

ПРИЛАДИ

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/04>**Ладженський О.В.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ВИРОБІВ ЗІ СКЛАДНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

У статті розглянуто проблему ультразвукового контролю об'єктів зі складною формою поверхні. На поточний момент акустичний неруйнівний контроль таких об'єктів ускладнений через проблему щільного прилягання перетворювача, отже, неможливості правильно локалізувати положення дефектів. У статті запропоновано методику визначення форми поверхні та ультразвукового перетворювача для коректного визначення параметрів збудження і прийому ультразвукових коливань. Показано можливість розробки гнучкого ультразвукового перетворювача, який може змінювати кривизну робочої поверхні. Такий тип перетворювачів може бути застосований для контролю об'єктів зі складним профілем поверхні. Це забезпечить кращий акустичний контакт між датчиком та об'єктом контролю, що значно підвищить вірогідність та продуктивність контролю. Крім того, це відкриває можливість для ультразвукового контролю об'єктів, які раніше не підлягали ультразвуковому контролю. Запропоновано алгоритм визначення координат градієнтів густини в матеріалі, що контролюється, який базується на визначенні координат елементів датчика. Проведено аналіз працездатності алгоритму. Показано можливість створення акустичної системи контролю з гнучким перетворювачем.

Ключові слова: неруйнівний контроль, акустичний контроль, ультразвук, складна поверхня, гнучкий ультразвуковий перетворювач.

Постановка проблеми. Акустичний метод неруйнівного контролю, спрямований на виявлення неоднорідностей у структурі матеріалу, набув поряд з іншими методами неруйнівного контролю широкого розвитку завдяки можливості досягнення високої роздільної здатності і незалежності від агрегатного стану контрольованого матеріалу та відсутності шкідливого впливу на людський організм.

Особливі переваги акустичного методу контролю пов'язані з розвитком автоматизованих систем на основі використання дискретних фазокерованих акустичних перетворювачів (ФАП) з двомірним панорамним відображенням розташування неоднорідностей (градієнтів густини) контрольованого матеріалу типу В-скан.

Проте недоліком подібних систем контролю, якщо йдеться про їх універсальне призначення, є необхідність індивідуального пристосування форми перетворювача до форми поверхні об'єкта дослідження для забезпечення можливості вводу-виводу коливань. Плоска поверхня перетворювача вимагає такої ж плоскої поверхні об'єкта контролю [1].

Постановка завдання. Ця робота спрямована на подолання вказаного недоліку і реалізацію

можливості забезпечення в автоматичному режимі виконувати контроль і панорамне відображення внутрішньої структури матеріалу твердотільних виробів зі складною формою поверхні за параметрами просторово-часових координат луносигналів.

Принцип роботи системи ґрунтується на допущенні незалежності швидкості хвилі поздовжніх коливань у контрольованому матеріалі від напрямку їх поширення. Конструкція ФАП відрізняється відсутністю жорсткого з'єднання елементів між собою, що дозволяє положенням елементів повторювати профіль поверхні об'єкта контролю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для можливості однозначного визначення координат просторового розташування градієнтів густини контрольованого середовища діаграма направленості ультразвукових коливань, якими виконується зондування такого середовища, має бути стаціонарною. Це виключає можливість використання одночасного збудження коливань усіх елементів ФАП, враховуючи їх довільне в певних межах взаємне просторове положення. Знаючи апіорі координатне розташування елементів перетворювача та регулюючи відповідно момент збудження та прийому коливань для кожного елементу перетворювача

можемо локалізувати координати інформативних акустичних сигналів (луносигналів), відбитих від дефектів [2]. Можемо також виконати фокусування коливань у заданій точці контрольованого середовища з метою забезпечення високої роздільної здатності контролю [3]. Основна проблемність у реалізації автоматизованої системи такого контролю полягає у необхідності врахування просторових координат положення елементів ФАП у разі визначення координат місця положення градієнтів густини контрольованого матеріалу за результатами вимірювання часового запізнення луносигналів, прийнятих елементами перетворювача [5].

