

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Григор'євої Людмили Олександрівни
«**Чисельне моделювання динамічних процесів в п'єзоелектричних тілах з урахуванням дисипативних властивостей та неоднорідності матеріалу**», поданої до захисту на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук за спеціальністю
01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми роботи

Удосконалення існуючих та створення нових зразків технічних пристроїв, які функціонують на основі п'єзоефекту, тісно пов'язано з необхідністю розробки нових підходів до дослідження процесів деформування електров'язкопружних елементів конструкцій. Забезпечення надійності та вибір оптимальних умов функціонування конкретних технічних пристроїв висуває необхідність застосовувати в п'єзоелектричних елементах неоднорідні, в тому числі функціонально-градієнтні матеріали. Аналіз літературних джерел показує, що до теперішнього часу дослідженням у цьому напрямку приділяється недостатньо уваги. Тому тема дисертаційної роботи Л.О. Григор'євої, яка присвячена розробці ефективних чисельних підходів до дослідження усталених та перехідних режимів роботи неоднорідних електров'язкопружних елементів конструкцій, обумовлених дією гармонічних та нестационарних електромеханічних навантажень, в т.ч. з урахуванням їх взаємодії з зовнішніми акустичними середовищами, є актуальною, науково спроможною та перспективною щодо можливостей подальшого теоретичного розвитку і практичного застосування отриманих результатів у машинобудуванні, енергетиці, транспорті, акустоелектроніці та нанотехнологіях.

Новизна одержаних результатів

У дисертаційній роботі розвинуто чисельну методику досліджень напружено-деформованого стану електров'язкопружних неоднорідних тіл при дії механічних та електричних навантажень. Робота містить низку нових оригінальних наукових ідей і практично важливих результатів, що стосуються п'єзоперетворювачів однорідної, багат шарової та функціонально-неоднорідної структури у формі плоских тіл, порожнистих циліндрів та куль. До основних наукових результатів, отриманих у роботі, можна віднести такі:

- В рамках лінійної теорії електропружності, гідропружності, механіки спадкового середовища, реологічних співвідношень та теорії коливань дисипативних систем дано постановки задач нового класу задач електров'язкопружності, що враховують неоднорідність матеріалу та вплив акустичного середовища.
- Розвинуто чисельні підходи до розв'язання задач про усталені вісесиметричні коливання однорідних та композитних тіл з врахування дисипативних властивостей матеріалу на основі варіаційних методів, сплайн-апроксимацій, скінченних різниць та гамільтонового формалізму. На їх основі

- досліджено усталені коливання порожнистих циліндричних п'єзовипромінювачів з врахуванням дисипативних властивостей через комплексні модулі.
- Розроблено узагальнений підхід до розв'язання зв'язаних початково-крайових задач про нестационарні коливання неоднорідних тіл плоскої, циліндричної та сферичної форми, що дозволяє проводити дослідження динамічного електромеханічного стану п'єзоперетворювачів однорідної, багаточислової та функціонально-неоднорідної структури при різних варіантах закріплення та електромеханічного навантаження.
 - Проведено порівняння резонансних коливань з врахуванням демпфування за Фойгтом, за Релеєм та за допомогою комплексних модулів. Визначено добротність та інші дисипативні характеристики п'єзоелемента та встановлено відповідність результатів вхідним даним.
 - Для врахування електромеханічних втрат енергії в нестационарних режимах запропоновано чотирипараметричну модель демпфування коливань. Виявлено нові закономірності перехідних процесів в неоднорідних тілах з врахуванням затухання коливань. Визначено декремент коливань та описано його залежність від розмірів п'єзоелемента та коефіцієнтів демпфування.
 - Запропоновано та реалізовано алгоритм розрахунку планарних осесиметричних коливань тонких круглих та кільцевих пластин при електричних та механічних навантаженнях.
 - Розвинуто чисельний підхід до дослідження динамічних процесів у неоднорідних тілах складної геометрії на основі методу скінченних елементів.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

механіки деформівного твердого тіла, механіки зв'язаних полів, математичної фізики та обчислювальної математики.

