

УДК 624.014.2:624.075.23

## **Експериментально-теоретичне дослідження роботи коротких стійок із холоднокатаних сталевих профілів**

**Семко О.В., д.т.н., Семко В.О., к.т.н., Авраменко Ю.О.,  
Прохоренко Д.А.**

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,  
Україна

**Анотація.** В роботі представлено результати експериментальних досліджень коротких тонкостінних сталевих стійок С-подібного перерізу. Проведено порівняння експериментальних результатів із результатами розрахунків, виконаних згідно з нормами Європи та Росії.

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований коротких тонкостенных стальных стоек С-образного сечения. Проведено сравнение экспериментальных результатов с результатами расчетов, выполненных согласно европейским и российским нормам.

**Abstract.** This publication contains results of experiment investigation of short cold-formed light-gauge C section columns. The results were compared with results of theoretical analysis by Europe and Russia codes.

**Ключові слова:** стійки, холодне формування, тонкостінні сталеві конструкції

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Технологія легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК) досить давно і успішно застосовується в країнах Заходу, а також набуває все більшої популярності в Україні. Найбільш поширеним та ефективним є використання таких конструкцій для будівництва малоповерхових житлових та громадських будівель, універсальних виробничих будівель, для зведення мансардних поверхів. Також можливе застосування ЛСТК у складі традиційних будівельних систем, наприклад, для влаштування покрівлі або навісних вертикальних огорожувальних конструкцій.

Даний тип конструкцій виготовляється переважно із холодногнутих або холоднокатаних сталевих оцинкованих профілів. Серед найбільш застосовуваних типів перерізів можна виділити С-подібний (застосовується здебільшого у несучих конструкціях перекриттів та стін), Z-подібний, омега-подібний (використовуються переважно у якості прогонів покриттів). Одна з основних проблем розвитку та застосування ЛСТК в Україні – це відсутність норм або навіть загальновизнаних принципів їх розрахунку та конструювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій та виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Питання проектування та будів-

ництва будівель із використанням ЛСТК у багатьох країнах світу вивчають вже більше 60 років. Перший нормативний документ щодо розрахунку ЛСТК з'явився в США в 1946 році. Серед існуючих світових стандартів проектування тонкостінних конструкцій найбільш поширеними та визнаними є нормативні документи Північної Америки [6], Європи [8] та Австралії [7]. В багатьох країнах світу національні стандарти з розрахунку ЛСТК розроблені на основі норм [6, 7, 8].

У даний час основними працями щодо ЛСТК в світі визнані праці американського професора Wei-Wen Yu [12] та групи авторів під керівництвом австралійського професора Gregory J. Hancock [10].

З поширенням ЛСТК в Росії та Білорусі розпочалося дослідження цього типу конструкцій [1, 3]. Як вже було зазначено вище, однією з перепон для легального впровадження ЛСТК в Україні є неможливість використання сучасних вітчизняних норм [5] для проектування тонкостінних конструкцій. В Білорусії ця проблема була частково вирішена із введенням в дію з 01.01.2010 р. європейських норм. В Росії для вирішення цієї проблеми кожен із виробників ЛСТК замовив технічні умови та рекомендації з розрахунку конструкцій, які випускає підприємство. Це дещо зменшило проблему, але не вирішило її, тому що загальнонаціональних норм на даний час так і не створено.

Україні теж необхідно вибрати один із шляхів впровадження методів розрахунку ЛСТК. Саме тому було вирішено провести дослідження, за результатами яких можливо отримати інформацію для порівняння різних підходів до проектування ЛСТК [4, 8].

**Метою дослідження** є експериментальне та теоретичне визначення несучої здатності С-подібних холоднокатаних тонкостінних профілів, визначення особливостей їх роботи та порівняння отриманих результатів з результатами, отриманими за різними нормами інших країн.

**Вклад основного матеріалу.** Робота виконана шляхом теоретичного розрахунку та експериментального визначення несучої здатності центральньо-стиснутих коротких стійок із легких сталевих тонкостінних С-подібних профілів.

