

**Лук'янченко Ольга Олексіївна**Доктор технічних наук, старший науковий співробітник, [orcid.org/0000-0003-1794-6030](https://orcid.org/0000-0003-1794-6030)

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Охтень Іван Олександрович**Здобувач наукового ступеня кандидата технічних наук, [orcid.org/0000-0002-2670-8694](https://orcid.org/0000-0002-2670-8694)

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ СТІЙКОСТІ ТОНКОСТІННИХ СТЕРЖНІВ ВІДКРИТОГО ПРОФІЛЮ З НЕДОСКОНАЛОСТЯМИ ФОРМИ**

**Анотація.** Представлена чисельна методика, яка базується на методі скінченних елементів (MCE) та обчислювальних процедурах програмного комплексу NASTRAN. Вона допомагає дослідити вплив геометричних недосконалостей форми тонкостінних стержнів відкритого профілю на критичні значення навантаження, форми втрати стійкості та напружено-деформований стан. Розроблено алгоритм комп'ютерного моделювання початкових недосконалостей форми тонкостінних стержнів, який реалізовано в програмному комплексі NASTRAN із застосуванням нейтрального файлу ПК NASTRAN та спеціально розробленої авторами програми, яка написана на мові FORTRAN і адаптована до цього програмного комплексу. Геометричні недосконалості стержнів можуть бути подані у вигляді їх форми втрати стійкості, або форми деформування від дії навантаження з можливістю варіювання максимального значення амплітуди недосконалостей. Для моделювання недосконалостей можуть бути використані обчислювальні процедури розв'язання задачі стійкості методом Ланцоша та геометрично нелінійної задачі статичної методом Ньютона – Рафсона. Розроблена авторами програма дає змогу формувати нові вузлові координати скінченно-елементної моделі стержнів та візуалізувати геометричні недосконалості в заданому масштабі. У статті наведено покроковий опис побудови скінченно-елементних моделей тонкостінного стержня відкритого профілю з ідеальною поверхнею та з урахуванням недосконалості форми, яка подана у вигляді першої форми втрати стійкості стержня від дії поздовжнього навантаження, прикладеного з ексцентриситетом. За допомогою препроцесора FEMAP NASTRAN формується геометрія середньої поверхні ідеального стержня, задаються механічні характеристики матеріалу, граничні умови і навантаження. Середина поверхня стержня подається у вигляді сукупності плоских чотирикутних скінченних елементів із шістьма степенями вільності у вузлі. Для отримання форми геометричної недосконалості стержня виконано лінійний розрахунок стійкості методом Ланцоша. Задавання максимальної амплітуди недосконалостей виконано з використанням розробленої авторами програми. За допомогою методу Ньютона – Рафсона розв'язана геометрично нелінійна задача статичної стійкості стержня із заданою недосконалістю форми, визначено критичне значення поздовжнього навантаження та отримана відповідна форма втрати стійкості стержня. Представлена чисельна методика та розроблений алгоритм комп'ютерного моделювання недосконалостей форми дає змогу дослідити в нелінійній постановці стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю з урахуванням геометричних недосконалостей різної амплітуди у вигляді різних форм деформування стержня, в тому числі форми втрати стійкості, оцінити вплив недосконалостей на критичне значення навантаження, форму втрати стійкості та напружено-деформований стан. Наведений алгоритм і чисельна методика можуть бути застосовані для досліджень стійкості таких тонкостінних елементів конструкцій, як оболонки, пластини та інші.

**Ключові слова:** тонкостінний стержень відкритого профілю; початкові недосконалості; метод скінченних елементів; стійкість; критичне навантаження; форма втрати стійкості

**Вступ**

Тонкостінні стержні відкритого профілю набули широкого застосування в будівництві завдяки простоті їх виготовлення, транспортування та

монтажу. З даних профілів виготовляють широкий спектр будівельних конструкцій: несучі і фахверкові колони, одно- і двоскатні ферми, балки покриття, стінові і покрівельні прогони. Конструкції з тонкостінних холодногнутих профілів мають низку

переваг і є досить ефективними для будівель громадського призначення, виробничих, складських та сільськогосподарських споруд. Однак існує нагальна потреба удосконалювати наявні і створювати нові методи розрахунку таких конструкцій.

