



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2012, ТОМ 18, НОМЕР 3, 185–196

УДК 624.014

(12)-0269-0

РОЗРОБКА АНАЛІТИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ДЛЯ ОЦІНКИ ЗНАЧЕНЬ КРИТИЧНИХ СИЛ ВТРАТИ МІСЦЕВОЇ СТІЙКОСТІ ТА ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ФОРМИ ПЕРЕРІЗУ ТОНКОСТІННИХ СТЕРЖНІВ ВІДКРИТОГО ПРОФІЛЮ

В. В. Юрченко

Київський національний університет будівництва і архітектури,

Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03680.

E-mail: vitalinay@rambler.ru

Отримана 5 вересня 2012; прийнята 20 вересня 2012.

Анотація. У роботі запропоновані аналітичні залежності для визначення значень критичних сил при розрахунку стійкості центрально стиснутих тонкостінних стержнів С-подібного профілю. Дані аналітичні залежності розроблені для випадків втрати стійкості елементів поперечного перерізу (місцевої втрати стійкості), а також втрати стійкості форми поперечного перерізу тонкостінного стержня. Критичні навантаження розраховувались із використанням оболонкових скінченно-елементних моделей тонкостінних стержнів С-подібного профілю в результаті аналізу втрати стійкості у лінеаризованій постановці як для пружної системи. Отримані аналітичні залежності пропонується використовувати в складі інженерної методики розрахунку та проектування стержневих конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів, зокрема при визначенні резервів несучої здатності у закритичній стадії роботи таких конструкцій.

Ключові слова: тонкостінний стержень, холодногнутий профіль, критична сила, лінійний аналіз втрати стійкості, пружне випинання, місцева втрата стійкості, втрата стійкості форми перерізу, закритична стадія роботи, метод скінченних елементів.

РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗНАЧЕНИЙ КРИТИЧЕСКИХ СИЛ ПОТЕРИ МЕСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ

В. В. Юрченко

Киевский национальный университет строительства и архитектуры,

Воздухофлотский пр., 31, г. Киев, Украина, 03680.

E-mail: vitalinay@rambler.ru

Получена 5 сентября 2012; принята 20 сентября 2012.

Аннотация. В работе предложены аналитические зависимости для определения значений критических сил при расчете устойчивости центрально-сжатых тонкостенных стержней С-образного профиля. Данные аналитические зависимости разработаны для случаев потери устойчивости элементов поперечного сечения (местной потери устойчивости), а также потери устойчивости формы поперечного сечения тонкостенного стержня. Критические нагрузки рассчитывались с использованием оболочечных конечно-элементных моделей тонкостенных стержней С-образного профиля в результате анализа потери устойчивости в линеаризованной постановке как для упругой системы. Полученные

аналитические зависимости предлагается использовать в составе инженерной методики расчета и проектирования стержневых конструкций из тонкостенных холодногнутих профилей, а именно при определении резервов несущей способности в закритической стадии работы таких конструкций.

Ключевые слова: тонкостенный стержень, холодногнутый профиль, критическая сила, линейный анализ потери устойчивости, упругое выпучивание, местная потеря устойчивости, потеря устойчивости формы сечения, закритическая стадия работы, метод конечных элементов.

DEVELOPMENT OF ANALYTICAL DEPENDENCES FOR EVALUATION OF ELASTIC CRITICAL LOADS FOR LOCAL AND DISTORTIONAL BUCKLING OF THIN-WALLED BARS WITH OPEN PROFILES

Vitalina Yurchenko

*Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture,
31, Povitroflotskyj avenue, Kyiv, Ukraine, 03680.
E-mail: vitalinay@rambler.ru*

Received 5 September 2012; accepted 20 September 2012.

Abstract. This paper proposes analytic dependences for evaluation of elastic critical buckling loads of thin-walled bars of C section subjected to central compression. These analytic dependences have been developed for both local and distortional buckling cases of thin-walled bar. Critical loads have been calculated using shell finite element models of thin-walled bars of C section performing linear buckling analysis as for elastic system. Derived analytic dependences should be used as a component of engineering calculation technique for structures from thin-walled cold-formed profiles in order to take into account the local and distortional buckling effects at the post-buckling stage of the structural behavior.

Keywords: thin-walled bars, cold-formed profiles, critical force, linear buckling analysis, linear buckling, local buckling, distortional buckling, post-buckling behavior, finite element analysis.

Сьогодні на український ринок металоко­н­струкцій активно імпортуються різноманітні кон­структивні системи із тонкостінних холодно­гнутих профілів, які знайшли широке засто­сування у будівельній індустрії [1, 5], зокрема як швидкокомтовані будівлі комплектного поста­чання [25, 26]. Цей ринок також представлений низкою вітчизняних виробників конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів. Проте широке використання конструкцій із тонко­стінних холодногнутих профілів вітчизняного виробництва затримується передусім недоско­налістю нормативної бази та недостатнім вітчизняним досвідом економічного та надійно­го проектування таких конструкцій.

Тому в останній час спостерігається підви­щена увага інженерної та наукової спільности до проблеми розрахунку конструкцій із тонко­стінних стержнів [9, 10]. Конструкції такого типу були предметом досліджень різних авторів

[3, 4, 11–14, 19, 22–24, 27, 28, 31, 34], зокрема, дослідженню проблеми стійкості несучих еле­ментів із тонкостінних холодногнутих профілів присвячені праці [2, 6–8, 21].

У більш повній мірі питання розрахунку та проектування несучих елементів із тонко­стінних холодногнутих профілів відображені у європейських нормах проектування [30]. Окрім «звичної» місцевої (рис. 1а) та загальної форм втрати стійкості (за згинальною (рис. 1г) та зги­нально-крутильною (рис. 1в) формами), у нор­мах європейських країн розглядається також втрата стійкості форми поперечного перерізу тонкостінного стержня (тобто втрата стійкості внаслідок викривлення поперечного перерізу) (рис. 1б), що є характерною для тонкостінних стержнів відкритого профілю.

Характерною особливістю несучих еле­ментів із тонкостінних холодногнутих профілів є можливість їх закритичної роботи (після

втрати місцевої стійкості стиснутих елементів перерізу, а також (або) після втрати стійкості форми поперечного перерізу [32, 35]. Втрата місцевої стійкості тонкої підкріпленої пластини (якими фактично є елементи перерізів профілів) призводить до нерівномірного розподілу нормальних напружень у перерізі такої пластини, що характеризується концентрацією нормальних напружень навкруги підкріплених країв пластини, тобто фактично у місцях спряжень тонких пластин, з яких складається переріз (рис. 2).

