

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Левченка Максима Станіславовича на тему:
«Моделювання тріщини між двома п'єзоматеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика

Актуальність теми дисертації. Використання п'єзоелектричних біматеріалів у сучасному виробництві набуває дедалі ширшого застосування, враховуючи ефективність останніх для багатьох задач пов'язаних з проектуванням та виготовленням електронних виробів. Конструктивно складові композитних елементів мають різні механічні та електричні властивості. Розв'язання задач деформування таких матеріалів залежить від безпосереднього наповнення і часто потребує розробки окремих методів і алгоритмів. Руйнування композитних матеріалів має певні відмінності від руйнування однорідних. Вони пов'язані з виникненням особливостей на межі поділу складових та поширенням дефектів між шарами, найчастіше тріщин. Одним з найбільш ефективних підходів в механіці неоднорідних структур для розв'язання таких задач є поєднання методів теорії пружності і теорії функцій комплексної змінної, а також методу скінченних елементів.

Актуальність теми дослідження зумовлена також тим, що в більшості робіт, присвячених дослідженню особливостей напружено-деформівного стану в біматеріальному тілі з тріщиною, розглядаються моделі електроізолюваної та електропроникної тріщин. Однак ці моделі не враховують фізичні властивості середовища що заповнює тріщину. Для вирішення цих неузгоджень було використано модель тріщини зі скінченною електричною проникністю. Особливо цікавим було порівняння результатів отриманих аналітичним методом, з чисельним, для тіл скінченних розмірів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, що проведені в дисертаційній роботі, виконано у відповідності з

основними напрямками наукової діяльності кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара МОН України у межах держбюджетної теми 1-655-21 «Моделі та методи визначення параметрів руйнування п'єзоактивних та п'єзопасивних композитів з дефектами на межі поділу матеріалів», номер державної реєстрації № 0121U109767, 2021– 2023 рр при кафедрі теоретичної та комп'ютерної механіки, що проводяться у відповідності з тематичними планами науково-дослідних робіт Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Формулювання наукової задачі, нове вирішення якої одержане в дисертації. Наукову задачу роботи можна умовно розділити на дві основні частини: першою є розробка та вдосконалення аналітичних методів дослідження тріщини зі скінченною електричною проникністю в біматеріальному п'єзоелектричному тілі. Другою є розробка моделей для чисельного розв'язку аналогічних задач методом скінченних елементів для плоского та просторового випадків. *Об'єктом* дослідження є процес деформування композитів з тріщинами на межі поділу п'єзоелектричних матеріалів з урахуванням діелектричної проникності середовища тріщини та різних типів граничних умов на її берегах. *Предметом* дослідження є електромеханічні поля в околі тріщини, швидкість вивільнення енергії, особливості врахування діелектричної проникності заповнювача тріщини при аналізі п'єзоелектричного біматеріалу.

Основними завданнями дослідження є:

1. Аналіз впливу різних електричних граничних умов на берегах тріщини на її розкриття та швидкість вивільнення енергії .
2. Отримання аналітичного розв'язку для задач з тріщиною зі скінченною електричною проникністю, між двома п'єзоелектричними матеріалами. Побудова аналогічної моделі для тіл скінчених розмірів та знаходження розв'язку методом скінченних елементів для плоского випадку. Розв'язок аналогічної задачі для тривимірного випадку та порівняння отриманих

результатів.

3. Розробка та використання алгоритму методу скінчених елементів для чисельного розв'язання задачі аналогічної попередньому пункту, але без використання заданої апріорі електричної моделі взаємодії берегів тріщини.

Наукова новизна отриманих автором результатів. Дисертаційна робота представляє інтерес як отриманими вперше аналітичними розв'язками так і чисельними результатами сучасних задач механіки руйнування.

Основні нові наукові результати дисертації полягають у наступному.

1. Задача механіки руйнування для тріщини між двома різними п'єзоелектричними матеріалами розв'язана аналітичним і чисельним підходами. Проаналізована електроізолювана модель тріщина. Проведено порівняння результатів для плоского та просторового випадків.

2. Запропоновано підхід до аналізу особливостей напружено-деформівного стану в біматеріальних п'єзоелектричних тілах з тріщиною при різних видах електричних граничних умов на її берегах. Особливої уваги отримала електропровідна модель тріщини в якій була виявлена можливість виникнення макрозон контакту берегів тріщини.

3. Для тріщини зі скінченною електричною проникністю знайдені значення її розкриття, величини електричного потоку та стрибки електричного потенціалу при переході через тріщину, спочатку за допомогою аналітичного підходу, а потім чисельного для плоского та тривимірного випадків. Знайдено також швидкість вивільнення енергії для цієї моделі електричних умов на берегах тріщини.

4. Запропоновано новий метод визначення значень електричного потоку, котрий реалізовано за допомогою скінченно-елементного моделювання як матриці, так і заповнювача тріщини.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що вони дають можливість визначати і досліджувати розподіл фізико-механічних полів у конструкціях з п'єзоелектричних матеріалів та дати оцінки їхньої міцності, тріщиностійкості та експлуатаційного ресурсу. Завдяки розробленим

методикам можливо розв'язання практично важливих плоских і тривимірних задач, для п'єзоелектричних біматеріальних тіл з міжфазними тріщинами при скінченній електричній проникності їх заповнювача. Отримані дані можна використовувати в роботі підприємств по виготовленню електронних виробів.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються. Дисертаційну роботу виконано на сучасному науковому рівні із застосуванням актуальних комп'ютерних технологій прикладної математики. Обґрунтованість і достовірність одержаних результатів забезпечується коректною постановкою задач, використанням точних аналітичних методів теорії функцій комплексної змінної, порівнянням із результатами отриманими раніше іншими авторами, справедливості яких доведено. Порівняльний аналіз результатів аналітичного та чисельного розв'язків, проведений в роботі, обґрунтовує ефективність обраних підходів до розв'язку відповідних задач механіки руйнування.

