

ВІДГУК

офіційного опонента д. ф.-м. н, проф. Зеленського А. Г.

на дисертаційну роботу

Левченка Максима Станіславовича

«Моделювання тріщини між двома п'єзоматеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 113 Прикладна математика

Дисертаційна робота Левченка Максима Станіславовича «Моделювання тріщини між двома п'єзоматеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача» присвячена розробці та обґрунтуванню нових розрахункових моделей та методів розв'язання задач деформування композитних п'єзоелектричних матеріалів з тріщинами на межі їх поділу. Детальний аналіз дисертації дозволяє сформулювати наступні висновки щодо актуальності досліджень, наукової новизни та практичного і теоретичного значення отриманих результатів, а також оцінити їх ступінь апробації.

1. Актуальність обраної теми дисертації, її зв'язок з науковими програмами

У механіці суцільного середовища протягом останніх десятиріч значна увага приділяється дослідженням, в яких враховується взаємодія фізичних полів різної природи. Необхідність проведення такого роду досліджень викликана широким використанням в різних галузях сучасної техніки елементів конструкцій, виготовлених із різномірних п'єзоелектричних матеріалів. Часто в таких елементах на межі поділу матеріалів з технологічних або експлуатаційних причин виникають тріщини. Дослідженню міжфазних тріщин у п'єзоелектричних матеріалах присвячено велику кількість публікацій, але в переважній більшості в них розглядаються моделі електропроникної та електроізолюваної тріщин. Однак дані моделі не враховують повноцінно фізичні властивості середовища, що заповнює тріщину, а також характеристики її берегів. Тому в даній роботі в якості основного елемента дослідження розглядається тріщина зі скінченною електричною проникністю, яка найбільш повно враховує ці властивості. Аналіз літературних джерел показує, що до теперішнього часу дослідженням у цьому напрямку приділяється недостатньо уваги, особливо у випадку тривимірної теорії пружності. Саме тому дисертаційна робота «Моделювання тріщини між двома п'єзоматеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача» цілком актуальна, науково важлива, спроможна та перспективна щодо можливостей подальшого теоретичного розвитку і практичного застосування її результатів.

Наголосимо також на тому, що дослідження за темою дисертації М.С. Левченка проводилися в науково-дослідній лабораторії механіки руйнування та пластичного деформування матеріалів кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки механіко-математичного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара в рамках держбюджетної теми «Розрахункові моделі п'єзоелектричних та п'єзоелектромагнітних композитів з тріщинами на межі поділу матеріалів» (номер державної реєстрації № 0121U109767, 2021– 2023 рр.)

2. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, наданих у дисертаційній роботі

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану наукової проблеми і обґрунтуванні та розробленні основної ідеї і теми дисертації, участі у формуванні мети і завдань дослідження; теоретичному обґрунтуванні і розробленні методів і алгоритмів розв'язання поставлених задач; якісному та кількісному аналізу результатів та їх інтерпретації; оформленні статей та доповідей на наукових конференціях. Результати розрахункових та теоретичних досліджень, які виносяться на захист, отримані автором самостійно.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій

Обґрунтованість і достовірність забезпечується коректністю та строгістю постановок задач, математичним обґрунтуванням розроблених і застосованих алгоритмів і методів. Для побудови математичних моделей використовувалися добре апробовані методи лінійної теорії електропружності та механіки руйнування; аналітичні розв'язки будувалися за допомогою методів теорії функцій комплексної змінної, зокрема крайових задач теорії аналітичних функцій; чисельні розв'язки були знайдені за допомогою методу скінченних елементів. Достовірність результатів підтверджується фізичною коректністю зроблених у дисертації висновків та їх узгодженням у часткових випадках з відомими результатами інших авторів.

4. Ступінь новизни результатів, їх теоретичне та практичне значення

В дисертаційній роботі набули подальшого розвитку теоретичні та практичні аспекти застосування розрахункових моделей тріщин між двома п'єзоелектричними матеріалами за різних моделей електричних граничних умов на їх берегах.

