

## РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента Лимаренко Юлії Олексіївни  
на дисертаційну роботу Козуба Владислава Юрійовича  
на тему «Скінченно-елементний аналіз з використанням паралельних  
технологій», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»

**Актуальність теми наукового дослідження.** В сучасній промисловості, дослідження поведінки інженерних конструкцій має велике значення для прогнозування працездатності та довговічності новітніх конструкцій. Задля зменшення витрат на експериментальне дослідження використовуються математичні моделі та обчислювальні експерименти. Проте створення математичних моделей потребує великої кількості даних про фізико-механічні властивості матеріалу конструкції, вимог до умов експлуатації та ін. Методи та програми для чисельного розв'язання задач механіки розвиваються протягом багатьох років. З розвитком комп'ютерних технологій обчислювальні експерименти стали потужним та ефективним засобом розв'язання проблем прикладної математики. Поява нових математичних моделей та обчислювальних методів, збільшення обсягу та складності сучасних обчислювальних задач вимагає розробки нових засобів автоматизації побудови комп'ютерних моделей та підготовки початкових розрахункових даних. У разі тривимірних конструкцій використовуються різноманітні чисельні методи, серед яких метод скінченних елементів здобув найбільшу популярність.

Використання мультитядерних процесорів для скінченно-елементного аналізу потребує розробки алгоритмів розрахунків, що забезпечують ефективне використання ресурсів процесора і, відповідно, скорочують час вирішення поставлених завдань. Важливим напрямком, який дозволяє належним чином використовувати можливості сучасних обчислювальних систем, є паралельне виконання обчислень. Із загальним поширенням та

покращенням різноманітних паралельних обчислювальних систем, ця проблематика стає ще більш своєчасною та значущою.

Враховуючи вищенаведене, вважаю, що дисертаційна робота В.Ю. Козуба є актуальною, оскільки серед основних задач дослідження автором були визначені такі завдання: розробити методики вирішення лінійних і нелінійних задач механіки з використанням паралельних технологій; на основі використання паралельних обчислень створити методику формування систем розв'язувальних рівнянь методу скінченних елементів; розробити підходи для розв'язування задач теплопровідності тривимірних ізотропних та анізотропних твердих тіл; розробити програмне забезпечення для реалізації розроблених підходів паралелізації обчислень. Завдання дослідження повною мірою націлені на реалізацію мети, що передбачає розробку результативних алгоритмів для оцінки напружено-деформованого стану тривимірних твердих тіл з різними умовами закріплення під дією силових та термічних навантажень.

Об'єктом дослідження є розробка програмного забезпечення для аналізу напружено-деформованого стану тривимірних твердих тіл з використанням методу скінченних елементів. Об'єкт дослідження належно узагальнений у предметі дослідження, яким є використання технологій паралельних обчислень для моделювання напружено-деформованого стану за допомогою методу скінченних елементів.

Безперечною є **наукова новизна дослідження**, яка полягає в наступному: вперше розроблено алгоритми паралельних обчислень матриць жорсткості скінченних елементів на основі моментної схеми скінченних елементів для задач пружності; розроблено паралельні алгоритми обчислення матриць теплопровідності для розв'язання задач теплопровідності; отримали подальший розвиток алгоритми паралельних обчислень у застосуванні до розв'язування лінійних та нелінійних задач; вперше розроблено застосунок з використанням алгоритмів паралельних обчислень пакету прикладних програм "MIRELA+" для розв'язання задач термопружності конструкцій.

Автором обґрунтовано добір загальнонаукових методів дослідження, які базуються на застосуванні методів математичного моделювання, обчислювальної математики та паралельних обчислень.

**Оцінка змісту дисертації та її основних положень.** Дисертація складається з анотації українською та англійською мовами, переліку публікацій здобувача за темою роботи, вступу, чотирьох розділів та посилань.

У вступі визначено актуальність та представлено обґрунтування теми дослідження, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет, методи дослідження, визначено наукову новизну та практичну значущість; наведено дані щодо апробації роботи, її структури та змісту.