Виклад основного матеріалу дослідження. Визначення координат положення елементів ФАП відносно положення центрального елемента після притискання перетворювача до поверхні об'єкта контролю виконаємо для випадку, коли відмінність такої поверхні від площини описується повільною функцією (рис. 1). Враховуючи розмір ширини елемента ФАП рівний, наприклад $\lambda/2$, де λ – довжина хвилі коливань до матеріалу об'єкта контролю, координати n -ного відносно центру перетворювача елемента можемо визначити, якщо виміряємо величину відстані Δh_n – зміщення положення елемента відносно горизонталі:

$$\begin{aligned} x_n &= \sqrt{\left(n \frac{\lambda}{2}\right)^2 - \Delta h_n^2} \\ z_n &= \Delta h_n \end{aligned} \quad (1)$$

Величина зміщення положення n -ного елемента перетворювача відносно горизонтального положення центрального елемента може бути визначена шляхом попереднього вимірювання величини нерівностей поверхні об'єкта контролю з допомогою мікропрофілометра і відповідного перерахування з відносно позиції такого елемента у складі перетворювача [4].

Розглянемо можливість визначення просторових координат градієнтів густини (дефектів внутрішньої структури контрольованого матеріалу) за величиною часового запізнення надходження луносигналів у випадку збудження зондуючого коливання центральним елементом ФАП. Час запізнення надходження луносигналу (τ_0) до центрального і n -ного (τ_n) елементів лінійно залежить від відстаней елементів перетворювача до місця розташування градієнта густини:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= \frac{2L_0}{C} \\ \tau_n &= \frac{L_0 + L_n}{C} \end{aligned} \quad (2)$$

Отже, відстані від елементів перетворювача до місця відбиття ультразвуку (місця розташування дефекту) становлять:

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{\tau_0 C}{2} \\ L_n &= \left(\frac{\tau_0}{2} - \tau_n\right) C \end{aligned} \quad (3)$$

Відповідно до рис. 1 градієнт густини матеріалу контролю (дефект) розташований у точці перетину кіл радіусом L_0 з центром у початку координат та радіусом L_n з центром у точці з координатами x_n, z_n :

$$\begin{aligned} L_0 &= \sqrt{x_d^2 + z_d^2} \\ L_n &= \sqrt{(x_d - x_n)^2 + (z_d - z_n)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Виходячи з (4), отримуємо вирази для обчислення координат просторового розташування градієнта густини (дефекту):

$$\begin{aligned} z_d &= 2 \frac{Az_n \pm \sqrt{A^2 z_n^2 + 4n^2 \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 x_n^2 L_0^2}}{n^2 \lambda^2} \\ x_d &= \sqrt{L_0^2 - z_d^2} \end{aligned} \quad (5)$$

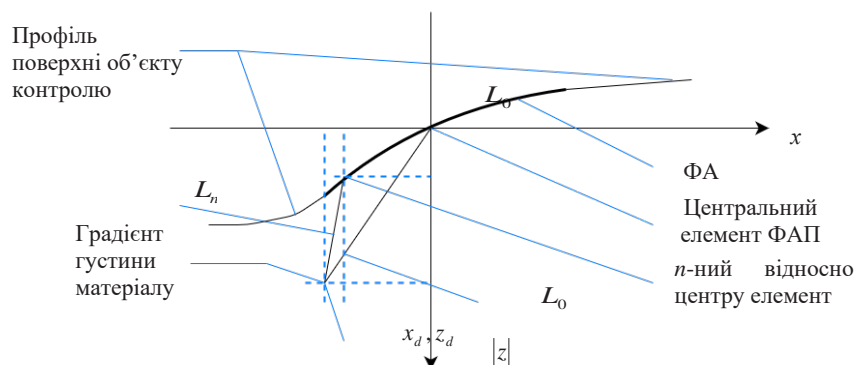


Рис. 1. Визначення координат положення градієнта густини (дефекту контрольованого матеріалу)

де $A = L_0^2 - L_n^2 + n^2 \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2$.

Підвищення роздільної здатності адаптивної до якості поверхні системи контролю можемо досягти за рахунок фокусування ультразвуку. Будова такої системи контролю відрізняється меншою складністю, особливо якщо задаватися глибиною розташування фокусної зони коливань, яка має, наприклад, співпадати з умовною віссю перетворювача. Знаючи координати кожного елемента ФАП та координати фокусної зони (фокусна відстань F) відносно центрального елемента перетворювача необхідно визначити відстані до неї відносно кожного іншого елемента L_n (рис. 2).