Базуючись на цьому, європейські норми проектування [30] регламентують виконувати перевірки несучої здатності таких елементів з вра-

хуванням можливості втрати стійкості стиснутими елементами перерізу (місцевої втрати стійкості, рис. 1а), так і втрати стійкості форми поперечного перерізу (рис. 1б). При обчисленні несучої здатності поперечного перерізу тонкостінного елемента можна користуватись концепцією «ефективної ширини» елемента [33] (рис. 3), що вперше запропонована фон Карманом ще в 1932 році [37].

Оцінку резервів несучої здатності тонкостінних елементів у закритичній стадії роботи таких конструкцій з врахуванням втрати місцевої стійкості та/або втрати стійкості форми поперечного перерізу можна отримати в результаті виконання аналізу втрати стійкості у

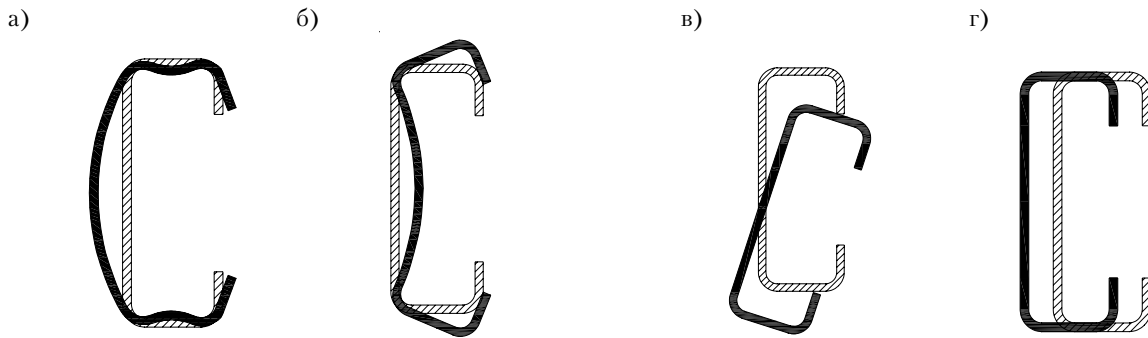


Рисунок 1. Форми втрати стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю: а – втрата стійкості елементів поперечного перерізу; б – втрата стійкості форми поперечного перерізу; в – загальна втрата стійкості стержня за згинально-крутильною формою; г – загальна втрата стійкості стержня за згинальною формою.

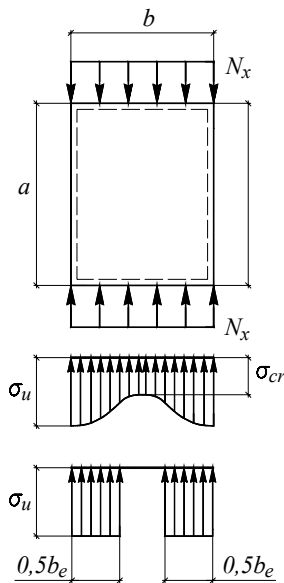


Рисунок 2. Нерівномірний розподіл нормальних напружень у перерізі пластини внаслідок втрати стійкості.

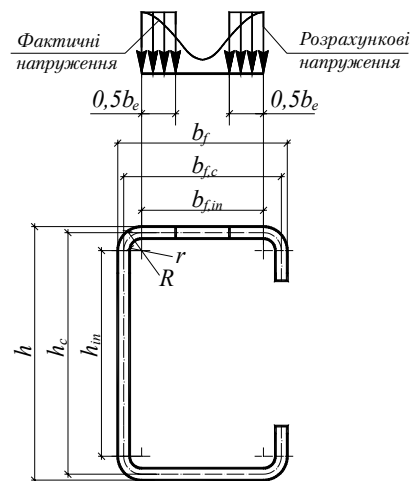


Рисунок 3. Розрахункова (ефективна) ширина стиснутої полиці С-подібного профілю.

лінеаризованій постановці як для пружної системи із використанням чисельних методів на відповідних моделях [29, 30, 36].

За мету роботи було висунуто:

1) для деяких типів поперечних перерізів тонкостінних стержнів виконати аналіз втрати стійкості у лінеаризованій постановці як для пружної системи із використанням оболонкових скінченно-елементних моделей та отримати значення критичних навантажень для форм втрати стійкості елементів перерізу (місцевої втрати стійкості), а також втрати стійкості форми поперечного перерізу;

2) запропонувати аналітичні залежності, що описують функціональний зв'язок значення критичної сили із визначеними параметрами перерізу, які можуть бути використаними в складі інженерної методики розрахунку та проектування стержневих конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів.

Задача стійкості тонкостінного стержня розв'язувалась у класичній постановці у припущенні, що усі прикладені до системи зовнішні навантаження (а отже, і внутрішні зусилля) зростають пропорційно одному і тому ж параметру λ . Те значення параметра λ , при якому матриця жорсткості системи вперше перестає бути позитивно визначеною, є критичним, а відповідне значення параметра λ – коефіцієнтом запасу стійкості [17, 18].

Критичні навантаження для втрати стійкості елементів перерізу (місцевої втрати стійкості), а також втрати стійкості форми поперечного перерізу розраховувались із використанням оболонкових моделей тонкостінних стержнів в результаті аналізу втрати стійкості, що розглядався у лінеаризованій постановці як для пружної системи. У цьому випадку задача стійкості зводилась до задачі знаходження власних значень і записувалась у термінах методу скінченних елементів як [20]:

$$\left(\mathbf{K}^0 + \lambda \cdot \mathbf{K}_{(S_{ij})}^G \right) \times \mathbf{U} = 0,$$

де \mathbf{K}^0 – початкова матриця жорсткості системи у межах пружних деформацій;

\mathbf{U} – сукупність узагальнених переміщень, що відповідають формі втрати стійкості системи;

\mathbf{K}^G – початкова геометрична матриця жорсткості, що є лінійною функцією напруженого стану S_{ij} .

При виконанні цих досліджень практична реалізація пошуку параметрів λ і, відповідно, значень критичних сил, за яких відбувається пружне випинання елементів перерізу (місцева втрата стійкості) або втрата стійкості форми поперечного перерізу, виконувалась на базі обчислювального комплексу SCAD, що реалізує метод скінченних елементів [15]. Результати обчислень значень критичних сил для обох форм втрати стійкості тонкостінного стержня С-подібного профілю (рис. 4) наведені у таблиці 1 [16].

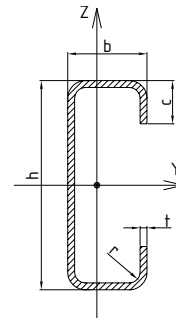


Рисунок 4. Поперечний переріз тонкостінного стержня.

