

ВІДГУК
офіційного опонента

на дисертаційну роботу Охтеня Івана Олександровича
«Стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю з недосконалостями
форми», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за
спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка

1. Обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи та зв'язок з науковими програмами, планами й темами

Застосування тонкостінних сталевих профілів у конструкціях будівель і споруд дає змогу не тільки істотно знизити їхню матеріаломісткість, а й суттєво скоротити як вартість, так і терміни виконання будівельно-монтажних робіт. Це, безумовно, сприяє поширенню легких металевих конструкцій у будівництві. Проте початкові деформації, недосконалості тонкостінних профілів виникають уже під час виготовлення, складування, транспортування, піднімання та фіксування елементів на монтажі. Як правило, недосконалості форми тонкостінних стержнів призводять до зменшення критичних навантажень і впливають на їх безаварійну експлуатацію. Досягти необхідної надійності тонкостінних стержнів у процесі експлуатації можна за допомогою оцінки впливу геометричних недосконалостей на їхні статичні й динамічні характеристики ще на стадії проектування.

Дослідження стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю за наявності геометричних недосконалостей є однією із складних задач механіки деформівного твердого тіла. Безперечно, розробка нового чисельного підходу щодо оцінки впливу геометричних недосконалостей на напружено-деформований стан і стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю з чисельною реалізацією методом скінченних елементів у нелінійній постановці, яка відповідає темі дисертаційної роботи Охтеня І. О., є важливою і актуальною задачею будівельної механіки.

Дисертаційна робота написана у Київському національному університеті будівництва і архітектури (КНУБА) і відповідає спрямуванню наукових

досліджень кафедри будівельної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури та Науково-дослідного інституту будівельної механіки (НДІБМ КНУБА). Дослідження виконані в межах науково-дослідних робіт: ЗДБ-2008 «Теоретичні основи та методики дослідження стійкості та руйнування просторових тонкостінних конструкцій пружних систем» (№ держ. реєстрації 0108U000230, 2008-2010 рр.); 4ДБ-2022 «Створення теорії і методів дослідження вібраційних процесів у складних деформованих системах при експлуатаційних навантаженнях періодичного, стохастичного та ударного характеру» (№ держ. реєстрації 0122U001336).

2. Склад і структура дисертаційної роботи

Дисертація, підготована Охтенем І. О., складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (167 найменувань) та додатків. Загальний обсяг роботи становить 130 сторінок та містить 6 таблиць і 58 рисунків.

3. Аналіз основного змісту роботи, її наукової новизни, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету й методи досліджень, наведено загальну характеристику роботи.

У першому розділі автором виконано достатньо широкий аналіз літературних джерел із досліджуваної тематики. Наведено сучасні теорії і методи розрахунку тонкостінних стержнів відкритого профілю, такі як теорія В. З. Власова, теорія зсуву та напівзсувна теорія В. І. Слівкера з оцінкою їхніх переваг і недоліків. Приділено увагу огляду чисельної реалізації методу скінченних елементів до дослідження напружено-деформованого стану і стійкості таких стержнів з використанням бістержневої моделі стержня, яка запропонована А. В. Перельмутером і В. І. Слівкером, оболонкових скінченних елементів та плоских скінченних елементів з додатково введеним зв'язком, реалізованих у працях А. Р. Тусніна. На основі виконаного аналізу визначено ефективність застосування окремих підходів та обмеження на їхню реалізацію з огляду на особливості обчислювальних процедур та конструктивні особливості тонкостінних елементів.

У другому розділі описано чисельну методику формування рівнянь статичної рівноваги тонкостінного стержня відкритого профілю в геометрично нелінійній постановці на основі принципу можливих переміщень Лагранжа у варіаціях. Наведено геометричні та фізичні співвідношення теорії пружності для

оболонкового скінченного елемента, який використано для створення комп'ютерної моделі тонкостінного стержня. Запропоновано алгоритм комп'ютерного моделювання геометричних недосконалостей стержнів у вигляді різних біфуркаційних форм втрати стійкості амплітуди із застосуванням обчислювальних процедур програмного комплексу NASTRAN та створеної автором програми для задавання амплітуди недосконалостей. Наведено методи Ланцоша і Ньютона-Рафсона, які були застосовані Охтенем І. О. до дослідження нелінійного деформування та стійкості тонкостінного стержня відкритого профілю з недосконалостями форми при дії статичних навантажень.

