

**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 Левченка Максима Станіславовича на тему «Моделювання тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача», представленій на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика

Витяг

з протоколу № 8 міжкафедрального семінару  
«Математичні проблеми механіки»  
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара  
від 10 травня 2024 року

**ПРИСУТНІ: 13 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. Ходанен Т. В. (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. Лобода В. В. (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. Шевельова А.Є. професорка 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 НДЛІ 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. Гергель І. Ю. (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 (3 особи, з правом голосу):**

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»;

д-р фіз.-мат. наук, проф. Зеленський А. Г. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), професор кафедри будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів Українського державного університету науки і технологій. Навчально-наукового інституту «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури».

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



### **Аспіранти участі в голосуванні не брали.**

**Порядок денний:** розгляд і обговорення дисертаційної роботи Левченка Максима Станіславовича на тему «Моделювання тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача», 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. Науковими керівниками призначено д. ф.-м.н., проф. Лободу В. В.

На засіданні вченої ради Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, протокол № 1 від 21 вересня 2023 р. другим науковим керівником дисертанта призначено професора університету Clermont Auvergne (Клермонт-Овернь, Франція) Юрія Лапусту.

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 аспіранта 4 року навчання Левченка Максима Станіславовича на тему: «Моделювання тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача» 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 Ходанен Т. В., 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 Левченка М. С. має високий рівень унікальності (95,37 %) і може бути допущена до захисту.

Робота виконана на 115 сторінках і містить такі складові частини: анотація, зміст, вступ, основна частина, висновки, список використаної літератури.

Слово надається аспіранту Левченку М. С. Будь ласка, регламент виступу – 30 хвилин.

### **Аспірант Левченко М. С.**

Шановний голову, шановні члени міжкафедрального семінару, шановні колеги!

**Тема моєї дисертації:** «Моделювання тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача».

**Актуальність теми.**



Частини конструкцій, створені з п'єзокерамічних матеріалів, широко застосовуються в різних галузях сучасної техніки. Особливу важливість здобули п'єзокерамічні композитні матеріали, які відрізняються легкістю, міцністю, надійністю та стійкістю до впливу навколишнього середовища. Однак їх експлуатаційні характеристики значною мірою залежать від наявності різних дефектів, зокрема тріщин між різними матеріалами, які 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. Але із огляду робіт, який наведений в дисертації витікає, що на теперішній час найбільш повно досліджені моделі електроізолюваної та електропроникної тріщин між двома п'єзоелектричними матеріалами у плоскому та антиплоскому випадку. Але 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, однак 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. Дослідженню саме цих актуальних проблем і присвячено дану роботу.

#### **Мета і завдання дослідження.**

*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 скінченою електричною проникністю у п'єзоелектричному біматеріалі.

Досягнення поставленої мети потребує розв'язання таких *завдань*:

- на прикладі електроізолюваної тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами розробити методику її дослідження в плоскому та просторовому випадках. Провести порівняння отриманих результатів та результатів аналітичного аналізу;

- для випадку плоскої задачі проаналізувати вплив різних електричних граничних умов на берегах тріщини на її відкриття, швидкості звільнення енергії при розвитку тріщини.

- дослідити тріщину на межі поділу двох п'єзоелектричних матеріалів з урахуванням електричної проникності середовища тріщини аналітично, шляхом зведення проблеми до розв'язку задачі лінійного спряження та чисельно за допомогою методу скінчених елементів. В останньому випадку розглянути плоску та просторову моделі тріщини. Порівняти отримані результати;



- для тріщини між двома різнорідними п'єзоелектричними матеріалами побудувати розрахункову модель, що враховує діелектричну проникність середовища тріщини без використання спрощуючих гіпотез про взаємодію берегів тріщини та провести аналіз цієї моделі за допомогою методу скінченних елементів

*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

*Предмет дослідження* - електромеханічні поля в околі тріщини, швидкість звільнення енергії, особливості врахування діелектричної проникності заповнювача тріщини при аналізі п'єзоелектричного біматеріалу.

*Методи дослідження.* Для побудови й аналізу математичних моделей використовується лінійна теорія пружності, механіка руйнування, теорія функцій комплексної змінної, а для чисельного розв'язання – метод скінченних елементів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному: з використанням аналітичного підходу та методу скінчених елементів проведено аналіз електроізолюваної тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами у плоскому та просторовому випадках. Запропоновано та реалізовано методику дослідження міжфазної тріщини в п'єзоелектричному композиті скінчених розмірів при різних видах електричних граничних умов на її берегах, яка включає знаходження швидкості звільнення енергії; детально проаналізовано вплив електричного поля на електропровідну тріщину. З використанням аналітичного розв'язку для тріщини зі скінченою електричною проникністю між двома п'єзоелектричними матеріалами проведено чисельний аналіз цієї моделі тріщини у плоскому і просторовому випадках для тіла скінчених розмірів; у просторовому випадку для різних поперечних перерізів, ортогональних фронтам тріщини, знайдені величини електричного потоку та інші електромеханічні характеристики. Запропоновано новий підхід до аналізу міжфазної тріщини зі скінченою електричною проникністю без урахування спрощуючих моделей взаємодії її берегів.

*Обґрунтованість і достовірність одержаних результатів* забезпечується коректним застосуванням математичного апарату й апробованих рівнянь лінійних теорій пружності, електропружності та методів теорії функцій комплексної змінної; зіставленням отриманих результатів у часткових і граничних випадках із вже відомими розв'язками інших авторів; порівнянням аналітичних значень параметрів руйнування з результатами, отриманими за допомогою методу скінченних елементів; відповідністю результатів розв'язування нових задач фізичній суті досліджуваних явищ.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що розроблено ефективна скінчено-елементна методика розв'язування плоских та тривимірних задач



для п'єзоелектричних біматеріальних тіл з міжфазними тріщинами при скінченій електричній проникності їх заповнювача, яка може використовуватись в інженерній практиці підприємств, пов'язаних з проектуванням та виготовленням електронних виробів, що включають п'єзоелектричну складову. Це має велике практичне значення, оскільки дозволяє оцінити розподіл фізико-механічних полів у конструкціях з п'єзоелектричних матеріалів та дати оцінки їхньої міцності, тріщиностійкості та експлуатаційного ресурсу.

У розділі I розглянуто плоску та просторову задачі для біматеріального п'єзоелектричного композиту з електро-ізолюваною тріщиною на межі поділу матеріалів. Спочатку в припущенні, що розмір тріщини набагато менший, розміру пластини, було застосовано аналітичний підхід. Використовуючи метод комплексних потенціалів, проблему було зведено до задачі лінійного спряження Гільберта-Рімана, для якої виведено точний аналітичний розв'язок. На основі цього розв'язку отримано вирази для електромеханічних факторів на межі поділу матеріалів.

Для побудови розв'язку у випадку області скінченних розмірів використовувався чисельний алгоритм, заснований на методі скінченних елементів. У плоскому випадку використовувались сітка із 8-вузлових чотирикутних кінцевих елементів, яка згущувалась при підході до тріщини і особливо до її вершин. Для просторового випадку розрахункова область являла собою біматеріальний куб з тунельною тріщиною на межі поділу матеріалів. Сітка формувалась із 20-вузлових скінчених елементів та згущувалась у напрямку фронтів тріщини. Отримано напруження, електричні зміщення та розкриття тріщин для всіх трьох розглянутих випадків. При цьому для просторового випадку, особлива увага зверталась на переріз, що проходить через середню точку фронту тріщини, перпендикулярно до нього. Показано дуже добру узгодженість результатів, отриманих для цього перерізу з аналітичним та числовим розв'язком плоскої задачі, що підтверджує правильність використаних аналітичної та чисельної методик.

