

УДК 620.179

АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ КУТІВ ПАДІННЯ І ЗАЛОМЛЕННЯ КРАЙОВИХ ПРОМЕНІВ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ ПРИ КОНТАКТНОМУ СПОСОБІ КОНТРОЛЮ ЦИЛІНДРИЧНИХ ВИРОБІВ

© Криничний П.Я., 2005

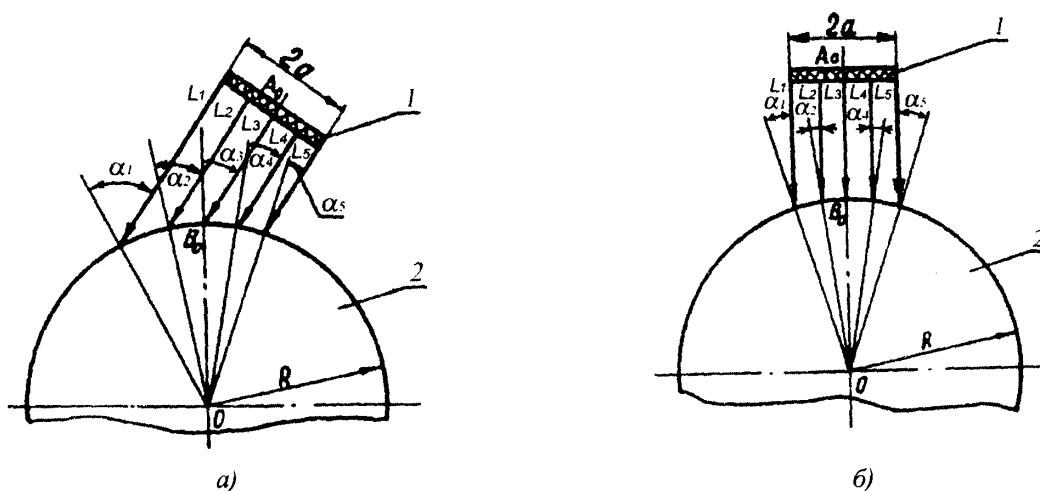
Науково-виробнича фірма „Зонд”, м. Івано-Франківськ

Розглянуто графоаналітичний та аналітичний методи визначення кутів падіння і заломлення крайових променів акустичного поля при контактному способі контролю циліндричних виробів. Виведено розрахункові формули, які дозволяють, не вдаючись до графічних побудов, аналітичним методом визначати значення кутів падіння і заломлення будь-якого променя пучка УЗК при контролі циліндричних виробів.

При ультразвуковому контролі різних виробів часто виникає необхідність забезпечення найбільш ефективного введення ультразвукових коливань (УЗК) у заданому напрямку. Особливо актуальним є вирішення цього питання при контролі виробів циліндричної форми, наприклад, бурильних труб, коли на характер формування акустичного поля в матеріалі виробу суттєвий вплив має кривизна їх поверхонь. Так, при прозвучуванні зовнішньої поверхні циліндра в площині його поперечного перерізу похилим пучком паралельних променів L_1, L_2, L_3, L_4 і L_5 повздовжніх хвиль УЗК ультразвукові промені падають на поверхню виробу під різними кутами $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ і α_5 , причому кут $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_4 > \alpha_5$

(рис. 1, а). Аналогічна картина поширення УЗК спостерігається, коли акустична вісь A_0B_0 падаючого пучка паралельних променів співпадає з напрямком радіуса кривизни OB_0 циліндричного виробу (рис. 1, б). У цьому випадку значення кутів падіння паралельних променів випромінювача, що знаходяться на однаковій віддалі від акустичної осі A_0B_0 пучка УЗК, поступово збільшуються, внаслідок чого кут $\alpha_1 = \alpha_5$ і $\alpha_2 = \alpha_4$, причому $\alpha_1 > \alpha_2$.