Перший розділ включає у себе аналіз літературних джерел, присвячених застосуванню методу скінчених елементів для вирішення проблем у різних наукових галузях. Одним з напрямків оптимізації скінченно-елементного аналізу фізико-механічних процесів є використання паралельних обчислень. Розглянуто методи паралельного програмування для вирішення фізичних та механічних задач для тіл складної структури. Досліджено особливості паралельних обчислень на всіх етапах розв'язання задач з метою оптимізації використання обчислювальних ресурсів.

У другому розділі для вирішення задач пружності та термопружності запропоновано підхід, заснований на використанні моментної схеми скінчених елементів. На основі розглянутої методики побудовано матриці жорсткості для слабо-стисливих ізотропних та анізотропних твердих тіл. На основі варіаційного підходу до рівнянь теплопровідності, сформовані матриці теплопровідності для твердих тіл, що враховують анізотропію теплофізичних властивостей. Представлені методи дозволяють створювати тривимірні моделі конструкцій, уникнувши спрощень в постановці задачі, та дозволяє формувати рівняння для шаруватих тіл з урахуванням анізотропії як теплофізичних, так і механічних властивостей шарів.

У третьому розділі представлено паралельні алгоритми для формування матриць жорсткості та теплопровідності скінченного елемента,

що базуються на використанні програмно-прикладного пакету «МІРЕЛА+». Описано методику використання паралельних обчислень на етапі формування розв'язувальних рівнянь і обробки результатів розв'язку у вигляді параметрів напруженого стану для подальшого аналізу. Для вирішення нелінійних задач на основі модифікованої схеми методу Ньютона-Канторовича запропоновано підхід з використанням паралельного обчислення нелінійних доданок на кожній ітерації. Розроблено алгоритм розв'язання задачі теплопровідності. Також розроблено підхід до рішення зв'язаних задач термопружності. Програмна реалізація запропонованої методики базується на використанні бібліотеки паралельного програмування OpenMP для систем із спільною пам'яттю.

В четвертому розділі застосовано розроблену методику для вирішення практичних задач пружності та термопружності шаруватих конструкцій. Надано розв'язки задач для конструкції з різними типами шарів – як ізотропними так і анізотропними. Для задач термопружності одержані поля температур та напружень. Для оцінки точності розрахунків проведено аналіз результатів при застосуванні різних сіток розрахункових вузлів, а також проаналізовано вплив використання паралельних технологій на продуктивність розв'язування задач за допомогою методу скінченних елементів.

Результати дисертаційного дослідження висвітлено у 10 наукових працях, з яких: 5 робіт апробаційного характеру; 4 статті, опубліковано у періодичних виданнях України, включених в перелік видань, де можуть бути опубліковані результати дисертаційних досліджень; одна стаття — у міжнародному виданні.

Позитивно оцінюючи наукову працю, можна висловити деякі **положення та зауваження, які мають дискусійний характер**, та потребують уточнень або додаткової аргументації.

1. Доцільно було б провести більш глибокі дослідження ефективності паралельних технологій в залежності від специфіки задач та обсягу даних.

2. Доцільно також було б провести більш детальний порівняльний аналіз результатів використання паралельних технологій у скінченно-елементному аналізі з іншими методами оптимізації часу розв'язування задач механіки конструкцій.

3. При розв'язанні задачі термопружного деформування в роботі не враховується залежність фізико-механічних властивостей матеріалу конструкції від температури.

4. В роботі для розв'язання задач термомеханіки конструкцій використовуються просторові скінченні елементи, але не наведено порівняння їх ефективності з існуючими оболонковими шаруватими СЕ.

В цілому зауваження та рекомендації не впливають на загальне позитивне сприйняття представленої роботи.

**Висновок.** Дисертаційна робота Козуба Владислава Юрійовича «Скінченно-елементний аналіз з використанням паралельних технологій» є завершеною самостійною науковою працею, що містить нові науково обґрунтовані результати особисто проведених здобувачем досліджень, характеризується повнотою та аргументованістю викладення основного змісту як роботи, так і опублікованих праць. Отже, представлена до захисту дисертація відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. №44), а її автор, Козуб Владислав Юрійович, за результатами публічного захисту наукових досліджень у формі дисертації, на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Рецензент

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри програмної інженерії

Запорізького національного університету

Юлія ЛИМАРЕНКО