У *третьому розділі* подано результати тестування запропонованого чисельного підходу щодо оцінки стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю без та з геометричними недосконалостями. У першій тестовій задачі виконано комп'ютерне моделювання тонкостінного покрівельного прогону з різними варіантами кріплення до рам несучого сталевого каркаса реальної конструкції покриття торговельного комплексу в м. Миколаєві. Під час дослідження стійкості стержні відкритого профілю моделювалися у вигляді сукупності плоских скінченних оболонкових елементів. Порівняння обчислених за запропонованим підходом критичних значень вертикального навантаження з результатами, отриманими за Єврокодом 3 (ДСТУ-Н.Б EN 1993-1-3:2012), показало їхню достатню збіжність.

У другій тестовій задачі досліджено стійкість тонкостінного стержня відкритого профілю від дії осьового стиснення з двома варіантами товщини. Недосконалості тонкостінних стержнів приймалися у вигляді перших форм втрати стійкості (місцевої і загальної) з різними амплітудами. Виконано порівняння критичних значень навантаження з експериментальними даними, які були отримані в 2016 році в лабораторії будівельного факультету Загребського університету (Хорватія), а також аналітичними та чисельними розрахунками, що отримані за допомогою комплексу ABAQUS у 2020 році на будівельному факультеті Брестського державного технічного університету (Білорусь).

У *четвертому розділі* наведено результати чисельного дослідження впливу недосконалості форми, яка змодельована у вигляді місцевої і загальної форми втрати, на нелінійне деформування і стійкість тонкостінного стержня відкритого профілю при дії поздовжньої сили. Оцінена залежність критичних значень навантаження від моделі й амплітуди недосконалостей. Виконано порівняння амплітуд недосконалостей з граничними відхиленнями, наведеними в державних нормативних документах. Також у розділі подано нові результати дослідження сумісного впливу різних амплітуд геометричних недосконалостей тонкостінного

стержня відкритого профілю реальної конструкції та ексцентриситету прикладання поздовжньої сили на його нелінійне деформування і стійкість.

Як наукову новизну слід відзначити нову чисельну методику дослідження нелінійного деформування та стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю зі змодельованими недосконалостями форми при дії статичних навантажень. Здобувачем створений ефективний алгоритм комп'ютерного моделювання недосконалостей тонкостінних профілів відкритого перерізу з використанням процедур програмного комплексу скінченно-елементного аналізу NASTRAN, за допомогою якого було досліджено в геометрично нелінійній постановці впливу різних моделей та амплітуд геометричних недосконалостей на стійкість стержнів відкритого профілю з різними граничними умовами та видами навантаження. Також автором встановлено особливості сумісного впливу амплітуди початкових недосконалостей та ексцентриситету прикладання сил на нелінійне деформування і стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю реальних конструкцій.

Обґрунтованість та достовірність результатів забезпечено завдяки ґрунтовному аналізу стану проблеми; строгості використання основних положень будівельної механіки; коректності формулювання механічних моделей, збіжності результатів залежно від кількості невідомих скінченно-елементної моделі та точності розв'язання системи рівнянь.

Достовірність результатів теоретичних розрахунків і експериментальних даних підтверджується їх взаємоузгодженням та кореляцією основних закономірностей досліджених процесів з даними інших дослідників.

Практичне значення одержаних результатів та рекомендації до їх застосування. Тема дисертаційної роботи Охтеня І. О. є практично значущою, що підтверджується широким використанням холодногнутих тонкостінних стержнів відкритого профілю в будівництві. Автором запропоновано нову чисельну методику дослідження нелінійного деформування та стійкості недосконалих тонкостінних стержнів відкритого профілю з різними граничними умовами та видами статичного навантаження, зокрема з урахуванням ексцентриситету його прикладання. Застосування цієї методики дозволить обґрунтувати граничні значення недосконалостей холодногнутих тонкостінних стержнів відкритого профілю та забезпечити їхню безаварійну експлуатацію. Розроблена методика була використана науково-дослідною та конструкторською організаціями України, про що свідчать акти впровадження, наведені в додатках.

Запропонований алгоритм комп'ютерного моделювання геометричних

недосконалостей тонкостінних стержнів відкритого профілю різної форми й амплітуди в програмному комплексі NASTRAN з використанням розроблених автором програм може бути корисними для інженерів-проектувальників та аспірантів вищих технічних навчальних закладів.

