

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента, доктора технічних наук, доцента**  
**Ступницького Вадима Володимировича**  
**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 світові тенденції інтенсивного розвитку промисловості згідно концепції «Індустрія 4.0», полягають у оптимізації життєвого циклу складних машинобудівних конструкцій з критичними умовами експлуатації. Ефективна реалізація проблем, пов'язаних зі збільшенням ресурсу виробів, безпосередньо пов'язана з розробкою нових і вдосконалення існуючих технологій поточного аналізу стану машин та механізмів на різних стадіях їх експлуатаційного циклу. Найбільш дієвим способом реалізації цієї проблеми є розвиток методів неруйнівного контролю, які можуть забезпечити високу продуктивність, ефективність, якість і достовірність контролю. Перебування конструкційних матеріалів в умовах дії критичних термодинамічних і силових навантажень супроводжується утворенням великої кількості неконтрольованих та непередбачуваних дефектів, які виявляються, як правило, лише при руйнуванні машин та механізмів. Детальний розгляд проблеми оцінки ресурсу та можливості подовження термінів подальшої експлуатації обладнання потребує вирішення складних завдань технічної діагностики, в тому числі розробки стратегії виявлення як наявних дефектів, так і прогнозування можливості їх утворення при різних умовах експлуатації обладнання.

Проблема вимірювання мікро- та макродефектів виникає практично завжди при контролі пошкодження металу і оцінці залишкового ресурсу об'єкта критичної інфраструктури. Вирішення цього завдання може бути визначальним для прийняття рішення про продовження експлуатації, що дозволяє заощадити значні матеріальні засоби і ресурси, а також скоротити час простою технологічного обладнання. Очевидно, що прийняте рішення має забезпечувати неруйнівний контроль найбільш навантажених робочих поверхонь виробу без демонтажу конструкції. З великого набору методів неруйнівного контролю (оптичних, рентгенівських, електромагнітних, теплових, акустичних та ін.) одним з найбільш дієвих є методи з використанням акустичних хвиль.

Найбільш поширеними у сучасній інженерній практиці є контактні методи збудження та реєстрації ультразвукових хвиль у зв'язку з простотою їх реалізації. Незважаючи на цю обставину, контактні методи діагностики є обмеженими в застосуванні, оскільки сучасні матеріали і вироби вимагають проведення високоточного контролю з можливістю виявлення локацій та розпізнання різноманітних дефектів та локальних неоднорідностей, які передують утворенню дефектів. Тому розробка комплексних методів безконтактного акустичного контролю, заснованих на різних видах взаємодії ультразвукових хвиль деградованим матеріалом, являє собою задачу, яка визначає якість діагностування конструкцій.

Особливу ефективність мають методи безконтактного лазерно-акустичного контролю, що дозволяють генерувати не лише поверхневі, але і об'ємні акустичні хвилі і тим самим дистанційно сканувати поверхні і внутрішню структуру матеріалів. Вищенаведене обумовлює актуальність вдосконалення наукової та практичної методології безконтактних методів неруйнівного контролю поверхонь машинобудівних виробів. Розробка більш точного комплексного методу дозволить вирішити проблему підвищення якості діагностування матеріалів і елементів конструкцій з метою своєчасного виявлення потенційних джерел руйнування, підвищуючи тим самим надійність і ресурс роботи виробів.

У зв'язку з цим, тематика наукових досліджень Мокрого Олега Мирославовича, представлена у дисертаційній роботі «Методологічні засади діагностування матеріалів і елементів конструкцій за розподілом швидкості поверхневих акустичних хвиль», є актуальною і такою, що спрямована на вирішення важливої науково-прикладної проблеми підвищення ресурсу роботи виробів шляхом кількісного оцінювання стану найбільш навантажених поверхонь, а також виявлення критично деградованих ділянок матеріалу. Ця тематика повністю відповідає паспорту спеціальності 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, їх достовірність.**

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів дисертаційної роботи Мокрого О.М. підтверджується використанням апробованих методів математичного аналізу, моделювання та оптимізації проектно-конструкторських рішень. Методика визначення швидкості ПАХ з високою роздільною здатністю за рахунок використання лазерних методів відображення акустичних полів базується на теорії пружності середовищ, взаємодії акустичних та оптичних полів, теорії хвиль та на сучасних методах експериментальних досліджень.

