадках до 1,7 раз), якщо співвідношення ширини полиці до висоти стінки профілю прийняти близьким до оптимального.

Представлені результати розрахунків несучої здатності стержневих елементів із холодногнутих профілів на дію поздовжньої сили стиску, обчислені за нормами проектування ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 і за нормами проектування ДБН В.2.6-198:2014. Показано, що в окремих випадках різниця в оцінці несучої здатності стержневих елементів із холодногнутих профілів сягала 25%. Окрім того, для розглянутих профілів обмеження місцевої стійкості стінки та поличок перерізу відповідно до вимог ДБН В.2.6-198:2014 не виконувались.

Виконано порівняння несучої здатності на дію поздовжньої сили стиску стержнів з поодиноким і складеним перерізом із С-подібного холодногнутого профілю. Виявлено, що несуча здатність стержневого елемента складеного перерізу є вищою у 3.75…3.1 разів (залежно від довжини стержня) за несучу здатність стержневого елементу з поодинокого С-подібного профілю, водночас площа елемента складеного перерізу відрізняється лише вдвічі.

Література

1. Айрумян Э. Л., Каменщиков Н. И. Рамные конструкции стального каркаса из оцинкованных гнутых профилей для одноэтажных зданий различного назначения. *Мир строительства и недвижимости*. 2006. №36. С. 9 – 11.
2. Бєлов І. Д., Юрченко В. В. Розробка та впровадження ефективних конструкцій будівель із тонкостінних холодногнутих профілів: сучасний стан проблеми та програма досліджень. *Збірник наукових праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди»*. 2010. Вип. 20. С. 364 – 369.
3. Schueremans L., Furtado A. C. FRISOMAT – steel innovator in cold-rolled buildings. *Steel* Construction. 2016. Vol. 9, No 3. P. 255 – 258.
4. 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. 220 с.
5. 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. 97 с.
6. Белый Г. И. О расчете упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме с учетом касательных напряжений деформаций сдвига. *Металлические конструкции и испытания сооружений. Межвуз. темат. сб. тр.*1983. № 32. С. 42 – 48.
7. Маневич А. И., Ракша С. В. Оптимальные центрально сжатые стержни открытого профиля. *Теоретичні основи будівництва.* 2000. Вып. 8. С. 484–489.
8. Сливкер В. И. Строительная механика. Вариационные основы: монография. М.: Изд-во АСВ, 2005. 736 с.
9. Туснин А. Р. Численный расчет конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля: монография. М.:Изд-во АСВ, 2009. 143 с.
10. Лалин В. В., Рыбаков В. А., Морозов С. А. Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем. *Инженерно-строительный журнал*. 2012. №1(27). С. 53–73.
11. Лалин В. В., Рыбаков В. А. Конечные элементы для расчета ограждающих конструкций из тонкостенных профилей. *Инженерно-строительный журнал*. 2011. №8(26). С. 69–80.

12. Осокин А. В. Развитие метода конечных элементов для расчета систем, включающих тонкостенные стержни открытого профиля: автореф. дисс….канд. техн. наук: 05.23.17. Москва, 2010. 24 с.

13. Nazmeeva T. V., Vatin N. I. Numerical investigations of notched C-profile compressed members with initial imperfections. *Magazine of civil engineering*. 2016. No 2(62). P. 92-101. DOI: 10.5862/MCE.62.9.

14. Юрченко В. В., Перельмутер А. В. Несуча здатність стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів: монографія. Київ: Каравела, 2020. 310 с.

15. Юрченко В.В. Удосконалення конструктивної форми легких каркасів будівель із холодногнутих профілів на базі рішення задачі оптимального проектування: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.23.01. Київ, 2019. 44 с.

16. Юрченко В. В. Пошук оптимальних розмірів поперечного перерізу С-подібного холодногнутого профіля, що працює в умовах центрального стиску. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць.* 2019. Вип. № 77. С. 115 – 125. DOI: 10.31650/2415-377X-2019-77-115-125

17. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 199 с.