В рамках експерименту було проведено випробування на стиск 11 коротких стійок із одиночних тонкостінних холоднокатаних С-подібних профілів. Схема перерізу профілів наведена на рис. 1. Довжина елементів (200 мм та 300 мм) виключала можливість загальної втрати їх стійкості. Випробування проводилось на приладі УИМ-5. Експериментальні зразки випробовувалися за схемою шарнірно опертої з обох кінців стійки, завантаженої зосередженою силою (рис. 2).

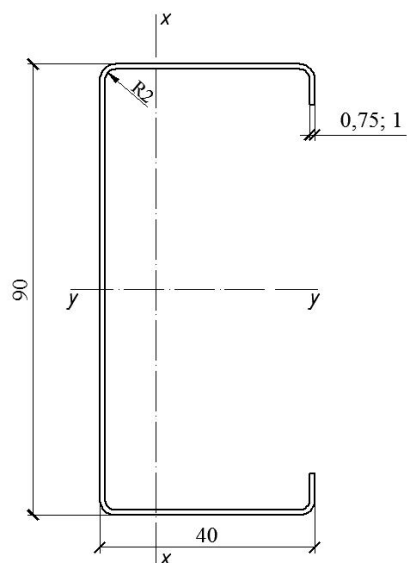


Рис. 1. Геометричні розміри перерізу зразків серії С200 та С 300



Рис. 2. Випробування на стиск коротких стійок С-подібних профілів

Випробування проводилось ступенями. Величина ступені завантаження складала 500 Н. Під час експерименту фіксувався характер роботи стійок. Завантаження відбувалось до руйнування кожного зі зразків.

Характер роботи зразків можна розділити на декілька етапів:

- при навантаженні в 500 Н – 1000 Н відбувалось локальне випучування стінки експериментальних зразків по середині висоти зразка;
- при збільшенні навантаження збільшувалась кількість ділянок в стінці, для яких відбувалась місцева втрата стійкості (див. рис. 3, а). Втрата стійкості мала пружний характер і при розвантаженні спостерігались зворотні деформації;
- при навантаженні більше 2000 Н в довгих зразках (довжиною 300 мм) спостерігалась пружна втрата стійкості форми перерізу (див. рис. 3, б). Для коротких зразків (довжиною 200 мм) спостерігалась поява місць втрати місцевої стійкості на пластинчастих елементах стінки, полиць та кромкових ребер жорсткості. Кількість ділянок, на яких відбувалась втрата місцевої стійкості, на перевищувала 3 (для зразків серії С200) та 5 (для зразків серії С300) по висоті елемента;
- при навантаженні, вказаному в табл. 1, відбувалось руйнування зразків.

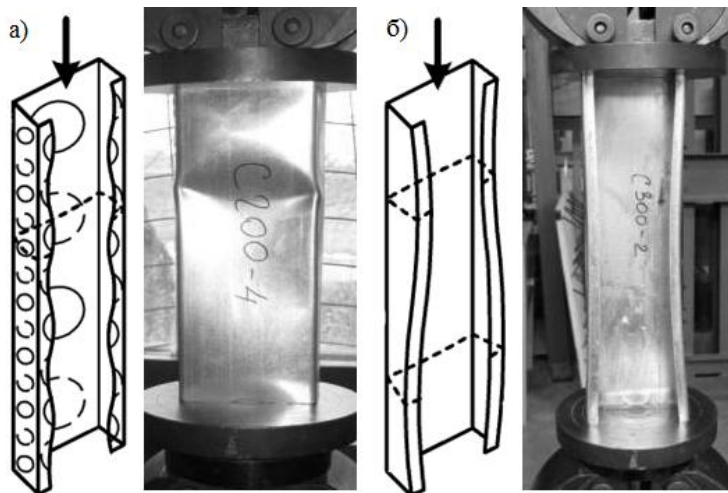


Рис. 3. Можливі форми втрати стійкості короткої стійки:  
а – місцева втрата стійкості; б – втрата стійкості форми перерізу

