

## РОЗРАХУНОК ТОНКОСТІННИХ СТЕРЖНІВ ВІДКРИТОГО ПРОФІЛЮ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНИХ РОЗРАХУНКОВИХ КОМПЛЕКСІВ

Карп'юк Ф.Р., Корнеєва І.Б., Карпюк В.М. (Одеська державна академія будівництва та архітектури. м. Одеса)

**Наведено результати обчислення величини бімомента  $B_{\omega}$  в консольній тонкостінній балці відкритого профілю, завантаженій зосередженою силою  $F$  з ексцентриситетом по відношенню до центра згину за аналітичним методом проф. В.З. Власова та різними програмними комплексами.**

Тонкостінні стержні відкритого профілю застосовуються в інженерних конструкціях в найрізноманітніших областях техніки. Як відомо, напружено-деформований стан (НДС) стержня (тонкого металевих профілю) характеризується шістьма видами деформацій, що відповідають шістьом степеням свободи поперечного перетину: розтяг/стиск (переміщення по осі  $x$ ), зсув по осі  $y$ , зсув по осі  $z$ , кручення навколо осі  $x$ , згин відносно осі  $y$  і згин відносно осі  $z$ . Але усі закони і формули, пов'язані з розрахунками на міцність і жорсткість, справедливі лише при прийнятті гіпотези плоских перерізів. Зрозуміло, що при депланації площини поперечного перерізу виникнуть додаткові напруження і деформації, що характеризуються новими силовими чинниками і, відповідно, геометричними характеристиками поперечного перерізу профілів навантажених елементів.

Розрахунок тонкостінних стержнів з урахуванням усіх відомих чинників є досить складним завданням на теперішньому етапі, коли, здавалося б, давно розроблена і в тій або іншій мірі апробована технічна теорія Власова [1].

Пряме використання методів теорії пружності, яка дозволяє отримати дійсний НДС, стосовно тонкостінних стержнів, практично, неможливе із-за надзвичайних математичних труднощів такого порядку, що навіть при сучасному розвитку обчислювальної техніки навряд чи можливо рекомендувати ці методи для повсякденної інженерної практики.

Чисельні методи, у тому числі МСЕ (метод скінчених елементів), якими оперують сучасні програмні комплекси, далеко не повністю охоплюють усі спектри питання розрахунку тонкостінних металевих конструкцій. З іншого боку, справедливим буде зауваження щодо крайньої обмеженості вітчизняних нормативних документів [2, 3, 4] для перевірки стержнів на вплив додаткових внутрішніх зусиль, викликаних крученням стержнів і депланацією перерізу.

Перейшовши до розгляду вищезгаданих відомих методів розрахунку тонкостінних стержнів металевих конструкцій (МК) потрібно акцентувати увагу на практичній стороні питання і можливості використання МСЕ, зокрема, бібліотеки МСЕ, існуючої в ПК «ЛІРА», «SCAD», «ANSYS». Відносно точний розподіл напружень можна отримати, використовуючи тривимірну теорію пружності, тобто стосовно МСЕ, використовуючи об'ємні SE. Проте, спосіб рішення таких завдань є досить громіздким як при завданні початкових даних, так і при виконанні розрахункових процедур. Особливо це стосується тонкостінних конструкцій. Тому на практиці при розрахунках і проектуванні МК він використовується досить рідко. Що ж можуть запропонувати сучасні промислові програмні комплекси при використанні стержневих SE (у ПК «ЛІРА», «SCAD» - універсальний стержень (SE 10), «ANSYS» – скінчений елемент (BEAM 188, 189)).

В той же час, при використанні сучасних засобів автоматизації проектування інженери, що займаються розрахунком конструкцій, зазнають певних труднощів, стикаючись з необхідністю розрахунку механічних систем, до складу яких входять тонкостінні стержні відкритого профілю. Річ у тому, що переважна більшість

розрахункових програмних комплексів, заснованих на методі скінчених елементів, дозволяють урахувати до 6 степенів свободи у вузлах дискретної системи, що відповідають лінійним переміщенням і поворотам цих вузлів як жорстких тіл.

У СЕ типу стержня має тільки шість степенів свободи - три переміщення ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) і три повороти ( $UX$ ,  $UY$ ,  $UZ$ ). Тому компоненти напружень, пов'язані з, так званим, сьомим ступенем свободи – депланацією перерізу, не ураховуються. В той же час, теорія тонкостінних стержнів відкритого профілю вимагає введення сьомої степені свободи у вузлах, що примикають до тонкостінних стержнів. Ця сьома степінь свободи відповідає депланаційній складовій вузлового переміщення. Вчені із цього приводу поки ще не прийшли до єдиної думки про реалізацію сьомої степеня свободи в МСЕ. Існує думка, що її реалізація неможлива без введення 8-ї і 9-ї степені свободи, які, у свою чергу, взагалі не мають фізичного смислу [5].