Зважаючи на те, що падіння пучка паралельних променів УЗК на опуклу поверхню циліндра відбувається під різними кутами α , можливі випадки, коли заломлені у виробі промені будуть поширюватись пучком, що сходиться або розходить.



1 – п'єзоелектричний випромінювач; 2 – поперечний переріз циліндра

Рис. 1. Схема прозвучування поверхні циліндричного виробу похилим (а) і прямим (б) випромінювачами УЗК

Таким чином, при проектуванні акустичного тракту необхідно враховувати значення кутів падіння і заломлення центрального променя ультразвукового пучка, а також крайніх бокових променів УЗК, що поширюються в площині поперечного перерізу виробів циліндричної форми.

Відомий графоаналітичний метод [1] визначення значення цих кутів, який пов'язаний з виконанням ряду трудомістких операцій, таких, наприклад, як обов'язкове схематичне зображення на робочому кресленні ходу променів пучка УЗК у площині осьового перерізу акустичного тракту системи "п'єзоперетворювач – контактне середовище – об'єкт контролю", вимірювання геометричних параметрів за графічною побудовою, обчислювальні операції.

У цій статті здійснена спроба, використовуючи простий математичний апарат, вивести розрахункові формули, які б дозволяли, не вдаючись до графічних побудов, тільки аналітичним методом визначити значення кутів падіння і заломлення будь-якого променя пучка УЗК при контролі циліндричних виробів.

Вирішення поставленої задачі базується на відомому припущенні [2] про те, що ультразвукові коливання в однорідних пружних середовищах поширюються по законах геометричної акустики – у вигляді сукупності прямолінійних променів-ліній, вздовж яких спрямована ультразвукова енергія.

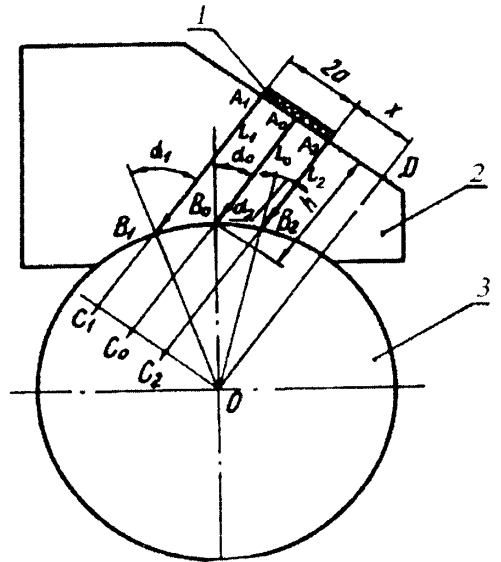
На схемі для виведення розрахункових формул для визначення кутів падіння і заломлення при контактному способі контролю виробів циліндричної форми (рис. 2) розглядається випадок похилого вводу паралельних променів $L_0, L_1, \text{ і } L_2$, пучка УЗК у площині поперечного перерізу циліндра. Ведення УЗК у циліндричний виріб через тонкий шар рідини здійснюється за допомогою призми похилого п'єзоперетворювача, контактна поверхня якої підігнана під кривизну циліндра. Оскільки товщина рідкої плівки значно менша за довжину хвилі ультразвуку, то її впливом нехтуємо. Віддаль від точки вводу B_0 центрального променя L_0 до дискового п'єзоперетворювача вибирається дещо меншою протяжності ближньої зони п'єзоперетворювача ($h < r_0$), у результаті чого в матеріалі призми п'єзоперетворювача ультразвукові коливання поширюються у вигляді спрямованого пучка паралельних променів.

Так, при частоті поздовжніх хвиль $f = 2,5 \text{ МГц}$ і діаметра п'єзоперетворювача $2a = 18 \text{ мм}$, широко застосовуваних при ультразвуковому контролі бурильних труб, протяжність ближньої зони в матеріалі призми п'єзоперетворювача (органічному склі) складає

$$r_0 = \frac{\alpha^2}{\lambda} = \frac{\alpha^2 f}{c} = \left(\frac{9^2 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{2670 \cdot 10^3} \right) \text{мм} = 76 \text{ мм},$$

де c – швидкість поширення повздовжніх коливань УЗК в органічному склі.