За даними, наведеними в табл. 1, із застосуванням методу регресивного аналізу була виконана апроксимація дискретних даних критичних сил для втрати стійкості елементів поперечного перерізу $P_{cr.loc} = P_{cr.loc}(\lambda_w, \lambda_f, A)$, де $\lambda_w = h/t$ – гнучкість стінки профілю, $\lambda_f = b/t$ – гнучкість полочки, A – площа поперечного перерізу. При чому, для різних діапазонів варіації гнучкості стінки λ_w були використані різні апроксимувальні поліноми, що дозволило максимально точно (із нормативним відхиленням, що не перевищує 3 %) описати набір дискретних значень критичних сил.

Таким чином, значення критичної сили $P_{cr.loc}$ для втрати стійкості стінки і полочок (місцевої втрати стійкості) С-подібних профілів пропонується визначати за такими залежностями: при $\lambda_w < 40$:

$$\begin{aligned} P_{cr.loc}(\lambda_w, \lambda_f, A) = & 2031 - 367,332\lambda_w + 238,847\lambda_f + \\ & + 666,729A + 23,875\lambda_w\lambda_f - 9,368\lambda_wA - \\ & - 33,596\lambda_fA + 5,125\lambda_w^2 - 31,576\lambda_f^2 - 12,158A^2 - \\ & - 0,675\lambda_w^2\lambda_f + 0,66\lambda_w\lambda_f^2 + 0,154\lambda_w^2A - \\ & - 0,201\lambda_wA^2 + 1,005\lambda_f^2A + 0,263\lambda_fA^2 + 0,048\lambda_w^3 + \\ & + 0,00792\lambda_f^3 + 0,39A^3, \end{aligned}$$

Таблиця 1. Значення критичних сил для місцевої втрати стійкості та втрати стійкості форми перерізу центрально стиснутих тонкостінних стержнів С-подібного профілю

| № з/п | Переріз профілю: $h \times b \times c \times t$, мм (h – висота, b – ширина полочки, c – довжина відгину, t – товщина) | Значення критичної сили для втрати стійкості | | № з/п | Переріз профілю: $h \times b \times c \times t$, мм (h – висота, b – ширина полочки, c – довжина відгину, t – товщина) | Значення критичної сили для втрати стійкості | |
|-------|--|--|------------------------------------|-------|--|--|------------------------------------|
| | | елементів перерізу, $P_{cr.loc}$, кН | форми перерізу, $P_{cr.dist}$, кН | | | елементів перерізу, $P_{cr.loc}$, кН | форми перерізу, $P_{cr.dist}$, кН |
| 1 | 28×15×8×2 | 655,443 | – | 40 | 240×50×26×3 | 198,825 | – |
| 2 | 30×30×10×2 | 615,836 | – | 41 | 240×70×26×3 | 212,970 | 383,313 |
| 3 | 34×19×8,5×2 | 547,587 | 322,965 | 42 | 240×55×25×4 | 473,621 | 637,769 |
| 4 | 50×30×14×3 | 1297,365 | 740,129 | 43 | 240×70×30×4 | 511,060 | 793,709 |
| 5 | 50×40×10×3 | 1279,245 | 598,728 | 44 | 240×105×36×4 | 579,972 | 939,393 |
| 6 | 100×50×15×3 | 602,332 | 568,506 | 45 | 240×52×32×5 | 944,746 | 1156,058 |
| 7 | 100×45×15×2 | 174,784 | 241,872 | 46 | 240×72×32×5 | 1007,974 | 1367,346 |
| 8 | 100×65×15×2 | 195,209 | 209,677 | 47 | 240×90×35×5 | 1075,577 | 1497,480 |
| 9 | 100×45×19×3 | 602,912 | 633,851 | 48 | 240×100×46×5 | 1149,978 | 1659,457 |
| 10 | 100×60×24×3 | 674,735 | 652,765 | 49 | 270×55×26×3 | 173,658 | – |
| 11 | 100×45×23×4 | 1438,734 | 1194,767 | 50 | 270×70×31×3 | 186,414 | 357,828 |
| 12 | 100×65×23×4 | 1555,166 | 1158,429 | 51 | 270×60×25×4 | 413,258 | – |
| 13 | 120×38×12×2 | 126,620 | 183,375 | 52 | 270×75×31×4 | 445,520 | 725,193 |
| 14 | 120×50×20×2 | 145,356 | 245,062 | 53 | 270×90×36×4 | 473,820 | 842,202 |
| 15 | 120×70×21×2 | 161,564 | 235,380 | 54 | 270×58×32×5 | 826,195 | 1067,254 |
| 16 | 120×50×24×3 | 499,776 | 615,526 | 55 | 270×75×35×5 | 880,334 | 1272,845 |
| 17 | 120×75×20×3 | 545,618 | 529,683 | 56 | 270×90×41×5 | 937,315 | 1444,491 |
| 18 | 120×53×25×4 | 1193,890 | 1152,651 | 57 | 270×100×51×5 | 993,860 | 1584,454 |
| 19 | 120×75×24×4 | 1283,580 | 1093,323 | 58 | 300×60×26×3 | 154,027 | – |
| 20 | 120×70×33×5 | 2510,550 | 1940,799 | 59 | 300×75×32×3 | 165,232 | – |
| 21 | 150×43×12×2 | 96,942 | – | 60 | 300×60×31×4 | 371,320 | – |
| 22 | 150×55×21×2 | 110,181 | 216,213 | 61 | 300×80×31×4 | 392,991 | 648,697 |
| 23 | 150×75×21×2 | 120,345 | 212,479 | 62 | 300×60×35×5 | 734,641 | 976,105 |
| 24 | 150×44×15×3 | 333,528 | 423,798 | 63 | 300×80×36×5 | 779,148 | 1183,494 |
| 25 | 150×60×20×3 | 374,986 | 517,553 | 64 | 300×90×46×5 | 827,450 | 1362,259 |
| 26 | 150×75×25×3 | 412,003 | 555,854 | 65 | 330×60×32×3 | 140,270 | – |
| 27 | 150×60×24×4 | 901,753 | 1038,067 | 66 | 330×115×39×3 | 164,232 | 408,086 |
| 28 | 150×80×24×4 | 977,782 | 1004,202 | 67 | 330×65×31×4 | 333,074 | – |
| 29 | 150×57×31×5 | 1793,573 | 1746,100 | 68 | 330×120×38×4 | 390,334 | 766,129 |
| 30 | 150×75×34×5 | 1931,009 | 1847,916 | 69 | 330×80×41×5 | 700,047 | 1103,773 |
| 31 | 180×60×21×2 | 87,801 | 185,486 | 70 | 330×100×42×5 | 735,303 | 1255,606 |
| 32 | 180×60×25×3 | 301,110 | 491,664 | 71 | 360×100×39×3 | 141,392 | 338,751 |
| 33 | 180×60×29×4 | 723,397 | 968,643 | 72 | 360×105×38×4 | 336,062 | 659,976 |
| 34 | 180×80×30×4 | 782,025 | 1028,862 | 73 | 360×75×31×5 | 594,320 | – |
| 35 | 200×50×25×3 | 251,125 | 393,135 | 74 | 360×90×37×5 | 630,361 | 999,254 |
| 36 | 200×54×25×4 | 600,107 | 803,236 | 75 | 360×105×42×5 | 661,852 | 1159,161 |
| 37 | 200×75×25×4 | 648,929 | 893,119 | 76 | 400×85×34×3 | 117,388 | – |
| 38 | 200×85×35×4 | 702,432 | 1026,160 | 77 | 400×90×33×4 | 278,682 | – |
| 39 | 200×72×32×5 | 1288,211 | 1581,038 | 78 | 400×90×37×5 | 549,531 | – |

при $40 < \lambda_w < 60$:

$$P_{cr.loc}(\lambda_w, \lambda_f, A) = 1100 - 55,379\lambda_w - 20,815\lambda_f + \\ + 197,119A + 0,597\lambda_w\lambda_f - 4,676\lambda_w A - 0,468\lambda_f A + \\ + 0,947\lambda_w^2 + 0,172\lambda_f^2 - 0,3A^2 - 0,002046\lambda_w^2\lambda_f -$$

$$- 0,006696\lambda_w\lambda_f^2 + 0,033\lambda_w^2 A + 0,002719\lambda_w A^2 + \\ + 0,007631\lambda_f^2 A + 0,00003118\lambda_f A^2 - 0,005886\lambda_w^3 + \\ + 0,001833\lambda_f^3 + 0,001921A^3,$$

при $60 < \lambda_w < 100$:

$$P_{cr.loc}(\lambda_w, \lambda_f, A) = 779,524 - 30,747\lambda_w - 2,682\lambda_f + \\ + 106,201A + 0,114\lambda_w\lambda_f - 1,673\lambda_wA - \\ - 0,389\lambda_fA + 0,385\lambda_w^2 - 0,063\lambda_f^2 - 0,251A^2 - \\ - 0,00004858\lambda_w^2\lambda_f - 0,001674\lambda_w\lambda_f^2 + 0,007889\lambda_w^2A + \\ + 0,0009871\lambda_wA^2 + 0,006306\lambda_f^2A + \\ + 0,002237\lambda_fA^2 - 0,001658\lambda_w^3 + 0,001912\lambda_f^3 + \\ + 0,002153A^3,$$

при $100 < \lambda_w < 140$:

$$P_{cr.loc}(\lambda_w, \lambda_f, A) = 313,767 - 8,132\lambda_w - 0,046\lambda_f + \\ + 42,45A + 0,051\lambda_w\lambda_f - 0,511\lambda_wA - \\ - 0,113\lambda_fA + 0,067\lambda_w^2 - 0,104\lambda_f^2 + 0,376A^2 - \\ - 0,0002592\lambda_w^2\lambda_f + 0,0002677\lambda_w\lambda_f^2 + \\ + 0,001803\lambda_w^2A - 0,001443\lambda_wA^2 - 0,0001891\lambda_f^2A + \\ + 0,003566\lambda_fA^2 - 0,0001863\lambda_w^3 + 0,0009417\lambda_f^3 - \\ - 0,008245A^3.$$

За даними, наведеними в табл. 1, із застосуванням методу регресивного аналізу була виконана апроксимація дискретних даних критичних сил для втрати стійкості форми поперечного перерізу $P_{cr.dist} = P_{cr.dist}(\lambda_w, \lambda_f, \lambda_c, A, k)$, де $\lambda_w = h/t$ – гнучкість стінки профілю, $\lambda_f = b/t$ – гнучкість полицки, $\lambda_c = c/t$ – гнучкість відгину, A – площа поперечного перерізу, $k = h/b$ – співвідношення розмірів висоти профілю до ширини полицки. При чому, для різних діапазонів варіації гнучкості стінки λ_w були використані різні апроксимувальні поліноми, що дозволило максимально точно (із нормативним відхиленням, що не перевищує 3 %) описати набір дискретних значень критичних сил.

Таким чином, значення критичної сили $P_{cr.dist}$ для втрати стійкості форми поперечного перерізу (втрати стійкості внаслідок викривлення поперечного перерізу) С-подібних профілів пропонується визначати за такими залежностями:

при $\lambda_w < 40$:

$$P_{cr.dist}(\lambda_w, \lambda_f, \lambda_c, A, k) = 2733 + 97,162\lambda_w - \\ - 410,701\lambda_f + 85,988\lambda_c + 339,983A - 3128k -$$

$$- 14,408\lambda_w\lambda_f + 2,87\lambda_w\lambda_c + 2,354\lambda_wA - 146,957\lambda_wk + \\ + 1,703\lambda_f\lambda_c - 11,373\lambda_fA + 323,029\lambda_fk - \\ - 3,398\lambda_cA - 34,869\lambda_ck - 69,252Ak + 4,685\lambda_w^2 + \\ + 13,734\lambda_f^2 - 7,981\lambda_c^2 - 0,207A^2 + 1209k^2,$$

при $40 < \lambda_w < 60$:

$$P_{cr.dist}(\lambda_w, \lambda_f, \lambda_c, A, k) = 833,818 - 17,572\lambda_w - \\ - 7,264\lambda_f - 15,808\lambda_c + 134,905A + 44,555k - \\ - 0,008486\lambda_w\lambda_f - 0,268\lambda_w\lambda_c - 0,952\lambda_wA - \\ - 2,219\lambda_wk + 1,323\lambda_f\lambda_c - 1,148\lambda_fA - 13,568\lambda_fk + \\ + 0,99\lambda_cA + 9,525\lambda_ck - 6,65Ak + 0,383\lambda_w^2 - \\ - 0,077\lambda_f^2 - 1,175\lambda_c^2 - 0,041A^2 - 5,328k^2,$$

при $\lambda_w > 60$:

$$P_{cr.dist}(\lambda_w, \lambda_f, \lambda_c, A, k) = 510,344 + 39,765\lambda_w - \\ - 31,39\lambda_f - 22,215\lambda_c + 113,625A - 298,306k - \\ - 0,573\lambda_w\lambda_f - 0,371\lambda_w\lambda_c - 0,053\lambda_wA - 8,347\lambda_wk + \\ + 0,728\lambda_f\lambda_c - 1,503\lambda_fA - 16,67\lambda_fk + \\ + 1,617\lambda_cA + 12,24\lambda_ck - 12,584Ak + 0,199\lambda_w^2 + \\ + 0,604\lambda_f^2 - 0,225\lambda_c^2 - 0,545A^2 + 70,044k^2.$$

Як бачимо з табл. 1, при гнучкості стінки, що не перевищує 30 ($\lambda_w < 30$), значення критичної сили для втрати стійкості форми поперечного перерізу є меншим за значення критичної сили для втрати стійкості елементів поперечного перерізу: $P_{cr.dist} < P_{cr.loc}$. Так для С-подібного профілю із розмірами перерізу $h = 100$ мм, $b = 65$ мм, $c = 15$ мм, $t = 5$ мм та гнучкістю стінки $\lambda_w = 16,8$ результати розв'язку задачі стійкості центральностиснутого стержня представлені на рис. 5, де можна побачити, що найнижче значення коефіцієнта запасу стійкості 1,59 характерне для втрати стійкості форми поперечного перерізу.

