

УДК 004.9:534.8

DOI 10.31471/1993-9981-2023-2(51)-16-28

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАСТИНЧАТИХ НАПРЯМНИХ ХВИЛЬ ТА АЛГОРИТМІВ

І. З. Лютак, З. П. Лютак

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, E-mail: ihorlt@gmail.com*

Робота присвячена вивченню і оптимізації контролю деформації під час використання пластинчатих напрямних хвиль. Автори підкреслюють важливість цього дослідження в контексті сучасного виробничого процесу, де постійно росте попит на високоякісні вироби, а технологічний прогрес вимагає постійної оптимізації. Основна мета дослідження полягає у виявленні ключових параметрів, що впливають на процеси деформації. Для цього автори проводять детальний аналіз, використовуючи математичний опис. Цей математичний опис допомагає краще зрозуміти динаміку процесів та взаємодію різних факторів, які впливають на виявлення дефектів в матеріалі об'єкту контролю. Наведено математичний опис параметрів роботи ультразвукового первинного перетворювача із детальним аналізом матеріалів виготовлення та способів застосування. Значну увагу приділено аналізу акустичного поля відбитого від границі розділу матеріал середовища поширення – дефект з практичної точки зору, а саме як найбільш оптимально виявити дефект та отримати його метричні показники. Стаття також акцентує увагу на необхідності розробки нових алгоритмів оброблення результатів. Це важливо для того, щоб забезпечити точність вимірювань та адекватність отриманих даних. Графіки та рисунки, представлені в статті, ілюструють досліджені процеси та їх особливості. Також наведено графік виявлення дефекту в стінці труби з застосуванням наведеного в статті математичного апарату. Автори підкреслюють, що вдосконалення технологічних процесів є ключовим елементом для підвищення ефективності виробництва. Оптимізація процесів контролю дефектів дозволить знизити виробничі витрати, покращити якість виробів та забезпечити їх довговічність. У підсумку, стаття представляє собою цінний внесок у вивчення та оптимізацію контролю наявності дефектів в металах, зокрема трубопроводах. Дослідження авторів має велике практичне значення для виробників, інженерів та науковців, які працюють у сфері неруйнівного контролю, матеріалознавства та технологій обробки матеріалів.

Ключові слова: ультразвук; металокопструкції; напрямні хвилі; неруйнівний контроль.

The study is dedicated to the examination and optimization of deformation control when using plate-guided waves. The authors emphasize the significance of this research in the context of the modern manufacturing process, where there's a continuous demand for high-quality products, and technological advancements necessitate ongoing optimization. The primary objective of the research is to identify key parameters that influence deformation processes. To achieve this, the authors conduct an in-depth analysis using a mathematical description. This mathematical representation aids in better understanding the dynamics of the processes and the interplay of various factors that affect defect detection in the material of the inspected object. A mathematical description of the parameters of the ultrasonic primary transducer is provided, with a detailed analysis of manufacturing materials and application methods. Considerable attention is given to the analysis of the acoustic field reflected from the boundary of the medium propagation-material interface – defect from a practical standpoint, specifically how to optimally detect a defect and obtain its metric indicators. The article also focuses on the need to develop new data processing algorithms. This is crucial to ensure measurement accuracy and the adequacy of the obtained data. Graphs and illustrations presented in the article offer a clear representation of the studied processes and their peculiarities. There's also a graph illustrating defect detection in a pipe wall using the mathematical framework discussed in the article. The authors stress that refining technological processes is a key element

in enhancing production efficiency. Optimizing defect control processes will help reduce production costs, improve product quality, and ensure their longevity. In conclusion, the article is a valuable contribution to the study and optimization of defect control in metals, especially pipelines. The authors' research holds significant practical importance for manufacturers, engineers, and scientists working in the fields of non-destructive testing, material science, and material processing technologies.

Key words: ultrasound; metal structures; guided waves; non-destructive testing.

Вступ

Ультразвукова дефектоскопія використовує пружні коливання і хвилі. Ультразвукові коливання - це механічні коливання частинок пружного середовища навколо свого положення рівноваги, а ультразвукові хвилі - це поширення в цьому середовищі механічних деформацій. Дане явище найбільш широко застосовуються при дефектоскопії матеріалів, медичній техніці. Для цього використовуються об'ємні однорідні хвилі, які представляють собою поздовжні і поперечні коливання.

Недоліком використання однорідних хвиль є їх низька чутливість, яка зумовлена допустимим розміром контрольованого дефекту, його формою, способом зварювання, структурою матеріалу, місцем знаходження у складних конструкціях, що не дає можливості безпосереднього доступу ультразвукового перетворювача до місця контролю. Це спостерігається, наприклад, при контролі окремих таврових з'єднань. Результати багатьох досліджень показують, що для пластинчатих матеріалів за їх розмірами, при статичних навантаженнях вплив величини непроварювання прямо пропорційно глибині непровару і його площі, що приводить до зменшення чутливості контролю. Для матеріалів з малою товщиною і високоміцних матеріалів при статичних і динамічних вібраційних навантаженнях використання класичних методів контролю з використанням поздовжніх і поперечних хвиль стає недоцільною через велику ймовірність недостовірності результатів.

Враховуючи, що при класичних методах контролю з використанням однорідних хвиль отримуємо пучок енергії, який з

поширенням на певні віддалі розходить і коли його ефективна ширина є співрозмірною з товщиною контрольованого об'єкту, виділення корисного сигналу є ускладненим, а то і неможливим. Селекція корисного сигналу на фоні шумів стає складною і малопродуктивною задачею. Практикою встановлено, що для серійних ультразвукових перетворювачів для контролю матеріалів товщиною до 5 мм використання класичних методів стає не ефективним. При ультразвуковому контролі труб діаметром 100 мм і менше спостерігається розфокусування променя, який вводиться в досліджуваний матеріал, що приводить до нерівномірності розподілення його енергії у перерізі на границі розділу середовищ перетворювач - матеріал, а також до збільшення шумів і відповідно зниження точності контролю.

