

ВІДГУК**офіційного опонента на дисертаційну роботу****Машенка Володимира Андрійовича «Приладові системи для вимірювання модулів пружності та коефіцієнта Пуассона конструкційних полімерних та гетерогенних матеріалів», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю****05.11.01 – прилади на методи вимірювання механічних величин****Актуальність теми**

Сучасний розвиток техніки пов'язаний із широким застосуванням полімерних матеріалів. Сьогодні полімерні матеріали використовуються у різних технічних системах або елементах конструкції, пов'язаних із перетворенням, передачею й поглинанням механічної енергії. Для ефективного функціонування таких систем важливо, щоб їх елементи мали необхідні значення модулів пружності та коефіцієнту Пуассона, тому одними із головних завдань, з погляду матеріалознавства, є підвищення точності вимірювань вказаних величин, що забезпечить їх раціональне застосування.

Забезпечення високоточних вимірювань коефіцієнта Пуассона та динамічних модулів пружності полімерних матеріалів може бути реалізовано за допомогою різних класів і моделей акустичних коливань, зокрема і поздовжніх, поперечних ультразвукових хвиль та поверхневих хвиль Релея із використанням нових методів. З іншого боку, розвиток сучасної мікроелектроніки та інформаційних технологій надає змогу розширити можливості використання акустичних методів завдяки новим методам обробки сигналів та автоматизації вимірювань і оцінювання їх результатів.

Окремим питання є розробка ефективних методів моніторингу потенційно небезпечних технічних об'єктів, що перебувають під дією руйнівних навантажень. У таких випадках ключовим питанням постає вибір методів і засобів вимірювання модулів пружності та коефіцієнта Пуассона як гетерогенних геоматеріалів, що дозволить прогнозувати їх працездатність за критичних режимів або слугуватиме для прийняття рішень про необхідність проведення попереджувальних заходів під час експлуатації геотехнічних об'єктів.

Виходячи з цього, удосконалення методів вимірювання коефіцієнта Пуассона та динамічних модулів пружності, як механічних величин, є актуальною науково-прикладною задачею, розв'язання якої надає можливість вирішити комплексну проблему підвищення точності вимірювання параметрів полімерних конструкційних матеріалів для забезпечення функціональності та надійності вузлів і елементів конструкцій промислових апаратів та розроблення приладових систем для вимірювання модулів пружності гетерогенних матеріалів для моніторингу стану технічних об'єктів.

Наукова новизна отриманих результатів

Автором отримано нові наукові результати, зокрема:

– уперше розроблено методологію вимірювання амплітуди резонансних коливань консольно закріпленого полімерного стрижня на звукових частотах, що базується на обробці цифрового зображення, яка дала можливість підвищити точності визначення головної резонансної частоти коливань зразка і, відповідно, і його динамічного модуля пружності;

– уперше отримані регресійні аналітичні залежності амплітуди резонансних максимумів зразків конструкційного полівінілхлориду від частоти за різних температур та регресійна залежність частоти головного максимуму від температури, що дає можливість прогнозувати значення динамічних модулів пружності за різних температур;

– подальшого розвитку отримали теоретичні моделі процесів відбивання, заломлення та трансформації акустичних хвиль на межі рідини та твердого тіла з від'ємними значеннями коефіцієнта Пуассона і на межі твердих тіл із додатними та від'ємними значеннями коефіцієнта Пуассона, що дало можливість розробити алгоритми визначення критичних кутів під час вимірювання швидкості поширення поперечної хвилі у матеріалах із від'ємним коефіцієнтом Пуассона;

– уперше розроблено концепцію приладової системи на основі імерсійного методу вимірювання швидкостей поширення поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль і коефіцієнтів їх поглинання в полімерних матеріалах та гетерогенних геоматеріалах, яка відрізняється тим, що вимірювання амплітуди та часу проходження імпульсу ультразвукового сигналу покладено на апаратну та програмну складові приладової системи, і таким чином підвищено точність визначення динамічних модулів пружності та коефіцієнта Пуассона;

– уперше запропоновано визначати дійсну й уявну частини динамічного коефіцієнта Пуассона через швидкості поширення поздовжніх та поперечних хвиль та коефіцієнтів їх затухання, що дало можливість їх вимірювання імерсійним методом із величиною невизначеності, що не перевищує 6 %;

– уперше отримано розв'язок рівняння Релея для матеріалів із від'ємним значенням коефіцієнта Пуассона, що дало змогу вдосконалити метод збудження та прийому хвиль Релея гребінчастою структурою та побудувати приладову систему для вимірювання швидкості поверхневої акустичної хвилі Релея і значень дійсної та уявної частин комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона за його мінімальної величини;

– уперше запропоновано концепцію приладової системи для вимірювання швидкостей поширення поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль у зразках гетерогенних геоматеріалів за одновісного напруження, прикладеного в

різних напрямках поширення ультразвукових хвиль, що базується на теоретичних моделях процесів відбивання, заломлення та трансформації УЗ-хвилі залежно від фізичних параметрів контактуючих середовищ, що дало змогу визначити модулі пружності третього порядку.

Ступінь обґрунтованості, достовірності та новизни наукових положень

Обґрунтованість і достовірність основних результатів дисертації Мащенко В.А. зумовлена коректністю постановки завдань, вірно обраними методами їх вирішення, звірянням отриманих результатів із результатами, опублікованими в наукових працях інших авторів, проведенням експериментальних досліджень.

У дисертаційній роботі застосовано методи математичної фізики для моделювання процесів коливання в'язкопружного стрижня, як об'єкта вимірювань під час дії збурювальних факторів, методи математичного моделювання для отримання функціональних залежностей параметрів моделі відбивання, заломлення та трансформації акустичних хвиль різних класів на межі поділу середовищ, методи теорії похибок, методи обробки зображень та розробки програмних додатків для алгоритмізації програмних кодів мікроконтролера приладових систем. Ці методологічні підходи є класичними, детально розробленими та широко апробованими в науковій літературі. Отримані результати відповідають теоретичним розрахункам. Можливість їх практичного застосування додатково засвідчується формулюванням конкретних висновків, методик і алгоритмів, що вже впроваджені або можуть бути впроваджені в інформаційно-вимірювальні приладові системи.

Запропоновані здобувачем рішення, висновки та рекомендації підтверджено актами впровадження. Також проведено апробацію результатів дисертаційного дослідження, їх опублікування у закордонних та фахових вітчизняних виданнях, представлення на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях і семінарах.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Мащенко В.А. складається зі вступу, шести розділів, висновків по роботі, списку літературних джерел та додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання дослідження та наукову проблему. Також викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відомості про апробацію та публікацію основних результатів дисертаційної роботи, визначено особистий внесок здобувача та представлено інформацію щодо впровадження результатів роботи.

У першому розділі дисертаційної роботи розглянуто теоретичні підходи до вимірювання модулів пружності другого й третього порядків та коефіцієнта

Пуассона твердого тіла як механічних величин, вимірювання яких пов'язані зі зміною рівноважного стану та дисипаціями енергії в матеріалі.

Автором показано, що в приладових системах для вимірювання комплексних модулів пружності та коефіцієнта Пуассона в переважній більшості випадків використовуються методи, де вимірюються первинні параметри, на основі яких проводяться розрахунки відповідних величин. Під час вимірювання первинних параметрів для визначення модулів пружності другого порядку прийнято застосовувати стандартні резонансні методи, метод динамічної жорсткості та ультразвукові методи.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений теоретичним дослідженням, спрямованим на вдосконалення методу вимірювання амплітуди резонансних коливань консольно закріпленого полімерного стрижня та розробки інформаційно-вимірювальної приладової системи для реалізації автоматизованого процесу вимірювань.

Визначення амплітуди резонансних коливань вільного кінця полімерного стрижня в реальному часі реалізовано у інформаційно-вимірювальній приладовій системі за допомогою цифрової обробки та аналізу зображення, отриманого із вебкамери.

Процес вимірювання повністю автоматизований у заданому частотному діапазоні й завершується побудовою резонансної кривої, на основі якої визначаються основні резонансні частоти коливань зразка та проводиться розрахунок складових комплексного модуля пружності зразка полімерного конструкційного матеріалу.

Крім цього у розділі представлено порівняльний аналіз резонансних методів визначення динамічного модуля пружності, проаналізовані граничні відносні похибки вимірювань та вказано, що вибір методу значною мірою залежить від жорсткості матеріалу, потрібної точності вимірювання та проведення додаткових вимірювань іншими методами для визначення необхідних величин.

У **третьому розділі** дисертації розглянуто декілька математичних моделей, які описують процеси відбивання, заломлення та трансформації акустичних хвиль на межі рідини та твердого тіла з від'ємними значеннями коефіцієнта Пуассона (ауксетик-середовище) і на межі твердих тіл із додатнім та від'ємним значеннями коефіцієнта Пуассона.

Основні параметри, які аналізуються в розглянутих моделях, є коефіцієнти відбивання, трансформації та збудження різних класів хвиль (поздовжньої, поперечної) на межі середовищ із різним акустичним імпедансом.

Проведені теоретичні розрахунки показали, що характер залежностей коефіцієнтів відбивання, трансформації та збудження при падінні поздовжньої

(поперечної) акустичної хвилі на межу поділу залежить від величини коефіцієнта Пуассона та акустичних жорсткостей контактуючих середовищ.

Одним із теоретичних висновків, які заслуговують на увагу, при моделюванні процесів падіння акустичних хвиль із рідини на поверхню ауксетика є наявність критичного кута при якому спостерігається повне внутрішнє відбивання, а відбита хвиля стає поверхневою.

Окремо у розділі розглядається задача проходження ультразвукових хвиль через занурену в рідину пластину з полімерних матеріалів із різними значеннями коефіцієнта Пуассона. Розрахунки коефіцієнтів відбивання та прозорості від кута падіння поздовжньої хвилі та товщини пластини для даної моделі є теоретичним підґрунтям для реалізації імерсійного методу у розробленій інформаційно-вимірювальній приладовій системі для вимірювання динамічних модулів пружності та коефіцієнта Пуассона.

Четвертий розділ дисертаційної роботи висвітлює розроблення інформаційно-вимірювальної приладової системи для імерсійного методу вимірювань швидкостей поширення УЗ-хвиль та визначення динамічних модулів пружності й коефіцієнта Пуассона ряду полімерних та гетерогенних матеріалів та їх практичне використання для прикладних задач фізики полімерів, матеріалознавства і геотехнічної механіки.

Робота приладової системи базується на проходженні поздовжніх та поперечних ультразвукових хвиль через зразок матеріалу, що занурений в імерсійну рідину. Це дає змогу вважати зразок еквівалентним відрізком заданої довжини, навантаженим на опір, який дорівнює хвильовому опору рідини, що допустимо при використанні високочастотних імпульсів, так як при цьому в рідині не виникають стоячі хвилі.

Згідно із розробленою методикою, визначення швидкості поздовжньої хвилі базується на порівнянні результатів вимірювань часів проходження зондувального імпульсу крізь імерсійну рідину при відсутності зразка та наявності зразка між випромінювачем і приймачем сигналів.

Для визначення швидкості поперечної хвилі використовується метод обертової пластини. При досягненні критичного кута поздовжня хвиля буде поверхневою, а у зразку матеріалу поширюється тільки поперечна хвиля.

У запропонованій інформаційно-вимірювальній приладовій системі автором реалізовано декілька нових технічних рішень, зокрема:

- розроблено паралельну структуру вимірювального каналу аналогово-цифрового інтерфейсу для визначення часу проходження УЗ-імпульсу та його амплітуди на основі операційних підсилювачів та швидкодіючих компараторів;

- виявлення прийнятого сигналу, вимірювання амплітуди першого й головного максимумів відгуку на зондувальний імпульс, при цьому визначення часу їх проходження та передачу даних на персональний комп'ютер для подальшої обробки покладено на однокристальний мікроконтролер;

– вимірювання амплітуди реалізовано за алгоритмом порозрядного наближення.

У розділі також деталізовано визначення похибок при імерсійних вимірюваннях та визначенні модулів пружності конструкційних полімерних і гетерогенних матеріалів. Розроблена інформаційно-вимірювальна приладова система забезпечує вимірювання швидкості поширення поздовжньої хвилі із граничною відносною похибкою 1,1 % і швидкості поширення поперечної хвилі – 0,5 % та, відповідно, модуля Юнга – 2,5 % і модуля зсуву 1,8 %.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи запропонована методика визначення комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика на основі парних експериментів при поширенні у ньому поздовжньої, поперечної акустичних хвиль та поверхневої акустичної хвилі Релея.

Використання рівнянь теорії пружності дало можливість автору визначити співвідношення для визначення дійсної та уявної частини комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика а також отримати аналітичний розв'язок рівняння Релея у випадку поширення в ауксетику поперечної та поверхневої акустичних хвиль.

Для вимірювання швидкості поширення поверхневої акустичної хвилі Релея та коефіцієнта її поглинання в полімерному ауксетику розроблена методика експерименту та вимірювальний стенд. Збудження та прийом поверхневих хвиль Релея проводили за допомогою гребінчастої структури, що створює на поверхні твердого тіла періодичну сукупність нормальних збурень із просторовим періодом.