Для С-подібного профілю із розмірами перерізу $h = 120$ мм, $b = 70$ мм, $c = 33$ мм, $t = 5$ мм та гнучкістю стінки $\lambda_w = 20,08$ результати розв'язку задачі стійкості центральностиснутого стержня представлені на рис. 6, де можна побачити, що найнижче значення коефіцієнта запасу стійкості 1,917 характерне для втрати стійкості форми поперечного перерізу.

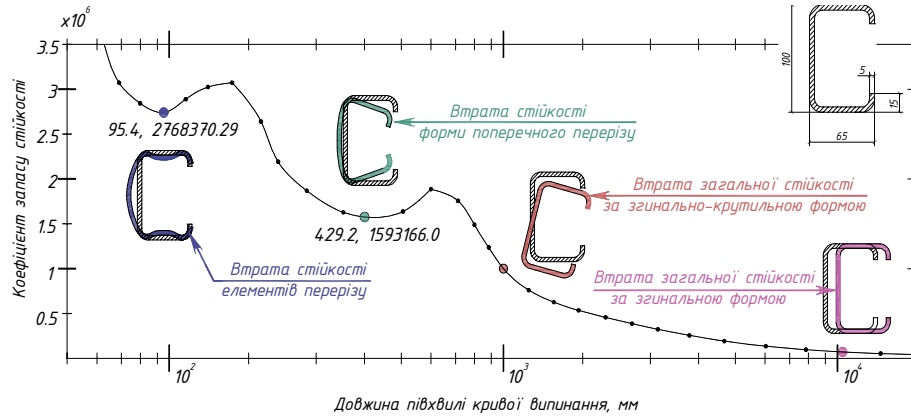


Рисунок 5. Результати розв'язку задачі стійкості центральностиснутого стержня С-подібного перерізу із розмірами $h = 100$ мм, $b = 65$ мм, $c = 15$ мм, $t = 5$ мм.

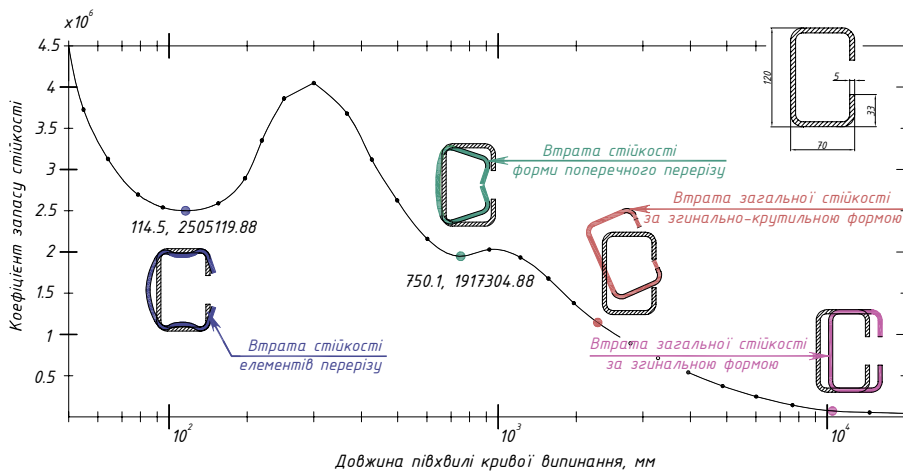


Рисунок 6. Результати розв'язку задачі стійкості центральностиснутого стержня С-подібного перерізу із розмірами $h = 120$ мм, $b = 70$ мм, $c = 22$ мм, $t = 5$ мм.

Для С-подібних профілів із гнучкістю стінки, що приблизно дорівнює 30 ($\lambda_w \approx 30$), значення критичних сил для обох форм втрати стійкості (як втрати стійкості елементів перерізу, так і втрати стійкості форми поперечного перерізу) є приблизно однаковими: $P_{cr.loc} \approx P_{cr.dist}$. Так, для С-подібного профілю із розмірами перерізу $h = 150$ мм, $b = 57$ мм, $c = 31$ мм, $t = 5$ мм та гнучкістю стінки $\lambda_w = 29,8$ результати розв'язку задачі стійкості центральностиснутого стержня представлені на рис. 7. Тут можна побачити, що для обох розглядуваних форм втрати стійкості коефіцієнти запасу стійкості є близькими за значеннями (1,78 – для втрати стійкості елементів поперечного перерізу і 1,73 – для втрати стійкості форми поперечного перерізу).

Для С-подібних профілів із гнучкістю стінки, що перевищує 30 ($\lambda_w > 30$), значення критичної сили для втрати стійкості форми поперечного перерізу є більшим за значення критичної сили

для втрати стійкості елементів поперечного перерізу: $P_{cr.dist} > P_{cr.loc}$. Так, для С-подібного профілю із розмірами перерізу $h = 150$ мм, $b = 43$ мм, $c = 20$ мм, $t = 2$ мм і гнучкістю стінки $\lambda_w = 72,5$ у результаті розв'язку задачі стійкості центрально-стиснутого стержня найнижче значення коефіцієнта запасу стійкості складає 1,19 і характерне для втрати стійкості елементів поперечного перерізу.

Висновок

Отже, в роботі запропоновано аналітичні залежності для визначення значень критичних сил при розрахунку стійкості центрально стиснутих тонкостінних стержнів С-подібного профілю. Дані аналітичні залежності розроблені для випадків втрати стійкості елементів поперечного перерізу (місцевої втрати стійкості), а також втрати стійкості форми поперечного перерізу

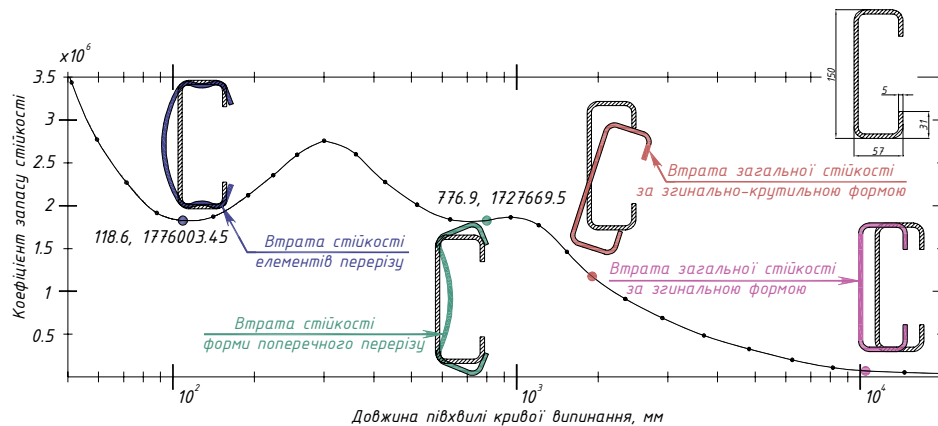


Рисунок 7. Результати розв'язку задачі стійкості центральносхвинутого стержня С-подібного перерізу із розмірами $h = 150$ мм, $b = 57$ мм, $c = 31$ мм, $t = 5$ мм.

