

УДК 539.3

## АНАЛІЗ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ТОНКОСТІННИХ СТЕРЖНІВ ВІДКРИТОГО ПРОФІЛЮ З УРАХУВАННЯМ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ ФОРМИ

**І.О. Охтень<sup>1</sup>,**

головний інженер проєктів

**О.О. Лук'яненко<sup>2</sup>,**

д-р техн. наук

**А.А. Козак<sup>2</sup>,**

канд. техн. наук

<sup>1</sup>ТОВ «Проектна компанія «Футуриста»  
провулок Рильський 10/3, м. Київ. 01001

<sup>2</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури  
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680

DOI: 10.32347/2410-2547.2022.108.360-368

Проаналізовано вплив геометричних недосконалостей форми на стійкість центрально стиснутих тонкостінних стержнів відкритого профілю з різною товщиною стінки. Застосовано обчислювальні процедури програмного комплексу скінченно-елементного аналізу NASTRAN. Результати дослідження стійкості стержнів порівняно з експериментальними, аналітичними і чисельними розрахунками інших дослідників.

**Ключові слова:** тонкостінний стержень відкритого профілю, недосконалість форми, статична стійкість, метод скінчених елементів.

**Вступ.** Завдяки розвитку технології виробництва, появи ефективних засобів захисту від вогню та корозії, доступності і швидкості монтажу, використання холодногнутих профілів набуло широкого розповсюдження в будівництві. Тонкостінні стержні відкритого профілю знайшли застосування для виготовлення широкого спектру будівельних несучих та огорожуючих конструкцій, оскільки мають ефективні вагові і економічні характеристики.

Елементи будівельних конструкцій з холодногнутих стержнів працюють як тонкостінні стержні, а дослідження їх напружено деформованого стану та стійкості виконується згідно з теорією тонких стержнів, яка вперше була описана С.П. Тимошенком [1]. Відповідно до теорії В.З. Власова [2] тонкі стержні відносяться до четвертого класу розрахункових схем основних елементів конструкцій по просторовому признаку. Теорія тонкостінних елементів будівельних конструкцій розвинута та доповнена в роботах О.А. Ільюшина, В.В. Болотіна, Ф. Блейхома, Н.С. Стрелецького, А.С. Вольміра та інших дослідників [3]. Огляд сучасних методик і результатів досліджень з визначення несучої здатності стержневих елементів з холодногнутих профілів наведений в книзі В.В. Юрченко і А.В. Перельмутера [3].

Однак, при розгляді чистого кручення в теорії тонких стержнів не враховуються специфічні особливості холодногнутих стержнів, якими є додаткові позовжні нормальні напруження, що виникають внаслідок відносної деплантації їх поперечного перерізу. Також доведено, що наявність малих реальних недосконалостей форми стержнів може значно знизити значення критичного навантаження. Тому виникає нагальна потреба у врахуванні геометричних недосконалостей в дослідженнях напружено-деформованого стану та стійкості елементів конструкцій з холодногнутих профілів.

Основи розрахунку стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з урахуванням недосконалостей форми закладені в роботах [4, 6]. В дослідженнях міцності та стійкості таких стержнів широкого застосування набули чисельні методи, які дозволяють врахувати наведені вище особливості їх поведінки. В багатьох сучасних обчислювальних комплексах, таких як SCAD, ЛИРА, NASTRAN [6], реалізовано метод скінченних елементів (МСЕ), який має свої переваги щодо створення розрахункових моделей та точності розрахунків статичних і динамічних характеристик будівельних конструкцій.

У попередніх роботах [9, 10, 11] авторами представлена чисельна методика і результати дослідження стійкості центрально стиснутих тонкостінних стержнів відкритого профілю з геометричними недосконалостями, що моделювались у вигляді різних форм втрати стійкості. Аналіз отриманих результатів підтвердив значний вплив геометричних недосконалостей на напружено-деформований стан і стійкість таких стержнів. В даній роботі на основі методу скінченних елементів та обчислювальних процедур програмного комплексу NASTRAN виконано дослідження впливу недосконалостей форми на стійкість стержнів відкритого профілю з різною товщиною стінки, результати якого порівнювались з аналітичними і чисельними розрахунками та експериментальними даними інших дослідників.

