

ВІДГУК

**офіційного опонента, доктора технічних наук, с.н.с., доцента
Роп'яка Любомира Ярославовича
на дисертаційну роботу Мокрого Олега Мирославовича
«Методологічні засади діагностування матеріалів і елементів
конструкцій за розподілом швидкості поверхневих акустичних хвиль»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій**

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасні конструкційні матеріали часто працюють в умовах високих механічних навантажень та температур, а також в несприятливій атмосфері, що зумовлює протікання в них деградаційних процесів. Руйнування відповідальних об'єктів внаслідок погіршення механічних властивостей матеріалів їх конструкції часто супроводжуються величезними матеріальними втратами, а іноді і людськими жертвами. Тому ефективний моніторинг стану матеріалу є необхідною умовою надійного і безпечного функціонування багатьох об'єктів народного господарства. Традиційно важливими є підходи, які базуються на дефектоскопічних методах контролю. Проте ці методи виявляють неоднорідності в матеріалі, яким притаманні чітко визначені просторові границі і які мають відповідно високий рівень контрастності (наприклад, тріщини). Такі дефекти характерні для кінцевої стадії процесу деградації. Поряд з цим, важливо виявляти області, в яких інтенсивно проходить процес деградації матеріалу задовго до появи в них дефектів. Складні процеси, що відбуваються під час деградації, призводять до багаторівневих змін в структурі матеріалу, виникнення мікрodefektів і супроводжуються зміною його фізичних властивостей. Виявлення локальної зміни фізичних властивостей може бути основою розроблення нових методів діагностики стану матеріалу.

Визначення швидкості акустичних хвиль та їх розподілу є ефективним сучасним підходом, який запропоновано використовувати для діагностики стану матеріалу. Зміна швидкості акустичних хвиль може бути індикатором зміни різноманітних властивостей матеріалів, в тому числі і таких, які призводять до погіршення їх механічних властивостей. Особливість цих вимірювань полягає в тому, що зміни швидкості акустичних хвиль є незначні, часто в межах кількох відсотків. Тому необхідно використовувати сучасні високоточні методи вимірювань. В першу чергу це стосується лазерних методів збудження та реєстрації акустичних хвиль.

Важливим є вибір типу акустичних хвиль, який використовується для діагностування матеріалу. Серед інших зручними є поверхневі акустичні хвилі, які дають можливість проводити вимірювання безпосередньо на об'єктах контролю без виготовлення спеціальних зразків. Проте використання поверхневих акустичних хвиль вимагає створити нові, а також розвинути існуючі підходи визначення їх швидкості, а також визначення розподілу швидкості.

В сучасній літературі вивченню розподілу швидкості поверхневих акустичних хвиль, а також використання його для діагностики стану матеріалів приділяється недостатньо уваги. Практично відсутні роботи з оптимізації визначення розподілу швидкості поверхневих акустичних хвиль. Використання лазерних методик, як правило, зводиться до заміни контактних перетворювачів на безконтактні лазерні, що обмежує потенціал лазерних методів. Тому розвиток методологічних засад діагностування матеріалів і елементів конструкцій за розподілом швидкості поверхневих акустичних хвиль, яка базується на використанні поєднання лазерних та контактних п'єзоелектричних перетворювачів, є актуальною науковою проблемою.

СТУПІНЬ ОБГРУНТОВАНOSTІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ, СФОРМУЛЬОВАНИХ В ДИСЕРТАЦІЇ, ТА ЇХНЯ ДОСТОВІРНІСТЬ

Ступінь обґрунтованості отриманих в дисертаційній роботі наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується правильністю постановки наукових задач, коректним застосуванням положень математичного апарату, зіставленням результатів теоретичних та експериментальних досліджень, а також промисловим впровадженням результатів роботи.

