

## ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 622.24.05-004.4

DOI: 10.31471/1993-9981-2018-2(41)-38-43

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Н. І. Чабан\*, О. М. Карнаш, І. В. Рибіцький, В. Д. Миндюк*  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 506611,  
e-mail: public@nung.edu.ua; nazarii.chaban@gmail.com

В статті розглянуті питання можливості використання акустичних методів для контролю зміни фізико-механічних характеристик металоконструкцій довготривалої експлуатації. Також наведені різні способи збудження та прийому ультразвукових хвиль: імпедансний; лазерно-фазовий, когерентний. Особливу увагу звернуто на когерентний спосіб, який, завдяки стрімкому розвитку обчислювальної техніки, дозволив створити новітні інформаційно-вимірювальні пристрої – дефектоскопи на ультразвукових фазованих решітках (УЗФР). Показано переваги систем УЗФР та можливості використання їх для оцінки зміни мікроструктури матеріалу металоконструкцій, які експлуатуються в складних умовах.

Ключові слова: дефектоскопія, мікроструктура, ультразвукові фазовані решітки

В статье рассмотрены вопросы использования акустических методов для контроля изменения физико-механических характеристик металлоконструкций длительной эксплуатации. Также приведены различные способы возбуждения и приема ультразвуковых волн: импедансный; лазерно-фазовый, когерентный. Особое внимание обращено на когерентный способ, который, благодаря стремительному развитию вычислительной техники, позволил создать новейшие информационно-измерительные устройства – дефектоскопы на ультразвуковых фазированных решетках (УЗФР). Показаны преимущества систем УЗФР та возможности их использования для оценки изменения микроструктуры материала металлоконструкций, которые эксплуатируются в сложных условиях.

Ключевые слова: дефектоскопия, микроструктура, ультразвуковые фазированные решетки

The article deals with the possibility of applying acoustic methods for controlling the change in the physical and mechanical characteristics of long-life metal structures. Various methods for excitation and reception of ultrasonic waves are also given: impedance; laser-phase, coherent. Particular attention is paid to the coherent method, which, due to the rapid development of computer technology, allowed to create the modern information and measurement devices - failure detectors based on ultrasonic field-induced phase grating (UFIPG). The advantages of UFIPG systems are shown including the possibility of their application to assess the change in the microstructure of metal structures material exploited under difficult conditions .

Key words: defectoscopy, microstructure, ultrasonic field-induced phase grating

Забезпечення безпечної експлуатації металоконструкцій довготривалої експлуатації є складною та важливою проблемою, особливо в нафтогазовій галузі, де переважна більшість обладнання експлуатується в складних умовах (значні знакомінні навантаження, наявність корозійно-активних середовищ, значні коливання температур та інше)[1].

Вирішення цієї проблеми, особливо в період їх експлуатації, можливе за рахунок застосування методів та засобів неруйнівного контролю (НК) та технічної діагностики (ТД), принцип дії яких полягає у взаємодії різних фізичних полів та речовин з контрольованим об'єктом. Одним з найпоширеніших є акустичний метод, оснований на встановленні взаємозв'язків між фізико-механічними,

технологічними, структурними характеристиками матеріалів і виробів та акустичними характеристиками [2]. До основних фізико-механічних характеристик, які можна визначати акустичними методами відносяться: пружні (модуль нормальної пружності, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона), міцнісні (міцність при згині, стискуванню, крученні та інші), структурні (анізотропія матеріалу, розміри кристалів, вид кристалічної ґратки, аморфність та інші), розміри та форма різних включень, глибина поверхневого зміцнення та ряд інших. Акустичними методами можна оцінювати тільки ті властивості матеріалів, які впливають на умови збудження, проходження, відбиття та заломлення пружних хвиль або на режими коливання об'єкта контролю. Інформативними параметрами акустичного методу контролю, які можуть бути виміряні сучасними дефектоскопами, можуть бути: швидкість поширення хвиль різних типів; хвильовий опір; коефіцієнти поглинання та розсіювання пружних хвиль.

