

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Охтеня Іван Олександрович

УДК 539.3

**СТІЙКІСТЬ ТОНКОСТІННИХ СТЕРЖНІВ ВІДКРИТОГО
ПРОФІЛЮ З НЕДОСКОНАЛОСТЯМИ ФОРМИ**

05.23.17 – будівельна механіка

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2023

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі будівельної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Лук'янченко Ольга Олексіївна,
Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, провідний науковий співробітник Науково-дослідного інституту будівельної механіки.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Волкова Вікторія Євгенівна,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет Міністерства освіти і науки України, завідувачка кафедри цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля;

кандидат технічних наук, доцент
Шлюнь Наталія Володимирівна,
Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, виконуюча обов'язки завідувача кафедри вищої математики.

Захист відбудеться «9» лютого 2024 р. о 13⁰⁰ годині в ауд. 204 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.04 у Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий «27» грудня 2023 р.

Виконуючий обов'язки вченого секретаря спеціалізованої вченої ради Д 26.056.04
доктор технічних наук, професор



I. I. Солодей

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В практиці сучасного будівництва у якості несучих елементів металоконструкцій широке застосування знайшли тонкостінні стержні. Вони поєднують у собі економічно ефективні вагові характеристики, високі технологічні якості і мають переваги при виготовленні, монтажі та експлуатації. З тонкостінних стержнів виготовляють широкий спектр будівельних конструкцій: несучі і фахверкові колони, одно- і двоскатні ферми, балки покриття, стінові і покрівельні прогони, рамні конструкції та інше. Одним з різновидів тонкостінних стержнів є холодногнуті стержні відкритого профілю.

Значний внесок у становлення теорії і методів розрахунку тонкостінних стержнів відкритого профілю зробили G. Winter, С.П. Тимошенко, В.З. Власов, Т. Von Karman, Yu Wei-wen, Ф. Блейх, А.А. Уманський, В.В. Болотін, О.А. Іллюшин, Б.Г. Гальоркін, А.С. Вольмір, В.Ю. Аскіназі, Т.В. Назмєєв, А.Р. Туснін, D. Dubina, Д.О. Советніков, А.В. Перельмутер, В.І. Слівкер, С.В. Ракша, В.Є. Волкова, В.В. Юрченко, А.О. Мартиненко та інші.

Комп'ютерне моделювання будівельних конструкцій з використанням методів механіки деформівного твердого тіла, математичної фізики і будівельної механіки дозволило зробити перехід від вузькоорієнтованих аналітичних підходів до чисельних методів розв'язання задач деформування та стійкості складних тонкостінних стержневих конструкцій в нелінійній постановці. Широке застосування в сучасних програмних комплексах, таких як SCAD, LIRA, ANSYS, NASTRAN, PANDA2 та інших, набув метод скінченних елементів. На теперішній час для моделювання тонкостінних стержнів відкритого профілю використовують бістержневу модель А.В. Перельмутера і В.І. Слівкера, оболонкові скінченні елементи та плоскі скінченні елементи з додатково введеним зв'язком.

Геометричні недосконалості тонкостінних стержнів, які виникають при виготовленні, транспортуванні та експлуатації, значно знижують їх несучу здатність. Основи розрахунку стійкості тонкостінних стержнів з урахуванням початкових недосконалостей закладено в роботах L. Donnell, C.C. Wan, J. Arbocz, C.D. Babcock. Дослідженню напружено-деформованого стану та стійкості тонкостінних стержнів з геометричними недосконалостями присвячені роботи S.Y. Lu, W. Nash, L.H.N. Lee, J.W. Hutchinson, G. Simitses, Г.Д. Гавриленка, N. Tsouvalis, М.Д. Корчака, В.А. Баженова, Є.О. Гоцуляка, В.І. Слівкера, D. Dubina, Ю.М. Муляра, О.О. Лук'янченко та інших. Однак, на теперішній час не існує глибокого аналізу впливу різних видів геометричних недосконалостей та їх амплітуди, як максимального відхилення від проектного стану, на форми втрати стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю та відповідні критичні значення навантаження.

Актуальність теми обумовлена необхідністю забезпечити міцність і стійкість складних стержневих конструкцій з холодногнутих профілів та обґрунтувати нормативні граничні відхилення, що наведені в державних нормативних документах: ДСТУ 8806:2018, ДСТУ 8808:2018 та ДСТУ 9233:2023.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності до загального плану наукових досліджень кафедри

будівельної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА) та Науково-дослідного інституту будівельної механіки (НДІБМ КНУБА). Дослідження проведені в межах науково-дослідних робіт, що виконувались за напрямком 05 – «Нові комп'ютерні засоби та технології інформатизації суспільства» за дорученням Міністерства освіти і науки України:

ЗДБ-2008 «Теоретичні основи та методики дослідження стійкості та руйнування просторових тонкостінних конструкцій пружних систем» (2008-2010 рр. № держ. реєстрації 0108U000230);

4ДБ-2022 «Створення теорії і методів дослідження вібраційних процесів у складних деформівних системах при експлуатаційних навантаженнях періодичного, стохастичного та ударного характеру» (№ держ. реєстрації 0122U001336).

Автор брав участь у виконанні перелічених науково-дослідних робіт як співвиконавець (додаток А).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є створення чисельної методики для розв'язання проблеми стійкості тонкостінних пружних стержнів відкритого профілю з недосконаlostями форми при дії статичних навантажень методами обчислювальної механіки та обґрунтування граничних відхилень затверджених державними нормативними документами: ДСТУ 8806:2018, ДСТУ 8808:2018 та ДСТУ 9233:2023.

Мета роботи досягається вирішенням наступних завдань:

- розробка нової чисельної методики дослідження нелінійного деформування і стійкості тонкостінних пружних стержнів відкритого профілю з недосконаlostями форми при дії статичних навантажень;
- розробка ефективного алгоритму комп'ютерного скінченно-елементного моделювання тонкостінних стержнів відкритого профілю у вигляді сукупності плоских оболонкових елементів зі змодельованими недосконаlostями форми;
- дослідження стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з ідеальною поверхнею в лінійній постановці з метою моделювання геометричних недосконаlostей у вигляді біфуркаційних форм втрати стійкості різної амплітуди;
- дослідження в геометрично нелінійній постановці напружено-деформованого стану та стійкості недосконалих тонкостінних стержнів відкритого профілю з метою побудови залежності критичних значень навантаження від амплітуди недосконаlostей та отримання форм деформування стержнів при втраті стійкості;
- оцінка впливу моделі недосконалості на стійкість стержнів відкритого профілю з різними граничними умовами та видами навантаження;
- дослідження сумісного впливу амплітуди початкових недосконаlostей та ексцентриситету прикладання сил на нелінійне деформування і стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю реальної конструкції;
- обґрунтування достовірності та ефективності розробленої чисельної методики.

Об'єктом дослідження є процеси нелінійного деформування та втрати стійкості стержнів відкритого профілю з недосконаlostями форми при статичній дії навантаження.

Предметом дослідження є критичні значення навантажень, біфуркаційні форми втрати стійкості і форми деформування в граничному стані стержнів відкритого профілю, деформації, еквівалентні напруження.

Методи дослідження. На основі принципу можливих переміщень Лагранжа, який чисельно реалізований за допомогою методу скінченних елементів, сформовані рівняння рівноваги тонкостінних пружних стержнів відкритого профілю в загальній системі координат. Згідно з розробленим в програмному комплексі NASTRAN алгоритму, виконано комп'ютерне моделювання стержнів у вигляді сукупності скінченних оболонкових елементів з шістьма ступенями вільності у вузлі. При розв'язанні задачі стійкості тонкостінних стержнів з ідеальною поверхнею в лінійній постановці методом Ланцоша із застосуванням спеціально створеної програми, отримані біфуркаційні форми втрати стійкості з яких формовані геометричні недосконалості різної амплітуди. За допомогою розв'язання геометрично нелінійної задачі статички методом Ньютона-Рафсона досліджено вплив моделі і амплітуди недосконалостей на нелінійне деформування і стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю з різними граничними умовами та видами статичного навантаження.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у чисельній реалізації методу скінченних елементів в задачах нелінійного деформування і стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з недосконалостями форми. При цьому:

1. Розроблена нова чисельна методика дослідження нелінійного деформування і стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю зі змодельованими недосконалостями форми при дії статичних навантажень.

2. Вперше створено ефективний алгоритм комп'ютерного скінченно-елементного моделювання тонкостінних стержнів відкритого профілю з різними моделями і амплітудами геометричних недосконалостей з використанням процедур програмного комплексу NASTRAN та спеціально створеної програми.

3. Досліджена стійкість тонкостінних пружних стержнів відкритого профілю з ідеальною поверхнею при дії статичних навантажень в лінійній постановці з метою моделювання геометричних недосконалостей у вигляді різних біфуркаційних форм втрати стійкості.

4. Досліджено в геометрично нелінійній постановці напружено-деформований стан та стійкість недосконалих тонкостінних стержнів відкритого профілю з метою побудови залежностей критичних значень статичного навантаження від амплітуди недосконалостей та отримання форм деформування стержнів при втраті стійкості.

5. Вперше оцінено вплив моделі та амплітуди геометричних недосконалостей на стійкість стержнів відкритого профілю з різними граничними умовами та видами статичного навантаження.

6. Отримані нові результати дослідження сумісного впливу амплітуди початкових недосконалостей та ексцентриситету прикладання сил на нелінійне деформування і стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю реальної конструкції.

Достовірність результатів обґрунтовується строгістю математичних перетворень, узгодженням чисельних результатів з результатами інших авторів, збіжністю результатів в залежності від числа невідомих скінченно-елементної

моделі та точності розв'язання системи рівнянь.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні чисельної методики розв'язання актуальної науково-технічної проблеми будівельної механіки з дослідження нелінійного деформування і стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з недосконалостями форми, що дозволяє забезпечити їх безаварійну експлуатацію та обґрунтувати граничні відхилення, які затверджені державними нормативними документами: ДСТУ 8806:2018, ДСТУ 8808:2018 та ДСТУ 9233:2023.

