

УДК 539.3

І.О. Охтень

Є.О. Гоцуляк, д-р техн. наук,

О.О. Лук'янченко, канд. техн. наук.

ДОСЛІДЖЕННЯ СУМІСНОГО ВПЛИВУ ПОЧАТКОВИХ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ І ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ НА СТІЙКІСТЬ СТЕРЖНІВ ВІДКРИТОГО ПРОФІЛЮ

Досліджений сумісний вплив початкових недосконалостей та ексцентриситету прикладення поздовжньої сили на стійкість стержнів відкритого тонкостінного профілю. Скінченноелементна модель стержня сформована за допомогою сучасного обчислювального комплексу. Недосконалості задані у формі хвилеподібного випучування стінки та у формі загальної втрати стійкості, що отримані при лінійному розрахунку стійкості. Визначені критичні значення навантаження для центрально та позацентровано стиснутого стержня з ексцентриситетами та початковими недосконалостями.

Авторами досліджена стійкість стержнів відкритого тонкостінного профілю з урахуванням початкових недосконалостей [1].

Недосконалості були задані двома способами: у формі хвилеподібного випучування стінки та у формі загальної втрати стійкості, що отримані при лінійному розрахунку стержня на стійкість. Хвилеподібне випучування відповідало першій формі втрати стійкості, а загальна втрата стійкості – п'ятнадцятій. Результати дослідження наведені на графіках (рис. 1 і 2). На графіках по осі абсцис відкладені величини амплітуд, що віднесені до товщини елемента, а по осі ординат – значення відповідних критичних сил, що віднесені до P_k (критичної сили, яка була отримана при лінійному розрахунку).

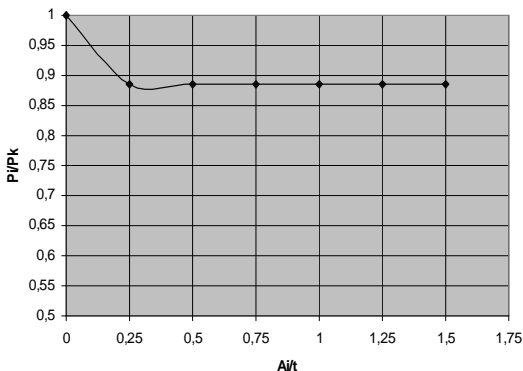


Рис. 1. Графік критичних сил при недосконалостях у вигляді першої форми втрати стійкості

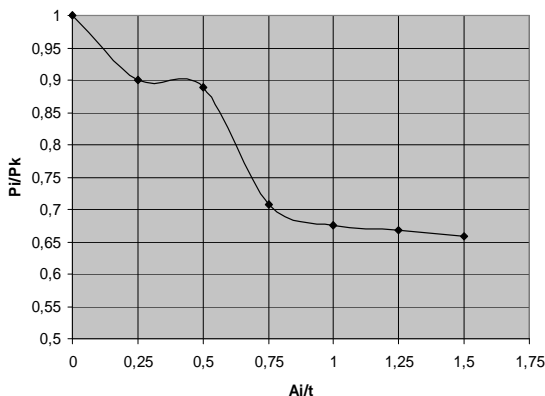


Рис. 2. Графік критичних сил при недосконалостях у вигляді п'ятнадцятої форми втрати стійкості

На основі даних графіків зроблений висновок, що втрата стійкості стержнів для всіх величин початкових недосконалостей по загальній формі досягається раніше ніж при недосконалостях по формі хвилеподібного випучування стінки і полиць.

Розрахунки ідеальних і недосконалих стержнів різного поперечного перерізу (160x50x30x2, 150x50x20x2, 200x60x24x2) у лінійній постановці показали, що величини критичних сил, які відповідають різним формам втрати стійкості, зменшуються повільно - на рис. 3 наведений спектр критичних сил для стержня 200x60x24x2, довжиною 2м, і кожна наступна критична сила відрізняється від попередньої в межах 1-10%.