Далі на рис. 2 здійснюємо необхідні геометричні побудови. З центру кола O проводимо дві взаємно перпендикулярні прямі OC_1 і OD , при цьому OC_1 паралельна до A_1D , а OD паралельна до прямих $A_0C_0, A_1C_1, \text{ і } A_2C_2$.



1 – п'єзоелектричний випромінювач; 2 – призма похилого п'єзоперетворювача; 3 – поперечний переріз циліндра

Рис. 2. Схема визначення кутів падіння і кутів заломлення крайових променів УЗК при прозвучуванні циліндричного виробу похилим п'єзоперетворювачем

Прямі $A_1C_1, \text{ і } A_2C_2$ є одночасно крайніми боковими променями ультразвукового пучка, а пряма A_0C_0 – центральним променем цього пучка. Точки $B_0, B_1 \text{ і } B_2$, в яких прямі $A_0C_0, A_1C_1, \text{ і } A_2C_2$ перетинаються з колом циліндра, є точками вводу відповідно центрального L_0 крайнього лівого L_1 і крайнього правого L_2 паралельних променів пучка УЗК в циліндричний виріб. Через вказані точки і центр кола проводимо радіальні прямі $OB_1, OB_0, \text{ і } OB_2$. потім вводимо наступні позначення (рис. 2):

$OB_1 = OB_0 = OB_2$ – радіус циліндричного виробу;

A_0B_0 – акустична вісь пучка УЗК дискового п'єзоперетворювача;

$A_1B_1 \text{ і } A_2B_2$ – відповідно крайній лівий і крайній правий промені пучка УЗК;

$A_1A_2 = 2a$ – діаметр плоского п'єзоперетворювача;

$\alpha_0, \alpha_2 \text{ і } \alpha_1$ – кути падіння центрального і крайових променів УЗК на циліндричну поверхню.

Оскільки кути $\angle C_0B_0O$ і $\angle \alpha_0$, $\angle C_1B_1O$ і $\angle \alpha_1$, $\angle C_2B_2O$ і $\angle \alpha_2$ за умовами їх побудови є вертикальними кутами, то на основі цього записуємо, що

$\angle C_0B_0O = \angle \alpha_0$; $\angle C_1B_1O = \angle \alpha_1$; $\angle C_2B_2O = \angle \alpha_2$,
де $OB_0 = OB_1 = OB_2 = R$ – радіус циліндричного виробу. З прямокутного трикутника C_0B_0O знаходимо, що

$$\frac{C_0O}{OB_0} = \sin \angle C_0B_0O = \sin \alpha_0,$$

$$C_0O = \frac{2a}{2} + x, \quad OB_0 = R.$$

Отже $\sin \alpha_0 = \frac{a+x}{R}$, звідки

$$x = R \sin \alpha_0 - a. \quad (1)$$

З прямокутного трикутника C_2B_2O знаходимо $\sin \alpha_2$, що є кутом падіння крайнього правого променя A_2B_2 пучка УЗК:

$$\frac{C_2O}{OB_2} = \sin \angle C_2B_2O = \sin \alpha_2.$$

Так як $C_2O = x = R \sin \alpha_0 - a$, $OB_2 = R$,

$$\sin \alpha_2 = \frac{R \sin \alpha_0 - a}{R},$$

$$\text{то } \alpha_2 = \arcsin\left(\frac{R \sin \alpha_0 - a}{R}\right). \quad (2)$$

Розглядаючи прямокутний трикутник C_1B_1O , визначаємо кут падіння α_1 крайнього лівого променя $L_1 (A_1B_1)$ пучка УЗК:

$$\frac{C_1O}{OB_1} = \sin \angle C_1B_1O = \sin \alpha_1.$$

Але згідно з умовами побудови (рис. 2) після підстановки замість x його значення (1) маємо $C_1O = 2a + x = R \sin \alpha_0 + a$.

