

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора
Середюка Ореста Євгеновича
на дисертаційну роботу

Мащенко 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

1. Актуальність теми дисертації

Широке застосування полімерних та гетерогенних матеріалів потребує все більшого наукового дослідження визначення їх механічних властивостей, оскільки відомими на даний час є значна кількість результатів досліджень по вивченню механічних властивостей металів і виробів з них.

Водночас неметалеві гетерогенні і полімерні матеріали в теперішній час набувають все ширшого застосування в різних сферах виробничої діяльності підприємств, а також при розробленні багатьох вузлів військової техніки. Це зумовлено з наявністю в них певних специфічних властивостей, наприклад, немагнітністю і підвищеною звуко- та теплоізоляцією, які поєднуються із високими показниками механічних властивостей матеріалів, зокрема, твердістю, міцністю на згинання і розрив та ін.

Актуальність досліджень в цьому напрямку зумовлена широким використанням полімерів, в тому числі матеріалів з від'ємним коефіцієнтом Пуассона (полімерні „ауксетики“), де вони виконують роль демпфувальних елементів, зменшуючи рівень вібрацій у конструкціях і забезпечуючи ізоляцію складових вузлів, пов'язаних із процесами передавання, перетворення та розсіювання механічної енергії. Для ефективної роботи необхідною умовою є наявність у полімерів необхідних в'язкопружних характеристик, які описуються, наприклад, динамічними модулями пружності.

Разом з тим, досягнення високої точності у вимірюванні динамічних характеристик полімерних матеріалів стає можливим завдяки застосуванню сучасних методологічних підходів та використанню різних типів і режимів акустичних коливань, зокрема поздовжніх, поперечних ультразвукових хвиль і поверхневих хвиль Релея. Водночас розвиток електроніки та інформаційних технологій створює додаткові передумови для підвищення ефективності застосування акустичних методів за рахунок удосконалених алгоритмів обробки сигналів та автоматизації вимірювальних процесів.

Також розробка вискоефективних систем моніторингу техногенно небезпечних об'єктів потребує попереднього визначення механічних характеристик гетерогенних матеріалів, що перебувають під впливом руйнівних навантажень. У цьому контексті одним із першочергових завдань

вимірювальної техніки є розроблення методів і засобів для вимірювання модулів пружності другого та третього порядку, що дозволить прогнозувати їх працездатність за критичних режимів навантаження.

Тому дослідження, які стосуються вивчення механічних властивостей конструкційних полімерних та гетерогенних матеріалів і розроблення методів та засобів вимірювання коефіцієнта Пуассона та динамічних модулів вказаних матеріалів є актуальними і характеризують актуальність дисертаційної роботи.

2. Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Дисертація викладена на 330 сторінках друкованого тексту. Основний зміст викладено на 281 сторінці. Список використаних джерел становить 189 найменувань.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, вказано особистий внесок здобувача, наведено основні дані щодо апробації роботи, публікацій, а також визначено особистий внесок здобувача та представлено інформацію щодо впровадження результатів роботи.

У **першому розділі** розглянуто теоретичні засади визначення модулів пружності другого й третього порядків та коефіцієнта Пуассона для твердих тіл як характеристик, що описують механічні властивості матеріалу. Їх вимірювання пов'язане зі зміною рівноважного стану та проявами дисипації енергії в матеріалах.

Проаналізовані дисипативні процеси, які відбуваються на рівні структурної організації полімерів і гетерогенних геоматеріалів, і кількісно оцінюються за фазовим зсувом між напруженням і деформацією під дією динамічного навантаження. У такому випадку характеристики матеріалу визначаються комплексними динамічними параметрами: модулем Юнга, модулем зсуву, модулем об'ємної деформації та комплексним коефіцієнтом Пуассона. Розглянуті методи вимірювань методів пружності зокрема резонансні методи, метод динамічної жорсткості і ультразвукові. Виконаний аналіз приладових систем для вимірювання швидкостей поширення ультразвукових хвиль. Виконаний порівняльний аналіз методів вимірювання коефіцієнта Пуассона полімерних матеріалів, які базуються на різних фізичних принципах збудження динамічних деформацій у зразках та вимірюванні первинних параметрів. Здійснене оцінювання основних джерел похибок при визначенні коефіцієнта Пуассона.

У **другому розділі** наведено результати теоретичних досліджень, спрямованих на вдосконалення резонансних методів вимірювання. Зокрема, на базі розробленої математичної моделі методу резонансних коливань консольного закріпленого стрижня розроблено інформаційно-вимірювальну

систему для автоматизації процесу вимірювань. Для реалізації цього підходу створено приладову систему та алгоритм керування апаратними засобами, що забезпечує фіксацію зображень коливань зразка при зміні частоти його збудження з подальшою цифровою обробкою.