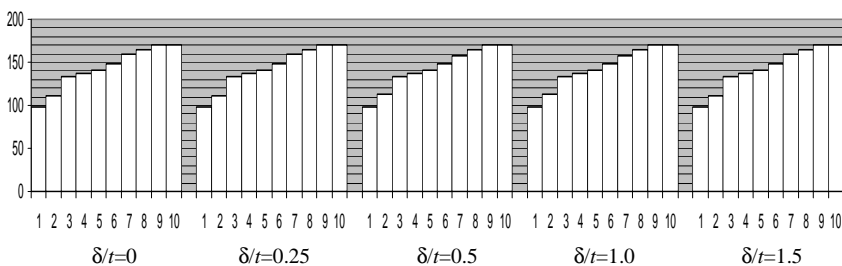


Рис. 3. Спектри критичних сил для центрально стиснутого стержня при різних значеннях початкових недосконалостей

Втрата стійкості може відбуватися по одній з чотирьох форм: загальна втрата стійкості (рис. 4,а), хвилеподібне випучування стінок (рис. 4,б), депланації стержня (рис. 4,в) і втрата стійкості на кінцях

стержня (рис. 4,г). Аналогічні форми отримані і при проведенні лабораторних випробувань стержнів. Такий густий спектр критичних сил, а також наявність початкових недосконалостей стержнів вимагає досліджувати стійкість з урахуванням недосконалостей по всім можливим формам. Крім цього необхідно досліджувати вплив ексцентриситету прикладення сили, який можна вважати одним з видів недосконалостей.

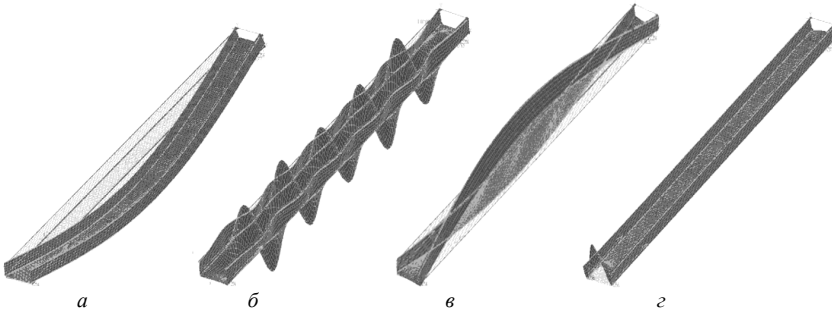


Рис. 4. Можливі форми втрати стійкості стержнів при лінійному розрахунку

Для проведення повного аналізу стійкості стержнів необхідно враховувати сумісний вплив недосконалостей, по чотирьом можливим формам, і різних значень ексцентриситетів прикладення сили.

Для дослідження сумісного впливу початкових недосконалостей і ексцентриситету на стійкість стержнів відкритого профілю вибрано стержень, що зображений на рис. 5. Розглядалися три варіанти навантаження: центрально і позациентрово стиснутий стержень з ексцентриситетами 10 і 20 мм (рис. 5).

Скінченноелементна (математична) модель стержня формується за допомогою обчислювального комплексу оснований на МКЕ. Полички, стінки і відгини стержня моделювалися плоскими скінченними чотирикутними елементами розмірами 10x10мм, всього у моделі 8600 елементів і 16640 вузлів. Матеріал - сталь Ст3 з наступними механічними характеристиками: $E=2.1 \cdot 10^{11}$ Па, $\mu=0.3$.

Розрахункову модель недосконалотого стержня будуються за допомогою обчислювального комплексу скінченноелементного аналізу та розробленої програми, в якій для формування нових координат вузлів моделі стержня компоненти вектора подібного до форми втрати стійкості додаються до відповідних координат середньої поверхні стержня. Амплітуда недосконалостей приймаються пропорційною товщині стінки стержня t : $\delta/t=0.25$; $\delta/t=0.5$; $\delta/t=1.0$; $\delta/t=1.5$.