Представлена чисельна методика використана в Науково-дослідному інституті будівельної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури при виконанні науково-дослідних робіт за дорученням Міністерства освіти і науки України та при складанні Технічного висновку по оцінці технічного стану тонкостінних конструкцій покрівлі по проекту «Влаштування дахової сонячної електростанції на покрівлі виробничої будівлі «Цех розливу в скляні банки» по вул. Богатирській, 3, літера «М» в м. Києві».

Особистий внесок здобувача. Основні результати та положення, які становлять суть (зміст) дисертації, отримані автором самостійно. В публікаціях і роботах, підготовлених у співавторстві, викладені такі результати, що належать автору: огляд літературних джерел з питань сучасного стану проблеми [2, 6]; алгоритм та реалізація комп'ютерного скінченно-елементного моделювання тонкостінних стержнів відкритого профілю з геометричними недосконалостями у вигляді різних біфуркаційних форм втрати стійкості (загальної, місцевої, депланації) при статичній дії поздовжніх і поперечних навантажень [1, 3, 4, 5, 6, 8, 9]; порівняльний аналіз результатів, отриманих згідно наведеної чисельної методики, з результатами досліджень інших авторів [2]; розв'язки практичних задач з оцінки впливу недосконалостей форми стержнів відкритого профілю на критичні значення навантаження та форми втрати стійкості [1, 3, 4, 5, 7].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи та отримані в ході її виконання результати доповідались та обговорювались на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях:

«Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА» (Київ, 17-19 жовтня 2006 р.).

«68–71 Науково-практичні конференції КНУБА» (Київ, 2007-2010 pp.).

«XXVII International Scientific and Practical Conference «Multidisciplinary academic research and innovation»» (May 25-28, 2021, Amsterdam, Netherlands).

«Міжнародна мультидисциплінарна наукова інтернет-конференція «Світ наукових досліджень»» (16-17 лютого 2023 р., м. Тернопіль, Україна – м. Переворськ, Польща).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на міжкафедральному семінарі КНУБА (м. Київ, 2023).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 9 наукових працях, серед яких: 2 статті у науково фаховому виданні України, яке включене до міжнародних науково-метричних баз, 4 статті у науково фахових виданнях і 3 публікації матеріалів міжнародних і вітчизняних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 130 сторінок, у тому числі 58 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел із 167 найменувань на 18 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, визначені мета і методи досліджень, наведена загальна характеристика роботи.

В першому розділі виконано огляд існуючих підходів до дослідження напружено-деформованого стану і стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю при статичному навантаженні.

Піонером в дослідженні холодногнутих профілів був G. Winter, який, зокрема розглянув тенденцію до місцевої втрати стійкості стержнів через їх тонкостінність. Значний внесок у теорію згину, кручення та випучування тонкостінних стержнів зробив С.П. Тимошенко. Однак, в цій теорії не були враховані специфічні особливості, які полягали у виникненні в стержнях додаткових поздовжніх нормальних напружень. Першою роботою, в якій висвітлено ці особливості, вважається книга В.З. Власова «Тонкостінні пружні стержні». Для опису напружено-деформованого стану стержня автор ввів нові секторіальні характеристики поперечного перерізу з урахуванням його депланації та новий силовий фактор – бімомент. В подальшому теорія тонкостінних стержнів відкритого профілю була розвинена та доповнена в роботах Т. Von Karman, Yu Wei-wen, Ф. Блейха, А.А. Уманського, В.В. Болотіна, О.А. Іллюшина, Б.Г. Гальоркіна, А.С. Вольміра, В.Ю. Аскіназі, Т.В. Назмеєва, А.Р. Тусніна, D. Dubina, Д.О. Советнікова, А.В. Перельмутера, В.І. Слівкера, С.В. Ракши, В.Є. Волкової, В.В. Юрченко та інших дослідників. Глибокий огляд існуючих досліджень і сучасних методів визначення несучої здатності стержневих елементів з холодногнутих профілів наведено в книзі В.В. Юрченко і А.В. Перельмутера. З даного огляду видно що, в багатьох дослідженнях тонкостінних стержнів відкритого профілю, крім теорії Власова, використовують теорію зсуву і напівзсувну теорію В.І. Слівкера.

Теорія зсуву враховує в повному обсязі деформації зсуву у виразі функціонала енергії деформації стержня і дає змогу оцінити міцність тонкостінного стержня відкритого профілю, але є складною в прикладному застосуванні. Напівзсувна теорія В.І. Слівкера враховує частину деформацій зсуву в серединній поверхні стінок стержнів, викликаних дією секторіальних сил. Вона має переваги над теорією Власова, бо може застосовуватись до тонкостінних стержнів різних профілів та комбінованих стержневих конструкцій.

Відомо, що однією з основних причин аварій тонкостінних конструкцій є втрата їх стійкості, тому особливо важливим є розв'язання задачі стійкості таких конструкцій. Втрата стійкості тонкостінних стержнів може відбуватися як по загальній і місцевій формах втрати стійкості, так і по формах, які містять депланацію стержнів. У роботах Б.Г. Гальоркіна, Ф. Блейха, G. Winter, В.Ю. Аскіназі, Т.В. Назмеєва, С.В. Ракша, Д.О. Советнікова, В.В. Юрченко,

А.О. Мартиненко та інших досліджено вплив геометричних і фізичних характеристик стержнів відкритого профілю, граничних умов, ексцентриситету прикладання зовнішніх сил на критичні значення навантаження та форми втрати стійкості.

Аналітичний розв'язок задачі стійкості тонкостінних стержневих конструкцій є складним, тому все частіше застосовуються чисельні методи. Метод скінченних елементів є одним з найбільш поширених методів будівельної механіки, який реалізовано в багатьох обчислювальних програмних комплексах SCAD, LIRA, ANSYS, NASTRAN, PANDA2 та інших. Розрахунок тонкостінних конструкцій методом скінченних елементів наведено в роботах О. Зенкевича, Р. Галлагера, Д. Дубіна, Б. Янга, А.І. Голованова, А.С. Городецького, Р.Б. Рікардса, С.Ф. Дьякова, В.І. Лаліна, А.В. Осокіна, В.В. Кудінова, К.М. Hsiao та інших. Скінченно-елементне моделювання тонкостінних стержнів на даний час виконується з використанням оболонкових скінченних елементів, плоских скінченних елементів з додатково введеним зв'язком та бістержневої моделі. Бістержнева модель, яка запропонована А.В. Перельмутером і В.І. Слівкером, побудована для стержневого елемента з шістьма ступенями вільності у вузлах на основі ряду енергетичних міркувань. Для розрахунку використовується механічна система з двох рівнопротяжних стержнів: основного і фіктивного. Енергія деформації в бістержневій моделі є сумою енергій в основному і фіктивному стержнях, розглянутих окремо. Дана модель дозволяє підвищити точність результатів розрахунків тонкостінних стержнів відкритого і замкнутого профілів.

Іншим підходом є використання оболонкових скінченних елементів при побудові моделі тонкостінного стержня. Він дозволяє при розв'язанні системи диференціальних рівнянь, яка описує напружено-деформований стан стержня, отримати переміщення і напруження по шести ступеням вільності для кожного вузла моделі. Також є можливість якісно моделювати геометричні недосконалості як стінок так і полицок стержнів. Основним недоліком цього методу вважається зростання числа скінченних елементів у порівнянні зі стержневою моделлю.

Використання плоских скінченних елементів з додатково введеним зв'язком реалізовано в роботах А.Р. Тусніна. Стержнева конструкція поділена на окремі тонкостінні скінченні елементи, що мають сім ступенів вільності в кожному вузлі. Недоліком запропонованих скінченних елементів є матриці жорсткості, члени яких є гіперболічними функціями з можливим діленням на нуль. Також дана модель непридатна для розрахунку тонкостінних стержнів замкнутого і комбінованого профілів.

Доведено, що наявність малих недосконалостей форми реальних стержнів може значно знизити значення критичного навантаження, тому виникає нагальна потреба їх врахування в дослідженнях стійкості тонкостінних стержневих конструкцій. Основи розрахунку стійкості тонкостінних стержнів з урахуванням початкових недосконалостей закладені у роботах L. Donnell, C.C. Wan. Дослідження несучої здатності тонкостінних стержнів з геометричними недосконалостями виконано в роботах J. Arbocz, C.D. Babcock, D. Bushnell, J.W. Hutchinson, G. Simitses, Г.Л. Гавриленко, N.G. Tsouvalis, М.Д. Корчака, В.А. Баженова, Є.О. Гоцуляка, D. Dubina, Ю.М. Муляра, О.О. Лук'янченко та ін. Огляд існуючих підходів показав,

що на теперішній час не існує глибокого аналізу впливу виду і амплітуди недосконалостей на втрату стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю та підтвердження граничних відхилень, прийнятих в державних нормативних документах: ДСТУ 8806:2018, ДСТУ 8808:2018 та ДСТУ 9233:2023.

У другому розділі представлена нова чисельна методика дослідження нелінійного деформування і стійкості тонкостінних пружних стержнів відкритого профілю зі змодельованими недосконалостями форми при дії статичних навантажень із застосуванням обчислювальних процедур програмного комплексу скінченно-елементного аналізу NASTRAN та спеціально створеної програми. Геометрія стержня у вигляді серединної поверхні представлена як сукупність чотирьохкутних оболонкових елементів з шістьма ступенями вільності у вузлі (рис. 1). Такий скінченний елемент сприймає мембранні, зсувні, поперечні та згинальні навантаження.