**1. Побудова скінченно-елементної моделі стержня відкритого профілю з недосконалостями форми.** Розглянуто тонкостінні профілі відкритого перерізу С 80/40/14/1,1 та С 80/40/14/3 довжиною  $l=1,7$  м (рис. 1). Стержні розглядались як центрально стиснуті з жорстким кріпленням знизу та шарнірно-рухомим зверху.

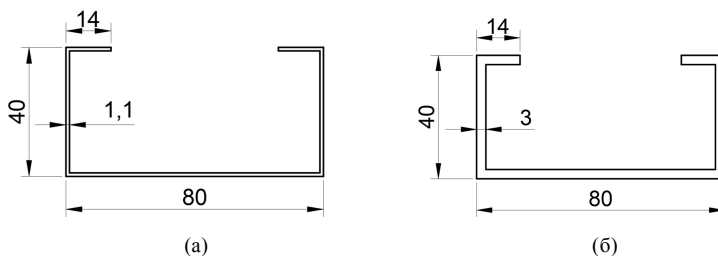


Рис. 1. Поперечні перерізи досліджуваних стержнів 80/40/14/1,1 (а), 80/40/14/3 (б)

Стержні виготовлено з оцинкованої сталі, механічні характеристики якої представлено в табл. 1.

Таблиця 1

## Механічні характеристики сталі

Характеристика	Позначення	Од. виміру	Значення
Межа текучості	$R_y$	МПа	321,2
Межа міцності	$R_u$	МПа	402,34
Модуль пружності	$E$	МПа	205300
Коефіцієнт Пуасона	$\mu$	-	0,29
Модуль зсуву	$G$	МПа	79600

Геометричні характеристики тонкостінних стержнів С 80/40/14/1,1 і С 80/40/14/3,0 визначено аналітично і наведено в табл. 2.

Таблиця 2

## Геометричні характеристики стержнів відкритого профілю

Параметр		Профіль		Одн. виміру
		С80/40/14/1,1	С80/40/14/3	
$A$	Площа поперечного перерізу	2,02	5,28	см <sup>2</sup>
$I_y$	Момент інерції відн. центр. осі $Y1$	4,873	11,501	см <sup>4</sup>
$I_z$	Момент інерції відн. центр. осі $Z1$	21,041	52,338	см <sup>4</sup>
$i_y$	Радіус інерції відносно осі $Y1$	1,553	1,476	см
$i_z$	Радіус інерції відносно осі $Z1$	3,228	3,148	см
$W_{u+}$	Макс. момент опору відн. осі $U$	5,26	13,085	см <sup>3</sup>
$W_{v+}$	Макс. момент опору відн. осі $V$	3,363	7,913	см <sup>3</sup>
$W_{v-}$	Мін. момент опору відн. осі $V$	1,91	4,516	см <sup>3</sup>
$z_m$	Координата центра мас по осі $Z$	1,449	1,453	см

Побудова скінченно-елементних моделей стержнів відкритого профілю виконана в програмному комплексі NASTRAN [6]. Полки і стінки стержнів змодельовано у вигляді сукупності чотирьохкутних оболонкових елементів з шістьма ступенями вільності у вузлі. Геометричні недосконалості змодельовано у вигляді першої загальної форми втрати стійкості стержнів з ідеальною поверхнею [12], які отримано з лінійного розрахунку стійкості методом Ланцюша (рис. 2).

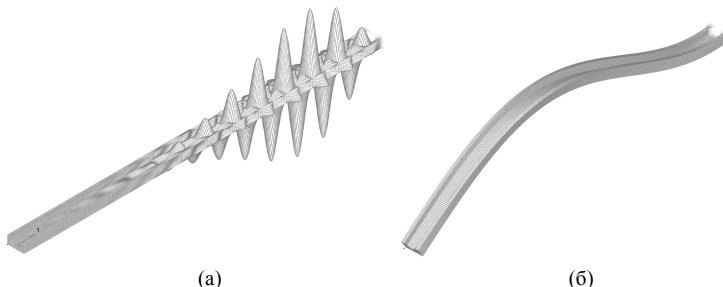


Рис. 2. Перша форма втрати стійкості тонкостінних стержнів 80/40/14/1,1 (а) і 80/40/14/3 (б)

