

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Проректор з наукової роботи**  
Дніпровського національного  
університету імені Олеся Гончара  
**Олег МАРЕНКОВ**



2024 р.

### **ВИСНОВОК**

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації  
Шевельової Наталії Володимирівни на тему «Взаємодія колінеарних тріщин на межі  
поділу п'єзоактивних матеріалів із різними електричними умовами на їхніх  
берегах», представленої на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності  
113 Прикладна математика

Витяг

з протоколу № 5 міжкафедрального семінару  
«Математичні проблеми механіки»  
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара  
від 21 лютого 2024 року

**ПРИСУТНІ: 12 з 14 членів наукового семінару.**

**ГОЛОВУЮЧИЙ:** д-р техн. наук, проф. Дзюба А. П. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**СЕКРЕТАР ЗАСІДАННЯ:** канд. фіз.-мат. наук, доц. Гергель І. Ю. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Члени наукового семінару:**

д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Е. Л. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р фіз.-мат. наук, проф. Гук Н. А. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), в. о. проректора з науково-педагогічної роботи, професор кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р фіз.-мат. наук, проф. Кузьменко В. І. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), професор кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, с.н.с. Адлуцький В. Я. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), старший науковий співробітник НДІ механіки руйнування та

пластичного деформування матеріалів кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Комаров О. В. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Панін К. В. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Ходанен Т. В. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Чернецький С. О. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. техн. наук, доц. Зайцева Т. А. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), завідувачка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук Дзюба П. А. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

**ЗАПРОШЕНІ ФАХІВЦІ (4 особи, з правом голосу):**

канд. фіз.-мат. наук Козакова Н. Л. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцентка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук Степанова Н. І. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла); доцентка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р фіз.-мат. наук, проф. Говоруха В. Б. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), завідувач кафедри вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін Дніпровського державного аграрно-економічного університету,

д-р фіз.-мат. наук, проф. Кагадій Т. С. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), професорка кафедри прикладної математики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

На засіданні присутні аспіранти кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки: асп. Левченко М. С., асп. Семенча О. О., асп. Терьохін Б. І., асп. Шебанов О. Д., асп. Шевельова Н. В.

**Аспіранти участі в голосуванні не брали.**

**Порядок денний:** розгляд і обговорення дисертаційної роботи Шевельової Наталії Володимирівни на тему «Взаємодія колінеарних тріщин на межі поділу п'єзоактивних матеріалів із різними електричними умовами на їхніх берегах», поданої на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика.

Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, протокол № 4 від 19 листопада 2020 р. Науковим керівником призначено канд. фіз.-мат.наук, доц. Ходанен Т.В.

Підготовка здобувача третього рівня вищої освіти здійснюється за акредитованою освітньо-науковою програмою «Прикладна математика» зі спеціальності 113 Прикладна математика (сертифікат про акредитацію освітньої програми 2068, дійсний до 01.07.2027 р.).

### **СЛУХАЛИ:**

Обговорення дисертації аспірантки 4 року навчання Шевельової Наталії Володимирівни на тему: «Взаємодія колінеарних тріщин на межі поділу п'єзоактивних матеріалів із різними електричними умовами на їхніх берегах» на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика.

Перевірку на плагіат здійснювала комісія у складі: канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Комаров О. В., канд. фіз.-мат. наук, доцентка кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Гергель І. Ю., канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Панін К. В.

За результатами перевірки дисертаційної роботи на плагіат програмою «Strikeplagiarism» зроблено висновок: дисертаційна робота Шевельової Н. В. має високий рівень унікальності (93,69 %) і може бути допущена до захисту.

Робота виконана на 136 сторінках і містить такі складові частини: анотація, зміст, вступ, основна частина, висновки, список використаної літератури.

Слово надається аспірантці Шевельовій Н. В. Будь ласка, регламент виступу – 30 хвилин.

### **Аспірантка Шевельова Н. В.**

Шановний голову, шановні члени міжкафедрального семінару, шановні колеги!

**Тема моєї дисертації:** «Взаємодія колінеарних тріщин на межі поділу п'єзоактивних матеріалів із різними електричними умовами на їхніх берегах».

### **Актуальність теми.**

В останні десятиліття п'єзоелектричні та п'єзоелектромагнітні матеріали набувають все ширшого застосування в інженерній практиці. Зокрема, ці матеріали використовуються у виробництві п'єзорезонаторів, п'єзоелектричних трансформаторів, п'єзоелектричних та п'єзوماгнітних актуаторів та інших високотехнологічних виробів. Але п'єзоактивні матеріали є схильними до крихкого

руйнування, спричиненого тріщинами та іншими дефектами їхньої структури. Більше того, вказані високотехнологічні вироби є, як правило, багатокомпонентними, що містять складові, виготовлені з різних п'єзоактивних і п'єзопасивних елементів. Але в області міжкомпонентних з'єднань досить часто наявні тріщини та інші дефекти, які суттєво знижують міцність конструкцій.

Проблемі дослідження тріщин між різними п'єзоелектричними та п'єзоелектромагнітними матеріалами (міжфазних тріщин) присвячено значну кількість досліджень українських та закордонних авторів. Але із огляду робіт, який наведений в дисертації витікає, що наразі відсутні результати досліджень п'єзоактивних композитів з колінеарними міжфазними тріщинами при різних електричних умовах на берегах різних тріщин. Крім того, недостатньо дослідженими залишаються проблеми визначення параметрів руйнування п'єзоелектричних та п'єзоелектромагнітних біматеріальних з'єднань при наявності на межах поділу різнорідних компонент систем тріщин, що мають різну довжину та довільне розташування. Дослідженню саме цих актуальних проблем і присвячено дану роботу.

#### **Мета і завдання дослідження.**

*Метою* даної роботи є розвиток аналітичних методів розв'язання плоских та антиплоских задач для п'єзоактивних біматеріальних тіл з колінеарними міжфазними тріщинами при різних електричних та магнітних умовах на їхніх берегах, а також аналіз електромагнітомеханічного стану п'єзоелектромагнітних біматеріальних тіл з довільними системами тріщин на межах поділу різнорідних компонент.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення таких *завдань*:

- отримати аналітичні представлення механічних, електричних та магнітних компонент через кусково-аналітичні функції для п'єзоактивних матеріалів у плоскому та антиплоскому випадках;
- сформулювати за допомогою цих представлень задачі лінійного спряження і побудувати їхні аналітичні розв'язки для конкретних типів навантажень, наборів тріщин та умов на їхніх берегах;
- визначити аналітично механічні напруження на межі поділу матеріалів поза тріщинами, а також стрибки переміщень, електричного та магнітного потенціалів в області тріщин;
- отримати аналітичні формули для визначення швидкості звільнення енергії при розвитку тріщин та проаналізувати залежності цих параметрів від зовнішнього навантаження, довжин тріщин, їхнього розташування та характеристик матеріалів.

*Об'єкт дослідження* – процеси деформування та руйнування п'єзоелектричних та п'єзоелектромагнітних біматеріальних з'єднань із системами тріщин на межах поділу різнорідних компонент.

*Предмет дослідження* – критичні параметри для систем міжфазних тріщин у п'єзоактивних композитах при різних електричних та магнітних умовах на берегах тріщин.

*Методи дослідження.* Для побудови і аналізу математичних моделей біматеріальних тіл з колінеарними міжфазними тріщинами використано аналітичні методики лінійної теорії пружності, механіки руйнування, теорії функцій комплексної змінної, зокрема, задачі лінійного спряження.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному: вперше запропоновано та реалізовано методику дослідження двох колінеарних тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами під дією антиплоского механічного навантаження та плоского електричного поля при умові, що одна з тріщин є електропровідною, а інша електропроникною; уперше розв'язано антиплоску задачу для п'єзоелектромагнітного біматеріалу з двома тріщинами на межі поділу різнорідних компонент при різних електричних та магнітних умовах на берегах різних тріщин; сформульовано та розв'язано нову плоску задачу для довільної системи колінеарних електро- та магнітопроникних тріщин між двома п'єзоелектромагнітними матеріалами під дією змішаного механічного навантаження; розроблено та реалізовано новий аналітичний підхід до дослідження скінченної множини тріщин на межі поділу п'єзоелектромагнітних матеріалів при умові, що береги тріщин покриті механічно м'якими електродами із заданим електричним зарядом і нульовою магнітною індукцією.