Тоді $\sin \alpha_1 = \frac{R \sin \alpha_0 + a}{R}$ і, як наслідок,

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{R \sin \alpha_0 + a}{R}\right). \quad (3)$$

Визначивши кути вводу α_1 , α_2 і приймаючи кут нахилу акустичної осі α_0 п'єзоперетворювача відомим за умовою задачі, на основі відомого співвідношення Снеліуса [3] знаходимо відповідні їм кути заломлення у виробі циліндричної форми.

Запишемо вираз для визначення кута заломлення центрального променя $L_0 (A_0B_0)$:

$$\beta_0 = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha_0}{n}\right), \quad (4)$$

де $n = C_1/C_2$ – коефіцієнт заломлення ультразвукових хвиль на границі розділу двох середовищ (призма п'єзоперетворювача – циліндричний виріб);

C_1 – швидкість поширення ультразвукових хвиль в матеріалі призми; C_2 – швидкість поширення ультразвукових хвиль в матеріалі циліндра.

Підставляючи у (4) замість кута α_0 кут α_1 , знаходимо кут заломлення β_1 крайнього лівого променя L_1 ультразвукового пучка

$$\beta_1 = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha_1}{n}\right), \quad (5)$$

або, виразивши β_1 через α_1 (див. (3)), отримуємо, що

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \arcsin\left\{\frac{\sin\left[\arcsin\left(\frac{R \sin \alpha_0 + a}{R}\right)\right]}{n}\right\} = \\ &= \arcsin\left\{\frac{\sin\left(\frac{R \sin \alpha_0 + a}{R}\right)}{n}\right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогічно визначаємо кут заломлення β_2 крайнього правого променя пучка УЗК L_2 :

$$\beta_2 = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha_2}{n}\right), \quad (7)$$

а після підстановки замість α_2 виразу (2) знаходимо, що

$$\begin{aligned} \beta_2 &= \arcsin\left\{\frac{\sin\left[\arcsin\left(\frac{R \sin \alpha_0 - a}{R}\right)\right]}{n}\right\} = \\ &= \arcsin\left\{\frac{\sin\left(\frac{R \sin \alpha_0 - a}{R}\right)}{n}\right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для перевірки практичного застосування отриманих залежностей розглянемо приклад розрахунку кутів падіння і заломлення крайових променів при прозвучуванні суцільного сталюого циліндра пучком паралельних променів УЗК за допомогою похилого призматичного п'єзоперетворювача. Ввід УЗК у циліндричний виріб здійснюється контактним способом у площині, перпендикулярній до поздовжньої осі циліндра. Товщиною шару контактного середовища, зважаючи на її малу величину, нехтуємо.

Розрахунок здійснюємо для наступних вихідних даних: діаметр циліндра $d = 114$ мм; діаметр п'єзоперетворювача $2a = 10$ мм; кут нахилу призми

п'єзоперетворювача $\alpha_0 = 10^\circ$; швидкість поширення повздовжніх хвиль ультразвуку в призмі п'єзоперетворювача (органічне скло) $C_1 = 2670$ м/с, а в сталевому циліндрі $C_2 = 5882$ м/с; коефіцієнт заломлення УЗК $n = C_1/C_2 = 0,454$. Використовуючи (2) і (3), визначаємо значення кутів падіння крайових променів ультразвукового пучка:

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{57 \cdot \sin 10^\circ + 5}{57}\right) = \arcsin 0,2613 = 15^\circ 9';$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{57 \cdot \sin 10^\circ - 5}{57}\right) = \arcsin 0,0858 = 4^\circ 55'.$$

