

О. В. СЕМКО, А. В. ГАСЕНКО, Д. М. ЛАЗАРЄВ, Ю. О. АВРАМЕНКО (Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка)

## ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЛЕГКИХ СТАЛЕВИХ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ

В роботі представлено результати комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів коротких тонкостінних сталевих стійок С-подібного перерізу. Проаналізовано напружено-деформований стан легких сталевих тонкостінних конструкцій та виконано порівняння експериментальних результатів з результатами комп'ютерного моделювання.

*Ключові слова:* скінчений елемент, переріз, напружено-деформований стан, тонкостінна конструкція

В работе представлены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов коротких тонкостенных стальных стоек С-образного сечения. Проанализировано напряженно-деформированное состояние легких стальных тонкостенных конструкций и выполнено сравнение экспериментальных результатов с результатами компьютерного моделирования.

*Ключевые слова:* конечный элемент, сечение, напряженно-деформированное состояние, тонкостенная конструкция

This publication contains results of computer simulation by finite element method of short cold-formed light-gauge C section columns. The strained-and-stressed state of light steel thin-walled structures is analyzed and the experimental results are compared with the results of computer simulations.

*Keywords:* finite element, strained-and-stressed state, thin-walled structures, columns

### Постановка проблеми в загальному вигляді

Широке застосування сучасних матеріалів і вдосконалювання деформативно-міцнісних характеристик традиційних конструкційних матеріалів сприяють інтенсивному використанню в різних галузях техніки, у тому числі й будівництві, економічних легких тонкостінних конструкцій.

Технологія легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК) досить давно та 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 огороджуваних 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). Але використання цих профілів в несучих конструкціях має деякі особливості, пов'язані з тонкостінністю та формою перерізу, насамперед, через можливість втрати стійкості при подовжньому стисканні.

Значення розрахунків на стійкість для розглянутих конструкцій в загальних розрахунках на міцність істотно зросло, оскільки руйнування таких будівельних конструкцій дуже часто пов'язане з втратою загальної стійкості або стійкості їхніх окремих конструктивних елементів – місцевої втрати стійкості.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій по цій проблемі

У нашій країні та за кордоном вчені приділяють значну увагу як загальним підходам і методам досліджень стійкості тонкостінних конструкцій, так і ряду окремих задач розрахунку на стійкість, тонкостінних стрижнів, підкріплених пластин, оболонки та ін. [1, 5, 7]. Особливо інтенсивний розвиток отримали різні чисельні методи розрахунку конструкцій на стійкість, орієнтовані на застосування сучасної комп'ютерної техніки й потужних програмно-обчислювальних комплексів.

Саме тому дослідження напружено-деформованого стану (НДС), виявлення запасів міцності є актуальною задачею. Використання комп'ютерного моделювання за допомогою пакетів комерційних програм дозволяє зменшити кількість натурних випробувань конструкцій. При зіставленні експериментальних даних з чисельними можна судити про достовірність отриманих результатів [2].

**Метою дослідження** є аналіз С-подібних холоднокатаних тонкостінних профілів з використанням методу скінчених елементів (МСЕ), визначення особливостей їх роботи та порівняння отриманих результатів з експериментальними дослідженнями.

### Виклад основного матеріалу

В останні десятиріччя, завдяки інтенсивному розвитку чисельних методів розрахунку й сучасної комп'ютерної техніки, дослідники одержали досить потужні засоби та інструменти для рішення різних задач міцності й стійкості конструкцій, які раніше не могли бути вирішені або одержували наближені рішення. Аналіз конструкцій з використанням МСЕ є в даний час фактично світовим стандартом для розрахунків на міцність, стійкість та інших розрахунків конструкцій. Основою для цього є універсальність МСЕ, який дозволяє єдиним способом розраховувати різні конструкції з різними властивостями матеріалу. Даний метод реалізований у різних універсальних програмно-обчислювальних комплексах, розроблених вітчизняними й закордонними авторами. Ці комплекси дозволяють вирішувати складні задачі міцності та стійкості конструкцій з урахуванням реальних умов їхньої експлуатації та за рахунок згущення сітки розбивки моделей на скінченні елементи (СЕ) одержувати результати, що максимально наближаються до точних рішень. При цьому, що досить важливо, вони дозволяють оцінювати збіжність і точність рішення шляхом порівняння результатів при різних густоті сітки СЕ.