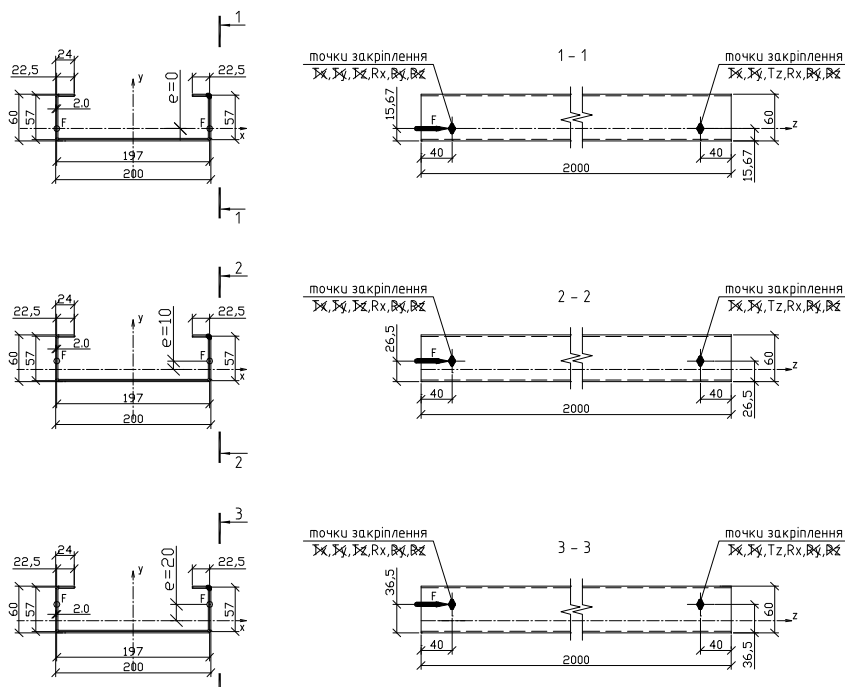


Рис. 5. Варіанти навантаження стержня

Використовуючи процедуру обчислювального комплексу розв'язання нелінійної задачі статки, для стержня з різними амплітудами початкових недосконалостей визначаються граничні значення стискаючої сили. Навантаження на стержень задається у вигляді $P_{кр} \cdot \beta$, де β – безрозмірний параметр, що змінюється в інтервалі від 0 до 1. На кожному етапі навантаження за допомогою метода Ньютона-Рафсона знаходяться розв'язки рівняння рівноваги недеформованого стержня до забезпечення умови збіжності по зміні нев'язки навантаження та по роботі внутрішніх сил на приростах вузлових переміщень.

Для трьох значень ексцентриситету проведено аналіз впливу початкових недосконалостей на величину критичної сили. Початкові деформації моделювалися у вигляді 1-ї форми втрати стійкості, отриманої при лінійному розрахунку. Прораховані варіанти з різними амплітудами початкових недосконалостей, які приймаються пропорційними товщині стінки стержня t : $\delta/t=0.25$; $\delta/t=0.5$; $\delta/t=1.0$; $\delta/t=1.5$.

Перша форма втрати стійкості для недеформованого стержня відбувається у вигляді хвилеподібного випучування стінки і полиць (рис. 6). Ця форма була

перетворена вище описаним способом у початкові недосконалості з різними амплітудними значеннями для проведення нелінійних розрахунків. На рис. 7 у вигляді графіків наведено результати таких розрахунків. Тут по осі абсцис відкладено амплітуду недосконалостей, а по осі ординат – значення критичної сили. Графік розбитий на дві частини: лінійний і нелінійний розрахунки.

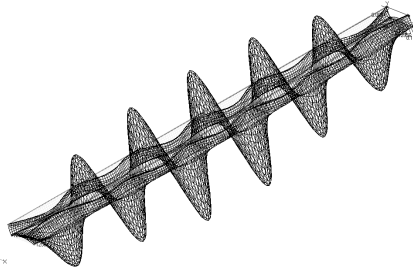


Рис. 6. Перша форма втрати стійкості ідеального центрального стиснутого стержня



Рис. 7. Результати розрахунків центрально стиснутого стержня

На основі розрахунків такого деформованого стержня можна зробити такі висновки:

- При лінійному розрахунку критична сила зменшується при збільшенні амплітуди недосконалостей. Перші форми страти стійкості можуть змінюватися зі зміною амплітуди недосконалостей.
- Критична сила деформованого стержня при нелінійному розрахунку на 1,5-3,5% нижче від ідеального.
- Зміна амплітуди початкових недосконалостей майже не впливає на величину критичної сили, зміна коливається в межах 0,2%.
- Втрата стійкості відбувається у вигляді зв'язного випучування, тобто одночасного випучування по зальній і місцевій формам.
- При розрахунку стержня з ексцентриситетом рівним 10 мм, перша форма втрати стійкості недеформованого стержня відбувається у вигляді депланації стержня, тобто його закручуванні відносно власної осі (рис. 8).

На основі нелінійного розрахунку такого деформованого стержня з різними значеннями амплітуд початкових недосконалостей (рис. 9) можна зробити такі висновки:

- Початкові недосконалості, що задані у вигляді форми деплацації, майже не впливають на величину критичної сили.

- При збільшенні величини початкових недосконалостей відбувається незначне збільшення критичної сили.