**2. Дослідження стійкості стержнів відкритого профілю без і з урахуванням недосконалостей форми.** Чисельні розрахунки стійкості стержнів відкритого профілю виконано в лінійній і нелінійній постановках за допомогою обчислювальних процедур комплексу NASTRAN відповідно методом Ланцоша та методом Ньютона-Рафсона. Отримано критичні значення навантаження та відповідні форми деформування стержнів з ідеальною поверхнею та урахуванням недосконалостей форми різної амплітуди. Вплив недосконалостей форми оцінено для стержнів з максимальними амплітудами, які приймалися пропорційними до товщини стінки  $t$  стержнів:  $0,25t$ ,  $0,5t$  та  $1t$ . Критичні значення стискаючої сили для всіх стержнів наведено в табл. 3. На рис. 3 представлені форми деформування стержнів при втраті стійкості, отриманих методом Ньютона-Рафсона в нелінійній постановці.

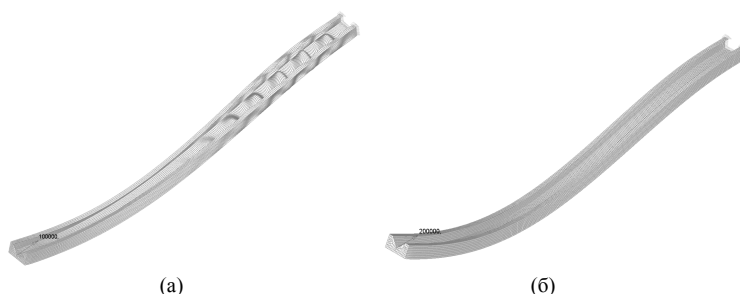


Рис. 3. Форми деформування при втраті стійкості тонкостінних стержнів 80/40/14/1,1 (а) і 80/40/14/3 (б) з геометричними недосконалостями  $1t$

**3. Порівняльний аналіз результатів дослідження стійкості стержнів відкритого профілю з експериментальними, аналітичними та чисельними даними інших авторів.** Результати дослідження стійкості стержнів відкритого профілю з аналогічними геометричними і механічними характеристиками (табл. 1 та табл. 2) отримано в лабораторії будівельного факультету Загребського університету (Хорватія) у 2016 р. [8]. У серії випробувань стійкості стержня був застосований статичний прес. Для передачі зосередженого навантаження використані сталеві пластини, які приварені до торців вертикально встановленого стержня та забезпечували жорстке кріплення у нижньому торці стержня. Навантаження прикладалось ступінчасто в залежності від товщини стінки досліджувальних стержнів: для зразків з товщиною стінки  $t=1,1$  мм приріст складав  $\Delta F=10$  кН, для зразка з товщиною стінки  $t=3,0$  мм –  $\Delta F=30$  кН. Втрата стійкості стержня з поперечним перерізом 80/40/14/1,1 відбулась при навантаженні  $F_{exp}=30$  кН через значну локальну деформацію стінки стержня. Для стержня з перерізом 80/40/14/3 експериментально визначене значення критичної сили склало  $F_{exp}=144,5$  кН, при цьому форма втрати стійкості стержня була подібна до загальної форми втрати стійкості. Результати експериментальних випробувань наведено в табл. 3.

На базі будівельного факультету Брестського державного технічного університету (Білорусь) виконано порівняння результатів дослідження [8] з аналітичними та чисельними розрахунками, які отримано із застосуванням програмного комплексу скінченно-елементного аналізу ABAQUS [7] та розрахунками за формулами (1) та (2) теорії тонкостінних стержнів. Результати розрахунків наведено в табл. 3.

$$F_{cr} = (y_A^2 + z_A^2 - r^2) \cdot F^3 + \left[ (F_y + F_z + F_\omega) \cdot r^2 - z_A^2 \cdot F_y - y_A^2 \cdot F_z \right] \cdot F^2 - r^2 \cdot (F_y \cdot F_z + F_y \cdot F_\omega + F_z \cdot F_\omega) \cdot F + F_y F_z F_\omega r^2 = 0. \quad (1)$$