*Обґрунтованість і достовірність* одержаних результатів забезпечується коректним застосуванням математичного апарату й апробованих рівнянь лінійних теорій пружності, електропружності, магнітоелектропружності і точних методів теорії функцій комплексної змінної; зіставленням отриманих результатів у часткових і граничних випадках із вже відомими розв'язками інших авторів; відповідністю результатів розв'язання нових задач фізичній суті досліджуваних явищ.

#### **Практичне значення одержаних результатів**

Співвідношення для визначення параметрів руйнування, що отримані у вигляді аналітичних формул, дозволяють оцінити вплив зовнішніх факторів на можливість розвитку пошкоджень та вказати шляхи підвищення тріщиностійкості композитних конструкцій, виготовлених з п'єзоелектричних та п'єзоелектромагнітних матеріалів. Точні аналітичні розв'язки, отримані в роботі, можуть служити еталонними при розробці й апробації чисельних методів розв'язання задач указанного класу для тіл кінцевих розмірів.

У розділі I розглянуто взаємодію електропровідної та електропроникної колінеарних тріщин уздовж межі поділу двох п'єзоелектричних матеріалів під дією антиплоского механічного навантаження та плоского електричного поля. Тріщини можуть мати довільну довжину та відстань між ними. Вважалося, що електричне поле паралельне берегам тріщин, а поляризація матеріалів паралельна фронтам тріщин.

Використовуючи представлення всіх потрібних електромеханічних величин через кусково-аналітичну вектор-функцію, сформульовано комбіновану крайову задачу Діріхле-Рімана. Додаткові умови для цієї задачі записано на основі умов на нескінченності, однозначності переміщень для обох тріщин і теореми Гауса для електропровідної тріщини.

Наведено аналітичний розв'язок цієї задачі в замкненій формі для довільних довжин тріщин і відстаней між ними та будь-яких зовнішніх електромеханічних навантажень. Представлено аналітичні вирази для напруження зсуву, електричного поля та їхніх коефіцієнтів інтенсивності, а також для стрибків механічного та електричного переміщень. Особливу увагу приділено швидкості звільнення енергії (ШЗЕ). З використанням асимптотичних виразів напружень та електричного поля, механічних та електричних переміщень у вершинах тріщин записано аналітичні вирази для ШЗЕ для електропровідної та електропроникної тріщин. Для часткового випадку значної відстані між тріщинами проведено порівняння числового значення розкриття тріщини з відомим результатом, отриманим іншим методом, і продемонстровано їхню хорошу узгодженість.

У розділі II розглянуто задачу про взаємодію двох штампів з плоскими підошвами, що вдавлюються у пружну ізотропну півплощину. Вважається, що один штамп жорстко зчеплений із півплощиною, а другий знаходиться з нею в умовах гладкого контакту. Дана задача, хоча й суттєво відрізняється своєю фізичною постановкою від розглянутої у першому розділі, проте її розв'язання здійснюється математичними методами, подібними до тих, які застосовані для задачі про електропроникну і електропровідну колінеарні тріщини на межі поділу різних матеріалів. Отже, окрім конкретної наукової мети даного розділу – розв'язання задачі, важливою є мета методологічна, а саме: підкреслити можливість зведення фізично різних задач до близьких математичних моделей і їхнє розв'язання подібними між собою математичними методами.

За методикою, аналогічною використаній у попередній задачі, сформульовано задачу лінійного спряження, яка складається із комбінації рівнянь Діріхле і Рімана, записаних на відповідних ділянках границі півплощини. Розв'язок задачі представлено з використанням двох канонічних розв'язків, що враховують поведінку функцій напружень і стрибків переміщень при підході до кутових точок штампів. Отриманий розв'язок дозволив представити всі потрібні фактори на границі півплощини в досить простому аналітичному вигляді. Зокрема, одержано формули, що дають можливість знайти осадку кожного штампу та форму вільної границі півплощини після деформації. Записано також формули, що визначають розподіл напружень під штампами.

Розділ III присвячено вивченню електромагнітомеханічного стану двох спаяних між собою п'єзоелектромагнітних півпросторів з двома тріщинами на межі поділу матеріалів під дією антиплоского механічного навантаження та електричного

і магнітного полів в площині, ортогональній фронтам тріщини. Вважається, що одна з тріщин є електромагнітопроникною, а інша електромагнітопровідною. Це означає, що перша не перешкоджає проходженню через неї електричного та магнітного полів, а для другої компоненти полів на берегах тріщини дорівнюють нулю.

Із використанням представлень механічних, електричних та магнітних факторів через функції комплексної змінної отримано вирази для цих величин через функції, аналітичні у всій комплексній площині, ортогональній фронтам тріщин, які мають стрибки при переході через тріщини. За допомогою цих представлень проблему зведено до задач лінійного спряження для кусково-аналітичних функцій, для яких отримано точні аналітичні розв'язки. На їхній основі знайдено аналітичні вирази для напружень, електричного та магнітного полів на межі поділу матеріалів поза тріщинами, а також розкриття тріщин і стрибки електричного і магнітного зміщень при переході через тріщини. Для біматеріалу, складеного із різних п'єзоелектромагнітних матеріалів, конкретних значень довжин тріщин, відстаней між ними та зовнішнього механічного, електричного і магнітного навантажень наведено чисельну ілюстрацію одержаних результатів. Зокрема, для різних значень магнітного поля представлено графіки зміни зсувного напруження на межі поділу матеріалів між тріщинами та розкриття електромагнітопровідної тріщини. Показано, що зовнішній магнітний потік суттєво впливає на механічні поля в околі електромагнітопровідної тріщини, а для електромагнітопроникної тріщини цей вплив є незначним.

**Розділ IV** присвячено дослідженню системи тріщин між двома п'єзоелектромагнітними півпросторами. Тріщини можуть мати довільну довжину і розташування, а їхня кількість може бути довільною. Приймається, що береги тріщин є електро- і магнітопроникними, а на нескінченності може бути задано змішане механічне навантаження та електричне і магнітне поля, які не змінюються по координаті, паралельній фронтам тріщин. Це означає, що має місце плоска деформація у площині, ортогональній фронтам тріщин.

Із використанням визначальних рівнянь для п'єзоелектричних та п'єзоелектромагнітних матеріалів побудовано представлення електромагнітомеханічних величин через кусково-аналітичну вектор-функцію. За допомогою цих представлень сформульовано задачу лінійного спряження, яку розв'язано аналітично. З використанням одержаного розв'язку записано в замкненому вигляді всі потрібні для подальшого аналізу механічні, електричні та магнітні компоненти вздовж межі поділу матеріалів. Оскільки отриманий розв'язок має осциляційну сингулярність у вершинах тріщин, то швидкість звільнення енергії є найбільш важливим параметром для визначення можливості розвитку тріщини в цьому випадку. Записано аналітичні вирази для ШЗЕ у всіх вершинах тріщин із використанням асимптотичних представлень усіх полів в околі вершин тріщин та інтегрального методу віртуального закриття тріщини.

Чисельні результати представлені у вигляді графіків і таблиць для різних навантажень, розташування тріщин та їхніх довжин. Особливу увагу приділено випадкам суттєвого зближення окремих тріщин. У таких випадках спостерігається значне зростання швидкостей звільнення енергії, особливо для вершин, що розташовані найближче одна від одної.

У розділі V розглядається біматеріальний простір, що складається з двох напівнескінчених магнітоелектропружних просторів зі скінченним набором тріщин уздовж межі поділу матеріалу. Тріщини можуть мати довільну довжину і розташування, а їхні береги покрито електродами, що мають різний сумарний електричний заряд і нульову сумарну магнітну індукцію. Біматеріальне тіло навантажеться віддаленим змішаним механічним навантаженням, електричним та магнітним полями, які не змінюються по координаті, паралельній фронтам тріщин. Це означає, що має місце плоска деформація у площині, ортогональній фронтам тріщин.

