

УДК 539.3

Охтен І.О.**Гоцуляк Є.О.**, д-р техн. наук,**Лук'янченко О.О.**, канд. техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВІДКРИТОГО ПРОФІЛЮ З УРАХУВАННЯМ ПОЧАТКОВИХ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ

В практиці сучасного будівництва і машинобудування у якості несучих елементів металоконструкцій широке застосування знайшли тонкостінні профілі, які поєднують у собі економічно ефективні вагові характеристики і високі технологічні якості при виготовленні і експлуатації. Такі конструкції економічні, мають технологічні переваги при монтажу і використанні. Одним з різновидів тонкостінних конструкцій є холодногнуті профілі, використання яких дозволяє створювати конструкції близькі до оптимальних по вазі. Дані профілі дозволяють виготовляти широкий спектр будівельних конструкцій: несучі і фахверкові колон, одно- і двоскатні ферми, балки покриття, стінові і покрівельні прогони. Це дозволяє створювати будівлі, де у якості несучих елементів використані холодногнуті профілі.

Оскільки вичерпання несучої здатності таких конструкцій при різних видах навантажень проходить, як правило, внаслідок втрати стійкості, проблемі визначення критичних навантажень тонкостінних профілів приділяється особлива увага. Наявність малих недосконалостей форми реальних стержнів може значно понизити її критичне навантаження, що викликає необхідність врахування цих особливостей при розрахунках конструкцій.

Основи розрахунку стійкості тонкостінних стержнів з урахуванням їх початкових недосконалостей закладені у роботах [2, 3], у [1] досліджений вплив взаємодії загальних і місцевих форм випучування на несучу здатність тонкостінних стержнів відкритого профілю.

В даній роботі досліджується стійкість реальних стержнів з урахуванням їх початкових недосконалостей. Розглядається стержень довжиною 2м, який має С-подібну форму поперечного перерізу з постійною по довжині і по перерізу товщиною (рис. 1). Паралельно відбувалася серія випробувань реальних стержнів, що дозволяє порівнювати теоретичні результати з експериментальними даними. Випробування стержнів (рис. 2) проводилися за допомогою пресу типу Р-100 у випробувальному центрі будівельних конструкцій при кафедрі

металевих та дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури.

Скінченноелементна (математична) модель стержня формується за допомогою обчислювального комплексу NASTRAN. Полічки, стінки і відгини стержня моделювалися плоскими скінченними чотирикутними елементами розмірами 10х10мм, всього у моделі 6400 елементів і 6633 вузлів. Як матеріал закладено сталь Ст3 з наступними механічними характеристиками: $E=2.1 \cdot 10^{11}$ Па, $\mu=0.3$. Прийнятий матеріал відповідає матеріалу реального стержня.

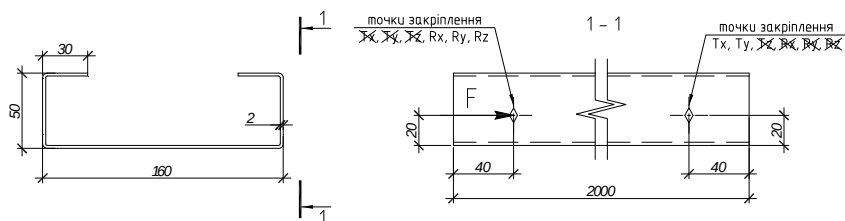


Рис. 1. Стержень, що досліджується



Рис. 2. Випробування стержнів

Розрахункову модель недосконалого 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 серединної поверхні стержня. Програма написана на мові ФОРТРАН99 і орієнтована на комплекс NASTRAN. Недосконалості приймаються пропорційними товщині стінки стержня t : $\delta/t=0.125$; $\delta/t=0.25$; $\delta/t=0.5$; $\delta/t=0.75$; $\delta/t=1.0$; $\delta/t=1.25$; $\delta/t=1.5$.