Розділ II присвячено дослідженню впливу різних типів електричних граничних умов на тріщині у п'єзоелектричному біматеріалі на її розкриття та швидкість вивільнення енергії. Розглядалася плоска деформація біматеріалу, складеного з двох півпросторів заповнених різними п'єзоелектричними матеріалами та тріщиною на межі їх поділу. Сформульовано граничні умови на інтерфейсі та механічні і електричні умови на зовнішній границі розрахункової області.

Скінченно-елементне розв'язання граничних задач здійснювалося в геометрично лінійній постановці за умови прикладання статичного навантаження. Для отримання параметрів руйнування, реалізована можливість визначення швидкості вивільнення енергії, котре було отримано за допомогою інтегрального методу віртуального закриття тріщин та постпроцесорної обробки отриманих чисельних результатів. Отримані результати показали, що для моделі електропроникної тріщини, величина її розкриття залежить лише від механічної



складової навантаження. При використанні моделі електроізолюваної тріщини видно що наявність електричного поля сприяє додатковому розкриттю тріщини. Для електропровідної тріщини має місце контактна взаємодія між берегами тріщини внаслідок дії електричного поля. У частковому випадку тріщини, набагато коротшої характерного розміру розрахункової області, довжини зон контакту, а також максимальні значення розкриття тріщини добре збігаються з точними, отриманими для області нескінченних розмірів. Результати для електропровідної тріщини демонструють суттєвий вплив електричного поля на характер деформування. Це зумовлено тим, що на берегах електродованої тріщини в паралельному їй електричному полі індуються вільні заряди, наявність яких якісно змінює вид поля в околі тріщини. Розглянуто також випадок частково електродованої тріщини. Для цього випадку характер деформування відрізняється від результатів для інших видів електростатичних граничних умов, зокрема, спостерігається утворення контактної зони в середній частині тріщини.

У розділі III проведено аналітичний та чисельний аналіз тріщини зі скінченною електричною проникністю між двома п'єзоелектричними матеріалами під дією зовнішнього механічного навантаження та електричного поля. Спочатку припускається, що розрахункова область нескінченно велика. Вважаючи, що заповнювач тріщини має ненульову скінченну діелектричну проникність, отримано електричну умову в області тріщини, яка зв'язує електричний потік через тріщину зі стрибками переміщень та електричного потенціалу її берегів. На основі цієї умови, яка аналогічна моделі конденсатора, знайдено трансцендентне рівняння для знаходження електричного потоку уздовж берегів тріщини. Показано що в більшій частині області тріщини, величина електричного потоку залишається практично постійною. Наведені значення електричного потоку та швидкості вивільнення енергії для різних навантажень та величин діелектричної проникності.

Аналогічну проблему, але для області скінченних розмірів проаналізовано за допомогою методу скінчених елементів. Розв'язок проводився для тієї ж моделі тріщини і при тих же параметрах, що і аналітичний аналіз. Зокрема, в припущенні, що розмір тріщини значно менший характерного розміру області, використовувались електричні зміщення берегів тріщини, одержані при аналітичному аналізі. Результати показали, що в більшій частині проміжку тріщини розбіжність в результатах є незначною. Це підтверджує достовірність як аналітичного підходу, так і чисельного розрахунку.

Також було проведено аналіз п'єзоелектричного біматеріального композиту з тріщиною на межі поділу матеріалів з позиції тривимірної теорії пружності. Використовувалась та ж, що і раніше, конденсаторна модель тріщини зі скінченною електричною проникністю і застосовувався метод скінчених елементів. Задаючи на берегах тріщини електричні зміщення, отримані із аналітичного розв'язку, проводився числовий аналіз і результати порівнювались із заданими. В результаті для



середнього перерізу, ортогонального фронтам тріщини, узгодження отриманого електричного потоку із заданим  $\epsilon$  дуже хорошим. Враховуючи, що для інших перерізів, особливо для близьких до торців, розбіжність збільшується, було проведено уточнення вказаних значень методом ітерації. Для цього береги тріщини розбивались на окремі елементи по напрямку її фронтів і з застосуванням процедури ітерації знаходились значення електричного потоку через тріщину з необхідною точністю.

У розділі IV 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. Вважалось, що тріщина має форму еліпса, вертикальна вісь якого набагато менша горизонтальної. Тріщина заповнена гіпотетичним матеріалом модулі пружності і п'єзоелектричні константи якого  $\epsilon$  на декілька порядків меншими від відповідних характеристик верхнього матеріалу, а діелектрична проникність приймається рівною діелектричним проникностям реальних матеріалів.

Дана модель була досліджена методом скінченних елементів. При цьому розрахункова область розглядалась як об'єднання трьох підобластей з різними фізичними характеристиками, які ідеально з'єднані на лініях їх стику. Використовувались 8-вузлові чотирикутні та 6-вузлові трикутні кінцеві елементи лагранжевого типу. Мало місце згущення сітки при підході до тріщини і особливо до її вершин. Отримані результати для різних значень діелектричної проникності тріщини показали хороше узгодження в порівнянні з результатами попереднього розділу. З огляду на це можна говорити про адекватність запропонованої моделі та можливість її застосування для вивчення тріщини зі скінченною електричною проникністю між п'єзоелектричними матеріалами.

За результатами досліджень зроблені наступні ВИСНОВКИ:

1) Розглянуто електроізолювану міжфазну тріщину у п'єзоелектричному біматеріальному пружному тілі під дією розтягувального зусилля, та електричного зміщення. В припущенні, що тіло нескінченно велике, побудовано аналітичний розв'язок задачі, а для випадку тіла скінченних розмірів – числовий. Задача розв'язана для плоского та просторового випадків. Отримані результати порівняні та виявлена добра їх узгодженість.

2) Для електропроникної та електропровідної моделей тріщин розроблено скінченно-елементну методику розрахунку п'єзоелектричного біматеріалу з тріщиною на його інтерфейсі. Розроблено схеми скінченно-елементної реалізації основних електростатичних граничних умов на берегах тріщини.

3) Досліджено плоску задачу для тріщини зі скінченною електричною проникністю між двома п'єзоелектричними матеріалами в рамках конденсаторної аналогії. Для нескінченно великої області побудовано аналітичний розв'язок задачі, а



для скінченної – числовий. Підтверджено, що електричний потік через тріщину практично не змінюється по її довжині. Досліджено залежності глобальних та локальних параметрів руйнування від діелектричної проникності заповнювача тріщини.

4) В рамках моделі тріщини зі скінченою електричною проникністю досліджено біматеріальне п'єзоелектричне тіло для просторового випадку. Спочатку проаналізовано задачу плоскої деформації середнього перерізу тривимірної області і визначено електричний потік через область тріщини, який використано як початкове наближення для просторової задачі. При аналізі останньої застосовано метод скінченних елементів в поєднанні з ітераційним алгоритмом, для визначення електричного потоку через область тріщини.

5) Для тріщини на межі поділу двох п'єзоелектричних матеріалів побудована нова розрахункова модель, що враховує діелектричну проникність середовища тріщини. Для конкретних матеріалів матриць та заповнювача тріщини і зовнішніх впливів виконано аналіз цієї моделі. Отримано, що значення електричного потоку через тріщину добре узгоджується з результатами аналітичного аналізу, проведеного на основі моделі тріщини зі скінченною електричною проникністю.

б) Аналіз результатів проведених числових досліджень у рамках розроблених моделей дав можливість виявити і сформулювати низку нових ефектів та закономірностей, які будуть сприяти підвищенню тріщиностійкості інженерних конструкцій.