Із використанням представлень електромагнітомеханічних величин через кусково-аналітичні функції сформульовано задачу лінійного спряження Рімана-Гільберта, яку розв'язано аналітично. З умов на нескінченності, однозначності переміщень та значень заданого сумарного електричного заряду та магнітної індукції для кожної тріщини побудовано систему лінійних алгебраїчних рівнянь (відносно довільних констант), розмірність якої дорівнює числу тріщин. Цю систему розв'язано методом Гауса. В результаті всі необхідні механічні, електричні та магнітні компоненти вздовж інтерфейсу представлено в замкненому вигляді.

Показано, що всі поля мають осциляційну сингулярність у вершинах тріщин. Це означає, що поняття коефіцієнта інтенсивності напружень не є зручним для опису процесу руйнування. Тому більшу увагу було приділено визначенню швидкості звільнення енергії. Для цього отримано асимптотичні представлення механічних, електричних і магнітних полів у вершинах тріщин і застосовано метод віртуального закриття тріщини. В результаті одержано формули для ШЗЕ у правій і лівій вершинах будь-якої тріщини.

Отримані аналітичні формули візуалізовано через графіки стрибків переміщення берегів тріщини, напружень, електричних і магнітних полів уздовж межі поділу магнітоелектропружних матеріалів. Швидкості звільнення енергії також наведено у табличній формі для різних вершин тріщин, навантаження, довжин тріщини та їхнього розташування.

За результатами досліджень зроблені наступні ВИСНОВКИ:

- 1) вивчено електромеханічний стан п'єзоелектричного біматеріального тіла з двома двома колінеарними тріщинами під дією антиплоского механічного навантаження та плоского електричного поля, прикладених на нескінченності, при умові, що одна з тріщин є електропровідною, а інша електропроникною.



Проблему зведено до комбінованої крайової задачі Діріхле-Рімана, для якої представлено аналітичний розв'язок. На основі цього розв'язку отримано аналітичні вирази для зсувного напруження та електричного поля на зчеплених ділянках межі поділу матеріалів, стрибки механічних переміщень та електричних зміщень вздовж тріщин, а також ШЗЕ;

- 2) проаналізовано взаємодію двох штампів з плоскими підшвами на границі пружної ізотропної півплощини, один з яких жорстко зчеплений із півплощиною, а інший знаходиться з нею в умовах гладкого контакту. З використанням комплексних потенціалів сформульовано математичну модель, яка аналогічна рівнянням розділу I, що описує взаємодію тріщин. Використовуючи розв'язок цих рівнянь, проаналізовано напруження під штампами та їхні вертикальні переміщення;
- 3) розв'язано антиплоску задачу для п'єзоелектромагнітного біматеріалу з двома тріщинами на межі поділу різнорідних компонент при різних електричних та магнітних умовах на берегах різних тріщин. Проблему зведено до комбінованої крайової задачі Діріхле-Рімана та задачі Гільберта для кусково-аналітичних функцій. З використанням розв'язків цих задач отримано аналітичні вирази для напружень, електричного та магнітного полів на межі поділу матеріалів поза тріщинами, а також розкриття тріщин та стрибки електричного і магнітного зміщень при переході через тріщини;
- 4) розглянуто плоску задачу для довільної кількості колінеарних електро- та магнітопроникних тріщин між двома п'єзоелектромагнітними матеріалами під дією віддаленого поля напружень. Сформульовано задачу лінійного спряження, розв'язок якої представлено в аналітичній формі для будь-якої неперіодичної системи тріщин. На основі цього розв'язку визначено всі потрібні для подальшого аналізу механічні, електричні та магнітні компоненти вздовж межі поділу матеріалів, а також швидкість звільнення енергії для всіх вершин тріщин;
- 5) розроблено та реалізовано аналітичний підхід до дослідження скінченної множини електрично заряджених тріщин на межі поділу п'єзоелектромагнітних матеріалів при умові, що береги тріщин покриті механічно м'якими електродами. З використанням комплексних потенціалів проблему зведено до задачі Рімана-Гільберта, яку розв'язано аналітично. Отримано повні та асимптотичні представлення механічних, електричних і магнітних факторів на межі поділу матеріалів, а також ШЗЕ при розвитку тріщин.

### **ЗАПИТАННЯ ТА ВІДПОВІДІ**

**Д-р техн. наук, проф. Дзюба А. П., професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки:**

Чи доводилося Вам використовувати пристрої з п'єзоелектричних матеріалів або спостерігати п'єзоелектричний ефект на практиці?

**Шевельова Н. В.:**

Так, це, наприклад, запальнички, принтери. Крім того, існує взуття із вбудованими п'єзоелементами, які світяться при ходьбі. Зрозуміло, що п'єзоматеріали знаходять і інші інженерні застосування. Тому, важливою є боротьба з пошкодженнями, зокрема тріщинами, у відповідних технічних пристроях.

**Д-р техн. наук, проф. Дзюба А. П., професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки:**

Які з отриманих раніше результатів, близьких до Вашої тематики, Ви б відзначили як найбільш важливі?

**Шевельова Н. В.:**

У дисертації на 10 сторінках зроблено огляд основних робіт, що мають відношення до дисертації (список літературних джерел містить 119 робіт). Автори найбільш важливих робіт по напрямкам досліджень показані на слайді 1.

Тут я б відзначила класичні монографії по механіці руйнування, в яких викладено найбільш важливі результати по тріщинам, та роботи, присвячені міжфазним тріщинам в ізотропних і п'єзоелектричних матеріалах.

Що стосується результатів дисертації, то вони є новими і раніше не розглядались. Найбільш близькі роботи, які я використовувала при побудові своїх розв'язків для системи тріщин, це роботи Тетяни Володимирівни із співавторами, де розглядалась одна тріщина у п'єзоелектромагнітному матеріалі, (а у мене розглядалась множина тріщин), та роботи професора Лапусти зі співавторами, де системи міжфазних тріщин розглядались між п'єзоелектричними матеріалами, а в моїй дисертації – між п'єзоелектромагнітними.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Говоруха В. Б., завідувач кафедри вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін Дніпровського державного аграрно-економічного університету:**

Поясніть детальніше сенс таблиці 1.4. Таке враження, що Ви там порівнюєте різні величини.

**Шевельова Н. В:**

Так, дійсно, порівнюються  $G_c$  і  $\tilde{G}_c$ . Але  $G_c$  – це граничне значення  $\tilde{G}_c$  при  $\Delta l \rightarrow 0$ . Воно знайдене аналітично в результаті дуже складних і громіздких перетворень. Щоб впевнитись в їх правильності, в пакеті Математика за допомогою програми чисельного інтегрування були обчислені інтеграли (1.51) для різних значень  $\Delta l$ . Результати Ви бачите – узгодження прекрасне, навіть для не дуже маленьких значень  $\Delta l$ .

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Говоруха В. Б., завідувач кафедри вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін Дніпровського державного аграрно-економічного університету:**

Є питання стосовно рисунка 4.2. Ви говорите про три тріщини, а там їх здається набагато більше.

**Шевельова Н. В:**

Ні, тут дійсно 3 тріщини, але розглядаються їхні різні положення. Чорні лінії (I) – це розкриття в 1-му стані. Червоні лінії (II) – це коли права тріщина наблизилась до середньої. Зелені лінії (III) – це коли і ліва тріщина наблизилась до середньої. Можна бачити, як змінюються розкриття і середньої тріщини, і крайніх.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Говоруха В. Б., завідувач кафедри вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін Дніпровського державного аграрно-економічного університету:**

Це більше не питання, а пропозиція. З мого погляду, правильніше було б використовувати замість терміну «швидкість звільнення енергії» термін «швидкість вивільнення енергії».