За допомогою формул (5) і (7) знаходимо значення кутів заломлення крайових променів ультразвукового пучка в сталевому циліндрі:

$$\beta_1 = \arcsin\left(\frac{\sin 15^\circ 9'}{0,454}\right) = \arcsin 0,5755 = 35^\circ 08';$$

$$\beta_2 = \arcsin\left(\frac{\sin 4^\circ 55'}{0,454}\right) = \arcsin 0,1891 = 10^\circ 54'.$$

Скориставшись співвідношенням Снеліуса, визначаємо значення кута заломлення центрального променя [формула (4)]:

$$\beta_0 = \arcsin\left(\frac{\sin 10^\circ}{0,454}\right) = \arcsin 0,3823 = 22^\circ 28'.$$

Вирішення даної задачі за допомогою графоаналітичного методу (рис. 3) дозволило отримати наступні значення кутів:

$$\beta_1 = \arcsin\left(\sin \alpha_1 \frac{C_2}{C_1}\right) = \arcsin\left(\sin 15^\circ \frac{5882}{2670}\right) = \arcsin 0,5701 = 34^\circ 46';$$

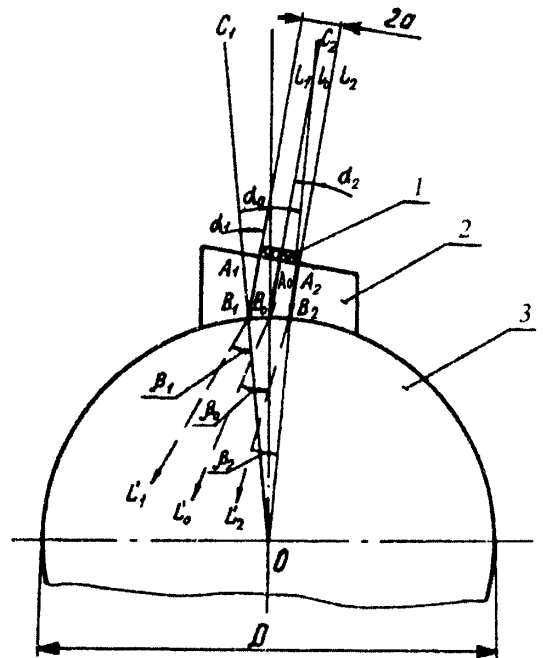
$$\beta_2 = \arcsin\left(\sin \alpha_2 \frac{C_2}{C_1}\right) = \arcsin\left(\sin 5^\circ \frac{5882}{2670}\right) = \arcsin 0,1921 = 11^\circ 5'.$$

Хід крайових і центрального променів пучка УЗК після їх заломлення в площині поперечного перерізу циліндра під відповідними кутами $\beta_1 = 34^\circ 46'$, $\beta_0 = 22^\circ 28'$, $\beta_2 = 11^\circ 5'$ зображено на рис. 3 штриховими лініями L_1' , L_0' і L_2' .

Для порівняльної оцінки аналітичного і графоаналітичного методів визначення кутів падіння і заломлення ходу променів пучка ультразвукових коливань при контролі виробів циліндричної форми результати розрахунків зведені в табл. 1.

З таблиці видно, що числові значення одних і тих же кутів, отриманих за допомогою аналітичного і графоаналітичного методів, дещо відрізняються один від одного. Така різниця за інших рівних умов перш за все обумовлена недосконалістю окремих операцій графоаналітичного методу, наприклад, графічного відтворення на робочому рисунку систе-

ми акустичного тракту і безпосереднього вимірювання геометричних параметрів цієї системи по зображеннях рисунка.