тонкостінного стержня. Критичні навантаження розраховувались із використанням оболонкових скінченно-елементних моделей тонкостінних стержнів С-подібного профілю в результаті аналізу втрати стійкості у лінеаризованій постановці як для пружної системи методом скінченних елементів.

Отримані аналітичні залежності пропонується використовувати в складі інженерної методики розрахунку та проектування стержневих конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів, зокрема при визначенні резервів несучої здатності у закритичній стадії роботи таких конструкцій.

Литература

1. Айрумян, Э. Л. Рамные конструкции стального каркаса из оцинкованных гнутых профилей для одноэтажных зданий различного назначения [Текст] / Э. Л. Айрумян, Н. И. Каменщиков // Мир строительства и недвижимости. – 2006. – № 36. – С. 9–11.
2. Астахов, И. В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутих профилей [Текст] : автореферат диссертации на соискание уч. ст. канд. техн. наук / И. В. Астахов. – СПб, 2006. – 21 с.
3. Багмутов, В. П. Расчет тонкостенного стержня открытого профиля на сложное сопротивление [Текст] / В. П. Багмутов. – Волгоград : ВолгПИ, 1990. – 32 с.
4. Бейлин, Е. А. Вариант единой теории кручения тонкостенных стержнем открытого, замкнутого и частично замкнутого профилей [Текст] / Е. А. Бейлин // Исследования по механике строительных конструкций и материалов : Межвузовский тематический сборник трудов / Ленинградский инженерно-строительный институт. – Л. : ЛИСИ, 1991. – С. 57–74.
5. Белов, И. Д. Розробка та впровадження ефективних конструкцій будівель із тонкостінних холодногнутих профілів: сучасний стан проблеми та програма досліджень [Текст] / І. Д. Белов, В. В. Юрченко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : Збірник наукових праць. – Рівне, 2010. – Випуск 20. – С. 364–369.

References

1. Airumian, E. L.; Kamenshchikov, N. I. Frame structures of steel framework from zinc-plated formed profiles for one-storey buildings of various applications. In: *World of construction and estate property*, 2006, No. 36, p. 9–11. (in Russian)
2. Astahov, I.V. Spatial stability of structural members from cold-formed profiles: Authors abstract in candidacy for PhD in Technical Sciences. St. Peterburg, 2006. 21 p. (in Russian)
3. Bagmutov, V. P. Calculation the resistance of thin-walled bar of open profile subjected to complex loading. Volgograd: VPI, 1990. 32 p. (in Russian)
4. Beilin, E. A. An alternative for unified theory of torsion of thin-walled bar of open, closed and party closed profiles. In: *Interuniversity theme collected works «Research of mechanics of building structures and materials»*. Leningrad: LISI, 1991, p. 57–74. (in Russian)
5. Byelov, I. D.; Yurchenko, V. V. Development and implementation of efficient building structures from thin-walled cold-formed profiles: modern state of problem and research program. In: *Resource-intensive materials, constructions, buildings and structures: collections of scientific works*. Rivne: NUWMNRU, 2010. Issue 20, p. 364–369. (in Ukrainian)
6. Byelov, I. D.; Yurchenko, V. V. About buckling verification of single bars of thin-walled cold-formed profiles with open cross section subjected to central compression. In: *Metal Constructions*, 2010, Volume 16, Number 4, p. 239–250. (in Ukrainian)

