

УДК 624.048:624.042:624.014.7

О.В. Семко, д.т.н., професор

Ю.О. Авраменко, аспірант

О.В. Череднікова, аспірант

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТОНКОСТІННИХ СТАЛЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Представлені результати комп'ютерного моделювання методом скінченних елементів тонкостінних сталевих елементів сталезалізобетонних конструкцій. Проаналізовано напружено-деформований стан та місцеву стійкість легких сталевих тонкостінних та легких сталезалізобетонних конструкцій. Виконано порівняння експериментальних результатів з результатами комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: *місцева стійкість, напружено-деформований стан, легкі сталеві тонкостінні конструкції, метод скінченних елементів*

Вступ. 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 [1 - 3]. Одним з найбільш ефективних методів рішення зазначених задач став метод скінчених елементів (МСЕ), реалізований у різних універсальних програмно-обчислювальних комплексах, розроблених вітчизняними та закордонними авторами. Ці комплекси дозволяють успішно вирішувати складні задачі міцності та стійкості конструкцій з урахуванням реальних умов їхньої експлуатації та одержувати за рахунок згущення сітки розбивки моделей на скінчені елементи (СЕ) результати, що наближаються до точних рішень.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. В даний час метод скінчених елементів стає домінуючим серед методів, використовуваних для дослідження найрізноманітніших фізичних процесів. Проте історично він вперше був запропонований для вирішення задач математичної фізики, а найбільший його розквіт пов'язаний з проблемами аналізу міцності, жорсткості, стійкості і динаміки інженерних конструкцій і будівельних споруд [4 - 6].

Слід зазначити, що застосування методу скінчених елементів для аналізу тонких непологих оболонок було значною проблемою для багатьох дослідників. Цим пояснюється те, що в 60-90-і роки ХХ століття було запропоновано і описано більше сотні найрізноманітніших кінцевих елементів оболонок, побудованих на основі як рівнянь різних теорій оболонок, так і 3-мірних рівнянь теорії пружності [1, 7, 8]. Найбільш ефективними виявилися підходи, в яких оболонка трактується як 3-мірне тіло, яке володіє деякими спеціальними властивостями, а саме: мала товщина, викривленість лицьових поверхонь, специфічне розподіл напружень по товщині (особливо для оболонок та пластин що складаються з декількох шарів композиційних матеріалів). Подібні елементи є основним розрахунковим інструментом у більшості розвинених інформаційних систем аналізу міцності та стійкості (ANSYS і DesignSpace фірми ANSYS Corporation; Cosmos/M Designer, Cosmos/DesignStar, Cosmos/Works фірми Structural Research & Analysis Corporation; Design Works фірми CADSI; система NASTRAN компанії MacNealSchwendler Software та ін.) [5, 9, 10].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Саме тому дослідження напружено-деформованого стану (НДС, виявлення запасів міцності) з використанням МСЕ є актуальною задачею. Використання комп'ютерного моделювання за допомогою пакетів комерційних програм дозволяє зменшити кількість натурних випробувань конструкцій.

Постановка завдання. Метою чисельного моделювання напружено-деформованого стану сталевих тонкостінних пластинок на дію стискаючих навантажень вздовж поздовжньої осі конструктивного елемента методом скінчених елементів є оцінка точності і достовірності експериментальних даних на основі порівняння результатів, отриманих різними шляхами.

Основний матеріал і результати. Серед безлічі схем розрахунку композитних оболонок та пластин, що складаються з декількох шарів, особливе місце займають схеми, засновані на МСЕ. Головна перевага подібних методик полягає в можливості розрахунку геометрично складних оболонок зі змінними механічними характеристиками під дією довільних навантажень. Однак побудова ефективних скінчених елементів тут складніше, ніж для однорідних оболонок та пластин, так як до всіх проблем створення відповідної моделі зразка додаються додаткові, пов'язані з нелінійністю розподілу напружень і переміщень по товщині.

Геометричні моделі досліджуваних зразків створювалися безпосередньо в підпрограмі Femap. Обов'язково виконувався контроль геометричних характеристик створеного плоского перерізу. Матеріали моделі задавалися як ізотропні. Всі властивості матеріалів задавалися у вигляді скалярних величин. Механічні характеристики металу та бетону моделі приймалися відповідними до зразків натурних випробувань, тобто отримані моделі та реальні зразки мали аналогічні розміри, характеристики матеріалів та граничні умови. Для визначення фізико-механічних характеристик сталі були виготовлені експериментальні зразки, що представляли собою металеві смужки, вирізані з випробуваних профілів, згідно [ГОСТ 11701-84] та стандартні бетонні кубики та призми. За результатами випробувань встановлені фізико-механічні характеристики сталі (нормативний опір за межею плинності $R_{yn} = 370$ МПа, тимчасовий опір $R_{un} = 460$ МПа) та бетону (призмova міцність $R_b = 4,37$ МПа, модуль пружності $E_b = 4,69 \cdot 10^3$ МПа та коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,14$).