Перевагами акустичного методу є можливість одностороннього доступу до контрольованої деталі, та доволі висока чутливість. Це дає можливість здійснювати виявлення дефектів типу порушення суцільності матеріалу (тріщини, непровари, різного роду включення, технологічні дефекти), вимірювати геометричних розміри (товщина виробу, його знос, діаметр та інше) та контролювати фізико-механічні характеристики, в першу чергу, твердість, та структуру металоконструкцій[2].

#### **Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми та цілі подальших досліджень**

На відміну від ультразвукової дефектоскопії та товщинометрії, ультразвуковий структурний аналіз, як за кордоном, так і в Україні, ще мало використовується в промисловості. Для контролю структури в більшості випадків використовується вплив структури та фазового складу на затухання та швидкість поширення ультразвукових коливань (УЗК) в металах. Слід відмітити, що вимірювання швидкості УЗК та коефіцієнта затухання ультразвуку існуючими імпульсними дефектоскопами, особливо контактним способом, має значну похибку, пов'язану з важкістю врахування часу пробігу акустичного

імпульсу в контактному шарі між перетворювачем та взірцем, так як товщина цього шару змінюється випадковим чином. Для зменшення вказаної похибки застосовують імерсійний контакт або безконтактні способи збудження та прийому ультразвукових коливань, наприклад лазерні способи збудження та прийому. Розроблено способи вимірювання швидкості та часу проходження, які мають підвищену точність [3]. Одним з них є спосіб синхрокільця або авто циркуляції імпульсу при якому сигнал, який пройшов через об'єкт контролю запускає генератор зондуючих імпульсів. В цьому випадку частота повторення імпульсів буде зворотно пропорційна часу проходження імпульсу та вимірюваної швидкості. Досліджено і інші способи вимірювання швидкості та затухання, а саме імпульсно-фазовий [3], гетеродинний [5] та інші.

В загальному, всі вищезазвані методи є методами проходження, які базуються на вимірюванні зміни параметру акустичного сигналу, що пройшов через об'єкт контролю.

Для контролю фізико-механічних характеристик металоконструкцій також використовуються імпендансні методи, які базуються на зміні механічного імпендансу або вхідного акустичного імпендансу поверхні об'єкту контролю з яким взаємодіє п'єзоперетворювач.

Недоліками вказаних методів для широкого застосування є відсутність промислової апаратури, складність настройки приладів через відсутність відповідних калібрів, складність інтерпретації, документування та зберігання (накопичування) одержаних сигналів.

Найбільш перспективними для акустичного контролю металоконструкцій в промислових умовах є когерентні методи, в яких інформативним параметром, окрім амплітуди та часу проходження імпульсів, також є і фаза сигналу.

#### **Висвітлення основного матеріалу дослідження**

Стрімкий розвиток обчислювальної техніки зробив можливим використання когерентних методів для візуалізації внутрішньої структури контрольованої деталі. При когерентній обробці вимірюваних значень акустичного поля, розсіяного порушенням

цілостності матеріалу використовуються аналогові та цифрові методи обробки сигналу. Методи обробки в частотному спектрі традиційно називають голографією. В США та країнах Європи ці методи називають методами синтезованої цифрової сфокусованої апертури - SAFT [6]. Вони дозволяють вимірювати розподіл значень акустичного поля, розсіяного дефектом [7].

Одним з методів з цифровою когерентною обробкою даних є дифракційна томографія, яка передбачає визначення форми дефекта за даними розсіяного ним акустичного поля. Завдання, які вирішуються в дифракційній томографії надзвичайно складні і представляють собою повноцінне рішення зворотної задачі розсіювання. При цьому спочатку вирішується пряма задача розсіювання, а потім уточнення з використанням даних про поле, зареєстроване поза межами розсіювача (дефекта). Найпоширеніший приклад практичної реалізації названої технології - це ультразвукові томографи, які знайшли широке застосування в медицині.

В техніці результати досліджень були реалізовані в новітніх інформаційно-вимірювальних системах - ультразвукових дефектоскопах на фазованих решітках (УЗФР) [8].

1. Дефектоскопи на фазованих решітках дають можливість здійснити інтегральну оцінку конструкції, оперативно візуалізувати внутрішню структуру контрольованого металу, полегшують інтерпретацію та документування результатів контролю, підвищують чутливість, достовірність контролю.

Основу системи УЗФР складає спеціалізований ультразвуковий перетворювач з певною кількістю окремих елементів, як правило 16-256 п'єзоелементів. При цьому кожен з елементів активується окремо, по запрограмованій схемі. Перетворювачі можуть бути використані з різними типами призм (квадратна, кругла, трикутна), як при контактному так і імерсійному способам контролю. Фазовані решітки - це набір

декількох п'єзоелементів, конструктивно з'єднаних в одному корпусі. Частота вимірювання знаходиться в діапазоні від 1 до 100МГц [8]. Конфігурацію п'єзоелементів (форму, розміри, послідовність розташування) у системах УЗФР вибирають у відповідності до об'єкту контролю та потенційних контрольованих параметрів.

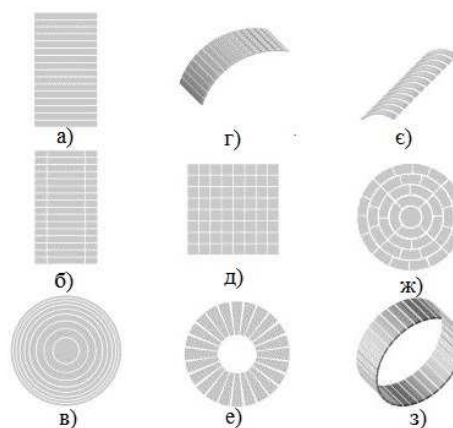


Рисунок 1 – Основні типи комбінацій п'єзоелементів,

де а), б) лінійний, в) циліндричний, г) зігнутий лінійний, д) лінійний двовимірний, е) секторний, є) лінійний фокусуєчий, ж) циліндричний-секторний, з) радіальний

На практиці найчастіше використовуються лінійні перетворювачі з різною кількістю п'єзоелементів. На ринку появились серійні дефектоскопи на УЗФР високої якості та широкої номенклатури, які випускаються фірмами Imasonic (Франція), R/DTech (Канада), Siemens (Німеччина), Siui (Китай) та інші. Розвиток ІТ- технологій дозволяє створити відносно недорогі, компактні електронні блоки управління ФР. Основні характеристики та можливості систем УЗФР наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Технічні засоби для контролю з використанням УЗФР

Назва	OmniScan MX2	Epoch 1000	Phasor XS	Harfang Veo	ISONIC2010	CTS-602
Виробник	R/D Tech, Канада	Olympus	GE Inspection Technologies	Sonatest	Sonotron, Ізраїль	SIUI, Китай
Режими сканування	TOFD A, B, C, S	A, B, L, S	A, B, L, S	TOFD S/L/C	TOFD S/L/C	A, B, C, D
Максимальна кількість елементів	128	64	64	64	32	128
Максимальна кількість каналів одночасно працюючих	16	16	16	16	32	32
Кількість варіантів фокусування (законів фокусування)	256	61	128	1024	128	256
Можливість збереження/передачі даних	SDHC, USB, Ethernet	немає	USB	USB WIFI	немає	USB
Програмне забезпечення для опрацювання даних	OmniPC™, NDT SetupBuilder	ні	ні	ні	ні	ні
Нанесення контуру зварного з'єднання	так	так	ні	так	так	так

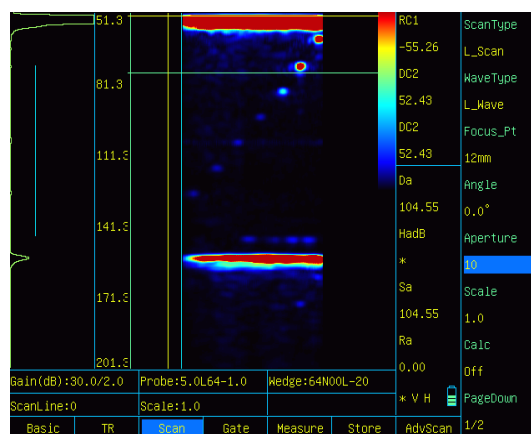
Фізичний принцип роботи фазових решіток полягає в генеруванні ультразвукових (УЗ) хвиль всіма п'єзоелементами, які в комплексі формують ультразвуковий пучок. Електронне управління кутом вводу УЗ-пучком і аналіз отриманого луно-імпульсу дозволяє в режимі реального часу формувати на екрані

дефектоскопа S-скан у вигляді двохмірного зображення січення деталі.