Наведенні результати частотних вимірювань та визначення модуля пружності конструкційних полімерних матеріалів. Поданні частотно-температурні вимірювання при визначенні модуля пружності конструкційного полівінілхлориду. Виконаний порівняльний аналіз резонансних методів визначення динамічного модуля пружності конструкційних полімерних матеріалів. Показано, що використання спеціалізованого програмного забезпечення для визначення амплітуди коливань у досліджуваному частотному діапазоні дозволило зменшити похибку при визначенні резонансної частоти.

У **третьому розділі** проведено дослідження математичних моделей процесів відбивання, заломлення й трансформації акустичних хвиль на межі рідина–тверде тіло з від’ємним коефіцієнтом Пуассона та на межі твердих тіл із додатними й від’ємними його значеннями.

Моделювання показало, що характер зміни коефіцієнтів відбивання й збудження залежить від величини коефіцієнта Пуассона та акустичних жорсткостей контактуючих середовищ. Критичні кути, за яких хвилі переходять у неоднорідний режим, визначаються швидкісними характеристиками обох середовищ, що відкриває можливості керування процесами повного відбивання хвиль.

Дослідженні залежності коефіцієнтів відбивання, трансформації й збудження для поздовжніх і поперечних хвиль на межі «рідина – ауксетик», які визначаються як значенням коефіцієнта Пуассона, так і акустичними жорсткостями матеріалів. Критичні кути, за яких змінюється поляризація хвиль і відбувається повне внутрішнє відбивання, також залежать від цього коефіцієнта. Обґрунтовано, що отримані теоретичні розрахунки параметрів моделі проходження акустичних ультразвукових хвиль через пластину, занурену у рідину, можуть слугувати основою для визначення пружних параметрів за допомогою імерсійного методу при кутах повного відбивання і повної прозорості.

У **четвертому розділі** обґрунтовано конструктивні параметри й метрологічні характеристики інформаційно-вимірювальної приладової системи (ІВПС) для імерсійного методу визначення швидкостей поширення ультразвукових хвиль. Представлено інформаційно-вимірювальну систему, призначену для визначення динамічних модулів пружності та коефіцієнта Пуассона полімерних і гетерогенних матеріалів.

У ІВПС розроблено вимірювальний канал на основі аналогово-цифрового інтерфейсу, що забезпечує реєстрацію часу проходження та амплітуди ультразвукових імпульсів. Його побудовано на базі операційних підсилювачів і швидкодіючих компараторів під керуванням однокристального мікроконтролера.

У пристрої реалізовано алгоритм виявлення сигналу в часовому вікні з регульованою затримкою, яка визначається частотою збудження та довжиною акустичного тракту. Амплітуда вимірюється методом порозрядного наближення за допомогою швидкісного компаратора та вбудованого восьмирозрядного ШІМ-генератора.

Окрім технічної реалізації, у розділі подано результати дослідження похибок під час вимірювань імерсійним методом та при визначенні модулів пружності та коефіцієнта Пуассона для низки полімерних і гетерогенних матеріалів.

У п'ятому розділі розроблено методику визначення комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика при поширенні в ньому поздовжніх, поперечних та поверхневих хвиль Релея.

На основі рівнянь теорії пружності отримано співвідношення для визначення дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона та розв'язано рівняння Релея для випадку поширення поперечних і поверхневих хвиль у таких матеріалах. Для експериментального визначення швидкості поширення та коефіцієнта поглинання хвиль Релея у полімерному ауксетикі створено спеціальний вимірювальний стенд. Збудження й прийом хвиль здійснювали за допомогою гребінчастої структури, яка формує та реєструє на поверхні матеріалу періодичні збурення.

У цьому ж розділі наведено результати випробувань для термопластичного поліуретану з коефіцієнтом Пуассона, близьким до мінус 1.

У шостому розділі подано методику визначення модулів пружності третього порядку гетерогенних геоматеріалів під одновісним напруженням.

Встановлено, що для ізотропного твердого тіла необхідно щонайменше три незалежні експерименти. Експериментальні дослідження виконувалися шляхом вимірювання часу проходження ультразвукових імпульсів через зразки за трьома схемами при тиску 50–100 МПа та різних режимах навантаження.

Отримані результати показали, що модулі пружності третього порядку на два порядки перевищують значення модулів другого порядку для ізотропних гетерогенних геоматеріалів. Розглянуті особливості деформації та визначення модулів пружності неідеально пружних матеріалів.

Робота завершується висновками, які впливають зі змісту роботи та є логічними.

Після списку використаних джерел подано два додатки, які характеризують впровадження дисертаційної роботи.

3. Оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації, їх достовірності та новизни

Обґрунтування наукових положень дисертації забезпечується коректністю постановки і вирішення завдань дослідження, достатньо чітким формулюванням мети і вибору методу досліджень, використанням основних положень теорії математичної фізики при моделюванні процесів коливання

в'язко пружного стрижня, апаратурних методів дослідження резонансних коливань, імерсійного методу при дослідженні швидкості поширення ультразвукових хвиль, теорії процесів відбивання, заломлення та трансформації акустичних хвиль на межі рідини та твердого тіла. При розробці методів отримання первинної інформації використовувалися методи неруйнівного контролю та постановки експериментів.

Узагальнення результатів здійснювалося із застосуванням теорії вимірювань, математичної статистики, теорії похибок при метрологічних дослідженнях. При числовому опрацюванні результатів експериментів використовувалося програмне забезпечення MATLAB для інженерно-фізичних розрахунків та програми символьної математики Maple, в тому числі різні методи апроксимації і методи обробки інформації з використанням персональних комп'ютерів. В роботі використовувалися методи системного аналізу для дослідження поведінки складних об'єктів вимірювань, розроблення конструкції елементів приладових систем та прийняття рішень у приладових системах вимірювань.

Отримані автором наукові результати у відповідності до поставлених задач є логічними, не суперечать фундаментальним фізичним і математичним закономірностям, повністю відображають отримані автором результати, а також підтверджуються достатньою апробацією основних положень і висновків на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях.

Достовірність отриманих в роботі положень і наукових результатів визначається їх теоретичним обґрунтуванням та експериментальним підтвердженням результатів досліджень, достатньою збіжністю результатів математичного і фізичного моделювання та результатами метрологічних досліджень, а також впровадженням результатів досліджень, які відображені в додатках до дисертації.

4. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи стосується розвитку теоретичних засад дослідження фізичних процесів в конструкційних полімерних та гетерогенних матеріалах при вимірюванні їх модулів пружності та коефіцієнта Пуассона. Найбільш вагомими є наступні складові наукової новизни роботи:

- уперше розроблено методологію вимірювання амплітуди резонансних коливань консольно закріпленого полімерного стрижня на звукових частотах, що базується на обробці цифрового зображення, яка дала можливість підвищити точність визначення головної резонансної частоти коливань зразка і, відповідно, підвищити точність визначення 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.

– 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 та значень дійсної та уявної частин комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона за його мінімальної величини.

– отримали подальшого розвитку 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 в матеріалах із від’ємним коефіцієнтом Пуассона.

– уперше розроблено концепцію створення приладової системи на основі імерсійного методу вимірювання швидкостей поширення поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль і коефіцієнтів їх поглинання в конструкційних полімерних матеріалах та гетерогенних геоматеріалах, що дозволило зменшити похибку визначення динамічних модулів пружності та коефіцієнта Пуассона.

5. Практичне значення результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Виконані в роботі дослідження дозволили одержати наступні практичні результати:

- на основі розробленої методології вимірювання амплітуди коливань розроблено приладову систему для визначення динамічного модуля пружності конструкційних полімерних матеріалів з похибкою, що не перевищує 1,9 %;

- на основі досліджених теоретичних моделей процесів відбивання заломлення та трансформації акустичних хвиль на межі рідини та твердого тіла з від’ємним значенням коефіцієнтом Пуассона розроблена приладова система для імерсійних вимірювань, яка дає можливість вимірювати значення динамічного коефіцієнта Пуассона та модулів пружності полімерних ауксетиків;

- на основі удосконаленого методу збудження та прийому хвиль Релея розроблена та реалізована приладова система для вимірювання швидкості поширення поверхневої хвилі в полімерному ауксетику;

- впровадженням результатів дисертаційної роботи на підприємстві НВФ «Продокологія» (м. Рівне);

- впровадженням результатів дисертаційної роботи в навчальний процес Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне).

6. Оцінка змісту дисертації, її завершеність в цілому, відповідність встановленим вимогам до оформлення дисертацій

Дисертаційна робота написана загальноприйнятою науковою мовою із використанням сучасної правильної української наукової термінології. Робота виконана на необхідному науковому рівні є завершеною науковою працею, має практичне значення та відображає вирішення актуальної науково-прикладної проблеми теоретичного та метрологічного напрямку у сфері вимірювання механічних характеристик конструкційних полімерних та гетерогенних матеріалах при оцінюванні їх модулів пружності та коефіцієнта Пуассона.

Оформлення дисертації в цілому відповідає вимогам чинного документу «Вимоги до оформлення дисертації», затвердженого Наказом МОН України від 12.01.2017р. № 40, чинним пунктам кваліфікаційних вимог, «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021р. № 1197, а також паспорту спеціальності 05.11.01 – прилади на методи вимірювання механічних величин.

7. Відповідність автореферату до змісту дисертації.

