

А.А. Зорі, Р.І. Соломічев, В.П. Тарасюк, В.М. Співак  
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ

## ДОСЛІДЖЕННЯ КУТІВ ВВЕДЕННЯ ТА ПРИЙОМУ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ ВІДНОСНО ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ ПРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНОМУ МЕТОДІ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

**Вступ.** Зупинка виробництва сталевого прокату на металургійному комбінаті у зв'язку з раптовим виходом з ладу прокатних валків спричиняє значні економічні втрати для підприємства. Тому, на даний момент перспективним напрямком у металургійному виробництві є здійснення безупинної оцінки зносу устаткування за допомогою неруйнівного контролю (НК).

У приповерхньому шарі металу бандажа сталепрокатних валків у процесі багаторазової гарячої прокатки виникають втомлені тріщини під значними навантаженнями та перепадами температур, які необхідно вчасно відстежити на ранніх стадіях їхнього розвитку. Дана проблема вирішується за допомогою безконтактного електромагнітно-акустичного (ЕМА) метода неруйнівного контролю.

**Постановка задачі.** Для розробки та підвищення ефективності електронної системи діагностичного контролю стану валків, необхідно дослідити вплив на вихідний сигнал кута введення та прийому ультразвукових коливань (УЗК) відносно об'єкту контролю.

**Вирішення задачі та результати досліджень.** За визначенням, приведеному в ДСТ 14782-86, кут введення похилого перетворювача  $\alpha$  – це кут між нормаллю до поверхні, на якій встановлений випромінюючий перетворювач, та лінією, що з'єднує центр відбивача (дефекту) з точкою виходу прийомного перетворювача при установці його в положення, при якому амплітуда луно-сигналу найбільша.

Акустична хвиля, що падає на границю поділу двох середовищ (див. рис. 1), частково проходить (коефіцієнти проходження енергії хвилі  $D_t$  й  $D_l$ ) та частково відбивається від неї (коефіцієнти віддзеркалення енергії хвилі  $R_t$ ,  $R'_t$ ,  $R'_l$ ). При цьому може відбуватися трансформація типів хвилі (коефіцієнт трансформації поперечної хвилі в подовжню  $T_{tl}$ ). В залежності від граничних значень кута  $\alpha$ , існує поняття критичних кутів введення УЗ-хвилі  $\alpha_{min} < \alpha < \alpha_{max}$ . У першому випадку, якщо  $\alpha_{min} > \alpha$ , то акустична хвиля не потраплятиме до похилого приймача й повернеться назад до випромінювача. У другому випадку, якщо  $\alpha > \alpha_{max}$  – хвиля швидко наблизиться до границі, зіллється з нею, трансформується або повністю відобразиться та амплітуди хвилі буде недостатньо, щоб вийти на поверхню до приймача.

Напрямок віддзеркалених та переломлених хвиль визначають із закону синусів [1] (1).

$$\frac{\sin(\alpha)}{c_t} = \frac{\sin(\alpha_l)}{c_l} = \frac{\sin(g_l)}{c'_l} = \frac{\sin(g_t)}{c'_t}, \quad (1)$$

де  $c_t=3300$  м/с,  $c_l=5600$  м/с – швидкості розповсюдження поперечної та подовжньої хвиль у металі;  $c'_t=1120$  м/с,  $c'_l=500$  м/с – швидкості

розповсюдження поперечної та подовжньої хвиль у повітрі (при середній температурі повітря 150 °С).

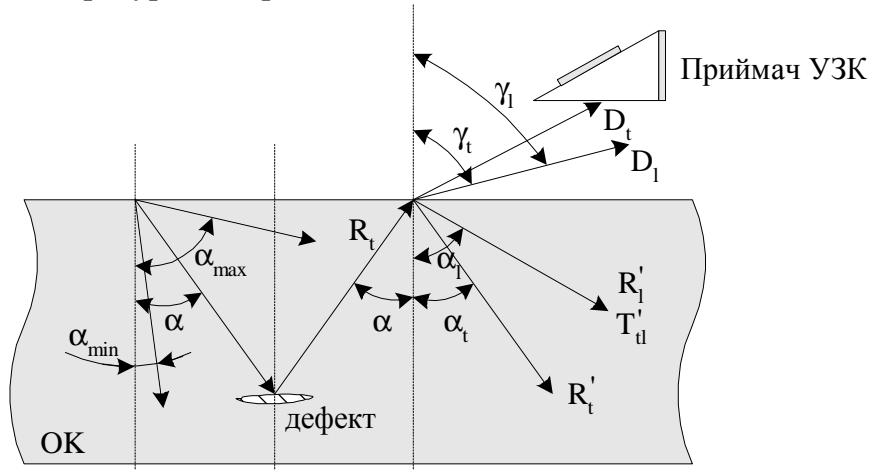


Рис. 1 Відображення та переломлення хвиль на границі розділу двох середовищ

що виникають ( $A_0$  – амплітуда хвилі, що генерується).