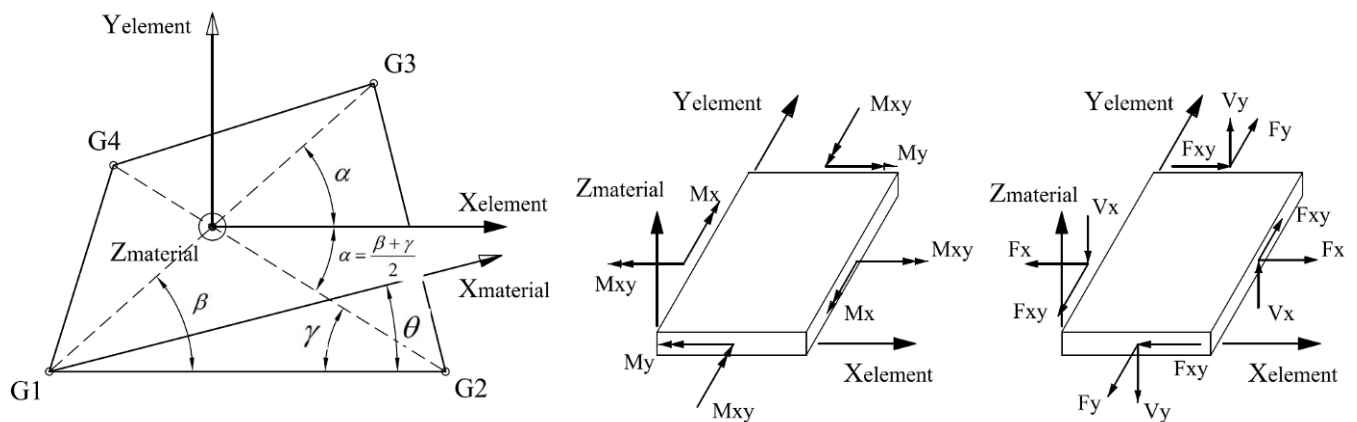


Рис. 1. Плоский 4-х кутний оболонковий скінченний елемент та внутрішні зусилля.

Наведено алгоритм комп'ютерного моделювання геометричних недосконалостей стержнів у вигляді різних біфуркаційних форм втрати стійкості (рис. 2) із задаванням амплітуди недосконалостей пропорційно до товщини стержня.

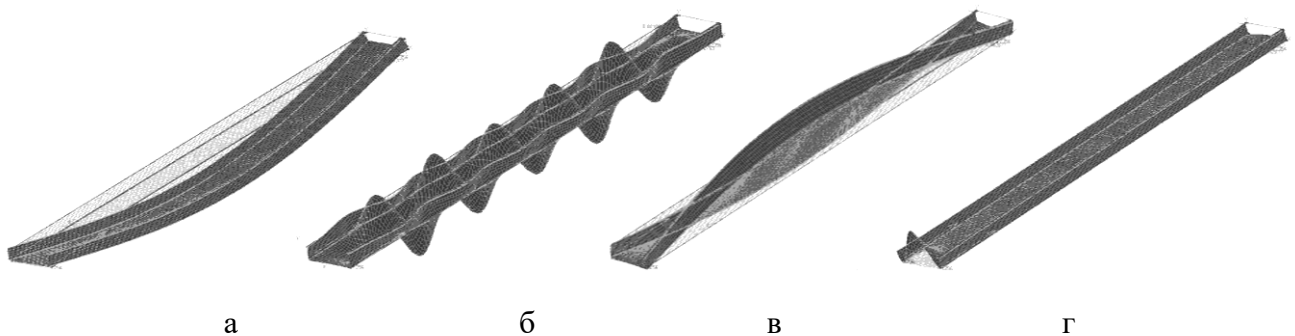


Рис. 2. Моделі недосконалостей стержня у вигляді різних форм втрати стійкості: загальної (а), місцевої (б, г) і з урахуванням депланації (в).

Для дослідження нелінійного деформування і стійкості тонкостінного стержня з урахуванням геометричних співвідношень Коші, фізичних співвідношень та граничних умов сформовані рівняння рівноваги згідно з принципом можливих переміщень Лагранжа в варіаціях у вигляді функціоналу

$$F = \delta W - \delta A = 0 \quad (1)$$

де δW – варіація потенціальної енергії деформування стержня;

δA – варіація роботи зовнішніх сил, прикладених до стержня.

В матричному виді умова рівноваги стержня (1) представлена виразом

$$([K] + [K_\sigma])\{q\} = \{P\} \quad (2)$$

де $[K], [K_G]$ – відповідно лінійна і нелінійна (геометрична) глобальні матриці жорсткості моделі стержня; $\{q\}$ – вектор узагальнених вузлових переміщень моделі; $\{P\}$ – вектор узагальнених вузлових зовнішніх сил моделі.

В дисертаційній роботі геометрично нелінійна задача статки стержня (2) розв’язана за допомогою покрокового інтегрування методом Ньютона-Рафсона. На кожному k -тому кроці ітерації системи алгебраїчних рівнянь

$$([K] + [K_\sigma])^{(k)} \{\Delta q\} = \{\psi\}^{(k)} \quad (3)$$

визначався вектор похибки $\{\psi\}^{(k)}$ за формулою

$$\{\psi\}^{(k+1)} \approx \{\psi\}^{(k)} + \frac{\partial \{\psi\}}{\partial \{q\}} \bigg|^{(k)} \cdot \{\Delta q\} \approx 0; \quad \{q\}^{(k+1)} = \{q\}^{(k)} + \{\Delta q\} \quad (4)$$

В рівняннях (3) і (4) застосовано знак приросту Δ , бо розглядались кінцеві значення вузлових переміщень.

Для формування недосконалостей стержня у вигляді біфуркаційних форм втрати стійкості та дослідження стійкості в лінійній постановці рівняння рівноваги складались з урахуванням зміни геометрії тіла в деформованому стані. В цьому випадку розв’язувалась задача на власні значення методом Ланцоша

$$\det([K] - \beta_i [K_G]) = 0 \quad (5)$$

де β_i – критичний параметр навантаження, який відповідає конкретній i -тій формі втрати стійкості стержня.

В третьому розділі виконано тестування представленого чисельного методу дослідження нелінійного деформування і стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю без і з геометричними недосконалостями.

Перша тестова задача мала за мету дослідити ефективність комп'ютерного моделювання стержнів відкритого профілю у вигляді сукупності плоских скінченних оболонкових елементів в задачах стійкості. Розглянута реальна конструкція покриття торговельного комплексу в м. Миколаєві. Досліджена стійкість покрівельного прогону з різними варіантами кріплення до рам несучого сталевого каркасу (рис. 3) при дії вертикального навантаження в лінійній постановці методом Ланцоша. Виконано порівняння критичних значень навантаження з результатами отриманими за Єврокодом 3 (ДСТУ-Н.Б EN 1993-1-3:2012).

Розглянуто нерозрізний п'ятипрольотний прогон (довжина прольоту – 12 м) з Z-подібними холодногнутими оцинкованими профілями висотою 254 мм та довжиною прольоту 12 м. Полички, стінки і відгини моделювалися плоскими скінченними оболонковими чотирикутними елементами розмірами 50x50 мм з шістьма ступенями вільності у вузлі. Модель містила 13200 елементів і 14440 вузлів. За матеріал прийнято сталь з механічними характеристиками: модуль пружності $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Па, коефіцієнт Пуасона $\mu=0,3$, межа текучості $R_y=355$ МПа. Вертикальне навантаження задано як сумарне граничне розрахункове навантаження на покрівлю $Q_0=1500$ Н/м.

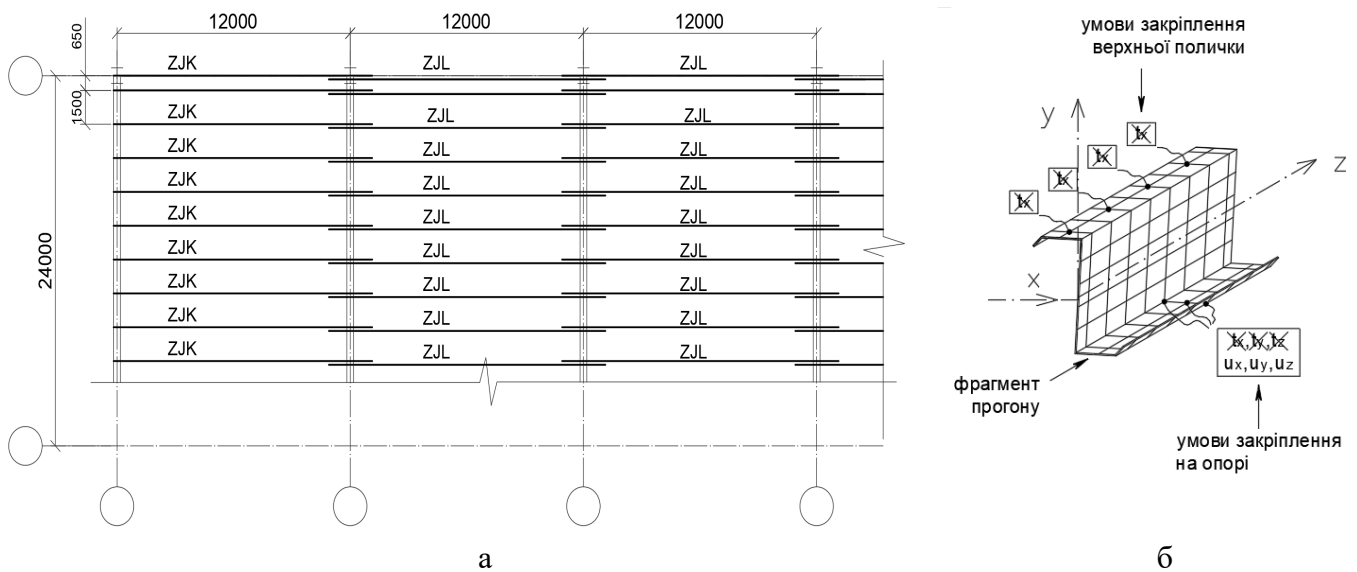


Рис. 3. Схема покриття (а) та варіант кріплення прогону (б) торговельного комплексу в м. Миколаєві.