Дане зображення надає оператору наглядну інформацію про розміщення та координати дефектів. Типовий приклад S –скану показаний на рис.2



а)



б)

Рисунок 2 - Зразок для налаштування ультразвукового дефектоскопа (а) і зображення структурних шумів та імітаторів дефектів типу тріщини на екрані дефектоскопа з УЗФР (б)

Сучасні дефектоскопи, в яких реалізована система УЗФР дозволяють одночасно працювати в декількох режимах та налаштовувати параметри контролю за допомогою модулів 3D, а також зберігати та документувати велику кількість S –сканів для подальшого їх використання при оцінці зміни тих чи інших контрольованих характеристик об'єкта.

Візуалізація дефектів при акустичній дефектоскопії металоконструкцій, полягає у зборі інформації про відносну відбиваючу здатність точок внутрішнього об'єму досліджуваного об'єкта з наступним зображенням зрізу або декількох зрізів на екрані дефектоскопа. Кожна точка зображення своєю яскравістю, або кольором характеризує відбиваючу здатність відповідної їй, за координатами, точки матеріалу досліджуваного об'єкта. Якщо площа візуалізованого зрізу матеріалу об'єкта проходить через дефект (неоднорідність, порушення цілісності матеріалу та інше), то межа розриву матеріалу, будучи сукупністю точок, що відображають УЗ хвилі, відобразиться на екрані у вигляді точок, більш яскравих або іншого кольору в порівнянні з сусідніми точками зображення (рис.3) [10].

Характерною особливістю УЗФР є те, що за рахунок одночасного або почергового збудження окремих п'єзоелементів в складеному п'єзоелектричному перетворювачі в електронному блоці керування генерується ультразвуковий промінь, в якому, за допомогою програмного забезпечення, можна змінювати такі параметри як кут падіння, фокусна відстань і розмір фокусної плями.

Також, програмне забезпечення приладу дозволяє створити акустичний промінь потрібної форми через взаємодію хвиль, з врахуванням характеристик перетворювачів та досліджуваного матеріалу.

Суттєвою перевагою УЗФР і головною відмінністю від традиційного ультразвукового контролю є можливість представлення результатів контролю у вигляді двовимірного зображення внутрішньої структури. Завдяки новому сприйняттю оператором інформації про внутрішню будову об'єкта контролю (на рівні образів) виникає головна відмінність від результатів традиційного ультразвукового контролю -можливість визначення ресурсу за результатами контролю.

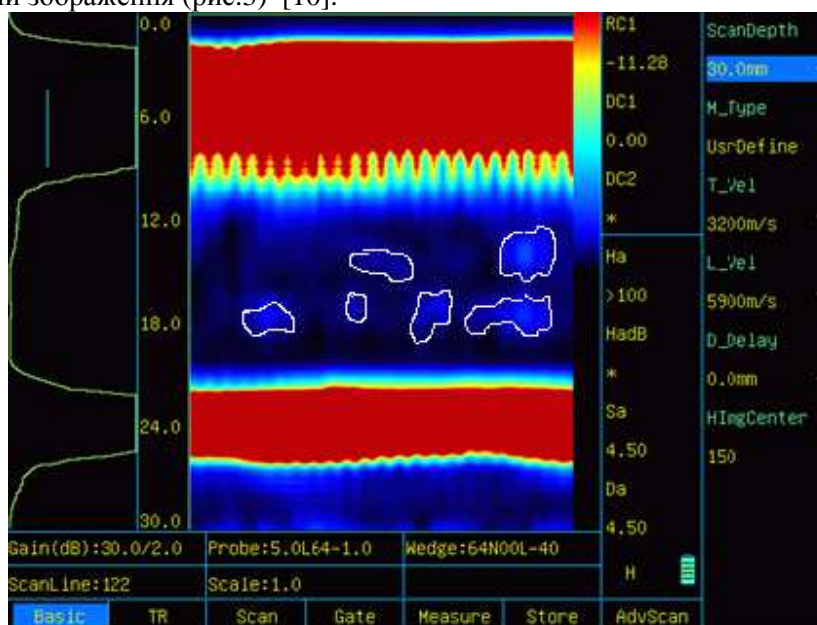


Рисунок 3 – Акустичне зображення елемента конструкції довготривалої експлуатації з структурними неоднорідностями, отримане на екрані дефектоскопа за допомогою УЗФР.

