



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

N4, TOM 16 (2010) 239-250

УДК [621.071.3 : 621.771] 624.046.3

(10)-0225-0

ПРО ПЕРЕВІРКУ СТІЙКОСТІ ЦЕНТРАЛЬНО-СТИСНУТИХ СТЕРЖНІВ З ОДИНОЧНИХ ТОНКОСТІННИХ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ ВІДКРИТОГО ПЕРЕРІЗУ

І. Д. Белов ^a, В. В. Юрченко ^b

^a *Випробувальний центр будівельних конструкцій,
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03680.*

^b *Київський національний університет будівництва та архітектури,
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03680.*

E-mail: vcbk@ukr.net

Отримана 3 листопада 2010; прийнята 26 листопада 2010.

Анотація. Показано, що широке використання конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів вітчизняного виробництва затримується передусім недосконалістю нормативної бази та недостатністю вітчизняного досвіду економічного та надійного проектування таких конструкцій. З огляду на це у роботі висвітлено питання нормативного перевірного розрахунку стійкості тонкостінних холодногнутих профілів відкритого перерізу відповідно до СНиП II-23-81*, СП 53-102-2004 і проекту першої редакції ДБН В.2.6. Приділено увагу визначенню зменшених (редукованих) розмірів поперечних перерізів елементів із тонкостінних холодногнутих профілів для тих випадків, коли гнучкість елементів перерізу (полички і/або стінки) перевищує їх граничне значення.

Ключові слова: швидкокомтовані будівлі комплектної поставки, холодногнутий профіль, тонкостінні елементи, перевірений розрахунок стійкості, редуковані розміри перерізу.

ПРО ПРОВЕРКУ УСТОЙЧИВОСТИ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ ИЗ ОДИНОЧНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ОТКРЫТОГО СЕЧЕНИЯ

И. Д. Белов ^a, В. В. Юрченко ^b

^a *Испытательный центр строительных конструкций,
Воздухофлотский пр., 31, г. Киев, Украина, 03680.*

^b *Киевский национальный университет строительства и архитектуры,
Воздухофлотский пр., 31, г. Киев, Украина, 03680.*

E-mail: vcbk@ukr.net

Получена 3 ноября 2010; принята 26 ноября 2010.

Аннотация. Показано, что широкое использование конструкций из тонкостенных холодногнутих профилей отечественного производства задерживается прежде всего из-за несовершенства нормативной базы и недостаточного отечественного опыта экономичного и надежного проектирования таких конструкций. Ввиду этого, в работе освещен вопрос нормативного проверочного расчета устойчивости тонкостенных холодногнутих профилей открытого сечения в соответствии со СНиП II-23-81*, СП 53-102-2004 и проектом первой редакции ДБН В.2.6. Уделено внимание определению уменьшенных (редуцированных) размеров поперечных сечений элементов из тонкостенных холодногнутих профилей для тех случаев, когда гибкость элементов сечения (полки и/или стенки) превышает их предельное значение.

Ключевые слова: быстровозводимые здания комплектной поставки, холодногнутой профиль, тонкостенные элементы, проверочный расчет устойчивости, редуцированные размеры сечения.

RESISTANCE CHECK OF CENTRAL STRUTS COMPOSED OF ISOLATED THIN-WEBBED COLD ROLL-FORMED SHAPES WITH OPEN CROSS SECTION

Igor Byelov ^a, Vitalina Yurchenko ^b

^a *Laboratory of Structural Testing,*

31, Povitroflotsky Av., Kyiv, Ukraine, 03680.

^b *Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture,*

31, Povitroflotsky Av., Kyiv, Ukraine, 03680.

E-mail: vcbk@ukr.net

Received 3 November 2010; accepted 26 November 2010.

Abstract. The extensive use of structures of domestic produced thin-webbed cold roll-formed shapes is delayed, first of all, because of imperfection of the normative base and the deficient domestic experience of economic and reliable designing of such type of structures. Therefore, the paper has adequately elucidated the problem of normative checking analysis of the thin-webbed cold roll-formed shapes resistance in accordance with the Sanitary Regulations II-23-81*, Civil Engineering Regulations 53-102-2004 and the first version project of the National Civil Engineering Regulations of Ukraine B.2.6. The paper gives consideration to determination of reduced dimensions of the cross section of the members of thin-walled cold roll-formed shapes for the cases when the slenderness ratio of the section members (flanges and/or a web) exceeds their limiting value.

Keywords: complete delivered light-gauge steel buildings, cold roll-formed shape, thin-webbed members, checking analysis of resistance, reduced sectional dimensions.

Вступ

Сьогодні на український ринок металокоплекцій 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 [2].

Використання легких сталевих конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів у практиці будівництва має ряд переваг [6, 25]:

- легкість конструкції у поєднанні з міцністю та стійкістю, зменшення навантажень від власної ваги (витрати сталі на каркас будівлі складає у середньому 25...50 кг/м²);
- підвищена стійкість до сейсмічних впливів та інших динамічних навантажень (будівлі з несучим каркасом із тонкостінних холодногнутих профілів здатні витримувати сейсмічні навантаження до 9 балів за шкалою Ріхтера, що пояснюється піддатливістю сталюого каркасу будівлі);
- зниження транспортних витрат за рахунок зниження маси, можливість доставки до місця будівництва повного комплексу конструкцій та елементів будівлі будь-яким видом транспорту;
- зменшення трудовитрат на монтаж та скорочення термінів будівництва, що досягається завдяки легкості кожного елемента та

- простоті вузлових рішень на болтах та самонарізних гвинтах;
- скорочення термінів будівництва за рахунок зниження витрат часу на проектування, виготовлення, доставку та монтаж;
- мінімальне використання будівельних машин (кранів, вантажопідйомних механізмів), можливість виконувати монтажні роботи у стиснених умовах, а також за допомогою ручного обладнання;
- практично повна відсутність «мокрих» технологічних процесів при будівництві, що дозволяє вести будівництво у будь-яку пору року та за будь-яких кліматичних умов.