Перші три варіанти відрізнялися способом розкріплення верхньої полички стержнів (табл. 1): не розкріплена (1), розкріплена за допомогою пружної в'язі (2), розкріплена повністю (3). При цьому для забезпечення геометричної незмінюваності системи одна крайня опора приймалась шарнірно-нерухомою, інші – шарнірно-рухомими. У четвертому варіанті (4) задано повне розкріплення полички стержня з площини при всіх шарнірно-нерухомих опорах.

Результати розрахунків наведено в табл. 1. Вплив закріплення опор на стійкість стержня є значним. При пружному розкріпленні полички критична сила Q_{cr}

зменшилась в межах (3,8 - 16,7) %. Критична сила при четвертому варіанті розкріплення значно більша (> 100%) у порівнянні з першим варіантом.

Таблиця 1

Форми втрати стійкості	Коефіцієнти втрати стійкості Q_{cr}/Q_0			
	при варіантах кріплення			
	1	2	3	4
Перша	0,15	0,557	0,536	1,792
Друга	0,171	0,624	0,75	1,793
Третя	0,225	0,708	0,75	2,037

Також проведена серія розрахунків для порівняння втрати стійкості прогону з різною кількістю прольотів, товщиною листа і способу закріплення серединних опор при умові повного розкріплення верхньої полицки профілю. Коефіцієнти втрати стійкості прогону наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Товщина листа, мм	Спосіб закріплення серединних опор	Коефіцієнти втрати стійкості Q_{cr}/Q_0				
		при кількості прольотів				
		1	2	3	4	5
2,3	шарнірно-рухомі	1,078	0,571	0,462	0,447	0,431
	шарнірно-нерухомі	0,966	1,053	1,216	1,219	1,221
2,9	шарнірно-рухомі	1,771	0,772	0,635	0,620	0,601
	шарнірно-нерухомі	1,8865	1,6784	1,937	1,9442	1,946
3,5	шарнірно-рухомі	2,663	1,003	0,841	0,827	0,806
	шарнірно-нерухомі	2,848	2,426	2,783	2,797	2,800
4,1	шарнірно-рухомі	3,772	1,267	1,085	1,074	1,051
	шарнірно-нерухомі	3,875	3,240	3,644	3,659	3,662

Порівняння критичних значень навантаження з результатами отриманими за Єврокодом 3 (ДСТУ-Н.Б EN 1993-1-3:2012) показало їх достатню збіжність з похибкою 2-3% і підтвердило ефективність моделювання стержнів оболонковими скінченими елементами.

Відповідні форми втрати стійкості прогону з різною кількістю прольотів, від одного (а) до чотирьох (г), представлено на рис. 4. Характер деформацій для п'ятипрольотної схеми аналогічний чотирьохпрольотній.

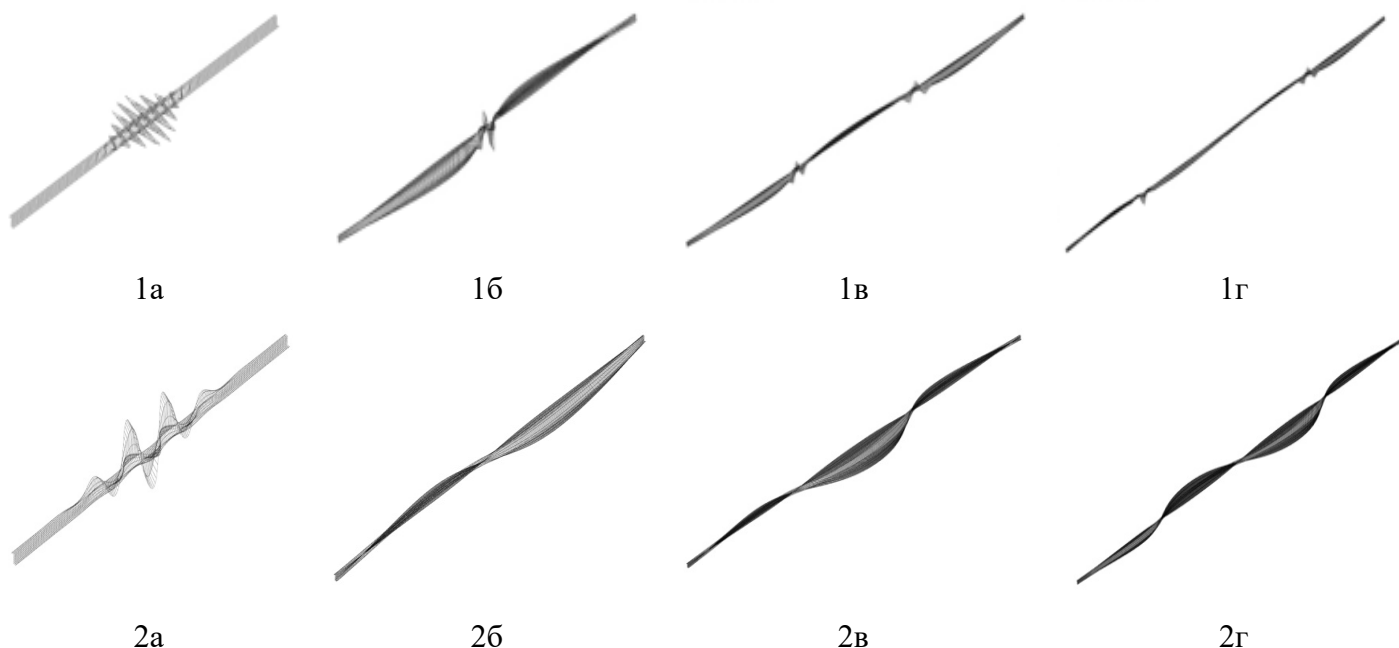


Рис. 4. Форми втрати стійкості прогонів з різною кількістю прольотів при шарнірно-нерухомих (1) та шарнірно-рухомих розкріпленнях серединних опор (2).

В другій тестовій задачі досліджена стійкість тонкостінного стержня відкритого профілю з геометричними недосконалостями та двома варіантами товщини стержня (рис. 5) від дії осьового стиснення.



Рис. 5. Профіль стержня з різними товщинами.

Механічні характеристики матеріалу: межа текучості $R_y = 321,2$ МПа, межа міцності $R_u = 402,34$ МПа, модуль пружності $E = 2,53 \cdot 10^{11}$ Па, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,29$, модуль зсуву $G = 79600$ МПа. Стержень вертикально розташований, жорстко закріплений знизу та шарнірно-рухомий зверху.

Геометричні недосконалості змодельовано у вигляді перших біфуркаційних форм втрати стійкості стержнів з ідеальною поверхнею (рис. 6), які отримано з лінійного розрахунку методом Ланцоша. Амплітуда недосконалостей форми

стержнів задана пропорційно до товщини $\delta = [0,25; 0,5; 1]t$, де t приймала значення 1,1 мм та 3 мм.

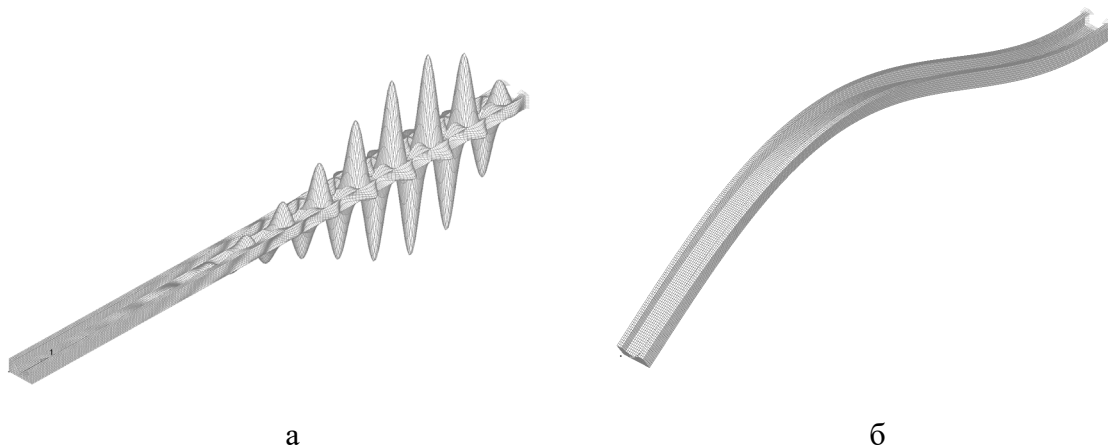


Рис. 6. Моделі геометричної недосконалості стержня у вигляді перших форм втрати стійкості: С 80/40/14/1,1 (а), С 80/40/14/3 (б).

Стійкість тонкостінного стержня відкритого профілю досліджена в нелінійній постановці методом Ньютона-Рафсона. На рис. 7 представлено форми втрати стійкості стержня для двох варіантів товщини стержня.