У дисертаційній роботі використані методи натурного моделювання пристроїв для експериментальної апробації запропонованих методик визначення швидкості акустичних хвиль, побудова, числовий та аналітичний аналіз моделі взаємодії поля оптичного випромінювання із полем переміщень на поверхні об'єкту контролю, які створені поверхневими акустичними хвилями.

Достовірність отриманих результатів підтверджується узгодженістю отриманих результатів із раніше відомими з літературних джерел, а також апробацією основних положень і отриманих результатів на науково-технічних конференціях.

НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

1. Запропоновано нову методику стабілізації інтерферометра Майкельсона, яка дозволяє реєструвати поверхневі акустичні хвилі (ПАХ) в умовах вібрацій на основі утворення інтерференційної картини у вигляді паралельних смуг на поверхні фотоприймача. Сформульовано умови, за яких ефект стабілізації є максимальним. На основі даної схеми інтерферометра Майкельсона запропоновано методику визначення локальної швидкості поверхневої акустичної хвилі в матеріалі.

2. Створено методику вимірювання швидкості ПАХ на базі використання розширеного лазерного променя, який відображає просторовий розподіл зміщень поверхні об'єкту контролю під дією поверхневих акустичних хвиль. Методика дозволяє збільшити точність вимірювань швидкості у випадку, коли основною є похибка визначення відстані. Показано, що діапазон частот поверхневих акустичних хвиль, в якому може бути застосована методика, умовно знаходиться в межах від 1 МГц до 15 МГц.

3. Розроблено методику, яка дозволяє врахувати і скоректувати похибку визначення швидкості ПАХ за використання перетворювача із жорстким з'єднанням збуджуючої та приймаючої частин, що виникає внаслідок наявності заглибин на поверхні об'єкту контролю. Експериментально виявлено, що наявність заглибини величиною кілька десятих долей міліметра в металі може призвести до виникнення додаткового часу затримки акустичного сигналу величиною в десятки мікросекунд. Врахування похибки вимірювань цього типу базується на використанні кількох контактних рідин з різною швидкістю поширення акустичних хвиль. Запропонований підхід дозволяє на порядок зменшити величину цього типу похибки.

4. Створено методику визначення розподілу швидкості поширення ПАХ, яка дає можливість змінювати крок вимірювань із використанням перетворювача, в якому жорстко з'єднана збуджуюча та приймальна частини. Особливістю запропонованої методики є можливість визначати швидкість поширення ПАХ з високою точністю за умови неточного визначення зміщення перетворювача. Такий підхід дає можливість проводити вимірювання розподілу швидкості ПАХ зі змінним кроком, не проводячи точних вимірювань відстані.

6. Сформульовано новий критерій вибору оптимальної величини кроку вимірювань на основі оцінки характеристик неоднорідностей об'єкту контролю та величини похибки вимірювань швидкості. Запропоновано методику досягнення оптимального значення кроку вимірювань, яка полягає у проведенні початкових вимірювань із мінімальним кроком вимірювань з подальшим можливим його збільшенням залежно від результатів вимірювань.

НАУКОВА ТА ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ ДЛЯ НАУКИ І ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ

Наукова та практична цінність полягає у розвитку наукового підходу оцінки стану матеріалу за розподілом швидкості поверхневих акустичних хвиль.

Вдосконалена лазерна методика реєстрації акустичних хвиль з допомогою інтерферометра Майкельсона дає можливість проводити вимірювання в умовах вібрацій і робить його використання більш доступним.

Запропонована лазерна методика визначення швидкості ПАХ на основі зондування поверхні об'єкту контролю розширеним лазерним променем дозволяє проводити вимірювання з високим розділенням і точністю. Методика збільшує точність вимірювання завдяки зменшенню похибки вимірювання відстані, яку пройшла акустична хвиля, що є важливим для вивчення процесів деградації матеріалів.

Важливим для практичних вимірювань є запропонована методика врахування похибки вимірювань, яка виникає внаслідок відхилення форми поверхні досліджуваного об'єкта від заданої. Зменшення цієї похибки розширює коло об'єктів, в яких можна проводити визначення швидкості поверхневих акустичних хвиль.