Мета роботи

Найбільш ефективним методом контролю якості матеріалів є використання пластинчатих напрямних хвиль. Дані хвилі відносяться до класу нормальних хвиль і утворюються при нахиленому падінні хвилі на поверхню матеріалу чи трубопроводу при певних умовах, таких як кутовому введення хвилі в досліджуваний об'єкт, визначеній частоті коливань ультразвукового перетворювача та товщині матеріалу співрозмірної з довжиною хвилі. Важливою частиною цієї роботи є спрямованість на виявлення та охарактеризування параметрів роботи ультразвукового первинного перетворювача. Також ми прагнемо виявити особливості відбитого від дефекту акустичної хвилі, щоб оптимізувати його виявлення. Зусилля будуть спрямовані на

розробку алгоритму проведення контролю, який сприятиме більш оптимальному застосуванню досліджень у цій області.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Так в [1] було здійснено дослідження розвитку теорії ультразвукових спрямованих хвиль. Проведено розгляд апаратних розв'язків, включаючи новітні розробки трансдукторів для виявлення ультразвукових спрямованих хвиль у трубопроводах та аналіз, як спрямовані ультразвукові хвилі взаємодіють з дефектами та особливостями трубопроводів. В [2] досліджується різниця між керованими хвилями та об'ємними хвилями полягає в їх характеристиках поширення, де керовані хвилі вимагають виконання межових умов у хвилеводних структурах. Показано, що поперечні хвилі, подовжні хвилі або їх комбіновані хвилі постійно відбиваються і поширюються вперед межами хвилеводу, надаючи напрямним хвилям вищі можливості поширення на довгі відстані порівняно з об'ємними хвилями. Автори [2] показали, що тестування з використанням напрямних хвиль вимагає меншої щільності перетворювачів через їх відмінні показники поширення. Один або кілька перетворювачів можуть ефективно покривати значну частину трубопроводу для скринінгу. Тестування за допомогою напрямних хвиль охоплює весь переріз трубопроводу, дозволяючи всебічне виявлення пошкоджень як у поперечному, так і в осьовому напрямках. В результаті, інспекція за допомогою напрямних хвиль пропонує переваги мінімальних точок вимірювання, повного покриття поперечного перерізу та можливості дії на довгі відстані. На противагу цьому, об'ємні хвилі в основному концентруються безпосередньо під перетворювачами. Тому об'ємні хвилі переважно використовуються для виявлення дефектів у напрямку товщини об'єкта. Завдяки їх меншому діапазону акустичного випромінювання,

об'ємне ультразвукове інспектування вимагає використання перетворювачів для точкового виявлення дефектів у трубопроводах. В [3] показано, що ультразвукова техніка керованих хвиль виявила великий потенціал для тестування трубопроводів у нафтогазовій та енергетичній промисловості. Проте чутливість та точність ідентифікації невеликих дефектів потребують подальшого вдосконалення. Сигнал однієї точки, отриманий традиційними методами з використанням фіксованих перетворювачів, містить обмежену інформацію для ідентифікації дефектів, тоді як інтерференційні режими не завжди можуть бути повністю видалені. Дослідження [3] розробляє покращений метод інспекції труб на основі 2-D збору та обробки сигналів з місцевим осьовим скануванням для покращення здатності виявляти дефекти невеликого розміру. Дані вихідного поля хвиль у просторово-часовому домені ($t-x$) аналізуються та фільтруються у частотно-хвильовому домені ($f-k$) та покращуються віртуальним фокусуванням у часовому домені. У домені $f-k$ використовується вузько смуговий фільтр з вікном високого порядку 2-D Гаусового типу для видалення компонентів інтерференційного режиму. Для спрощення процесу сканування, забезпечуючи при цьому прийнятне виявлення дефектів, оптимізація параметрів сканування вивчається на основі числового моделювання методом скінченних елементів (FEM). Результати досліджень в [3] показали, що експерименти з осьовим скануванням за допомогою гнучкого електромагнітного акустичного перетворювача показують ефективність виявлення невеликих дефектів. У дослідження [4] запропоновано підхід до інспекції трубопроводів, який може бути застосований для декількох роботів або одного робота з інтегрованими акустичними датчиками високої роздільної здатності та доброї точності локалізації. Даний підхід

демонструється успішною інспекцією декількох дефектів на сталевій трубі за допомогою вручну керованих перетворювачів акустичних напрямлених хвиль. Підхід було розділено на два етапи: виявлення дефектів та їх локалізація. На етапі виявлення характеристика приймача визначає порогове значення амплітуди виявлення та зону виявлення одного перетворювача, в якій може бути присутній дефект (наприклад, круглий отвір діаметром 8,5 мм). Розмір цієї зони визначає відстань між перетворювачем для забезпечення 100% покриття всієї труби. Це призвело до успішного виявлення дефектів. На етапі локалізації, для кожного місця розташування перетворювача, де було виявлено дефект, проводилося п'ять додаткових вимірювань для визначення місця дефекту в зоні виявлення, і це призвело до помилок визначення місця дефекту менше ніж на 30 мм, що добре корелює з прогнозами зі симуляцій Монте-Карло. Алгоритм на основі щільності для виявлення кластерів був успішно використаний для ідентифікації та комбінування декількох вимірювань.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Попри інтенсивний розвиток у сфері неруйнівного контролю та значний прогрес в оптимізації ультразвукових первинних перетворювачів, деякі аспекти загальної проблеми залишаються невирішеними. Однією з ключових проблем, яку потрібно врахувати, є визначення оптимальних параметрів для різних типів дефектів у різних матеріалах. Це особливо важливо, оскільки характеристика дефекту та матеріал об'єкту контролю можуть впливати на якість виявлення. Також, попри детальний аналіз акустичної хвилі, яка відбивається від дефекту, залишається питання про те, як різні параметри цієї хвилі можуть впливати на здатність системи виявляти дефекти різного типу і розміру. Є потреба в подальшому дослідженні