Для розробки і обґрунтування методів зменшення впливу окремих чинників на вимірювання швидкості акустичних хвиль (температурної нестабільності первинного перетворювача, а також форми поверхні об'єкту контролю) використано методологію числового та аналітичного аналізу моделі взаємодії поля оптичного випромінювання із полем переміщень на поверхні об'єкту контролю. Чисельні методи, які застосовуються для розв'язання поставлених науково-аналітичних та проектно-конструкторських задач, є обґрунтованими, їх збіжність встановлена на основі доведених тверджень та отриманих числових результатів. Достовірність отриманих наукових результатів дисертаційної роботи підтверджується також достатнім рівнем співпадіння аналітично отриманих результатів з результатами експериментальних досліджень. Частина результатів узгоджується з тими, що одержані при проведенні аналогічних досліджень і відомі з літературних джерел.

### **Новизна наукових положень дисертаційної роботи.**

У процесі розв'язання науково-прикладних задач, які були поставлені в дисертаційній роботі Мокрого О.М. «Методологічні засади діагностування матеріалів і елементів конструкцій за розподілом швидкості поверхневих акустичних хвиль»,

виходячи з її мети, автором було отримано низку нових наукових результатів, серед яких, на мій погляд, найважливішими є такі:

1. Розвинуті теоретичні основи та практично реалізовані методологічні принципи діагностування матеріалів і елементів конструкцій за розподілом швидкості поверхневих акустичних хвиль.

2. Розроблено методику реєстрації поверхневих акустичних хвиль з допомогою стабілізованого інтерферометра Майкельсона, яка дає можливість проводити дослідження в умовах вібрацій.

3. Запропоновано принципово нову методику безконтактної реєстрації локальної швидкості поверхневих акустичних хвиль з високим розділенням із використанням лазерного променя, що дозволяє збільшити точність знаходження швидкості у випадку, коли домінуючою похибкою вимірювання є лише похибка визначення відстані.

4. Науково обґрунтований метод визначення розподілу швидкості поверхневої акустичної хвилі в неоднорідних зразках шляхом зміни кроку вимірювань для його оптимізації з використанням перетворювача, в якому збуджуюча та приймальна призми є жорстко пов'язаними.

5. Запропонована нова методика використання універсальних вимірювальних приладів для реєстрації часу проходження акустичного сигналу з метою визначення швидкості акустичних хвиль на основі аналізу та математичного опрацювання неперервного опорного сигналу з частотою збудження поверхневих акустичних хвиль та з подальшим порівнянням часу її проходження в досліджуваному зрізці та тестовому каліброваному зразку.

#### **Наукове та практичне значення отриманих результатів та можливі шляхи використання результатів дослідження.**

Наукове та практичне значення результатів роботи полягає в наступному:

1. Набула подальшого розвитку методологія неруйнівного контролю та кількісного оцінювання деградаційних змін матеріалів, яка систематизує та вдосконалює процес прогнозування ресурсопридатності виробів під час експлуатації механічних конструкцій виробів машинобудування та приладобудування.

2. На основі нового методу зменшення впливу різноманітних чинників, які призводять до похибок вимірювання швидкості ПАХ, як основного критерію наявності деградованих ділянок поверхні досліджуваного об'єкту, а відтак до спотворення результатів неруйнівного контролю, розроблена та практично реалізована нова методика технічної діагностики, що базується на використанні контактних п'єзоелектричних перетворювачів та лазерних технологій.

3. Розроблена методика визначення розподілу швидкості акустичної хвилі зі змінним кроком сканування, що дає змогу суттєво зменшити загальну похибку вимірювання, практично звівши її лише до похибки реєстрації часу проходження поверхневої акустичної хвилі. Така методика дозволяє суттєво покращити точність та адекватність результатів вимірювання, а отже значно розширити можливості інструментарію діагностування конструкцій та оцінювання стану матеріалу щодо виявлення критичних ділянок, в яких можливий розвиток дефектів для превентивного запобігання передчасного руйнування об'єктів контролю.

4. Впроваджені у виробництво методики для контролю відновлених методом електрометалізації газотермічних покриттів колінчатих валів за величиною швидкості поверхневих акустичних хвиль на підприємстві «Газотермік», для оцінки якості захисних багат шарових покриттів на приватному авторемонтному підприємстві «Вулкан». Результати дисертаційної роботи використовувались у виробничому структурному підрозділі «Локомотивне депо Львів-Захід» для аналізу стану резервуарів електровозів та рам візків локомотивів, а також для діагностування результатів випробовування віброударної обробки деталей, яка проводилась в державній науковій установі НАН України та МОН України «Київський академічний університет».

5. Проведені ґрунтовні експериментальні дослідження працездатності і ефективності розроблених автором дисертаційної роботи методологічних засад акустичного неруйнівного контролю з використанням як п'єзоелектричних перетворювачів, так і лазерних методів, що обґрунтувало достовірність теоретичних та аналітичних досліджень та підтвердило дієвість запропонованих підходів.