### **ЗАПИТАННЯ ТА ВІДПОВІДІ**

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

Ви розглянули моделювання, чи дослідження поведінки тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами, і перед цим казали, що там є і композитні матеріали, які складаються з різних матеріалів PZT-4 та PZT-5. Хотілося б знати, які характеристики цих матеріалів? Набагато вони відрізняються між собою чи є подібними? Чи обидва матеріали є п'єзоелектричними?

**Левченко М. С.:**

Так, обидва матеріали PZT-4 та PZT-5 – це п'єзоелектричні матеріали. Взагалі вони подібні, але все ж є певні відмінності у їхніх фізичних характеристиках. В самій дисертаційній роботі вказані характеристики даних матеріалів. І там можна побачити, що вони різняться між собою, тобто, вони не однакові.



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

Фізико-механічні характеристики п'єзоелектричних матеріалів знайти не дуже просто, адже так розтягнути зразок не дуже виходить, кажуть фахівці, котрі цим займаються. Тобто, де Ви берете ці характеристики якщо вони там є? І ще питання. Якщо ці характеристики сильно відрізняються, то чи можуть з'явитись особливості по лінії розділу цих матеріалів, коли з одного боку та іншого буде різний розподіл основних параметрів напружено-деформованого стану. Наприклад, у Вас на Рис. 4.3. вони симетричні. Тобто, вони однакові?

**Левченко М. С.:**

Ні, ці поля не однакові. Вони не дуже сильно відрізняються один від одного, але матеріали задані різними. Якщо брати більш детально, по відкриттю тріщини, по переміщенням верхнього і нижнього берега, то вони не є симетричними.

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

При захисті дисертації бажано було б подивитись, які саме ці характеристики, адже в доповіді вони не наведені. Якщо вони відрізняються, то такої симетрії не повинно бути, можливо, візуально це зараз не помітно, але якщо параметри відрізняються, то потрібно подивитись. Ще питання. У Вас є тріщина, яка роз'єднала ці матеріали, а по лінії, де немає тріщини, як вони з'єднані?

**Левченко М. С.:**

Насправді, як саме з'єднується матеріали на практиці, ми не заглиблювались в роботі, а при розрахунках в пакеті Abaqus є спеціальні процедури, які використовуються при з'єднанні пластин між собою. При виконанні цих процедур пластини повністю з'єднанні між собою, окрім місць, де виникає тріщина.

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

Ви кажете, що тріщина заповнена якимось віртуальним чи гіпотетичним матеріалом. Якщо це всередині якась просторова задача, тріщина не поверхнева. Звідки з'явиться так званий гіпотетичний заповнювач?

**Левченко М. С.:**

Насправді гіпотетичний заповнювач являє собою реальний матеріал. Наприклад, в Табл. 4.1. розрахунки робились для вакууму, води. Під словами «гіпотетичний заповнювач», малося на увазі, що моделювання проводилося не для двох областей, як



в попередніх розділах, а для трьох, де ця тріщина також моделювалась окремо у формі еліпса.

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

Наприклад, з'явилась тріщина, яка повинна чимось заповнитись, звичайно, вона мікроскопічна, але все одно вона повинна чимось заповнитись, чи повітрям, чи якимось іншим середовищем, котре попаде в цю тріщину. Тобто, Ви розглядали модель, правильно?

**Левченко М. С.:**

Так, в самій моделі з початку задавались властивості відповідного заповнювача.

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

При моделюванні заповнювача тріщини в розділі 4 Ви вибирали його модулі пружності і п'єзоелектричні константи величинами порядку  $10^{-6}$  від відповідних характеристик верхнього матеріалу. Чому саме  $10^{-6}$ ? Чому не менше чи більше?

**Левченко М. С.:**

Якщо брати менші значення, то результати в області тріщини різко спотворюються і стають нереальними. До речі, для  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$  вони практично не змінюються. Тому обрано було найменші з можливих значень. Якщо брати наприклад,  $10^{-4}$ , то відмінність вже проявляється, тобто, вплив модуля пружності заповнювача стає більш відчутним. Тому було вибрано саме  $10^{-6}$ .

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

Уточніть, як реалізовувалась ітераційна процедура в тривимірному випадку для тріщини зі скінченною електричною проникністю?

**Левченко М.С.:**

Береги тріщини розбивались на прямокутники шириною  $2l_2/n$ . На кожному з них задавались значення електричного потоку. Для першої ітерації дані для них брались з двовимірного випадку і проводився розрахунок за МСЕ. Якщо результати не влаштували, проводився новий розрахунок, де за початкове значення брались дані, отримані на попередній ітерації, і одержані результати порівнювались із заданими. При їх незадовільному узгодженні аналогічним шляхом виконувалась наступна ітерація і т. д.



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

На Рис. 1.4 дві осі – це площина тріщини, а чи обмежена дана фігура по глибині? Чи вона є нескінченною?

**Левченко М. С.:**

В данному випадку, цей розрахунок проводився для скінченних розмірів, тобто просторове тіло обмежене.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Зеленський А. Г., професор кафедри будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів Придніпровської державної академії будівництва та архітектури:**

На Рис. 1.4 наведена тривимірна сітка, яка згущується при підході до тріщини. Але незрозуміло, чи змінюється степінь згущення по координаті, співнаправленій із фронтом тріщини? Поясніть.

**Левченко М. С.:**

По координаті, співнаправленій з фронтом тріщини згущення сітки не відбувається, там крок сітки постійний. А от при підході до вершин тріщини сітка згущується, як видно з Рис. 1.3.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Зеленський А. Г., професор кафедри будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів Придніпровської державної академії будівництва та архітектури:**

В Табл. 2.3 багато значень ШЗЕ є нульовими, хоч навантаження є. Як Ви це пояснюєте?

**Левченко М.С.:**

В даних таблицях нулями показні значення, котрі менше 0,01. Як можна побачити з таблиць, деякі величини є порядку 1000, саме тому було прийнято рішення не приводити дуже малі величини.

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

У Вас два матеріали. Підкажіть, вони однорідні чи неоднорідні, можливо, ізотропні чи не ізотропні, ортотропні? Відомо, що брати Кюрі віднайшли п'єзоелектричні матеріали серед дуже неоднорідних, наприклад, турмалін. Цікаво розуміти, чи винайшли нові матеріали ізотропні, однорідні, чи це просто модель?

**Левченко М. С.:**



Самі матеріали задаються матрицями жорсткості п'єзоелектричних, діелектричних та пружних констант. Самі ці матриці задаються дуже складно але їхня механічна структура найчастіше являє собою трансверсально-ізотропний матеріал.

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

Питання щодо термінології. В роботі Ви використовуєте крім аналітичного підходу також числовий метод, метод скінченних елементів. В дисертації я зустріла в першому розділі для плоскої задачі, цитую: «Використовується сітка з восьмиузлових чотирикутних кінцевих елементів», а для просторової задачі : «сітка з двадцятиузлових скінченних елементів». В доповіді також ці поняття пролунали. Що Ви розумієте під кінцевими елементами, і що під скінченними? В чому їх різниця?

**Левченко М. С.:**

Те як було названо, ці елементи ми задавали в програмі Abaqus, де можна обирати, якими елементами можна робити розбиття сітки. Тому було обрано саме ці елементи для гарної побудови сітки. А різниці між цими термінами немає.

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

Ще питання щодо термінології. В ключових словах у Вас вказано поняття «швидкість звільнення енергії», а в тексті дисертації було помічено, що є таке поняття, як «швидкість вивільнення енергії». Також ці поняття зустрічались і в доповіді. В чому відмінність цих понять?

**Левченко М. С.:**

Між цими поняттями немає відмінності, вони є абсолютно ідентичними.