**Шевельова Н. В:**

Згодна.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гук Н. А., в. о. проректора з науково-педагогічної роботи, професорка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Математичні моделі, що використовуються в роботі, Ви отримали самостійно, чи вони вже є відомими? І вкажіть, які є новими, якщо такі є.

**Шевельова Н. В:**

Визначальні рівняння, рівняння рівноваги, геометричні рівняння (аналог рівнянь Коші), а також аналогічні співвідношення для п'єзоелектричного та п'єзоелектромагнітного матеріалів були відомими. Але далі ми їх перетворювали і будували спеціальні математичні моделі, зручні для розв'язку наших задач. Наприклад, (3.35), 3.36), (3.37), (3.38) – вони були новими.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Кагадій Т. С., професорка кафедри прикладної математики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»:**

Ви розглядали взаємодію електропровідної і електропроникної тріщин, а також електромагнітопровідної і електромагнітопроникної тріщин. Поясніть, в чому різниця між цими типами тріщин?

**Шевельова Н. В:**

Електропроникна тріщина – це модель, яка передбачає, що електричне поле може вільно перетинати тріщину, тобто тріщина не впливає на електричне поле.

Електропровідна модель тріщини описує випадок, коли береги тріщини є електропровідними, наприклад, покриті електродами. На них, як відомо, електричне поле відсутнє. Аналогічно можна охарактеризувати і вплив магнітних ефектів.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Кагадій Т. С., професорка кафедри прикладної математики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»:**

У розділі 3 Ви розглядали вплив і електричного, і магнітного полів. Яке поле, по Вашим розрахункам, виявилось більш впливовим?

**Шевельова Н. В:**

В нашому випадку ми основну увагу звертали на магнітне поле.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Кагадій Т. С., професорка кафедри прикладної математики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»:**

У розділі 2 в дисертації розглядалась задача для штампів. Оскільки вона трохи випадає із проблем для тріщин, яким присвячена Ваша робота, поясніть, чому Ви цей матеріал включили в дисертацію?

**Шевельова Н. В:**

Справа в тому, що математичний апарат, який використовувався у розділі 2, дуже близький до методик, які використовувались в дисертації для задач про тріщини. Тому ця задача була включена в дисертацію.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Кагадій Т. С., професорка кафедри прикладної математики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»:**

Мабуть для демонстрації зв'язку між задачами для тріщин і задачами для штампів?

**Шевельова Н. В.:**

Так.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Е. Л., професорка кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

На слайді 5 Ви вказали, що предметом дослідження є критичні параметри для систем тріщин. Конкретизуйте, будь ласка, які параметри маються на увазі?

**Шевельова Н. В.:**

Це, в першу чергу, швидкість звільнення енергії, а також коефіцієнт інтенсивності напружень.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Е. Л., професорка кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Два параметри?

**Шевельова Н. В.:**

Так.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Е. Л., професорка кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

У Вас в дисертації п'ять розділів. Можете сказати, в яких розділах відомі результати, а в яких Ваші результати? Мабуть, є теоретичні результати, з якими Ви потім порівнюєте Ваші результати. Можете сказати?

**Шевельова Н. В.:**

Я б відповіла так, що, по-перше, тут всі розв'язки є точними аналітичними в усіх розділах, і неточності могли виникнути лише через помилки у викладках. Все багаторазово перевірялось, тому наведені результати є правильними.

Що стосується новизни розв'язків, то більшість з них є новими, і навіть виходячи з цього, у нас було не дуже багато можливостей для порівняння із загальновідомими результатами. Але в розділі 1 дисертації проводились порівняння,

і було отримано практично точне співпадіння. Я можу показати це в дисертації. Ось написано: «Для перевірки отриманих результатів і підтвердження їхньої достовірності було проведено порівняння часткового випадку отриманого розв'язку з іншим відомим розв'язком.» І далі, якщо є бажання, можна ознайомитись.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Е. Л., професорка кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Ваша модель, яку Ви використовували для розв'язання задачі, наприклад, розділу 4, є відомою, чи вона розроблена Вам, чи, може, Вами удосконалена?

**Шевельова Н. В.:**

Ця модель є відомою, але, як я вже говорила, деякі з наших формул перетворювались і знаходились нові моделі.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Е. Л., професорка кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Тобто, це відома модель. А скажіть, чи існують інші моделі для міжфазної тріщини у п'єзоелектромагнітному матеріалі? Чи це єдина модель, яка зустрілась, і Ви її використали? Чи, може, була можливість обрати якусь модель, щоб її удосконалити?

**Шевельова Н. В.:**

У розділі 4 розглянуто модель електропроникних тріщин. Крім того, в розділі 5 розглядалась модель електропровідних (електродованих) тріщин. Результати порівнювались. Основна їхня відмінність у тому, що електропровідна тріщина реагує на електричне поле, а електропроникна не реагує.

**Канд. фіз.-мат. наук Дзюба П. А., доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Я займаюсь експериментальними дослідженнями, тому мене цікавить, чи проводили Ви експериментальну перевірку одержаних результатів?

**Шевельова Н. В.:**

На жаль, ні, оскільки у нас не було доступу до засобів, які могли б адекватно змодельювати особливості задач, що розглядались.

**Канд. фіз.-мат. наук Дзюба П. А., доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

А загалом, це можна зробити?

**Шевельова Н. В.:**

Я думаю, можна, але детально ми це питання не досліджували, оскільки розуміли, що у зв'язку з відсутністю засобів ми це зробити не зможемо.

**Канд. фіз.-мат. наук Дзюба П. А., доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

У Вас майже у всіх розділах зустрічаються досить громіздкі операції з матрицями і векторами (наприклад, при отриманні (4.11) і (4.12)). Як Ви виконували ці операції? Вручну, чи за допомогою якихось програм?

**Шевельова Н. В.:**

На початку роботи, коли розв'язувалась антиплоска задача, в основному приходилось працювати з матрицями і векторами 2-го порядку. Тому багато перетворень проводилось вручну, а потім перевірялась пакетом Математика. В подальшому реалізація усіх перетворень виконувалась в пакеті Математика.

**Канд. фіз.-мат. наук, доц. Комаров О. В., доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Поясніть детальніше, як Ви задовольняєте умови однозначності переміщень (1.21), (1.22)?

**Шевельова Н. В.:**

(1.21) задовольняється з умов на нескінченності (1.14), що дає вирази для довільних коефіцієнтів  $C_1, C_2, D_1, D_2$ . Для виконання ж умови (1.22) формула (1.16) підставляється в (1.22). Після перетворень, з одержаного рівняння знаходиться остання довільна константа  $C_3$ , що і завершує виконання умов однозначності переміщень.

**Канд. фіз.-мат. наук, доц. Гергель І. Ю., доцентка кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Можна відкрити слайд 10? Чому коефіцієнти інтенсивності (КІ) напружень та електричного поля для вершин «с» і «а» Ви вводите по одним формулам ((1.34), (1.35)), а для вершин «b» і «d» по формулам, які суттєво від них відрізняються?

**Шевельова Н. В:**

Справа в тому, що вершини «с» і «а» є вершинами електропровідної тріщини, і біля них розв'язок має кореневу осциляційну сингулярність (*особливість*), а у вершинах «b» і «d» електропроникної тріщини має місце звичайна коренева особливість. Тому КІ вводяться згідно з правилами, встановленими для таких типів сингулярностей.

**Канд. техн. наук, доц. Зайцева Т. А., завідувачка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

У мене питання стосовно задачі для штампів. Можете відкрити слайд 14? Мені здалося, що при розв'язанні цієї задачі Ви використали умову рівноваги тільки для одного, по-моєму, правого, штампа. А як Ви виконували умову рівноваги іншого штампа?

**Шевельова Н. В:**

Дійсно, явно виписане тільки рівняння рівноваги правого штампа. Але попередня (ось ця) умова, що вказує поведінку невідомої функції на нескінченності, згідно з монографією Мусхелішвілі, забезпечує виконання і умови рівноваги лівого штампа.