### Оцінка змісту дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури з 293 найменувань та додатків, в яких наведено результати наукових досліджень та акти використання результатів роботи. Загальний обсяг роботи складає 297 сторінок, містить 110 рисунків і 2 таблиці. Обсяг дисертаційної роботи (311 сторінок) не перевищує встановлені норми.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання дослідження, висвітлено наукову новизну та практичну значимість одержаних результатів. Наведено відомості про апробацію роботи та публікації.

У **першому розділі** на основі проведеного аналізу новітніх публікацій в галузі технічної діагностики проаналізовано стан розвитку сучасних методів неруйнівного контролю матеріалів і методології акустичного неруйнівного контролю зокрема. Проведений ґрунтовний аналіз методик збудження та реєстрації акустичних хвиль, а також вимірювання їх швидкості за допомогою контактних п'єзоелектричних перетворювачів і методів із використанням лазерних технологій. В розділі розглянуто проблеми, які обмежують застосування реєстрації та математичного опрацювання швидкості акустичних хвиль, як домінуючого показника деградації матеріалу та наявності дефектів на поверхні виробів, що спричиняють недосконалості існуючих методів діагностики об'єктів контролю. На основі критичного аналізу літературних джерел за станом питання технічної діагностики з метою прогнозування ресурсу виробів дисертантом сформульована мета і задачі дисертаційної роботи.

**Другий розділ** присвячений методології лазерних технологій реєстрації та опрацювання акустичних хвиль для неруйнівного контролю конструкцій та матеріалів. Автором запропонована та реалізована методика збільшення стійкості реєстрації поверхневих акустичних хвиль шляхом аналізу інтерференційної картини на поверхні фотоприймача, яка виникає внаслідок наявності кута між зондуючими променями. Проведене аналітичне опрацювання чутливості вимірювання швидкості поширення поверхневих акустичних хвиль від радіуса оптичного променя та різниці плеч інтерферометра. Запропонована також методика визначення швидкості ПАХ на

основі розширеного оптичного пучка. Наведені результати експериментальних впливу ширини лазерного променя на особливості визначення швидкості поверхневих акустичних хвиль за запропонованою методикою. Виміряна залежність часового зсуву сигналу від положення фотоприймача для різних величин діаметра пучка лазера на поверхні вимірювального зразка.

У **третьому розділі** автор наводить методики зменшення впливу температури перетворювача та макрогеометричних параметрів поверхні об'єкту контролю на визначення розподілу швидкості поверхневих акустичних хвиль за допомогою контактних перетворювачів. Наводяться конструктивні рішення вдосконалених контактних вимірювальних приладів, у яких реалізована методика повної компенсації температурної похибки перетворювача. Впровадження такої схеми суттєво покращує точність та адекватність результатів неруйнівного контролю. В даному розділі опрацьовано методику мінімізації впливу джерела похибки визначення швидкості ПАХ, пов'язаного з нерівністю поверхні досліджуваного об'єкту контролю. Також наведена оптимізаційна модель вибору найбільш ефективного кроку вимірювань для визначення розподілу швидкості ПАХ в об'єктах контролю з нерівномірним розподілом властивостей, а також алгоритм вирішення цієї наукової задачі.

У **четвертому розділі дисертації** наводяться результати теоретичного обґрунтування впровадження різних методів визначення швидкості поверхневих акустичних хвиль. Для вирішення цієї задачі автором сформульовані вимоги до методик вимірювань із урахуванням особливостей об'єктів контролю, поставлених завдань, а також існуючого обладнання. Для практичної реалізації поставлених завдань дисертантом запропоновано використання компенсаційного методу вимірювання, що полягає у компенсації неінформативної частини вимірювальної величини і вимірювання лише змінної її частини. Крім того, описані декілька методик визначення часового зсуву між сигналами. Наведено аналіз їх переваг та недоліків. Описана конструктивна схема установки для вимірювання швидкості з допомогою п'єзоелектричного збудження поверхневих акустичних хвиль з лазерною реєстрацією сигналу.

**П'ятий розділ** дисертації присвячений аналізу результатів експериментальних досліджень. Наведено результати дослідження впливу наводнювання на швидкість поверхневих акустичних хвиль у взірцях з низьковуглецевої сталі. На основі отриманих експериментальних даних показано, що існує залежність між величиною локальної деформації та зміною швидкості акустичних хвиль. Ця залежність може бути використана для визначення величини локальної пластичної деформації, а також для можливості оцінки виникнення руйнування внаслідок розтягу дослідного взірця.

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

Таким чином, дисертаційна робота Мокрого О.М. за змістом є завершеною науковою роботою, по структурі, мові і стилю написання відповідає вимогам МОН України, які ставляться до докторських дисертацій.