Використовуючи процедуру обчислювального комплексу розв'язання нелінійної задачі статки, для стержня з різними амплітудами початкових недосконалостей визначаються критичні значення стискаючої сили. Навантаження на стержень задається у вигляді $q_{кр}^0 \cdot \beta$, 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 недосконалого стержня до забезпечення умови збіжності по зміні нев'язки навантаження та по роботі внутрішніх сил на приростах вузлових переміщень.

Було проведено аналіз впливу початкових недосконалостей на величину критичної сили. Початкові деформації моделювалися у вигляді 1-ї форми втрати стійкості, отриманої при лінійному розрахунку. Були прораховані варіанти з різними амплітудами початкових недосконалостей. На рис.3 представлений графік залежності критичної сили від величини амплітуди початкових недосконалостей δ/t . По осі абсцис відкладені величини амплітуд віднесені до товщини елемента, а по осі ординат – значення відповідних критичних сил віднесених до P_k (критичної сили, що була отримана при лінійному розрахунку).

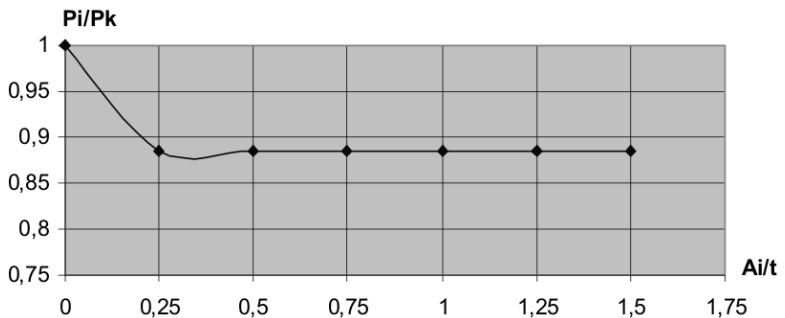


Рис. 3. Графік залежності критичної сили від величини початкових недосконалостей по 1-й формі втрати стійкості

За цим графіком можна зробити наступні висновки:

- Втрата стійкості була досягнута для всіх випадків при меншій критичній силі порівняно з лінійним розрахунком.
- Величина критичної сили для даних задач не залежить від амплітуди недосконалостей.
- Форма деформацій схожа на загальну форму втрати стійкості. Це можна пояснити тим, що навантаження прикладене не в центрі елементу, а з деяким ексцентриситетом (для більшої відповідності реальним конструкціям), що провокує згин елемента.

Результати попередніх розрахунків елемента показали, що при лінійній постановці критичні сили мають дуже густий спектр (рис. 4) і різниця між першою критичною силою (51499.04), яка відповідає місцевій формі втрати стійкості і 15-ю (66020.83), яка відповідає загальній формі, незначна (різниця між ними 22%). На рис. 4 наведена множина критичних сил для досліджуваного стержня, на графіку по осі абсцис відкладений номер форми втрати стійкості, а по осі ординат відповідні значення критичних сил.

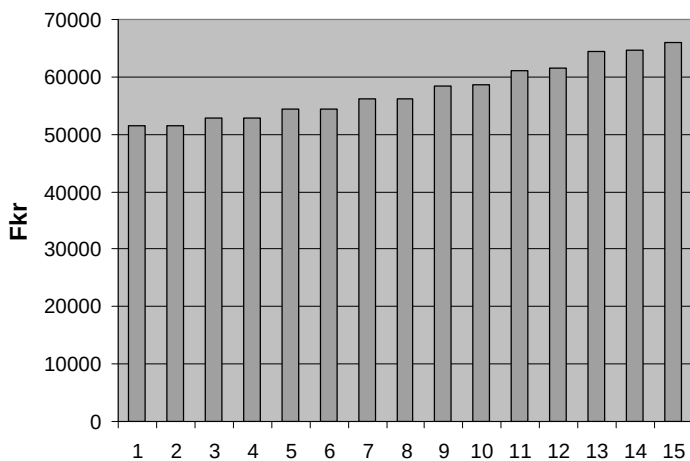


Рис. 4. Спектр критичних сил

На рис. 5 наведені форми втрати стійкості.