1 – п'єзоперетворювач; 2 – призма похилого п'єзоперетворювача; 3 – поперечний переріз циліндра

Рис. 3. Схема визначення кутів падіння і кутів заломлення крайових променів УЗК графоаналітичним методом

Таблиця 1 – Значення кутів падіння і заломлення ходу променів пучка УЗК при контролі виробів циліндричної форми, визначені аналітичним і графоаналітичним методами

Умовні позначення	Метод визначення кутів	
	аналітичний	графоаналітичний
α_1	15°9'	15°0'
α_2	4°55'	5°0'
β_0	22°28'	22°28'
β_1	35°08'	34°46'
β_2	10°54'	11°5'

Висновки:

Оцінюючи в цілому аналітичний метод розрахунку кутових параметрів акустичного тракту системи „призматичний п'єзоперетворювач – циліндричний виріб”, можна відзначити наступне:

1. Сукупність отриманих виразів (1) – (8) дозволяє визначити важливу функціональну залежність кутів падіння і кутів заломлення α і β будь-якого з променів пучка ультразвукових коливань від радіуса кривизни циліндричної поверхні R контрольованого виробу, радіуса п'єзоперетворювача a і співвідношення швидкостей поширення УЗК $C_1/C_2 = n$ акустичного тракту системи „п'єзоперетворювач – контрольований об'єкт”.

2. Відносна простота розрахункових формул (1) – (8) робить аналітичний метод більш ефективним для оцінки характеру поширення ультразвукових коливань в зоні акустичного тракту, наприклад, при розробці методики луна-дефектоскопії або луна-товщинометрії виробів циліндричної форми.

3. Порівняльна оцінка аналітичного і графоаналітичного методів показує, що при використанні останнього виникає суб'єктивна похибка, що вноситься в результати розрахунків шуканих величин.

4. Оскільки розрахункові формули виведені для випадку, коли значення кута нахилу акустичної осі випромінювача від'ємне, у випадку його додатного значення необхідно керуватися наступними умовами:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_{1n} &= \sin \alpha_{20}; & \sin \alpha_{2n} &= \sin \alpha_{10}; \\ \sin \beta_{1n} &= \sin \beta_{20}; & \sin \beta_{2n} &= \sin \beta_{10}, \end{aligned}$$

де “ n ” - додатне, “ 0 ” - від'ємне значення кута.

1. Єрмолов И.Н. *Физические основы эхо- и теплового методов ультразвуковой дефектоскопии*. – М.: Машиностроение, 1970. – 107 с., ил. 2. Выборнов Б.И. *Ультразвуковая дефектоскопия*. – М.: Металлургия, 1974. – 240 с., ил. 3. Соколов В.С. *Дефектоскопия металлов*. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 79 с.

УДК 620.179.17:622.323

ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТРУБ НАФТОВОГО СОРТАМЕНТУ

© Карпаш О.М., 2005

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Розглянуто питання розробки нових та удосконалення існуючих способів і методів підвищення інформативності результатів акустичного контролю труб нафтового сортаменту, у тому числі під час оцінки герметичності та міцності їх різьбових з'єднань. Викладено результати досліджень з підвищення точності вимірювання контакт-ного тиску в різьбових з'єднаннях акустичним методом.

Основні труднощі у вирішенні проблеми неруйнівного контролю та технічної діагностики (НКТД) обладнання пов'язані з неповнотою та неоднозначністю інтерпретації інформації, яку одержують на практиці експериментів різними фізичними методами. Складність діагностування таких об'єктів визначається взаємозв'язком, стохастичністю і корельованістю багатьох одночасно триваючих фізичних процесів, складністю конструкцій основних вузлів обладнання та умов експлуатації, принциповими труднощами одержання достовірної інформації, необхідної для розпізнання несправностей і оцінки технічного стану.

Окрім того, на сучасному етапі розвитку науки і техніки України ставиться завдання не тільки локалізації та виявлення вже наявних дефектів типу порушення суцільності матеріалу, але й контроль за утворенням та докритичним розвитком тріщини, контроль напружено-деформованого стану матеріалу, вимірювання зміни фізико-механічних характеристик металу в процесі експлуатації, що дасть змогу через вимірювання цих параметрів вийти на оцінку залишкового ресурсу об'єктів довготривалої експлуатації та розробити принципово нові методи, способи і технології оцінки фактичного фізичного (технічного) стану металоконструкцій [1].