Як недоліки конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів можна відмітити більш високу імовірність пошкодження конструкцій при транспортуванні, вантажно-розвантажувальних роботах, на монтажі.

Не дивлячись на це, впровадження у практику будівництва конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів є актуальним та економічно обґрунтованим у тій області використання, де їх ефективність є найвищою: житлові будинки (одноповерхові, у т. ч. багатоквартирні, мансарди, котеджі тощо); будівлі і споруди громадського призначення (будівлі адміністративного та торговельно-побутового призначення, криті спортивні споруди, торговельно-виставкові павільйони, автомаїстерні тощо); виробничі та сільськогосподарські будівлі (безкранові виробничі цехи, склади, ангари, ферми, оранжереї, теплиці тощо) [10].

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. Саме недостатньою вивченістю питання відносно дійсної несучої здатності конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів можна пояснити той факт, що у Рекомендаціях [1] було різко обмежено коефіцієнт умов роботи таких конструкцій, прийнятий у розмірі 0,75 (в окремих випадках 0,8).

Статичний аналіз та визначення внутрішніх зусиль в елементах конструкції з тонкостінних холодногнутих стержнів відкритого профілю при врахуванні стисненого кручення є склад-

ною задачею [26, 27, 32]. Як відомо, теорія тонкостінних стержнів відкритого профілю потребує введення сьомого ступеня свободи у вузлах стержневої системи, що примикають до тонкостінного стержня [10, 23]. Цей сьомий ступінь свободи відповідає депланаційній складовій вузлового переміщення. Туснін О. Р. дослідив питання чисельного розрахунку просторових конструкцій з тонкостінних стержнів відкритого профілю із розробкою стержневого тонкостінного скінченного елемента, який дозволяє врахувати не лише чисте, але й стиснене кручення при співпадінні та неспівпадінні центрів ваги та згину, наявності або відсутності ексцентриситетів у вузлах тощо. Автором представлено матрицю жорсткості тонкостінного стержня з урахуванням деформації стисненого кручення, а також матрицю перетворення координат для переходу від місцевої системи координат до загальної [23].

Загальна теорія розрахунку тонкостінних стержнів відкритого профілю та стержневих систем, складених з тонкостінних стержнів, викладена в працях В. З. Власова [11], Є. А. Бейліна [5], Г. Ю. Джанелідзе і Я. Г. Пановко [13], А. А. Уманського [24].

Вивченню проблеми стійкості несучих елементів конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів присвячені праці Белого Г. І. [7, 8] та його учня Астахова І. В. [3], Перельмутера А. В. і Слівкєра [16, 17], Манєвича А. І. [15], Ракши С. В. [19] Багмутова В. П. [4], Ватіна Н. І. [9, 10] та інших [14, 20].

Характерною особливістю несучих елементів із тонкостінних холодногнутих профілів є можливість їх закритичної роботи (після втрати місцевої стійкості стиснутих частин елементів перерізу). Втрата місцевої стійкості тонкої підкріпленої пластини (якими є елементи перерізу) призводить до нерівномірного розподілу нормальних напружень у перерізі такої пластини, що характеризується концентрацією нормальних напружень в околі підкріплених країв пластини, тобто фактично у місцях спряження тонких пластин, з яких складається переріз. При обчисленні несучої здатності поперечного перерізу тонкостінного елемента використовується концепція «ефективної ширини» елемента, вперше запропонована фон Карманом [33], і розвинута у працях [28, 29, 30, 31].

Дана робота присвячується висвітленню питання нормативного перевірного розрахунку стійкості тонкостінних холодногнутих профілів відкритого перерізу, у тому числі визначенню зменшених (редукованих) розмірів поперечних перерізів елементів для тих випадків, коли гнучкість елементів перерізу (полічки і/або стінки) перевищує їх граничне значення.

1. Прийнята термінологія і основні позначення

У подальших викладках будемо використовувати такі позначення (рис. 1):

h – загальна висота перерізу (генеральний розмір перпендикулярний до вільної осі перерізу, наприклад, висота стінки);

b – загальна ширина перерізу (генеральний розмір паралельний до вільної осі перерізу, наприклад, ширина поліці);

t – товщина профілю;

N – поздовжнє зусилля у розрахунковому перерізі елемента;

A – площа поперечного перерізу стержня бруто;

R_y – розрахунковий опір сталі на стиск, розтяг і згин;

γ_c – коефіцієнт умов роботи конструкції;

E – модуль пружності сталі;

G – модуль зсуву;

I_x і I_y – моменти інерції перерізу відносно головних осей перерізу $x - x$ і $y - y$ відповідно;

i_x і i_y – радіуси інерції поперечного перерізу стержня відносно головних осей перерізу $x - x$ і $y - y$ відповідно;

$l_{ef,x}$ і $l_{ef,y}$ – розрахункові довжини стержневого елемента у двох головних площинах інерції $x - z$ і $y - z$ відповідно;

λ_x і λ_y – гнучкості стержня при згині відносно осей відповідно $x - x$ і $y - y$;

$\bar{\lambda}_x$ і $\bar{\lambda}_y$ – умовні гнучкості стержня при згині відносно осей відповідно $x - x$ і $y - y$;

h_{ef} – розрахункова висота стінки;

b_{ef} і $b_{ef,1}$ – розрахункова ширина поліці;

a_{ef} – розрахункова довжина відгину;

a_x і a_y – координати центру згину перерізу відносно осей $x - x$ і $y - y$ відповідно;

I_t – момент інерції перерізу при вільному крученні;

I_ω – секторіальний момент інерції перерізу.

У подальших викладках будемо використовувати наступну термінологію.

