

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Жушмана Владислава Вікторовича
«Математичне та комп'ютерне моделювання
контактної взаємодії тіл складної форми»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 113 Прикладна математика

Актуальність теми дисертації. У сучасному світі зростають вимоги до точності та ефективності розв'язання інженерних проблем. Від оптимального проектування машин і механізмів до дослідження біомеханічних систем, від аналізу контактів у електронних пристроях до розробки нових матеріалів – усі ці задачі потребують детального моделювання контактних явищ. У зв'язку з цим, математичне моделювання, підкріплене потужними чисельними методами, є ключовим інструментом для проведення наукових досліджень.

Математичні моделі, що описують взаємодію між твердими тілами, є основою для розуміння та прогнозування поведінки складних систем. Комп'ютерне моделювання, зокрема, дозволяє вирішувати задачі, які є занадто складними для аналітичного підходу. Використання чисельних методів, таких як метод скінченних елементів, дає можливість отримати рішення для широкого спектра контактних задач.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в рамках плану наукових досліджень Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара в межах науково-дослідної роботи кафедри комп'ютерних технологій, факультету прикладної математики: «Математичне та комп'ютерне моделювання контактної взаємодії тіл складної форми» (№ держреєстрації 0119U101053, 2019-2021 р.р.) та «Детерміновані та стохастичні алгоритми комп'ютерного моделювання об'єктів та процесів різної природи» (№ держреєстрації 0122U001467, 2022-2024 р.р.).

Формулювання наукової задачі, нове вирішення, яке одержане в дисертації. Основною науковою задачею, яку вирішує автор, є розробка та впровадження нових математичних і комп'ютерних моделей контактної взаємодії тіл складної форми, подальший розвиток аналітичних підходів до розв'язання просторових контактних задач, та створення узагальнюючого алгоритму для організації комплексного підходу в задачах контактної взаємодії. *Об'єктом дослідження* є процеси деформування пружного півпростору під дією поверхнево навантажених абсолютно жорстких штампів різної форми. *Предметом дослідження* виступають компоненти напружено-деформованого стану пружного півпростору, що знаходиться під дією

поверхневого навантажених абсолютно жорстких штампів різної форми, а також ідентифікація площадок контакту для випадків її невідомості.

В дисертаційному дослідженні було вирішено наступні *завдання*:

1. Для задачі про вдавнення в однорідний та ізотропний пружний півпростір абсолютно жорсткого плоского двозв'язного штампа, використовуючи відомий метод, було отримано розрахункові формули аналітичного розв'язку задач для плоских штампів в плані близьких до кільцевих. Розкладання відбувалося за новим малим параметром;
2. Розроблено відповідне програмне забезпечення для проведення розрахунків і аналізу отриманих аналітичних результатів;
3. Проведено скінченно-елементне моделювання процесу контактної взаємодії абсолютно жорсткого штампу з пружним півпростором за допомогою програмного комплексу ANSYS. Виконано комп'ютерне моделювання для розрахунку напружено-деформівного стану. Розроблено групи скінченно-елементних моделей для врахування можливих пошкоджень у разі впливу складних природних умов або агресивного середовища. Створено базу знань для подальшого використання в експертній системі;
4. Сформульовано задачу контактної взаємодії абсолютно жорсткого штампу з пружним півпростором у випадку, коли область контакту заздалегідь невідома. Розроблено підхід для розв'язання цієї задачі з використанням сучасних математичних алгоритмів та інформаційних технологій. Створено експертну систему для ідентифікації форми поперечного перерізу штампу за допомогою програмного засобу CLIPS. Виконано визначення контуру пошкодженої форми штампу з використанням розробленого інструментарію.;
5. Розроблено узагальнюючий алгоритм розв'язання контактної задачі для випадку взаємодії абсолютно жорсткого штампа з пружним півпростором.

Наукова новизна отриманих результатів.

Результати дисертаційної роботи є новими, зокрема:

1. Автором отримано аналітичні розв'язки для задачі про вдавлювання циліндричного абсолютно жорсткого плоского двозв'язного штампа в формі, близької до кільця (трикутного, шестикутного і восьмикутного) в однорідний та ізотропний пружний півпростір використовуючи відомий метод, за допомогою розкладання за новим малим параметром.
2. Було розроблено програмне забезпечення на мові C++ для аналізу і візуалізації аналітичного розв'язку задачі про вдавлювання в однорідний та ізотропний пружний півпростір циліндричного абсолютно жорсткого штампу з двозв'язним поперечним перерізом.