взаємодії між характеристиками акустичної хвилі та особливостями дефекту. Щодо алгоритму проведення контролю із застосуванням вейвлет обробки сигналів, це сучасний підхід, що відкриває нові можливості. Однак, також виникає питання про його ефективність у різних умовах, а також про можливість його оптимізації для специфічних задач. Загалом, попри значний прогрес у дослідженні, ще багато аспектів загальної проблеми потребують подальшого вивчення та розробки. Це підкреслює важливість продовження досліджень в цій області, з метою подальшого вдосконалення методів та технік неруйнівного контролю.

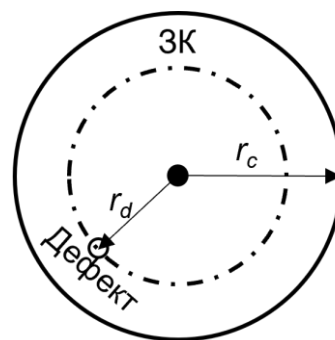
Формулювання цілей статті

Оптимізація контролю дефектів є критично важливою в сучасних промислових умовах, особливо коли мова йде про великогабаритні об'єкти. Використання пластинчатих напрямних хвиль у комбінації з передовими алгоритмами оброблення результатів відкриває нові можливості для виявлення дефектів з вищою точністю та швидкістю. Дослідження цього напрямку дасть змогу вирішити актуальну проблему застосування технології пластинчатих напрямних хвиль існуючими технічними засобами. Це не тільки сприятиме оптимізації ресурсів та часу, але й значно збільшить продуктивність та точність контролю, що, в кінцевому підсумку, гарантує вищу надійність та безпеку експлуатації великогабаритних конструкцій.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Метод проведення ультразвукового контролю. Процес контролю має два етапи: виявлення та локалізація дефекту. Кожен етап використовує різні стратегії вимірювань, що призводить до різних компромісів і оптимальних методів. На етапі виявлення оцінюється продуктивність перетворювача за максимальною дистанцією виявлення та порогом амплітуди. Ці оцінки проводяться для

попередньо визначеного дефекту-еталону при конкретних рівнях шуму, враховуючи бажану ймовірність виявлення та ймовірність помилкового спрацювання. На основі цих оцінок формується план виявлення. Порядок проведення контроль керується згідно цього плану, проводячи вимірювання на кожному наперед визначеному місці. Після виявлення характерної особливості, додаткові вимірювання проводяться поблизу зони виявлення з рівномірним кутовим розподілом в межах заданого кола. Цей підхід дозволяє локалізувати виявлену особливість. Щоб полегшити процес локалізації, роботи реконфігуруються або місця вибірки коригуються. Зазначимо, що ця інспекція може проводитися на всіх попередньо визначених точках вибірки за допомогою одного проходження або кількох послідовних кроків ультразвукового контролю. На етапі виявлення розташування позицій вибірки для роботів розроблено таким чином, щоб досягти визначеного покриття контролю для вказаного дефекту-еталону, наприклад, отвору в повну товщину діаметром певного розміру. Рис. 1 показує як отримується відбиття від дефекту на відстані r_d . Оскільки вважається, що передавач є всенапрямленим, напрямні хвилі поширюються від перетворювача у вигляді кругового фронту хвилі, і кожне положення перетворювача визначає зону контролю (ЗК), яка є колом радіусу r_c . Теорія виявлення [5] використовується для визначення і порогу амплітуди сигналу на основі вимог до заданої ймовірності визначення наявності дефекту для визначеного еталону в умовах експериментального шуму. Тут r_c є малим порівняно з об'ємом труби, тому хвилі можна розглядати як у пластині.



r_d – відстань до дефекту, r_c – радіус зони контролю

Рисунок 1 – Контроль дефекту за луно-імпульсом

Ми припускаємо, що у отриманих експериментальних даних присутній Гаусовий білий шум [6] через теплові коливання та електричний шум. Обробка за допомогою обгортки Гільберта (тобто абсолютне значення перетворення Гільберта сигналів) призводить до Релеєвого розподілу амплітуд шуму a_n . Для порогової амплітуди a_t виявлення дефекту може мати таку ймовірність помилкової тривоги D_p [7]:

$$D_p = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{a_t}{\sigma_n}\right)^2}, \quad (1)$$

де σ_n - це квадратний корінь середньоквадратичної амплітуди шуму.

При додаванні Гаусового білого шуму амплітуди луно-сигналу від дефекту a_d після обробки з допомогою обгортки Гільберта призводять до розподілу Райса [8]. Для порогової амплітуди a_t , a_t може надати ймовірність виявлення P_d за [8] так:

$$P_d = Q_1\left(\frac{\mathcal{G}(a_d)}{\sigma_n}, \frac{a_t}{\sigma_n}\right), \quad (2)$$

де Q_1 - Q -функція Маркума, \mathcal{G} - масштабний фактор і залежить від a_d .

