

ВІДГУК

офіційного опонента 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

Актуальність теми дисертації.

Проблеми, що розглянуті в дисертаційній роботі Левченка М.С. є, без сумніву, актуальними, оскільки частини конструкцій, створені з п'єзокерамічних матеріалів, широко застосовуються в різних галузях сучасної техніки. Першочергово важливими є п'єзокерамічні композитні матеріали, що відрізняються легкістю, міцністю, надійністю та стійкістю до впливу навколишнього середовища. Однак експлуатаційні характеристики цих матеріалів залежать в першу чергу від наявності різних дефектів, зокрема міжфазних тріщин, що виникають з технологічних або експлуатаційних причин на межі складових композиту.

Проблемі аналізу тріщин між різними п'єзоелектричними матеріалами присвячено значну кількість досліджень українських та закордонних авторів. З наведеного в дисертації огляду робіт витікає, що на теперішній час найбільш повно досліджені моделі електроізолюваної та електропроникної тріщин між двома п'єзоелектричними матеріалами. Однак ці моделі не враховують в достатній мірі фізичні властивості середовища, що заповнює тріщину та характеристики її берегів. Вказані фактори найбільш повно можуть бути враховані в моделі тріщини зі скінченою електричною проникністю, але до теперішнього часу кількість досліджень у цьому напрямку є недостатньою для адекватного та повного відображення процесів взаємодії фізико-механічних полів у п'єзоелектричних композитах з міжфазними тріщинами, особливо при їх розгляді з позицій тривимірної теорії пружності. Оскільки вищевказані важливі проблеми набули подальшого розвитку в даній дисертаційній роботі, то її тематику можна вважати актуальною і практично важливою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Актуальність дисертаційного дослідження підтверджується також тим, що

дисертаційне дослідження проводилося у відповідності з планами наукових досліджень в науково-дослідній лабораторії механіки руйнування та пластичного деформування матеріалів кафедри теоретичної та прикладної механіки механіко-математичного факультету Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара в рамках 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.

Формулювання наукової задачі, нове вирішення якої одержане в дисертації. *Мета роботи* полягає в розробці методик та розв'язання нових плоских та тривимірних задач механіки руйнування для складених п'єзоелектричних тіл з міжфазними дефектами під дією механічного навантаження та електричних полів, зокрема, розвиток моделі міжфазної тріщини зі скінченною електричною проникністю у п'єзоелектричному біматеріалі.

Для досягнення цієї мети автор вирішив наступні завдання:

- на прикладі електроізолюваної тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами розробив методику її дослідження в плоскому та просторовому випадках. Провів порівняння отриманих результатів та результатів аналітичного аналізу;
- для випадку плоскої задачі проаналізував вплив різних електричних граничних умов на берегах тріщини на її розкриття та швидкість вивільнення енергії біля вершин;
- дослідив тріщину на межі поділу двох п'єзоелектричних матеріалів з урахуванням електричної проникності середовища тріщини аналітично, з використанням задачі лінійного спряження та чисельно за допомогою методу скінченних елементів. В останньому випадку розглянув плоску та просторову моделі тріщини та провів порівняння отриманих результатів;
- для тріщини між двома різнорідними п'єзоелектричними матеріалами побудував розрахункову модель, що враховує діелектричну проникність середовища тріщини без використання рівнянь, що описують взаємодію берегів тріщини та виконав реалізацію цієї моделі за допомогою методу скінченних елементів.

Вважаю, що

- *об'єкт дослідження* – 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,

та

- *предмет дослідження* – електромеханічні поля в околі тріщини, швидкість вивільнення енергії, особливості врахування діелектричної проникності заповнювача тріщини при аналізі п'єзоелектричного біматеріалу адекватно відображають коло завдань, які розв'язуються в даній роботі.

Наукова новизна отриманих автором результатів. Вважаю, що наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. *Розглянута* електроізолювана тріщина між двома п'єзоелектричними матеріалами у плоскому та просторовому випадках. Виконано порівняння отриманих чисельних результатів з аналітичними, що знайдені для тріщини, довжина якої набагато менша від характерного розміру тіла.
2. *Запропонована та реалізована методика* дослідження міжфазної тріщини в п'єзоелектричному композиті скінченних розмірів при різних моделях електричних граничних умов на її берегах. Найбільш детально проаналізовано електропровідну модель, для якої встановлено, що в залежності від інтенсивності зовнішнього електричного поля можливо виникнення макрозон контакту берегів тріщини.
3. *Розроблено чисельно-аналітичний підхід* для моделі тріщини зі скінченною електричною проникністю між двома п'єзоелектричними матеріалами та проведено чисельний аналіз цієї моделі у плоскому і просторовому випадках для тіла скінченних розмірів. У просторовому випадку, для різних поперечних перерізів, ортогональних фронтам тріщини, знайдені її розкриття, величини електричного потоку та стрибки електричного потенціалу при переході через тріщину.

