

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Мартинюка Івана Юрійовича
*«Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах деформування,
континуального руйнування та формозмінення просторових тіл
неканонічної форми та складної структури»*,
поданої до захисту в спеціалізовану вчену раду Д 26.056.04
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка.

Дисертація складається зі вступу, семи розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 120 найменувань, додатків, викладена на 297 сторінках друкованого тексту, серед яких 278 сторінок основного тексту, 127 рисунків, 29 таблиць та 2 додатків.

1. Актуальність теми дослідження

Використання ефективних елементів конструкцій у будівництві дозволяє реалізувати прогресивні рішення, що є достатньо актуальним для України в умовах військової агресії. Складність такого класу задач пов'язана з розробкою удосконалених методик оцінки розподілу напружень та деформацій у відповідних елементах конструкцій з урахуванням їх геометричної та фізичної нелінійності за дії різних типів термосилових впливів.

Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) просторових тіл неканонічної форми та складної, на сьогоднішній день виконується із застосуванням чисельних методів, серед яких найбільшого поширення здобув метод скінчених елементів (МСЕ). Питання розв'язання задач геометрично та фізично нелінійного деформування, континуального руйнування на основі МСЕ при термосиловому навантаженні не знайшло достатнього відображення в наукових дослідженнях. Тому вирішення зазначеної проблеми є актуальною задачею будівельної механіки.

У дисертаційному дослідженні розглядаються тонкостінні, масивні та просторові тіла неканонічної форми з складною структурою. Чисельний розрахунок таких тіл доцільно виконувати на основі напіваналітичного методу скінчених елементів. Аналіз результатів, отриманих вітчизняними та іноземними вченими свідчить, що розв'язання задач в такій постановці не знайшло широкого відображення в наукових публікаціях.

Зважаючи на викладене, тема дисертаційної роботи Мартинюка Івана Юрійовича є актуальною. Це підтверджується також і узгодженням теми дисертації із низкою держбюджетних науково-дослідних робіт, при виконанні яких використовували наукові напрацювання Мартинюка І.Ю.

2. Основні результати дослідження

Дисертація складається зі *вступу*, де представлена загальна характеристика роботи, семи розділів, списку посилань, висновків і додатку, в якому містяться дані про впровадження результатів роботи.

В *першому розділі* подано огляд підходів до опису процесів деформування та руйнування просторових тіл неканонічної форми і складної структури, що дозволило окреслити коло невирішених проблем, а також обґрунтувати задачі дослідження.

У *другому розділі* наведено основні співвідношення теорії пружності, пружнопластичності та повзучості з урахуванням пошкоджуваності матеріалу. Отримано формули для обчислення вузлових реакцій і коефіцієнтів матриці жорсткості скінченних елементів, які у роботі використовувалися в якості апроксимуючих функцій у характерному напрямку рядів Фур'є для випадків змінних або усереднених механічних та геометричних параметрів в поперечному перерізі скінченного елемента.

В *третьому розділі* отримано основні розв'язувальні співвідношення за використання представлень переміщень поліномами, що дозволило значно збільшити кількість випадків для опису граничних умов на торцях тіла. Оптимальність вибору поліномів дозволяє записати такі матриці системи рівнянь, що характеризуються збіжністю ітераційних алгоритмів при розв'язанні відповідних систем.

У цьому розділі також розглянуто алгоритм розв'язання систем лінійних і нелінійних алгебраїчних рівнянь, що виникають у процесі чисельного моделювання та обґрунтовано вибір оптимальної системи координатних функцій, використаної для поліноміального апроксимаційного розкладу переміщень у характерному напрямку з урахуванням вимог до точності та обчислювальної ефективності.

Четвертий розділ містить детальний опис побудови розрахункових співвідношень для геометрично-нелінійного деформування. Тут для врахування зміни геометрії тіла використано, окрім початкової, ще і актуальну конфігурацію. Побудова крокового процесу розв'язання еволюційних задач формозміни здійснена з використанням проміжної відлікової конфігурації, яка вибиралася з урахуванням малості деформацій. При цьому випадок врахування великих деформацій можливий при значних поворотах частин конструкцій, що не змінюють напружено-деформований стан тіла.

З урахуванням вище описаного у розділі сформовано та представлено розв'язувальні рівняння напіваналітичного методу скінчених елементів, застосованого до геометрично нелінійних задач деформування. Описано криволінійний неоднорідний призматичний скінченний елемент, що дозволяє точно враховувати особливості геометрії та фізичної неоднорідності. У цьому розділі сформульовано розв'язувальні співвідношення з урахуванням ефектів формозміни, що забезпечує підвищену точність чисельного моделювання.