Глибокий огляд відомих досліджень і сучасних методик визначення несучої здатності стержневих елементів з холодногнутих профілів наведено в книзі В. В. Юрченко і А. В. Перельмутера [1]. Основи теорії розрахунку тонкостінних елементів заклали ще на початку ХХ століття С. П. Тимошенко [2], коли опублікував результати власних досліджень на кручення двотаврової балки. Ним було виявлено ефект появи нормальних напружень у поперечних перерізах стержня, що зазнає кручення. Водночас важливим досягненням були експериментальні дослідження Баха, який відкрив центр згину металевої балки швелерного перерізу при дії поперечного навантаження та виявив у балці, крім деформацій згину, деформації кручення. Значний вклад в розвиток теорії розрахунку тонкостінних відкритих профілів при дії згинальних та крутильних навантажень зробив В. З. Власов. Його теорія була розвинута та доповнена в роботах О. А. Ільюшина, В. В. Болотіна, Ф. Блейхома, Н. С. Стрелецького, А. С. Вольміра [3] та інших дослідників [1].

В експериментальних і теоретичних роботах Т. Кармана, Дж.Б. Дуата, М. Л. Шарпа, Хенкока, Лау, Дж. Вінтера, П. Байларда, В. І. Слівкера [4], Ю. Ченга, Б. Шафера [5] та інших виявлена характерна особливість стержнів відкритого профілю, а саме: піддатливість до деформацій, що викликані малою товщиною та великою гнучкістю складових пластин. Сучасні чисельні методи розрахунку тонкостінних стержнів відкритого профілю та методи з оптимізації форми їх поперечного перерізу дають змогу запроєктувати ефективні поперечні перерізи та досягти добрих вагових характеристик, але залишається відкритим питання щодо їх удосконалення [1].

Оскільки вичерпання несучої здатності тонкостінних конструкцій при різних видах навантажень проходить, як правило, внаслідок втрати стійкості (рис. 1, а), особлива увага приділяється проблемі визначення критичних навантажень. Доведено, що наявність малих недосконалостей форми реальних стержнів може значно знизити значення критичного навантаження, тому виникає нагальна необхідність їх врахування в дослідженнях стійкості таких конструкцій. Основи розрахунку стійкості тонкостінних стержнів з урахуванням початкових недосконалостей закладені в роботах [6; 7]. Застосування чисельних методів дає змогу врахувати наведені вище особливості поведінки тонкостінних стержнів відкритого

профілю в дослідженнях їх несучої здатності та стійкості. Широке застосування набув метод скінченних елементів (МСЕ), який реалізовано в багатьох сучасних обчислювальних комплексах, таких як SCAD, ЛИРА, NASTRAN [1; 10; 11].

На сьогодні сучасні комп'ютерні комплекси допомагають будувати розрахункові моделі стержнів як з реальними, так і змодельованими недосконалостями форми. Реальні геометричні недосконалості можуть бути виміряні і враховані в розрахунках несучої здатності конкретно для кожного стержня безпосередньо як геометричні параметри. Але такий підхід потребує багато часу і матеріальних затрат. За наявності достатньої кількості даних про геометричні недосконалості стержнів одного профілю їх можна врахувати в розрахунках лише в разі узагальнення та обґрунтування як статистичних характеристик. Наразі така база даних для тонкостінних стержнів відкритого профілю відсутня. Тому альтернативним підходом є комп'ютерне моделювання геометричних недосконалостей таких стержнів у вигляді різних форм втрати стійкості з оцінкою ефективності їх урахування в розрахунках стійкості.

## **Мета статті**

Мета – чисельна реалізація методу скінченних елементів у дослідженнях нелінійного деформування та стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з геометричними недосконалостями; представлення алгоритму комп'ютерного моделювання початкових недосконалостей форми різної амплітуди із застосуванням програмного комплексу NASTRAN.

## **Виклад основного матеріалу**

Згідно з розробленим чисельним підходом задача нелінійного деформування та стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю формулюється у геометрично нелінійній постановці в переміщеннях на основі підходу Лагранжа. Система рівнянь рівноваги тонкостінного стержня подається в скінченно-елементній постановці з використанням умов рівноваги всіх вузлів розрахункової моделі, яка будується в програмному комплексі NASTRAN [10]. Середина поверхня стержня апроксимується сукупністю чотирикутних оболонкових елементів з шістьма степенями вільності у вузлі. Геометричні недосконалості стержня можуть бути змодельовані у вигляді різних форм втрати стійкості (місцевої, загальної і т. п.) з варіюванням амплітуди від дії статичного навантаження. Тут форми втрати стійкості отримані при розв'язанні задачі стійкості стержня з ідеальною поверхнею в лінійній постановці. Задача стійкості такого стержня формулюється як задача на власні