4. *Розроблено методика дослідження міжфазної тріщини зі скінченною електричною проникністю без урахування спрощуючих моделей взаємодії її берегів. Цей підхід базується на скінченно-елементному моделюванні заповнювача тріщини і дозволяє визначити електричний потік через тріщину та інші її механічні та електричні характеристики.*

Практичне значення одержаних результатів. Важливо, що скінченно-елементна методика розв'язування плоских та просторових задач, для п'єзоелектричних біматеріальних тіл з міжфазними тріщинами при скінченній електричній проникності їх заповнювача, яка розроблена в дисертації, може використовуватись в інженерній практиці підприємств, пов'язаних з проєктуванням та виготовленням електронних виробів, що включають п'єзоелектричні компоненти. Це має велике практичне значення, оскільки дозволяє оцінити розподіл фізико-механічних полів у п'єзоелектричних елементах інженерних конструкцій та дати оцінки їхньої міцності, тріщиностійкості та експлуатаційного ресурсу.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, що захищаються. Дисертаційна робота відповідає вимогам до досліджень такого рівня і виконана на належному науковому рівні.

Вважаю, що одержані результати в достатній мірі є обґрунтованими і достовірними. Це забезпечується коректним застосуванням математичного апарату й апробованих рівнянь лінійної теорії електропружності та методів теорії функцій комплексної змінної; зіставленням отриманих результатів у часткових і граничних випадках із вже відомими розв'язками інших авторів; порівнянням розв'язків та значень параметрів руйнування, отриманих аналітично, з результатами, одержаними за допомогою методу скінченних елементів.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором особисто або за його безпосередньої участі. Дисертаційна робота є завершеним дослідженням, виконаним автором самостійно відповідно до програми його досліджень. Зокрема, дисертантом проведено пошук та аналіз літературних джерел; побудова аналітичних розв'язків математичних моделей, сформульованих разом із науковими керівниками, їх чисельна реалізація, отримання розв'язків тестових задач методом скінченних елементів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить вступ, огляд літератури, 4 розділи, висновки та список використаних джерел, що включес 138 найменувань на 15 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 115 сторінок, обсяг основного тексту – 104 сторінки. Робота містить 31 рисунок та 12 таблиць.

У вступі та огляді літератури проведено аналіз публікацій за проблематикою дисертації та визначено внесок досліджень інших авторів до розвитку цього напрямку.

У першому розділі розглянуто плоску та просторову задачі для біматеріального п'єзоелектричного композиту з електро-ізолюваною тріщиною на межі поділу матеріалів.

У другому розділі проведено дослідження впливу різних типів електричних граничних умов на тріщині у п'єзоелектричному біматеріалі на її розкриття та швидкість вивільнення енергії.

У третьому розділі проведено аналітичний та чисельний аналіз тріщини зі скінченною електричною проникністю між двома п'єзоелектричними матеріалами під дією зовнішнього механічного навантаження та електричного поля. Також було проведено аналіз п'єзоелектричного біматеріального композиту з тріщиною на межі поділу матеріалів з позиції тривимірної теорії пружності.

У четвертому розділі розглянуто задачу плоскої деформації, аналогічну до попереднього розділу, але було використано інший спосіб моделювання заповнювача тріщини, без використання рівняння для знаходження електричного потоку вздовж берегів тріщини. Дана модель була досліджена методом скінченних елементів.

Висновки по роботі чіткі, логічні і впливають із теоретичних даних та результатів чисельних експериментів, отриманих автором.

Проте до дисертаційної роботи є деякі **зауваження**.

1. На початку розділу I на рис. 1 розглядається одна тріщина $(-b, b)$. В цьому ж розділі перед формулою (1.15) вводиться множина L , що визначає досить загальні змішані умови на інтерфейсі. Не зрозуміло, як співвідносяться Рис. 1 і L ?
2. В деяких рівняннях розділу 1 для позначення стрибка переміщень і електричного поля при переході через вісь x_1 використовуються квадратні дужки, а в інших розділах – кутові. Бажано було б використовувати одне

позначення, оскільки це утруднює розуміння роботи.

3. В рядку перед рисунком 4.7 вказується, що «напруження практично сходяться до свого номінального значення, рівного заданому напруженню на нескінченності». Але ж у цьому розділі розглядалась скінченна область.
4. У роботі є деякі описки, які не впливають на розуміння тексту дисертації.
Так, наприклад:
 - в тезах № 1 на ст. 14 – нема інтернет-посилання, а в інших тезах на цій же сторінці є;
 - у другому абзаці сторінки 15 замість «Дацишина» повинно бути «Дацишин», оскільки це посилання на роботу Олександри Петрівни Дацишин;
 - в реченнях перед рівнянням (1.31) та після рівняння (1.45) пропущені коми.

Висловлені зауваження не знижують позитивної оцінки роботи в цілому, а також розроблених автором основних наукових положень, висновків та отриманих результатів проведених досліджень.

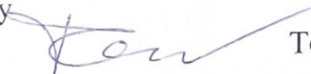
Зміст дисертації відповідає вимогам, що висуваються до наукових робіт такого рівня. Текст дисертації є оригінальним, а її структура цілком узгоджується з назвою, метою і завданням дослідження. Зміст та результати дисертації відповідають спеціальності 113 Прикладна математика.

Загальний висновок. Враховуючи актуальність, новизну, важливість одержаних автором наукових результатів, їх обґрунтованість і достовірність, а також практичну цінність сформульованих положень і висновків, вважаю, що дисертаційна робота Левченка Максима Станіславовича «Моделювання тріщини між двома п'єзоматеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача», 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

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри прикладної математики
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»



Тетяна КАГАДІЙ

Підпис професора Кагадій Т.С.
засвідчую.

Вчений секретар Вченої ради
НТУ «Дніпровська політехніка»



Таїсія КАЛЮЖНА