Значення критичних кутів знаходяться з виразів:

$$a_{\min} = \arcsin\left(\frac{c'_t}{c_t}\right), \quad (2)$$

$$a_{\max} = \arcsin\left(\frac{c_t}{c_l}\right). \quad (3)$$

При виборі оптимального кута введення УЗК з проміжку  $a_{\min} < \alpha < a_{\max}$  скористаємося виразом для коефіцієнта віддзеркалення хвилі (за енергією), що випромінюється, від дефекту  $R_t$  [2].

$$R_t = \frac{1}{1 + \left(\frac{z_c \cdot l}{\rho \cdot h_{\text{деф}} \cdot Z_t}\right)^2}, \quad (4)$$

де  $Z_t$  - акустичний опір сталі ОК для поперечної хвилі, визначається виразом:

$$Z_t = \frac{\rho \cdot c_t}{\cos(\alpha)} \cdot \sin^2(2 \cdot \alpha), \quad (5)$$

де  $\rho=8200 \text{ кг/м}^3$  – щільність сталі 150ХНМ,  $\alpha$  – кут нахилу введеної хвилі.

Дефект (наприклад мікротріщина) – це шар повітря певної товщини  $h_{\text{деф}}$  по обидві сторони якого розташоване однакове середовище. Прошарок – дефект, має акустичний опір (імпеданс) середовища:

$$z_c = \rho_c \cdot c'_t,$$

де  $\rho_c$  – щільність повітря,  $c'_t$  – швидкість поперечної хвилі в повітрі.

Підставляючи (5) у (4) одержимо залежність коефіцієнта віддзеркалення поперечної хвилі  $R_t$  від кута введення  $\alpha$  та розміру дефекту  $h_{\text{деф}}$ :

Залежність  $R_t(\alpha, h_{\text{деф}})$  при варіації  $\alpha$  від  $8,7^\circ$  до  $36,1^\circ$  та товщини дефекту  $h_{\text{деф}}$  від 0,5 мкм до 10 мкм наведена на рисунку 2, де цифрами позначено залежності при  $h_{\text{деф}}=10 \text{ мкм}$  (1),  $h_{\text{деф}}=1 \text{ мкм}$  (2),  $h_{\text{деф}}=0,5 \text{ мкм}$  (3).

Цей закон впливає із рівняння фазових швидкостей уздовж границь для всіх типів хвиль. Амплітуди хвилі, що пройшла  $A_{np}$  та віддзеркаленої хвилі  $A_{від}$  характеризуються відповідними коефіцієнтами прозорості  $D=A_{np}/A_0$ , та віддзеркалення  $R=A_{від}/A_0$  для кожного типу хвиль,

$$R_t(a, h_{\text{деф}}) = \frac{1}{1 + \left( \frac{z_c \cdot l}{p \cdot h_{\text{деф}} \cdot \frac{r \cdot c_t}{\cos(a)} \cdot \sin^2(2 \cdot a)} \right)^2} \cdot 100\% \quad (6)$$

Використовуючи формулу закону синусів для кутів розповсюдження хвиль (1), знайдемо кут нахилу переломленої хвилі, що надходить до приймача (7).

$$g_t(a) = \arcsin\left(\frac{\sin(a) \cdot c'_t}{c_t}\right) \quad (7)$$

При варіації  $a$  від  $8,7^\circ$  до  $36,1^\circ$ , побудуємо залежність кута переломлення хвилі УЗК  $\gamma_t(\alpha_t)$  (див. рис. 3).