Під час дослідження виявлено, що на несучу здатність профілю значно впливають початкові недосконалості. Так, у більшості випадках руйнування відбувалось на ділянці біля опори стійки в місці прикладання навантаження. Це пояснюється певною нерівномірністю прикладання навантажен-

ня на зразки, що виникала із двох причин. По-перше, при прикладанні навантаження через опорні елементи (дерев'яні бруски, повстяні підкладки) відбувалось прорізання їх через тонкостінність профілю. По-друге, стійки були отримані розрізанням декількох профілів на мірні довжини, при цьому неможливо було отримати точність різання металу, що за безпечується при виготовленні ЛСТК.

Таблиця 1

| Номер профілю | Товщина профілю $t$ , мм | Форма втрати стійкості* | Розрахункова несуча здатність за [4] при врахуванні можливості втрати стійкості $N_{розр}^B$ , кН |       | Розрахункова несуча здатність за [8] при врахуванні можливості втрати стійкості $N_{розр}^{EN}$ , кН |       | Граничне експериментальне навантаження $N_{експ}$ , кН | $\frac{N_{експ}}{N_{розр}^B}$ | $\frac{N_{експ}}{N_{розр}^{EN}}$ |
|---------------|--------------------------|-------------------------|---|-------|--|-------|--|-------------------------------|----------------------------------|
|               |                          |                         | L   | L+D   | L  | L+D   |  |                               |                                  |
| C200-1        | 1,0                      | L                       | 29,63   | 25,39 | 39,51  | 33,85 | 42,0   | 1,42                          | 1,06                             |
| C200-2        | 1,0                      | L                       | 29,63   | 25,39 | 39,51  | 33,85 | 41,0   | 1,38                          | 1,04                             |
| C200-4        | 0,75                     | L                       | 24,05   | 17,74 | 32,06  | 23,66 | 37,0   | 1,54                          | 1,15                             |
| C200-5        | 0,75                     | L                       | 24,05   | 17,74 | 32,06  | 23,66 | 32,0   | 1,33                          | 1,00                             |
| C300-1        | 1,0                      | L+D                     | 29,63   | 25,39 | 39,51  | 33,85 | 36,5   | 1,44                          | 1,08                             |
| C300-2        | 1,0                      | L+D                     | 29,63   | 25,39 | 39,51  | 33,85 | 43,6   | 1,72                          | 1,29                             |
| C300-3        | 1,0                      | L+D                     | 29,63   | 25,39 | 39,51  | 33,85 | 39,6   | 1,56                          | 1,17                             |
| C300-4        | 0,75                     | L+D                     | 24,05   | 17,74 | 32,06  | 23,66 | 29,0   | 1,63                          | 1,23                             |
| C300-5        | 0,75                     | L+D                     | 24,05   | 17,74 | 32,06  | 23,66 | 35,5   | 2,00                          | 1,50                             |
| C300-6        | 0,75                     | L+D                     | 24,05   | 17,74 | 32,06  | 23,66 | 30,5   | 1,72                          | 1,29                             |

\* L – місцева втрата стійкості; L+D – одночасний вплив втрати місцевої стійкості та втрати стійкості форми перерізу.

Зруйновані зразки представлені на рис. 4.

Для визначення фізико-механічних характеристик сталі були виготовлені експериментальні зразки, що представляли собою металеві смужки, вирізані з випробуваних профілів, згідно з ГОСТ 11701-84. Зразки були випробувані ступенево-зростаючим навантаженням на розривній машині МР-500. За результатами випробувань встановлені фізико-механічні характеристики сталі. Для зразків товщиною 1 мм: нормативний опір за межею плинності  $R_{yn} = 37,0$  кН/см<sup>2</sup>, тимчасовий опір  $R_{un} = 46,0$  кН/см<sup>2</sup>. Для зразків товщиною 0,75 мм: нормативний опір за межею плинності  $R_{yn} = 65,5$  кН/см<sup>2</sup>, тимчасовий опір  $R_{un} = 66,5$  кН/см<sup>2</sup>. Зразки наведені на рис. 5.