Моделювання НДС зразків було виконано в системі NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis). Ця програма скінчено-елементного аналізу розроблена компанією MacNealSchwendler Software – MSC Software Corporation визнаною однією з лідерів у даному напрямку із-за повного огляду явищ різної фізичної природи: міцність, стійкість, теплофізика з можливістю вирішення складених задач, які об'єднують всі перераховані види [6].

Геометричні моделі досліджуваних зразків створювалися безпосередньо в підпрограмі Femap. Обов'язково виконувався контроль геометричних характеристик створеного плоского перерізу. У результаті порівняння геометричних характеристик модельованого перерізу та даних із сортаменту [3] виявлено, що відхилення між ними складає до 0,5 %, що в межах допусків на прокат.

Матеріал моделі задавався як ізотропний. Всі властивості матеріалу задавалися у вигляді скалярних величин. Для визначення фізико-механічних характеристик сталі були виготовлені експериментальні зразки, що представляли собою металеві смужки, вирізані з випробуваних профілів, згідно [ГОСТ 11701-84]. За результатами випробувань встановлені фізико-механічні характеристики сталі. Для зразків товщиною 1 мм: нормативний опір за межею плинності  $R_{yn} = 37,0 \text{ кН/см}^2$ , тимчасовий опір  $R_{um} = 46,0 \text{ кН/см}^2$ . Для зразків товщиною 0,75 мм: нормативний опір за межею плинності  $R_{yn} = 65,5 \text{ кН/см}^2$ , тимчасовий опір  $R_{um} = 66,5 \text{ кН/см}^2$ .

При виборі типу та розмірів скінчених елементів на які розбивалась утворена модель, враховано час створення об'ємної скінчено-елементної сітки, необхідний дисковий простір для проведення ПК NASTRAN розрахунку, точність і збіжність отриманих результатів при розрахунку моделей розбитих різними СЕ. Були змодельовані та прораховані 11 коротких стійок із одиночних тонкостінних холоднокатаних С-подібних профілів довжиною 200 та 300 мм, розбитих об'ємними СЕ – тетраедрами або гексаедрами – із стороною від 4 до 1 мм. Схема перерізу профілів наведено на рис. 1.

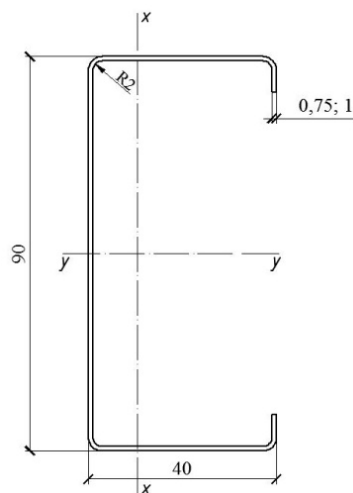


Рис. 1. Геометричні розміри перерізу зразків серії: С200 та С300

Під час порівняння збіжності отриманих результатів вирішено розбивати модель на тетраедри із стороною рівною 0,5...2 % від загальної довжини модельованого зразка, але не більше ніж  $4t$  (де  $t$  – товщина профілю). Такі розміри скінченно-елементної сітки забезпечують відхилення від середнього значення напружень отриманого за результатами всіх розрахунків до 1 %.

Щоб максимально наблизити «випробування» моделей за допомогою ЕОМ до реального експерименту, до зразків прикладались розподілені по поверхні граничні умови та навантаження аналогічні дійсним під час проведення експерименту [4]. Експериментальні зразки випробовувались за схемою шарнірно опертої з обох кінців стійки завантаженої зосередженою силою (рис. 2).



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

Тому для верхньої поверхні зразків заборонялися тільки поступальні переміщення вздовж двох осей  $x$  і  $y$ , перпендикулярних поздовжній осі елемента  $z$ . Для протилежної поверхні зразків заборонялися всі три поступальні переміщення.

Навантаження до зразків прикладалась як статичне рівномірно розподілене по поверхні. При розрахунку конструкцій число ступенів навантаження від початку завантаження до значення максимально прикладеного рівне 10 з включенням опції показу результатів на проміжних ступенях.

Характер роботи зразків можна розділити на декілька етапів:

- при навантаженні в 10...25 % від руйнівного відбувалось локальне випучування стінки експериментальних зразків по середині висоти зразку;

- при збільшенні навантаження відбувалось збільшення кількості ділянок в стінці, для яких відбувалась місцева втрата стійкості (рис. 3), 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. Втрата стійкості мала пружний характер і при розвантаженні спостерігались зворотні деформації.