**Канд. техн. наук, доц. Зайцева Т. А., завідувачка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Перейдіть, будь ласка, на таблицю 3.1. В ній наведено фізичні характеристики п'єзоелектричного матеріалу  $\text{BaTiO}_3$  і п'єзромагнітного  $\text{CoFeO}_4$ . При розрахунках же Ви використовуєте їхні композиції (суміші), тобто п'єзоелектромагнітні матеріали з різним процентним вмістом кожної компоненти. Як Ви знаходите фізичні характеристики верхнього і нижнього п'єзоелектромагнітних матеріалів?

**Шевельова Н. В:**

У розділі 3 це виконується за формулою (3.61). Наприклад, якщо для верхнього матеріалу  $V_f = 0.1$ , то для знаходження, наприклад, компоненти  $C_{11}$  замість  $\theta^c$



підставляється  $C_{11}$ , замість  $\Theta^e$  – 16.6, замість  $\Theta^m$  – 28.6, а  $V_f$ , зрозуміло, береться рівним 0.1. І так для усіх інших компонент.

**Головуючий, д-р техн. наук, проф. Дзюба А. П., професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Запитань більше немає. Переходимо до обговорення дисертаційної роботи. Слово має науковий керівник.

### **ВИСТУП НАУКОВОГО КЕРІВНИКА:**

Щодо поняття «швидкість звільнення енергії» чи «швидкість вивільнення енергії». Справа в тому, що в різних літературних джерелах використовуються обидва варіанти. Можу зараз продемонструвати приклади використання за необхідності. Проте й один, і інший варіанти англійською перекладаються абсолютно однаково, отже, в зарубіжних публікаціях таких проблем не виникає. Ми обрали для себе варіант «звільнення», і в усіх розділах дотримуємося однієї і тієї самої термінології. Погоджуюся, що є деяка семантична різниця в цих поняттях, і ми були би вдячні Володимирі Борисовичу за посилання на якийсь словник. Проте, мабуть, доведеться це залишити в дисертації без змін, бо вона вже пройшла перевірку на плагіат, і формально вже текст не має бути змінений після цього семінару.

Мій офіційний відгук з оцінкою роботи аспірантки 4 року навчання Шевельової Наталії Володимирівни подано до відділу аспірантури та головуючому на засіданні сьогоднішнього міжкафедрального наукового семінару. Коротко зупинюся на основних його положеннях.

Шевельова Наталія Володимирівна у 2020 році закінчила факультет прикладної математики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара за спеціальністю «Прикладна математика», отже, має фундаментальну математичну й ІТ-підготовку. Після закінчення магістратури вона виявила бажання вступити до аспірантури на кафедру теоретичної та комп'ютерної механіки, де й навчається до теперішнього часу.

Протягом навчання в аспірантурі Наталія Володимирівна повністю і своєчасно виконала освітню складову індивідуального навчального плану та індивідуальний план наукової роботи.

У процесі виконання індивідуального плану наукової роботи та підготовки дисертації Наталія Володимирівна працювала систематично, сумлінно і творчо. Основні результати дисертації отримано нею самостійно.

Не буду перераховувати обов'язкові елементи дисертаційної роботи Наталії Володимирівни, вона докладно представила у доповіді, а члени семінару нададуть зараз власну оцінку її здобутків.

Основні результати дисертації опубліковано у 5 статтях, зокрема 2 статті – у виданнях, які мають кuartиль Q2 та проіндексовано у наукометричних базах Scopus та Web of Science Core Collection, 3 статті у фахових виданнях України категорії Б, зокрема 1 стаття у фаховому виданні України, яке проіндексовано у базі Scopus. Отже, відповідно до п. 8 чинного Порядку... кількість публікацій складає 7 одиниць: 3 статті (по 2 співавтора, у фахових виданнях України) та 2 статті у двох різних міжнародних виданнях, віднесених до другого кuartилу (Q2), кожна з яких прирівнюється до 2 публікацій.

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на підсумкових наукових конференціях в ДНУ та на чотирьох міжнародних конференціях, перелік яких є в дисертації. Результати роботи увійшли до заключного звіту по держбюджетній темі кафедри № 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.).

Окрім зазначених здобутків у науковій роботі дисертантки хотіла би відмітити її пунктуальність, відповідальність, відмінні організаторські здібності, надзвичайну працездатність. Вона добре реагує на критику, прагне до самовдосконалення, є активним та досвідченим фахівцем у просуванні ідей важливості освіти в галузі прикладної математики та прикладної механіки – зокрема, вона є модератором сторінки нашої кафедри у Facebook, за що ми їй щиро вдячні. Хотілося б висловити побажання, щоб після закінчення аспірантури Наталія Володимирівна не полишала цю важливу справу, і за умови позитивного рішення нашого семінару та подальшого позитивного рішення разової спеціалізованої вченої ради щодо її дисертації, вже після закінчення аспірантури вона знайшла би можливість продовжувати співпрацю з нашою кафедрою як викладач або як стейкхолдер.

Підсумовуючи, хочу сказати, що мені особисто було надзвичайно приємно працювати з Наталею Володимирівною. Сподіваюся на вашу підтримку її дисертаційної роботи, яку я як науковий керівник рекомендую до захисту на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 11 Математика та статистика зі спеціальності 113 Прикладна математика.

Дякую за увагу.

### **В ОБГОВОРЕННІ ДИСЕРТАЦІЇ ШЕВЕЛЬОВОЇ Н. В. ВЗЯЛИ УЧАСТЬ:**

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Говоруха В. Б., завідувач кафедри вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін Дніпровського державного аграрно-економічного університету:**

Дисертаційна робота і доповідь Шевельової Н. В. складає хороше враження. В ній розглянуто нові задачі, які у багатьох випадках вдалось звести до задач лінійного

спряження і, головне, розв'язати в аналітичному вигляді. Аналітичні розв'язки завжди викликають особливу повагу, оскільки вони мають і самостійне значення, і можуть слугувати еталонними для чисельних.

Заслуговує на увагу новизна тематики досліджень. Наскільки мені відомо, і як зазначено в доповіді, колінеарні міжфазні тріщини в смартматеріалах, на відміну від поодиноких тріщин, досліджені ще недостатньо. А тому саме робота Наталії Володимирівни має особливу цінність. Також хотілось звернути увагу, що у багатьох випадках здобувачу вдалося звести розв'язки поставлених задач до досить простих аналітичних формул і провести їх ґрунтовний аналіз. А це теж дуже кропітка і важлива робота.

Тому я вважаю, що в роботі на достатньому рівні наявні і актуальність, і новизна, і достовірність, тому я рекомендую цю роботу до захисту на разовій раді.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Кагадій Т. С., професорка кафедри прикладної математики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»:**

Я приєднуюсь до Володимира Борисовича щодо оцінки роботи, її актуальності і новизни. Ця робота продовжує тематику робіт наших відомих вчених. Оскільки Наталія Володимирівна отримала фундаментальну ІТ-підготовку, то хочу порадити їй в майбутньому внести в свої статті, доповіді елементи, які полюбляють зараз на конференціях – якісь числові симуляції шляхом використання пакетів Abaqus і Ansys, щоб наглядно продемонструвати, що відбувається з тріщинами. Можливо, це будуть якісь лекції для студентів, якісь конференції тощо. Тобто, просунутись у напрямку візуалізації результатів. Я розумію, що зараз стоять інші цілі щодо захисту. Робота цілісна, відпрацьована, і вона не потребує таких корегувань. А це просто побажання на майбутнє. Якщо Наталія Володимирівна буде підключатись до викладання студентам, то це буде дуже доцільно.

У цілому я дякую і буду підтримувати цю роботу.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Е. Л., професорка кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки:**

Робота мені сподобалась. Тема, безумовно, актуальна, багато розрахунків, всі формальності з публікаціями виконані, і здобувачка, на мій погляд, набула необхідних професійних компетентностей для захисту роботи і отримання ступеня доктора філософії.

Як побажання для покращення доповіді, можу рекомендувати більш чітко проводити межу між відомими і отриманими здобувачкою результатами.