значення і розв'язується методом Ланцоша. Скінченно-елементна модель тонкостінного стержня з геометричними недоскональностями будується за допомогою розробленого авторами алгоритму та спеціально створених програм, які адаптовані під комплекс NASTRAN. Задача стійкості тонкостінного стержня з недоскональностями форми формулюється як крайова геометрично нелінійна задача статичної і розв'язується методом Ньютона – Рафсона. У граничних точках рівноваги, в яких відбувається втрата стійкості недосконалого стержня, досліджується форма деформування стержня та визначається критичне (граничне) значення навантаження.

Прикладами реалізації чисельного підходу є результати дослідження стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю зі змодельованими недоскональностями форми при дії поздовжніх сил із урахуванням ексцентриситету їх прикладання, які виконано авторами і наведено в статтях [8; 9]. Результати чисельного розрахунку підтверджені експериментально за допомогою преси типу Р-100 у випробувальному центрі будівельних конструкцій при кафедрі металевих та дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури (рис. 1, б).

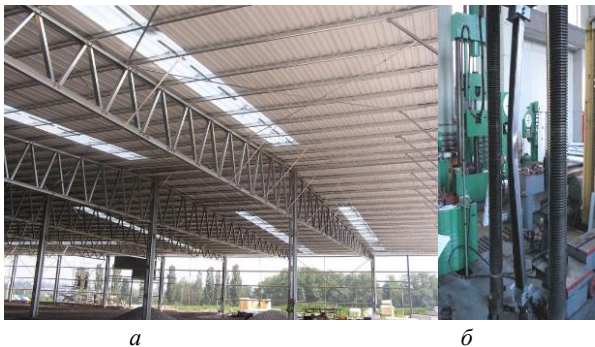


Рисунок 1 – Конструкція покрівлі з тонкостінних стержнів відкритого профілю (а); випробування стержнів на стійкість за допомогою преси (б)

У пропонованій статті представлено алгоритм комп'ютерного моделювання початкової геометричної недоскональності тонкостінного стержня відкритого профілю у вигляді форми втрати стійкості, який містить три етапи:

1. Створення скінченно-елементної моделі тонкостінного стержня з ідеальною поверхнею:

- створення геометрії стержня у вигляді серединної поверхні;
- призначення матеріалу з відповідними механічними характеристиками;
- задавання типу та параметрів скінченних елементів;
- розбиття серединної поверхні стержня на скінченні елементи;

- задавання граничних умов;
- задавання навантажень.

2. Розв'язання задачі стійкості стержня з ідеальною поверхнею в лінійній постановці методом Ланцоша для отримання форми втрати стійкості, яка береться за модель геометричної недоскональності стержня.

3. Комп'ютерне моделювання геометрії тонкостінного стержня з недосконалістю форми, значення максимальної амплітуди якої задається відносно до товщини стінки стержня.

Розглянемо алгоритм комп'ютерного моделювання початкової геометричної недоскональності тонкостінного стержня відкритого профілю покроково.

**Етап 1.** Створення скінченно-елементної моделі тонкостінного стержня з ідеальною поверхнею починаємо з геометрії його поперечного перерізу. Для цього за допомогою команди **Geometry – Point** задаємо кутові точки поперечного перерізу (рис. 2).

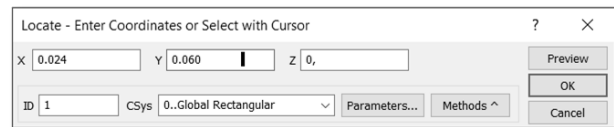


Рисунок 2 – Діалогове вікно задавання кутових точок поперечного перерізу стержня

У відкритому діалоговому вікні послідовно вводимо координати кутових точок в декартовій системі координат:

- Точка 1 X: 0.024, Y: 0.060, Z: 0.0, ОК,
- Точка 2 X: 0.000, Y: 0.060, Z: 0.0, ОК,
- Точка 3 X: 0.000, Y: 0.000, Z: 0.0, ОК,
- Точка 4 X: 0.200, Y: 0.000, Z: 0.0, ОК,
- Точка 5 X: 0.200, Y: 0.060, Z: 0.0, ОК
- Точка 6 X: 0.176, Y: 0.060, Z: 0.0, ОК.