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

Аналогічне питання щодо понять «розкриття тріщини» та «відкриття тріщини». Є якась відмінність?

**Левченко М. С.:**

Ці поняття також є синонімами.



**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:**

Яка у Вас приблизно була степінь згущення сітки у плоскому випадку? Тобто, яке було співвідношення найбільшого і найменшого елементів? Та одразу таке ж питання для тривимірного випадку.

**Левченко М. С.:**

Найбільші елементи знаходяться на краях, потім йшло згущення сітки першого рівня, потім другого у напрямку вершини тріщини, тому степінь згущення була приблизно не менше 100.

Для тривимірного випадку бралось менше згущення, ніж для двовимірного. Бо в тривимірному випадку виходило дуже багато елементів, і через це сітка бралась трохи більш спрощена, ніж для двовимірного.

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

В дисертації було вказано, що «запропонована ефективна скінчено елементна методика». Поясніть, що є критерієм ефективності в цьому випадку? В якому розумінні ця методика є ефективною?

**Левченко М. С.:**

Методика полягала в тому, що бралась область, розбивалась на декілька прямокутних частин, і потім йшло згущення у кожній області окремо, але так, щоб не було стрибкоподібності в сітці. І отримувались результати. Потім виконували розбиття сітки з більшим згущенням, оскільки в програмі Abaqus є можливість вільно змінювати степінь згущення сітки. Потім порівнювались результати, якщо вони вже мало змінювались, то ми повертались до попередньої сітки, для економії ресурсу розрахунку. Також всі задачі спочатку вирішувались аналітичним шляхом і потім за умови, що розмір тріщини набагато менший, ніж розмір розрахункової області, отримані результати порівнювались між собою.

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

Ви описали саму методику, а питання було саме про поняття ефективності. Ефективність означає щось краще. Тобто чому Ви говорите що вона ефективна? Краще чого ця методика?



**Левченко М.С.:**

Саме краще чого, зараз не можу відповісти. Можна сказати, що саме для наших розрахунків, коли ми рахували для різних сіток і порівнювали результати. Наприклад, при побудові нашої сітки ми можемо сказати, що вона більш ефективна за інші, хоч має менше вузлів. Адже так ми економимо ресурс розрахунку, а результат не погіршується.

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

Мабуть, це не дуже вдале використання цього слова.

**Левченко М. С.:**

Зрозуміло.

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

Ви розглядаєте біматеріальні тіла двовимірні та тривимірні, і на межі їх поділу є тріщина. Поясніть більш детально. Коли Ви застосовували метод скінченних елементів, як Ви підбирали ці параметри сітки? Хотілося б почути конкретний розмір основної сітки, конкретний розмір більш дрібної сітки. На які орієнтири Ви спирались, щоб обґрунтувати правильність будови сітки? Як Ви оцінювали похибку числового розв'язку?

**Левченко М. С.:**

Почнемо з порівняння результатів. Спочатку задачу вирішували аналітичним шляхом, і отримані результати порівнювали з результатами інших авторів. Потім задача вирішувалась методом скінченних елементів для плоского випадку. Для плоского випадку будувалась складна сітка, яка складалась з трьох підобластей в кожній з яких відбувалось поступове згущення до її внутрішньої границі, а в останній – до вершин. Отримані результати порівнювались з результатами аналітичного розрахунку. Потім ця ж задача вирішувалась для тривимірного випадку, і аналізуючи переріз, близький до середнього, всі результати порівнювались між собою. Наприклад, на Рис. 1.5. можна це побачити. В таблиці 1.1. наведено значення максимального розкриття, де можна побачити добру узгодженість результатів.

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



Ви розповідали в четвертому розділі про три підобласті з різними фізичними характеристиками. Що це за підобласті? Чому їх три, якщо Ви розглядаєте саме біматеріальне тіло?

**Левченко М. С.:**

Для відповіді одразу повернемось до третього розділу, де розглядалось біматеріальне тіло. Там за допомогою умови (3.3) було отримано розв'язок задачі. В останньому розділі моделювання заповнювача тріщини було представлено в інший спосіб, одразу бралось дві області, котрі не просто з'єднувались між собою в місцях, де немає тріщини, а була ще третя область, яка, так би мовити, була моделлю цієї тріщини, котра одразу задавалася. Саме тому областей три.

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

В четвертому розділі тріщину Ви зображаєте еліптичної форми. Чому саме така модель тріщини?

**Левченко М. С.:**

Можна сказати, що еліпс – це найбільш реалістична модель тріщини, бо якщо брати, наприклад, просто дві дуги, то в вершинах тріщини розкриття було б не зовсім правильним. Тому була взята саме еліптична модель.

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

Якісь додаткові припущення, що відбувається саме в вершинах тріщини, Ви робили? Чи нехтували тим, що там обов'язково повинні бути пластичні деформації в вершинах, тобто Ви в рамках теорії пружності все це розглядали?

**Левченко М.С.:**

Дана модель будувалась, і потім без усіляких припущень проводився розрахунок в рамках теорії пружності.

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

Навпаки, Ви робили припущення, тому що це відомий факт, там пластика завжди є в вершинах тріщини.



**Левченко М. С.:**  
Згоден.

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

Ви плоску задачу розглядали. Це модель плоскої деформації. Тобто, плоский напружений стан Ви не розглядали?

**Левченко М. С.:**

Так, для плоскої задачі розв'язок проводився в припущенні, що має місце плоска деформація. В 3-вимірному випадку в середніх перерізах має місце плоска деформація, а на торцях – стан ближчий до плоского напруженого.

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

З Вашої точки зору, скажіть, якщо в цій моделі плоский напружений стан та плоску деформацію розглядати, то як вибір моделі буде впливати на розв'язок, на величину розкриття? В якому випадку буде більше розкриття?

**Левченко М. С.:**

В плоскій деформації в центральному перерізі розкриття тріщини менше, ніж на торцях. Тобто, для плоского напруженого стану розкриття буде більшим.

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

Як Ви будували розв'язок задачі лінійного спряження (1.46) та і інших подібних задач?

**Левченко М. С.:**

Ми користувались розв'язком із монографії Мусхелішвілі. Там він записаний для задачі про штамп, але рівняння те ж саме, тому ми цим розв'язком скористались, і тільки довільні константи знайшли з умов на нескінченності і умов однозначності переміщень при обході контуру тріщини.

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



А як задовольняються умови на нескінченності?

**Левченко М. С.:**

Невідома функція розкладається в ряд при великих «z», і коефіцієнт при  $z^0$  прирівнюється до правої частини (1.47), а при  $z^{-1}$  прирівнюється до 0, що забезпечує виконання умов однозначності переміщень.

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

А чи можливо для просторового випадку знайти аналітичний розв'язок за допомогою такого підходу?

**Левченко М. С.:**

Цей підхід можна використовувати тільки для плоского випадку при умові, що область нескінченна.

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

В розділі 2 Ви розглядаєте електрично провідну тріщину. Поясніть детальніше, що це означає.

**Левченко М.С.:**

Це тріщина, береги якої покриті електродами, і значить, електричний потенціал постійний на берегах тріщини. Тобто, граничні умови на берегах  $\varphi = 0$  або  $E_1 = -\frac{\partial \varphi}{\partial x_1} = 0$ . Ще є електропроникні електричні умови на тріщині, це коли тріщина не впливає на електричні поля ( $E_1^+ = E_1^-$ ,  $D_3^+ = D_3^-$  на берегах). Також є умови електричної ізоляції  $D_3^+ = D_3^- = 0$ , які аналогічні умовам теплової ізоляції.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Шевельова А. Є. професорка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Які ефекти для електрично провідної тріщини Ви отримали?