Дослідження роботи тонкостінних стержнів і розробки теоретичних положень по їхньому розрахунку базувалося і апробувалося, в основному, на натурних експериментальних даних. На сьогоднішньому етапі в літературі міцно закріпилося поняття числового експерименту. Розвиток апарату МСЕ, який входить в основу потужних розрахункових програмних комплексів, дають змогу з достатньою точністю розв'язувати складні задачі лінійної і нелінійної статyki і динаміки будівельних конструкцій.

#### Мета та задачі дослідження

Мета даної роботи полягає у визначенні бімомента  $B_{\omega}$  консольної тонкостінної балки відкритого профілю (рис. 1) за допомогою числових методів.

Задачами дослідження являються:

- визначення  $B_{\omega}$  аналітичним методом проф. В.З. Власова, МСЕ, з використанням найбільш розповсюджених програмних комплексів;
- порівняння результатів розрахунків за числовими методами з аналітичним;
- визначення оптимального числового методу для розрахунків тонкостінних стержнів відкритого профілю.

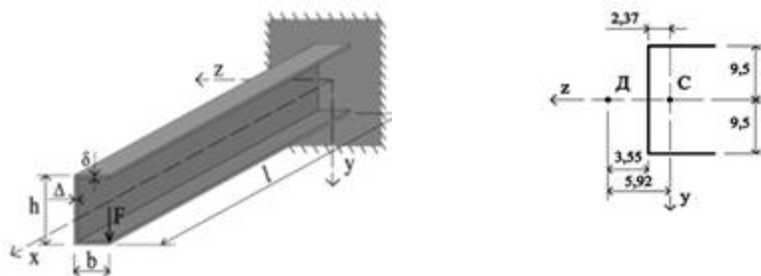


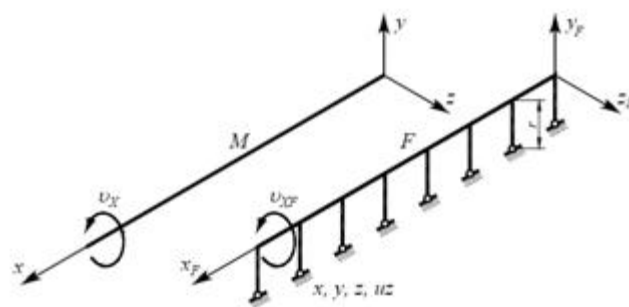
Рис.1. Консольна тонкостінна балка відкритого профілю, завантажена зосередженою силою  $F$  з ексцентриситетом по відношенню до центра згину.

#### Методика дослідження

В даній роботі використані такі методи розрахунку тонкостінного стержня як аналітичний метод за теорією проф. Власова В.З. і МСЕ.

Теоретичною основою ПК «ЛІРА», «SCAD» є метод скінчених елементів (МСЕ), реалізований у формі переміщень. Вибір саме цієї форми пояснюється простотою її алгоритмізації і фізичної інтерпретації, наявністю єдиних методів побудови матриць жорсткості і векторів навантажень для різних типів скінчених елементів, можливістю урахування довільних граничних умов і складної геометрії конструкції, що розраховується. Принципи побудови скінчено-елементних моделей викладені в [6].

Для розрахунку стержневих конструкцій, утворених з тонкостінних стержнів відкритого профілю, з використанням розрахункового комплексу «SCAD» [7], можна використати апроксимацію стержня двома стержнями (основним і фіктивним), які розглядаються в класичній постановці такими, що відповідають теорії Бернуллі-Ейлера для стержнів суцільного перетину. Тому для введення в розрахункову схему яких-небудь додаткових степеней свободи між переміщеннями поперечних перетинів основного і фіктивного стержнів встановлюється зв'язок, який забезпечує рівність кутів повороту перетинів відносно повздовжньої осі:  $\theta_x = \theta_{xF}$ . Окрім цього, на переміщення фіктивного стержня накладається система зовнішніх зв'язків (рис. 2.). Докладно про принципи побудови бістержневої моделі конструкцій із тонкостінних стержнів відкритого профілю викладено в [8, 9]. Там же показано, що бістержнева модель енергетично еквівалентна вихідному (базовому) тонкостінному стержню.



