

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу

**МАКСИМ'ЮКА ОЛЕКСАНДРА ВСЕВОЛОДОВИЧА** на тему:

**«Чисельне дослідження формозмінення просторових тіл  
напіваналітичним методом скінченних елементів»,**

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»

Детальне вивчення дисертації Максим'юка Олександра Всеволодовича на тему «Чисельне дослідження формозмінення просторових тіл напіваналітичним методом скінченних елементів» та його наукових публікацій, дозволяє визначити результати щодо загальної оцінки роботи, оцінки їх наукового рівня, зокрема актуальності, обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, наукової новизни, практичного значення.

### **Актуальність обраної теми**

Сучасний розвиток науки і техніки у якості однієї з найбільш важливих висуває проблему підвищення міцності і надійності інженерних конструкцій, забезпечення безпеки людей та навколишнього середовища. Особливо гостро ця проблема постає для об'єктів, експлуатація яких може призводити до досягнення ними граничного стану, пов'язаного з втратою несучої здатності. Відповідальні елементи конструкцій у вигляді просторових тіл, застосовуються у різних галузях сучасної техніки. Під дією зовнішнього термосилового навантаження можуть накопичуватися пластичні деформації та деформації повзучості. Розвиток непружних деформацій супроводжується накопиченням пошкоджень у матеріалі, які можуть призвести до руйнування.

В теперішній час задачі термопружного та термопластичного деформування просторових тіл складної форми та структури з урахуванням пошкоджуваності матеріалу недостатньо досліджені. Особливо важливою проблемою, що не знайшла відображення в наукових дослідженнях, є визначення напружено-деформованого стану під впливом тривалого термосилового навантаження. Найвний досвід розв'язання задач повзучості свідчить, що незначні похибки у визначенні напружень, пов'язані з некоректним урахуванням перелічених факторів, призводять до суттєвих помилок у величинах розрахункового і залишкового ресурсу. Тому вдосконалення та розробка методів чисельного розв'язання задач фізично і геометрично нелінійного деформування просторових тіл та відповідальних об'єктів сучасної техніки, які знаходяться під впливом

довільно розподілених у просторі та часі силових, кінематичних і температурних навантажень є актуальною проблемою будівельної механіки.

Дисертаційна робота Максим'юка О.В. присвячена розв'язанню важливої науково-прикладної задачі про визначення напружено-деформованого стану (НДС) просторових тіл складної форми з урахуванням процесів фізично та геометрично нелінійного деформування, які перебувають під впливом тривалого термосилового навантаження.

**Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій** дисертації забезпечується логічною відповідністю методів дослідження стосовно сформульованої мети та конкретних завдань, використанням аналізу та синтезу, загальноприйнятих теорій механіки деформівного твердого тіла та теорій будівельної механіки

**Достовірність основних положень дисертації підтверджується** отриманням на основі розробленої методики, шляхом їх порівняння з аналітичними, експериментальними та чисельними даними інших авторів для значної кількості контрольних задач. При розрахунку реальних конструкцій проводилися дослідження збіжності результатів залежно від кількості скінченних елементів і членів розкладання, що утримуються, від величини кроку за параметром, від точності розв'язання систем лінійних рівнян. Також перевірялася точність задоволення природним граничним умовам.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у створенні узагальненого чисельного підходу до розв'язання актуальних задач математичного моделювання процесів фізично і геометрично нелінійного деформування просторових тіл складної структури, які знаходяться під впливом довільно розподілених у просторі і часі силових і температурних навантажень, для оцінки напружено-деформованого стану об'єктів сучасної техніки.

**Практичне значення результатів роботи і використання результатів досліджень** полягає в тому, що розроблена методика реалізована у вигляді комплексу програм та може бути використана у проєктно-конструкторській практиці при аналізі напружено-деформованого стану криволінійних призматичних конструкцій з урахуванням залежності характеристик матеріалу від температури, великих пластичних деформацій та деформацій повзучості. Широки

можливості застосування методики та програм ілюструються розв'язанням низки складних прикладних задач.

Результати виконання роботи використані у науково-дослідних роботах і в навчальному процесі на кафедрі будівельної механіки КНУБА і в НДІБМ КНУБА в межах держбюджетних і відомчих науково-дослідних робіт, що виконувались в цьому закладі за пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки «Нові комп'ютерні засоби та технології інформатизації суспільства».