За допомогою команди **Geometry – Curve - Line – Points** з'єднаємо задані точки п'ятьма лініями і отримаємо геометрію поперечного перерізу стержня у вигляді, поданому на рис. 3.

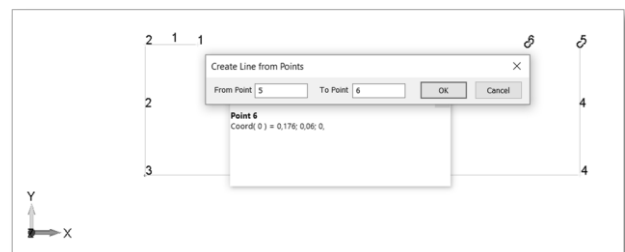


Рисунок 3 – Геометрія поперечного перерізу стержня

Для створення серединної поверхні стержня застосовуємо команду **Geometry – Surface – Extrude, Select All, Ok**. В діалоговому вікні (рис. 4) задаємо довжину стержня: **Base X: 0; Y: 0; Z: 0; Tip X: 0; Y: 0; Z: -2.0, Ok, Cancel**.

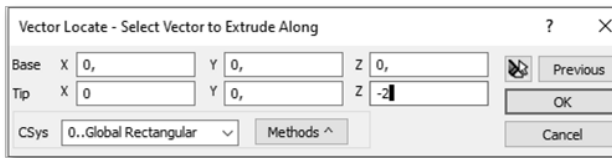


Рисунок 4 – Діалогове вікно створення серединної поверхні стержня

На рис. 5 представлена геометрія тонкостінного стержня відкритого профілю з ідеальною поверхнею.

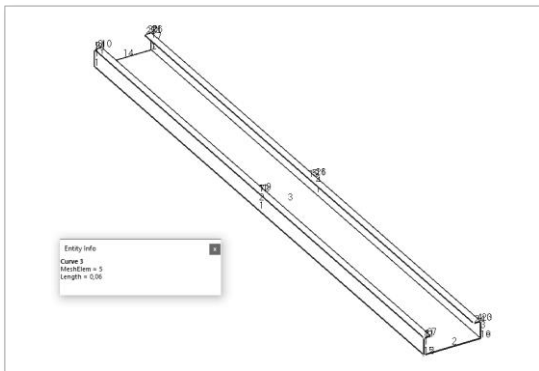


Рисунок 5 – Геометрія тонкостінного стержня відкритого профілю з ідеальною поверхнею

Далі, за допомогою команди **Model – Material** та діалогового вікна (рис. 6), задаємо механічні характеристики матеріалу, які відповідають сталі С245 по ДСТУ 8539:2015.

Для апроксимації серединної поверхні стержня у вигляді сукупності скінченних елементів задаємо тип елемента – “plate”, це плоский чотирикутний елемент з шістьма степенями вільності у вузлі. Властивості елемента задаємо за допомогою команди **Model – Property**. У відкритому діалоговому вікні (рис. 7) вводимо такі параметри: **Title**: «лист», **Thickness**: 0.002, **Ok**, у рядку **Material** оберемо задану раніше сталь 245, **Ok**, **Ok**, **Cancel**.