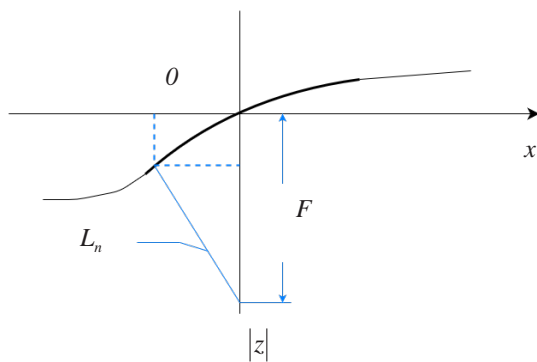


Рис. 2. Фокусування ультразвукових коливань

Для n -ного елемента величина такої відстані становитиме:

$$L_n = \sqrt{(F - z_n)^2 + x_n^2} \quad (6)$$

Фокусування ультразвукових коливань вимагає співпадіння фаз у разі їх надходження у фокусну зону від кожного елемента перетворювача [3; 4]. Знаючи відстань кожного з них до зони фокусування, маємо визначити затримки чи упередження моментів збудження коливань кожним п'єзоелектричним елементом перетворювача та відповідно моментів вимірювання їх рівня у разі прийому луносигналів. Так, для n -ного елемента відносно центру перетворювача величина затримки збудження відносно моменту збудження центрального елемента має становити

$$\Delta\tau_n = \frac{L_n - F}{C} \quad (7)$$

Час затримки моменту вимірювання рівня луносигналу, який приймається n -ним елементом перетворювача, повинен бути також регламентованим і становити $\tau_n = 2L_n/C$ [1].

Якщо положення фокусної зони задається координатами x_F, z_F , що не співпадають з віссю перетворювача, величина затримки моменту збу-

дження кожного n -ного елемента з координатами x_n, z_n відносно моменту збудження коливань центрального елемента становить:

$$\Delta\tau_n = \frac{\sqrt{(x_n - x_F)^2 + (z_n - z_F)^2} - \sqrt{x_F^2 + z_F^2}}{C} \quad (8)$$

Незважаючи на великий обсяг вимірювань і обчислень, це є чи не єдина можливість реалізації адаптивної до складної будови поверхні контрольованого об'єкта системи автоматичного ультразвукового контролю.

Точність необхідних для реалізації системи вимірювань, а відповідно і рівень вірогідності контролю, залежить насамперед від точності визначення координат просторового розташування елементів перетворювача на поверхні об'єкта контролю.

Іншим фактором, який не меншою мірою може впливати на результат контролю, є співвідношення нерівностей поверхні та розмірів п'єзоелектричних елементів ультразвукового перетворювача. Це вкрай важливо для можливості використання лінійних ФАП, довжина елементів якого становить шість і більше довжин хвиль коливань у середовищі контрольованого матеріалу. Така невідповідність розмірів елементів і нерівностей (каверн) на поверхні матеріалу може впливати на якість акустичного контакту частини перетворювача з цим матеріалом та можуть виникати інші небажані явища на границі розділу середовищ, що обов'язково приведе до спотворення результату контролю. Використання ж ФАП з двомірним розділенням елементів взагалі нами не розглядається як надто складне для реалізації рішення.

Конструктивно вимірювальний перетворювач ФАП повністю повторює конфігурацію лінійного фазо-керуваного перетворювача [2; 3], виконаного у вигляді послідовного набору п'єзоелектричних елементів шириною $\lambda/2$, де λ – довжина хвилі коливань у контрольованому середовищі товщиною $\lambda_k/4$, виходячи з умови механічного резонансу на частоті ультразвукового коливання (тут λ_k – довжина хвилі коливань у матеріалі п'єзокераміки) та довжиною не менш за 6λ . Відмінність полягає лише в тому, що елементи перетворювача приєднані (приклеєні) до гнучкої основи – наприклад по вініловій плівці, яка є стороною замкнутого простору – коробу, заповненого повітрям. У разі встановлення такої конструкції на поверхню об'єкта контролю гнучка сторона разом з приєднаними п'єзоелектричними елементами приймає форму цієї поверхні.