Виявлення дефекту здійснюється, коли амплітуда сигналу в часовій області перевищує порогову амплітуду виявлення a_t . Для отримання 100%-ного покриття контроль поверхні перетворювачі повинні рухатися по структурі таким чином, щоб усі

точки потрапляли в ЗК принаймні в одного перетворювача у певний момент. Це можна досягти за допомогою одного перетворювача, який сканує область, або групи які працюють спільно. Коли дефект виявлено, наступний крок - його локалізація. Процес контролю реконфігурується для отримання додаткових вимірювань у точках r_s , розташованих на однаковій відстані навколо кола з радіусом, центр якого знаходиться на місці спрацювання сигналу пластинчатої напрямної хвилі. Дані з цих місць потім об'єднуються для формування зображення. У зображенні амплітуда кожного пікселя є зваженою сумою внесків від кожного сигналу в часовій області в відповідний момент надходження. Піксель з найвищою амплітудою на зображенні вибирається як знаходження виявленого дефекту. Це реалізовано за допомогою алгоритму формування зображення з затримкою та сумою, де інтенсивність пікселя на певному місці (x, y) може бути записана за допомогою такої формули [4]:

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^{N_s} \left| H(s_i(t - \tau_i(x, y))) \right|, \quad (3)$$

де $s_i(t)$ – сигнал в часовому просторі, отриманий на i -й точці контролю; H – перетворення Гілберта; τ_i – час поширення від точки контролю i до границі розділу і назад до тієї самої точки; x, y, z – координати, де z співпадає з віссю труби.

Спосіб збудження перетворювачем ультразвукових хвиль можна розглядати як взаємодію падаючої хвилі з багатократним відбиттям хвиль у всередині матеріалу де виникають резонансні явища. Вони приводять до утворення нормальних напрямних хвиль, які поширюються вздовж напрямку і стоячих у перпендикулярно до поширення напрямку, рис. 2.



Рисунок 2 – Принцип збудження пластинчатих напрямних хвиль ультразвуковим первинним перетворювачем

В дослідженнях ультразвукової дефектоскопії в якості первинних перетворювачів, які випромінюють і приймають ультразвукові коливання, використовують круглі, прямокутні або квадратні п'єзопластини з п'єзокераміки типу ЦТС - 19 чи іншого п'єзоматеріалу, зокрема кварцу. При подачі на п'єзопластину електричної енергії вона змінює свою товщину внаслідок чого утворюється зворотній п'єзоэффект. Аналіз і вибір п'єзоперетворювачів, які використовуються для створення пластинчатих напрямних хвиль є важливою задачею, так як вони впливають на чутливість методу контролю і на його роздільну здатність.

Підхід до оптимізації характеристик ультразвукового первинного перетворювача. Придаючи п'єзоелементу різну форму, по різному розміщуючи під певним кутом до досліджуваної поверхні об'єкту контролю і наділяючи їх функціями окремо випромінювача, приймача, або одночасно випромінювача - приймача отримуємо різні режими роботи. Тому вирішення задачі створення базового п'єзоперетворювача для створення пластинчатих напрямних хвиль відкриває можливість для їх ефективного використання. При цьому характеристики перетворювачів можуть бути визначені за параметрами п'єзоелементу, який генерує і приймає ультразвукові хвилі. Наприклад, у нахилених перетворювачах амплітуду

зондуючого і приймаючого ультразвукових сигналів, а також акустичне поле, яке створюється у виробі можна визначити за параметрами п'єзоелементу методом уявного випромінювання. Основні характеристики, за якими визначають властивості п'єзоперетворювача є [9]:

1) коефіцієнт електромеханічного перетворення L , який характеризує ефективність роботи перетворювача в режимі випромінювання:

$$L = P_{1c} / U_0, \quad (4)$$

де P_{1c} - середнє значення амплітуди акустичного тиску хвилі, яка випромінюється, U_0 - амплітуда електричної напруги, яка збуджує перетворювач у режимі приймання;

2) коефіцієнт зворотного випромінювання M :

$$M = I / P_{2c}, \quad (5)$$

де P_{2c} - середнє значення амплітуди тиску ультразвукової хвилі, яка поступає на перетворювач, I - електричний струм, що протікає між електродами п'єзоперетворювача в режимі приймання;

3) коефіцієнт подвійного електромеханічного перетворення D :

$$D = L \cdot M. \quad (6)$$

Даний коефіцієнт характеризує ефективність роботи суміщеного первинного перетворювача в режимі випромінювання - приймання.

Для оцінки коефіцієнта подвійного електромеханічного перетворення використаємо методику розрахунку перехідних процесів за час t у перетворювачі у режимі приймання, що дозволяє визначити імпульс струму $I(t)$, який протікає у перетворювачі при прийманні сигналу:

$$I(t) = G U(t) \quad (7)$$

де $U(t)$ - електрична напруга збудження в режимі випромінювання; G - константа п'єзоэффекту, яка залежить від ємності п'єзопластини, кута нахилу п'єзопластини, коефіцієнта загасання і характеристичного імпедансу:

$$G = 2(h_{33}C_0)^2 Z_2 K_{23} \frac{\exp(-2\alpha H)}{S(Z + Z_2)^2}, \quad (8)$$

$$K_{23} = Z_3 - Z_2 / Z_3 + Z_2$$

де Z , Z_2 , Z_3 - відповідно характеристичні імпеданси перетворювача, контактної рідини і досліджуваного матеріалу; S - площа пластини; H - віддаль між пластиною і досліджуваним матеріалом; α - коефіцієнт загасання; h_{33} - п'єзоелектричний модуль, який визначає зв'язок між прикладеним електричним полем і виникненням механічного напруження в матеріалі; індекс 33 вказує на напрямок, в якому прикладено електричне поле, та напрямок, в якому спостерігається механічне напруження. Значення h_{33} високе для матеріалів із високим п'єзоэффектом; C_0 - діелектрична проникливість матеріалу при нульовому п'єзоэффекті (тобто без зовнішнього електричного поля).