Особистий внесок здобувача. Більшість результатів наукової роботи автор одержав самостійно, а саме: зведення поставлених задач механіки руйнування до відповідних задач лінійного спряження і отримання аналітичних розв'язків, чисельна реалізація результатів, чисельний розв'язок тестових задач для випадків композитних тіл скінченних розмірів і перевірки достовірності аналітичних результатів.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися автором роботи й обговорювалися на підсумкових наукових конференціях Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара протягом 2018-2023 років, на наукових семінарах кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки і таких міжнародних конференціях: Математичні проблеми технічної механіки. – Київ, Черкаси, Кам'янське. – 2018; Друга міжнародна науково-технічна конференція пам'яті академіка НАН України В. І. Моссаковського (до сторіччя від дня народження). - Дніпро: 2019; Математичні проблеми технічної механіки – Кам'янське. – 2021; Сучасні проблеми механіки та математики – Львів. – 2023.

Мова і стиль роботи. Матеріал роботи викладений логічно і послідовно, написаний українською мовою з використанням сучасної наукової термінології. Зміст дисертації відповідає вимогам, що висуваються до наукових праць такого рівня, з характерною системністю та обґрунтованістю. Основні результати наукових досліджень представлені і проаналізовані в повній мірі.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 5 статей. Дві статті опубліковані у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus. 3 статті входять до переліку наукових фахових видань України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 115 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, огляду літератури, чотирьох розділів, висновку і списку використаних джерел. Робота містить 31 рисунок та 12 таблиць. Список використаних джерел охоплює 138 найменувань, з них 56 кирилицею та 82 латиницею.

У вступі та огляді літератури автором проведено огляд і аналіз підходів і методик до розв'язання подібного класу задач іншими авторами, зосереджено увагу на їх внесок до досліджень відповідних проблем механіки руйнування.

У першому розділі розглянуто два підходи до розв'язку проблеми міжфазної електроізолюваної тріщини в біматеріальному просторі. Перший підхід виконано за допомогою аналітичного методу. Другий був реалізований за допомогою методу скінченних елементів.

У другому розділі розвинено методику дослідження впливу різних електричних граничних умов на тріщині.

У третьому розділі зосереджено увагу на порівнянні аналітичних результатів для тріщини зі скінченною електричною проникністю між двома п'єзоелектричними матеріалами та чисельних для плоского та просторового випадків.

У четвертому розділі розв'язано задачу для випадку п'єзоелектричного біматеріального простору з міжфазною тріщиною, що знаходиться під дією електричного та механічного навантажень. Тут тріщина розглядалась як окрема підобласть тіла з заданими характеристиками заповнювача, яка разом з

матрицею аналізувалась за допомогою методу скінченних елементів

Висновок по роботі висвітлює аналітичні і чисельні результати, отримані автором. Він є логічним і послідовним.

Окремі дискусійні питання і зауваження.

1. При формулюванні проблеми в розділі III компоненти пружної, п'єзоелектричної та діелектричної матриць у визначальних рівняннях задаються з двома індексами, а на Рис. 3.1 – з чотирма. Це в деякій мірі утруднює читання роботи.

2. В дисертації формулами (3.25) в розділі III задаються фізичні характеристики матеріалу PZT-4. Але ці характеристики вже наводились на сторінці 45 в розділі I. Вважаю, що слід було б зробити посилання на ці дані, а не повторювати їх ще раз.

3. При опису особливостей методу скінченних елементів у формулі (1.55) робота зовнішніх зусиль «А» залежить від 4-х змінних, а в наступній формулі ця ж робота залежить від 3-х змінних. Тобто незрозуміло чи може враховуватись в методиці, що розглядається, зсувне напруження, чи ні?

4. В роботі присутні деякі помилки: у другому абзаці ст. 17 замість «а також основних робіт» повинно бути «а також основні роботи»; в реченні після (1.57) замість «Позначивши» повинно бути «Позначимо»; в реченні перед рис. 1.7 «центрального перерізу» повторюється двічі, в роботі 65 списку літератури: замість «theJ-integral» повинно бути «the J-integral».

Вказані зауваження не знижують загальний рівень поданої дисертаційної роботи. Здобувачем отримані вагомні за науковою цінністю результати. В цілому дисертаційна робота є завершеною і актуальною науковою працею.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Левченка Максима Станіславовича на тему «Моделювання тріщини між двома п'єзоматеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача» є актуальною за змістом, містить наукову новизну,

основні результати та висновки дисертації обґрунтовані, мають теоретичне та практичне значення. Рецензована дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Оформлення дисертації відповідає вимогам, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 року. Методичний рівень, наукова новизна і практичне значення, рівень оприлюднення результатів рецензованої роботи відповідає вимогам до дисертацій ступеня доктора філософії згідно положень Постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р. «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а її автор Левченко Максим Станіславович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 11 Математика та статистика за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Рецензент

Доцент кафедри теоретичної
та комп'ютерної механіки
механіко-математичного факультету
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара
канд. фіз.-мат. наук, доцент



О. В. Комаров

Підпис к. ф.-м. наук, доцента Комарова О. В. засвідчую

Проректор з наукової роботи
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара



О. М. Маренков