Форма поперечних перерізів тонкостінних стержнів є відкритою, що обумовлено особливостями технологічного процесу виготовлення холодногнутих профілів. Кожний поперечний переріз стержня прив'язують до двох головних осей інерції $x - x$ і $y - y$, перетин яких проходить у центрі ваги перерізу. Одна з осей інерції перетинає серединну лінію перерізу лише в одній точці, назвемо цю вісь *вільною віссю перерізу*. Іншу головну вісь інерції перерізу, яка перетинає серединну лінію перерізу щонайменше у двох точках назвемо *матеріальною віссю перерізу*. У подальшому прийmemo, що вільною віссю перерізу є вісь $x - x$, а матеріальною віссю перерізу є вісь $y - y$ (рис. 2).

Поперечний переріз стержнів з тонкостінних холодногнутих профілів утворюється і відповідно описується набором *елементів перерізу*. Як окремий елемент перерізу розглядається прямолінійна ділянка перерізу (наприклад, стінка, поліця, відгин). Елемент перерізу з'єднуються з іншими прямолінійними ділянками (елементами) перерізу у *вузлах спряження*.

Непідкріплений елемент перерізу – елемент перерізу, один край (торець) якого є вільний, а другий край (торець) є вузлом спряження з іншим елементом перерізу. *Підкріплений елемент перерізу* – елемент перерізу, у якого по краях (торцях) розташовуються вузли спряження з іншими елементами перерізу.

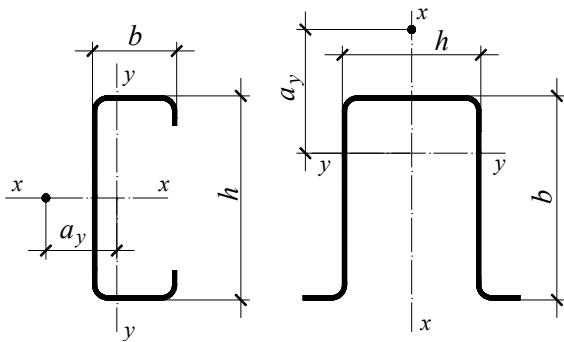


Рисунок 1. Типи поперечних перерізів тонкостінних холодногнутих стержнів відкритого профілю із зазначенням генеральних розмірів.

2. Визначення розрахункових розмірів елементів перерізу

При перевірці місцевої стійкості елементів перерізу тонкостінних холодногнутих профілів розрахункову довжину підкріпленого елемента перерізу (розрахункова висота

стілки h_{ef} і розрахункова ширина підкріпленої полиці b_{ef}) слід приймати як його повну довжину (відстань між внутрішніми гранями сусідніх елементів перерізу) за вирахуванням двох внутрішніх радіусів спряження елементів (див. рис. 3). За розрахункову довжину не підкріпленого елемента перерізу (розрахункова

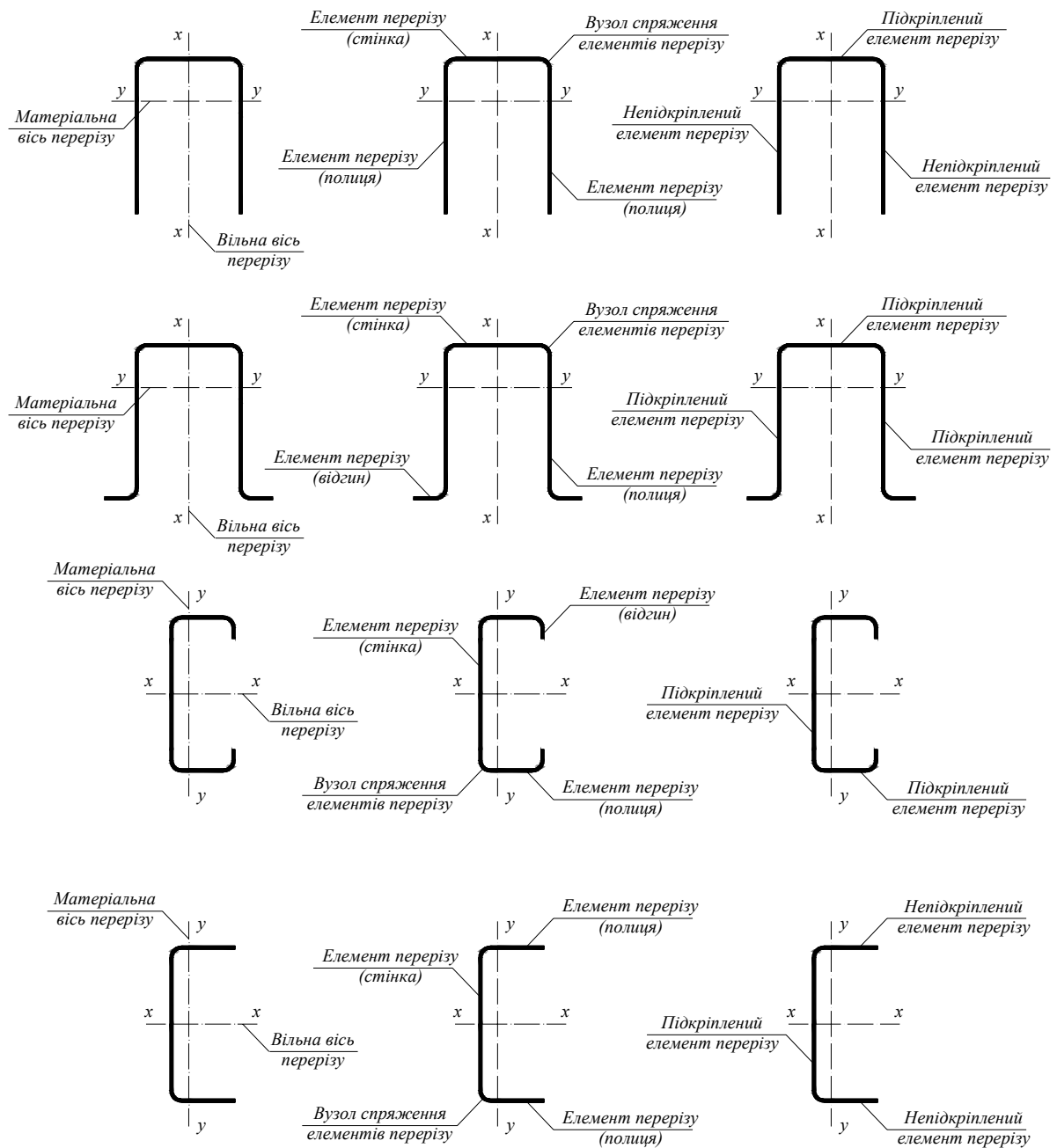


Рисунок 2. Типи поперечних перерізів тонкостінних стержнів із холодногнутих елементів відкритого профілю і прийнята термінологія.

ширина невідкріпленої полиці $b_{ef,1}$ і розрахункова довжина відгину a_{ef}) слід приймати відстань від вільного краю елемента до краю викружки (див. рис. 3).

3. Перевірка стійкості центрально-стиснутих тонкостінних стержнів відкритого профілю за згинальною формою її втрати

Розрахунок елементів суцільного перерізу при центральному стиску на стійкість за згинальною формою втрати стійкості за умови забезпечення місцевої стійкості елементів поперечного перерізу виконують у двох головних площинах інерції $x - z$ і $y - z$ за формулами [21]:

$$\frac{N}{\varphi_x AR_y \gamma_c} \leq 1; \tag{1}$$

$$\frac{N}{\varphi_y AR_y \gamma_c} \leq 1; \tag{2}$$

де φ_x і φ_y – коефіцієнти поздовжнього згину при центральному стиску, значення яких обчислюють за значеннями відповідних умовних гнучкостей стержня $\bar{\lambda}_x$ і $\bar{\lambda}_y$:

$$\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{l_{ef,x}}{i_x} \sqrt{\frac{R_y}{E}}; \tag{3}$$

$$\bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{l_{ef,y}}{i_y} \sqrt{\frac{R_y}{E}}. \tag{4}$$

При цьому коефіцієнти поздовжнього згину φ_x і φ_y обчислюють як [12, 22]:
при $\bar{\lambda}_x < 0,4$ ($\bar{\lambda}_y < 0,4$):

$$\begin{aligned} \varphi_x &= 1,0; \\ \varphi_y &= 1,0; \end{aligned} \tag{5}$$

при $\bar{\lambda}_x \geq 0,4$ ($\bar{\lambda}_y \geq 0,4$):

$$\begin{aligned} \varphi_x &= \frac{0,5}{\bar{\lambda}_x^2} \times (\delta_x - \sqrt{\delta_x^2 - 39,48 \bar{\lambda}_x^2}); \\ \varphi_y &= \frac{0,5}{\bar{\lambda}_y^2} \times (\delta_y - \sqrt{\delta_y^2 - 39,48 \bar{\lambda}_y^2}) \end{aligned} \tag{6}$$

Додатково при $\bar{\lambda}_x \geq 5,8$ ($\bar{\lambda}_y \geq 5,8$) на значення коефіцієнтів φ_x і φ_y накладається умова:

$$\begin{aligned} \varphi_x &\leq 7,6 / \bar{\lambda}_x^2; \\ \varphi_y &\leq 7,6 / \bar{\lambda}_y^2. \end{aligned} \tag{7}$$

Значення коефіцієнтів δ_x і δ_y у формулі (6) обчислюються як [12, 22]:

$$\begin{aligned} \delta_x &= 9,87 \times (1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}_x) + \bar{\lambda}_x^2; \\ \delta_y &= 9,87 \times (1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}_y) + \bar{\lambda}_y^2; \end{aligned} \tag{8}$$

де α і β – коефіцієнти, що враховують вплив початкових недосконалостей конструктивної форми та наявності залишкових напружень і визначаються залежно від типу поперечного перерізу стержня та типу кривої втрати стійкості. Для тонкостінних холодногнутих стержнів із поперечними перерізами, відкритими,

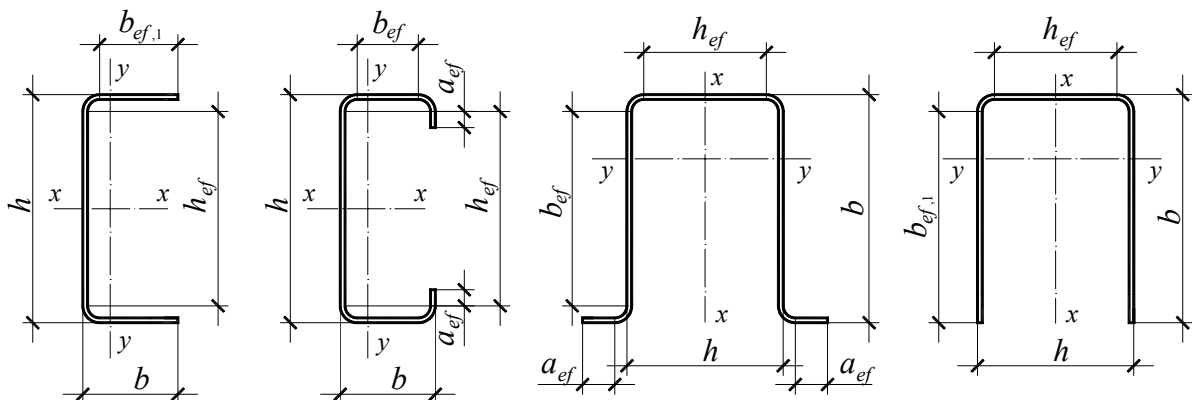


Рисунок 3. До визначення розрахункових розмірів перерізу елемента з холодногнутого профілю.

симетричними відносно однієї осі інерції, втра- та стійкості яких відбувається за типом кривої стійкості c , значення коефіцієнтів $\alpha = 0,04$ і $\beta = 0,14$ [12, 22]. Тоді:

$$\begin{aligned} \delta_x &= \bar{\lambda}_x^2 + 1,3818\bar{\lambda}_x + 9,4752; \\ \delta_y &= \bar{\lambda}_y^2 + 1,3818\bar{\lambda}_y + 9,4752. \end{aligned} \quad (9)$$

4. Перевірка стійкості центрально-стиснутих тонкостінних стержнів відкритого профілю за згинально-крутильною формою її втрати

Тонкостінні стержневі елементи відкритого перерізу за відсутності планок чи ґраток, що підкріплюють його по довжині, необхідно також перевіряти на втрату загальної стійкості за згинально-крутильною формою за формулою [21]:

$$\frac{N}{\varphi_c AR_y \gamma_c} \leq 1, \quad (10)$$

де φ_c – коефіцієнт, який приймається залежно від значення коефіцієнту φ_1 таким, що дорівнює [21]:

$$\varphi_c = \begin{cases} \varphi_1 & \text{при } \varphi_1 \leq 0,85; \\ 0,68 + 0,21\varphi_1 \leq 1,0 & \text{при } \varphi_1 > 0,85. \end{cases} \quad (11)$$

Значення коефіцієнту φ_1 слід обчислювати за формулою [21] з урахуванням гнучкості стержня відносно вільної осі перерізу:

$$\varphi_1 = 7,6 \frac{C_{\max}}{\bar{\lambda}_x^2}. \quad (12)$$

Зазначимо, що при виведенні розрахункової формули (10) використовувалось припущення, що співвідношення критичних сил при роботі тонкостінного стержневого елемента за межами пружності є таким же, як при роботі його у межах пружності [18].

Як відомо, в основу перевірки згинально-крутильної форми втрати стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю покладена теорія Власова В. З. [11]. У загальному випадку умова втрати стійкості шарнірно обпертого центрально-стиснутого пружного тонкостінного стержня описується рівнянням [11]:

$$(N_x - N)(N_y - N)(N_\omega - N)r^2 - a_x^2 N^2(N_x - N) - a_y^2 N^2(N_y - N) = 0, \quad (13)$$

де

$$N_x = \frac{\pi^2 EI_x}{l^2}, \quad (14)$$

$$N_y = \frac{\pi^2 EI_y}{l^2}, \quad (15)$$

$$N_\omega = \frac{\pi^2 EI_\omega + GI_t}{r^2}, \quad (16)$$

$$r^2 = \frac{I_x + I_y}{A} + a_x^2 + a_y^2. \quad (17)$$

У практичних розрахунках часткове стиснення депланації опорних перерізів стержнів враховується уведенням коефіцієнту 2,0 у перший член чисельника формули для обчислення N_ω [18]:

$$N_\omega = \frac{2,0\pi^2 EI_\omega + GI_t}{r^2}, \quad (18)$$

що наближено допомагає оцінити фактичні умови у вузлах стержневої конструкції.

Для тонкостінного стержня із однією віссю симетрії $x - x$, що є вільною віссю перерізу (див. рис. 1, 2), $a_x = 0$, при цьому $N_y = 0$ і з формули (13) отримаємо [18]:

$$(N_x - N)(N_\omega - N)r^2 - a_y^2 N^2 = 0, \quad (19)$$

де

$$r^2 = \frac{I_x + I_y}{A} + a_y^2. \quad (20)$$

Розділивши на $N_x N_\omega r^2$ усі члени рівняння (19), отримаємо:

$$\left(1 - \frac{N}{N_x}\right) \left(1 - \frac{N}{N_\omega}\right) - \frac{a_y^2}{r^2} \frac{N^2}{N_x N_\omega} = 0. \quad (21)$$

З врахуванням позначень $c = \frac{N}{N_x}$, $\delta = \frac{N}{N_\omega}$ із формули (21) отримаємо:

$$(1 - c)(1 - c\delta) - c^2 \beta^2 = 0, \quad (22)$$

де

$$\beta^2 = \frac{a_y^2 \delta}{r^2}. \quad (23)$$

З рівняння (22) знаходимо:

$$C_{\max} = \frac{-(1 + \delta) + \sqrt{(1 - \delta)^2 + 4\beta^2}}{2(\beta^2 - \delta)}, \quad (24)$$

або після простих перетворень отримаємо:

$$C_{\max} = \frac{2}{(1+\delta) + \sqrt{(1-\delta)^2 + \frac{4\delta\alpha_y^2}{r^2}}}. \quad (25)$$

В остаточному вигляді з використанням безрозмірних величин формула для обчислення коефіцієнту C_{\max} наводиться в [22] та в проєкті першої редакції [12]. Коефіцієнт C_{\max} при розрахунку стійкості тонкостінних холодногнутих стержнів відкритого профілю при $I_x > I_y$, у яких вісь $x - x$ співпадає із вільною віссю перерізу, необхідно розраховувати за формулою [12, 22]:

$$C_{\max} = \frac{2}{1+\delta + \sqrt{(1-\delta)^2 + \frac{16\zeta^2}{\mu}}}, \quad (26)$$

де

$$\delta = \frac{4}{\mu} \left(\frac{I_x + I_y}{Ab^2} + \zeta^2 - 2\nu\zeta \right); \quad (27)$$

$$\mu = 8 \frac{I_\omega}{I_x b^2} + 0,156 \frac{I_t}{Ab^2} \lambda_x^2; \quad (28)$$

$$\nu = \frac{0,5th^3}{I_y} (0,667(\eta_1^4 - \chi^4) + 0,25(\eta_1^2 - \chi^2) - \chi(0,125 - \chi^2) + \zeta); \quad (29)$$

$$\chi = \frac{b^2}{h^2 + 2bh}; \quad (30)$$

$$\gamma = \frac{3b^2}{h^2 + 6bh}; \quad (31)$$

$$\eta_1 = \frac{h}{b} - \frac{I_\omega}{I_x b^2}; \quad (32)$$

$$\zeta = \frac{a_y}{h} = 4\chi \frac{h+3b}{h+6b}. \quad (33)$$

5. Перевірка стійкості елементів перерізу центрально-стиснутих тонкостінних стержнів відкритого профілю

Місцеву стійкість стінки центрально-стиснутого тонкостінного холодногнутого стержня С-подібного і коритоподібного профілів вважається забезпеченою, якщо її умовна гнучкість $\bar{\lambda}_w$ не перевищує граничної $\bar{\lambda}_{uw}$ [12, 22]:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_{ef}}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}} \leq \bar{\lambda}_{uw}. \quad (34)$$