Достовірність отриманих результатів забезпечується коректністю постановок задач, точністю математичних перетворень, використанням обґрунтованих методів розв'язання, розробкою стійких алгоритмів чисельного розв'язання отриманих систем диференціальних та алгебраїчних рівнянь, наявністю практичної збіжності обчислювальних процесів, фізичною коректністю зроблених у дисертації висновків та їх узгодженням у часткових випадках з відомими результатами інших авторів. Результати, отримані різними чисельними методами (варіаційно-сплайновим методом, підходом на основі гамільтонового формалізму, методом скінченних різниць, методом скінченних елементів), взаємověріфікуються, що також свідчить про їх достовірність.

Значення роботи для науки і практики

Робота присвячена подальшому розвитку прикладних досліджень, які пов'язані з розробкою ефективних методик чисельного аналізу динамічних процесів деформування неоднорідних п'єзоелектричних тіл в резонансних та нестационарних режимах роботи з урахуванням дисипативних властивостей

матеріалу, що дає можливість отримувати більш наближені до реальності результати.

Практичне значення роботи полягає у використанні розроблених моделей та розвинутих підходів до розв'язання крайових та початково-крайових задач, для автоматизованого дослідження динамічних режимів роботи електров'язкопружних елементів конструкцій багатошарової та неоднорідної структури, які наразі набувають значного поширення в практичних застосуваннях, прогнозування їх динамічної міцності, а також для оцінки достовірності результатів, отриманих у рамках інших моделей, які використовуються при дослідженні зв'язаних полів у тілах з п'єзоефектом.

На основі створених математичних моделей та програмних засобів можуть бути також сформульовані рекомендації інженерного спрямування, що стосуються комплексних теоретичних та експериментальних досліджень при модернізації існуючих і проектуванні нових неоднорідних електров'язкопружних елементів складної геометрії, що експлуатуються в умовах гармонічних та нестационарних електромеханічних навантажень.

Рекомендації щодо використання результатів проведених досліджень

Отримані в дисертаційній роботі результати, в тому числі, запропоновані математичні та механічні моделі, виконані постановки задач, розроблені методики чисельного розв'язання та зроблені висновки роботи можуть бути використані при подальших дослідженнях задач механіки електропружних, гідроелектропружних та електров'язкопружних систем, що проводяться в наукових установах, зокрема, в Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка, ДП «КНДІ Гідроприладів», вищих навчальних закладах та науково-дослідних інститутах відповідного профілю. Вони також можуть використовуватись у проектно-конструкторських і виробничих організаціях при проектуванні сучасних пристроїв, активним елементом яких є неоднорідні п'єзо-перетворювачі, та дослідженні умов їх безпечної та надійної експлуатації.

Повнота викладення результатів дисертації у фахових виданнях

Матеріали дисертації достатньо повно опубліковано у 39 наукових працях, зокрема 23 статті у наукових фахових виданнях України, один розділ в колективній монографії закордонного видання та 15 тез доповідей на наукових конференціях та симпозіумах. З них 11 робіт опубліковано у виданнях, що індексуються міжнародними науково-метричними базами Scopus та Web of Science. Зазначені публікації з достатньою повнотою розкривають основний зміст дисертаційної роботи.

Основні положення і результати дисертації також пройшли достатньо повну апробацію і дістали позитивну оцінку на 15 Міжнародних і Всеукраїнських наукових конференціях, симпозіумах та семінарах. Результати дисертації в повному обсязі доповідалися на засіданні кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», на науковому семінарі кафедри теоретичної та прикладної механіки механіко-математичного факультету КНУ імені Тараса Шевченка, трьох семінарах різного рівня

Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка і одержали позитивні оцінки.