Також у розділі представлені результати вимірювань для термопластичного поліуретану із коефіцієнтом Пуассона близьким до мінус одиниці та оцінки абсолютної похибки для швидкості поширення поверхневої хвилі, яка рівна 4 м/с, а для коефіцієнта її поглинання – 2 Нп/м.

Окремим пунктом розділу є оцінка величини поверхневої енергії гетерогенних геоматеріалів за значеннями швидкості поширення поверхневої хвилі.

У шостому розділі дисертаційної роботи запропоновано методику визначення модулів пружності третього порядку гетерогенних геоматеріалів. Автором показано, що для реалізації запропонованої методики необхідно провести три незалежні експерименти.

Для визначення модулів пружності третього порядку проведено вимірювання часу проходження ультразвукового УЗ-імпульсу через зразок матеріалу за трьома схемами при різних режимах навантаження.

Аналіз отриманих результатів показав, що значення модулів третього порядку на два порядки вищі за модулі пружності другого порядку зразків ізотропних гетерогенних геоматеріалів.

У розділі також використаний модельний підхід для аналізу особливостей деформації структурно-неоднорідного гетерогенного геоматеріалу та проведено моделювання зміни пружних модулів зі зміною концентрації дефектів при зовнішніх збуреннях.

Висновки до дисертаційної роботи містять одинадцять пунктів, які висвітлюють отримані у роботі теоретичні та практичні результати.

Дисертація та автореферат написані українською мовою. Стиль викладу матеріалів відповідає загальноприйнятому і має високий науково-професійний рівень. Оформлення дисертації та автореферату відповідає чинним вимогам.

Виходячи з аналізу основної частини дисертаційної роботи, можна зробити висновок що дисертація є завершеною науковою кваліфікаційною роботою.

Значення одержаних результатів для науки і практики та рекомендації щодо їх можливого використання

Одержані в дисертаційному дослідженні результати мають теоретичну та практичну цінність і можуть бути використані для подальших теоретичних та експериментальних досліджень, а також розроблення нових інформаційно-вимірювальних приладових систем. Представлені в роботі методики вимірювань, алгоритми та рекомендації щодо їх застосування є готовими до використання на виробництві для вимірювання модулів пружності та коефіцієнта Пуассона ряду конструктивних матеріалів. Рішення, запропоновані автором можуть знайти застосування у науково-дослідних інститутах, підприємствах машинобудування, які спеціалізуються на розробці нових рішень, інститутах підвищення кваліфікації, перепідготовки інженерно-технічних кадрів та у закладах вищої освіти

Результати дисертаційної роботи були використані при виконанні держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України «Біомеханіка зубощелепної системи, верхніх та нижніх кінцівок: математичне моделювання та практичні рекомендації» (номер держреєстрації 0119U002007, 2018–2020 р.), науково-дослідної роботи кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування «Розробка, дослідження електротехнічних і автоматизованих систем та їх елементів» (номер держреєстрації 0123U105012, 2023–2028 р.). Приладова система для визначення динамічних модулів пружності гетерогенних матеріалів та окремі положення дисертаційної роботи розроблені та виконані в межах науково-дослідної роботи «Фізичні закономірності геодинамічних процесів техногенного характеру у геотехнічних системах» (номер держреєстрації 0113U002682, 2012–2013 р.).

Повнота викладення результатів роботи в опублікованих працях

За результатами досліджень опубліковано 56 наукових праць, зокрема 2 монографії, 9 статей у наукових виданнях, що внесені до міжнародних наукометричних баз Scopus та WOS (із них 3 статті у виданнях іноземних держав), 19 – наукових фахових виданнях України, 5 статей в інших виданнях України за темою дисертаційної роботи. Апробація результатів представлена в 19 тезах матеріалів конференцій різного рівня та підтверджена двома патентами України на корисні моделі.

Обсяг, кількість і джерела публікацій відповідають діючим вимогам до докторських дисертацій.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.

Реферат дисертації у повній мірі відображає основні положення, висновки і рекомендації, наведені у дисертації. Зміст реферату відповідає змісту дисертації. Структура, обсягом і оформленням дисертації і реферату відповідають вимогам, що ставляться до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Зауваження до дисертації

Поряд з позитивними сторонами дисертації, необхідно відмітити і низку зауважень.

1. Перший розділ дисертаційної роботи, переобтяжений матеріалом стосовно оцінки похибок вимірювання модулів пружності та коефіцієнта Пуассона різними методами. Можливо частину матеріалу слід було б перенести у інші розділи роботи або додатки.