Я підтримую цю роботу і пропоную винести позитивне рішення нашого семінару та рекомендувати її до захисту на разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 113 Прикладна математика.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Кузьменко В. І., професор кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Мені сподобалась ця робота. Ви вивчали вплив контактного тиску на розвиток тріщин. Було б ще цікаво проаналізувати, як розвиток тріщин впливає на контактні напруження. Це обернена задача, і вона була б цікавою для розв'язання в майбутньому. В цілому я підтримую цю роботу.

**Канд. фіз.-мат. наук Дзюба П. А., доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Дисертаційна робота і доповідь Шевельової Н. В. склала хороше враження. В ній розглянуто нові задачі, які у багатьох випадках вдалось звести до задач лінійного спряження і розв'язати в аналітичному вигляді. Аналітичні розв'язки завжди викликають особливу повагу, оскільки вони мають і самостійне значення, і можуть слугувати як еталонні для апробації чисельних алгоритмів. Рекомендую в майбутньому провести відповідні числові експерименти.

Мені особливо імponує, що для більшості задач проведено всебічний параметричний аналіз, результати якого представлено у вигляді графіків і таблиць. Я знайомився з дисертацією, і можу сказати, що на презентацію винесені далеко не всі представлені в дисертації графіки і таблиці. Тобто, і розроблені методики досліджень, і графічні та табличні матеріали будуть представляти інтерес для практичних застосувань і подальших досліджень.

У цілому підтримую усіх попередніх доповідачів, що в роботі на достатньому рівні представлена і актуальність, і новизна, і достовірність, тому я рекомендую її до захисту на разовій раді.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гук Н. А., в. о. проректора з науково-педагогічної роботи, професорка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Шановні колеги! Ми почули змістовне дослідження, його викладення. Хочу звернути увагу, що дуже плідно відбувалась наукова дискусія. Ті навички і софтскіл, яких набула Наталія Володимирівна під час навчання в аспірантурі, дозволили їй на високому науковому рівні відповідати зараз на запитання, на зауваження, які були поставлені до роботи. Також хочу звернути увагу на високий науковий рівень представленої роботи, на те, що здобувач виконала усі необхідні умови, а саме – освітню складову, наукову складову, достатню кількість публікацій, широку апробацію цієї роботи. Тому вважаю, що ми маємо підтримати цю роботу і рекомендувати її для подальшого захисту.

**Канд. техн. наук, доц. Зайцева Т. А., завідувачка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Я, щоб не повторюватись, хочу звернути увагу на таку деталь, яка для мене дуже важлива, тому що для усіх задач знайдені як глобальні параметри, такі як розкриття тріщини, розподіли напружень поза тріщинами та під штампами, так і локальні – коефіцієнти інтенсивності напружень та швидкості звільнення енергії, що визначають можливість розвитку тріщини.

Я повністю підтримую усіх колег, які позитивно оцінили роботу Наталії Володимирівни. Робота актуальна, новизна, достовірність, практична цінність присутні. Тобто, я вважаю, що дисертація готова, і рекомендую її до захисту на разовій раді за спеціальністю «Прикладна математика».

**Головуючий, д-р техн. наук, проф. Дзюба А. П., професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Чи є ще бажуючі виступити? Якщо немає, то я також скажу декілька слів.

Додати щось складно, все сказано, але все ж спробую. Актуальність. Тут слід відзначити наукову школу з механіки матеріалів, яка відома не тільки в Україні, а й на європейському рівні, тому актуальність не викликає сумніву.

Заслугове на увагу представлення дисертаційної роботи. Нікому не вдалось поставити Наталію Володимирівну в складне становище. Це означає, що вона володіє предметом, що робота виконана самостійно.

Формальності виконані в повному обсязі. Достатня кількість публікацій. Вона закінчила факультет прикладної математики, магістратуру, тобто має відповідну підготовку. Вважаю, що у нас немає підстав не проголосувати за те, щоб подати цю дисертацію до захисту і побажати в цьому напрямі успіхів.

Тепер щодо формальної процедури. Якщо немає питань до головуєчого, до здобувачки, то давайте перейдемо до висновку.

## ВИСНОВОК

### Актуальність теми дисертації

Завдяки взаємозалежності механічних, електричних та магнітних полів п'єзоелектричні та п'єзоелектромагнітні матеріали набувають все ширшого застосування в інженерній практиці. Але п'єзоактивні матеріали є схильними до крихкого руйнування, спричиненого тріщинами та іншими дефектами їхньої структури. Більше того, вироби, що включають п'єзоелектричні та п'єзоелектромагнітні матеріали, є, як правило, багатокомпонентними і містять складові, виготовлені з різних п'єзоактивних і п'єзопасивних елементів. Але в області

міжкомпонентних з'єднань досить часто наявні тріщини та інші дефекти, які суттєво знижують міцність конструкцій.

Проблемі дослідження тріщин між різними п'єзоелектричними та п'єзоелектромагнітними матеріалами (міжфазних тріщин) присвячено значну кількість досліджень українських та закордонних авторів. Але із огляду робіт, який наведений в дисертації витікає, що наразі відсутні результати досліджень п'єзоактивних композитів з колінеарними міжфазними тріщинами при різних електричних умовах на берегах різних тріщин. Крім того, недостатньо дослідженими залишаються проблеми визначення параметрів руйнування п'єзоелектричних та п'єзоелектромагнітних біматеріальних з'єднань при наявності на межах поділу різнорідних компонент систем тріщин, що мають різну довжину та довільне розташування. У зв'язку із вказаними обставинами тематику дисертаційної роботи можна вважати актуальною.

**Затвердження теми та плану дисертації.** Тема дисертації затверджена вченою радою Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара 19 листопада 2020 р., протокол № 4. Науковим керівником призначено канд. фіз.-мат. наук, доц. Ходанен Т. В.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з індивідуальним планом підготовки аспіранта кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Дослідження за темою дисертації здійснювалися також 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 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.

**Публікації та особистий внесок здобувача.** За темою дисертації опубліковано 5 статей. Три з них опубліковані у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus Три статті – у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України категорії Б. Основні результати дисертації отримано автором самостійно. Визначення загального плану досліджень належить науковому керівнику Т. В. Ходанен. У працях, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у побудові аналітичних розв'язків, їхній чисельній реалізації, ілюстрації одержаних результатів, порівнянні результатів розрахунків для часткового випадку з відомими. Публікації Шевельової Н. В. відповідають вимогам пп. 8, 9 «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).

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Обґрунтованість і достовірність одержаних результатів забезпечується коректним застосуванням математичного апарату й апробованих рівнянь лінійних теорій пружності, електропружності, магнітоелектропружності і точних методів теорії функцій комплексної змінної; а в часткових випадках їхнім порівнянням із результатами відомих точних аналітичних розв'язків та висновками, що витікають із простих фізичних міркувань.

#### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Запропоновано та реалізовано методику дослідження двох колінеарних тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами під дією антиплоского механічного навантаження та плоского електричного поля при умові, що одна з тріщин є електропровідною, а інша електропроникною. Шляхом зведення проблеми до комбінованої крайової задачі Дірихле-Рімана та її розв'язання отримано аналітичні вирази для електромеханічних факторів на межі поділу матеріалів, зокрема, швидкості звільнення енергії.
2. Розв'язано антиплоску задачу для п'єзоелектромагнітного біматеріалу з двома тріщинами на межі поділу різнорідних компонент при різних електричних та магнітних умовах на берегах різних тріщин. Отримано аналітичні вирази для напружень, електричного та магнітного полів на межі поділу матеріалів поза тріщинами, а також розкриття тріщин та стрибки електричного і магнітного зміщень при переході через тріщини.
3. Сформульовано та розв'язано нову плоску задачу для довільної системи колінеарних електро- та магнітопроникних тріщин між двома п'єзоелектромагнітними матеріалами під дією змішаного механічного навантаження. Для довільної кількості тріщин різної довжини та розташування визначено механічні, електричні та магнітні компоненти вздовж межі поділу матеріалів, а також швидкість звільнення енергії для всіх вершин тріщин.
4. Розроблено та реалізовано новий аналітичний підхід до дослідження скінченної множини тріщин на межі поділу п'єзоелектромагнітних матеріалів при умові, що береги тріщин покриті механічно м'якими електродами із заданим електричним зарядом і нульовою магнітною індукцією. Проаналізовано вплив довжин та взаємного розташування тріщин, а також механічних, електричних та магнітних полів на глобальні та локальні параметри руйнування окремих тріщин.