До основних наукових результатів, отриманих у роботі, можна віднести:

- розглянута електроізолювана тріщина на межі поділу двох п'єзоелектричних матеріалів для плоского та просторового випадків; для випадку тріщини, набагато коротшої від розміру області,

проведено порівняння аналітичних результатів з числовими і виявлено їх хорошу узгодженість;

- розроблена чисельна методика дослідження тріщин в п'єзоелектричному біматеріальному тілі для різних моделей електричних граничних умов на берегах тріщини, яка включає визначення швидкості вивільнення енергії біля вершин тріщини;
- запропоновано підхід для знаходження механічних та електричних характеристик в задачах з тріщиною зі скінченною електричною проникністю на межі поділу двох п'єзоелектричних матеріалів, при цьому задачі спочатку вирішувались аналітичним методом, а в подальшому й чисельним для плоского та просторового випадків;
- розроблено нову методику знаходження основних електромеханічних характеристик для тріщини зі скінченною електричною проникністю, яка базується на моделюванні за допомогою методу скінченних елементів як п'єзоелектричної матриці, так і заповнювача тріщини.

5. Теоретичне і практичне значення отриманих результатів

Теоретичне значення дисертаційної роботи Левченка М. С. полягає в модифікації методу віртуального закриття тріщини в п'єзоелектричному біматеріалі для постпроцесорного обчислення швидкостей вивільнення енергії в її вершинах, у розробці методики уточнення величини електричного потоку через тріщину зі скінченною електричною проникністю у п'єзоелектричному біматеріалі, яку реалізовано з використанням ітераційної процедури у тривимірному випадку, у побудові числового алгоритму аналізу тріщини зі скінченною електричною проникністю у п'єзоелектричному біматеріалі, який оснований на моделюванні властивостей заповнювача тріщини та подальшої реалізації отриманої моделі за допомогою методу скінченних елементів.

Практичне значення розроблених у роботі методів і алгоритмів полягає в можливості їх застосування в науково-дослідних організаціях і конструкторських бюро для розв'язування прикладних задач при дослідженні електромеханічних полів у п'єзоелектричних композитних тілах, послаблених міжфазними тріщинами, що перебувають під дією зовнішнього електромеханічного навантаження, а також для розв'язування споріднених задач для тіл із тріщинами на межах поділу матеріалів; одержані точні аналітичні розв'язки можна використовувати як еталонні при розробці та апробації наближених чисельних методів розв'язування задач зазначеного класу. Результати дисертаційної роботи можуть бути впроваджені в навчальному процесі та при виконанні курсових і дипломних робіт студентами кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

6. Висновок про апробацію результатів і повноту опублікування основних положень дисертації

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та дістали позитивну оцінку на підсумкових наукових

конференціях Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара протягом 2018-2024 років, а також на 4-х міжнародних наукових конференціях.

Матеріали дисертації достатньо повно опубліковані в 5-х наукових статтях і 3-х тезах конференцій, зокрема в 3-х статтях у наукових фахових виданнях України і в 2-х статтях у виданнях, що індексується науково-метричною базою Scopus.

Зазначені публікації з достатньою повнотою розкривають основний зміст дисертаційної роботи.

7. Аналіз основного змісту роботи

У *вступі* обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, а також сформульовано мету та завдання роботи, її зв'язок з науковими програмами, планами та темами Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара; визначені об'єкт, предмет та методи дослідження; відображені наукова новизна, теоретична та практична цінність результатів дослідження, особистий внесок здобувача.

У *огляді літератури*, який є складовою частиною вступу, проведено аналіз публікацій за проблематикою дисертації.

У *першому розділі* розглянуто електро-ізолювану тріщину між двома п'єзоелектричними матеріалами для плоского та просторового випадків. Для аналітичного підходу використано припущення, що розмір тріщини набагато менший розміру пластини. За допомогою цього було отримано вирази для електромеханічних факторів на межі поділу матеріалів. Невідомі фактори було знайдено за допомогою методу скінченних елементів для плоского та просторового випадків. Результати порівнювались та була виявлена добра їх узгодженість.

У *другому розділі* розглядалася плоска деформація біматеріалу, складеного з двох півпросторів, заповнених різними п'єзоелектричними матеріалами з тріщиною на межі їх поділу. Сформульовано граничні умови на інтерфейсі та механічні і електричні умови на зовнішній границі розрахункової області. Застосовано метод скінченних елементів. Для отримання швидкості вивільнення енергії, реалізована можливість постпроцесорної обробки отриманих числових результатів.