Гранична умовна гнучкість стінки $\bar{\lambda}_{uw}$ визначається як [12, 22]:

при $\bar{\lambda} \leq 0,8$:

$$\bar{\lambda}_w \leq \bar{\lambda}_{uw} = 1,0; \quad (35)$$

при $\bar{\lambda} > 0,8$:

$$\bar{\lambda}_w \leq \bar{\lambda}_{uw} = 0,85 + 0,19\bar{\lambda};$$

$$\bar{\lambda}_w \leq \bar{\lambda}_{uw} \leq 1,6; \quad (36)$$

тут $\bar{\lambda}$ – умовна гнучкість стержневого елемента, що приймається у розрахунку на стійкість при центральному стиску (за більшим із значень умовних гнучкостей стержня відносно головних осей інерції перерізу, $\bar{\lambda} = \max\{\bar{\lambda}_x, \bar{\lambda}_y\}$).

У випадках, коли фактичне значення умовної гнучкості стінки $\bar{\lambda}_w$ перевищує значення граничної умовної гнучкості $\bar{\lambda}_{uw}$, обчислене за формулами (35)–(36), але не більше, ніж у два рази ($\bar{\lambda}_{uw} \leq \bar{\lambda}_w \leq 2\bar{\lambda}_{uw}$), перевірку загальної стійкості стержня за формулами (1)–(2) допускається виконувати з урахуванням розрахункової зменшеної висоти стінки перерізу h_{red} , обчисленої як для стиснутих елементів із гнучкою стінкою за формулою [12, 22]:

$$h_{red} = t\bar{\lambda}_{uw} \sqrt{\frac{E}{R_y}}. \quad (37)$$

Місцеву стійкість полиці (підкріпленої або невідкріпленої відгинами) центрально-стиснутого тонкостінного холодногнутого стержня відкритого профілю слід вважати забезпеченою, якщо значення умовної гнучкості звису полиці $\bar{\lambda}_f$ не перевищує значення граничної умовної гнучкості звису $\bar{\lambda}_{uf}$ [12, 22]:

$$\bar{\lambda}_f = \frac{b_{ef}}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}} \leq \bar{\lambda}_{uf} \text{ або}$$

$$\bar{\lambda}_f = \frac{b_{ef,1}}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}} \leq \bar{\lambda}_{uf}. \quad (38)$$

Гранична умовна гнучкість полиці $\bar{\lambda}_{uf}$ тонкостінних стержнів відкритого профілю визначається як [12, 22]:

— для тонкостінних стержнів, непідкріплених по довжині планками (див. рис. 4):

$$\bar{\lambda}_{uf} = 0,43 + 0,08\bar{\lambda}, \quad (39)$$

— для тонкостінних стержнів, підкріплених по довжині планками (див. рис. 5):

$$\bar{\lambda}_{uf} = 0,85 + 0,19\bar{\lambda}, \quad (40)$$

тут $\bar{\lambda}$ — умовна гнучкість стержневого елемента, що приймається у розрахунку на стійкість при центральному стиску (за більшим із значень умовних гнучкостей стержня відносно головних осей інерції перерізу, $\bar{\lambda} = \max\{\bar{\lambda}_x, \bar{\lambda}_y\}$). При цьому, у випадку, якщо значення умовної гнучкості елемента $\bar{\lambda} < 0,8$ або $\bar{\lambda} > 4,0$, у формулах (39)–(40) необхідно приймати відповідно $\bar{\lambda} = 0,8$ і $\bar{\lambda} = 4,0$.

Розрахункова довжина відгину або ребра a_{ef} , який облямовує звис поясного листа (полиці) (див. рис. 3), виміряна від його осі, повинна задовольняти нерівності [12, 22]:

$$0,5t\sqrt{\frac{E}{R_y}} \geq a_{ef} \geq kb_{ef}, \quad (41)$$

де $k = 0,3$ — для тонкостінних стержневих елементів, непідсилених по довжині планками (див. рис. 4); $k = 0,2$ — для тонкостінних стержневих елементів, підсилених по довжині планками (див. рис. 5).

У випадку, коли звиси поясних листів (полиць) облямовуються відгинами (або ребрами) (рис. 4, б і в) і розрахункова висота відгину a_{ef} задовольняє нерівність (41), тоді значення граничної умовної гнучкості полиці $\bar{\lambda}_{uf}$, що визначається за формулами (39) і (40), слід помно-

жити на коефіцієнт 1,5 [12, 22]. Гранична умова на гнучкість полиці $\bar{\lambda}_{uf}$ тонкостінних стержнів відкритого профілю в цьому випадку визначається як:

— для тонкостінних стержнів, непідкріплених по довжині планками (див. рис. 4):

$$\bar{\lambda}_{uf} = 0,645 + 0,12\bar{\lambda}, \quad (42)$$

— для тонкостінних стержнів, ідкріплених по довжині планками (див. рис. 5):

$$\bar{\lambda}_{uf} = 1,275 + 0,285\bar{\lambda}. \quad (43)$$

У випадках, коли фактичне значення умовної гнучкості полиці (підкріпленої або непідкріпленої) $\bar{\lambda}_f$ перевищує значення граничної умовної гнучкості $\bar{\lambda}_{uf}$, обчислене за формулами (39)–(40) або за формулами (42)–(43), але не більше, ніж у два рази ($\bar{\lambda}_{uf} \leq \bar{\lambda}_f \leq 2\bar{\lambda}_{uf}$), перевірку загальної стійкості тонкостінного стержневого елемента за формулами (1)–(2) допускається виконувати з урахуванням розрахункової зменшеної ширини полиці перерізу b_{red} :

$$b_{red} = t\bar{\lambda}_{uf}\sqrt{\frac{E}{R_y}}. \quad (44)$$

У випадках, коли фактичне значення умовної гнучкості стінки $\bar{\lambda}_w$ перевищує значення граничної умовної гнучкості стінки $\bar{\lambda}_{wv}$, обчислене за формулами (35)–(36), і/або фактичне значення умовної гнучкості полиці (підкріпленої або непідкріпленої) $\bar{\lambda}_f$ перевищує значення граничної умовної гнучкості $\bar{\lambda}_{uf}$, обчислене за формулами (39)–(40) або (42)–(43), тоді розрахунок центрально-стиснутих стержнів суцільного перерізу виконують з урахуванням