У середині експериментальної конструкції коробка-перетворювача використовується вимірювальна частина стандартного профілометра для вимірювання вертикальних координат елементів перетворювача, які своїм положенням повторюють профіль поверхні контролюваного об'єкта. Для можливості контролювати процес визначення координат елементів ФАП короб конструкції перетворювача виконується з прозорої пластмаси.

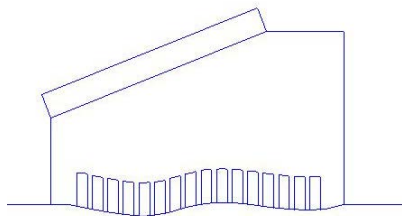


Рис. 3. ФАП з гнучкою поверхнею

Висновки.

Дискретний ультразвуковий перетворювач типу "Phased array" виконаний на гнучкій основі

для можливості вертикального зміщення елементів відповідно до профілю неплоскої поверхні контролюваного об'єкта дозволив реалізувати систему контролю з відображенням двовимірного розподілу типу В-скан градієнтів густини (дефектів) структури такого матеріалу.

Адаптація до фактичного профілю поверхні контролюваного матеріалу в місці встановлення ФАП виконується шляхом вимірювання взаємного вертикального зміщення елементів перетворювача з допомогою стандартного профілометра. Визначені таким чином двовірні координати елементів ФАП та виміряні часові запізнення моментів надходження луносигналів до кожного з елементів перетворювача забезпечують відповідно до розроблених алгоритмів визначення двовірних координат розташування градієнтів густини. Розглянута також можливість реалізації високої роздільної здатності контролю матеріалу зі складною конфігурацією поверхні шляхом фокусування ультразвуку в наперед заданих просторових координатах середовища контролюваного матеріалу.

Список літератури:

1. Roy O., Chatillon S., Mahaut S. Ultrasonic inspection of specimen with complex geometry using a flexible smart contact transducer. *Proc. of the 2nd Inter. Conf. on NDE in Relation to struct. Integ. for Nuclear and Pressurised Components*, 2000, p. 411.
2. Mahaut S., Roy O., Casula O., Cattiaux G. Pipe Inspection using UT Smart flexible Transducer. *8th ECNDT, Barcelona proceedings*. 2002.
3. Масевський С.М. Фазовимірювальні системи неруйнівного контролю : навчальний посібник. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 288 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25091>.
4. Pan T., Pharr M., Ma Y., Ning R., Yan Z., Xu R., Feng X., Huang Y., Rogers J.A. Experimental and theoretical studies of serpentine interconnects on ultrathin elastomers for stretchable electronics. *Adv. Funct. Mater.* 27, 1702589, 2017.
5. Zhou W. Ultrasonic Phased Array Post-processing Imaging Techniques: A Review. *Journal of Mechanical Engineering*. 2016. No. 52. Pp. 1–11. 10.3901/JME.2016.06.001.

Ladyzhenskyi O.V. ULTRASONIC CONTROL OF OBJECTS WITH A COMPLEX SURFACE SHAPE

The article considers the problem of ultrasonic control of objects with a complex surface shape. At present, acoustic non-destructive testing of such objects is complicated by the problem of tight fit of the transducer and, therefore, the inability to correctly locate the position of the defects. The article proposes a method for determining the shape of the surface and the ultrasonic transducer for the correct determination of the parameters of excitation and receiving of ultrasonic waves and, accordingly, the correct localization of discontinuities. The acoustic testing system with the formation of a two-dimensional reflection of the type of B-scan on the basis of the use of a converter of type "Phased array", which differs in the placement of elements on a flexible basis in order to repeat their spatial placement of the surface shape of the control object, is considered. The design of the transducer is characterized by the lack of rigid connection of the elements. In addition, it opens up opportunities for ultrasonic inspection of objects that were not previously subject to ultrasonic inspection. Adaptation to the actual surface profile of the material at the installation site of the transducer is performed by measuring the mutual vertical displacement of the transducer elements. The algorithms of calculation of coordinates of gradients of density of controlled material on the basis of preliminary determination of coordinates of acoustic converter elements and time parameters are given. The proposed algorithm does not require complex calculations and is therefore suitable for real-time calculations. The possibility of building an acoustic control system for materials with a complex surface based on oscillation focus at the specified points of the environment of this material is also shown.

Key words: NDT, acoustic testing, ultrasound, complex surface, flexible transducer.