В залежності від навантаження пластини п'єзоперетворювача, а це залежить від структури матеріалу, його товщини, зовнішніх впливів, імпульс струму, який протікає через п'єзоперетворювач буде змінюватися [10]:

$$I(t) = \frac{G}{RC} \int_0^t U(t) \exp\left(-\frac{t-y}{RC}\right) dy, \quad (9)$$

де y - змінна інтегрування, R - імпеданс пластини і матеріалу, C - ємність пластини.

Якщо в якості збуджуючого сигналу перетворювача використовувати імпульс напруги в вигляді одного періоду з синусоїдальною частотою і певною амплітудою достатньою для збудження, то імпульс струму буде:

$$I(t) = \frac{GU_0}{\sqrt{1+tg^2\varphi}} \left(\sin(\omega t - \varphi) + \sin\left(\varphi \exp(-t\omega/tg\varphi)\right) \right), (10)$$

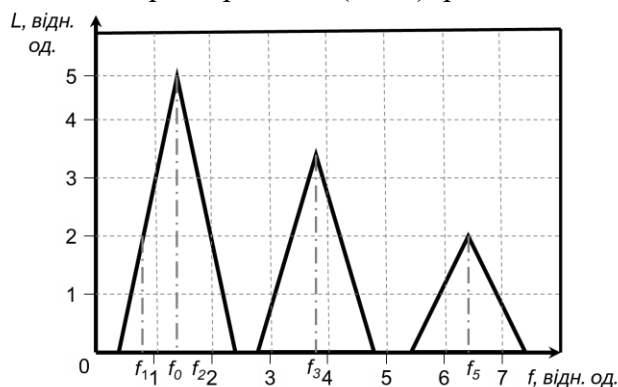
де φ - кругова частота; $tg\varphi = \omega R \cdot C_0$.

Амплітудне значення струму I_m досягається при $t = \pi/2$:

$$I_m = \frac{G}{\sqrt{1+tg^2\varphi}} \left(\cos\varphi + \sin\varphi \exp(e^{-\pi/2tg\varphi}) \right). (11)$$

При експериментальних дослідженнях перетворювач збуджувався імпульсом тривалістю пів періоду, частотою 5МГц, а також імпульсом в вигляді одного періоду, частотою 10 МГц. Найбільшої величини амплітуди відбитого сигналу на границі розділу двох середовищ з різною густиною отримували при збудженні перетворювача зондуючим імпульсом тривалістю пів періоду при контактному способі перетворювача з поверхнею матеріалу. Експеримент проводився на матеріалі труби з сталі X50 діаметром 720мм.

Важливою характеристикою, яка показує зміну модуля коефіцієнта перетворення п'єзоперетворювача в залежності від частоти є його амплітудно - частотна характеристика (АЧХ), рис. 3:



L – коефіцієнт прямого електромеханічного перетворення; f - частота

Рисунок 3 - Амплітудно - частотна характеристика прямого пів хвильового резонансного п'єзоперетворювача частотою 5 МГц

В якості параметрів АЧХ досліджувались наступні величини:

- частота, яка відповідає першому максимуму f_0 (перша гармоніка);
- f_1, f_2 частоти, при яких АЧХ в області першої гармоніки нижче максимальної на 5 дБ, а режим двійного перетворення рівний 2дБ;
- f_3, f_5 - частоти непарних гармонік;
- $\Delta f = f_1 - f_2$ - смуга пропускання, що характеризується граничними частотами.

Ширина смуги пропускання робочих частот п'єзоперетворювачів вказує на можливість забезпечення з високою точністю основних параметрів контролю. Чим ширша смуга, тим кращі основні показники апаратури, зокрема у таких приладах вища чутливість, роздільна здатність, ширший діапазон вибору частот і менша похибка вимірювання контрольованих параметрів. Смуга робочих частот від десяти долей до десятків мегагерц дозволяють зменшити тривалість випромінюючих і приймаючих акустичних імпульсів до десятків долей мікросекунди і тим самим підвищити роздільну здатність дефектів за глибиною їх розташування, розширити область контролю малих товщин, тобто збільшити діапазон вимірювань ультразвукових товщиномірів. Широка смуга пропускання перетворювачів дає можливість плавно змінювати частоту пластинчатих напрямних ультразвукових хвиль таким чином, щоб забезпечити максимальну чутливість контролю різноманітних дефектів у конкретних матеріалах.

Поле випромінювання перетворювача має різну форму, яке представляє просторовий розподіл акустичного тиску P , який створюється перетворювачем в досліджуваному об'єкті. Поле тиску, яке створюється п'єзоперетворювачем на різних відстанях від випромінюючої пластини z і віддалі від осі симетрії випромінювання x має різну форму і відповідно різний

розподіл енергії у досліджуваному матеріалі:

$$P(z) = P(0) \left| 2 \sin \left(\frac{k}{2} \left(\sqrt{z^2 + a^2} - z \right) \right) \right|, \quad (12)$$

де a - радіус перетворювача, k - хвильове число.