**Левченко М. С.:**

Для випадку електрично провідної тріщини отримано що там є контактна взаємодія між берегами тріщини внаслідок дії електричного поля.



Утворення зон контактної взаємодії між берегами тріщини обумовлено комбінацією двох факторів – наявністю електричного поля  $E_1^\infty$  і різницею електромеханічних властивостей п'єзоматеріалів, внаслідок чого деформації берегів тріщини різняться одна від одної.

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

На Рис. 2.3. та 2.4. вказані форми розкриття тріщини, але з іншої сторони – інший матеріал. Форма розкриття для цих двох матеріалів однакова чи різна?

**Левченко М. С.:**

Сама форма розкриття однакова. На рисунках вказано розкриття тріщини, тобто стрибок переміщення берегів тріщини.

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

Але ж нижня частина – то інший матеріал?

**Левченко М. С.:**

Так, різний. Але результат на графіку береться як розкриття. Тобто, від значення переміщення верхнього берега тріщини віднімається значення переміщень нижнього берега.

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

Тобто, це не контур тріщини?

**Левченко М. С.:**

Ні, це не контур тріщини, це саме її розкриття.

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

В рівнянні (3.20) є залежність від  $x_1$ , як Ви поясните цю залежність?

**Левченко М. С.:**

Рівняння дійсно залежить від  $x_1$  через  $H_I$ , тому його невідому  $D$  треба знаходити для кожного  $x_1$ . Але залежність  $H_I$  від  $x_1$  є дуже незначною, тому  $D$  виходить майже константою у всій області тріщини.



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

Як Ви проводили інтегрування в (3.21)? На мій погляд, це досить непроста процедура.

**Левченко М. С.:**

Для всіх факторів які стоять під інтегралом, було отримано аналітичні вирази, вони всі приведені в дисертації. Далі вони підставлялись в інтеграл, проводились дуже складні перетворення, інтегрування. В результаті цього вдається в замкненому вигляді знайти інтеграл і таким чином отримується формула.

**ВИСТУП НАУКОВОГО КЕРІВНИКА, д-ра фіз.-мат. наук, проф. Лободи В. В.:**

Основною причиною передчасного руйнування конструкцій, виготовлених з композитних матеріалів, є тріщини на межі поділу різних компонент. Існує значна кількість робіт, які присвячено дослідженню таких тріщин як у п'єзопасивних, так і в п'єзоелектричних матеріалах. В останньому випадку більшість таких досліджень виконано в рамках найпростіших моделей електропроникної і електроізолюваної тріщин. Але ці моделі не враховують властивості середовища, що заповнює тріщину і тому в багатьох випадках не є адекватними дійсності. Моделі ж, що враховують електричні властивості наповнювача тріщини приводять до досить складних математичних проблем, які на даний момент ще потребують свого розв'язання. Особливо це стосується тріщин у п'єзоелектричних композитах скінченних розмірів. Ці обставини і вказують на **актуальність** завдань які ставляться в дисертаційній роботі.

Дана робота тісно пов'язана з роботами, що проводились 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 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.

В роботі отримана низка **нових результатів**, серед яких слід особливо виділити наступні:

- Розвинуто скінченно-елементну методику дослідження міжфазної тріщини в п'єзоелектричному композиті скінчених розмірів при різних видах електричних граничних умов на її берегах, яка включає постпроцесорну обробку результатів для знаходження швидкості вивільнення енергії. Для електропровідної моделі тріщини встановлено можливість виникнення



макрозон контакту берегів тріщини у зв'язку із впливом зовнішнього електричного поля.

- Побудовано аналітичний розв'язку плоскої хадачі для тріщини зі скінченою електричною проникністю між двома п'єзоелектричними матеріалами, а також проведено чисельний аналіз цієї моделі тріщини у плоскому і просторовому випадках для тіла скінчених розмірів. У просторовому випадку реалізовано новий алгоритм визначення електричного поля через тріщину та інших електромеханічних факторів.

- Запропоновано підхід до аналізу міжфазної тріщини зі скінченою електричною проникністю, що базується на скінченно-елементному моделюванні заповнювача тріщини і приводить до результатів для електричний потоку через тріщину що добре узгоджуються з результатами конденсаторної моделі.

З моєї точки зору результати є **достовірними**, оскільки при їх одержанні використовувались строгі математичні залежності та перевірені числові алгоритми. У ряді випадків проведено порівняння аналітичних розв'язків з результатами розрахунків методом скінчених елементів і одержано хорошу узгодженість.

**Практичне значення** одержаних результатів та розв'язків полягає, з моєї точки зору, у виявленні реальної картини деформування міжфазної тріщини для тіл скінчених розмірів, що досягнута завдяки розгляду різних способів урахування електричних властивостей заповнювача тріщини.

Більшість результатів отримані автором дисертаційної роботи **самостійно**. Я приймав участь, в основному, лише при обговоренні постановок задач та одержаних результатів.

Максим Левченко є випускником бакалаврата, а потім і магістратури нашої кафедри. Навчання в магістратурі закінчив у 2020 р. і отримав диплом з відзнакою. Того ж року вступив до очної аспірантури ДНУ. Наукові досліджень здобувач почав ще на 3-му курсі бакалаврату при виконанні курсових, а далі дипломної роботи. Навчаючись в аспірантурі Максим Левченко сумлінно виконував індивідуальний навчальний план з освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. Він повністю і своєчасно виконав освітню складову індивідуального навчального плану. У процесі підготовки дисертації та виконання індивідуального плану наукової роботи він проявив здатність самостійно проводити наукові дослідження, проявив наполегливість і творчий підхід до розв'язання наукових задач, обґрунтування і аналізу отриманих результатів.

За період навчання в аспірантурі за темою дисертації здобувачем опубліковано 5 статей, з яких дві статті у провідних міжнародних журналах, що входять до бази даних Скопус. Апробацію одержаних наукових результатів дисертаційного дослідження проведено на 4 міжнародних наукових конференціях та міжкафедральних семінарах.



Вважаю, що дисертаційна робота Левченко Максима Станіславовича на тему «Моделювання тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача», виконана на належному науковому рівні, 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, а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 11 «Математика» за спеціальністю 113 «Прикладна математика».

**ВИСТУП НАУКОВОГО КЕРІВНИКА, д-ра фіз.-мат. наук, проф. Лапусти Ю. М. (переклад):**

П'єзокерамічні композиційні матеріали широко використовуються в розумних пристроях і інших областях сучасної техніки. Проте їх експлуатаційні характеристики значною мірою залежать від наявності різноманітних дефектів, зокрема тріщин між різними матеріалами, які з технологічних чи експлуатаційних причин виникають на межах розділу композитних компонентів. Стосовно дослідження таких тріщин одержано низка важливих результатів, але деякі принципові питання дослідження тріщин зі скінченою електричною проникністю залишаються дослідженими недостатньо. Оскільки вивченню цих питань присвячена дана дисертаційна робота, то її тематику можна вважати **актуальною**.

Робота включає низку **нових аналітичних та чисельних результатів**. Серед цих результатів слід особливо виділити наступні:

1. Аналіз електроізолюваної тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами для областей скінчених розмірів у плоскому та просторовому випадках.
2. Аналіз електропровідної моделі моделі міжфазної тріщини для п'єзоелектричної пластинки, для якої встановлено можливість виникнення макрозон контакту берегів тріщини в залежності від інтенсивності зовнішнього електричного поля.
3. Чисельний аналіз конденсаторної моделі тріщини зі скінченною електричною проникністю у плоскому і просторовому випадках для п'єзоелектричного тіла скінчених розмірів.
4. Новий підхід до аналізу міжфазної тріщини зі скінченою електричною проникністю, що базується на скінченно-елементному моделюванні як п'єзоелектричних матриць, так і заповнювача тріщини.