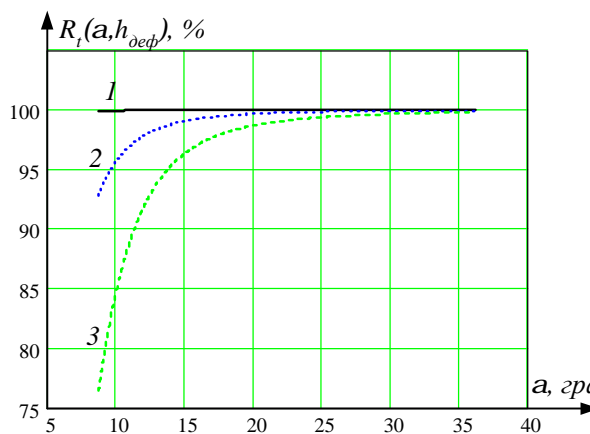


Рис. 2 Залежність коефіцієнта віддзеркалення від кута введення хвилі

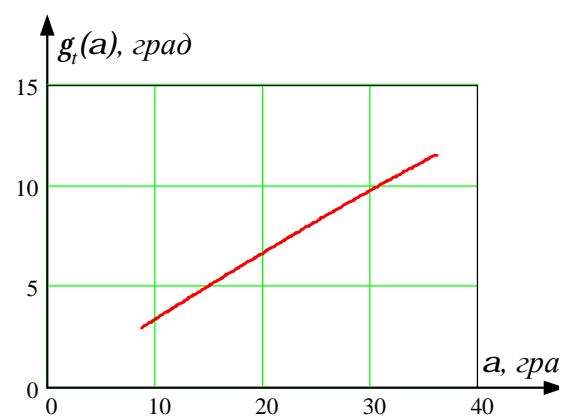


Рис. 3 Залежність кута переломлення від кута введення хвилі

Із графіку залежності  $\gamma_t(\alpha)$  видно, що кут переломлення не перевищує  $12^\circ$  для максимуму кута введення, тому треба обирати нормальний непохилий прийомний перетворювач, так як кут прийому хвилі менш ніж  $25^\circ$ . У випадку, якщо кут переломлення був би більший за  $25^\circ$ , стандартний похилий перетворювач треба обирати з кутами  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  і т.д.

Нехай кут переломлення хвилі  $\gamma_t=10^\circ$ , тоді кут випромінювання поперечної хвилі із закону синусів (1)  $\alpha=30,7^\circ$ . При цьому куті розрізняються дефекти від 0,1 мкм (коефіцієнт віддзеркалення енергії хвилі складає  $R_t=92,67\%$ ).

Розрахунок коефіцієнта віддзеркалення хвилі  $R'_t$  від внутрішньої границі ОК при виході її на поверхню [3] за виразом (8) дає значення  $R'_t = 7,04\%$

$$R'_t = \frac{\sin(2 \cdot a_t) \cdot \sin(2 \cdot a_t) - \left(\frac{c_l}{c_t}\right)^2 \cdot \cos^2(2 \cdot a_t)}{\sin(2 \cdot a_t) \cdot \sin(2 \cdot a_t) + \left(\frac{c_l}{c_t}\right)^2 \cdot \cos^2(2 \cdot a_t)} \cdot 100\% \quad (8)$$

де кут віддзеркалення  $\alpha_t=\alpha=30,7^\circ$ ,  $\alpha_t$  – кут частково трансформованої подовжньої хвилі з поперечної, знаходиться із закону синусів (9).

$$a_t = \arcsin\left(\frac{\sin(a) \cdot c_l}{c_t}\right). \quad (9)$$

Коефіцієнт прозорості за енергією границі поділу двох середовищ (метал-повітря):

$$D_t = 100\% - R'_t = 100\% - 7,04\% = 92,96\% .$$

Тобто крізь границю проходить 92,96% енергії поперечної хвилі скрізь повітря до приймача.

Коефіцієнт трансформації віддзеркаленої поперечної хвилі у подовжню [4] знаходиться за виразом (10).

$$T_{tt} = \frac{\left(\frac{c_l}{c_t}\right) \cdot \sin(4 \cdot a_t)}{\sin(2 \cdot a_t) \cdot \sin(2 \cdot a_t) + \left(\frac{c_l}{c_t}\right)^2 \cdot \cos^2(2 \cdot a_t)} \cdot 100\% = 99,96\% . \quad (10)$$

З виразу видно, що 7,04% відбитої енергії поперечної хвилі майже повністю (99,96%) трансформується у подовжню хвилю і надалі не несе ніякої корисної функції по виявленню дефектів.

#### **Висновки.**

1. З результатів досліджень випливає, що оптимальний кут введення ультразвукових коливань до об'єкту контролю становить  $\alpha=30,7^\circ$ , при цьому коефіцієнт віддзеркалення енергії хвилі складатиме  $R_t=92,67\%$  та буде забезпечено розпізнання дефектів розміром від 0,1 мкм.

2. У ході досліджень також було встановлено рівні критичних кутів введення УЗК, значення кута переломлення хвилі, її коефіцієнти трансформації та прозорості за енергією при проходженні границі поділу двох середовищ (метал-повітря), вплив зміни зазначених параметрів на розповсюдження УЗК.

3. Проведені попередні досліди дають підґрунтя та повноваження для подальшої побудови математичної моделі перетворювачів, каналу виміру параметрів деградації валків та синтезу електронної системи дефектоскопії.

#### **Перелік посилань:**

1. Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. – М: Высшая школа, 1991. – 283 с.
2. Алешин Н. П., Лупачев В. Г. Ультразвуковая дефектоскопия. Справ. пособие. – Минск: Высшая школа, 1987. – 386 с.
3. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М: Высшая школа, 1978. – 445 с.
4. Гурбатов С.Н, Руденко О.В. Акустика в задачах. – М: Наука, 1996. – 335 с.