## **Висновок про повноту опублікування основних положень дисертації, аналіз автореферату.**

Основні результати дисертаційної роботи в достатній мірі оприлюднені у 45 наукових працях, із яких 23 статті у наукових фахових виданнях України та у наукових періодичних виданнях інших держав, 7 статей у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Web of Science та Scopus; 13 – матеріали міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференцій та симпозіумів. Автором отримано 9 патентів на винаходи та корисні моделі.

Основні наукові положення і висновки, які представлені в дисертації та авторефераті, ідентичні між собою. Автореферат відображає актуальність роботи, зміст і суть одержаних наукових результатів, їх практичне значення, детально виокремлює особистий внесок здобувача та демонструє широку апробацію результатів досліджень.

## **Апробація результатів досліджень**

Отримані результати та основні наукові положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 13 міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференцій та симпозіумів.

## **Зауваження.**

1. У наведеній науковій новизні дисертаційної роботи автор поєднує отримані ним наукові висновки з результатами досліджень (пп.1, 2, 4, 7). Натомість їх слід було б розділити і результати роботи більш детально висвітлити в розділі «Практичне значення одержаних результатів роботи» та загальних висновках. Крім того, на мою думку, першим пунктом наукової новизни слід було сформулювати узагальнюючу новизну нової чи вдосконаленої методології діагностування матеріалів і елементів конструкцій саме за розподілом швидкості поверхневих акустичних хвиль.

2. Розділ 1 дисертаційної роботи занадто розтягнутий (65 стор.) і переобтяжений детальним описом великої кількості прикладів існуючих конструктивних вирішень вимірювального обладнання. Натомість всю різноманітність схем та методик можна було б узагальнено класифікувати та описати особливості використання лише типових представників цих груп.

3. В частині, де розглядається вплив заглибини, розглядається лише одна форма заглибини і робиться висновок, який відноситься до нерівностей різних типів. Чи можна вважати коректним такий підхід для вирішення практичних завдань, адже в реальній ситуації нерівності поверхні можуть мати довільну форму.

4. В розділі 3 запропоновано методику визначення розподілу зміни швидкості в ділянці її локальної неоднорідності шляхом покрокового переміщення перетворювача. Для практичного використання цього підходу корисно сформулювати обмеження на граничні характеристики неоднорідності, які можна виявити. Також важливо визначити, як вони залежать від параметрів вимірювального перетворювача.

5. З результатів досліджень по дисертаційній роботі не зрозуміло, як окремі типи дефектів (пористість, мікротріщини, залишкові напруження тощо) можуть бути диференційовано діагностовані та розпізнані за допомогою запропонованих автором методик. Адже кожен з цих дефектів своєрідно впливає на ресурс контрольованого об'єкту і може бути як значущим, так і маловпливовим у конкретних умовах експлуатації виробу.

6. Не зовсім вдало представлений вираз для критерію оптимізації кроку вимірювання (розділ 3, формула 3.28). Наведений вираз справляє враження формалізовано-декларативного, оскільки величина кроку вимірювання в ньому представлена у неявному вигляді. Також не чітко сформульовані обмеження та умови вирішення даної задачі.

Проте, вважаю, що вищенаведені зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного на високому науковому рівні дисертаційного дослідження, не зменшують його наукову новизну та практичну значимість і не знижують загального позитивного сприйняття проведеного обсягу досліджень.

### Загальні висновки.

Переходячи до оцінки роботи в цілому, вважаю, що дисертаційна робота Мокрого Олега Мирославовича, яка виконана на тему "Методологічні засади діагностування матеріалів і елементів конструкцій за розподілом швидкості поверхневих акустичних хвиль", є завершеною науковою працею, в якій отримано нові важливі наукові та практичні результати, які сприяють розвитку науково-прикладних основ неруйнівних методів діагностики матеріалів і конструкцій та кількісного оцінювання стану їх функціональних поверхонь, а також виявлення критично деградованих ділянок матеріалу.

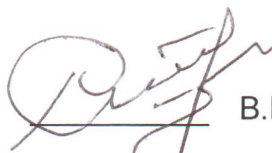
Дисертаційна робота повністю відповідає паспорту спеціальності 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій.

Дисертація повністю відповідає п.п. 9, 10, 12 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567, а здобувач Мокрий Олег Мирославович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, доцент  
професор кафедри «Технології  
машинобудування» Національного університету  
«Львівська політехніка»

Підпис професора кафедри ТМБ, д.т.н.  
В. В. Ступницького засвідчую:  
вчений секретар НУ «Львівська політехніка»




В.В.Ступницький

Брилинський Р.Б.