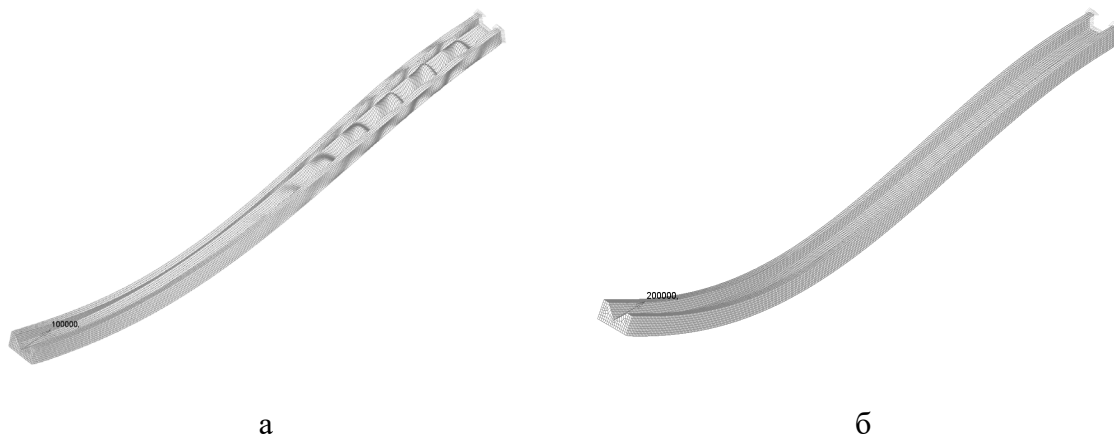


Рис. 7. Форми втрати стійкості стержня з амплітудою $\delta = 0,5t$: С 80/40/14/1,1 (а), С 80/40/14/3 (б).

Критичні значення навантаження порівняні з експериментальними даними (табл. 3), які отримані в 2016 році в лабораторії будівельного факультету Загребського університету (Хорватія), і аналітичними та чисельними розрахунками, що отримані за допомогою комплексу ABAQUS у 2020 році на будівельному факультеті Брестського державного технічного університету (Білорусь).

Таблиця 3

Тип дослідження	Амплітуда недосконалостей	Критичні значення стискаючої сили, кН	
		С 80/40/14/1,1	С 80/40/14/3
Експериментальні дослідження			
F _{exp}	0	30,8	144,3
Аналітичні і чисельні дослідження			
F _{theory}	0	42,6	145,5
F _{FEM(ABAQUS)}	0	39,38	270,08
F _{NL0}	0	39,375	135,50
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

Виявлено, що для стержня товщиною 1,1 мм критичні значення стискаючих сил, отриманих чисельно, менші за аналітичні на 8,75% та 1,3% відповідно. Різниця з експериментальними даними склала 26,2%, що можна пояснити значною локальною деформацією стінки стержня. Для стержня товщиною 3 мм різниця між аналітичними та чисельними значеннями критичних сил склала 6,9% та 49,5%, між експериментальними і чисельними – 6,1%. Збільшення амплітуди недосконалостей мало вплинуло на критичні значення стискаючих сил.

В четвертому розділі представлено результати дослідження стійкості стержня довжиною 2 м і товщиною $t = 2$ мм зі сталі марки Ст3 від дії поздовжньої сили. На рис. 8 показана геометрія поперечного перерізу стержня відкритого профілю, діюча поздовжня сила та граничні умови.

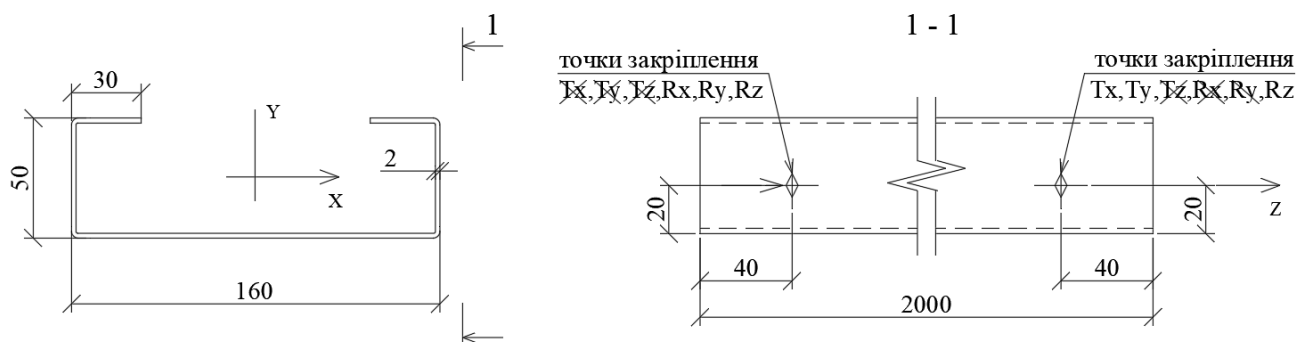


Рис. 8. Профіль стержня, поздовжнє навантаження та граничні умови.

Недосконалість форми моделювалась амплітудою $\delta = [0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5]t$ у вигляді місцевої (рис. 9, а) і загальної (рис. 9, б) біфуркаційних форм втрати стійкості стержня з ідеальною поверхнею, отриманими при розв'язанні задачі стійкості в лінійній постановці методом Ланцоша.

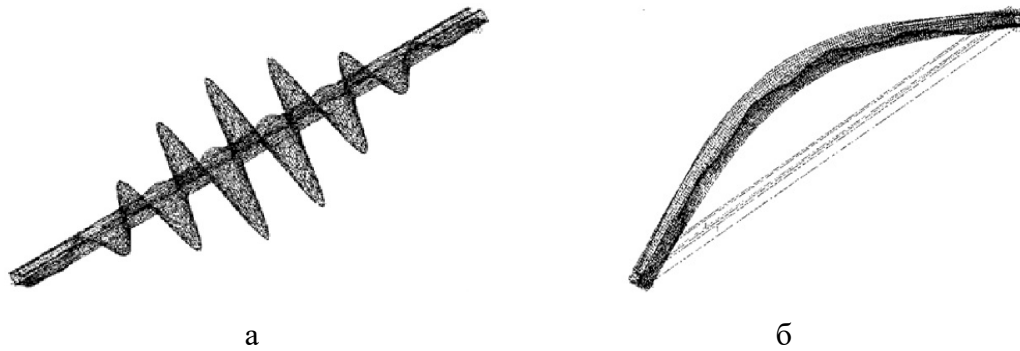


Рис. 9. Моделі геометричної недосконалості стержня: місцева (1-а) та загальна (15-а) біфуркаційні форми.

Оцінено вплив моделі і амплітуди геометричної недосконалості на критичні значення навантаження та відповідні форми втрати стійкості стержня при розв'язанні нелінійної задачі статyki методом Ньютона-Рафсона. На рис. 10 представлені залежності параметра критичного навантаження $\beta = F_{cr}/F_{cr}^0$, ($F_{cr}^0 = 56$ кН) від моделі і амплітуди недосконалості стержня.

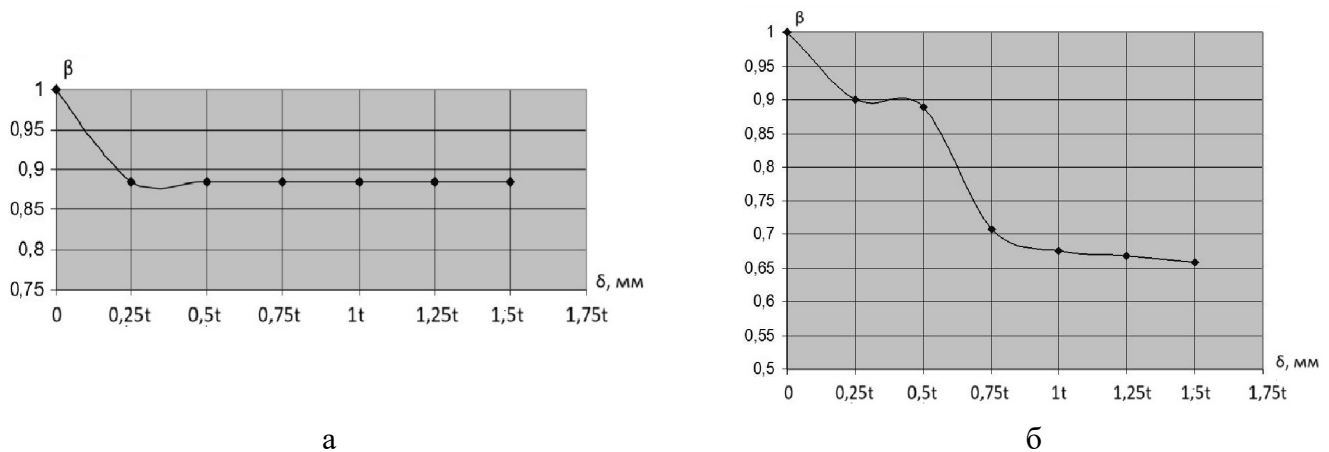


Рис. 10. Залежності параметру критичного навантаження від амплітуди і моделі недосконалості: місцева (а) та загальна (б) форми втрати стійкості.

Дослідження стійкості стержня показали, що на критичні значення навантаження має вплив як моделі так і амплітуди недосконалостей. Стержень з недосконалістю у вигляді місцевої форми втрати стійкості (рис. 10, а) амплітудою від 0,25t і більше втрачає стійкість при майже рівних значеннях навантажень близьких до $0,9 F_{cr}^0$. Стержень з недосконалістю у вигляді загальної форми втрати стійкості (рис. 10, б) більш чутливий до збільшення амплітуди недосконалості. Різна поведінка стержня може бути врахована при встановленні граничних нормативних відхилень.

Як приклад, на рис. 11 показана крива навантаження та форма втрати стійкості стержня з недосконалістю у вигляді місцевої форми амплітудою $\delta = 0,5t$.

