

ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТРАКТУ ДЕФЕКТОСКОПУ ПРИ РОБОТІ З ДИФРАГОВАНИМИ ХВИЛЯМИ НА ТРИЩИНОПОДІБНИХ НЕСУЦІЛЬНОСТЯХ

© Давидов Є. О., 1999

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона.

Розглянено кількісні залежності дифрагованих хвиль, утворених на тріщиноподібних дефектах. На основі побудованої моделі дифракції ультразвукових хвиль на напівнескінченному розрізі чисельно досліджено повний ультразвуковий тракт дефектоскопу. Отримані аналітичні і чисельні залежності дозволяють здійснити найбільш ефективний вибір схемних рішень і параметрів п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП).

Дифракція в твердому тілі на напівнескінченному розрізі

Визначати кількісно амплітуди дифракційних хвиль виражених інтегральними рівняннями з особливостями [2-4] в інженерній практиці практично неможливо. Автором була пророблена подібна робота [5], де необхідно виконувати дії з вельми громіздкими аналітичними виразами, що можливо тільки із залученням чисельних методів і сучасних засобів обчислювання. Не поменшуючи переваг чисельних рішень, відмітимо, що при цьому приховане фізичне значення процесів, що відбуваються. Тому якісний аналіз стає практично недоступним.

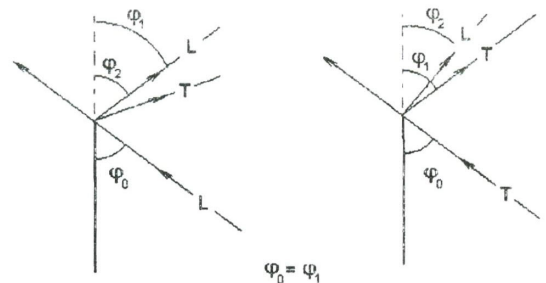
Трохи інакший підхід прийнятий в геометричній теорії дифракції (ГТД). ГТД дозволяє «конструювати» фізичні поля за певними законами, що мають ясний фізичний сенс. Тому застосування механізму ГТД найбільш доцільно використати в інженерних додатках. Найбільш істотним недоліком ГТД є неможливість визначення коефіцієнта дифракції, який можна отримати внаслідок точного рішення «модельної задачі» і потім узагальнити на схожий клас дифракції на напівплощині, що описується інтегралом Френеля [6], яке використовується в більшості робіт по ГТД.

У загальному випадку можливі два варіанти виникнення дифрагованих хвиль: при падінні поздовжньої і при падінні поперечної УЗ хвилі (рис. 1). Згідно з приведеними варіантами дифракції (рис. 1) всякий раз будуть утворюватися три межі світло-тінь, кожна з яких, в свою чергу, буде породжувати процес поперечної дифузії, що приводить до виникнення крайових хвиль. Запишемо рішення задачі в

загальному вигляді

$$U = U_{\text{пр}}F + U_L F + U_T F, \quad (1)$$

де $U_{\text{пр}}$ - падаюча (первинна) УЗ хвиля, U_L - поздовжня трансформована УЗ хвиля, U_T - поперечна трансформована УЗ хвиля, F - інтеграл Френеля, що описує процес поширення дифрагованої хвилі, для відповідної межі світло-тінь.



T - позначення поперечної хвилі
L - позначення поздовжньої хвилі
 Φ_0 - кут падіння хвилі на розріз
 Φ_1, Φ_2 - кути відбиття

Рис. 1. Схеми трансформації геометрооптичних складових при падінні УЗ хвилі на розріз в твердому тілі.

У розгорнутому вигляді згідно з позначеннями рис. 2. можемо записати:

$$U_{\text{пр}} = A_0 \exp(iK_{\text{пр}} R \cos(\varphi - \varphi_0)),$$

$$U_L = A_L \exp(iK_L R \cos(\varphi - \varphi_L)),$$

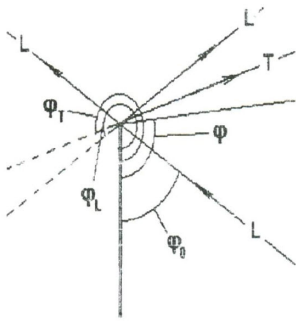
$$U_T = A_T \exp(iK_T R \cos(\varphi - \varphi_T)),$$

$$U = A_{\text{пр}} \exp(iK_{\text{пр}} R \cos(\varphi - \varphi_0)) \cdot F(\sqrt{2K_L R} \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_0}{2})) +$$

$$\begin{aligned}
 &+ A_L \exp(iK_L R \cos(\varphi - \varphi_L)) \cdot F(\sqrt{2K_L R} \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_L}{2})) + \\
 &+ A_T \exp(iK_T R \cos(\varphi - \varphi_T)) \cdot F(\sqrt{2K_T R} \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_T}{2})),
 \end{aligned} \tag{2}$$