Наведено порівняльні результати демонструють ефективність цього програмного забезпечення.

3. Розроблено програмне забезпечення під ANSYS на специфічній пропрієтарній мові програмування APDL, що призначена для інженерних рішень, яке дозволяє забезпечити додаткові можливості для точнішого моделювання і аналізу та корегувати параметри комп'ютерної моделі через функціонал, відсутній у поточному інтерфейсі користувача програмного комплексу ANSYS.
4. Автором створено і протестував експертну систему для розв'язання задачі ідентифікації форми поперечного перерізу штамп, що діє на пружний півпростір. Автоматизовано процес ідентифікації форми поперечного перерізу штамп використовуючи розроблене програмне забезпечення на мові програмування COOL під програмну систему CLIPS.
5. Було розроблено узагальнюючий підхід до розв'язання задачі ідентифікації форми поперечного перерізу штамп із застосуванням сучасних математичних алгоритмів та інформаційних технологій. Цей підхід поєднує аналітичні методи, програмні системи ANSYS, CLIPS, і розроблені власні програмні додатки, об'єднуючи всі етапи дослідження в один комплексний продукт. Такий інтегрований підхід забезпечує високий рівень точності та ефективності у вирішенні поставлених завдань.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення результатів, отриманих у дисертаційній роботі полягає в розробці нових математичних і комп'ютерних моделей, алгоритмів та підходів, які можуть бути використані як для проведення обчислювальних експериментів, так і для розв'язання реальних інженерних задач. Ці інновації можуть служити науково-методичною основою для перспективних розробок у механіці контактної взаємодії, допомагаючи вирішувати актуальні задачі, що виникають у інженерній практиці під час розрахунків контактних характеристик у конструкціях та спорудах.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків, рекомендацій, які захищаються. Основні положення та висновки дисертації науково обґрунтовані. Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів дисертаційної роботи підтверджуються використанням загальновизнаних принципів, співвідношень і методів механіки деформівного твердого тіла. Результати дослідження гарантуються строгістю застосованого математичного апарату і підтверджуються порівнянням з раніше отриманими результатами, що були отримані різними методами, а також з відомими результатами обчислювальних експериментів інших авторів. Припущення, сформульовані в

роботі, обґрунтовані як їх змістовним характером, так і методами математичного моделювання, що забезпечує надійність і точність зроблених висновків.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи викладено у 5 наукових статтях, дві з яких опубліковано в виданні, що входить до бази даних Scopus. Більшість представлених результатів були отримані автором самостійно, а саме: розроблено програмне забезпечення для розрахунку контактних характеристик жорсткого штампу у формі трикутного кільця з пружним півпростором, створено скінченно-елементні моделі, проведено числові експерименти та порівняно результати з отриманими раніше, створено експертну систему для ідентифікації геометричної форми основи штампу, зміненої внаслідок пошкоджень, забезпечено комунікацію між експертною системою та даними для аналізу результатів.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи були активно представлені та обговорювалися на низці наукових заходів. Протягом 2021-2024 років їх висвітлювали на підсумкових наукових конференціях Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Крім того, результати дослідження обговорювалися на семінарі «Актуальні питання оптимізації та дискретної математики», організованому при Науковій раді НАН України з проблеми «Кібернетика», який функціонує на базі Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Також робота була представлена на міжнародних конференціях, де отримала схвальні відгуки від фахівців у галузі.

Мова і стиль роботи. Матеріал роботи подано логічно та послідовно, написано українською мовою з використанням сучасної наукової термінології. Зміст дисертації повністю відповідає вимогам, які висуваються до наукових праць такого рівня, і характеризується системністю та обґрунтованістю. Основні результати наукових досліджень повністю представлені та детально проаналізовані, що свідчить про високий рівень виконання роботи.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладено у 5 наукових статтях, що опубліковані у виданнях, що внесені до переліку зарубіжних наукових видань та наукових фахових видань України, та додатково відображено в матеріалах 7 міжнародних та всеукраїнських конференцій. Дві з статей опубліковано в виданні, що входить до бази даних Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку використаних джерел, який містить 144 найменування на 16 сторінках, з них 52 кирилицею та 92

латиницею. Загальний обсяг дисертації становить 131 сторінку, з яких основний текст займає 114 сторінок.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, мету та завдання дослідження, наукову новизну і практичну значущість результатів, основні положення для захисту, а також структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі проаналізовано публікації з математичного та комп'ютерного моделювання контактної взаємодії тіл складної форми. Метою огляду було вивчення сучасних підходів до моделювання контактної взаємодії, розв'язання задач ідентифікації контактних площадок і оцінка коректності моделей. Обґрунтовано вибір напрямку дослідження.