У *третьому розділі* проведено аналіз тріщини зі скінченною електричною проникністю. Спочатку в припущенні, що довжина тріщини набагато менша розміру розрахункової області, було використано аналітичний підхід. На основі умови в області тріщини, аналогічній моделі конденсатора, знайдено рівняння для знаходження електричного потоку. Подібна задача була розв'язана методом скінченних елементів для області скінченних розмірів. Аналіз проводився для плоского та тривимірного випадків. Із застосуванням ітераційного алгоритму знайдені розподіл електричного потоку через тріщину та інші електричні і механічні характеристики.

Четвертий розділ присвячено розгляду задачі плоскої деформації для тріщини між двома п'єзоматеріалами. Ця задача аналогічна задачі попередньому розділу, але тут автор використав інший спосіб моделювання заповнювача тріщини, модулюючи його гіпотетичним матеріалом з електричними властивостями, близькими до реального. Застосовано метод скінченних елементів. Встановлено, що результати знаходження електричного потоку через тріщину добре узгоджуються з результатами попереднього розділу, отриманими з використанням іншої моделі тріщини.

Завершується робота висновками, які впливають зі змісту роботи, є логічними та віддзеркалюють основні результати дисертаційної роботи.

8. Оцінка структури дисертації, мови та стилю викладення

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, огляду літератури, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних літературних джерел із 138 найменувань. Матеріали дисертаційної роботи викладені на 115 сторінках, містять 31 рисунок та 12 таблиць.

Дисертаційна робота написана українською мовою з використанням сучасної наукової термінології. Викладення матеріалу дисертації є логічним і відповідає вимогам до наукових праць, а зміст роботи висвітлює основні результати наукових досліджень.

9. Зауваження щодо змісту дисертації

В результаті розгляду дисертаційної роботи є такі зауваження:

1. У розділі 3 при знаходженні значень електричного потоку для тривимірного випадку було проведено уточнення отриманих значень методом ітерацій. А для плоского, ні. Хоча як можна побачити з отриманих результатів похибка в деяких перерізах досягає майже 10%. Слід було б також провести уточнення і для плоского випадку за допомогою методу ітерацій.
2. На рис. 1.4 вказана структура сітки та розкриття тріщини при $\sigma = 10^4 \text{ МПа}$ та $d = 0$ для плоского випадку, а для просторового випадку розкриття вказано при $\sigma = 10^4 \text{ МПа}$ та $d = 10^{-5} \text{ Кл/м}^2$. Вважаю, що слід було б проводити візуалізацію при однакових значеннях напруження та електричного зміщення, що дало б можливість краще порівнювати результати.
3. В розділі 4 використовуються терміни «заповнювача тріщини» (перед (4.1), 1-й рядок ст. 96) та «наповнювача тріщини» (2-й рядок після Рис. 4.4).. Треба було б використовувати один термін.
4. Незрозуміло, чому назва роботи № 3 на сторінці 13 наведено на українській мові тоді як у списку літературних джерел вона під номером 97 фігурує на англійській мові?
5. В роботі є деякі описки та невдалі формулювання. «Модель, запропонована Comninou M. [62], припускає контакт берегів тріщин

поблизу IX вершин» на сторінці 19, «одному 3 заздалегідь обраному вузлі» після рівняння (2.8), «бімЕтеріалу» після рисунку 2.4.

Однак, зроблені зауваження не носять принципового характеру, не зменшують наукової та практичної цінності дисертаційної роботи і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

10. Відповідність дисертації спеціальності, за якою вона подається до захисту

Дисертаційна робота Левченка М.С. на тему «Моделювання тріщини між двома п'єзоматеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача» повністю відповідає спеціальності 113 Прикладна математика.

11. Загальні висновки

В цілому дисертаційна робота Левченка Максима Станіславовича є завершеним науковим дослідженням на актуальну тему. Отримані науково обґрунтовані аналітичні та числові результати утворюють нову ланку досліджень механіки деформівного твердого тіла.

Враховуючи актуальність, новизну, важливість одержаних автором наукових результатів, їх обґрунтованість і достовірність, а також теоретичну і практичну цінність сформульованих положень і висновків, дисертаційна робота Левченка Максима Станіславовича «Моделювання тріщини між двома п'єзоматеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика, 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 Левченко Максим Станіславович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Офіційний опонент:

професор кафедри будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів
Навчально-наукового інституту

“Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”

Українського державного університету науки і технологій

доктор фізико-математичних наук, професор

Підпис А.Г. Зеленського засвідчую:

