

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Білого Дмитра Володимировича
на тему «Внутрішні та міжфазні тріщини в п'єзоелектричних квазікристалах»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна
математика

Актуальність теми дослідження. Побудова моделей для дослідження поведінки та міцнісних характеристик композитних матеріалів (зокрема з дефектами типу отворів і тріщин) є чи не найактуальнішою проблемою в механіці руйнування. Зважаючи на значне розмаїття нових матеріалів, що використовуються в різних галузях будівництва, виробництва приладів та інструментів спеціального та побутового призначення, кількість як модельних, так і конкретних розрахункових задач для тіл з таких матеріалів збільшується чи не щоденно. Отже, дослідження моделей тіл з тріщинами, виготовлених з п'єзоелектричних квазікристалів, якому присвячено дисертаційну роботу Білого Д. В., є беззаперечно актуальним, тим більше, що подібні композити, наскільки нам відомо, в Україні до цього часу не досліджувалися взагалі, а отже, робота має очевидну перспективу.

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з індивідуальним планом підготовки аспіранта та в рамках держбюджетних тем 1-335-18 «Розрахункові моделі п'єзоелектричних та п'єзоелектромагнітних композитів з тріщинами на межі поділу матеріалів» (номер державної реєстрації № 0118U003302, 2018–2020 рр.) та 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.).

Метою дисертаційної роботи було дослідження тріщини між двома різнорідними п'єзоелектричними квазікристалами під впливом плоского та антиплоского навантаження механічного та електричного типу, а також рухомої тріщини в анізотропному матеріалі. В роботі сформульовано чотири задачі, які потрібно було вирішити задля досягнення мети. Чотири розділи, з яких складається дисертація, цілком відображають кожну зі сформульованих задач. Вважаю, що мету роботи досягнуто.

Наукову новизну одержаних результатів можна сформулювати, виходячи з висновків до розглянутих в роботі конкретних задач, які всі є новими. Отже, *вперше:*

1. Розв'язано задачу для двох зчеплених одновимірних п'єзоелектричних квазікристалічних півпросторів з тунельною електрично провідною тріщиною вздовж межі їх поділу під дією віддалених рівномірно розподілених антиплоских фононних та фазонних зсувних напружень та електричного поля в площині, перпендикулярній фронту тріщини. Встановлено, що фононні та фазонні напруження мають осциляційну кореневу сингулярність біля вершин тріщини, яка на відміну від плоского випадку не призводить до взаємного проникнення берегів.
2. Розв'язано антиплоску задачу для п'єзоелектричного квазікристала з електропровідною міжфазною тріщиною під впливом фононного

механічного навантаження та електричного поля, а також розподіленого вздовж берегів тріщини електричного заряду. Встановлено, що електричний заряд не змінює характер особливостей фізичних полів в околі тріщини, але суттєво впливає на їхні кількісні характеристики.

3. Аналітично розв'язано плоску задачу для електрично проникної тріщини на межі поділу двох напівнескінчених одновимірних п'єзоелектричних квазікристалічних півпросторів під дією віддалених рівномірно розподілених фононних нормальних та зсувних напружень, а також фазового напруження та електричного зміщення. Встановлено особливості фононних і фазонних полів у вершинах тріщини, а складові цих полів отримано аналітично.
4. Отримано аналітичний розв'язок плоскої задачі теорії пружності для п'єзоелектричного квазікристала з тріщиною, береги якої ортогональні квазі-періодичному напрямку розміщення атомів кристалічної решітки, для випадку електрично ізолюваних берегів тріщини.
5. Одержано аналітичний розв'язок для тріщини, що рухається усталено з дозвуковою швидкістю в ортотропному матеріалі, під дією зосереджених сил, прикладених до її берегів тріщини; встановлено особливості напружень в точках фронту тріщини.

Усі отримані в роботі результати є **науково обґрунтованими**, що забезпечується коректністю постановок задач, використанням апробованих математичних моделей і аналітичних методів, порівнянням часткових випадків із відомими аналітичними розв'язками.

Практичне значення роботи полягає в можливості розробки програмних комплексів для комп'ютерного моделювання процесів руйнування квазікристалічних композитів із п'єзоелектричними складовими та використанні їх як еталонних при розробці й апробації наближених чисельних методів розв'язання задач зазначеного класу для тіл кінцевих розмірів. До цього слід додати фахове введення в науковий обіг в галузі прикладної математики, зокрема в механіці руйнування, понять «фононний» та «фазонний», які використовуватимуться в подальшому в наукових розробках з цієї тематики.

Апробація результатів роботи є достатньою: основні положення та результати дисертації доповідалися й обговорювалися на підсумкових наукових конференціях Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара протягом 2019-2022 років, на трьох міжнародних конференціях та на міжкафедральному семінарі «Математичні проблеми механіки» ДНУ.

Публікації за темою дисертації. Здобувачем опубліковано 4 статті в 3 різних наукових фахових виданнях України, 1 статтю у зарубіжному науковому виданні *Acta Mechanica*, яке включене до міжнародної наукометричної бази *Scopus*, 2 тез доповідей та 1 матеріали міжнародних наукових конференцій. В опублікованих роботах автора повною мірою відображено зміст дисертації. Праці опубліковано протягом 4-х років навчання в аспірантурі, що свідчить про систематичність роботи Білого Д. В. над темою дослідження.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4-х розділів, висновків та списку використаних джерел, що містить 120 джерел, з яких 87 – англomовні. Робота добре структурована (містить 26 пунктів та 4 підпункти) та проілюстрована 30 рисунками, містить 4 таблиці. Обсяг основного тексту – 102 сторінки, що відповідає вимогам, встановленим освітньо-науковою програмою «Прикладна математика» спеціальності 113 Прикладна математика. Оформлення роботи відповідає чинним вимогам.

У *вступі* зазначено мету і завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет, методи дослідження, сформульовано наукову новизну, подано відомості про зв'язок з науковими програмами, планами наукових досліджень кафедри, апробацію роботи, особистий внесок дисертанта в опубліковані праці та описано структуру роботи.

У *першому розділі* подано історію дослідження квазікристалів, описано їхню структуру, наведено класифікацію. Проведено докладний огляд літератури та визначено місце власних досліджень в контексті обраної тематики.

У *другому розділі* всебічно розглянуто антиплоску задачу для одновимірного біматеріального п'єзoeлектричного квазікристала з міжфазною тріщиною. Побудовано представлення компонент електропружно-деформівного стану через кусково-аналітичні функції, сформульовано задачу лінійного спряження для випадку електропровідної тріщини. Отримано точний аналітичний розв'язок цієї задачі, проілюстровано вплив зовнішнього механічного фонon навантаження і різних величин електричного поля на фонonні і фазонні напруження та зсувне відкриття тріщини. Представлено розв'язок задачі про антиплоске навантаження для одновимірного п'єзoeлектричного біматеріального квазікристала з тріщиною під впливом механічного навантаження і електричного поля, прикладених на нескінченності, та електричного заряду, розподіленого вздовж берегів тріщини. Графічно зображено розподіли фонon та фазон напружень та відкриття тріщини за різних значень заряду на її берегах. Проведено аналіз впливу величини цього заряду на вказані характеристики фізичних полів.

У *третьому розділі* розглянуто плоску задачу для одновимірного біматеріального п'єзoeлектричного квазікристала з тунельною тріщиною на межі поділу матеріалів. Отримано матрично-векторні представлення параметрів стану композита, сформульовано задачу лінійного спряження Рімана-Гільберта для випадку електрично непроникної тріщини, яку розв'язано аналітично. Сформульовано аналогічну задачу лінійного спряження і для моделі електрично проникної тріщини. Розв'язок цієї задачі також отримано аналітично. Для обох видів електричних граничних умов на берегах тріщини наведено аналітичні вирази для фонonних і фазонних стрибків зміщень вздовж області тріщини, а також фонonних і фазонних напружень вздовж зв'язаних частин поверхні поділу матеріалів. Отримано коефіцієнти інтенсивності фонonних і фазонних напружень біля вершин тріщини. Чисельну реалізацію одержаних результатів проілюстровано для конкретної комбінації п'єзoeлектричних квазікристалів.

Зроблено важливі висновки стосовно залежностей фононних та фазонних полів від зовнішнього механічного навантаження та електричного поля.

У *четвертому розділі* досліджено тріщину, що рухається усталено з дозвуковою швидкістю в ортотропному матеріалі під дією зосереджених сил, прикладених до берегів тріщини. Шляхом заміни координат, виключення швидкості руху тріщини із системи рівнянь її руху та використання методу комплексних потенціалів проблему зведено до неоднорідної задачі лінійного спряження. Одержано аналітичний розв'язок вказаної задачі, показано, що напруження мають кореневу особливість у вершині тріщини незалежно від швидкості її руху. Отримані результати проілюстровано для конкретного ортотропного вуглепластика. Продемонстровано ріст розкриття тріщини при збільшенні швидкості її руху.

Висновки сформульовано до кожного розділу роботи, найбільш вагомими з них, що цілком, на мою думку, відповідають поставленим завданням та логічно випливають з проведеного дослідження, подано в кінці роботи.

Високо оцінюючи представлену Білим Д. В. дисертацію, вважаю за доцільне висловити деякі зауваження та побажання:

1. Багато було б в розрахункових пунктах роботи наводити назви конкретних квазікристалів. Так, наприклад, у таблицях 3.1, 3.2 наведено фізичні характеристики конкретних квазікристалів, проте їхні назви не зазначено, а лише подано відповідне посилання на джерело. Цікаво було б дізнатися, які саме п'єзoeлектричні квазікристали розглядалися.
2. На с. 33 в огляді літератури є посилання на «Г. С. Кіта і М. В. Хая [1616]». Очевидно, що це помилковий номер, має бути «16». В електронному варіанті дисертації це помітно через червоний колір шрифту, але в друкованому – ні. У майбутньому варто уникати подібних технічних помилок, які за умов більшої кількості джерел або меншої кількості цифр в номері можуть бути переключені у помилки цитування або навіть у дезінформацію.
3. У кінці висновків до третього розділу йдеться про «хорошу узгодженість» результатів для «часткового випадку дуже близьких фізичних характеристик нижньої та верхньої складових КК біматеріалу» та для «відповідного однорідного КК». Це твердження викликає низку запитань: за якими критеріями та параметрами проводилося порівняння? Що означає «відповідний однорідний КК»? Яке відхилення автор вважав «хорошою узгодженістю»?
4. У четвертому розділі розглянуто задачу про тріщину в ортотропному матеріалі, яка рухається з усталеною дозвуковою швидкістю (до речі, в назві розділу замість словосполучення «в анізотропному матеріалі» краще було б написати: «в ортотропному матеріалі»). Цей розділ виглядає дещо чужорідним в даній роботі, оскільки ортотропний матеріал не є квазікристалом, який розглянуто в попередніх розділах. Зважаючи на те, що цей розділ було написано наприкінці 2022 року (судячи з відповідної

статті за номером 4 у списку публікацій), можна припустити, що наступним кроком у наукових дослідженнях Білого Д. В., наприклад, буде задача про рухому тріщину саме в квазікристалах. Напевно, якби у висновків до цього розділу про цю (або якусь іншу) перспективу було вказано, він виглядав би більш гармонійно.

5. По тексту роботи трапляються невдалі вислови, на кшталт: «Прикладом **нових сучасних** (тавтологія, виділено мною – Т. Х.) матеріалів є квазікристали, які були відкриті **лише в другій половині минулого століття** (суперечить попередньому твердженню, виділено мною – Т. Х.), але вже **ввійшли в широке використання** (граматично неправильне словосполучення, виділено мною – Т. Х.) як у високотехнологічних вимірювальних приладах, так і в побутових виробках»; замість слова «нескінченності» на С. 3, 60, 77, 96 вжито слово «нескінченості»; наявні зайві коми (наприклад, «що є частковим випадком анізотропного, матеріалу», С. 98) тощо.

Проте вказані зауваження не знижують в цілому високої оцінки виконаної роботи.

Загальний висновок. Вважаю, що здобувач Білий Д. В. в результаті виконання дисертаційної роботи повністю оволодів методологією наукової діяльності, особисто отримав вагомі наукові результати. Отже, дисертація Білого Дмитра Володимировича «Внутрішні та міжфазні тріщини в п'єзоелектричних квазікристалах» є закінченою науковою працею, яка відповідає вимогам 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), а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Рецензент:

доцент кафедри теоретичної
та комп'ютерної механіки
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара
кандидат фізико-математичних наук,
доцент



Тетяна ХОДАНЕН

Підпис канд. фіз.-мат. наук, доц. Ходанен Т. В. засвідчую
Проректор з наукової роботи



Олег МАРЕНКОВ