У другому розділі представлено задачу контактної взаємодії плоского абсолютно жорсткого двозв'язного штампу та пружного півпростору. Використано алгоритм зведення задачі вдавлювання в ізотропний півпростір жорсткого штампу до задач для кругового кільця, застосовуючи відомий розв'язок задачі про кільцевий штамп у формі подвійного ряду. Застосовано розкладання за новим малим параметром.

У третьому розділі, використовуючи систему автоматизованого проектування ANSYS, розроблено моделі контактної взаємодії плоских абсолютно жорстких штампів з пружним півпростором. Створено моделі контактної взаємодії для однозв'язних та двозв'язних штампів різної форми поперечного перерізу: круг, трикутник, шестикутник, кругове кільце тощо. Порівняння результатів моделювання з аналітичними розв'язками показало задовільне узгодження, що підтверджує адекватність моделей.

На основі цих моделей створено групи з різними типами та ступенями пошкоджень або зношення. Розроблено програмне забезпечення на специфічній мові програмування для ANSYS (APDL) для коригування параметрів моделей, використовуючи функціонал, відсутній у поточному інтерфейсі ANSYS.

У четвертому розділі розроблено експертну систему з використанням програмного інструменту CLIPS для автоматизації процесу прийняття рішень на основі набору правил та знань. Організовано базу знань, що включає інформацію про геометричні характеристики та властивості матеріалів штампів і півпростору, дані про напружено-деформований стан системи штамп-пружний півпростір, а також набір правил і фактів.

Експертна система автоматизує ідентифікацію поперечних перерізів штампів з плоскою підшвою, що тиснуть на пружний півпростір. Розроблено узагальнюючий алгоритм для створення та аналізу моделей контактної взаємодії жорсткого циліндричного штампу з плоскою основою і пружним півпростором під дією стискаючої сили. Як приклади, розв'язано задачі

ідентифікації геометричної форми поперечних перерізів штампів з невідомими пошкодженнями, що тиснуть на пружний півпростір.

Наприкінці роботи наведено *висновки*, що відповідають меті та завданням дослідження, а також описано отримані результати. Представлені висновки є логічними та послідовними.

Окремі дискусійні питання та зауваження.

Є зауваження до дисертаційної роботи, серед яких:

1. В ході виконання наукового дослідження, в межах дисертаційної роботи, автором розроблено програмні додатки. Мало б сенс навести детальний опис кожного застосунку.
2. На рис. 3.9 - 3.12 представлено розподіл нормальних напружень на півпросторі під штампами поперечний перетин яких має форму близьку до кільцевої (з різною формою границь), які мають різні типи пошкоджень, але не зрозуміло яким чином обиралися для розгляду типи пошкоджень і чому саме такі?
3. Хочу відзначити, що у розділі 2 при отриманні розрахункових формул має місце велика кількість складних математичних перетворень. Мені здається, що було б вдало навести, хоча б частково, їх в основному тексті дисертації.
4. В тексті дисертації зустрічаються невдалі формулювання та описки. Зокрема: на сторінці 20 в рядку 21 замість «результатами» треба «результати», на сторінці 74 в рядку 2 замість «променя» треба писати «променю», на сторінці 74 в рядку 14 замість «перевищую» треба «перевищує», на сторінці 96 в рядку 9 замість «мінімуму» треба писати «мінімум».

Наведені зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Загальний висновок.

Дисертаційне дослідження Жушмана Владислава Вікторовича «Математичне та комп'ютерне моделювання контактної взаємодії тіл складної форми» є завершеною і самостійною науковою роботою. Основні наукові результати повністю відображені в наукових публікаціях автора. Тому, вважаю, що дисертаційна робота Жушмана Владислава Вікторовича «Математичне та комп'ютерне моделювання контактної взаємодії тіл складної форми», що представлена на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика, за актуальністю теми, новизною та обґрунтуванням наукових результатів, які мають як теоретичне та практичне значення, відповідає встановленим вимогам відповідно наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», «Порядку

присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 р. зі змінами від 21.03.2022), а її автор Жушман Владислав Вікторович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Рецензент

доцент кафедри комп'ютерних технологій
факультету прикладної математики
Дніпровського національного університету
Імені Олеся Гончара
канд. техн. наук, доцент

Петро ДЗЮБА

Підпис канд. техн. наук,
доц. Дзюби П.А. засвідчую:

Проректор з наукової роботи



Олег МАРЕНКОВ