Для моделювання властивостей реакції пружної основи сумісно з сталеву складову конструкції був введений додатковий шар - двомірний ортотропний матеріал товщиною 0,1 мм. Такий підхід дозволяв отримати і варіювати величиною «склеювання» бетону з пластинкою, а як наслідок – реальну роботу конструкції. Під час моделювання конструкцій передбачалося, що вони будуть працювати у пружній стадії без утворення залишкових деформацій. З цих міркувань і підбиралась величина прикладеного навантаження, що склала 2 МПа.

Для максимального наближення роботи моделей за допомогою програмного комплексу, до відповідних граней тонкостінних сталевих пластин прикладались різні граничні умови: вільні краї, шарнірне обпирання та жорстке затиснення ненавантажених сторін. Так як опорні плити пресу при подальшому натурному випробуванні були шарнірними, то для верхньої поверхні дослідних зразків заборонялися поступальні переміщення вздовж двох осей, перпендикулярних поздовжній осі конструктивного елемента, а три кутові переміщення та поступальні переміщення вздовж поздовжньої осі елемента були дозволені. Для протилежної поверхні зразків заборонялися всі три поступальні переміщення, а кутові були дозволені.

При виборі типу та розмірів кінцевих елементів на які розбивалась утворені моделі, враховано час створення об'ємної кінцево-елементної сітки, необхідний дисковий простір для проведення розрахунку в програмному комплексі, точність та збіжність отриманих результатів при розрахунку моделей розбитих різними скінченими елементами.

Таким чином, за результатами аналізу для створення об'ємної скінченно-елементної сітки коротких сталевих та сталезалізобетонних конструктивних елементів було прийнято використовувати шестигранні об'ємні елементи з розмірами, що склали 2% від загальної висоти зразків.

Моделі розраховувалися на статичне навантаження. Число ступенів навантаження від початку до значення максимального прикладеного – 20 з включенням опції відображення результатів на проміжних ступенях.

Внаслідок проведення розрахунків методом скінчених елементів за допомогою ЕОМ були отримані характерні графіки розподілу відносно головних осей деформацій і напружень та їх числові значення із вказуванням екстремумів (рис. 1).