4. Повнота викладення результатів в опублікованих працях

Основні результати, наукові положення, висновки та рекомендації достатньо повно відображено в 9 працях: 6 статей у фахових виданнях України і 3 тези конференцій. Слід зауважити, що 2 статті опубліковані у фаховому виданні категорії «А», яке цитується у реферативній базі Web of Science, та 1 стаття у виданні, яке цитується в реферативній базі Index Copernicus.

Наукові праці Охтеня І. О. відповідають вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України для кандидатських дисертацій. Наведені в дисертації розробки пройшли апробацію на конференціях, де доповідалися основні положення та результати досліджень.

5. Ідентичність змісту анотацій та основних положень дисертації

Зміст анотацій українською та англійською мовами повною мірою відображає зміст дисертації та достатньо висвітлює її основні результати та висновки.

6. Дотримання академічної доброчесності

У дисертаційній роботі відсутні порушення академічної доброчесності. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

7. Дискусійні положення та зауваження до дисертації.

У процесі аналізу змісту й структури дисертації та автореферату виникли такі зауваження змістовного та редакційного характеру:

1. У першому розділі дисертації досить повно та змістовно виконано ретроспективний огляд наукових досліджень за обраною тематикою. Проте доцільно було б приділити більше уваги питанням аналітичного і чисельного моделювання геометричних недосконалостей тонкостінних стержнів у дослідженнях інших авторів.
2. Потребує додаткового пояснення наведене на с. 29 твердження: «Основна гіпотеза підходу ЕСВЛ полягає в тому, що зниження критичного навантаження досягає свого максимуму, коли глобальні та

місцеві нестабільності збігаються». Вважаю, що, цитуючи основні результати, викладені в закордонних публікаціях, слід дотримуватися загальноприйнятих термінів і визначень вітчизняної школи будівельної механіки та уникати англіцизмів.

3. На мій погляд, у другому розділі в пункті 2.3.1 треба було більш детально обґрунтувати критерії вибору моделі та амплітуди недосконалості.
4. Було б доцільно в розділах 3 і 4 при описі результатів дослідження нелінійного деформування та стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю методом Ньютона-Рафсона вказувати параметри чисельного розрахунку та надавати інформацію про збіжність результатів.
5. Потребують додаткового пояснення наведені на с. 85 в табл. 3.9 результати обчислення критичних сил, отримані для випадку ідеального стержня. А саме: чому значення $F_{FEM} = 270$ вдвічі перевищує значення F_{theory} та F_{N10} .
6. Наведений на с. 87 на рис.3.9,б профіль С 80/40/14/3 має особливості форми. Ширина верхніх полицок становить 14 мм, а товщина 3 мм. Тобто відношення їхньої ширини до товщини дорівнює 3.7. Таким чином, верхні полицки мають більшу жорсткість порівняно з нижньою полицкою і ребрами. Було б доцільно пояснити, як така особливість форми поперечного перерізу впливає на поведінку стержня.
7. Наявні й друкарські помилки. Так, на с. 112 в таблиці 4.2.1 наведено порівняння результатів чисельного моделювання з рекомендаціями нормативних документів: ДСТУ 8806:2018 та ДСТУ 9233:2033. Граничне значення кривизни вказано відповідно до ДСТУ 8806:2018 - 0,1% від довжини стержня, ДСТУ9233:2033 – 0.1° від довжини стержня, розмірність результату обчислень не наведена.

Наведені зауваження не знижують наукової та практичної цінності дисертаційної роботи Охтеня І. О. і не впливають на її загальну позитивну оцінку.

8. Висновок

Дисертаційна робота Охтеня Івана Олександровича на тему «Стійкість тонкостінних стержнів відкритого профілю з недосконалами форми» є кваліфікаційним завершеним науковим дослідженням. Тема і зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.23.17 – будівельна механіка. За актуальністю, науковою новизною, практичною і теоретичною значущістю отриманих результатів робота відповідає вимогам, встановленим Департаментом

атестації кадрів вищої кваліфікації МОН України для кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка.

Офіційний опонент
завідувачка кафедри цивільної інженерії,
технологій будівництва і захисту довкілля
Дніпровського державного аграрно-економічного
університету МОН України,
доктор технічних наук, професор

В. Є. Волкова

Підпис д.т.н., професора Волкової В. Є. «засвідчую»

Вчений секретар
Дніпровського державного
аграрно-економічного університету

О. Ю. Береза