Тут величини  $F_y, F_z, F_\omega$  визначаються за

$$F_z = \frac{\pi^2 EI_z}{(\mu l)^2}; \quad F_y = \frac{\pi^2 EI_y}{(\mu l)^2}; \quad F_\omega = \frac{1}{r^2} \cdot \left( \frac{\pi^2 EI_\omega}{(\nu l)^2} + GL_t \right). \quad (2)$$

Таблиця 3

## Результати розрахунків та досліджень

Критичне значення стискаючої сили, кН	Максимальна амплітуда недосконалостей	Переріз стержня	
		С 80/40/14/1,1	С 80/40/14/3
Результати експериментального дослідження [8]			
$F_{exp}$	0	30,8	144,3
Результати аналітичних і чисельних досліджень [7]			
$F_{theory}$	0	42,6	145,5
$F_{FEM}$	0	39,38	270,08
Оцінка впливу початкових недосконалостей			
$F_{NL025}$	0,25 t	38,875	135,495
$F_{NL05}$	0,5 t	38,871	135,483
$F_{NL1}$	1,0 t	38,869	135,412

Порівняльний аналіз показав, що критичні значення стискаючих сил, які отримано в даній роботі в розрахунках стійкості стержнів в нелінійній постановці за допомогою обчислювальних процедур програмного комплексу NASTRAN, менші за аналітичні та експериментальні. Критичні сили, які отримано аналітично, більші за чисельні результати всіх дослідників. Виявлено співпадіння чисельних значень критичних сил у випадку стержня відкритого профілю з ідеальною поверхнею товщиною 0,0011 м і неспівпадіння – 0,003 м. Дослідження стійкості стержнів з урахуванням змодельованих недосконалостей форми показало, що збільшення амплітуди недосконалостей мало вплинуло на критичні значення стискаючих сил.

**Висновок.** Результати дослідження свідчить про те, що модель геометричних недосконалостей стержнів у вигляді загальної форми втрати стійкості не є найнебезпечнішою для стійкості стержнів з таким профілем, кріпленням і навантаженням. Тому є необхідність в подальших дослідженнях стійкості стержнів виконати моделювання геометричних недосконалостей, наприклад, у вигляді форм їх деформування в

граничному стані і від дії експлуатаційного навантаження, які отримано в нелінійній постановці.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. –М.: Наука, 1971. – 807с.
2. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. –М.: Физматгиз, 1959, - 574 с.
3. Юрченко В.В., Перельмутер А.В. Несуча здатність стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів. – К.: Каравела, 2020. -310 с.
4. Рахша С.В. Зв'язна втрата стійкості і вагова оптимізація тонкостінних стержнів відкритого профілю: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Дніпропетровськ – 2003.
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. Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. – К.: КПИ, 2011. – 217 с.
7. Надольский, В.В. Анализ потери устойчивости симметричных тонкостенных элементов С-образного сечения / В.В. Надольский, Ф.А. Веревка // Теория и практика исследований, проектирования и САПР в строительстве : сборник статей IV Международной научно-технической конференции, Брест, 27 марта 2020 года / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет, Строительный факультет, ООО "Лира САПР", ООО "ПСС-SOFiSTiK", ООО НПФ "СКАД СОФТ", ОДО НПП "БрестКАД", ЧУП "Брестстройнаука" ; редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест: БрГТУ, 2020. – С. 126–132. – Библиогр.: с. 131–132 (12 назв.).
8. Šimić, D. Critical Force Analysis of Thin-Walled Symmetrical Open-Section Beams, Applied Mechanics and Materials (Volume 827), Trans Tech Publications. – Switzerland, 2016. – P. 283-286
9. 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. – К.: КНУБА, 2008. - Вип.82. – С. 131-136.
10. Охтеня І.О., Гоцуляк Є.О., Лук'яненко О.О. Дослідження сумісного впливу початкових недосконалостей і ексцентриситету на стійкість стержнів відкритого профілю // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2008, - Вип.83. – С. 126-132.
11. Охтеня І.О., Лук'яненко О.О. Деякі аспекти врахування початкових недосконалостей у розрахунках стійкості тонкостінних елементів відкритого профілю // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. Збірн. – К.: КНУБА, 2021 – Вип. 106. – С. 122-128.
12. Лук'яненко О.О., Охтеня І.О. Комп'ютерне моделювання в задачах стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з недосконалами форми. Управління розвитком складних систем. Київ, 2021. № 47. С. 95 – 101.