З моєї точки зору **результати є достовірними**, оскільки вони ґрунтуються на строго перевірених теоретичних підходах. Крім того, в окремих випадках вони добре узгоджуються з уже відомими та підтвердженими результатами і аналітичними розв'язками.

**Практичне значення** одержаних результатів та розв'язків полягає у тому, що вони дають можливість спростити розробку програмних комплексів для



комп'ютерного моделювання процесів руйнування п'єзоелектричних композитів з урахуванням електричної провідності наповнювачів тріщин.

Вважаю, що більшість результатів отримані автором дисертаційної роботи самостійно. Моя участь обмежувалась, в основному, лише обговоренням постановок задач, знайдених розв'язків та одержаних результатів. Під час своєї роботи Максим Левченко продемонстрував глибокі теоретичні знання у суміжних галузях прикладної математики, механіки руйнування композиційних матеріалів, математичного та чисельного моделювання, хорошу здатність проводити дослідження у вищезазначених наукових сферах, здатність ефективно представляти та аналізувати отримані результати за допомогою деяких сучасних комп'ютерних засобів, таких як програмне забезпечення Mathematics та Abaqus.

Вважаю, що дисертаційна робота Левченко Максима Станіславовича на тему «Моделювання тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача», виконана на належному науковому рівні, відповідає всім вимогам відповідного Порядку присудження ступеня доктора філософії та її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії... за напрямом «Математика і статистика» за спеціальністю «Прикладна математика».

### **В ОБГОВОРЕННІ ДИСЕРТАЦІЇ ЛЕВЧЕНКА М. С. ВЗЯЛИ УЧАСТЬ:**

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

Хочу надати позитивну оцінку роботі Максима Станіславовича. Дуже вагомі результати він отримав, які дійсно є новими. Я була у складі комісії з перевірки на плагіат. Робота має значний відсоток унікальності, що свідчить на користь самостійності виконання і оригінальності всього дослідження. Теоретична підготовка здобувача зараз була продемонстрована в результаті відповідей на запитання, і зручні і не зручні. Було поставлено дуже багато запитань, і це якраз свідчить про те, що тема дисертації є дійсно актуальною, тому вона й викликала таку зацікавленість фахівців. Я дивилася текст самої роботи, вона досить добре оформлена, за всіма вимогами МОН України.

Отже, я вважаю, що її можна рекомендувати до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Зеленський А. Г.**, професор кафедри будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.

По-перше, в мене дійсно така думка: тріщину, мабуть, не зовсім адекватно відображати у вигляді еліпса, оскільки суть тріщини та її розростання якраз в тому,



що саме вона росте на кінцях. На мій погляд, тріщина це «прижмурене око», можна так сказати. В еліпса не видно, куди б вона мала розростатися, тобто, трошки модель, мабуть, не зовсім відповідає, хоча як перше наближення для визначення напружено-деформованого стану може бути доброю. Це добре.

Що стосується терміну «ефективність», то «ефективність» – термін чи поняття, мабуть, не завжди доцільно чи можна там говорити «ефективніше чогось». Наприклад, чисельний метод є ефективним, тому що він добре узгоджується з аналітичними розв'язками. От в цьому, мабуть, ефективність роботи нашого здобувача, так треба і відповідати.

Стосовно термінології методу «скінченних елементів» та «кінцевих елементів». Мені здається, що треба було просто в роботі писати один із цих термінів постійно. В принципі, це один і той же термін, це ж не кінцеві різниці. Тому просто потрібно завжди використовувати один термін.

Також були питання, що в тріщині на кінцях виникають пластичні деформації і так далі, чи потрібно було це враховувати. Я вважаю, що ні, просто задача ставиться класична – розглядається абсолютно пружне тіло. За цією темою опубліковано та розв'язано сотні задач в абсолютно пружній постановці.

Дисертація Максима Станіславовича на мене склала добре враження, дисертація дійсно добротна, і як для дисертацій доктора філософії – вона достатньо високого наукового рівня. В ній розглянуто нові задачі, як ми бачимо, присвячені дослідженню важливих параметрів для різних моделей тріщин на межі поділу п'єзоелектричних матеріалів. Робота актуальна, приділена велика увага моделям тріщин зі скінченною електричною проникністю. В роботі здобувача використані і розвинені аналітичні методи розв'язання поставлених задач, причому важливо підкреслити, крім використання аналітичних методів і отриманих аналітичних результатів тут є поєднання з чисельними методами, а це в одній роботі говорить про те, що її рівень достатньо науково високий і характеризує здобувача високого наукового рівня. Мені імпонує, як науковцю який займається теж просторовими задачами, остання задача третього розділу, що присвячена розгляду тріщини в просторовому випадку. Відомо, що просторові задачі на порядок складніші звичайних задач, і будь-які розв'язки заслуговують на увагу. Тут в дисертації ще й доповнюється це все ускладнюючими факторами, пов'язаними з п'єзоелектричним матеріалом, тріщиною між двома матеріалами, нетривіальною моделлю тріщини. Заслуговує на увагу, що дисертант успішно впорався з вказаними труднощами, доповідь була добротна, хороша, ясна.

Вважаю, що в роботі Левченка Максима Станіславовича на достатньо високому науковому рівні представлені актуальність, новизна, достовірність, тому пропоную рекомендувати цю роботу до захисту в разовій раді.

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



Мені сподобалось як Максим Станіславович зробив доповідь, відповів на запитання. Вважаю, що наш здобувач готовий до того щоб виходити на захист та отримувати відповідний ступінь доктора філософії. Представлена робота має перспективу, це очевидно. Були питання, і це завжди добре, коли є перспектива і є питання. Але я хочу побажати продовжувати роботу, можливо, в статях, яким завгодно чином. Перспектива продовження є.

Бажаю успішного захисту і вважаю, що ми маємо підтримати роботу і допустити Максима Станіславовича до захисту на разовій спеціалізованій вченій раді.

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

Сьогодні заслухали виступ за матеріалами кваліфікаційної роботи на здобуття ступеню доктора філософії. На мій погляд всі формальні вимоги, які висуваються до робіт, виконано. Робота актуальна, присутня наукова новизна одержаних результатів, достатня кількість і рівень публікацій, щоб можна було цю роботу рекомендувати до захисту.

На мій погляд, здобувачу трохи не вистачило часу, щоб уважно вичитати текст роботи, усунути термінологічні неточності, граматичні помилки та представити текст роботи в більш якісному вигляді. Рекомендую здобувачу все ж таки звернути увагу на питання термінології. Також хочу звернути увагу здобувача, що є такі науки як обчислювальна механіка, обчислювальна математика, де глибоко та на високому теоретичному рівні вивчаються питання збіжності, оцінки похибки числового розв'язку і застосування числових методів, зокрема методу скінченних елементів в класі стандартних пакетів. Потрібно більш уважно ставитись до таких питань. Система розмірності є поки що відкритим питанням, тому треба використовувати існуючі практичні рекомендації і напрацювання в цьому напрямку.

Задачі що розглянуті в роботі, є складними, і тут хочу зауважити, що при застосуванні методу скінченних елементів для тіл з тріщинами, які знаходяться на межі поділу матеріалів, з точки зору обчислювальної математики не все так прозоро і однозначно, є питання. До речі, в наукових колах тривають дискусії з цього приводу, «яким чином моделювати тріщину?», «враховувати чи не враховувати наявність пластичних деформацій які завжди є в околі вершин тріщини?», «чи буде ця математична модель тріщини адекватно описувати поведінку тріщини в реальних конструкціях?». Але все це, мабуть, здобувачу на майбутнє, він робить в цьому напрямку свої перші кроки. Як кажуть, досконалості немає меж.