Результати досліджень. Форма акустичного поля найбільш залежить від параметрів п'єзоматеріалу, з якого виготовлений даний п'єзоелемент. Ці параметри впливають на коефіцієнт електромеханічного перетворення перетворювача і на його амплітудно-частотну характеристику. Дані параметри забезпечуються шляхом демпфування

п'єзоперетворювача, узгодженням його з електричними елементами R , L , C генератора зондуючих імпульсів, а також використання спеціальних електронних схем збудження п'єзоелементів і включення їх у режим приймання ультразвукових коливань (компенсація вільних коливань п'єзоелементів, зменшення реактивних складових, узгодження вхідного опору). Важливу роль для позитивного вирішення даної задачі має застосування п'єзоелементів спеціальної форми, наприклад, сферично вигнутих, застосування спеціального складу п'єзокераміки, властивості якої показані у табл. 1, а умовні позначення у табл. 2.

Таблиця 1 – Властивості п'єзокераміки

Позначення	Одиниця виміру	ЦТС-26	ЦТС-26м	ЦТС-21	ЦТС-45
T_k	°C	350	350	400	330
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	–	1700	1700	500	1750
$tg\delta$, не більше	%	2.0	2.0	2.0	2.0
Q_m	–	80	80	150	75
v^{E_1}	103м/с	3.0	3.0	3.70	2.77
σ_p	–	0.36	0.38	0.32	–
k_p	–	0.60	0.60	0.30	0.61
k_{33}	–	0.68	0.68	0.42	0.70
d_{31}	10^{-12} Кл/Н	–170	–160	–40	–180
d_{33}	10^{-12} Кл/Н	350	340	100	380
d_{15}	10^{-12} Кл/Н	–	–	120	–
g_{31}	10^{-3} В·м/Н	–11.3	–10.6	–9.0	–11.6
g_{33}	10^{-3} В·м/Н	–	23.3	22.6	24.5
$t_{роб}$	°C	250	250	350	250
ρ_v	10^8 Ом·м, при 100 °C	1	1	1	1
ρ_v	10^4 , при $t_{роб}$	–	–	10	–
ρ	10^3 кг/м ³	7.6	7.6	7.6	7.5

Пояснення позначення констант п'єзокераміки представлено в табл. 2.

Практика показує, що враховуючи перехідні процеси у перетворювачі найбільш ефективним є суміщений перетворювач контактного типу.

Основними параметрами пластинчатих напрямних хвиль є фазова і групова швидкість, рис. 4. Вибір мод для проведення контролю об'єкту здійснюють за наступними міркуваннями. Симетричні моди характеризуються тим, що вони

збуджують рух матеріалу вздовж одного напрямку. Це може бути, наприклад, вертикальний рух вгору та вниз. Асиметричні моди збуджують рух матеріалу в двох або більше напрямках. Це може бути, вертикальний рух вгору та вниз, а також горизонтальний рух вліво та вправо. Моди з вищою фазовою швидкістю зазвичай передають більше енергії. Моди з низькою фазовою швидкістю краще реагують на дефекти, оскільки вони мають здатність "відчувати" невеликі зміни в матеріалі. Для контролю об'єктів на довші відстані краще використовувати моди з великою енергією, оскільки вони менше загасають на відстані.

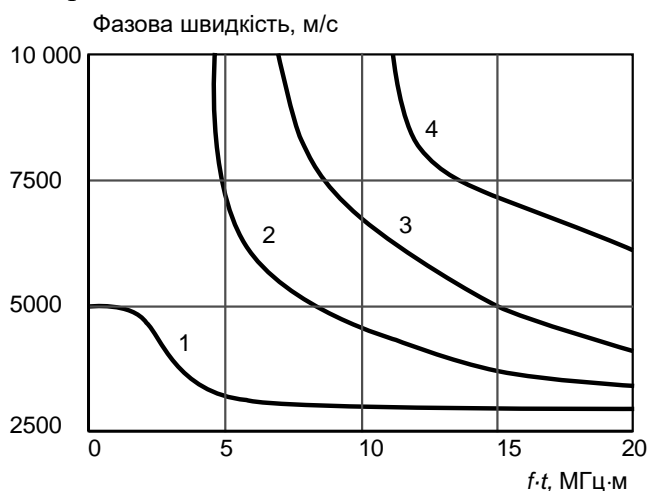
Таблиця 2 – Умовні позначення п'єзокерамічних констант

Позначення	Пояснення
T_k	Температура точки Кюрі
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0, \epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	Відносна діелектрична проникність
$\text{tg } \delta$	Тангенс кута діелектричних втрат в слабких полях при $E=25$ кВ/м
Q_m	Механічна добротність
v_l^E	Швидкість звуку
σ_p	Планарний коефіцієнт Пуассона
d_{31}, d_{33}, d_{15}	П'єзоелектричні модулі
g_{31}, g_{33}	Електричні константи за напругою (чутливість в режимі приймання)
$T_{роб}$	Рекомендована підвищена температура
ρ_v	Питомий об'ємний електричний опір

Важливою частиною ультразвукового контролю є оброблення сигналу, отриманого від первинного перетворювача. Ми обрали вейвлет-аналіз сигналів, оскільки він став досить популярним у сфері аналізу ультразвукових сигналів, особливо при виявленні дефектів. Однією з його ключових особливостей є масштабний аналіз, який дозволяє розглядати сигнал на різних рівнях деталізації. Це означає, що користувач може сконцентруватися на високочастотних або низькочастотних аспектах сигналу за потреби. Там, де багато