#### REFERENCES

1. Timoshenko S.P. Ustoychivost stержney, plastin i obolochek (Stability of bars, plates and shells оболочек). – Moscow: Nauka, 1971.
2. Vlasov V.Z. Tonkostennyye uprugie stержzni (Thin-walled elastic bars) // Moscow: Fizmatgiz, 1959 – 568 p.
3. Yurchenko V. V., Perelmuter A.V. Nesucha zdatnist stержnevyykh elementiv konstruktssii iz kholodnohnutykh profiliv. – K.: Karavela, 2020 –310 p.
4. Raksha S.V. Svyznaya poterya ustoychivosti i vesovaya optimizatsiya tonkostennykh stержney otkrytogo profilya (Coherent stability loss and weight optimization of thin-walled bars of an open profile). Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Dnipro – 2003.

5. *Donnel L.H., Wan C.C.* Vliyanie nepravil'nostej v forme na ustojchivost' sterzhnej i tonkostennykh cilindrov pri osevom szhatii (Influence of Shape Irregularities on the Stability of Rods and Thin-Walled Cylinders under Axial Compression) // *Mekhanika*– 1951. – №408, P. 91 – 107.
6. *Rudakov K.N.* FEMAP 10.2.0. Geometricheskoe i konechno-elementnoe modeliro vanie konstruksii (FEMAP10.2.0.Geometrical and FEM of designs). – K.: KPI, 2011.-217 p
7. *Nadolsky, Vitaliy Valerevich; Verevka, F. A.* Analiz potery ustoychivosty symmetrychnykh tonkostennykh elementov S-obraznogo secheniya (Research and engineering in construction using computer aided design: theory and practice) // *Theory and practice of research, design and CAD in construction: collection of articles of the IV International Scientific and Technical Conference.* – Brest: Brest State Technical University, 2020. – P. 126–132.
8. *Šimič, D.* Critical Force Analysis of Thin-Walled Symmetrical Open-Section Beams, Applied Mechanics and Materials (Volume 827), Trans Tech Publications. – Switzerland, 2016. – P. 283-286
9. *Okhten I.O., Gotsulyak E.A., Lukianchenko O.O.* Doslidzhennia stiikosti tonkostinnykh elementiv vidkrytoho profilu z urakhuvanniam pochatkovykh nedoskonalostei (Research of thin-walled elements firmness of an open profile taking into account initial imperfections) // *Strength of Materials and Theory of Structures: The scientific and technical collected articles.* - Issue. 82. – K.: KNUBA, 2008. - P. 131.
10. *Okhten I.O., Gotsulyak E.A., Lukianchenko O.O.* Doslidzhennia spilnogo vplyvu pochatkovykh nedoskonalostei i ekscentrysetetu na stiikist sterzhniv vidkrytoho profilu (Research of compatible influence of initial imperfections and eccentricity on firmness of an open profile cores) // *Strength of Materials and Theory of Structures: The scientific and technical collected articles.* - Issue. 83. – K.: KNUBA, 2009. - P. 126.
11. *Okhten I.O., Lukianchenko O.O.* Deyaki aspekti vrahuvannya pochatkovykh nedoskonalostej u rozrahunkah stiikosti tonkostinnykh elementiv vidkrytoho profilu (Some aspects of consideration of initial imperfections in the calculations of stability of thin-walled elements of open profile) // *Strength of Materials and Theory of Structures: The scientific and technical collected articles.* - Issue. 106. – K.: KNUBA, 2021. - P. 122.
12. *Okhten I.O., Lukianchenko O.O.* Komp'yuterne modelyuvannya v zadachah stiikosti tonkostinnykh sterzhniv vidkrytoho profilu z nedoskonalostyami formi (Computer simulation in the problems of stability of thin-walled rods of an open profile with shape imperfections) // *Management of Development of Complex Systems.* - Issue. 47. – K.: KNUBA, 2021. - P. 95.