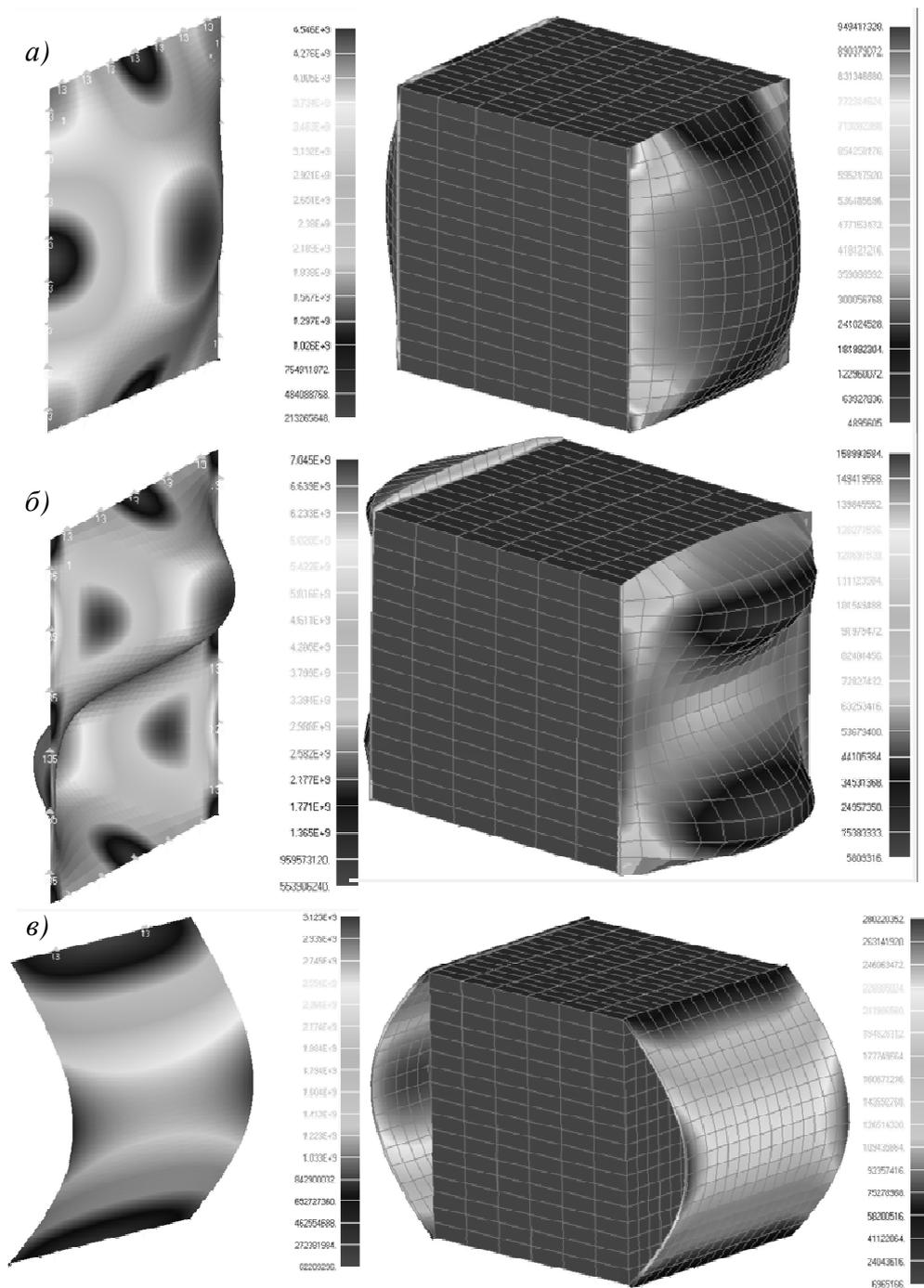


Рисунок 1 - НДС та характер руйнування моделей ЛСТК та легкого сталезалізобетонного елемента з різними граничними умовами ненавантажених крамок тонкостінних пластин: а – з шарнірним обпиранням; б – з жорстким затисненням; в – з вільним обпиранням.

Порівняння змодельованого напружено-деформованого стану дослідних зразків легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК) при різних умовах закріплення ненавантажених сторін тонкостінної пластинки засвідчує суттєве зменшення деформацій викривлення та збільшення несучої здатності: вільне обпирання (3,02 кН); шарнірне обпирання (13,03 кН); жорстке затиснення (26,4 кН), що потрібно враховувати при реальному проектуванні.

Як зазначено на рис.1 «руйнування» моделей зразків наступне: у зразка з шарнірним обпиранням сталевій пластинки по контуру утворюється по одній півхвилі в поперечному та поздовжньому напрямках при критичному навантаженні 45 кН; у моделі, що представляє

собою сталезалізобетонний конструктивний елемент з жорстким защемленням ненавантажених сторін сталеві пластинки – з'являється дві півхвилі в поздовжньому напрямку та одна в поперечному при значенні 68 кН; при вільному обпиранні – одна півхвиля в поздовжньому напрямку при 26,7 кН.

Таким чином характер закріплення сталеві пластини суттєво впливає на несучу здатність як конструктивного елемента, так і конструкції в цілому, що було враховано при подальших експериментальних дослідженнях місцевої втрати стійкості сталевих елементів сталезалізобетонних конструкцій.

Отримані значення розподілів головних напружень та деформації дослідних елементів були подібними до реальних при подальшому проведенні експериментальних досліджень (рис. 2) і свідчить про втрату місцевої стійкості тонкостінного елемента конструкції та підтверджує обрані передумови чисельного аналізу таких конструкцій.

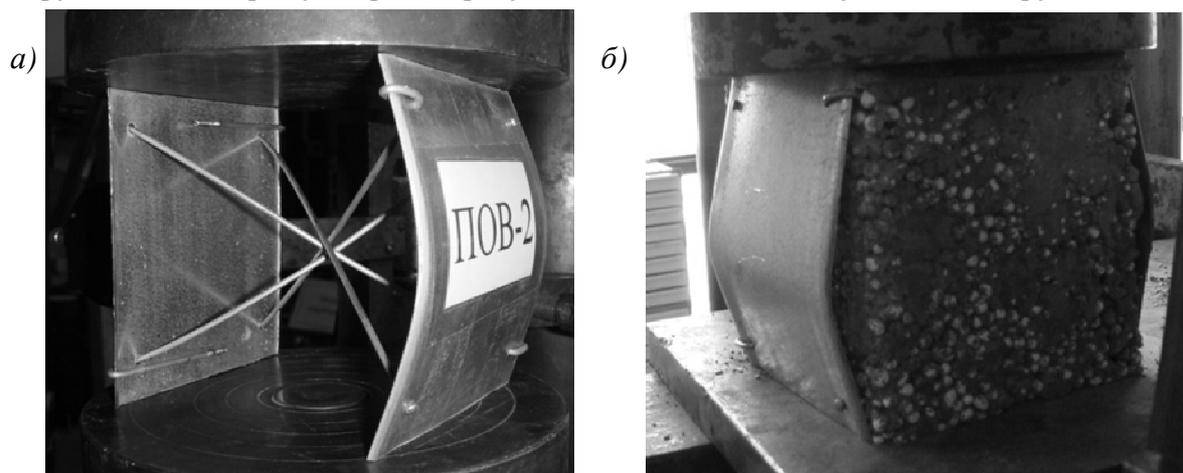


Рисунок 2 - Характер руйнування дослідних зразків: а) тонкостінного сталевого елемента; б) легкого сталезалізобетонного елемента