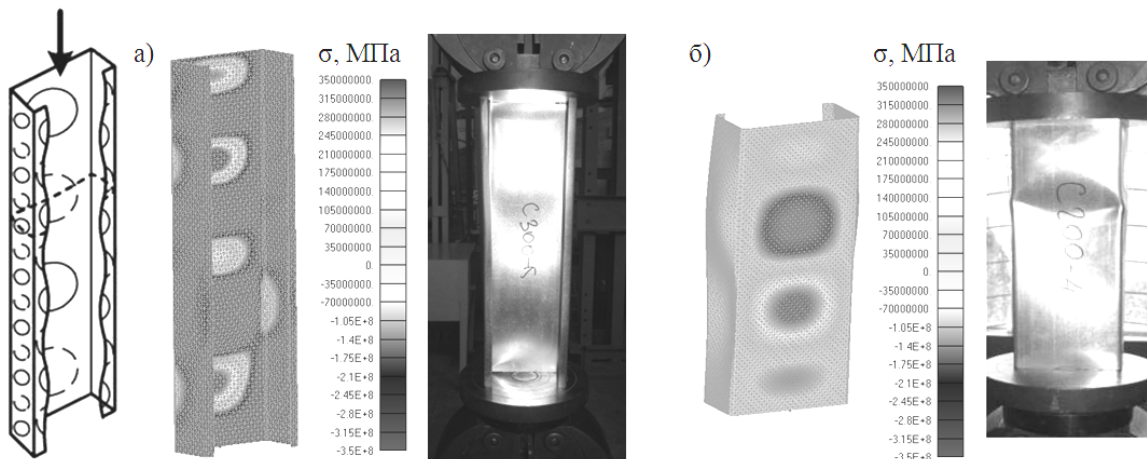


Рис. 3. Характер руйнування зразків серії:  
а) – С300; б) – С200

У результаті проведення розрахунків МСЕ за допомогою ЕОМ були отримані графіки розподілу деформацій і напружень відносно го-

ловних осей на поверхні моделей та їх числові значення із вказуванням екстремумів. Відхилення експериментальних даних від чи-

сельних розрахунків складає близько 10%. Це відхилення можна пояснити початковою недосконалістю опорних поверхонь експериментальних зразків, що впливає на несучу здатність. Так, у більшості випадків руйнування відбувалось на ділянці біля опори стійки в місці прикладання навантаження. Це пояснюється певною нерівномірністю прикладання навантаження на зразки, що виникала з 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 машинобудівельну точність різання металу, що забезпечується при виготовленні ЛСТК.

### Висновки

В результаті експериментально-чисельних досліджень коротких сталевих тонкостінних стійок було виявлено, що робота таких конструкцій є прогнозованою. Під час порівняння збіжності отриманих результатів при чисельному розрахунку моделей розбитими об'ємними скінченими елементами (тетраедрами і гексаедрами) із різними розмірами, вирішено розбивати моделі стійок на тетраедри із стороною 2...4 мм, що складає менше 2 % від висоти дослідного зразка та не більше чотирьох товщин профілю. Результати моделювання напружено-деформованого стану моделей зразків мають добру збіжність (різниця максимальних напружень менше 10 %) із результатами експериментальних випробувань. Руйнування зразків під час проведення експерименту мало аналогі-

чний характер, виявлений під час чисельного розрахунку моделей.

### БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Астахов, И. В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / И. В. Астахов. – Санкт-Петербург: СПГАСУ, 2006. – 24 с.
2. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. СливСЕР. – К.: Компас, 2001. – 448 с.
3. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутых стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балт-Профиль» [Текст]. – М.: ЦНИИПСК, 2006. – 69 с.
4. Експериментально-теоретичне дослідження роботи коротких стійок із холоднокатаних сталевих профілів [Текст]: зб. наук. праць / О. В. Семко и др. – К: УкрНДІпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського, 2010. – Вип. 6. – С. 74 – 82.
5. Субботин, С. Л. Численный метод расчёта сжатых пластин на устойчивость при сложном нагружении [Текст] / С. Л. Субботин // тез. докл. 3-й междунар. конф. (Тверь, 29 июня – 3 июля, 1998) – Тверь, 1998. – 24 с.
6. Шимкович, Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows [Текст] / Д. Г. Шимкович. – М.: ДМК, 2003. – 448 с.
7. Yu, W.-W. Cold-Formed Steel Design [Текст]: third edition / Wei-Wen Yu. – New York: John Wiley & Sons Inc., 2000. – 645 p.

Надійшла до редколегії 27.04.11.

Прийнята до друку 11.05.2011.