### **Повнота викладу матеріалів в опублікованих працях**

Дисертаційне дослідження підтверджується апробацією отриманих результатів у 16 наукових працях, опублікованих протягом 2019-2024 рр. Серед опублікованих робіт: 1 монографія, 4 статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», 6 статей у наукових фахових виданнях України категорії «А», які цитуються у реферативній базі Web of Science, 5 робіт представлені як тези наукових доповідей у збірниках матеріалів вітчизняних та міжнародних конференцій

### **Оцінка змісту, стилю та мови дисертації, її завершеності, оформлення**

На рецензію представлена дисертація, що складається з анотації, вступу, 4-х розділів з висновками, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 158 сторінок, в тому числі 131 сторінка – основний текст, в якому 56 рисунків, 7 таблиць, 24 сторінки – використаних джерел з 191 найменуванням, 3 сторінки додатків.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими планами, сформульовані мета та задачі досліджень, визначені наукова новизна й практичне значення, обґрунтована достовірність і приведені дані про апробацію результатів дисертації і особистий внесок здобувача. Також подано детальний огляд літератури за темою дисертації.

У першому розділі «Розв'язувальні співвідношення напіваналітичного методу скінчених елементів для фізично і геометрично нелінійних задач» при розробці нових типів СЕ в рамках НМСЕ основним фактором для досягнення високої ефективності їх використання являється вибір системи координатних функцій і методики виведення матриці жорсткості. Апроксимація переміщень вздовж координати розкладу виконувалась змішаною системою координатних функцій, перші два члени належать поліномам Лагранжа, а інші – Міхліна. На основі високоефективної МССЕ побудовані розв'язувальні співвідношення для криволінійних неоднорідних призматичних тіл.

**У другому розділі «Чисельна реалізація напіваналітичного методу скінченних елементів для криволінійних неоднорідних призматичних тіл»** Вибір оптимального з точки зору витрат машинного часу та швидкості збіжності ітераційного процесу алгоритму розв'язання систем лінійних та нелінійних рівнянь НМСЕ є важливим фактором, що впливає на ефективність методу в цілому. Як показали численні дослідження, використання МБІ до розв'язання систем рівнянь НМСЕ для призматичних тіл зі змінними параметрами має ряд важливих переваг у порівнянні з розв'язанням систем традиційним варіантом МСЕ.

При організації обчислювального процесу та його програмній реалізації враховані основні вимоги, які висуваються до програмного забезпечення розрахунку міцності на ПК. Модульна структура розробленої системи програм забезпечує її незамкненість відносно нових класів задач.

**У третьому розділі «Дослідження збіжності і достовірності напіваналітичного методу скінченних елементів для криволінійних неоднорідних призматичних тіл»** Розроблений у рамках напіваналітичного методу підхід до дослідження напружено-деформованого стану неоднорідних криволінійних призматичних тіл з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності потребує обґрунтування його ефективності стосовно традиційного МСЕ та підтвердження достовірності результатів, що одержуються на його основі.

До основних показників, що дозволяють провести зіставлення НМСЕ і МСЕ, відносяться швидкість збіжності розв'язків при збільшенні числа невідомих і обсяг нарахувань, пов'язаних з розв'язанням лінійних і нелінійних рівнянь. Для класу задач збіжність визначається такими факторами, як характер зміни вздовж  $Z^3$  геометричних і механічних параметрів об'єкта. Нерівномірний розподіл механічних характеристик пов'язаний з наявністю початкової неоднорідності матеріалу, розвитком пластичних деформацій та залежністю властивостей матеріалу від температури. Ці фактори впливають і на збіжність ітераційного процесу, оскільки від них залежить обумовленість матриці НМСЕ.

З метою визначення галузі ефективного застосування НМСЕ розглянуто широке коло контрольних прикладів. Шляхом порівняння результатів, отриманих напіваналітичним методом для задач у пружній, пружно-пластичній постановці та з урахуванням великих пластичних деформацій, з результатами інших авторів показано достовірність запропонованої методики.

**У четвертому розділі «Аналіз напружено-деформованого стану тіл складної форми та структури»** наведено розв'язок складних просторових задач,

пов'язаних з оцінкою параметрів НДС реальних об'єктів. Співставлення результатів плоского і просторового розрахунку НДС трубчатого елемента при термосиловому навантаженні показало, що урахування в просторовій постановці згинаючих навантажень на область вирізу викликає перерозподіл напружень в перерізі тіла і тому аналіз даного об'єкта потрібно проводити тільки на базі просторового розв'язку.