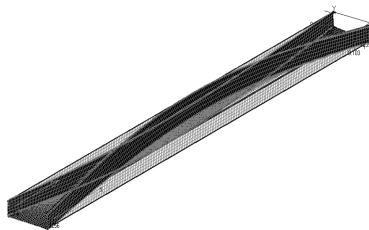


Рис. 8. Перша форма втрати стійкості ідеального стержня при позациентровому стиску з ексцентриситетом $e=10\text{мм}$

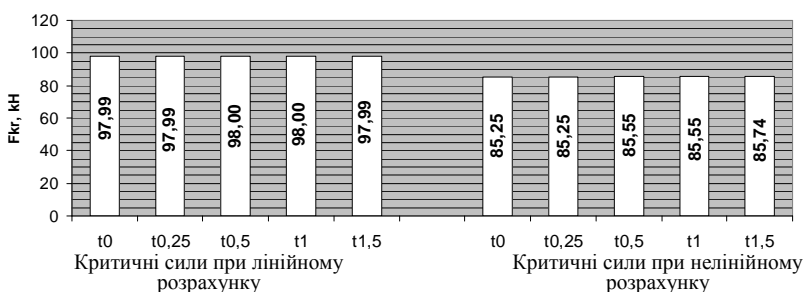


Рис. 9. Результати розрахунків позациентрово стиснутого стержня ($e=10\text{мм}$)

Ці результати підтверджені розрахунками з ексцентриситетом 20мм (рис. 10), при якому виявлені аналогічні закономірності, при чому у даному випадку зміна величини ексцентриситету впливає на критичну силу ще в меншій мірі ніж при $e=10\text{ мм}$.

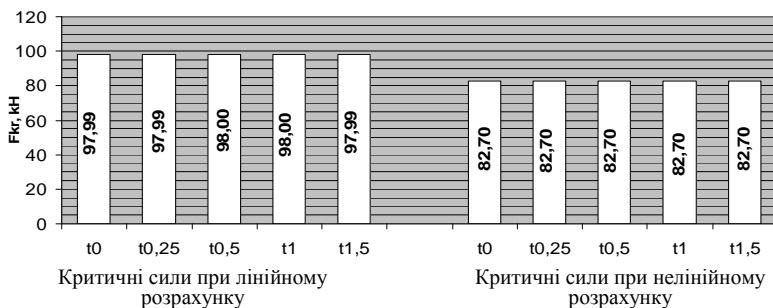


Рис. 10. Результати розрахунків позациентрово стиснутого стержня ($e=20\text{мм}$)

Загалом, після проведення серії розрахунків і випробувань можна виділити чотири види форм втрати стійкості для стержнів такого типу: загальна втрата стійкості (рис. 4,а), хвилеподібне випучування стінок (рис. 4,б), депланація стержня (рис. 4,в) і втрата стійкості на кінцях стержня (рис. 4,г).

Дослідивши вплив різних видів недосконалостей на стійкість стержнів, можна зробити наступні висновки:

- Лише недосконалості, що задані у вигляді загальної форми втрати стійкості і хвилеподібного спучування впливають на величину критичної сили.
- Вплив величини недосконалостей проявляється лише при задані їх у вигляді загальної форми втрати стійкості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Охтеня І.О., Гоцуляк Є.О., Лук'яненко О.О.* Дослідження стійкості тонкостінних елементів відкритого профілю з урахуванням початкових недосконалостей // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – Вип.82. – К.:КНУБА, 2008.
2. *Ракша С.В.* Связная потеря устойчивости и весовая оптимизация тонкостенных стержней открытого профиля. Дисертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Днепропетровск – 2003.
3. *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984с.
4. *Тимошенко С.П.* Устойчивость стержней, пластин и оболочек – М.: Наука, 1971. – 807с.
5. *Доннелл Л.Г., Ван К.* Влияние неправильностей в форме на устойчивость стержней и тонкостенных цилиндров при осевом сжатии // Механика. Сб. перев. и обз. иностр. период. лит.-ры. – 1951. – №408, С.91 – 107.
6. *Койтер В.Т.* Устойчивость и критическое поведение упругих систем // Механика: Сб. перев. иностр. статей. – 1960. – №5, С.99 – 110.
7. Строительные нормы и правила. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. –96с.

Отримано 03.06.09

Исследовано совместное влияние начальных несовершенств и эксцентриситета приложения продольной силы на устойчивость стержней открытого тонкостенного профиля. Конечноеэлементная модель стержня сформирована с помощью современного вычислительного комплекса. Несовершенства заданы в форме волнообразного выпучивания стенки и в форме общей потери устойчивости, которые получены при линейном расчете. Определены критические значения нагрузки для центрально и внецентренно сжатого стержня с эксцентриситетами и начальными несовершенствами.

Combined influence of initial imperfections and eccentricity of longitudinal force on stability of the opened thin-walled type bars is investigated. The finite element model of bar is built with the use of the modern program. Imperfections are set in form undulating goggling of wall and in form general loss of stability, defined by the buckling analysis. The critical loads are found for central and eccentrically compressed bar with initial imperfections.