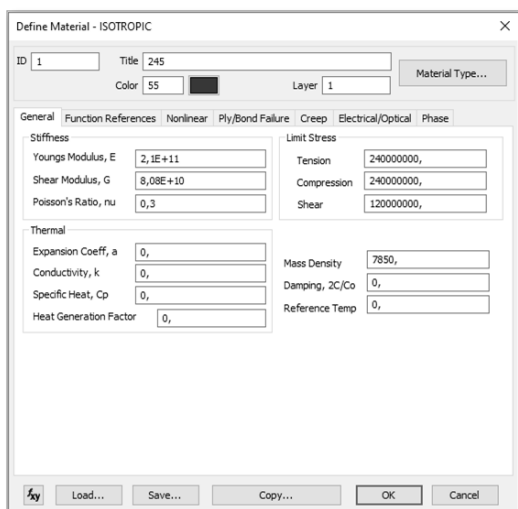


Рисунок 6 – Діалогове вікно задавання характеристик матеріалу

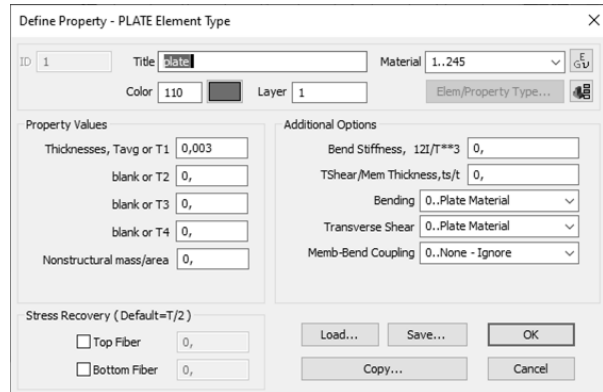


Рисунок 7 – Діалогове вікно задавання властивостей скінченного елемента типу “plate”

Розбиття поверхні на скінченні елементи виконуємо командою **Mesh – Geometry – Surface** з відповідними параметрами, що зображені на рис. 8.

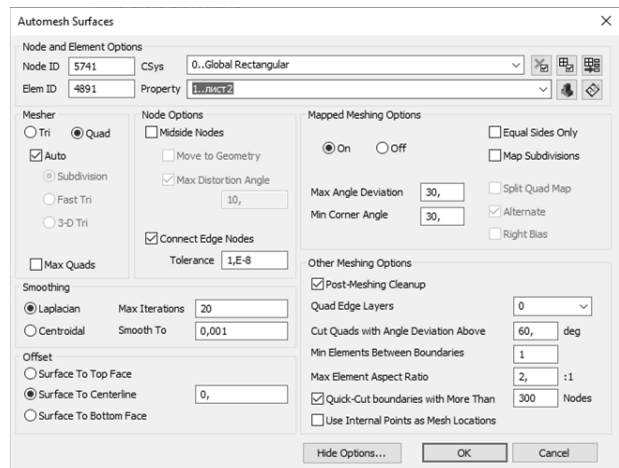


Рисунок 8 – Діалогове вікно створення скінченно-елементної сітки на серединній поверхні стержня

Для задавання граничних умов обираємо вузли моделі та задаємо вид кріплення за допомогою команди **Model – Constraint – Nodal**. На одному кінці стержня задаємо шарнірно-рухоме кріплення:  $T_x$ : так,  $T_y$ : так,  $T_z$ : ні,  $R_x$ : ні,  $R_y$ : так,  $R_z$ : так, а на протилежному – шарнірно-нерухоме:  $T_x$ : так,  $T_y$ : так,  $T_z$ : так,  $R_x$ : ні,  $R_y$ : так,  $R_z$ : так.

Навантаження прикладаємо у вузлах моделі, де задані шарнірно-рухомі опори у вигляді одиничної поздовжньої сили з модулем 1 Н. Застосовуємо команду **Model – Load – Nodal**, обираємо два вузли та вводимо:  $F_x=0$ ,  $F_y=0$ ,  $F_z=-1$ .

Після виконання вищенаведених операцій сформована скінченно-елементна модель тонкостінного стержня відкритого профілю з ідеальною поверхнею.

**Етап 2.** Для моделювання геометричної недосконалості стержня у вигляді біфуркаційної форми втрати стійкості виконуємо розрахунок на стійкість ідеального стержня в лінійній постановці (Buckling) методом Ланцоша.

У діалоговому вікні **Model – Analysis**, створюємо тип розрахунку «b1» з такими параметрами: **Type – Buckling, Analysis Type – Simcenter Nastran, Solve Using – Integrate solver**. Після команди **Next** входимо у діалогове вікно **NASTRAN Output Requests** і задаємо для параметра **Number Desired** значення, яке відповідає кількості форм та критичних сил, які необхідно отримати. Запускаємо задачу на розрахунок командою **Analyze**.

Після закінчення розрахунку, за допомогою панелі **Post**, можемо переглянути та проаналізувати результати розрахунку стержня на стійкість: критичні значення навантаження та форми втрати стійкості. Як приклад, на рис. 9 представлена перша форма втрати стійкості стержня з ідеальною поверхнею від дії поздовжньої сили  $P_{кр} = 95,387$  кН. Ця форма є загальною формою втрати стійкості стержня і нами взята за форму його геометричної недосконалості.