Запропонована методика визначення розподілу швидкості ПАХ, критерій оптимізації кроку вимірювання, а також алгоритм його реалізації дозволяє максимально достовірно визначати розподіл швидкості ПАХ в матеріалі, що дає можливість підвищити ефективність діагностування.

В дисертаційній роботі приведені практично реалізовані схеми визначення швидкості акустичних хвиль, які дозволяють встановлювати швидкість акустичних хвиль з достатньою для діагностування стану матеріалу точністю в лабораторних та польових умовах.

На практиці результати дисертаційної роботи використано: для контролю якості відновлених електрометалізаційними газотермічними покриттями колінчатих валів за величиною швидкості поверхневих акустичних хвиль на приватному підприємстві «Газотермік»; для оцінки якості захисних багатощарових покриттів на приватному авторемонтному підприємстві «Вулкан». Результати роботи використовувались у виробничому структурному підрозділі «Локомотивне депо Львів-Захід» регіональної філії «Львівська залізниця» для оцінювання стану резервуарів електровозів та рам візків локомотивів, а також для оцінювання стану металів після віброударної обробки, яка проводилась в державній науковій установі НАН України та МОН України «Київський академічний університет».

ОЦІНКА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та додатків, серед яких є акти впровадження результатів роботи.

У **вступі** подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими програмами, окреслено мету та задачі дослідження, сформульовано новизну отриманих результатів та її практичне значення, наведено дані про апробацію результатів роботи та публікації її основного змісту та особистий внесок здобувача в публікаціях, зроблено короткий опис структури дисертації.

В першому розділі проведено аналіз сучасних літературних джерел, які присвячені використанню величини швидкості акустичних хвиль для діагностування стану матеріалів, розглянуто фізичні основи зв'язку властивостей матеріалів із швидкістю акустичних хвиль, розглянуто властивості різних типів хвиль з точки зору ефективності їх застосування в неруйнівному контролі для оцінювання стану матеріалів. Проаналізовано сучасні методики збудження та реєстрації акустичних хвиль, а також вимірювання їх швидкості за допомогою контактних п'єзоелектричних перетворювачів, а також методи із використанням лазерних технологій. Також розглянуто наявні проблеми, які обмежують застосування швидкості акустичних хвиль для неруйнівного контролю матеріалів, а відтак і діагностики об'єктів контролю. Зроблено висновок, що для ефективного застосування зміни величини швидкості акустичних хвиль з метою оцінювання стану матеріалу перспективним є використання поверхневих релеївських хвиль із застосуванням для їх збудження та реєстрації контактних п'єзоелектричних та безконтактних лазерних методів, а також їх поєднання залежно від умов проведення діагностування.

Другий розділ присвячений розробці лазерних методик для реєстрації акустичних хвиль, а також для визначення їх швидкості. Запропоновано нову конструкцію інтерферометра Майкельсона, яка усуває один з основних його недоліків – нестабільну роботу в умовах вібрацій та температурних дрейфів. Також у цьому розділі представлена нова методика визначення швидкості поверхневої акустичної хвилі, яка дозволяє поєднувати точність та високу роздільну здатність вимірювань. Швидкість поверхневої акустичної хвилі визначають за допомогою розширеного зондуючого лазерного променя, що дозволяє розширити відображення акустичного поля, створеного на поверхні зразка матеріалу акустичною хвилею. На основі аналізу просторової структури оптичного поля лазерного променя зроблено оцінку частотного діапазону поверхневої акустичної хвилі, в якому запропонована методика

може бути реалізована. Відповідно для металів, в яких швидкість поширення поверхневої акустичної хвилі близька до 3000 м/с, цей діапазон становить від 1 МГц до 15 МГц, що відповідає частотам акустичних хвиль, які використовують в неруйнівному контролі.