**Практичне значення результатів дослідження** полягає в тому, що вони дозволяють оцінити вплив зовнішніх факторів на можливість розвитку пошкоджень та вказати шляхи підвищення тріщиностійкості композитних конструкцій, виготовлених з п'єзоелектричних та п'єзоелектромагнітних матеріалів. Точні аналітичні розв'язки, отримані в роботі, можуть служити еталонними при розробці й

апробації чисельних методів розв'язання задач указанного класу для тіл кінцевих розмірів.

### Список опублікованих праць за темою дисертації

*Статті у наукових фахових виданнях України:*

1. Шевельова Н. В., Ходанен Т. В. Взаємодія двох штампів із різними умовами контакту на границі ізотропної півплощини. *Computer Science and Applied Mathematics*. 2021. №1. С. 81-89. DOI: <https://doi.org/10.26661/2413-6549-2021-1-10>.
2. Шевельова Н. В., Ходанен Т. В. Взаємодія міжфазних тріщин з різними електричними та магнітними умовами на їх берегах у п'єзоелектромагнітному композиті. *Проблеми обчислювальної механіки та міцності конструкцій*. 2022. Вип. 34. Т. 1. С. 59-70. DOI: <https://doi.org/10.15421/4222110>.

*Стаття у науковому фаховому виданні України, яке входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus*

3. Шевельова Н. В., Ходанен Т. В. Система колінеарних електрично та магнітно проникних тріщин між двома п'єзоелектромагнітними матеріалами. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Фізико-математичні науки*. 2023. №2. С. 164–167. DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2023/2.29>.

*Статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science Core Collection*

1. Loboda V., Shevelova N., Khodanen T., Lapusta Y. An interaction of electrically conductive and electrically permeable collinear cracks in the interface of piezoelectric materials. *Archive of Applied Mechanics*. 2022. Vol. 92. P. 1465–1480. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02123-3>.
2. Shevelova N., Khodanen T., Chapelle F., Lapusta Y., Loboda V. A set of collinear electrically charged interfacial cracks in magneto-electroelastic bimaterial. *Acta Mechanica*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00707-023-03642-y>.

*Додаткові праці апробаційного характеру*

1. Шевельова Н. В., Ходанен Т. В. Зчеплений та гладкий штамп на границі пружної ізотропної півплощини. *Математичні проблеми технічної механіки-2021*: матеріали міжнародної наукової конференції, 13-16 квітня 2021 р. Дніпро, Кам'янське, 2021. С. 38. URL: [https://www.dstu.dp.ua/uni/downloads/maket\\_zbirnik\\_mater\\_conf\\_mptm2021.pdf](https://www.dstu.dp.ua/uni/downloads/maket_zbirnik_mater_conf_mptm2021.pdf).
2. Shevelova N. V., Khodanen T. V. Piezoelectric bimaterial with electrically conductive and electrically permeable collinear cracks at the interface.



*Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем*: тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції, 23-25 листопада 2022 р., Дніпро: ДНУ, 2022. С. 226. URL: <http://mpzis.dnu.dp.ua/wp-content/uploads/2022/12/MPZIS-2022-1.pdf>.

3. Шевельова Н. В., Ходанен Т. В. Система колінеарних електрично та магнітно проникних тріщин між двома п'єзоелектромагнітними матеріалами. *Сучасні проблеми механіки*: Матеріали VII міжнародної наукової конференції, 28-29 серпня 2023 р., м. Київ, КНУ ім. Тараса Шевченка, Україна. С. 64. URL: [http://lwf.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/08/ABSTRACTS\\_MPM\\_2023\\_UKR.pdf](http://lwf.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/08/ABSTRACTS_MPM_2023_UKR.pdf).
4. Shevelova N. V., Khodanen T. V. An interaction of the interfacial cracks system in piezoelectromagnetic biomaterial. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем*: Тези доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпро: ДНУ, 2023. – С. 44. URL: <http://mpzis.dnu.dp.ua/wp-content/uploads/2023/11/mpzis-2023.pdf>.

**На підставі заслуховування та обговорення доповіді Шевельової Н. В. про основні положення дисертаційної роботи, питань та відповідей на них УХВАЛИЛИ:**

1. Вважати, що за актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованості, наукової та практичної цінності здобутих результатів дисертація Шевельової Наталії Володимирівни на тему «Взаємодія колінеарних тріщин на межі поділу п'єзоактивних матеріалів із різними електричними умовами на їхніх берегах» відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами).

2. Рекомендувати дисертаційну роботу Шевельової Наталії Володимирівни на тему «Взаємодія колінеарних тріщин на межі поділу п'єзоактивних матеріалів із різними електричними умовами на їхніх берегах» до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

3. Клопотати перед вченою радою університету розглянути питання про створення спеціалізованої вченої ради для проведення разового захисту дисертації на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика Шевельової Наталії Володимирівни у такому складі:

№ з/п	Прізвище, ім'я, по батькові	Місце основної роботи, підпорядкування, посада	Науковий ступінь, шифр, назва спеціальності, за якою захищена дисертація, рік присудження	Вчене звання (за спеціальністю, кафедрою), рік присвоєння	Наукові публікації, опубліковані за останні п'ять років, за науковим напрямом, за яким підготовлено дисертацію здобувача
1	2	3	4	5	6
1.	Гук Наталія Анатоліївна (голова)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України, в.о. проректора з науково-педагогічної роботи	доктор фізико-математичних наук 01.02.04-механіка деформівного твердого тіла 2011 р., Україна	професор кафедри комп'ютерних технологій, 2016 р., Україна	<p>1. Guk N. A., Kozakova N. L. Delamination of a Three-Layer Base Under the Action of Normal Loading. <i>J. Math. Sci.</i> 2021. Vol. 254, 89–102. <a href="https://doi.org/10.1007/s10958-021-05290-w">https://doi.org/10.1007/s10958-021-05290-w</a> (Scopus).</p> <p>2. Guk N., Verba O., Yevlakov V. Design of a Recommendation System Based on the Transition Graph. <i>Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.</i> 2021, 3, С. 24–31. DOI: <a href="https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233501">https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233501</a> URL: <a href="http://journals.urau.ua/eejet/article/view/233501">http://journals.urau.ua/eejet/article/view/233501</a> (Scopus).</p> <p>3. Гук Н. А., Єгошкін Д. І. Налаштування та навчання нечіткої моделі для задачі класифікації. <i>Вісник Запорізького національного університету. Серія фіз.-мат. наук.</i> 2021. Вип. 1. С. 33-43. DOI: <a href="https://doi.org/10.26661/2413-6549-2021-1-04">https://doi.org/10.26661/2413-6549-2021-1-04</a> URL: <a href="http://journalsofznu.zp.ua/index.php/phys-math/article/view/2286">http://journalsofznu.zp.ua/index.php/phys-math/article/view/2286</a> DOI: (фахове видання, категорія Б).</p> <p>4. Гук Н. А. Ідентифікація пошкоджень в деформівних системах на основі нечіткого логічного виведення. <i>Проблеми обчислювальної механіки та міцності конструкцій</i>, 2023. – Вип. 37. С. 20–29. (фахове видання, категорія Б).</p>