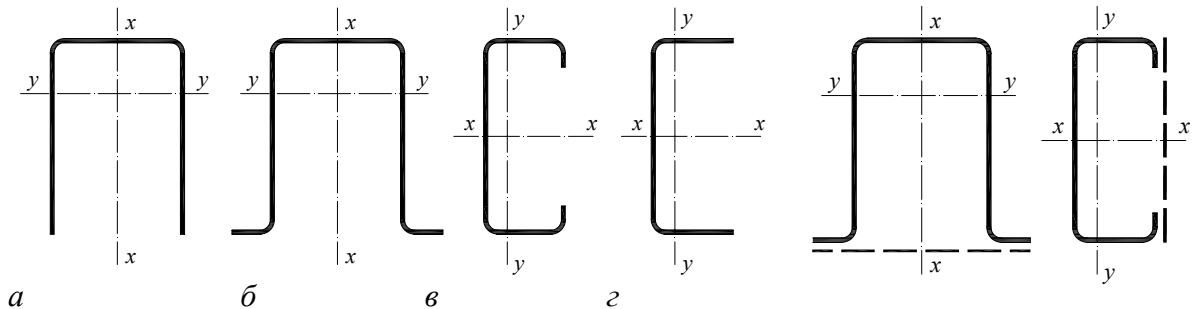


Рисунок 4. Тонкостінні холодногнуті елементи, непідсилені по довжині стержня планками.

Рисунок 5. Тонкостінні холодногнуті елементи, підсилені по довжині стержня планками.

зменшеної площі перерізу A_{red} , визначеної залежно від зменшених розмірів перерізу h_{red} і b_{red} , обчислених відповідно до (37) і (44).

Висновки

Показано, що широке використання конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів вітчизняного виробництва затримується передусім недосконалістю нормативної бази та недостатністю вітчизняного досвіду економічного та надійного проектування таких конструкцій. З огляду на це у роботі висвітлено питання нормативного перевірного розрахунку стійкості тонкостінних холодногнутих профілів відкритого перерізу відповідно до СНиП II-23-81*, СП 53-102-2004 і проекту першої редакції ДБН В.2.6. Приділено увагу визначенню зменшених (редукованих) розмірів поперечних перерізів елементів із тонкостінних холодногнутих профілів з врахуванням місцевої втрати їх стійкості.

Література

1. Айрумян, Э. Л. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутих стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балтпрофиль» / Э. Л. Айрумян. – М. : ЦНИИПСК им. Мельникова, 2004. – 69 с.
2. Айрумян, Э. Л. Рамные конструкции стального каркаса из оцинкованных гнутых профилей для одноэтажных зданий различного назначения / Айрумян Э. Л., Каменщиков Н. И. // Мир строительства и недвижимости. – 2006. – № 36. – С. 9–11.
3. Астахов, И. В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутих профилей : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук / Астахов И. В. – СПб, 2006. – 24 с.
4. Багмутов, В. П. Расчет тонкостенного стержня открытого профиля на сложное сопротивление / Багмутов В. П. – Волгоград : ВолгПИ, 1990. – 32 с.
5. Бейлин, Е. А. Вариант единой теории кручения тонкостенных стержнем открытого, замкнутого и частично замкнутого профилей / Бейлин Е. А. // Исследования по механике строительных конструкций и материалов : Межвузовский тематический сборник трудов. – Л. : ЛИСИ, 1991. – С. 57–74.
6. Белов, И. Д. Розробка та впровадження ефективних конструкцій будівель із тонкостінних холодногнутих профілів: сучасний стан проблеми та програма досліджень / Белов И. Д., Юрченко В. В. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць / Акад. буд-ва України, НУВГП, Північ.-Захід. від-ня АБУ ; відп. ред. Є. М. Бабич. – Рівне, 2010. – Вып. 20. – С. 364–369.
7. Белый, Г. И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме / Белый Г. И. // Строительная механика сооружений : Межвуз. темат. сб. тр. – Л. : ЛИСИ, 1983. – № 42. – С. 40–48.
8. Белый, Г. И. О расчете упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме с учетом касательных напряжений деформаций сдвига / Белый Г. И. // Металлические конструкции и испытания сооружений : Межвуз. темат. сб. тр. – Л. : ЛИСИ, 1983. – № 32. – С. 42–48.
9. Ватин, Н. И. Термопрофиль в легких стальных строительных конструкциях / Ватин Н. И., Попова Е. Н. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2006. – 63 с.
10. Ватин, Н. И. Расчет металлоконструкций: седьмая степень свободы / Ватин Н. И., Рыбаков В. А. // СтройПРОФИЛЬ. – 2007. – № 2(56). – С. 60–53.
11. Власов, В. З. Тонкостенные упругие стержни / Власов В. З. – М. : Физматгиз, 1959. – 568 с.
12. Державні будівельні норми. Конструкції будинків і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу : ДБН В.2.6-163:2010. – На зміну СНиП II-23-81*; СНиП III-18-75; СНиП 3.03.01-87 ; вводиться в дію з 2011-09-01. – (проект першої редакції).
13. Джанелидзе, Г. Ю. Статика упругих тонкостенных стержней / Джанелидзе Г. Ю., Пановко Я. Г. – М. : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1948. – 208 с.
14. Короткий, С. В. Визначення критичних сил для локальних форм пружного випучування центрально-стиснутого тонкостінного стержня відкритого профілю / Короткий С. В., Юрченко В. В. // Збірник тез студентських доповідей / Відп. за випуск П. П. Лізунов. – К. : КНУБА, 2009. – С. 164–166.
15. Маневич, А. И. К теории связанной потери устойчивости подкрепленных тонкостенных конструкций // Прикладная математика и механика. – 1982. – Том 42, № 2. – С. 337–345.
16. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Сталь, 2002. – 600 с. – ISBN 966-7589-13-7.
17. Перельмутер, А. В. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. В 2 т. Т 1. / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М. : Изд-во SCAD Soft, 2007. – 670 с.
18. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81* «Стальные конструкции») / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.