У **третьому** розділі розглянуто методики зменшення впливу температури перетворювача на стабільність параметрів роботи. Проаналізовані механізми, які призводять до зміни часової затримки сигналу в елементах перетворювача. Запропонована методика розрахунку його елементів, яка дозволяє мінімізувати вплив зміни температури на характеристики перетворювача. Також проведений аналіз похибки вимірювання швидкості поверхневої акустичної хвилі, спричиненої нерівністю поверхні об'єкту контролю. Експериментально виявлено механізм виникнення цієї похибки і запропоновано методику, яка дає можливість її зменшити. Для зразка матеріалу із неоднорідним розподілом швидкості поверхневих акустичних хвиль запропонований критерій вибору оптимального кроку вимірювань, який залежить від характеристик неоднорідності зразка, а також від параметрів вимірювального обладнання. На основі сформульованого критерію створений алгоритм, який дозволяє отримати розподіл швидкості поверхневої акустичної хвилі з оптимальним кроком вимірювань.

В **четвертому** розділі розроблено прикладну методику визначення швидкості ПАХ. Приведена розроблена схема установки для визначення швидкості поверхневих акустичних хвиль, в якій використовується їх збудження за допомогою контактної п'єзоелектричної перетворювача і два різні типи реєстрації: контактна п'єзоелектрична та безконтактна лазерна. В установці використовується компенсаційна схема вимірювання часу запізнення акустичного сигналу. Приведена схема вимірювання швидкості поверхневої акустичної хвилі, яка може бути використана для роботи в польових умовах.

В **п'ятому** розділі розглянуто можливості оцінювати різноманітні характеристики металів на основі визначення розподілу швидкості поверхневої акустичної хвилі. Проведено дослідження розподілу швидкості поздовжніх та поверхневих акустичних хвиль в пластично деформованих шляхом розтягу зразках, а також зразках, підданих наводнюванню. Експериментально показано, що швидкість обох типів акустичних хвиль в пластично деформованих зразках зменшується. Зроблено оцінки впливу пористості, яка виникла в пластично деформованих зразках на швидкість акустичних хвиль. Показано, що можна оцінювати величину локальної пластичної деформації за величиною зміни швидкості акустичних хвиль.

У **висновках** сформульовано основні наукові результати дисертаційної роботи.

Список використаних джерел досить повний і широко охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації.

У додатках наведено акти впровадження результатів досліджень у виробництво та навчальний процес, а також список публікацій автора.

Зміст автореферату відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває внесок здобувача у наукові результати та практичну цінність роботи.

В представленій докторській дисертації Мокрого О. М. не використано результатів його кандидатської дисертації.

ПОВНОТА ВИКЛАДЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ В ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЯХ

За темою дисертації опубліковано 45 наукових праць, серед них 23 статті у наукових фахових виданнях України та у наукових періодичних виданнях інших держав (із них 7 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus та WEB of Science), 13 у збірниках праць та тезах міжнародних і вітчизняних конференцій, отримано 9 патентів України на винаходи та корисні моделі. Внесок дисертанта в праці зі співавторами є вирішальним.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані результати та основні наукові положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 13 наукових конференціях, в т.ч. на міжнародних.

ЗАУВАЖЕННЯ ДО ЗМІСТУ ТА ОФОРМЛЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Не зрозумілим є критерій вибору частоти акустичних хвиль, які використовували в дослідженнях. Для поверхневих акустичних хвиль застосовували хвилі частотою 2,5; 3 та 6 МГц, а для поздовжніх – 5 і 10 МГц. Оскільки частота акустичних хвиль є важливою характеристикою вимірювань, в дисертаційній роботі потрібно було б обґрунтувати її вибір для експериментальних досліджень різних матеріалів.