Дослідження впливу розмірів фланців на розподіл напружень і зон пластичних деформацій корпусної деталі, навантаженої внутрішнім тиском дозволило підібрати такі розміри фланця, при яких інтенсивність пластичних деформацій в області їх максимальних значень знижується в 3 рази, що дозволяє продовжити ресурс роботи конструкції.

Вивчення пластичного формозмінення полоси прямокутного перерізу в процесі протяжки у плоскій і просторовій постановках показало, що плоска постановка дає результати для різних параметрів, характеризуючих процес, вищих на 30-60% у порівнянні з просторовим розрахунком. У цьому випадку, щоб отримати достовірну картину НДС, необхідно розв'язувати задачу в просторовій постановці.

### **Узагальнюючи оцінку роботи, слід виділити її основні наукові та практичні результати**

- на основі НМСЕ розроблена ефективна чисельна методика розв'язання просторових задач термопружності, термопластичності при малих і великих пластичних деформаціях для криволінійних неоднорідних призматичних тіл;
- розроблений криволінійний неоднорідний призматичний скінчений елемент, оригінальний для дослідження масивних і тонкостінних просторових конструкцій, матриця жорсткості якого виведена у відповідності до методики НМСЕ;
- запропонований підхід розвинутий на випадок великих пластичних деформацій, розв'язувальні співвідношення для дослідження геометрично нелінійних об'єктів побудовані в актуальній конфігурації;
- проведено порівняння ефективності НМСЕ і традиційного МСЕ, що охоплює ряд аспектів: дослідження збіжності ітераційного процесу розв'язання систем лінійних і нелінійних рівнянь в залежності від вибору параметра релаксації, порівняння збіжності апроксимації переміщень при збільшенні числа членів розкладу, викликаному вибором системи базисних функцій і вплив на ефективність метода в цілому;

- розроблений комплекс програм, який реалізує НМСЕ стосовно криволінійних неоднорідних призматичних тіл стосовно фізично і геометрично нелінійних задач.

### **В процесі детального ознайомлення з текстом дисертації виникли наступні зауваження**

1. Збіжність розроблених методів в основному визначалася шляхом порівняння отриманих результатів з іншими методами або з аналітичними розв'язками. Це не може гарантувати стовідсоткової впевненості в правильності отриманих результатів.

2. Можна зробити зауваження щодо виявлених у тексті дисертації деяких дрібних термінологічних хиб, описок, складність прочитання надто дрібного шрифту на рисунках, незначні відхилення від системи одиниць вимірювання SI.

3. З тексту дисертації не зрозуміло, які з результатів, що були прийняті за еталонні при розв'язанні тестових задач, є експериментальними, а які – чисельними даними.

4. В дисертації отримані вагомні результати у напрямку розширення можливостей засобів скінченно-елементного аналізу. У той же час в дисертаційній роботі не наводяться результати порівнянь (кількісні та якісні) чи інші дані про переваги (їх перелік) розробленого в дисертації «нашого національного» програмного продукту над відомими існуючими пакетами МСЕ, що могло б мати комерційний інтерес.

Висловлені зауваження не зменшують важливості наукових результатів і можуть бути враховані автором у подальших дослідженнях.

В цілому дисертаційна робота виконана з дотриманням правил академічної доброчесності.

### **Відповідність дисертації вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії ...»**

Дисертаційна робота Максим'юка Олександра Всеволодовича «Чисельне дослідження формозмінення просторових тіл напіваналітичним методом скінченних елементів» відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», зокрема пп. 5,6,7,8,9. Дисертаційна робота є завершеною самостійною науковою працею, а отримані результати свідчать про важливий внесок в розвиток напрямку дослідження формозмінення.

### **Загальний висновок**

Підсумовуючи усе вищезазначене, можна стверджувати про високий рівень виконання здобувачем поставленого наукового завдання та глибоке оволодіння методологією наукової діяльності.

Наукова значущість отриманих теоретичних та експериментальних досліджень дозволяє визначити представлену роботу як таку, що вирішує важливу наукову проблему будівельної механіки.

Вважаю, що дисертація «Чисельне дослідження формозмінення просторових тіл напіваналітичним методом скінченних елементів», подана на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» є завершеною науковою працею, яка відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44, та напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми КНУБА з вищезазначеної спеціальності, а її автор – Максим'юк Олександр Всеволодович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

Рецензент

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри будівельної механіки  
Київського національного університету  
будівництва і архітектури



Олена КОСТИНА