1	2	3	4	5	6
2.	Говоруха Володимир Борисович (опонент)	Дніпровський державний аграрно-економічний університет Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри вищої математики, фізики та загально-інженерних дисциплін	доктор фізико-математичних наук 01.02.04-механіка деформівного твердого тіла, 2012 р., Україна	професор кафедри вищої математики, 2015 р., Україна	<p>1. V. Govorukha, M. Kamlah Analysis of a mode III interface crack in a piezoelectric bimaterial based on the dielectric breakdown model // <i>Archive of Applied Mechanics</i>. 2020. Vol. 90, No. 5. P. 1201-1213. DOI: <a href="https://doi.org/10.1007/s00419-020-01668-5">https://doi.org/10.1007/s00419-020-01668-5</a> URL: <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s00419-020-01668-5">https://link.springer.com/article/10.1007/s00419-020-01668-5</a>. (<i>Scopus</i>).</p> <p>2. Govorukha, V., Kamlah, M., Zhao, S. An interface crack in piezoelectric bimaterial with one electrically conductive and two electrically permeable zones at its faces. <i>Journal of Mechanics of Materials and Structures</i>. 2022. 17(5). P. 455–468 DOI: 10.1007/s00419-024-02538-0, URL: <a href="https://msp.org/jomms/2022/17-5/jomms-v17-n5-p04-s.pdf">https://msp.org/jomms/2022/17-5/jomms-v17-n5-p04-s.pdf</a>. (<i>Scopus</i>).</p> <p>3. Govorukha, V., Kamlah, M. Analysis of an interface crack with multiple electric boundary conditions on its faces in a one-dimensional hexagonal quasicrystal bimaterial. <i>Archive of Applied Mechanics</i>, 2024, DOI: 10.1007/s00419-024-02538-0 (<i>Scopus</i>).</p>
3.	Кагадій Тетяна Станіславівна (опонент)	Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри прикладної математики	доктор фізико-математичних наук 01.02.04-механіка деформівного твердого тіла 2005 р., Україна	професор кафедри вищої математики, 2008 р., Україна	<p>1. Kagadiy T.S., Shporta A.G. Onoprienco O.D. Asymptotic method in two-dimensional problems of electroelasticity. <i>Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu</i>. 2020-02   journal-article. DOI: <a href="https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-1/130">10.33271/nvngu/2020-1/130</a> (<i>Scopus</i>).</p> <p>2. Kagadiy T.S., Shporta A.G. Mathematical modeling in the calculation of reinforcing elements. <i>Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu</i>. 2019-10   journal-article. DOI: <a href="https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-5/10">10.29202/nvngu/2019-5/10</a> (<i>Scopus</i>).</p> <p>3. Кагадій Т. С. , Шпорта А. Г. , Білова О. В. , Щербина І. В. Математичне моделювання в задачах геометрично нелінійної</p>

1	2	3	4	5	6
					<p>теорії пружності. <i>Прикладні питання математичного моделювання</i>. 2021. Т. 4, №1. С. 103–110.          DOI: <a href="https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2021.4.1.11">https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2021.4.1.11</a>, 2021  <b>(фахове видання, категорія Б).</b></p>
4.	<p>Зайцева Тетяна Анатоліївна (рецензент)</p>	<p>Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри комп'ютерних технологій</p>	<p>кандидат технічних наук, 01.02.04-механіка деформівного твердого тіла, 1993 р., Україна</p>	<p>доцент кафедри комп'ютерних технологій, 2000 р., Україна</p>	<p>1. Obodan N. I., Zaitseva T. A., and Fridman O. D., Contact problem for a rigid punch and an elastic half space as an inverse problem, <i>Journal of Mathematical Sciences</i>. Vol. 240, No. 2, July, 2019 – P. 184-193          DOI: <a href="https://doi.org/10.1007/s10778-021-01081-7">10.1007/s10778-021-01081-7</a>          URL: <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s10778-021-01081-7">https://link.springer.com/article/10.1007/s10778-021-01081-7</a> (Scopus).</p> <p>2. Зайцева Т. А., Жушман В. В. Про побудову скінченно-елементної моделі взаємодії двозв'язного в плані штампа з пружним півпростором. <i>Питання прикладної математики і математичного моделювання</i>, №21, Дніпро: Ліра, 2021, С. 46-52.          DOI: <a href="https://doi.org/10.15421/322108">https://doi.org/10.15421/322108</a>          URL: <a href="https://pmm.dp.ua/index.php/pmmm/article/view/311">https://pmm.dp.ua/index.php/pmmm/article/view/311</a> (фахове видання, категорія Б).</p> <p>3. Зайцева Т. А., Шмельов І. І. Сучасні підходи до розв'язання контактної задачі про втиснення двозв'язного штампу в пружній півпростір. <i>Вісник Національного технічного університету «ХПІ»</i>. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. №1(5), 2021, 72-79.          DOI: <a href="https://doi.org/10.20998/2079-0023.2021.01.12">https://doi.org/10.20998/2079-0023.2021.01.12</a>          URL: <a href="http://nio.nuou.org.ua/index.php/2079-0023">http://nio.nuou.org.ua/index.php/2079-0023</a> (фахове видання, категорія Б).</p> <p>4. Shyshkanova G., Zaytseva T., Zhushman V., Levchenko N., Korotunova O. Solving three-dimensional contact problems for foundation design in green building. <i>Journal of Physics: Conference</i></p>

1	2	3	4	5	6
					<p><i>Series</i>, 2023, 2609(1), 012001          DOI: 10.1088/1742-6596/2609/1/01200 URL:  <a href="https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2609/1/012001">https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2609/1/012001</a>  <b>(Scopus).</b></p>
5.	Дзюба Петро Анатолійович (рецензент)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри комп'ютерних технологій	кандидат технічних наук, 01.02.04- механіка деформівного тіла, 2012 р., Україна		<p>1. Dzyuba A. P., Dzyuba P. A. Experimental Studies of the Stability of Cylindrical Shells Damaged by Randomly Located Circular Holes. <i>International Applied Mechanics</i>, 2023, 59(2). P. 218–224.          DOI: <a href="https://doi.org/10.1007/s10778-023-01214-0">https://doi.org/10.1007/s10778-023-01214-0</a> URL:  <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s10778-023-01214-0">https://link.springer.com/article/10.1007/s10778-023-01214-0</a>  <b>(Scopus).</b></p> <p>2. Дзюба П. Экспериментальное исследование устойчивости ослабленных круговыми отверстиями цилиндрических оболочек при осевом сжатии <i>Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій</i>. Дніпро: Ліра, 2020. Вип. 32. С. 23-39.          DOI: <a href="https://doi.org/10.15421/4220013">https://doi.org/10.15421/4220013</a> URL:  <a href="https://pommk.dp.ua/index.php/journal/article/view/511">https://pommk.dp.ua/index.php/journal/article/view/511</a>. <b>(фахове видання, категорія Б).</b></p> <p>3. Експериментальні дослідження впливу поздовжнього з'єднувального потовщення стінки циліндричної оболонки на критичну силу втрати стійкості. <i>Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій</i>. Дніпро: Ліра, 2022. – Вип. 35. – С. 42-52. DOI: <a href="https://doi.org/10.15421/422214">https://doi.org/10.15421/422214</a> URL:  <a href="https://pommk.dp.ua/index.php/journal/article/view/556/557">https://pommk.dp.ua/index.php/journal/article/view/556/557</a>.  <b>(фахове видання, категорія Б).</b></p> <p>4. Dzyuba A.P., Dzyuba P.A., Iskanderov R.A. Numerical and experimental simulation of destruction of stretched cylindrical shell damaged by random cuts-cracks.</p>

1	2	3	4	5	6
					<i>International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering</i> , 2022, 14(4). P. 175-181. URL: <a href="https://www.iotpe.com/IJTPE/IJTPE-2022/IJTPE-Issue53-Vol14-No4-Dec2022/24-IJTPE-Issue53-Vol14-No4-Dec2022-pp175-181.pdf">https://www.iotpe.com/IJTPE/IJTPE-2022/IJTPE-Issue53-Vol14-No4-Dec2022/24-IJTPE-Issue53-Vol14-No4-Dec2022-pp175-181.pdf</a> (Scopus).

**Результати голосування:**

«За» – 16 осіб ,

«Проти» – немає,

«Утримались» – немає.

**Головуючий**

**Секретар**

**Анатолій ДЗЮБА**

**Ірина ГЕРГЕЛЬ**