інших методів аналізу зосереджуються або на часі, або на частоті, вейвлет-аналіз враховує обидва цих параметри. Це означає, що можна відслідковувати, як змінюється сигнал у часі, не втрачаючи при цьому даних про частоту. Ця локалізація в часі та частоті особливо корисна, коли потрібно виявити короткочасові збурення або дефекти. Вейвлет-трансформація також володіє чутливістю до слабких або трудно помітних характеристик сигналу, що може не бути поміченим за допомогою інших методів. Ще однією важливою особливістю є можливість вибору між різними вейвлет-функціями. Різні функції можуть бути оптимальними для різних типів ультразвукових сигналів, тому аналіз може бути налаштований під конкретну задачу. Завдяки цим особливостям, вейвлет-аналіз може виявляти та локалізувати дефекти з великою точністю, адаптуючись до особливостей кожного сигналу. Для аналізу ультразвукових напрямних хвиль ми використовуємо вейвлет функцію Добеші (Daubechies wavelets) або вейвлет Мексиканського капелюха (Mexican Hat wavelet). Вейвлет Добеші популярний через його здатність забезпечувати гарну локалізацію в часі та частоті. Він володіє компактною опорою і може бути використаний для реконструкції сигналу без будь-яких втрат, що робить його особливо корисним для аналізу сигналів, де деталі є важливими, як це часто відбувається при виявленні дефектів. Вейвлет Мексиканського капелюха, з іншого боку, є гарно локалізованим в часі та частоті, що робить його дуже чутливим до короткочасових збурень в сигналах. Це особливо корисно при виявленні дефектів, які можуть бути тимчасовими або локальними в сигналі. Так, для проведення аналізу сигналу напрямних хвиль, де деталі не є важливими Мексиканський капелюх є оптимальним вибором. Вейвлет Добеші є кращим варіантом, де потрібна висока чутливість до короткочасових збурень, його

ми застосовуємо при локалізації дефекту місце якого отримано за допомогою застосування напрямних ультразвукових хвиль. Для оптимального застосування ультразвукових напрямних хвиль та оброблення сигналу нами запропоновано алгоритм.



номери 1...4 позначають порядковий номер моди

Рисунок 4 – Зв'язок між фазовою швидкістю та добутком частоти f на товщину t пружного середовища для симетричних мод пластинчатих напрямних хвиль

Алгоритм проведення ультразвукового контролю:

1. Підготовка об'єкта до контролю:

1.1 Визначте ділянки для ультразвукового тестування (залежить від геометрії об'єкту контролю, його стану, доступності поверхонь).

1.2 Очистіть поверхню об'єкта від забруднень та корозії у місцях контакту із ультразвуковими перетворювачами.

2. Використання напрямних хвиль:

2.1. Підключіть ультразвуковий перетворювач до вторинного пристрою (дефектоскоп).

2.2. Застосуйте контактний гель на поверхню об'єкта для кращого зв'язку між перетворювачем та поверхнею.

2.3. Встановіть перетворювач на відповідне місце об'єкта.

2.4. Запустіть процес ультразвукового контролю.

2.5. Запишіть отриманий сигнал.

3. Оброблення сигналу напрямних хвиль з використанням вейвлету Мексиканського капелюха:

3.1. Завантажте сигнал до програми обробки.

3.2. Застосуйте вейвлет-перетворення Мексиканського капелюха до сигналу.

3.3. Визначте аномалії чи можливі дефекти на основі обробленого сигналу.

4. Використання об'ємних хвиль для локалізації дефектів:

4.1. Перемістіть датчик на ділянки, де було виявлено можливі дефекти.

4.2. Запустіть процес ультразвукового контролю для отримання даних об'ємних хвиль та детального визначення параметрів дефекту.

5. Оброблення сигналу об'ємних хвиль з використанням вейвлету Добеші:

5.1. Завантажте сигнал до програми обробки.

5.2. Застосуйте вейвлет-перетворення Добеші до сигналу, що дає змогу точніше визначити положення та розмір дефекту.

6. Аналіз результатів та документація:

6.1. Зробіть висновки про стан об'єкта на основі отриманих даних.

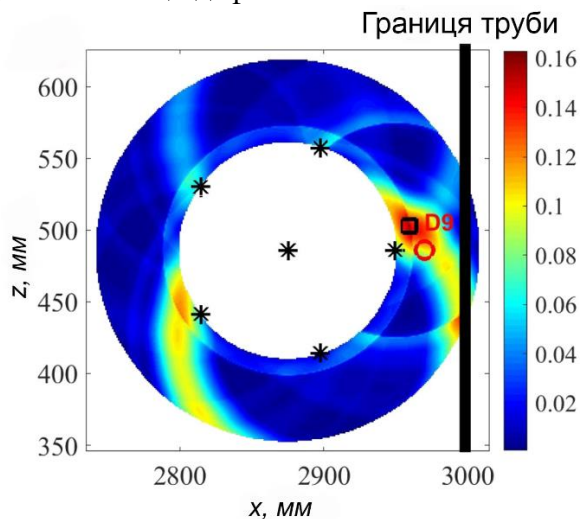
6.2. Запишіть всі знаходження та рекомендації щодо подальшого обслуговування об'єкта.

7. Завершення процесу контролю.

Контроль дефектів в трубопроводі.