*Стаття надійшла 19.05.2022*

*Охтен І.О., Лук'янченко О.О., Козак А.А.*

#### **АНАЛІЗ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ТОНКОСТІННИХ СТЕРЖНІВ ВІДКРИТОГО ПРОФІЛЮ З УРАХУВАННЯМ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ ФОРМИ**

Виконано аналіз впливу геометричних недосконалостей форми на стійкість центрально стиснутих тонкостінних стержнів відкритого профілю з різною товщиною стінки. Для створення комп'ютерних моделей стержнів застосовано програмний комплекс скінченно-елементного аналізу NASTRAN. Полки і стінки стержнів змодельовано у вигляді сукупності чотирьохкутних оболонкових елементів з шістьма ступенями вільності у вузлі. Геометричні недосконалості змодельовано у вигляді першої загальної форми втрати стійкості стержнів з ідеальною поверхнею, які отримано з лінійного розрахунку стійкості, який жорстко закріплений знизу та шарнірно-рухомий зверху. За допомогою спеціально створеної програми формувалась амплітуда недосконалостей форми стержнів пропорційно до товщини стінки. Розрахунки стійкості стержнів відкритого профілю виконано в лінійній постановці методом Ланцоша, в нелінійній – методом Ньютона-Рафсона. Отримано значення критичного навантаження та відповідні форми деформування стержнів з ідеальною поверхнею та урахуванням недосконалостей форми різної амплітуди. Результати дослідження стійкості стержнів відкритого профілю порівняно з експериментальними, які отримано в 2016 році в лабораторії будівельного факультету Загребського університету (Хорватія), і аналітичними та чисельними розрахунками, які отримано із застосуванням програмного комплексу ABAQUS у 2020 році на будівельному факультеті Брестського державного технічного університету (Білорусь). Порівняльний аналіз показав, що критичні значення стискаючих сил, які отримано

в даній роботі в розрахунках стійкості стержнів в нелінійній постановці за допомогою обчислювальних процедур програмного комплексу NASTRAN, менші за аналітичні та експериментальні. Критичні сили, які отримано аналітично, більші за чисельні результати всіх дослідників. Виявлено співпадіння чисельних значень критичних сил у випадку стержня відкритого профілю з ідеальною поверхнею товщиною 0,0011 м і неспівпадіння – 0,003 м. Дослідження стійкості стержнів з урахуванням змодельованих недосконалостей форми показало, що збільшення амплітуди недосконалостей мало вплинуло на критичні значення тискокаючих сил. Це свідчить про те, що модель геометричних недосконалостей стержнів у вигляді загальної форми втрати стійкості не є найнебезпечнішою для стійкості стержнів з таким профілем, кріпленням і навантаженням. Тому є необхідність в подальших дослідженнях стійкості стержнів виконати моделювання геометричних недосконалостей, наприклад, у вигляді форм їх деформування в граничному стані і від дії експлуатаційного навантаження, які отримано в нелінійній постановці.

**Ключові слова:** тонкостінний стержень відкритого профілю, недосконалість форми, статична стійкість, метод скінченних елементів.