Ймовірно, вже скоро може стати непотрібним протокол результатів контролю з параметрами дефектів, їх характером і кількістю. Актуальним і необхідним залишається питання подальшої обробки отриманих зображень з метою визначення реальних розмірів і типу дефектів з метою передбачення можливості їх росту. Розробивши спеціальну програму аналізу акустичних зображень об'єктів даного класу, можна буде отримати висновок про стан об'єкта і про його ресурс.

### Висновки

Таким чином, дефектоскопи на УЗФР вже знайшли широке застосування в промислових умовах для виявлення місця утворення, форми та розмірів дефектів типу порушення цілостності матеріалу, в тому числі, при контролі зварних з'єднань [9]. Потенційні можливості використання систем УЗФР дають підставу на дослідження нових методів контролю фізико-механічних, насамперед, напружено-деформованого стану та зміни мікроструктури металоконструкцій довготривалої експлуатації, так званого, переддефектного стану. Визначення вказаних параметрів особливо важливе для металоконструкцій, які протягом тривалого часу знаходяться в технологічному процесі (насосно-компресорні труби для видобування вуглеводневої суміші, бурильні труби для поглиблення стовбура свердловини та інші) під час якого контроль їх технічного стану є неможливим.

1. *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій. : довідн. Пос. у 8 томах/ за заг.ред. З.Т. Назарчука. – Простір. -Львів. – 2017.Том1: Експлуатаційна деградація матеріалів та конструкцій./ Є.І. Крижанівський, О.П.Остап, Г.М.Никифорчин, О.З.Студент, П.В.Ясній. 2016.- 360 с.*

2. *Незрушаючий контроль: Справочник: в 8т./ Под общ. Ред. В.В.Клюева. Т.3.*

*И.Н.Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – 2-е изд.испр. – М.-Машиностроение, 2006. – 864 с.:ил.*

3. *Труэл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела: пер. с англ/ Р.Труэл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. - М.: Мир, 2009.-307с.*

4. *Пябус Г.В., Мельканович А.Ф., Кушкулей Л.М. Установка для измерения ультразвука в твердых телах/ Г.В. Пябус, А.Ф. Мельканович, Л.М. Кушкулей //Дефектоскопия, 2007.- №2.- С 57-63.*

5. *Методы неразрушающих испытаний: пер. с англ.. / Под ред. Р.Шарпа. М.: Мир.- 2012.- 564с.*

6. *Бадаян В.Г. Ультразвуковая дефектметрия металлов с применением голографических методов / В.Г. Бадаян, Е.Г. Базулин, А.Х. Вopilкин и др.-М. Высшая школа, 2008. – 298 с.*

7. *Крауткремер Й., Крауткремер Г.Ультразвуковой контроль материалов : справ.изд. : пер. с нем/ Й. Крауткремер, Г. Крауткремер.- М.: Металлургия, 1991.-752с*

8. *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline. - Quebec: R/D Tech inc., 2012. - 368 p.*

9. *Попович О.В., Карпаш О.М., Карпаш М.О. Методика вибору перетворювачів з фазованими решітками для визначення розмірів і форм дефектів./О.В. Попович, О.М. Карпаш, М.О. Карпаш // Фізико-хімічна механіка матеріалів. №3(52) – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України,2016.- с. 126-132.*

10. *Sci –Chang Wooh, Lawrence Azar. Phase steering and focusing behavior of ultrasound in cementitious materials // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2009. - Vol.18. - P.2161-2168.*

**Поступила в редакцію 20.11.2018 р.**  
**Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Райтер П. М., докт. техн. наук, проф. Олійник А. П.**