19. Ракша, С. В. Зв'язна втрата стійкості і вагова оптимізація тонкостінних стержнів відкритого профілю : автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.17 / Ракша С. В. ; Придніпровська держ. акад. будівництва й архітектури. – Д., 2003. – 33 с.
20. Смазнов, Д. Н. Устойчивость при сжатии составных колонн, выполненных из профилей из высокопрочной стали / Смазнов Д. Н. // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 3. – С. 42–49.
21. Строительные нормы и правила. Стальные конструкции : СНиП II-23-81*. – Взамен СНиП II-В.3-72; СНиП II-И.9-62; СН 376-67 ; введ. 1982-01-01. – М. : ФГУП ЦПП, 2005. – 90 с.
22. Свод правил по проектированию и строительству. Общие правила проектирования стальных конструкций : СП 53-102-2004. – Введен 2005-01-01. – М. : ДЕАН, 2007. – 272 с. – ISBN 978-5-93630-546-7.
23. Туснін, О. Р. Кінцевий елемент для чисельного розрахунку конструкцій з тонкостінних стержнів відкритого профілю / Туснін О. Р. // Металеві конструкції. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 73–78.
24. Уманський, А. А. Изгиб и кручение тонкостенных авиационных конструкций / Уманський А. А. – М. : Оборониздат, 1939. – 112 с.
25. Юрченко, В. В. Проблема оптимального проектування поперечних рам каркасів із тонкостінних холодногнутих профілів / Юрченко В. В. // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА : тези доповідей. В 2-х ч. Ч. 1. – К. : КНУБА, 2009. – С. 44–46.
26. Davies, J. M. Modelling analysis and design of thin-walled structures. *Proceedings of the 4th ICSAS*, 1999, p. 3–18.
27. Dubina, D.; Ungureanu, V.; Szabo, I. Codification of imperfections for advanced finite analysis of cold-formed steel members. *Proceedings of the 3rd ICTWS*, 2001, p. 179–186.
28. ENV 1993-1-3 EuroCode 3: Design of steel structures. Part 1.3: General rules. Supplementary rules for cold formed thin gaugemembers and sheeting. European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 1996.
29. Hasham, A. S.; Rasmussen, K. J. R. Nonlinear analysis of locally buckled I-section steel beam-column. *Proceedings of the 3rd ICTWS*, 2001, p. 427–436.
30. Koiter, W.T. The effective width of flat plates for various longitudinal edge conditions at loads far beyond the buckling load, Rep. No. 5287, National Luchtvaart Laboratorium (The Netherlands).
31. Rhodes, J. Some observations on the post-buckling behavior of thin plates and thin-walled members. *Proceedings of the 3rd ICTWS*, 2001, p. 69–84.
32. Sarawit, A.T.; Kim, Y.; Bakker, M. C. M.; Peköz, T. The finite element method for thin-walled members-applications. *Proceedings of the 3rd ICTWS*, 2001, p. 437–448.
33. von Karman, T.; Sechler, E.E. and Donnel, L.H. The strength of thin plates in compression, *Trans ASME*, 1932, Vol. 54, p. 53–57.

Белов Ігор Дмитрович – к.т.н., доцент, директор Випробувального центру будівельних конструкцій, академік Академії будівництва України. Наукові інтереси: дійсна робота конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів, експериментальні дослідження металевих конструкцій.

Юрченко Віталіна Віталіївна – к.т.н., доцент кафедри металевих і дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва та архітектури (КНУБА), член Міжнародної організації зі структурної та багато профільної оптимізації ISSMO, представник КНУБА у європейській асоціації науково-дослідних та освітніх організацій в галузі металобудівництва METNET. Наукові інтереси: структурна та параметрична оптимізація стержневих металевих конструкцій, оптимальне проектування та методики розрахунку каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів, удосконалення методик розрахунку вузлів металевих конструкцій.

Белов Ігорь Дмитриевич – к.т.н., доцент, директор Испытательного центра строительных конструкций, академик Академии строительства Украины. Научные интересы: действительная работа конструкций из тонкостенных холодногнутих профилей, экспериментальные исследования металлических конструкций.

Юрченко Виталина Витальевна – к.т.н., доцент кафедры металлических и деревянных конструкций Киевского национального университета строительства и архитектуры (КНУСА), член Международной организации по структурной и многопрофильной оптимизации ISSMO, представитель КНУСА в европейской ассоциации научно-исследовательских и образовательных организаций в области металлостроительства METNET. Научные интересы: структурная и параметрическая оптимизация стержневых металлических конструкций, оптимальное проектирование и методики расчета каркасов зданий из тонкостенных холодногнутих профилей, совершенствование методик расчета узлов металлических конструкций.

Byelov Igor – a Ph. D. (Eng.), an Assistant Professor, the Manager of the Structural Testing Laboratory, an Academician of the Civil Engineering Academy of Ukraine. Research interests: actual behaviour of the structures of thin-webbed cold roll-formed shapes and engineering research of metal structures.

Yurchenko Vitalina – a Ph. D. (Eng.), an Assistant Professor of the Metal and Timber Structures Department of the Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture (KNUCEA), a fellow of the International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization (ISSMO), a representative of KNUCEA in the European Network of Research and Training Organizations in Metal Branch (METNET). Research interests: structural and parametric optimization of metal lattice systems, optimal designing and designing technique of building frames of thin-webbed cold roll-formed shapes, imperfection of designing techniques of metal structural members joints.