Тому вважаю, що здобувач набув необхідних компетентностей для можливості захисту роботи в спеціалізованій раді. Я підтримую цю роботу і вважаю, що ми прийнемо правильне рішення щодо рекомендації роботи до захисту у спеціалізованій раді.



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

Я плануєся рецензентом цієї роботи. Я ознайомився з дисертаційною роботою. Це досить серйозне дослідження, в якому розв'язано декілька нових задач стосовно проблем механіки руйнування п'єзокомпозитів з міжфазними тріщинами.

Заслуговує на увагу, що в роботі розглянуто всі існуючі зараз моделі тріщини в п'єзоелектричних матеріалах і проведено порівняння результатів, отриманих в рамках цих моделей, що завжди було цікаво. Це зроблено шляхом аналізу розкриття тріщини, швидкості звільнення енергії та інших факторів. Зрозуміло, що основну увагу було приділено складній, але найбільш адекватній дійсності моделі, яка враховувала електричні характеристики середовища тріщини. Дисертантом були отримані результати аналітично для нескінченної області та чисельно для біматеріалів скінчених розмірів. Проведено порівняння цих результатів, це також було цікаво.

Результати його досліджень, на мій погляд, мають достатньо актуальності, новизни і практичної цінності, тому я підтримую цю дисертацію і рекомендую її до захисту на разовій раді за спеціальністю «прикладна математика».

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

Заперечувати, що це актуальна і важлива проблема, немає ніякої можливості. Дійсно, задачі є надзвичайно актуальними. Але хотів би додати, що це ще й безмежна проблема, крім актуальності і важливості. Після того як брати Кюрі відкрили ці матеріали, встановлено багато їх різновидностей. Найвідоміші – це кварц, турмалін, а зараз – штучні керамічні. Вони відрізняються тією особливістю, що в цьому матеріалі є кристалографічні осі. Їх переміщення однієї від іншої надає п'єзоелектричний ефект. Якщо деформувати, то виробляється електрика, якщо подати електрику, то це тіло починає деформуватись. Тому ці тіла суттєво неоднорідні. Також ці матеріали, як правило, в напрямку кристалографічних осей є крихкими, тому у відповідних критеріях руйнування, які пов'язані із пластикою, виникають дуже великі особливості.

Мистецтво дисертанта полягає в тому, що він знайшов такі частини, де зробив свій внесок в дослідження цієї важливої, безмежної проблеми. Якраз той обсяг досліджень, який зробив Максим Станіславович, на мій погляд, повністю задовольняє вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Буде правильно, якщо ми підтримаємо, щоб направити цю роботу до захисту.



## ВИСНОВОК

### **Актуальність теми дисертації**

Елементи конструкцій, створені з п'єзокерамічних матеріалів, широко застосовуються в різних галузях сучасної техніки. Особливу важливість здобули п'єзокерамічні композитні матеріали, які відрізняються легкістю, міцністю, надійністю та стійкістю до впливу навколишнього середовища. Однак їх експлуатаційні характеристики значною мірою залежать від наявності різних дефектів, зокрема тріщин між різними матеріалами, які 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. Але із огляду робіт, який наведений в дисертації витікає, що на теперішній час найбільш повно досліджені моделі електроізолюваної та електропроникної тріщин між двома п'єзоелектричними матеріалами у плоскому та антиплоскому випадку. Але 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, однак 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. У зв'язку із вказаними обставинами тематику дисертаційної роботи можна вважати актуальною.

**Затвердження теми та плану дисертації.** Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, протокол № 4 від 19 листопада 2020 р. Науковими керівниками призначено д. ф.-м.н., проф. Лободу В. В.

На засіданні вченої ради Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, протокол № 1 від 21 вересня 2023 р. другим науковим керівником дисертанта призначено професора університету Clermont Auvergne (Клермонт-Овернь, Франція) Юрія Лапусту.

**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. Дві з них опублікована у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus. Три статті входять до переліку наукових фахових видань України. Основні результати дисертації отримані автором самостійно. Визначення загального плану досліджень належить науковому керівнику В. В. Лободі. У працях, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у побудові аналітичних розв'язків, їхній чисельній реалізації, проведенні скінченно-елементного аналізу, ілюстрації одержаних результатів, порівнянні результатів розрахунків для часткового випадку з відомими. Публікації Левченка М.С. 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 та методів теорії функцій комплексної змінної; зіставленням отриманих результатів у часткових і граничних випадках із вже відомими розв'язками інших авторів; порівнянням аналітичних значень параметрів руйнування з результатами, отриманими за допомогою методу скінченних елементів; відповідністю результатів розв'язування нових задач фізичній суті досліджуваних явищ.

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

1. Проведено аналіз електроізолюваної тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами у плоскому та просторовому випадках. Виконано порівняння отриманих результатів з аналітичними, які знайдені для випадку тріщини, набагато меншої ніж розмір біматеріального тіла.
2. Запропоновано та реалізовано методу дослідження міжфазної тріщини в п'єзоелектричному композиті скінчених розмірів при різних видах електричних граничних умов на її берегах, яка включає знаходження швидкості звільнення енергії. Детально проаналізовано електропровідну модель, для якої встановлено можливість виникнення макрозон контакту берегів тріщини в залежності від інтенсивності зовнішнього електричного поля.
3. З використанням аналітичного розв'язку для тріщини зі скінченою електричною проникністю між двома п'єзоелектричними матеріалами проведено чисельний аналіз цієї моделі тріщини у плоскому і просторовому випадках для тіла скінчених розмірів. У просторовому випадку для різних поперечних перерізів,



ортогональних фронтах тріщини, знайдені її відкриття, величини електричного потоку та стрибки електричного потенціалу при переході через тріщину.

4. Запропоновано підхід до аналізу міжфазної тріщини зі скінченою 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 електромеханічні параметри.

**Практичне значення результатів дослідження** полягає в тому, що розроблено ефективна скінченно-елементна методика розв'язування плоских та тривимірних задач для п'єзоелектричних біматеріальних тіл з міжфазними тріщинами при скінченій електричній проникності їх заповнювача, яка може використовуватись в інженерній практиці підприємств, пов'язаних з проектуванням та виготовленням електронних виробів, що включають п'єзоелектричну складову. Це має велике практичне значення, оскільки дозволяє оцінити розподіл фізико-механічних полів у конструкціях з п'єзоелектричних матеріалів та дати оцінки їхньої міцності, тріщиностійкості та експлуатаційного ресурсу.

### Список опублікованих праць за темою дисертації

*Статті у наукових фахових виданнях України:*

1. **Левченко М. С.,** Гергель І. Ю., Лобода В. В. Про особливості деформування тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпро: Ліра, 2021. – Вип. 33. – С. 86–97. DOI: <https://doi.org/10.15421/4221008>.
2. **Левченко М.,** Лобода В. Аналіз тріщини зі скінченою електричною проникністю між двома п'єзоелектричними матеріалами // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 50 Серія: Динаміка і міцність машин. № 1. 2023, с. 45-50, DOI: 10.20998/2078-9130.2023.1.275582.
3. **Левченко М. С.,** Лапуста Ю. М., Лобода В. В. Про спосіб моделювання заповнювача тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій, 2(37), с.94-104. <https://doi.org/10.15421/4223219>.