6. Белов, И. Д. Про перевірку стійкості центрально-стиснутих стержнів з одиночних тонкостінних холодногнутих профілів відкритого перерізу [Текст] / И. Д. Белов, В. В. Юрченко // *Металеві конструкції*. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 239–250.
7. Белый, Г. И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме [Текст] / Г. И. Белый // *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 [Текст] / Г. И. Белый // *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 [Текст] / Н. И. Ватин, Е. Н. Попова. – СПб. : [б. и.], 2006. – 63 с.
10. Ватин, Н. И. Расчет металлоконструкций: седьмая степень свободы [Текст] / Н. И. Ватин, В. А. Рыбаков // *СтройПРОФИЛЬ*. – 2007. – № 2(56). – С. 60–53.
11. Власов, В. З. Тонкостенные упругие стержни [Текст] / В. З. Власов. – М. : Физматгиз, 1959. – 595 с.
12. Власов, В. З. Тонкостенные пространственные системы [Текст] / В. З. Власов. – М. : Издательство по строительству, 1958. – 504 с.
13. Джанелидзе, Г. Ю. К теории тонких и тонкостенных стержней [Текст] / Г. Ю. Джанелидзе // *Прикладная математика и механика*. – 1949. – Т. XIII, вып. 6. – С. 597–608.
14. Джанелидзе, Г. Ю. Статика упругих тонкостенных стержней [Текст] / Г. Ю. Джанелидзе, Я. Г. Пановко. – М. : Гостехиздат, 1948. – 208 с.
15. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко [и др.]. – М. : Издательство АСВ, 2008. – 592 с.
16. Короткий, С. В. Визначення критичних сил для локальних форм пружного випучування центрально-стиснутого тонкостінного стержня відкритого профілю [Текст] / С. В. Короткий, В. В. Юрченко // *Збірник тез студентських доповідей* / Відп. за випуск П. П. Лізунов. – К. : КНУБА, 2009. – С. 164–166.
17. Перельмутер, А. В. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы [Текст]. Том 1 / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М. : Издательство SCAD Soft, 2007. – 670 с.
18. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.
19. Ракша, С. В. Зв'язна втрата стійкості і вагова оптимізація тонкостінних стержнів відкритого профілю [Текст] : автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.17 / С. В. Ракша ; Придніпровська держ. академія будівництва й архітектури. – Дн., 2003. – 33 с.
7. Belyi, G. I. Second-order analysis of elastic-plastic thin-walled bars. In: *Structural mechanics*. Leningrad: LISI, 1983, Number 42, p. 40–48. (in Russian)
8. Belyi, G. I. About second-order analysis of elastic-plastic thin-walled bars taking into account shear stresses caused by shear deformations. In: *Interuniversity theme collected works «Metal structures and testing of structures»*. Leningrad: LISI, 1983, Number 32, p. 42–48. (in Russian)
9. Vatin, N. I.; Popova, E. N. Thermal profile in light gauge steel structures. St. Petersburg: [s. n.], 2006. 63 p. (in Russian)
10. Vatin, N. I.; Rybakov, V. A. Analysis of metal structures: the seventh degree of freedom. In: *StroyProfil*, 2007, Number 2(56), p. 60–53. (in Russian)
11. Vlasov, V. Z. Thin-walled elastic bars. Moscow: Fizmatgiz, 1959. 595 p. (in Russian)
12. Vlasov, V. Z. Thin-walled spatial structural systems. Moscow: Publishing house in building, 1958. 504 p. (in Russian)
13. Dzhanelidze, G. Yu. To the theory of the thin and thin-walled bars. In: *Applied mathematics and mechanics*, 1949, Volume XIII, Issue 6, p. 597–608. (in Russian)
14. Dzhanelidze, G. Yu.; Panovko, Ya. G. Statics of elastic thin-walled bars. Moscow: Gostehizdat, 1948. 208 p. (in Russian)
15. Karpilovskiy, V. S.; Kriksunov, E. Z.; Maliarenko, A. A.; Mikitarenko, M. A.; Perelmuter, A. V.; Perelmuter, M. A. SCAD Office. Computer system SCAD. Moscow: ASV, 2008. 592 p. (in Russian)
16. Korotkiy, S. V.; Yurchenko, V. V. Determination of the critical loads for local and distortional buckling of thin-walled bar with open profile subjected to central compression. In: *Collection of abstracts of students reports*. Kyiv: KNUBA, 2009, p. 164–166. (in Ukrainian)
17. Perelmuter, A. V.; Slivker, V. I. Equilibrium stability of structures and related problems. Volume 1. Moscow: SCAD Soft, 2007. 670 p. (in Russian)
18. Perelmuter, A. V.; Slivker, V. I. Design models of structures and a possibility of their analysis. Kyiv: Stal, 2002. 600 p. (in Russian).
19. Raksha, S. V. Combined loss of stability and weight optimization of thin-walled bars of open profile: Authors abstract of DSc. in engineering: 05.23.17. Dnepropetrovsk, 2003. 33 p. (in Ukrainian)
20. Rozin, L. A. Finite-element method as applied to elastic systems. Moscow: Stroiizdat, 1977. 129 p. (in Russian)
21. Smaznov, D. N. Stability of built-up columns subjected to compression, made of profiles from high-strength steel. In: *Civil engineering journal*, 2009, Number 3, p. 42–49. (in Russian)
22. Tusnin, O. R. Finite element for numeric analysis of structures of thin-walled open profile bars. In: *Metal Constructions*, 2009, Volume 15, Number 1, p. 73–78. (in Ukrainian)
23. Umanskii, A. A. Bending and torsion of thin-walled aircraft structures. Moscow: Oboronizdat, 1939. 112 p. (in Russian)

20. Розин, Л. А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам [Текст] / Л. А. Розин. – М. : Стройиздат, 1977. – 129 с.
21. Смазнов, Д. Н. Устойчивость при сжатии составных колонн, выполненных из профилей из высокопрочной стали [Текст] / Д. Н. Смазнов // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 3. – С. 42–49.
22. Туснін, О. Р. Кінцевий елемент для чисельного розрахунку конструкцій з тонкостінних стержнів відкритого профілю [Текст] / О. Р. Туснін // Металеві конструкції. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 73–78.
23. Уманский, А. А. Изгиб и кручение тонкостенных авиационных конструкций [Текст] / А. А. Уманский. – М. : Оборониздат, 1939. – 112 с.
24. Уманский, А. А. Расчет тонкостенных криволинейных балок [Текст] / А. А. Уманский // Труды научно-технической конференции / Военно-воздушная академия имени Н. Е. Жуковского. – М. : Изд-во ВВА им. Н. Е. Жуковского, 1944. – Вып. 2. – С. 35–48.
25. Юрченко, В. В. Проблема оптимального проектирования поперечных рам каркасів із тонкостінних холодногнутих профілів [Текст] / В. В. Юрченко // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА : тези доповідей. В 2-х частинах. Ч. 1 / Міністерство освіти і науки України, Київський національний університет будівництва і архітектури. – К. : КНУБА, 2009. – С. 44–46.
26. Юрченко, В. В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутих профилей в среде «SCAD Office» [Текст] / В. В. Юрченко // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 8. – С. 38–46.
27. Chodor, L. Sensitivity load capacity of nonlinear structures (in Polish) [Текст] / L. Chodor, G. Bijak, G. Kołodziej // XLIII Conference, PAN, Krynica. – 1997. – Vol. 3. – С. 43–50.
28. Davies, J. M. Modelling analysis and design of thin-walled structures [Текст] / J. M. Davies // Light-Weight Steel and Aluminium Structures ICSAS '99: Proceedings of the 4th International Conference on Steel and Aluminium Structures / Edited by P. Mäkeläinen and P. Hassinen. – Netherlands : Elsevier, 1999. – P. 3–18.
29. Dubina, D. Codification of imperfections for advanced finite analysis of cold-formed steel members [Текст] / D. Dubina, V. Ungureanu, I. Szabo // Proceedings of the Third International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2001), 5th–7th June 2001, Cracow / Edited by J. Zaras, K. Kowal-Michalska, J. Rhodes. – Cracow : Elsevier Science, 2001. – С. 179–186.
30. ENV 1993-1-3:2001. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.3: General rules – Supplementary rules for cold formed thin gaugemembers and sheeting [Текст]. – [S. l.] : BSi, 2001. – 128 p. – ISBN 0-580-33219-5.
24. Umanskii, A. A. Analysis of thin-walled curved beams. In: *Works of scientific and technical conference VVA named after N. E. Zhukovsky*. Moscow: N. E. Zhukovsky Publishing house, 1944. Issue 2, p. 35–48. (in Russian)
25. Yurchenko, V. V. The problem of optimal design of transverse frames of framework from thin-walled cold-formed profiles. In: *Scientific conference of young scientists, post-graduates and students KNUBA: theses in two parts*. Kyiv: KNUBA, 2009, p. 44–46. (in Ukrainian)
26. Yurchenko, V. V. Designing of building framework from thin-walled cold-forming profiles under «SCAD Office» environment. In: *Civil engineering journal*, 2010, Number 8, p. 38–46. (in Russian)
27. Chodor, L.; Bijak, G.; Kołodziej, G. Sensitivity load capacity of nonlinear structures. In: *XLIII Conference, PAN, Krynica*, 1997, Volume 3, p. 43–50. (in Polish)
28. Davies, J. M. Modelling analysis and design of thin-walled structures. In: *Light-Weight Steel and Aluminium Structures ICSAS '99: Proceedings of the 4th International Conference on Steel and Aluminium Structures* / Edited by P. Mäkeläinen and P. Hassinen. Netherlands: Elsevier, 1999, p. 3–18.
29. Dubina, D.; Ungureanu, V.; Szabo, I. Codification of imperfections for advanced finite analysis of cold-formed steel members. In: *Proceedings of the Third International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2001), 5th–7th June 2001, Cracow* / Edited by J. Zaras, K. Kowal-Michalska, J. Rhodes. Cracow: Elsevier Science, 2001, p. 179–186.
30. ENV 1993-1-3:2001. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.3: General rules – Supplementary rules for cold formed thin gaugemembers and sheeting. [S. l.]: BSi, 2001. 128 p. ISBN 0-580-33219-5.
31. Garstecki, A.; Kałkol, W.; Rzeszut, K. Analysis of thin-walled bars with open and closed-open cross-section. In: *Engineering Transaction*, 2000, Volume 4, Number 48, p. 345–355.
32. Hasham, A. S.; Rasmussen, K. J. R. Nonlinear analysis of locally buckled I-section steel beam-column. In: *Proceedings of the Third International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2001), 5th–7th June 2001, Cracow* / Edited by J. Zaras, K. Kowal-Michalska, J. Rhodes. Cracow: Elsevier Science, 2001, p. 427–436.
33. Koiter, W. T. Elastic stability and post-buckling behavior. In: *Proceedings of the Symposium on nonlinear problems* / Edited by R. E. Langer. Madison: University of Wisconsin Press, 1963, p. 257–275.
34. Rzeszut, K.; Garstecki, A.; Kałkol, W. Structural sensitivity analysis of thin-walled structures. In: *Proceedings of the Third International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2001), 5th–7th June 2001, Cracow* / Edited by J. Zaras, K. Kowal-Michalska, J. Rhodes. Cracow: Elsevier Science, 2001, p. 69–84.
35. Rhodes, J. Some observations on the post-buckling behavior of thin plates and thin-walled members. In:

31. Garstecki, A. Analysis of thin-walled bars with open and closed-open cross-section [Текст] / A. Garstecki, W. Kąkol, K. Rzeszut // Engineering Transaction. – 2000. – Vol. 4, № 48. – С. 345–355.
 32. Hasham, A. S. Nonlinear analysis of locally buckled I-section steel beam-column [Текст] / A. S. Hasham, K. J. R. Rasmussen // Proceedings of the Third International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2001), 5th–7th June 2001, Cracow / Edited by J. Zaras, K. Kowal-Michalska, J. Rhodes. – Cracow : Elsevier Science, 2001. – С. 427–436.
 33. Koiter, W. T. Elastic stability and post-buckling behavior [Текст] / W. T. Koiter // Proceedings of the Symposium on non-linear problems / Edited by R. E. Langer. – Madison : University of Wisconsin Press, 1963. – P. 257–275.
 34. Rzeszut, K. Structural sensitivity analysis of thin-walled structures [Текст] / K. Rzeszut, A. Garstecki, W. Kąkol // Proceedings of the Third International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2001), 5th–7th June 2001, Cracow / Edited by J. Zaras, K. Kowal-Michalska, J. Rhodes. – Cracow : Elsevier Science, 2001. – С. 69–84.
 35. Rhodes, J. Some observations on the post-buckling behavior of thin plates and thin-walled members [Текст] / J. Rhodes // Proceedings of the Third International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2001), 5th–7th June 2001, Cracow / Edited by J. Zaras, K. Kowal-Michalska, J. Rhodes. – Cracow : Elsevier Science, 2001. – С. 69–84.
 36. Sarawit, A. T. The finite element method for thin-walled members-applications [Текст] / A. T. Sarawit, Y. Kim, M. C. M. Bakker, T. Peköz // Proceedings of the Third International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2001), 5th–7th June 2001, Cracow / Edited by J. Zaras, K. Kowal-Michalska, J. Rhodes. – Cracow : Elsevier Science, 2001. – С. 437–448.
 37. T. von Karman. The strength of thin plates in compression [Текст] / T. von Karman, E. E. Sechler, L. H. Donnel // Trans. ASME. – 1932. – Vol. 54. – С. 53–57.
- Proceedings of the Third International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2001), 5th–7th June 2001, Cracow / Edited by J. Zaras, K. Kowal-Michalska, J. Rhodes. Cracow: Elsevier Science, 2001, p. 69–84.*
36. Sarawit, A. T.; Kim, Y.; Bakker, M. C. M.; Peköz, T. The finite element method for thin-walled members-applications. In: *Proceedings of the Third International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2001), 5th–7th June 2001, Cracow / Edited by J. Zaras, K. Kowal-Michalska, J. Rhodes. Cracow: Elsevier Science, 2001, p. 437–448.*
 37. T. von Karman; Sechler, E. E.; Donnel, L. H. The strength of thin plates in compression. In: *Trans. ASME, 1932, Volume 54, p. 53–57.*

Юрченко Віталіна Віталіївна – докторант Київського національного університету будівництва та архітектури при кафедрі металевих та дерев'яних конструкцій, старший науковий співробітник НПО СКАД Софт, член міжнародної організації структурної та багатопрофільної оптимізації ISSMO, представник Київського національного університету будівництва та архітектури у європейській асоціації дослідницьких та навчальних організацій у галузі металобудівництва. Наукові інтереси: структурна та параметрична оптимізація стержневих металевих конструкцій, оптимальне проектування та методики розрахунку каркасів будівель з тонкостінних холодногнутих профілів, розробка систем автоматизованого проектування у галузі розрахунку та оптимального проектування металевих стержневих систем.

Юрченко Віталіна Віталіївна – докторант Київського національного університету будівництва та архітектури при кафедрі металевих та дерев'яних конструкцій, старший науковий співробітник НПО СКАД Софт, член міжнародної організації структурної та багатопрофільної оптимізації ISSMO, представник

Киевского национального университета строительства и архитектуры в европейской ассоциации исследовательских и обучающих организаций в области металлостроительства METNET. Научные интересы: структурная и параметрическая оптимизация стержневых металлических конструкций, оптимальное проектирование и методики расчета каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей, разработка систем автоматизированного проектирования в области расчета и оптимального проектирования металлических стержневых систем.

Vitalina Yurchenko – Doctoral Candidate of Steel and Wooden Structures Department of Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Senior Staff Scientist of SCAD Soft. She is a member of International Society of Structural and Multidisciplinary Optimization ISSMO. She is representative of Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture in European Network of R&D and Training Organisations on Metal Branch METNET. Her research interests include structural and parametric optimization of steel structures, structural optimization and design calculation techniques of steel frameworks from thin-walled cold-formed profiles, software development for computer-aided design and optimization of steel structural systems.