Різниця критичного навантаження для зразків з вільним обпиранням ненавантажених кромek склала не більше 8,9 %; для зразків з жорстким защемленням - близько 14 %, оскільки в теоретичному розрахунку не були враховані незначні ребра жорсткості для моделювання защемлення поздовжніх сторін; значна відмінність 28 % в критичному навантаження для зразків з шарнірним обпиранням по контуру обумовлена тим, що в експериментальних дослідженнях досить важко отримати ідеальний шарнір, очевидно, що для зразків з бетонною складовою це відхилення виявляється меншим.

Висновки. Використання сучасних програмних комплексів для чисельного аналізу напружено-деформованого стану тонкостінних сталевих елементів сталезалізобетонних конструкцій дозволило виявити місця із найбільшими напруженнями та деформаціями, на які під час проведення експериментальних досліджень було звернено особливу увагу. З'явилася можливість більш повно досліджувати вплив на напружено-деформований стан і стійкість тонкостінності конструкцій та підкріплюючого впливу пружної основи (бетонної складової), що дозволяє у багатьох випадках зменшити витрати матеріалів, масу як окремих несучих конструкцій, так і будівель в цілому, а також обрати оптимальну конструкцію зразків для експериментальних випробувань, і таким чином зменшити їх кількість.

Література

1. Гузь А.Н. Трехмерная теория устойчивости стержнем, пластин и оболочек / А.Н. Гузь, И.Ю. Бабич - К: «Вища школа», 1980. – 167 с.
2. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич - М.: Мир, 1975.- 541 с.

3. Wang Feiyul. A study of plate stability problem based on the theory of elasticity / Wang Feiyul, He Fubao // Act. Mech. Solidasin. - 1985. - №4. - P. 429 -435.
4. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. - 632 с.
5. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows / Д.Г. Шимкович – М.: ДМК, 2003. – 448 с.
6. Перельмутер, А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. СливСЕР. – К.: Компас, 2001. – 448 с.
7. Андрианов И.В. Аналитическое и численное исследование устойчивости пластин со смешанными граничными условиями / И.В. Андрианов, Л.В. Курпа Л.В., А.О. Иванова // Известия Высших Учебных Заведений. Строительство и Архитектура. - 1990. - №8. - С. 25 - 29.
8. Матвеев К.А. Некоторые варианты исследования устойчивости упругих пластин методом граничных элементов / К.А. Матвеев // Тез. докл. междунар. научно -техн. конф. «Расчетные методы механики деформируемого твердого тела» Новосибирск: Изд - во СГАПС. - 1995. - С.45.
9. Субботин, С.Л. Численный метод расчёта сжатых пластин на устойчивость при сложном нагружении / С.Л. Субботин – Тезисы докладов 3-й междунар. конф., Тверь, 29 июня – 3 июля, 1998 г. – Тверь, 1998. – 24 с.
10. Chettiar C. Ganapethy. Finite element method for instability of plates / Chettiar C. Ganapethy, Pandian N //1. Stract. Eng. - 1983, 10. - №1. - P. 17 - 21.

*А.В. Семко, д.т.н., проф., Ю.А. Авраменко, асп., А.В. Чередникова, асп.
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Представлены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов тонкостенных стальных элементов сталежелезобетонных конструкций. Проанализировано напряженно-деформированное состояние и местную устойчивость легких стальных тонкостенных и легких сталежелезобетонных конструкций. Выполнено сравнение экспериментальных результатов с результатами компьютерного моделирования.

Ключевые слова: *местная устойчивость, напряженно-деформированное состояние, легкие стальные тонкостенные конструкции, метод конечных элементов*

*A.V. Semko, Dr. Tech. Sc., Prof., Y.A. Avramenko, Post graduate st., A.V. Cherednikova, Post graduate st.
Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk*

NUMERICAL ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THIN STEEL ELEMENTS OF COMPOSITE STEEL AND CONCRETE STRUCTURES

This publication contains results of computer simulation by finite element method of thin-walled steel elements of Composite Steel and Concrete Structures. It is analyzed the stress-strain state and local stability of light steel thin-walled and lightweight composite structures. It is compared the experimental results with the results of computer simulations.

Keywords: *local stability, stress-strain state, light steel thin-walled structures, finite element method*

Надійшла до редакції 3.09.2012

© О.В. Семко, Ю.О. Авраменко, О.В. Череднікова