*Okhten I.O., Lukianchenko O.O., Kozak A.A.*

#### **ANALYSIS OF THE LOSS OF STABILITY OF OPEN PROFILE THIN-WALLED RODS, INTO ACCOUNT THE IMPERFECTIONS OF THE FORM**

It was made the analysis of influence the geometric imperfections to form on the stability of centrally compressed thin - walled rods of open profile with different wall thickness. The software complex of finite element analysis NASTRAN was used to create computer models of rods. Shelves and walls of rods are modeled as a set of quadrangular shell elements with six degrees of freedom in the node. Geometric imperfections are modeled in the form of the first general form of loss the stability of rods with an ideal surface, which are obtained from the linear calculation of stability which is rigidly fixed at the bottom and articulated at the top. With the help of a specially created program, the amplitude of imperfections in the shape of the rods was proportional to the wall thickness. Calculations of the stability of open-profile rods were performed in a linear formulation by the Lanzosch method, and in a nonlinear formulation by the Newton-Rafson method. Was received the values of the critical load and the corresponding forms of deformation of the rods with an ideal surface and taking into account the imperfections of the shape of different amplitude. The research results of stability of open-profile rods compared to experimental, obtained in 2016 in the laboratory of the Faculty of Civil Engineering, University in Zagreb (Croatia), and analytical and numerical calculations obtained using the ABAQUS software in 2020 at the Faculty of Civil Engineering, Brest State Technical University Faculty (Belarus). Comparative analysis showed that the critical values of compressive forces obtained in this work in the calculations of the stability of the rods in a nonlinear formulation using the computational procedures of the software package NASTRAN, was less than analytical and experimental. The critical forces obtained analytically are bigger than the numerical results of all researchers. The coincidence of numerical values of critical forces was detected in the case of an open profile rod with an ideal surface thickness of 0.0011 m and a mismatch in 0.003 m. The stability of rods research, taking into account the simulated imperfections of the form showed that the increase in the amplitude of imperfections had little effect on the critical values of compressive forces. This indicates that the model of geometric imperfections of the rods in the form of a general form of loss of stability is not the most dangerous for the stability of rods with such a profile, mounting and load. Therefore, there is need in further research of stability of the rods to perform modeling of geometric imperfections, for example, as the forms of their deformation in the ultimate state and from the action of operating load, which are obtained in nonlinear formulation.

**Keywords:** thin-walled bars, geometry imperfection, eccentricity, finite element method.



УДК 539.3

*Охтен І.О., Лук'янченко О.О., Козак А.А. Аналіз втрати стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з урахуванням недосконалостей форми// Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. Збірн. – К: КНУБА, 2022 – Вип. 108. – С. 360-368.*

*Проаналізовано вплив геометричних недосконалостей форми на стійкість центрально стиснутих тонкостінних стержнів відкритого профілю з різною товщиною стінки. Застосовано обчислювальні процедури програмного комплексу скінченно-елементного аналізу NASTRAN. Результати дослідження стійкості стержнів порівняно з експериментальними, аналітичними і чисельними розрахунками інших дослідників.*

Пл. 3. Бібліогр. 12 назв.

UDC 539.3

*Okhten I.O., Lukianchenko O.O., Kozak A.A. Analysis of the loss of stability of open profile thin-walled rods, into account the imperfections of the form // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles. – K.: KNUBA, 2022. – Issue 108. – P. 360-368.*

*It was made the analysis of influence the geometric imperfections to form on the stability of centrally compressed thin - walled rods of open profile with different wall thickness. The software complex of finite element analysis NASTRAN was used to create computer models of rods. The research results of stability of open-profile rods compared to experimental, analytical and numerical calculations of other researchers.*

Fig. 3. Ref. 12.

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** головний інженер проектів ТОВ «Проектна компанія «Футуриста», ОХТЕНЬ Іван Олександрович.

**Адреса робоча:** 01001 Україна, м. Київ, провулок Рильський 10/3 Охтеню Івану Олександровичу.

**Робочий тел.:** +38(067) 785-01-01

**Мобільний тел.:** +38(097) 640-82-82

**E-mail:** iokhten@gmail.com

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0002-2670-8694>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, провідний науковий співробітник НДІ будівельної механіки КНУБА, професор кафедри теоретичної механіки КНУБА, ЛУК'ЯНЧЕНКО Ольга Олексіївна.

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ЛУК'ЯНЧЕНКО Ользі Олексіївні.

**Робочий тел.:** +38(044) 241-54-20

**Мобільний тел.:** +38(095) 727-18-25

**E-mail:** [lukianchenko\\_oo@knuba.edu.ua](mailto:lukianchenko_oo@knuba.edu.ua), [lukianch0907@meta.ua](mailto:lukianch0907@meta.ua)

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0003-1794-6030>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки КНУБА КОЗАК Андрій Анатолійович

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури.

**Робочий тел.:** +38(044) 248-3237

**мобільний тел.:** +38(066) 1997036

**E-mail:** [kozak\\_aa@knuba.edu.ua](mailto:kozak_aa@knuba.edu.ua)

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-3192-1430>