References

[1] E. L. Yrumjan, N. I. Kamenshchikov, "Ramnyie konstruktsii stalnogo karkasa iz otsinkovannyih gnutyih profiley dlya odnoetazhnyih zdaniy razlichnogo naznacheniya", *Mir stroitelstva i nedvizhimosti*, no. 36, pp. 9 – 11, 2006.

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

[4] 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.

[5] 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.

[6] G.I. Belyj, "O raschete uprugoplasticheskih tonkostennyih sterzhney po prostranstvenno-deformiruemoy sheme s uchetom kasatelnyih napryazheniy deformatsiy sdviga", *Metallicheskie konstruktsii i ispyitaniya sooruzheniy*, no. 32, pp. 42 – 48, 1983.

[7] A.I. Manjevich, S.V. Raksha, "Optimalnyie tsentralno szhatyie sterzhni otkryitogo profilya", *Theoretical Foundations of Civil Engineering*, vol. 8, pp. 484–489, 2000.

[8] V.I. Slovker, *Stroitelnaya mehanika. Variatsionnyie osnovy*, Moscow, ASV, 2005.

[9] A. R. Tusnin, *Chislennyiy raschet konstruktsiy iz tonkostennyih sterzhney otkryitogo profilya*, Moscow, ASV, 2009.

[10] V.V. Lalin, V.A. Rybakov, S.A. Morozov, "Issledovanie konechnyih elementov dlya rascheta tonkostennyih sterzhnevyih sistem", *Inzhenerno-stroitelnyi zhurnal*, no. 1(27), pp. 53–73, 2012.

[11] V.V. Lalin, V.A. Rybakov, "Konechnyie elementyi dlya rascheta ograzhdayuschih konstruktsiy iz tonkostennyih profiley", *Inzhenerno-stroitelnyi zhurnal*, no. 8(26), pp. 69–80, 2011.

[12] A. V. Osokin, "Razvitie metoda konechnykh elementov dlia rascheta system, vkliuchaiushchykh tonkostennye sterzhni otkrytoho profylia", avtoref. dys. … kand. tekhn. nauk: 05.23.17, Moscow, 2010.

[13] T. V. Nazmeeva, N. I. Vatin, "Numerical investigations of notched c-profile compressed members with initial imperfections", *Magazine of civil engineering*, no. 2(62), pp. 92-101, 2016. DOI: 10.5862/MCE.62.9.
[14] V. V. Yurchenko, A.V.Perelmuter, *Nesucha zdatnist sterzhnevykh elementiv konstruktsii iz kholodnohnutykh profiliv*, Kyiv, Karavela, 2020.
[15] V. V. Yurchenko, "Udoskonalennia konstruktyvnoi formy lehkykh karkasiv budivel iz kholodnohnutykh profiliv na bazi rishennia zadachi optymalnoho proektuvannia", avtoref. dys. … d-ra tekhn. nauk: 05.23.01, Kyiv, 2019.
[16] V. V. Yurchenko, "Poshuk optymalnykh rozmiriv poperechnoho pererizu S-podibnoho kholodnohnutoho profilia, shcho pratsiuie v umovakh tsentralnoho stysku", *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, vol. 77, pp. 115 – 125, 2019. DOI: 10.31650/2415-377X-2019-77-115-125.
[17] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2014.

АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Перельмутер А.В., д.т.н., с.н.с.,
avp@scadsoft.com, ORCID: 0000-0001-9537-2728
НПО «СКАД Софт»
ул. Просвещения, 3А, оф.2, г. Киев, 03037, Украина
Юрченко В.В., д.т.н., профессор,
vitalina@scadsoft.com, ORCID: 0000-0003-4513-809X
Киевский национальный университет строительства и архитектуры
просп. Воздухофлотский, 31, г. Киев, 03680, Украина

Аннотация. В связи с имплементацией на территории Украины европейских норм проектирования, регламентирующих нормативный расчет и проектирование несущих элементов конструкций из холодногнутых профилей, основной целью исследований выдвигался детальный анализ и проверка непротиворечивости, согласованности и полноты этих нормативных требований. В статье рассматривается и исследуется несущая способность стержневых элементов из холодногнутых профилей, подверженных действию центрального сжатия. Представлена система ограничений, в которой сформулированы условия прочности и общей устойчивости таких стержневых элементов с учетом их возможной закритической работы, а именно способности сопротивляться внешним воздействиям и после возникновения явления потери местной устойчивости элементов сечения и/или потери устойчивости формы сечения.