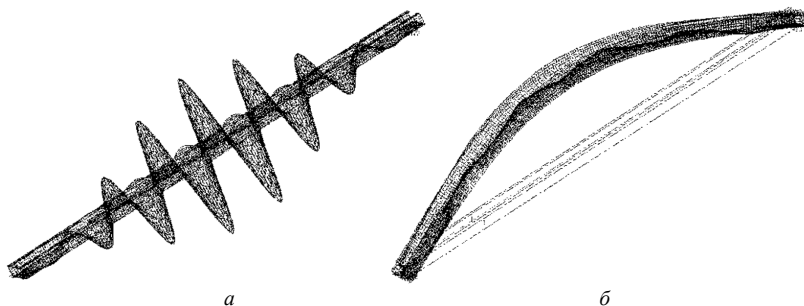


Рис. 5. Форми втрати стійкості: а) перша форма, б) п'ятнадцята форма

Другим етапом роботи був розрахунок елемента з недосконалостями у формі загальної втрати стійкості. Були прораховані варіанти з різними величинами початкових недосконалостей аналогічні попереднім розрахункам. За результатами розрахунків можна зробити наступні висновки (рис. 6):

- Критичне навантаження залежить від величина амплітуди початкових недосконалостей.
- Втрата стійкості стержнів для всіх величин початкових недосконалостей по 15-й формі досягається раніше ніж при недосконалостях по 1-й формі.
- Необхідно проводити тестові задачі з різними значеннями ексцентриситету прикладання сили.

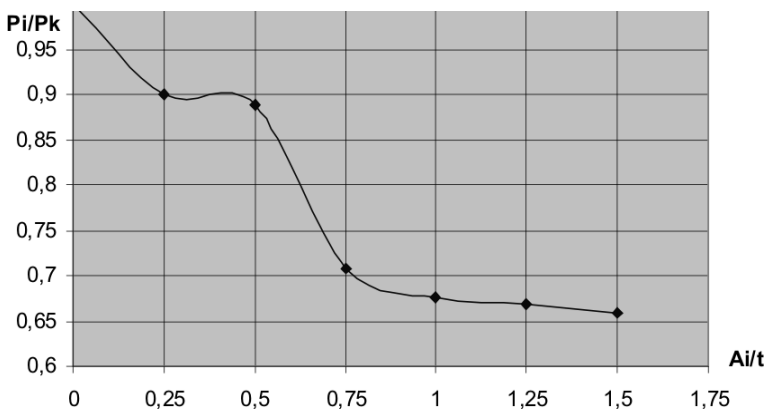


Рис. 6. Графік залежності критичної сили від величини початкових недосконалостей по 15-й формі втрати стійкості

Розроблена програма дозволяє задавати реально виміряні, а також гіпотетичні початкові недосконалості серединної поверхні стержня. Це відкриває перед нами можливість дослідження впливу на несучу здатність різних видів початкових недосконалостей, шляхом порівняння теоретичних результатів з даними лабораторних випробувань. Метою дослідження є розробка методів урахування початкових недосконалостей, вплив яких на критичну силу максимально відповідає впливу реальних недосконалостей.

1. *Ракиш С.В.* Связная потеря устойчивости и весовая оптимизация тонкостенных стержней открытого профиля. Дисертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Днепропетровск – 2003.
2. *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984с.
3. *Тимошенко С.П.* Устойчивость стержней, пластин и оболочек – М.: Наука, 1971. – 807с.
4. *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.
5. *Койтер В.Т.* Устойчивость и закритическое поведение упругих систем // Механика: Сб. перев. иностр. статей. – 1960. – №5, С.99 – 110.
6. Строительные нормы и правила. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. –96с.