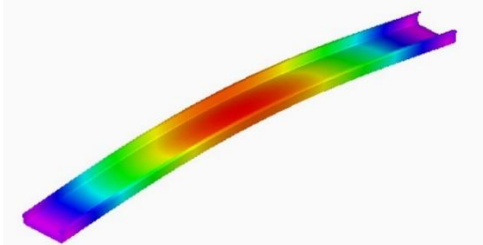


Рисунок 9 – Перша біфуркаційна форма втрати стійкості стержня з ідеальною поверхнею від дії поздовжнього навантаження

**Етап 3.** За допомогою нейтрального файлу FEMAP NASTRAN та спеціально розробленої авторами програми, яка написана на мові ФОРТРАН90 і зберігається в Microsoft Developer Studio, формуємо скінченно-елементну модель стержня з геометричними недосконалостями із заданою амплітудою.

Для подальшого розрахунку залишаємо першу форму втрати стійкості. Для цього через команду **Delete – Output – Set...** видаляємо всі результати розрахунку, окрім результату розрахунку стійкості з номером 1. Виконуємо експорт моделі у нейтральний файл: **File – Export – Femap Neutral**.

Переходимо у Microsoft Developer Studio (рис. 10) і створюємо проєкт: **File – New** з назвою “20060” та завантажуюмо всі файли програми у проєкт.

У головній програмі **main.for** задаємо такі параметри: кількість вузлів моделі, кількість рядків нейтрального файлу (цю інформацію можна дізнатися, відкривши нейтральний файл у текстовому редакторі), ім'я вихідного нейтрального файлу та параметр, який задає максимальну амплітуду недосконалостей  $\delta$  відносно до товщини стінки стержня  $t$ .

Виконуємо компіляцію **Build – Complete Main.for** та запускаємо програму **Build – Build 20060.exe**. Результатом роботи програми є створений

нейтральний файл 403n, який містить нові координати вузлів стержня з геометричними недосконалостями із заданою максимальною амплітудою. Далі, використовуючи текстовий редактор, виконуємо заміну блоку 403 у нейтральному файлі на блок 403n. Після цього модифікований файл імпортуємо в середовище FEMAP NASTRAN як вхідну скінченно-елементну модель тонкостінного стержня відкритого профілю із заданою недоскоалістю форми і максимальною амплітудою.

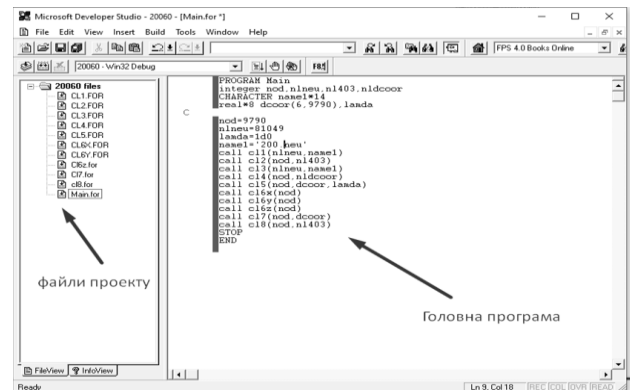


Рисунок 10 – Інтерфейс Microsoft Developer Studio

Для дослідження стійкості тонкостінного стержня з геометричними недосконалостями згідно представленої чисельної методики застосовуємо обчислювальну процедуру комплексу NASTRAN – розв'язання геометричної нелінійної задачі статички (Nonlinear Static). У діалоговому вікні **Model – Analysis** створюємо новий тип розрахунку «b2» з такими параметрами: **Type – Nonlinear Static, Analysis Type – Simcenter Nastran, Solve Using – Integrate solver**. Задаємо методом Ньютона – Рафсона. В результаті цієї процедури ми можемо побудувати залежність відгуку стержня (переміщення вузлів, напруження в елементах і т.п.) від покрової дії навантаження, дослідити докритичний, критичний (граничний) та закритичний стан стержня, визначити критичне (граничне) значення навантаження. Для цього застосовуємо панель **Post**. Як приклад, на рис. 11 зображена форма втрати стійкості тонкостінного стержня відкритого профілю із заданою максимальною амплітудою недоскоалістю форми  $\delta=t$ , яка отримана в результаті розв'язання геометрично нелінійної задачі статички методом Ньютона – Рафсона.