П'ятий розділ присвячений опису нового алгоритмічного підходу до дослідження нелінійних крайових задач. Ефективність часу розрахунків за використання цього підходу забезпечується використанням зв'язних векторів

переміщень. У роботі продемонстровано, що при цьому не відбувається втрати точності.

Описаний у цьому розділі підхід реалізовано у вигляді програмного забезпечення (ПЗ), що адаптоване до сучасних персональних комп'ютерів з урахуванням їх обчислювальних характеристик. Розроблене ПЗ призначене для чисельного аналізу призматичних тіл складної форми та структури. У розділі міститься детальний опис архітектури обчислювального комплексу, що охоплює модулі введення, обробки та друку вхідної й вихідної інформації, а також блоки для розв'язання систем лінійних і нелінійних алгебраїчних рівнянь.

В шостому розділі проведено дослідження ефективності застосування напіваналітичного методу скінченних елементів до розв'язання задач механіки деформівного тіла для криволінійних призматичних тіл у пружній та пружно-пластичній постановках. Описано реалізацію даного підходу в середовищі сучасного програмного забезпечення. Представлено особливості чисельного аналізу збіжності методу, включаючи комплексне порівняння ефективності скінченних елементів із урахуванням змінних і усереднених механічних та геометричних характеристик. Додатково виконано порівняльний аналіз збіжності методів Фур'є-розкладу, поліноміальної апроксимації та методу скінченних елементів. Проведено детальне дослідження збіжності класичного та напіваналітичного підходів для моделювання призматичних тіл, що враховують варіативність матеріальних та геометричних параметрів. У роботі обґрунтовано достовірність отриманих результатів, чим підтверджено ефективність застосування напіваналітичного методу скінченних елементів для такого класу задач (підвищеної складності).

В сьомому розділі наведено результати чисельного аналізу напружено-деформованого стану призматичних конструкцій різного призначення, зокрема Т-подібного хвостовика лопатки ротора парової турбіни, демпфувального елемента та елементів кріплення поворотного пристрою. Проведено дослідження впливу товщини фланця на напружено-деформований стан корпусної деталі. Реалізовано комплексне чисельне моделювання процесів деформування та оцінювання ресурсу роботи призматичних тіл за умов термопружно-пластичного навантаження. Окрему увагу приділено моделюванню деформування й оцінці залишкового ресурсу ялинкового хвостовика та лопатки газової турбіни в умовах експлуатаційного термонавантаження. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації геометричних параметрів та прогнозування довговічності енергетичного ресурсу відповідних елементів.

Сформульовані у роботі висновки цілком логічно виходять зі змісту дисертації та є достатньо аргументованими.

В цілому дисертація має чітку структуру, справляє враження завершеної актуальної роботи, що виконана на високому науковому рівні.

3. Наукова новизна дослідження та отриманих результатів

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає в розробці нового чисельного підходу, що базується на ефективному використанні розвиненої бібліотеки скінченних елементів та уніфікованих крокових алгоритмів, який дозволяє проводити комплексне дослідження лінійних, фізично та геометрично нелінійних задач деформування, континуального руйнування, просторових тіл неканонічної форми та складної структури і визначення на цій основі ресурсу об'єктів сучасної техніки, які знаходяться під впливом довільно розподілених в просторі та часі силових, кінематичних і температурних навантажень.

Розроблений у ході дисертаційного дослідження підхід розвинений автором для дослідження напружено-деформованого стану об'єктів з урахуванням великих пластичних деформацій, деформацій повзучості і континуального руйнування. Такий підхід дозволив значно розширити область ефективного застосування МСЕ для дослідження багатьох класів нових задач.

Використання розробленого у ході виконання дисертаційної роботи підходу дозволило вирішити ряд нових складних задач пружного та пружно-пластичного деформування призматичних тіл. На основі аналізу числових результатів виявлено якісні особливості процесів деформування та отримано кількісні оцінки напруженого стану, що має самостійне прикладне значення.

4. Обґрунтованість наукових положень дисертації і достовірність результатів

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, підтверджується логічною послідовністю, коректністю та строгістю використання основних принципів, методів та підходів механіки деформівного твердого тіла, теорії пружності та пластичності та повзучості. Вибір автором фізичних співвідношень для опису процесу в'язко-пружно-пластичного деформування та параметрів континуальної механіки руйнування є аргументованим. Достовірність результатів забезпечується проведеними дослідженнями їх збіжності при згущенні скінчено-елементної сітки та кількості кроків за параметром навантаження та узгодженням отриманих результатів із даними, наведеними в роботах інших авторів.