2. Для методу резонансних коливань консольно закріпленого стрижня доцільно було б визначити модулі пружності за інших резонансних частот для ряду конструкційних полімерних матеріалів та порівняти їх із значеннями отриманими при основній резонансній частоті.

3. У наведеному алгоритмі цифрової обробки захопленого RGB-зображення при реалізації методу резонансних коливань консольно закріпленого стрижня не зовсім зрозуміло коли слід упускати деякі кроки алгоритму і який критерій при цьому використовує автор.

4. Для модель проходження акустичних хвиль через занурену у рідину пластину в роботі отримано співвідношення для визначення відносної похибки коефіцієнта поглинання, співвідношення (3.3.33), проте кількісної оцінки за цим співвідношенням не проведено.

5. У четвертому розділі дисертаційної роботи отримані залежності критичного кута від коефіцієнта Пуассона у твердому тілі для різних значень величини відношення швидкості поширення акустичної хвилі в рідині до швидкості поширення поперечної хвилі, проте з тексту роботи не зрозуміло як ці залежності використовуються практично.

6. У висновках до п'ятого розділу дисертаційної роботи сказано, що розроблений експериментальний стенд при незначних конструктивних змінах може бути використаний при вимірюваннях для полімерних ауксетиків із більшим значенням дійсної частини коефіцієнта Пуассона та в'язкопружних полімерних матеріалів із додатнім значенням її величини. Не зовсім зрозуміло які конструктивні зміни автор має на увазі.

7. З тексту дисертаційної роботи не зрозуміло чи оцінювалися похибки визначення модулів пружності третього порядку для деяких гетерогенних геоматеріалів.

8. Не наведені результати підтвердження адекватності запропонованих моделей за результатами експериментальних досліджень.

8. По тексту дисертації мова іде про похибки а потрібно оперувати величиною невизначеності.

9. Викладення частини матеріалу здійснюється в стилі методик, методичних вказівок а не опису процесу досліджень (стор. 88, 77 та інш.)

10. На частину тверджень відсутні обґрунтування, наприклад: "... висота прокладки повинна бути на 3-5% менша...(стор. 90)", "...розміри вибирають таким чином....(стор. 87)", та інші.

11. Відсутні частина посилань на підставі чого використовується певні залежності, наприклад :“Динамічний модуль обчислюється за співвідношенням... (стор. 82”) , “ При проведенні вимірювань модулів пружності у діапазоні частот від 10 Гц до 10 кГц з використанням випробувальної комірки (рис. 1.2.12) відносна похибка не буде перевищувати 2,5–3 % при виконанні вимог вказаних у табл. 1.2.5. (стор.96)”, та інші.

12. В тексті дисертації є не коректне використання джерел інформації.

13. При оформленні графіків не дотримано вимог стандартів до представлення графічної інформації, в тому числі і не завжди вказані розмірності.

14. В розділі умовних позначень та скорочень не наведені позначення фізичних величин, які використовуються.

15. В тексті дисертації мають місце орфографічні помилки і неточності, наприклад: “ ... помилки у виготовленні зразка... (мабуть неточності або відхилення від заданих параметрів при виготовленні)”, “...модуль частотної характеристики...”, та інші.

Вказані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

Висновок

Дисертація Мащенко Володимира Андрійовича є закінченою роботою, спрямованою на вирішення важливої науково-технічної задачі підвищення точності вимірювання параметрів конструкційних полімерних матеріалів для

забезпечення функціональності та надійності вузлів і елементів конструкцій промислових апаратів та розроблення приладових систем для вимірювання модулів пружності гетерогенних матеріалів для моніторингу стану технічних об'єктів. У виконаній роботі отримано нові важливі науково-прикладні результати теоретичного і практичного планів, які підтверджено відповідними експериментами. Дисертаційні дослідження здобувача виконані на сучасному методологічному і науковому рівні, ґрунтуються на базових положеннях теорії пружності, технічної акустики, електроніки та інформаційно-вимірювальних технологіях.

Вважаю, що за актуальністю, науковою новизною, практичним значенням отриманих результатів та їх реалізацією у нових технічних розробках, висвітленням у наукових виданнях дисертаційна робота відповідає чинним вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, п. 7–9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а її автор Мащенко Володимир Андрійович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – Прилади та методи вимірювання механічних величин.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
директор навчально-наукового
інституту аерокосмічних
технологій Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»



Іван КОРОБКО

Підпис Коробка Івана Васильовича
підтверджую
Вчений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського



Валерія ХОЛЯВКО