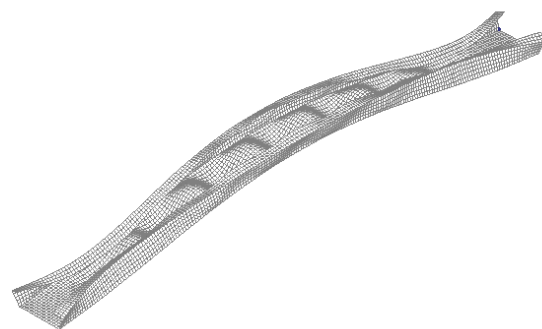
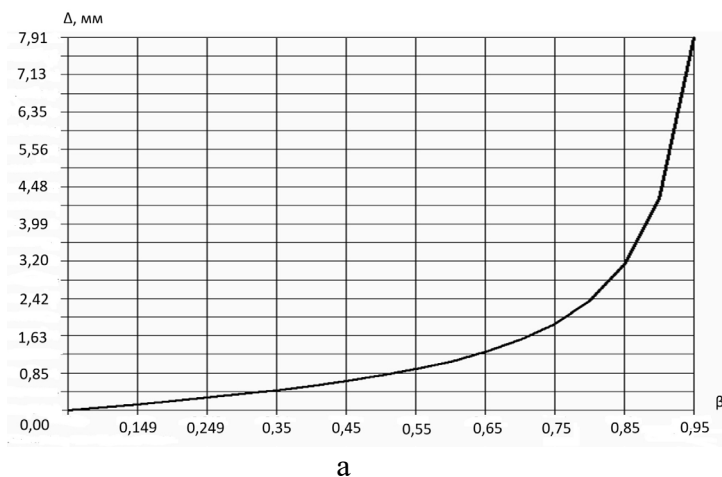


Рис. 11. Крива навантаження (а) та форма втрати стійкості (б) стержня з недосконалістю у вигляді місцевої біфуркаційної форми ($\delta=0,5t$).

Бачимо, що поведінка стержня є нелінійною (рис. 11, а).

В розділі наведено результати дослідження сумісного впливу амплітуди геометричних недосконалостей та ексцентриситету прикладання поздовжньої сили $e = [0; 10 \text{ мм}; 20 \text{ мм}]$ на стійкість тонкостінного стержня відкритого профілю реальної конструкції. На рис. 12 показана геометрія поперечного перерізу стержня довжиною 2 м виготовленого зі сталі марки Ст3кп (ДСТУ 2651:2005), накладені на нього граничні умови та ексцентриситети прикладання поздовжньої сили.

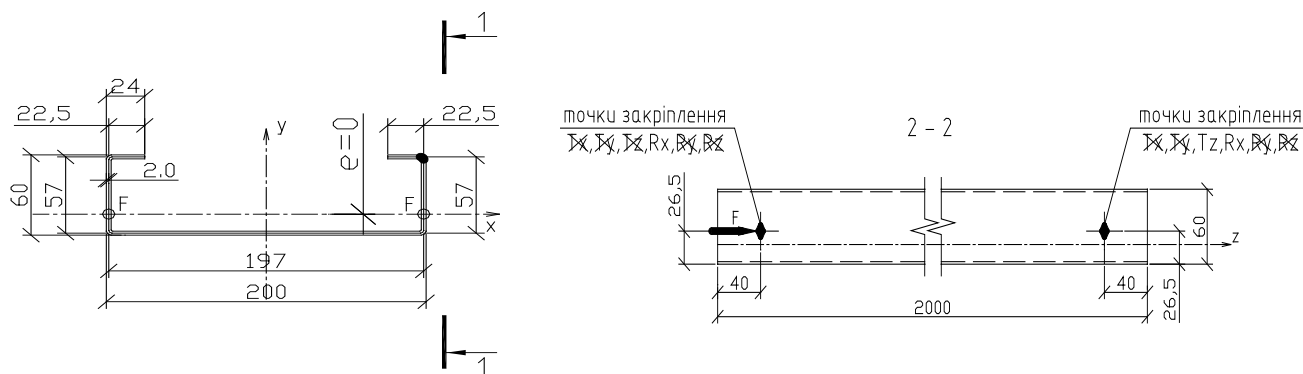


Рис. 12. Профіль стержня, поздовжнє навантаження та граничні умови при $e=10 \text{ мм}$.

За моделі недосконалостей прийняті перші біфуркаційні форми втрати стійкості стержня з ідеальною поверхнею (рис. 13), які отримані при розв'язанні задач стійкості в лінійній постановці методом Ланцоша. Амплітуда недосконалостей задана пропорційно до товщини стержня $\delta=[0,25; 0,5; 1; 1,5]t$, де $t = 2 \text{ мм}$.

Стійкість стержня при дії поздовжнього навантаження $F_{cr}^0 = [110,13; 97,99; 97,99] \text{ кН}$ з ексцентриситетом $e=[0; 10; 20] \text{ мм}$ досліджена в лінійній постановці методом Ланцоша, в нелінійній – методом Ньютона-Рафсона.

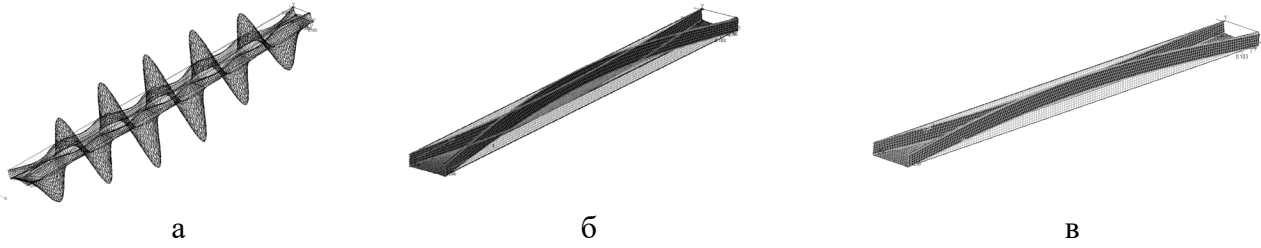


Рис. 13. Моделі недосконалості стержня при ексцентриситетах прикладення поздовжньої сили: $e=0$ (а), $e=10$ мм (б), $e=20$ мм (в).

На рис. 14 наведено залежності кривих поздовжнього навантаження від ексцентриситету та амплітуди недосконалості. Вздовж осі абсцис відкладено параметр критичного навантаження $\beta = F_{cr}/F_{cr}^0$, вздовж осі ординат – максимальне сумарне переміщення Δ (мм) вузлів моделі стержня.

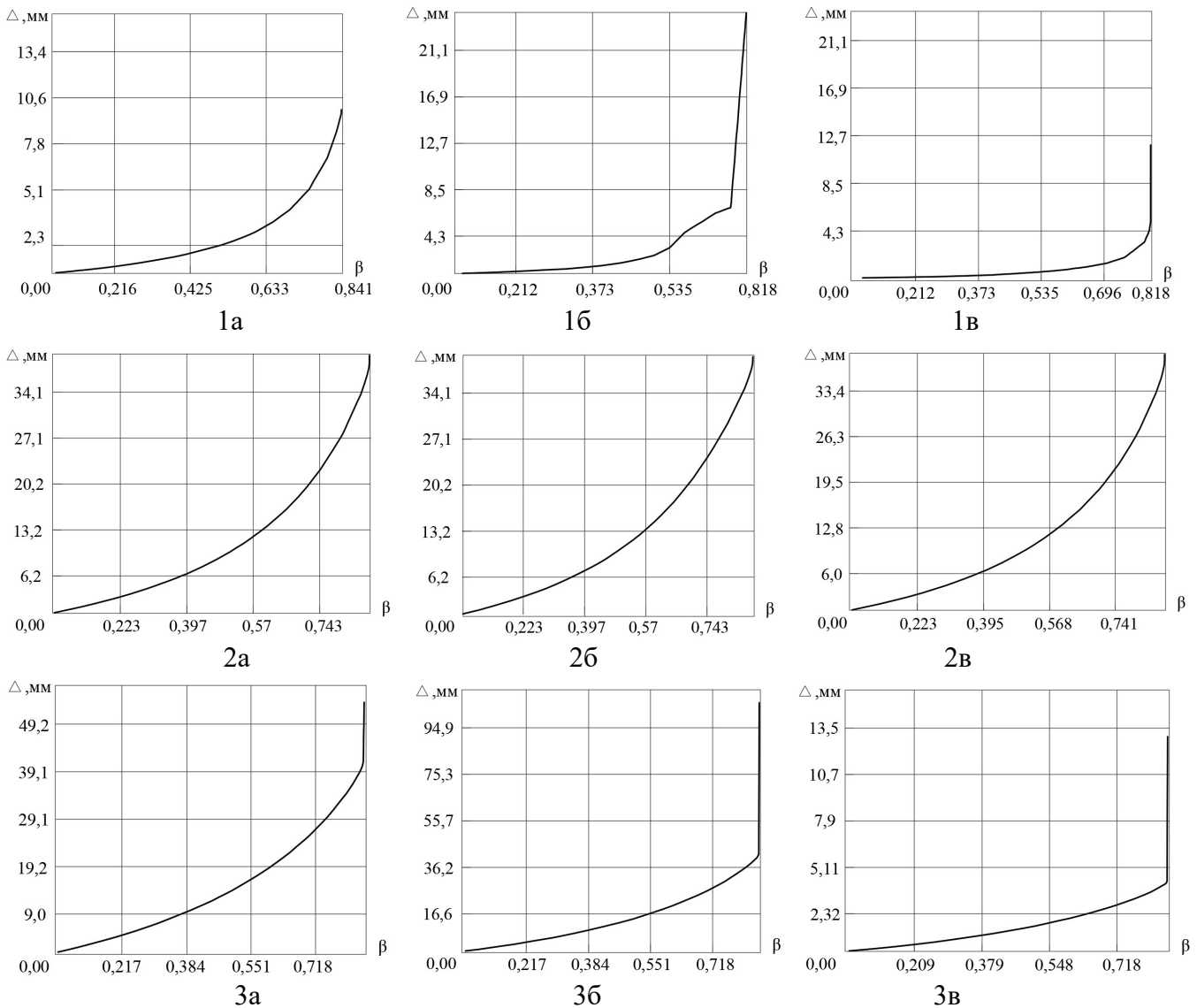
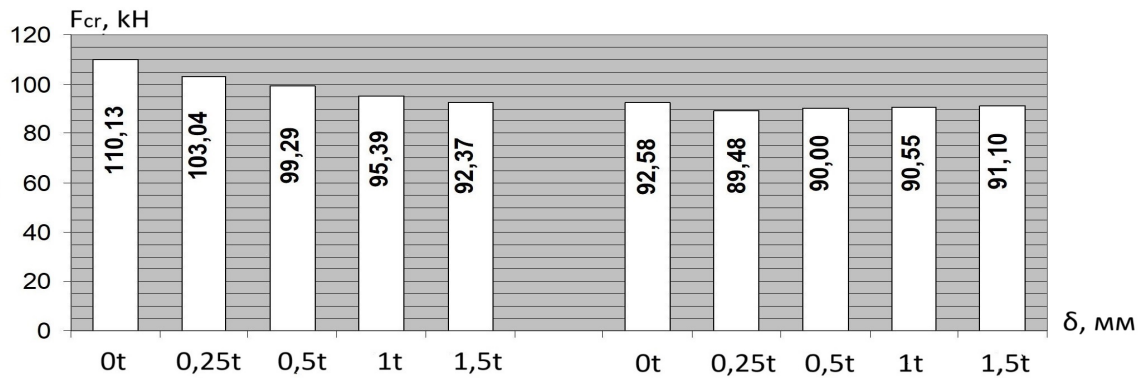
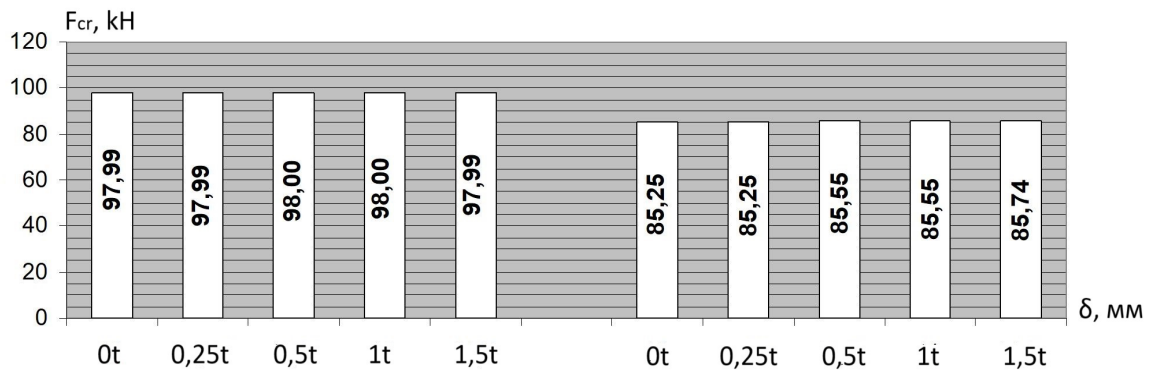