5. Практичне значення одержаних наукових результатів

Значимість для науки та практики роботи полягає у розробленні автором методики та програмних засобів для її реалізації щодо розв'язання нових складних задач пружного і пружно-пластичного деформування призматичних тіл за дії термосилового навантаження. Під час виконання роботи було реалізовано комплекс програм для проведення числового експерименту.

Розроблені програмні продукти можуть бути використані в проектно-конструкторській практиці підприємств машинобудування, будівництва та інших галузях виробництва.

Потенціал практичного застосування результатів роботи, що отримані автором, у дисертаційному дослідженні наочно продемонстровано на прикладі результатів розрахунку конкретних об'єктів.

Дисертаційне дослідження є частиною науково-дослідних робіт Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА) і Науково-дослідного інституту будівельної механіки КНУБА (НДІБМ КНУБА), що свідчить про зв'язок досліджень з актуальними науковими програмами.

6. Презентація результатів

Дисертаційна робота є результатом тривалих та ґрунтовних досліджень автора, основні положення яких з надмірною повнотою опубліковані у різних наукових виданнях. За темою дисертації опубліковано 33 наукові праці, в тому числі 8 - у фахових виданнях, що входять до переліку категорії "А" та індексуються у міжнародній наукометричній базі Web of Science; 15 статей у фахових журналах категорії "Б"; 9 публікацій у збірниках матеріалів та доповідей українських та міжнародних наукових конференцій та 1 монографія (видана у співавторстві). В опублікованих працях в достатній мірі висвітлені наукові положення, основні висновки і рекомендації дисертаційної роботи.

Апробація результатів дослідження, викладених у роботі, доповідалися і обговорювалися на численних міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, семінарах та провідних наукових центрів зі спеціальності 05.23.17 – будівельна механіка.

Текст автореферату відповідає змісту дисертації і повно його відображає.

7. Зауваження по змісту та оформленню дисертації

1. Не зрозуміло, чи є можливим використання запропонованих алгоритмів для задач немонотонного та циклічного навантаження, зокрема – для задач малоциклової втоми?

2. Для об'єктів, що розраховувались, представлені не всі вихідні дані: не наведені відомості про розроблене програмне забезпечення (у якому програмному середовищі реалізовані програми, наявність вбудованих функцій для автоматичного розбиття об'єкту на СЕ, для візуалізації представлення результатів розрахунку та ін.).

3. В дисертації отримані вагомі 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 розробленого програмного продукту над відомими існуючими пакетами МСЕ, що могло б мати комерційний інтерес.

4. Можна зробити зауваження щодо виявлених у тексті дисертації деяких дрібних термінологічних хиб, описок, складність читання надписів, виконаних надто дрібним шрифтом на рисунках, незначні відступлення від системи одиниць вимірювання СІ.

Наведені зауваження не є принциповими і не знижують наукову цінність й практичне значення дисертаційної роботи.

8. Відповідність роботи вимогам, установленим для докторських дисертацій, загальні висновки

Дисертаційна робота І.Ю. Мартинюка за змістом відповідає спеціальності 05.23.17 – будівельна механіка і є комплексною та завершеною науковою працею. В дисертації вирішено конкретну наукову проблему — розробку універсального підходу до дослідження нелінійних процесів деформування довільно навантажених масивних і тонкостінних криволінійних неоднорідних призматичних тіл складної форми за дії силових і температурних навантажень.

За обсягом виконаних досліджень, актуальністю, науковою новизною, достовірністю, практичною цінністю та впровадженням отриманих результатів дисертаційна робота *«Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах деформування, континуального руйнування та формозмінення просторових тіл неканонічної форми та складної структури»* відповідає усім вимогам щодо докторських дисертацій а її автор — **Мартинюк Іван Юрійович** заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Офіційний опонент

завідувач кафедри прикладної математики
та механіки Луцького національного
технічного університету,
доктор технічних наук, професор



Олена МІКУЛІЧ

Підпис О.А. Мікуліч засвідчую:

Начальник відділу кадрів
Луцького національного технічного
університету



Валентина ПАНАСЮК



ВІРНО:
Начальник відділу кадрів

"14" 04 2008