Коли відстань між перетворювачем і краєм труби d_{ed} є меншою ніж r_c , відбивання від краю труби може викликати помилкове спрацювання на етапі виявлення дефектів та створювати артефакти на зображенні під час локалізації дефекту. Використання коротшого часового вікна може обмежити цей ефект, але може також видалити сигнали від дефектів біля краю труби, тому

зона виявлення зменшується. Проте, використання коротшого кроку контролю перетворювачем p_s може зменшити цей недолік. Було виявлено, що для областей біля краю труби p_s може бути коротшим, щоб зберегти 100% покриття виявлення. Наприклад, $p_s = 125$ мм використовують для інспекції області труби від 375 мм до 2625 мм, тоді як для ближчої до краю області використовують $p_s = 62.5$ мм. Дефект D9 вивчає вплив відбивання від краю труби. Навіть якщо покриття не 100% при $p_s = 125$ мм, дефект все ще може бути виявлений. На етапі локалізації проблема полягає в тому, що сигнали від дефекту у додаткових вимірах можуть бути поглинені відбитими сигналами і видалені під час формування зображення. Дефект може бути виявлений, але не вірно локалізований, коли відбивання від труби не враховуються. Однак дефект може бути локалізований з похибкою в 19 мм, як показано на рис. 5, що свідчить про можливість використання відбитих сигналів для локалізації дефектів.



* - місце контролю перетворювачем

Рисунок 5 – Зображення акустичного поля від дефекту D9 включаючи відбиття від границі труби

На основі (3), підходу оптимізації ультразвукового перетворювача та приведеного алгоритму проведено обчислення контролю дефекту в трубі, рис. 5. Показано ефективне застосування розробленого відходу.

Висновки

Аналізуючи деформацію при використанні пластичних напрямних хвиль, було виявлено декілька ключових параметрів, які визначають якість і стабільність процесу. Через застосування специфікованих математичних формул, встановлено взаємозв'язок між різними факторами, які впливають на деформаційні процеси. Це дозволило краще зрозуміти динаміку і взаємодію цих процесів. В рамках дослідження було розроблено нові алгоритми оброблення результатів. Ці алгоритми забезпечують вищу точність вимірювань і дозволяють отримувати більш адекватні дані про деформаційні процеси. Вдосконалення технологічних процесів деформації, яке пропонується в цій статті, може значно підвищити ефективність виробництва. Це не тільки знизить виробничі витрати, але і поліпшить якість кінцевих продуктів.

Список використаних джерел

1. ZANG, Xulei, et al. Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection: A review. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2023, 105033.
2. Wenbo Duan, Ray Kirby, Guided wave propagation in buried and immersed fluid-filled pipes: Application of the semi-analytic finite element method, *Computers & Structures*, Volume 212, 2019, Pages 236-247, ISSN 0045-7949, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.10.020>.
3. LIU, Tianhao, et al. An Enhanced Long-range Guided-wave Pipe Inspection Method Based on Local Axial 2D Signal

Acquisition and Processing. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023.

4. ZHANG, Jie, et al. Pipe inspection using guided acoustic wave sensors integrated with mobile robots. NDT & E International, 2023, 139: 102929.

5. Hang J., Niu X., Croxford A.J., Drinkwater B.W. Strategies for guided acoustic wave inspection using mobile robots Proc R Soc A, 478 (2022), Article 20210762, 10.1098/rspa.2021.0762.

6. Michaels J.E., Lee S.J., Croxford A.J., Wilcox P.D. Chirp excitation of ultrasonic guided waves Ultrasonics, 53 (2013), pp. 265-270, 10.1016/j.ultras.2012.06.010

7. Beckmann P. Rayleigh distribution and its generalizations Radio Sci, 68D (1964), pp. 927-932, 10.6028/jres.068D.092.

8. Talukdar K.K., Lawing W.D. Estimation of the parameters of the rice distribution J Acoust Soc Am, 89 (1991), pp. 1193-1197, 10.1121/1.400532.

9. Цапенко В.К. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник/ В.К.Цапенко, Ю.В.Куц. –К.: НТТУ «КПІ».- 2010.-448 с.

10. Храмов А.В. Первинні вимірювальні перетворювачі вимірювальних приладів і автоматичних систем: Навч. посібник.-К.: Вища шк., 1998.-527с.

3. LIU, Tianhao, et al. An Enhanced Long-range Guided-wave Pipe Inspection Method Based on Local Axial 2D Signal Acquisition and Processing. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023.

4. ZHANG, Jie, et al. Pipe inspection using guided acoustic wave sensors integrated with mobile robots. NDT & E International, 2023, 139: 102929.

5. Hang J., Niu X., Croxford A.J., Drinkwater B.W. Strategies for guided acoustic wave inspection using mobile robots Proc R Soc A, 478 (2022), Article 20210762, 10.1098/rspa.2021.0762.

6. Michaels J.E., Lee S.J., Croxford A.J., Wilcox P.D. Chirp excitation of ultrasonic guided waves Ultrasonics, 53 (2013), pp. 265-270, 10.1016/j.ultras.2012.06.010

7. Beckmann P. Rayleigh distribution and its generalizations Radio Sci, 68D (1964), pp. 927-932, 10.6028/jres.068D.092.

8. Talukdar K.K., Lawing W.D. Estimation of the parameters of the rice distribution J Acoust Soc Am, 89 (1991), pp. 1193-1197, 10.1121/1.400532.

9. Tsapenko V.K. Osnovy ultrazvukovoho neruinivnoho kontroliu: Pidruchnyk/ V.K.Tsapenko, Yu.V.Kuts. – K.: NTTU «KPI».- 2010.-448 s. . [in Ukrainian]

10. Khramov A.V. Pervynni vymiriualni peretvoriuvachi vymiriualnykh pryladiv i avtomatychnykh system: Navch. posibnyk.-K.: Vyshcha shk., 1998.-527s. [in Ukrainian]

References

1. ZANG, Xulei, et al. Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection: A review. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 105033.

2. Wenbo Duan, Ray Kirby, Guided wave propagation in buried and immersed fluid-filled pipes: Application of the semi analytic finite element method, Computers & Structures, Volume 212, 2019, Pages 236-247, ISSN 0045-7949, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.10.020>.