Рис. 14. Криві навантаження стержня з ексцентриситетом: $e = [0(1), 10(2), 20(3)]$ мм при $\delta = [0$ (а); $0,5$ (б); $1,5$ (в)]т.

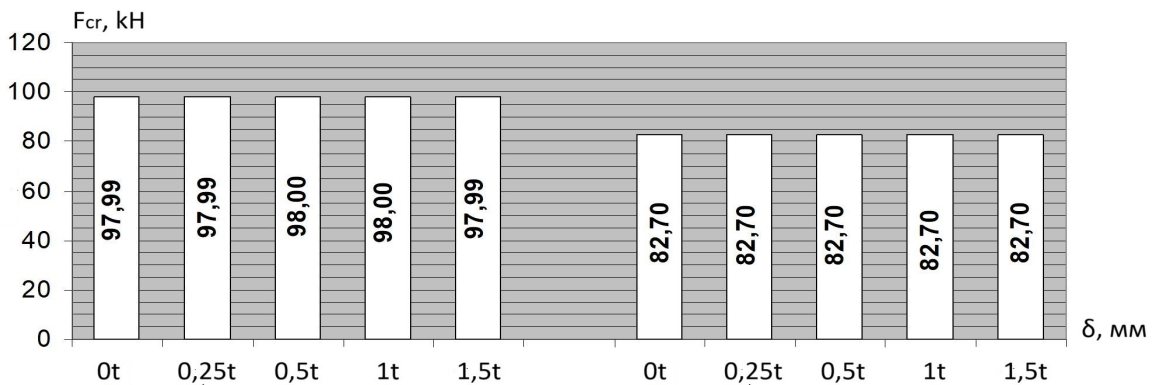
На рис. 15 представлені залежності критичної сили від амплітуди недосконалості форми стержня та ексцентриситету прикладання поздовжньої сили.



a



б



в

Рис. 15. Залежність критичних значень навантаження при лінійному (зліва) та нелінійному (справа) розрахунках стійкості стержня з недосконалостями та при ексцентриситетах: $e=0$ (а), $e=10$ мм (б), $e=20$ мм (в).

З рис. 13 видно, що збільшення амплітуди недосконалостей змінює момент різкого зростання максимального сумарного переміщення вузлів моделі. Зі збільшенням ексцентриситету прикладання поздовжньої сили спостерігається зменшення критичних значень навантаження (рис. 15): при лінійному розрахунку

максимально на 11%, при нелінійному – 7,9% та 10,7%, відповідно, при $e = 10$ мм та $e = 20$ мм.

Можна зробити висновок, що прийняті у розрахунках величини максимальних амплітуд недосконалостей співрозмірні з гранично-допустимими відхиленнями, наведених в державних нормативних документах.

На рис. 16 представлені форми втрати стійкості стержня з різними амплітудами недосконалостей та ексцентриситетами прикладання поздовжньої сили.

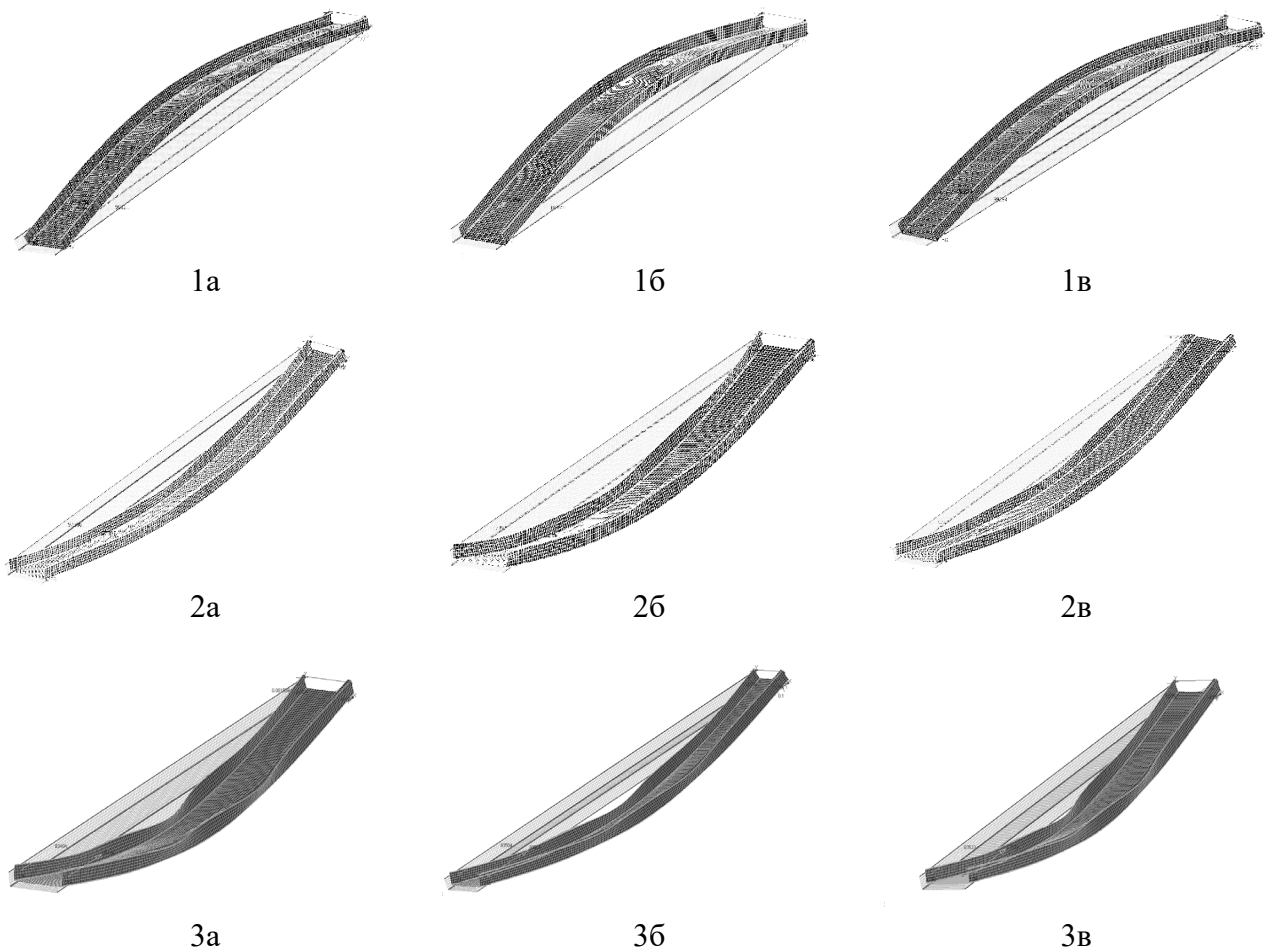


Рис. 16. Форми втрати стійкості стержня з недосконалістю $\delta/t=[0(a); 0,5(б); 1,5(в)]$ та ексцентриситетом: $e=[0(1); 10(2); 20(3)]$ мм

Форма деформування стержня при втраті стійкості (рис. 16) зі зростанням амплітуди недосконалостей та конкретних значеннях ексцентриситету прикладання навантаження суттєво не змінюється і повторює відповідну прийняту модель недосконалості форми стержня (рис. 13).