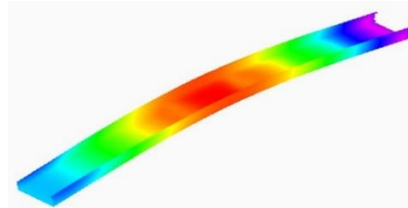


Рисунок 11 – Форма втрати стійкості стержня з недоскоалістю форми ( $\delta/t = 1$ ) від дії поздовжнього навантаження

На рис. 12 представлена залежність прогину стержня ( $w$ ) від поздовжнього навантаження, яке задається через параметр навантаження  $\beta$ . Бачимо, що втрата стійкості стержня відбулась від дії поздовжньої сили, значення якої дорівнює  $P_{кр} = 95,387 \cdot 0,822 = 78,396$  кН.

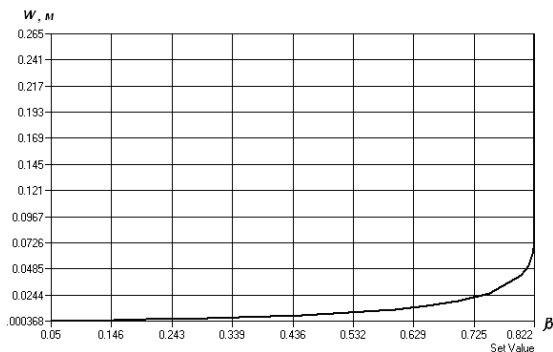


Рисунок 12 – Крива поздовжнього навантаження стержня з недосконалістю форми ( $\delta/t = 1$ )

## Висновок

Представлена чисельна методика, яка базується на методі скінченних елементів та обчислювальних процедурах програмного комплексу NASTRAN, дає змогу дослідити вплив геометричних недосконалостей форми тонкостінних стержнів відкритого профілю на критичні значення навантаження, форми втрати стійкості та їхній напружено-деформований стан. Розроблений алгоритм комп'ютерного моделювання геометричних недосконалостей стержнів дає змогу подавати їх у вигляді різних форм втрати стійкості або форм деформування із заданням максимальної амплітуди недосконалостей та використовувати для формування розрахункових скінченно-елементних моделей стержнів при дослідженні їх стійкості в лінійній та нелінійній постановках.

## Список літератури

1. Юрченко В. В., Перельмутер А. В. Несуча здатність стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів Київ: Каравела, 2020. 310 с.
2. Тимошенко С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. Москва: Наука, 1971. 807 с.
3. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. Москва: Наука, 1967. 984 с.
4. Slivker V. I. Mechanics of structural elements. Theory and applications. Berlin-Heidelberg-New York-Hong Kong-London-Milan-Paris-Tokyo: Springer Verlag, 2007. 786 p.
5. Cheng Yu., Schafer B. W. Local buckling tests on cold-formed steel beams // Journal of Structural Engineering. 2003. Vol. 129. Issue 12. P. 1596 – 1606.
6. Ракша С. В. Зв'язна втрата стійкості і вагова оптимізація тонкостінних стержнів відкритого профілю: автореф. ... до-ра техн. наук. Дніпропетровськ. 2003.
7. 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.
8. Охтен І. О., Гоцуляк Є. О., Лук'янченко О. О. Дослідження стійкості тонкостінних елементів відкритого профілю з урахуванням початкових недосконалостей. *Опір матеріалів і теорія споруд*: наук.-техн. зб. Вип. 82. Київ: КНУБА, 2008.
9. Охтен І. О., Гоцуляк Є. О., Лук'янченко О. О. Дослідження спільного впливу початкових недосконалостей і ексцентриситету на стійкість стержнів відкритого профілю. *Опір матеріалів і теорія споруд*: наук.-техн. зб. Вип. 82. Київ: КНУБА, 2009.
10. Рудаков К. Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. Київ: КПИ, 2011. 217 с.
11. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with Nastran. Москва: ДМК Пресс, 2013. 784 с.

Стаття надійшла до редколегії 18.09.2021

### Lukianchenko Olga

DSc(Eng.), Senior Research Officer, [orcid.org/0000-0003-1794-6030](https://orcid.org/0000-0003-1794-6030)  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

### Okhten Ivan

Applicant of the Department of Building Mechanics, [orcid.org/0000-0002-2670-8694](https://orcid.org/0000-0002-2670-8694)  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