2. В дисертаційній роботі розглянуто вплив відхилення форми поверхні зразка на похибку визначення швидкості поверхневої акустичної хвилі для вимірювань, в яких використовується контактний перетворювач із жорстко з'єднаною збуджуючою та приймальною частинами. З іншого боку, розглядається перетворювач, в якого збуджуюча та приймальні призми не

з'єднані (рис. 1.26), а також перетворювач, в якого є дві приймальні призми (рис. 3.4). Бажано було б оцінити вплив нерівності поверхні також і на результат вимірювань із використанням цих перетворювачів і обґрунтувати доцільність їх використання для вимірювань в об'єктах контролю з поверхнями із заглибленнями та іншим видом нерівностей.

3. В роботі розглянуто вивчення розподілу швидкості поверхневих акустичних хвиль по поверхні об'єкту контролю, проте не висвітлено розподіл властивостей за його глибиною. Локалізація поверхневої акустичної хвилі в приповерхневому шарі певної товщини є важливою для аналізу стану матеріалу, особливо, підданому різним видам поверхневої обробки.

4. Для стабілізованої схеми інтерферометра Майкельсона реєстрації поверхневих акустичних хвиль бажано б було оцінити, за яких умов вона може працювати. Наприклад, сформулювати обмеження на частотний діапазон поверхневих акустичних хвиль, для яких можна використовувати запропоновану схему, аналогічно, як це зроблено для методики із розширеним оптичним пучком.

5. В роботі розглянуто вплив зміни температури перетворювача на точність визначення швидкості поверхневої акустичної хвилі. Проаналізовано випадок, коли величина зміни температури перетворювача становить 5 °С. Разом з тим, важливим є випадок, коли температура перетворювача змінюється на десятки градусів, наприклад, за проведення температурних досліджень. В дисертації не показано, чи можна в цьому випадку користуватись запропонованими підходами для зменшення температурної похибки вимірювань.

6. У дисертації є деякі орфографічні та стилістичні помилки. Наприклад, на стор. 94: «Поверхневі акустичні хвилі в цьому плані є набагато зручнішими».

Зауваження до автореферату: На стор. 23, Рис. 14 Фрагмент парогону високого тиску (1) з перетворювачем ПАХ (2) – фрагмент труби позначений одночасно поз. 1 та поз. 2.

Однак ці зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного дисертаційного дослідження та не зменшують його наукову новизну та практичну значимість.

ВІДПОВІДНІСТЬ ДИСЕРТАЦІЇ ВСТАНОВЛЕНИМ ВИМОГАМ

Дисертаційна робота Мокрого Олега Мирославовича за змістом є завершеною науковою працею, в якій отримані нові наукові та практичні результати, що в сукупності вирішують важливу науково-технічну проблему в області діагностики матеріалів і конструкцій та технологій поверхневого

зміцнення деталей машин. Дисертаційна робота повністю відповідає паспорту спеціальності 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій, написана державною мовою та оформлена згідно з вимогами, які пред'являються до докторських дисертаційних робіт. Об'єм викладених результатів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття. Автореферат у повній мірі відображає зміст дисертації.

ОЦІНКА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ЇЇ ЗАВЕРШЕНОСТІ

Дисертаційна робота Мокрого Олега Мирославовича на тему «Методологічні засади діагностування матеріалів і елементів конструкцій за розподілом швидкості поверхневих акустичних хвиль» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу наукову-технічну проблему, суть якої полягає в створенні завадостійких з високою адаптивністю до характеристик об'єкту контролю роздільною здатністю методик та засобів визначення розподілу швидкості поверхневих акустичних хвиль в об'єктах контролю для кількісного оцінювання їх стану, а також виявлення критично деградованих ділянок матеріалу. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12, 13 та 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою КМУ № 567 від 24 липня 2013 р., щодо докторських дисертацій, а здобувач Мокрий Олег Мирославович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій.

Офіційний опонент,
професор кафедри комп'ютеризованого машинобудування
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу,
доктор технічних наук, с.н.с., доцент

Л. Я. Роп'як

Л. Я. Роп'як

25 " 08 2020 р.

Учений секретар ІФНТУНГ

В. П. Трачук