$$E_{yF} = \frac{EI_{\omega}}{r^2}$$

$$\theta_x = \theta_{xF}$$

$$M_{yF} = -EI_{yF} (\omega_F)'$$

$$V_{\omega} = M_{yF} r$$

$$M_{\omega} = Q_{yF} r$$

Рис. 2. Бістержнева модель тонкостінного стержня

При такому підході внутрішні зусилля у фіктивному стержні можна інтерпретувати як узагальнені зусилля в вихідному тонкостінному стержні, що виникають при стисненому крученні. А саме, бімомент  $V_{\omega}$  і момент стисненого кручення  $M_{\omega}$  збігаються з точністю до множника  $r$  відповідно із згинальним моментом  $M_{yF}$  і поперечною силою  $Q_{yF}$ , які виникають у фіктивному стержні.

При моделюванні тонкостінного стержня оболончастими елементами в ПК «ЛІРА» використовувався бібліотечний універсальний чотирикутний скінченний елемент оболонки типу (SE44). Крок скінчено-елементної сітки призначався виходячи із розміру – один кінцевий елемент може бути не більшим від 1/20 характерного розміру дослідного елемента конструкції [10].

В розрахунковому комплексі «ANSYS» [11] з бібліотеки скінчених елементів використовувався BEAM189. Це квадратичний три-вузловий стержневий елемент, який використовується, головним чином, при розрахунку тонкостінних профілів (рис.3.).

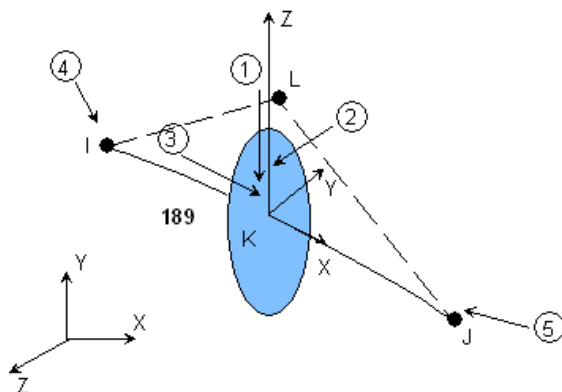


Рис.3. Квадратичний три-вузловий стержневий елемент ПК «ANSYS»

Конструкція елемента BEAM189 (як і

BEAM188) дозволяє визначати в результаті розрахунку згинно-крутні бімоменти  $V_{\omega}$  (рис. 4-6).

### Висновки

Проведене дослідження дозволяє сформулювати наступне:

- інженерний розрахунок тонкостінних стержнів відкритого профілю при вільному і стисненому крученні доцільно виконувати за допомогою числових методів;
- порівняння результатів розрахунків за числовим та аналітичними методами показало кращу збіжність при використанні бістержневої моделі в ПК «SCAD» та ПК «ANSYS»;
- при моделюванні тонкостінного стержня оболончастими скінченими елементами потрібно ретельно вибирати сітку скінчених елементів.

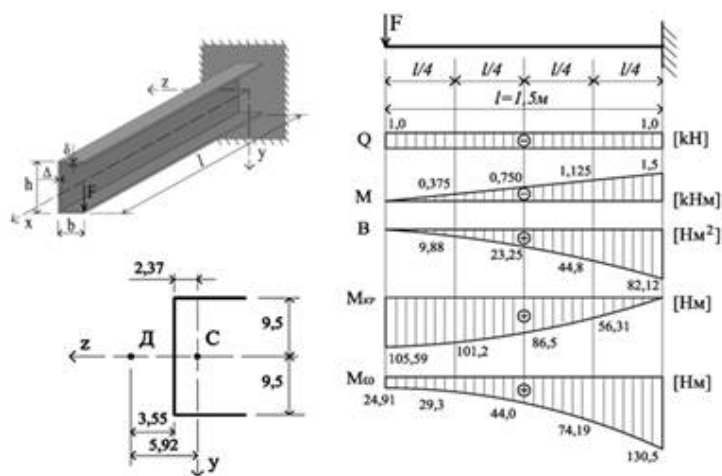


Рис. 4. Результати рішення задачі за теорією проф. Власова В.З.