ВИСНОВКИ

Основні результати, отримані в дисертаційній роботі, полягають у наступному:

- розроблена нова чисельна методика дослідження нелінійного деформування і стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю зі змодельованими

недосконалостями форми при дії статичних навантажень;

- вперше створено ефективний алгоритм комп'ютерного скінченно-елементного моделювання тонкостінних стержнів відкритого профілю з різними моделями і амплітудами геометричних недосконалостей з використанням процедур програмного комплексу NASTRAN та спеціально створеної програми;

- досліджена стійкість тонкостінних пружних стержнів відкритого профілю з ідеальною поверхнею при дії статичних навантажень в лінійній постановці методом Ланцоша з метою моделювання геометричних недосконалостей у вигляді різних біфуркаційних форм втрати стійкості;

- досліджено в геометрично нелінійній постановці напружено-деформований стан та стійкість недосконалих тонкостінних стержнів відкритого профілю методом Ньютона-Рафсона з метою побудови залежностей критичних значень статичного навантаження від амплітуди недосконалостей та отримання форм втрати стійкості;

- вперше оцінено вплив моделі та амплітуди геометричних недосконалостей на стійкість стержнів відкритого профілю з різними граничними умовами та видами статичного навантаження;

- отримані нові результати дослідження сумісного впливу амплітуди початкових недосконалостей та ексцентриситету прикладання сил на нелінійне деформування і стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю реальної конструкції;

- обґрунтована достовірність отриманих результатів строгістю математичних перетворень, узгодженням результатів з аналітичними, чисельними та експериментальними результатами інших авторів, збіжністю результатів в залежності від числа невідомих скінченно-елементної моделі та точності розв'язання системи рівнянь;

- підтверджена ефективність застосування чисельної методики до оцінки впливу недосконалостей форми на стійкість стержнів відкритого профілю та аналізу нормативних граничних відхилень діючих державних стандартів України з виготовлення холодногнутих профілів;

- створено програмне забезпечення для моделювання геометричних недосконалостей тонкостінних стержнів відкритого профілю на основі комплексу NASTRAN і спеціально створеної програми, яка адаптована до даного комплексу.

В дисертаційній роботі сукупність отриманих результатів являє собою розв'язання актуальної науково-технічної проблеми будівельної механіки щодо забезпечення стійкості конструкцій з тонкостінних стержнів відкритого профілю при дії статичних навантажень з метою їх безаварійної експлуатації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

а) статті, що включені до наукових періодичних видань інших держав, та у наукових фахових виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз:

1. *Okhten I.O.* Some aspects of consideration of initial imperfections in the calculations of stability of thin-walled elements of open profile / I.O. Okhten, O.O. Lukianchenko // *Strength of materials and theory of structures*. K.: KNUCA. – 2021. – Issue 106. – P. 122-128. (Web of Science)

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

б) статті в наукових фахових виданнях України:

3. Дослідження стійкості тонкостінних елементів відкритого профілю з урахуванням початкових недосконалостей / Є.О. Гоцуляк, І.О. Охтен, О.О. Лук'янченко // Зб. Опір матеріалів та теорія споруд. К.: КНУБА, 2008. – Вип.82. – С.131-136.
4. *Охтен І.О.* Дослідження сумісного впливу початкових недосконалостей і ексцентриситету на стійкість стержнів відкритого профілю / І.О. Охтен, Є.О. Гоцуляк, О.О. Лук'янченко //Зб. Опір матеріалів та теорія споруд. К.: КНУБА, 2009. – Вип. 83. – С.126-132.
5. *Охтен І.О.* Дослідження стійкості тонкостінних елементів відкритого профілю з різними варіантами розкріплення / І.О. Охтен, Є.О. Гоцуляк // Зб. Опір матеріалів та теорія споруд. К.: КНУБА, 2010. – Вип.86. – С.56-64.
6. Комп'ютерне моделювання в задачах стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з недосконалостями форми / О.О. Лук'янченко, І.О. Охтен // Зб. Управління розвитком складних систем. К.: КНУБА. – 2021. – Вип. 47. – С. 95-101. (Index Copernicus)

в) публікації по доповідям на міжнародних та вітчизняних конференціях:

7. *Охтен І.О.* Особливості проектування конструкцій зі сталевих гнутих профілів і профілів підвищеної жорсткості // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА, м. Київ, 17-19 жовтня 2006 р. – С. 31.
8. *Okhten I.* Вплив початкових недосконалостей форми на стійкість тонкостінних стержнів // XXVII International Scientific and Practical Conference «Multidisciplinary academic research and innovation» (May 25-28, Amsterdam, Netherlands, 2021).
9. Numerical approach to research of elastic systems parametric vibrations with shape imperfections / O. Lukianchenko, O. Kostina, I. Okhten // Світ наукових досліджень. Випуск 16. Зб. Наукових публікацій міжнародної мультидисциплінарної наукової інтернет-конференції. м. Тернопіль, Україна – м. Переворськ, Польща, 16-17 лютого 2023 р. – С. 403.

АНОТАЦІЯ

Охтен І.О. Стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю з недосконалостями форми. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка. – Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню стійкості тонкостінних пружних стержнів відкритого профілю з недосконаlostями форми. На основі методу скінченних елементів і обчислювальних процедур програмного комплексу NASTRAN розроблена чисельна методика дослідження стійкості стержнів відкритого профілю з геометричними недосконаlostями різної амплітуди і форми. Розроблено алгоритм комп'ютерного скінченно-елементного моделювання тонкостінних стержнів відкритого профілю у вигляді сукупності плоских оболонкових елементів. Створено програмне забезпечення для моделювання геометричних недосконаlostей різної амплітуди у вигляді місцевих і загальних форм втрати стійкості стержнів з урахуванням деплантації їх поперечного перерізу, яке адаптоване до обчислювального комплексу NASTRAN. Ефективність моделювання стержнів відкритого профілю у вигляді сукупності оболонкових скінченних елементів підтверджена розв'язанням тестової задачі стійкості багатопрольотних прогонів покриття торговельного комплексу в м. Миколаєві з різними варіантами розкріплення від дії вертикального навантаження. Дослідженню стійкості стержня відкритого профілю з недосконаlostю форми в нелінійній постановці методом Ньютона-Рафсона присвячена друга тестова задача. Підтверджена співпадіння отриманих результатів з результатами інших авторів і експериментами. Досліджена стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю різного виду з недосконаlostями форми при поздовжньому навантаженні в лінійній постановці методом Ланцоша, в геометрично нелінійній постановці – методом Ньютона-Рафсона. Досліджено сумісний вплив амплітуди геометричних недосконаlostей та ексцентриситету прикладання поздовжньої сили на нелінійне деформування і стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю реальної конструкції. Представлено залежності критичних значень навантажень та форм втрати стійкості від амплітуди недосконаlostей стержнів та ексцентриситету прикладання поздовжніх сил. Підтверджено вплив моделі і амплітуди геометричних недосконаlostей на стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю. Проаналізовано граничні відхилення у діючих державних нормативних документах.

Ключові слова: тонкостінні пружні стержні відкритого профілю, недосконаlostь форми, статична стійкість, критичні навантаження, форми втрати стійкості, метод скінченних елементів.

ABSTRACT

Okhten I.O. Stability of an thin-walled open-profile bars with imperfections of form. - Manuscript.

The thesis is monograph submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.23.17 – Structural Mechanics. – Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation work is dedicated to the investigation of the stability of thin-walled open-profile elastic bars with imperfections of form. A numerical methodology for researching the stability of bars with geometric imperfections of various amplitudes and forms has been developed based on the finite element method and computational procedures of the NASTRAN software complex. It has been devised an algorithm for

computer finite element modeling of thin-walled bars in the form of a set of planar shell elements. Software has been developed for modeling geometric imperfections of various amplitudes in the form of local and global shapes of stability loss for bars, considering the out-of-plane deformation of their cross-section which adapted to the NASTRAN computational complex. The effectiveness of modeling thin-walled bars in the form of a set of shell finite elements has been confirmed by solving a test problem of the stability of beams of a trading complex in Mykolaiv, considering various scenarios of bracing under vertical loads.

The stability of an open-profile bar with imperfections of form in a nonlinear setting using the Newton-Raphson method is dedicated to the second test problem. The coincidence of the obtained results with the results of other authors and experiments has been confirmed. The work examines the stability of various types of thin-walled bars with imperfections of form under longitudinal loading in a linear setting using the Lanzos method and in a geometrically nonlinear setting using the Newton-Raphson method. It has been researched the combined effect of the initial imperfection amplitude and the eccentricity of applied forces on the nonlinear deformation and stability of thin-walled open-profile bars of the real structure. Dependencies of critical load values and stability loss forms on the amplitude of bar imperfections and the eccentricity of applied longitudinal forces are presented. The influence of the model and amplitude of geometric imperfections on the stability of thin-walled open-profile bars is confirmed.

Keywords: open profile thin-walled elastic bars, imperfections of form, static stability, critical loads, stability loss forms, finite element method.

Підписано до друку 26.12.2023
Формат 60х90 1/16. Папір офсетний № 2
Друк цифровий.
Ум. друк. арк. 1,375 арк.
Тираж 100 прим. Замовлення № 20249

Надруковано в типографії ФОП Степенко Р.Д.
02660, м. Київ, б-р Миколи Міхновського, 24/2
тел.: +38 (095) 6724642, www.urb.com.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 7205 від 03.12.2020