

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Жушмана Владислава Вікторовича на тему
«Математичне та комп'ютерне моделювання контактної взаємодії тіл
складної форми», подану на здобуття ступеня доктора філософії зі
спеціальності 113 Прикладна математика

Актуальність теми дослідження. Проблема контактної взаємодії є однією з найважливіших в механіці деформівного твердого тіла з огляду на широке коло практичних задач. Класичні праці цього напрямку із фундаментальними аналітичними розв'язками не охоплюють всього різноманіття сучасних постановок. Зокрема, як теоретичний, так і практичний інтерес становлять задачі, коли контактна зона наперед невідома. Застосування сучасних скінченно-елементних пакетів є ефективними при розв'язанні практичних задач зокрема й контактної взаємодії, але стандартних підходів до задач у зазначеній постановці наразі немає. Отже, розробка відповідних алгоритмів та програмних засобів для розв'язання контактних задач із невідомими наперед зонами контакту є актуальною проблемою механіки деформівного твердого тіла.

Дисертаційна робота Жушмана В. В. виконувалась у відповідності з індивідуальним планом підготовки аспіранта кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Проведені дослідження є частиною ініціативних науково-дослідних робіт «Математичне та комп'ютерне моделювання контактної взаємодії тіл складної форми» (№ держреєстрації 0119U101053, 2019-2021 р.р.), «Детерміновані та стохастичні алгоритми комп'ютерного моделювання об'єктів та процесів різної природи» (№ держреєстрації 0122U001467, 2022-2024 р.р.), що виконувалися на кафедрі комп'ютерних технологій ДНУ.

Подана до захисту дисертаційна робота Жушмана В. В. має на меті побудову нових математичних та комп'ютерних моделей контактної взаємодії тіл складної форми, подальший розвиток аналітичних підходів до розв'язання просторових контактних задач. В ній реалізовано комплексний підхід до задач моделювання контактної взаємодії. У роботі створено власний програмний продукт, що реалізує отримання аналітичних розв'язків, проведення чисельних експериментів, створення експертної системи для ідентифікації форми площадки контакту із застосуванням сучасного прикладного програмного забезпечення. Відповідно до поставленої мети сформульовано п'ять завдань. Чотири розділи дисертації повною мірою відображають виконання кожного з поставлених завдань.

Наукова новизна одержаних результатів сформульована у вступі роботи та полягає в такому:

– отримано аналітичні розв'язки для задачі про вдавлювання в однорідний та ізотропний пружний півпростір циліндричного абсолютно жорсткого плоского двозв'язного штампа в формі, близької до кільця (трикутного, шестикутного та восьмикутного, коли межі області контакту не є подібними). *Вперше* було розв'язано задачі для штампів у формі кільця, границі яких близькі до трикутників, шестикутників, восьмикутників, у вигляді розкладання за новим малим параметром.

– розроблено **нове** програмне забезпечення на мові C++ для аналізу і візуалізації аналітичного розв’язку про вдавлювання в ізотропний пружний півпростір циліндричного абсолютно жорсткого штампу поперечний переріз якого займає двозв’язну область.

– **вперше** розроблено програмне забезпечення для використання у скінченно-елементному пакеті ANSYS на специфічній пропрієтарній мові програмування для інженерних рішень (APDL) для корегування параметрів комп’ютерної моделі через функціонал, який відсутній в поточному інтерфейсі користувача програмного комплексу ANSYS.

– створено та протестовано експертну систему для розв’язання задачі ідентифікації форми поперечного перерізу штампу, що діє на пружний півпростір. Для цього **вперше** було застосовано програмну систему CLIPS і розроблено програмне забезпечення на мові програмування COOL під CLIPS.

– **вперше** було створено підхід для розв’язання задачі ідентифікації форми поперечного перерізу штампу із застосуванням сучасних математичних алгоритмів та інформаційних технологій, а саме, розроблено алгоритм, у якому використовуються аналітичні підходи, програмні системи ANSYS, CLIPS, та розроблено власні програмні додатки, які поєднують всі етапи дослідження в один комплексний продукт.

Усі отримані в роботі результати є **науково обґрунтованими**, що забезпечується використанням загальноновизнаних положень, співвідношень та методів механіки деформівного твердого тіла; суворістю використовуваного математичного апарату; порівнянням результатів з отриманими раніше з використанням різних методів, а також з відомими результатами обчислювальних експериментів і експериментальними даними інших авторів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблені в дисертаційній роботі нові математичні та комп’ютерні моделі, алгоритми і підходи можуть бути використані як при проведенні обчислювальних експериментів, так і під час розв’язання практичних інженерних задач. Вони можуть слугувати науково-методичною основою для перспективних розробок в механіці контактної взаємодії для розв’язання актуальних задач, що виникають в інженерній практиці при розрахунках контактних характеристик в конструкціях та спорудах.