Выполненные исследования несущей способности продемонстрировали, что для моно-симметричных холодногнутых профилей потеря устойчивости по изгибно-крутильной форме является определяющей. Для таких сечений оценено влияние соотношения габаритных размеров (ширины полки к высоте стенки) на несущую способность холодногнутых профилей. Показано, что при одной и той же площади поперечного сечения несущую способность холодногнутого профиля на действие продольной силы сжатия можно значительно повысить при помощи назначения оптимального соотношения ширины полки к высоте стенки профиля.

Представлены результаты расчетов несущей способности стержневых элементов из холодногнутых профилей на действие продольной силы сжатия, вычисленные по нормам проектирования ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 и по нормам проектирования ДБН В.2.6-198:2014. Показано, что в отдельных случаях разница в оценке несущей способности стержневых элементов из холодногнутых профилей достигала 25%.

Выполнено сравнение несущей способности на действие продольной силы сжатия для стержневых элементов из С-образного профиля и с составным сечением из двух С-образных профилей. Показано, что несущая способность стержневого элемента составного сечения

превышает несущую способность элемента из одиночного профиля более чем в 3 раза, в то время как площади поперечных сечений этих элементов отличаются лишь вдвое.

Ключевые слова: несущая способность, прочность, устойчивость, тонкостенный стержень, холодногнутый профиль.

LOAD-BEARING CAPACITY ANALYSIS FOR STRUCTURAL COLD-FORMED MEMBERS SUBJECTED TO CENTRAL COMPRESSION

Perelmuter A.V., Doctor of Engineering, Senior Staff Scientist,
avp@scadsoft.com, ORCID: 0000-0001-9537-2728
NPO «SCAD Soft»
Osvity str., 3A, of. 2, Kyiv, 03037, Ukraine
Yurchenko V.V., Doctor of Engineering, Professor,
vitalina@scadsoft.com, ORCID: 0000-0003-4513-809X
Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture
31, Povitroflotsky Ave., Kyiv, 03037, Ukraine

Abstract. The main purpose of the research was a deep analysis and verification of the consistency and completeness of the design code relating to calculation of load-bearing structural members made from cold-formed profiles. The work has been done in close connection with the implementation on the territory of Ukraine of this design code. The article has discussed and investigated the load-bearing capacity of structural members made of cold-formed profiles subjected to the action of central compression. A system of constraints has been presented, in which the strength and buckling constraints for thin-walled cold-formed column members are formulated, taking into account their possible post-buckling behavior, namely, the ability to resist external loads and effects even after the occurrence of the local buckling and/or distortional buckling phenomenon.

The performed load-bearing capacity investigation has shown that for the mono-symmetric cold-formed profiles, the flexural-torsional buckling is determinative. For such cold-formed profiles, the effect of the overall dimensions ratio (flange width to web height) on the load-bearing capacity of cold-formed profiles has been estimated. It has been shown that for the same cross-sectional area the load-bearing capacity of a column structural member made from cold-formed profile and subjected to axial compression can be significantly increased by assigning an optimal ratio of flange width to web height.

The paper also has presented the results of the load-bearing capacities for the structural cold-formed members subjected to central compression, calculated according to the design standard DSTU-N B EN 1993-1-3: 2012 and according to the design code DBN V.2.6-198: 2014. It has been shown that in some cases the difference in the assessment of the load-bearing capacity for such structural cold-formed members reached 25%.

A comparison of the load-bearing capacities for the action of the central compression has been made for structural cold-formed members made from a C-shaped profile and with a composite section of two C-shaped profiles. It has been shown that the load-bearing capacity of the structural cold-formed member of the composite section exceeds the load-bearing capacity of the member with single C-shaped profile by more than 3 times, while cross-section areas of these structural members differ only doubly.

Keywords: load-bearing capacity, strength, stability, thin-walled bar, cold-formed profile.

Стаття надійшла до редакції 29.11.2021