*Статті у наукових виданнях інших держав, які входять до міжнародних наукометричних баз даних*

1. Adlucky V. J., **Levchenko M. S.,** Loboda V. V. Finite-element analysis of the parameters of fracture in a piezoelectric bimaterial with interface crack for various



types of boundary conditions on its faces // J. Math. Sci. – 2024. – 279, No. 2. – P. 181–196. – <https://doi.org/10.1007/s10958-024-07004-4> (Scopus, Q3)

2. **Levchenko M., Lapusta Y., Loboda V.** 3-D analysis of a crack with finite electrical permeability between two piezoelectric materials. *Procedia Structural Integrity* 59 (2024) 724–730. 10.1016/j.prostr.2024.04.103 (Scopus, Q2)

*Додаткові праці апробаційного характеру*

1. Левченко М.С., Лобода В.В. Тріщина між двома п'єзоелектричними матеріалами під дією механічного навантаження та електричного поля. // Математичні проблеми технічної механіки-2018. Матеріали міжнародної наукової конференції. – Київ, Черкаси, Кам'янське. – 2018. – С. 60.
2. Левченко М.С., Лобода В.В. Чисельно-аналітичний аналіз тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами. // Математичні проблеми технічної механіки-2021. Матеріали міжнародної наукової конференції. – Київ, Черкаси, Кам'янське.. -2021.- С. 42.  
[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)
3. В. Адлуцький, М. Левченко, В. Лобода Визначення параметрів руйнування п'єзоелектричного біматеріалу при наявності інтерфейсної тріщини з використанням МСЕ. // Сучасні проблеми механіки та математики – 2023. Матеріали міжнародної наукової конференції. Львів. – 2023 - с.185.  
[http://iapmm.lviv.ua/mpmm2023/materials/me03\\_26.pdf](http://iapmm.lviv.ua/mpmm2023/materials/me03_26.pdf)

**На підставі заслуховування та обговорення доповіді Левченка М.С. 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 Левченка Максима Станіславовича на тему «Моделювання тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача» 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 Левченка Максима Станіславовича на тему «Моделювання тріщини між двома п'єзоелектричними матеріалами з урахуванням електричної проникності її заповнювача» 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 Левченка Максима Станіславовича 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.uran.ua/eejet/article/view/233501">http://journals.uran.ua/eejet/article/view/233501</a> (Scopus).</p> <p>3. Гук Н. А., Єрошкін 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</p>



1	2	3	4	5	6
2.	Зеленський Анатолій Григорович (опонент)	Український державний університет науки і технологій. Навчально- науковий інститут «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», професор кафедри будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів	Доктор фізико- математичних наук, 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла,  2021 р, Україна	Професор  кафедри будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів 2024 р.	видання, категорія Б).  1. Zelensky A. Mathematical theory of shallow physically nonlinear shells of arbitrary thickness (2023) AIP Conference Proceedings, 2840 (1), art. no. 030012, DOI: 10.1063/5.0168340 (Scopus). 2. Zelensky A., Slobodyanyuk S. (2023) Stress-strain state of shallow shells of arbitrary thickness according to mathematical theory. AIP Conference Proceedings, 2678, art. no. 020025, DOI: 10.1063/5.0120051 (Scopus). 3. Зеленський А. П. Варіант математичної теорії ортотропних і фізично нелінійних нетонких пластин : монографія. Д.: Придніпровська державна академія будівництва та архітектури. 2023. – 140 с. 4. Зеленський А. П. Варіант математичної теорії трансверсально-ізотропних пластин довільної товщини : монографія : монографія. Д.: Придніпровська державна академія будівництва та архітектури. 2022. – 256 с. 5. Зеленський, А. (2023). Гранична задача для півнескінченної нетонкої пластини. <i>Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій</i> , 1(36), 49-68. <a href="https://doi.org/10.15421/4223105">https://doi.org/10.15421/4223105</a> (фахове видання, категорія Б)
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	1. Kagadiy T.S. Asymptotic method in dimensional problems of electroelastic Kagadiy T.S., Shporta A.G. Onoprienco O.D. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020-02   journal-article. DOI: 10.33271/nvngu/2020-1/130 (Scopus) 2. Kagadiy T.S. Mathematical modeling in the calculation of reinforcing elements \\\ Kagadiy T.S., Shporta A.G. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2019-10   journal-article. DOI: 10.29202/nvngu/2019-5/10 (Scopus) 3. Кагадій Т.С. Математичне моделювання в задачах



1	2	3	4	5	6
					геометрично нелінійної теорії пружності / Т.С. Кагадій, А.Г. Шпорта, О.В. Білова, І.В. Щербина // Прикладні питання математичного моделювання. – 2021. – Т. 4, №1. – С. 103–110. <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(фахове видання)
4.	Гарт Етері Лаврентіївна (рецензент)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України, професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки	доктор фізико-математичних наук, 01.02.04-механіка деформівного твердого тіла, 2017 р., Україна	професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки, 2021 р., Україна	<p>1.Hart E. L., Hudramovich V. S. Computer simulation of the stress-strain state of plates with reinforced elongate rectangular holes of various orientations // Strength of materials and theory of structures: Scientific-and-technical collected articles. – Kyiv: KNUBA, 2022. – Issue 108. – P. 77–86. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.108.77-86 (WoS). <a href="http://opir.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-108/05-108_hart_hudramovich.pdf">http://opir.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-108/05-108_hart_hudramovich.pdf</a></p> <p>2.Hart E. L., Terokhin B. I. Computer simulation of the stress-strain state of the plate with circular hole and functionally graded inclusion // Journal of Optimization, Differential Equations and their Applications. – 2021. – Vol. 29, Iss. 1. – P. 42–53. ISSN (Print): 2617-0108; ISSN (Online): 2663-6824 (Scopus). <a href="https://doi.org/10.15421/142103">https://doi.org/10.15421/142103</a></p> <p>3.Hart E. L., Hudramovich V. S. Projection-iterative schemes for the implementation of variational-grid methods in the problems of elastoplastic deformation of inhomogeneous thin-walled structures // J. Math. Sci. – 2021. – Vol. 254, No. 1. – P. 21–38. (Scopus) <a href="https://doi.org/10.1007/s10958-021-05285-7">https://doi.org/10.1007/s10958-021-05285-7</a></p>



1	2	3	4	5	6
5.	Комаров Олександр Вікторович (рецензент)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки	кандидат фізико- математичних наук 01.02.04- механіка деформівного тіла 2008 р., Україна	доцент кафедри теоретичної та комп'ютерн ої механіки, 2021 р., Україна	1. Білий, Д. В., Комаров, О. В., & Лобода, В. В. (2021). Антиплоска задача для одномірного п'єзоелектричного квазікристала з міжфазною тріщиною. <i>Computer Science and Applied Mathematics</i> , (1), 5-14. <a href="https://doi.org/10.26661/2413-6549-2021-1-01">https://doi.org/10.26661/2413-6549-2021-1-01</a> (фахове видання, категорія Б). 2. Loboda V., Sheveleva A., Komarov O., Lapusta Y. An interface crack with mixed electrical conditions at it faces in 1-D quasicrystal with piezoelectric effect. <i>Mechanics of Advanced Materials and Structures</i> , 2022, Vol. 29, No. 23, 3334–3344. <a href="https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1896056">https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1896056</a> . (Scopus). 3. Білий Д. В., Комаров О. В. Дослідження рухомої тріщини в анізотропному матеріалі. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – 2022. – Т. 1. № 34. – С. 5–15. URL: <a href="https://doi.org/10.15421/4222101">https://doi.org/10.15421/4222101</a> (фахове видання, категорія Б).

**Результати голосування:**

«За» – 16 осіб ,

«Проти» – немає,

«Утримались» – немає.

Головуючий

Секретар

Анатолій ДЗЮБА

Тетяна ХОДАНЕН