Теоретичні та практичні положення роботи є складовою частиною навчальної дисципліни «Комп’ютерне моделювання систем та процесів» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 113 Прикладна математика ОП «Комп’ютерне моделювання та технології програмування» та дисципліни «Методи Computer modeling and simulation» (для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 113 Прикладна математика ОП «Інформатика»). Окремі теоретичні результати використані при виконанні курсових та дипломних робіт студентами факультету прикладної математики ДНУ.

Апробація результатів дисертації є цілком достатньою. Основні результати роботи доповідались і обговорювались на 7 міжнародних наукових конференціях та у цілому – на міжкафедральному науковому семінарі при постійнодіючому семінарі «Актуальні питання оптимізації та дискретної математики» при Науковій раді НАН

України з проблеми «Кібернетика» факультету прикладної математики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Публікації. За темою дисертації автором опубліковано 12 наукових праць, з яких: 4 статті – у провідних наукових фахових виданнях України (3 – категорії Б, 1 – категорії А), що внесені до відповідного переліку МОН України, зокрема 1 стаття у виданні, що індексується в наукометричній базі Scopus; 1 стаття – у періодичному науковому виданні іншої держави, що входить до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science Core Collection; 7 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях, що повністю відповідає вимогам до публікацій, викладеним у 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 (зі змінами). Основний зміст публікацій повністю відповідає змісту дисертації.

Усі основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. В працях, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в отриманні аналітичних результатів, розробленні програмного забезпечення, проведенні числових експериментів, інтерпретації та порівнянні результатів із відомими, отриманими іншими авторами, розробленні експертної системи, формулюванні висновків.

Структура роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, що містять 30 рисунків та 1 таблицю, висновків, списку використаних джерел із 144 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 131 сторінку, обсяг основного тексту 114 сторінок, що відповідає вимогам, встановленим освітньо-науковою програмою «Прикладна математика» спеціальності 113 Прикладна математика.

Оформлення роботи відповідає чинним вимогам. Робота добре структурована, матеріал викладено зрозумілою мовою, розділи роботи логічно пов'язані між собою. Проведені числові експерименти проілюстровані рисунками та графіками із відповідними поясненнями в тексті, що полегшує сприйняття матеріалу. Обсяг графічного матеріалу достатній. У тексті роботи також наведено фрагменти кодів розробленого автором програмного забезпечення, що демонструє високу кваліфікацію автора і в галузі ІТ.

У вступі роботи обґрунтовано актуальність теми дисертації; зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами; сформульовано мету й завдання дослідження; визначено наукову новизну, достовірність, практичне значення одержаних результатів; наведено відомості про апробацію результатів роботи, публікації та особистий внесок автора, структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі наведено аналіз публікацій за проблематикою дисертаційної роботи, а саме, присвячених математичному та комп'ютерному моделюванню контактної взаємодії тіл складної форми. Розглянуто сучасні підходи до питань моделювання контактної взаємодії тіл складної форми, розв'язання контактних задач

ідентифікації форми площадок контакту, а також оцінку коректності побудованих моделей. Логічно обґрунтовано вибір власного напрямку дослідження.

Другий розділ містить постановку задачі контактної взаємодії плоского абсолютно жорсткого двозв'язного в плані штампу та пружного півпростору. Задачу про вдавлення в ізотропний пружний півпростір жорсткого штампу, коли площадка контакту займає двозв'язну область, контур якої складається з двох ліній, що не перетинаються та можуть бути неподібними, зведено до послідовності задач для області контакту в формі кругового кільця. Застосовано відомий розв'язок задачі про кільцевий штамп в формі подвійного ряду, коефіцієнти якого визначаються з рекурентних співвідношень. Використано метод розкладу за малим параметром, який може мати фізичне значення або будь-яке інше, наприклад, характеризувати форму і розміри площадки контакту. Наведено розвинення потенціалу простого шару при відображенні двозв'язної області інтегрування на кругове кільце за допомогою перетворення змінних інтегрування та перетворення координат полюса ядра. В результаті одержано послідовність аналогічних задач для кругового кільця для визначення функцій, що характеризують розподіл нормального тиску під штампом в формі некругового кільця, а також заглиблення, проекції векторів повороту штампу та ліній, які обмежують область контакту. Проведено розрахунки для штампів різної конфігурації, а саме у формі кільця границі яких близькі до трикутників, шестикутників, восьмикутників та штампів лінії контурів якого не є подібні. Отримано аналітичні розв'язки для двозв'язного близького до трикутного, шестикутного та восьмикутного кільцевих в плані штампів (за рахунок іншого розкладання у ряд контуру штампів).

За допомогою створеного автором спеціального програмного забезпечення (мовою C++) виконано аналіз та візуалізацію отриманих результатів. Наведено графіки розподілу нормального тиску під основою штампів різної конфігурації, близьких до кільцевих. Проведено порівняння результатів з отриманими раніше аналітично.

У розділі використано потужний математичний апарат для отримання аналітичних розв'язків та створено власне програмне забезпечення, що свідчить про глибокі теоретичні знання та практичні навички у галузі програмування, засвоєні автором роботи.