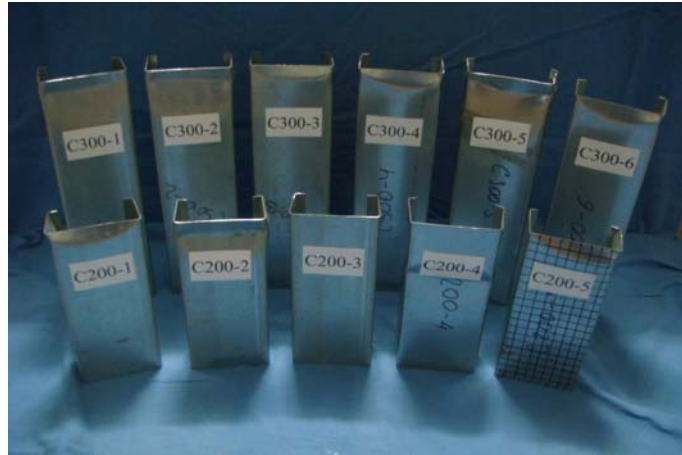


Рис. 4. Характер руйнування дослідних зразків

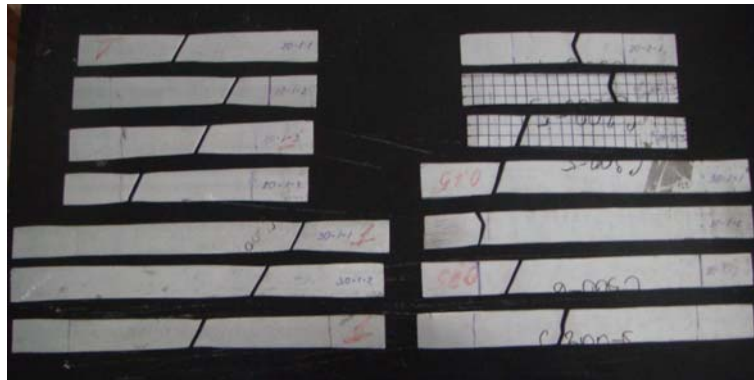


Рис. 5. Характер руйнування зразків сталі

За основу теоретичного розрахунку взято європейські норми [8]. Варто зазначити, що в даному стандарті передбачена процедура визначення несучої здатності елементів за результатами експерименту.

Врахування питань місцевої стійкості плоских елементів перерізу визначалось за положеннями [9]. Суть даного процесу полягає у визначенні ефективних ширин плоских елементів перерізу профілю та врахування особливостей роботи тонкостінних профілів: форми втрати стійкості, перехід у пластичну роботу, врахування залишкових напружень від формування профілю та характеристики сталі.

Особливістю сталевих тонкостінних конструкцій є складність розрахунку стиснутих частин перерізу через необхідність врахування можливості втрати місцевої стійкості плоских ділянок перерізу. Навіть при невеликих відносних величинах ділянок (до 5 %), що втратили стійкість, але при розташуванні їх у місцях найбільших напружень, зниження несучої здатності профілю може досягати 30 % [1]. Це питання вирішується використанням замість повної площі стиснутих елементів перерізу зменшеної (редукованої), в яку не включаються ділянки, що втратили стійкість.

В рекомендаціях [4] наведено табличні значення редукованої площі, що визначались із урахуванням вимог, зокрема, [8] та [5], але для обмеженої номенклатури профілів. Методику визначення редукованих площ наведено в нормах [8] для широкого діапазону перерізів.

При розрахунку стиснутих стійок із тонкостінних профілів необхідно враховувати, що вони можуть втрачати загальну стійкість за згинальною, згинально-крутильною або крутильною формою, місцеву стійкість плоских ділянок (рис. 3,а) та стійкість форми перерізу (рис. 3, б).

На напружено-деформований стан ЛСТК впливає також метод їх виготовлення. Згідно з дослідженнями [1] врахування зміцнення сталі, що відбувається при прокатуванні профілів у місцях згину, призводить до збільшення просторової стійкості стиснутого елемента на 5 % – 10 %, а вплив залишкових напружень від формування профілю – до зменшення її на 2 % – 7 %.

Розрахунок несучої здатності елементів за чинними нормами неможливий через невідповідність пропорцій їх геометричних розмірів, наведених у [5]. Згідно з п.7.23 [5] максимальне відношення ширини полиці профілю  $b$  до його товщини  $t$  становить для даного випадку менше 12 мм при ширині полиці випробуваного елемента 40 мм.

Нами було проведено розрахунок коротких стійок на центральний стиск за методиками, наведеними в [8] та [4]. Несуча здатність профілів визначалась для двох випадків:

- при можливості втрати елементами профілю місцевої стійкості в результаті випучування;
- при можливості втрати елементами профілю місцевої стійкості при розвитку пластичних деформацій плоских ділянок та, одночасно, при втраті перерізом профілю стійкості форми перерізу.

При порівнянні результатів, представлених в табл. 1, з даними закордонних дослідників можна стверджувати, що отримані результати дослідження майже відповідають отриманим в роботі [11]. Це свідчить про правильність виконання експерименту та теоретичних розрахунків.

Середній коефіцієнт запасу міцності при розрахунку за [8] становить 1,18, при розрахунку за [4] – 1,57. Такі результати показують, що рекомендації, розроблені в Росії, дають суттєві запаси, які можна виправдати лише на початку впровадження тонкостінних конструкцій в масове використання.

### **Висновки**

У результаті експериментально-теоретичних досліджень коротких сталевих тонкостінних стійок було виявлено, що робота таких конструкцій є прогнозованою. Для впровадження ЛСТК в Україні необхідно розробляти власну нормативну базу, яку доцільно гармонізувати з європейськими та американськими стандартами.

### **Література**

- [1] Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.23.01 / И.В. Астахов. – Санкт-Петербург: СПГАСУ, 2006. – 24 с.
- [2] ГОСТ 11701-84 Металлы. Методы испытания на растяжение тонких листов и лент. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 10 с.
- [3] Лагун Ю.И. Экспериментальные исследования поведения тонкостенных холодногнутых профилей под нагрузкой / Ю.И. Лагун, О.Н. Лешкевич, В.Е. Новиков, А. Чубрик // Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство): сб. науч. тр. Междунар. симпоз., г. Брест, 15 – 18 июня 2009 г. – Брест : ОАО «Брестская типография», 2009. – С. 148 – 153.
- [4] Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутых стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балт-Профиль». – М.: ЦНИИПСК, 2006. – 69 с.
- [5] СНиП II-23-81\* Стальные конструкции. – М.: Стройиздат, 1990. – 97 с.
- [6] North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members – Washington : American Iron and Steel Institute, 2007. – 172 p.
- [7] AS/NZS 4600:2005. Cold-formed steel structures – Sydney: Standards Australia / Standards New Zealand, 2005. – 148 p.



- [8]** EN 1993-1-3:2006 Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. – Brussels: CEN, 2006. – 130 p.
- [9]** EN 1993-1-5:2006 Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-5: General rules. Plated structural elements. – Brussels: CEN, 2006. – 53 p.
- [10]** Hancock G.J. Cold-Formed Steel Structures to the AISI Specification / Gregory J. Hancock, Thomas M. Murray, Duane S. Ellifritt. – New York: Marcel Dekker, Inc, 2001. – 398 p.
- [11]** Heinisuo M. Design of Cold-Formed Members Following New EN 1993-1-3 / M. Heinisuo, J. Kukkonen // Research report 132. – Tampere: Tampere University of Technology, 2005. – 47 p.
- [12]** Yu W.-W. Cold-Formed Steel Design: third edition / Wei-Wen Yu. – New York: John Wiley & Sons Inc., 2000. – 645 p.

*Надійшла до редколегії 21.06.2010 р.*