Автореферат в загальному написаний відповідно до вимог МОН України до авторефератів. Він містить всі необхідні складові структурної побудови і в ньому викладена основна суть виконаних наукових досліджень, а також наведені висновки та список основних публікацій. Зміст автореферату дисертації адекватно відображає основну суть виконаної роботи.

8. Повнота викладення основних наукових положень, висновків та рекомендацій.

Здобувачем за темою дисертацією опубліковано 56 наукових праць, в тому числі 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. Обсяг, кількість і джерела публікацій відповідають діючим вимогам до докторських дисертацій.

9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи та автореферату.

1. В роботі відсутні посилання на результати наукових досліджень

українських вчених у напрямку дослідження акустичних хвиль при їх поширенні в твердих, рідких і гетерогенних середовищах.

2. Не розкрито, чому відомі методи вимірювання модулів пружності та коефіцієнта Пуассона не задовольняють сучасному стану відомих результатів, наприклад, по яких параметрах чи характеристиках.

3. В роботі не розкрито суть від'ємного коефіцієнта Пуассона і діапазон його значень. Доцільно було навести діапазон значень цього коефіцієнта для різних полімерів, гетерогенних матеріалів і для металевих матеріалів.

4. Чи можна здійснити порівняння результатів ультразвукових і руйнівних методів визначення механічних властивостей полімерів? Якщо так, то чи це було реалізовано.

5. В роботі не відображено значення модуля пружності гетерогенних матеріалів при моніторингу стану технічних об'єктів, про що акцентується в актуальності дисертації на стор. 34.

6. В роботі не відображені висновки щодо найбільшої інформативності виду ультразвукових хвиль (поздовжні, поперечні, поверхневі Релея) для вимірювання чи контролю і яких параметрів полімерних матеріалів.

7. Як обґрунтовано, що дослідження (математичне моделювання) трансформації акустичних хвиль проведено в усьому діапазоні можливих значень коефіцієнта Пуассона.

8. У четвертому розділі роботи представлено графік залежності відносної похибки вимірювання від значення коефіцієнта Пуассона. Однак з тексту роботи не зрозуміло чим зумовлене різке зростання відносної похибки в околі значення коефіцієнта Пуассона рівного нулю.

9. Необхідно конкретизувати як проведенні дослідження дозволили розв'язати ряд фундаментальних проблем і практичних задач у фізиці полімерів і прикладному матеріалознавстві. Які проблеми і задачі розв'язані (пункт 11 висновків)?

10. Чи можна розглядати розроблений метод для визначення механічних властивостей полімерів як еталонний?

11. Не наведенні значення температур, при яких проводилися дослідження амплітуди резонансних коливань консольно закріпленого зразка (розділ 2.2).

12. Вимірювання модулів пружності та коефіцієнта Пуассона стосуються переважно полімерних ауксетиків та окремих геоматеріалів. Було би доцільніше представити результати для композитів і конструкційних полімерів, які активно використовуються в авіа- та машинобудуванні.

10. Висновок про відповідність дисертації кваліфікаційним вимогам Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук

Дисертаційна робота Маценка Володимира Андрійовича є завершеною працею, спрямованою на вирішення актуальної науково-прикладної проблеми теоретичного та метрологічного напрямку у сфері вимірювання механічних

характеристик конструкційних полімерних та гетерогенних матеріалах при оцінюванні їх модулів пружності та коефіцієнта Пуассона та розроблення при цьому 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 результатами експериментальних досліджень. Дисертаційні дослідження здобувача виконані на сучасному методологічному і науковому рівні. В цілому дисертаційна робота відповідає науковому рівню робіт, що подаються на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Мета роботи, поставлені та вирішенні в ній завдання досліджень, викладені основні наукові результати, достатня кількість і обсяг публікацій та апробацій дають можливість зробити висновок про те, що дисертаційна робота "Приладові системи для вимірювання модулів пружності та коефіцієнта Пуассона конструкційних полімерних та гетерогенних матеріалів" повністю відповідає паспорту спеціальності 05.11.01 – прилади на методи вимірювання механічних величин.

Відзначені недоліки і зауваження не впливають на вагомість результатів дисертації та її практичну значимість.

Вважаю, що дисертаційна робота Мащенко Володимира Андрійовича за актуальністю, науковою новизною, практичною цінністю отриманих в ній результатів досліджень та рівнем виконання повністю відповідає кваліфікаційним вимогам пунктів 7,8,9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021р. № 1197, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а її автор Мащенко Володимир Андрійович заслуговує присвоєння наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади на методи вимірювання механічних величин.

Офіційний опонент:
професор кафедри
інформаційно-вимірювальних
технологій та енергетичного менеджменту
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу,
доктор технічних наук, професор



03.09.2025р.

Орест СЕРЕДЮК