У **третьому розділі** розроблено моделі контактної взаємодії плоских абсолютно жорстких штампів з пружним півпростором в пакеті ANSYS. Було проведено чисельні експерименти з власне створеними моделями контактної взаємодії для однозв'язних та двозв'язних в плані штампів за формою поперечного перерізу близькою до круга, трикутника, шестикутника, кругового кільця, кільця, близького до трикутного, тощо. Виконано порівняння отриманих результатів в середині зони контакту з результатами аналітичного розв'язку, яке продемонструвало задовільне узгодження, зроблено висновок про адекватність запропонованих моделей. На основі розроблених моделей було створено групи таких, що мали різні типи і степені пошкоджень або зношення.

Розроблено програмне забезпечення під ANSYS на специфічній пропрієтарній мові програмування для інженерних рішень (APDL) для корегування параметрів

комп'ютерної моделі через функціонал, який відсутній в поточному інтерфейсі користувача програмного комплексу ANSYS. Отримано результати для низки чисельних експериментів, які були збережені у базі для подальшої передачі їх у систему CLIPS для створення експертної системи.

Найцікавішим, як на мене, є **четвертий розділ** як логічне продовження перших трьох, в яких було отримано аналітичні та числові результати. Автором було розроблено власну експертну систему. Для створення і підтримки цієї системи було обрано програмний інструмент CLIPS, що дозволив автоматизувати процес прийняття рішень на основі набору правил та знань, які були створені і використані для розв'язання конкретних завдань. Організована база знань як ключовий компонент експертної системи, що містить інформацію про геометричні характеристики і властивості матеріалів штампів і півпростору, інформацію про напружено-деформований стан системи штамп-пружний півпростір, а також набір правил і фактів. Побудована експертна система дозволила автоматизувати ідентифікацію поперечних перерізів штампів з плоскою подошвою, що тиснуть на пружний півпростір.

Для забезпечення зручності використання та інтеграції програмної системи CLIPS у розроблений проект на мові програмування C++, було створено додаткові бібліотечні файли.

У підсумку запропоновано власний алгоритм для задач створення та аналізу математичних і комп'ютерних моделей контактної взаємодії абсолютно жорсткого циліндричного штампу із плоскою основою з пружним півпростором під дією стискаючої сили. Для прикладу розв'язано задачі ідентифікації геометричної форми поперечних перерізів абсолютно жорстких штампів, що тиснуть на пружний півпростір, але мають пошкодження, які заздалегідь не відомі.

Висновки сформульовано до кожного розділу роботи, найбільш вагомі з них подано в кінці роботи. Загальні висновки відповідають поставленим завданням та логічно впливають з проведеного дослідження.

Як і будь-яка новаторська, оригінальна робота, дисертація Жушмана В. В. не позбавлена певних недоліків, зокрема:

1. У кутових точках, як відомо, мають місце особливості у полях напружень. На с. 74 зазначено, що *«На зовнішній границі контакту маємо значний розбіг в отриманих результатах, що можна було передбачити з причини існуючих різниць у підходах між аналітичним і чисельним розв'язанням такого класу задач. Також треба мати на увазі особливості, що мають місце при розрахунку напруг у кутових зонах контактуючих тіл»*. І далі: *«Результати чисельного розв'язку знаходяться в рамках допустимих відхилень»*. По-перше, ці два твердження суперечать одне одному. По-друге, у чисельних розрахунках варто було скористатися можливостями ANSYS, а саме, застосувати у кутових точках спеціальні скінченні елементи. Адже, якщо йдеться про розрахунки на міцність, увагу слід приділяти саме найнебезпечнішим областям конструкції.

2. Наповнення бази знань, що передуює створенню будь-якої експертної системи – питання чи не найголовніше. У роботі це наповнення проводилося шляхом отримання даних попередніх чисельних експериментів та описано як «отримання даних з умовних датчиків». Хотілося б почути на захисті про можливі практичні шляхи наповнення цієї бази знань.
3. Серед технічних недоглядів відзначу використання поняття «напруги» замість «напруження» (с. 74), орфографічні помилки на кшталт «найдених» замість «знайдених» (сс. 96, 97), розриви в назвах рисунків або відриви від них самих (рис. 3.8, 3.9, 3.11, 3.12, 3.13) тощо.

Проте ці зауваження носять скоріше характер побажань та не знижують в цілому високої оцінки виконаної автором роботи.

Загальний висновок. Вважаю, що здобувач Жушман В. В. в результаті виконання дисертаційної роботи повністю оволодів методологією наукової діяльності, особисто отримав вагомі наукові результати. Дисертація Жушмана Владислава Вікторовича на тему «Математичне та комп'ютерне моделювання контактної взаємодії тіл складної форми» є оригінальною закінченою науковою працею, виконаною на сучасному науковому рівні. Робота відповідає всім 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 (зі змінами), а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Рецензент:

доцент кафедри теоретичної
та комп'ютерної механіки
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара
кандидат фізико-математичних наук,
доцент



Тетяна ХОДАНЕН

Підпис канд. фіз.-мат. наук, доц. Ходанен Т. В. засвідчую
Проректор з наукової роботи



Олег МАРЕНКОВ