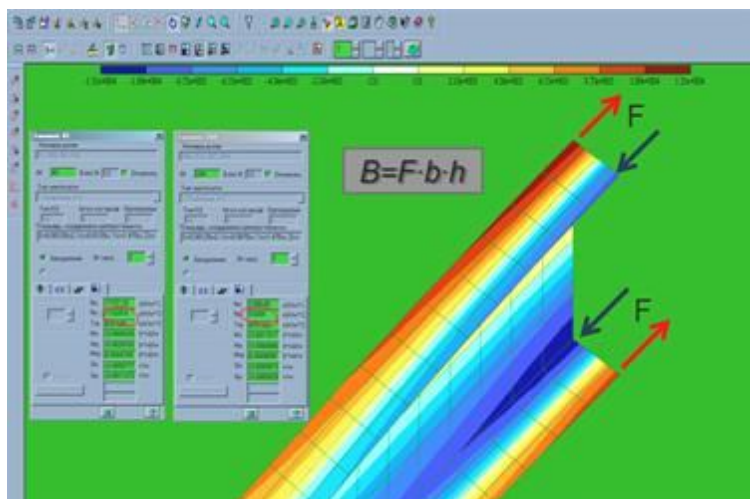
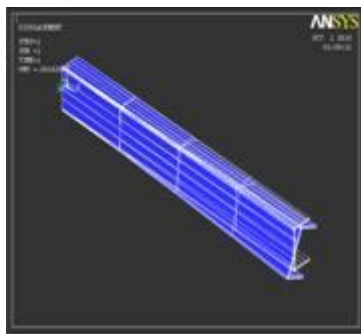
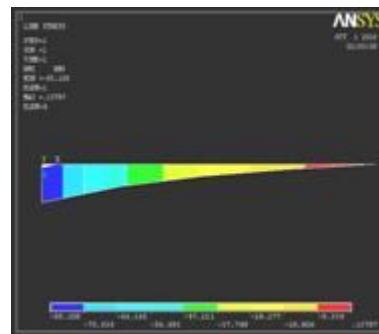


Рис. 5. Ізополя зусиль на припорній ділянці балки, визначених за допомогою оболончастих скінчених елементів у ПК «ЛІРА 9.6».



Деформована схема



Епюра бімоментів

Рис. 6. Результати розрахунку консольної балки у ПК «ANSYS 11.0»

Таблиця 1

Порівняння результатів розрахунків консольної тонкостінної балки відкритого перерізу, завантаженої зосередженою силою  $F$ , з ексцентриситетом відносно центру згину (рис. 1)

Аналітичний метод за теорією проф. Власова В.З.	Бістержнева модель ПК «SCAD 11»	Моделювання стержня оболончастими елементами в ПК «ЛІРА-9.6»	Моделювання стержня в ПК «ANSYS 11.0»
$B_{\omega}, \text{Нм}^2$	$B_{\omega}, \text{Нм}^2$	$B_{\omega}, \text{Нм}^2$	$B_{\omega}, \text{Нм}^2$
82,12	84,6	95,2	85,11
	2,9%	13,2%	3,51%

## SUMMARY

The brought results over of calculation of size of bimoment  $B_{\omega}$  in the cantilever thin-walled beam of open profile, high-usage the concentrated force  $F$  with an excentricity in relation to the center of bend after the analytical method of prof. V.Z. Vlasov of and different programmatic complexes.

## Література

1. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. - М.: Фитматгиз, 1959, - 407 с.
2. СНиП 2.03 06-85. Алюминиевые конструкции. Нормы проектирования. — М.: Стройиздат, 1996. — 47 с.
3. СНиП I-23-81\*. Стальные конструкции / Госстрой СССР, — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1981, —96 с.
4. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП 11-23-81\*. Стальные конструкции) / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. —148 с.

5. Тусин О.Р. Конечный элемент для численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Металлические конструкции. —2009. — №1, т. 15. — С. 73-78.
6. ЛИРА 9.2 Руководство пользователя. Основы: Учеб. пособие / Е.Б. Стрелец-Стрелецкий, Ю.В. Гензерский, М.В. Лазнюк, Д.В. Марченко, В.П. Титок /Под ред. А.С. Городецкого — К.: «Факт», 2005. — 146 с.
7. Юрченко В.В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде «SCAD Office»: - Инженерно-строительный журнал, №8, 2010. – С. 38 – 46.
8. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. — К.: «Сталь», 2002. — 600 с.
9. Сливкер В.И. Строительная механика. Вариационные основы. — М.: Изд-во АСВ, 2005. —736 с.
10. Барабаш М.С., Лазнюк М.В., Мартинова М.Л., Пресняков Н.И. Современные технологии расчета и проектирования металлических и деревянных конструкций: — Москва. «Издательство Ассоциации строительных вузов», 2008. — 327 с.
11. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: - Практическое руководство. – М: Едиториал УРСС, 2003. – 272с.