## COMPUTER SIMULATION IN THE PROBLEMS OF STABILITY OF THIN-WALLED RODS OF AN OPEN PROFILE WITH SHAPE IMPERFECTIONS

**Abstract.** The presented numerical methodology is based on the finite element method (FEM) and computational procedures of the NASTRAN software package. It allows to investigate the influence of geometric imperfections in the shape of thin-walled rods of open profile on the critical values of the load, the shape of the stability loss and the stress-strain state. It has been developed



an algorithm for computer modeling of initial imperfections in the shape of thin-walled rods, which is implemented in the NASTRAN software package using a neutral NASTRAN PC file and a specially developed program written in FORTRAN language and adapted to this software package. Geometric imperfections of the rods can be represented as their form of loss of stability or the form of deformation from the action of the load with the possibility of varying the maximum value of the imperfections amplitude. Computational procedures for solving the Lanczos stability problem and the geometrically nonlinear static problem by the Newton-Rafson method can be used to model imperfections. The program developed by the authors allows to form new nodal coordinates of a finite-element model of rods and to visualize geometric imperfections in a given scale. The article provides a step-by-step description of finite-element construction models of thin-walled rod of open profile with an ideal surface and taking into account the imperfection of the form, which is presented as the first form of loss of rod stability from longitudinal load applied with eccentricity. With the help of the FEMAP NASTRAN preprocessor is forming the geometry of the middle surface of an ideal rod, and setting the mechanical characteristics of the material, boundary conditions and load. The middle surface of the rod is fed as a set of flat quadrangular finite elements with six degrees of freedom in the node. In the article, a linear calculation of the stability by the Lanczos method is performed to obtain the form of rod geometric imperfection. Setting the maximum amplitude of imperfections was performed using the program developed by the authors. Using the Newton-Rafson method, the geometrically nonlinear problem of rod statics with a given shape imperfection is solved, the critical value of the longitudinal load is determined, and the corresponding form of the rod stability loss is obtained. The presented numerical technique and the developed algorithm of computer modeling of shape imperfections allow to investigate in nonlinear formulation the stability of open profile thin-walled rods taking into account geometric imperfections of different amplitude as different forms of rod deformation, including the form of stability loss, to assess the impact of imperfections on the critical value of the load, the form of stability loss and stress-strain state. The presented algorithm and numerical technique can be used to study the stability of such thin-walled structural elements as shells, plates and others.

**Keywords:** open profile thin-walled rods; initial imperfections; finite element method; buckling; critical load; form of loss of stability

#### References

1. Yurchenko, V., Perelmuter, A. (2020). Load-bearing capacity of rod elements of structures from cold-bent profiles. Kyiv: Caravela. 310.
2. Tymoshenko, S. (1971). Stability of rods, plates and shells. Moscow: Nauka. 807.
3. Volmir, A. (1967). Stability of deformable systems. Moscow: Nauka. 984.
4. Slivker, V. I. (2007). Mechanics of structural elements. Theory and applications. Berlin-Heidelberg-New York-Hong Kong-London-Milan-Paris-Tokyo: Springer Verlag, 786.
5. Yu, Cheng, Schafer, B. W. (2003). Local buckling tests on cold-formed steel beams. *Journal of Structural Engineering*. 129, 12, 1596–1606.
6. Raksha, S. (2003). Coherent loss of stability and weight optimization of thin-walled rods on open profile. DSc thesis. Dnipropetrovsk.
7. Donnell, L., Van, K. (1951). Influence of irregularities in the shape on the stability of rods and thin-walled cylinders under axial compression. *Mechanics. Sat. trans. and obz. foreign period. lit-ry*, 408, 91–107.
8. Okhten, I., Gotsulyak, E., Lukianchenko, O. (2008). 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*, 82, 131.
9. Okhten, I., Gotsulyak, E., Lukianchenko, O. (2009). Research of compatible influence of initial imperfections and eccentricity on firmness of an open profile core. *Strength of Materials and Theory of Structures: The scientific and technical collected articles*, 83, 126.
10. Rudakov, K. (2011). FEMAP 10.2.0. Geometric and finite-element modeling of constructions. Kyiv : KPI, 217.
11. Rychkov, S. (2013). Modeling of structures in Femap with Nastran environment. M. DMK Press, 784.

#### Посилання на публікацію

- APA Lukianchenko, Olga & Okhten, Ivan, (2021). Computer simulation in the problems of stability of thin-walled rods of an open profile with shape imperfections. *Management of Development of Complex Systems*, 47, 95–101, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2021.47.95-101.
- ДСТУ Лук'яненко О. О., Охтен І. О. Комп'ютерне моделювання в задачах стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з недосконаlostями форми. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2021. № 47. С. 95 – 101, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2021.47.95-101.