Реферат дисертації повно і всебічно відображає основні положення дисертаційної роботи, зміст проведених досліджень, отриманих результатів та висновків.

Академічна доброчесність

Жодних порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, в яких висвітлено основні наукові результати, не виявлено. Елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в дисертаційній роботі відсутні. Усі результати, які винесені авторкою на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих нею роботах.

Зауваження та пропозиції

Попри згадані вище здобутки та наукові результати, до роботи варто зробити такі зауваження:

1. Розглянуті в роботі електропружні системи при певних рівнях електромеханічного навантаження стають суттєво нелінійними. У зв'язку з цим виникає потреба у визначенні меж застосування розроблених авторкою підходів до розв'язання динамічних задач електров'язкопружності.

2. При дослідженні нестационарних та усталених коливань однорідних та неоднорідних електров'язкопружних тіл в дисертаційній роботі розглянуто лише тіла канонічної та близької до неї форми. У той же час досить розповсюдженими на практиці є конструктивні елементи більш складної геометрії, які мають отвори і тріщини довільного обрису. Слід було б показати які математичні труднощі виникають при розв'язанні такого класу багатозв'язних задач і які підходи використовуються до їх розв'язання.

3. У розділі 4 дисертаційної роботи проведено чисельне моделювання динамічних процесів для багаточастотних п'єзоелементів. Для таких тіл варто було б висвітлити питання утворення та розвитку міжфазних тріщин, що є важливим для оцінки механічної міцності п'єзоперетворювачів в процесі експлуатації.

4. Завдяки взаємодії полів різної фізичної природи, розглянуті в дисертаційній роботі матеріали можуть внутрішнім чином реагувати на впливи електричного, магнітного, теплового та механічного полів, що істотно ускладнює вивчення перебігу досліджуваних явищ і потребує застосування нових моделей їх розрахунку. Неврахування впливу цих ефектів може зумовити виникнення невиннованих великих помилок на етапі проектування певного конструкційного елемента. Тому слід було би докладно висвітлити питання взаємодії полів різної фізичної природи в досліджуваних тілах, а також можливості застосування розроблених чисельних підходів до розв'язання задач у рамках загальної термомагнітоелектропружності.

5. Хоча робота оформлена досить добре, мають місце деякі описки та невдалі формулювання. Наприклад, в сформульованій меті роботи вказано «перехідні процеси», тоді як в роботі крім перехідних розглядаються усталені процеси також. Для понять «функціонально-неоднорідний» та «функціона-

льно-градієнтний матеріал» варто було б надати означення, щоб окреслити відмінності між ними. При описі узагальнених характеристик п'єзоелектричних композитів вводяться поняття усереднених за об'ємом величин, які не наведено в переліку основних позначень.

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

Загальні висновки

В цілому, дисертаційна робота Григор'євої Людмили Олександрівни є завершеним науковим дослідженням, в якій розв'язана важлива і актуальна наукова проблема механіки деформівного твердого тіла, що пов'язана з розробкою ефективної чисельної методики дослідження деформування неоднорідних електров'язкопружних елементів конструкцій.

Враховуючи актуальність тематики дисертації, обґрунтованість, значущість та важливість отриманих у ній результатів, вважаю, що дисертаційна робота «Чисельне моделювання динамічних процесів в п'єзоелектричних тілах з урахуванням дисипативних властивостей та неоднорідності матеріалу» повністю відповідає вимогам «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197, а її авторка, Григор'єва Людмила Олександрівна, заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Завідувач кафедри вищої математики, фізики
та загальноінженерних дисциплін
Дніпровського державного
аграрно-економічного університету,
доктор фізико-математичних наук,
професор

 Володимир ГОВОРУХА

Підпис В.Б. Говорухи засвідчую:

Вчений секретар
Дніпровського державного
аграрно-економічного університету,
доктор фізико-математичних наук,
професор



 Олена БЕРЕЗА