де $A_{\text{ПР}}, A_L, A_T$ - амплітуди УЗ хвиль відповідно для падаючої і відбитої поздовжньої і поперечної, K_L, K_T - хвильові числа для подовжньої і поперечної хвилі, відповідно, $\varphi, \varphi_0, \varphi_L, \varphi_T$ - кути хвиль згідно з позначеннями рис. 2, R - відстань від точки спостереження до вершини розрізу,

$F(\xi) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \int \exp(is^2) \cdot ds$ - інтеграл Френеля.



φ_0 - кут падіння УЗ хвилі на розріз

φ_L, φ_T - кути трансформованих УЗ хвиль

φ - кут спостереження за хвилею, дифрагуюною на розрізі

Рис. 2. Позначення і відлік кутів для розрахункової схеми визначення дифрагованих хвиль.

$$\chi(\xi_{\text{ПР}}) = \chi(\sqrt{2K_{\text{ПР}} R} \cos(\varphi - \varphi_0)) = \chi(\pi + \varphi_0 - \varphi), \tag{6}$$

$$\chi(\xi_L) = \chi(\sqrt{2K_L R} \cos(\varphi - \varphi_L)) = \chi(-\pi + \varphi_L - \varphi), \tag{7}$$

$$\chi(\xi_T) = \chi(\sqrt{2K_T R} \cos(\varphi - \varphi_T)) = \chi(-\pi + \varphi_T - \varphi). \tag{8}$$

Оскільки перші три члени формули описують геометрооптичну частину поля, ті що залишилися - виражають структуру поля дифрагованих хвиль. Таким чином вираз для дифрагованих хвиль можна записати так:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{диф}} = & A_{\text{ПР}} \cdot \frac{\exp(iKR + \pi/4)}{\sqrt{2\pi R}} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{i}{2KR} \right) \frac{(-1)^n \cdot \Gamma(n+1/2)}{2\pi \cdot (\cos(\frac{\varphi - \varphi_0}{2}))^{2n+1}} + \\
 & + A_L \cdot \frac{\exp(iK_L R + \pi/4)}{\sqrt{2\pi R}} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{i}{2K_L R} \right) \frac{(-1)^n \cdot \Gamma(n+1/2)}{2\pi \cdot (\cos(\frac{\varphi - \varphi_L}{2}))^{2n+1}} + \\
 & + A_T \cdot \frac{\exp(iK_T R + \pi/4)}{\sqrt{2\pi R}} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{i}{2K_T R} \right) \frac{(-1)^n \cdot \Gamma(n+1/2)}{2\pi \cdot (\cos(\frac{\varphi - \varphi_T}{2}))^{2n+1}}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Якщо виразити значення відбитих амплітуд A_L і A_T через амплітуду падаючої хвилі $U_{\text{ПР}}$, використовуючи для цього відомі формули для відповідних коефіцієнтів відбиття від площини [1, 7, 9], то можемо отримати часткову формулу для розрахунку

Скористаємося асимптотичним наближенням функції $F(\xi)$ [6]:

$$F(\xi) = \chi(\xi) - i \frac{\exp(i\xi^2)}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(n+1/2)}{(i\xi^2)^{(n+1/2)}}, \tag{3}$$

тут $\Gamma(n+1/2)$ - гамма функція,

$$\chi(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi > 0 \\ 0, & \xi < 0 \end{cases} \tag{4}$$

Таким чином можемо записати вираз:

$$\begin{aligned}
 U = & U_{\text{ПР}} \chi(\xi) + U_L \chi(\xi_L) + U_T \chi(\xi_T) - \\
 & - (U_{\text{ПР}} \cdot i \frac{\exp(i\xi_{\text{ПР}}^2)}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(n+1/2)}{(i\xi_{\text{ПР}}^2)^{(n+1/2)}} + \\
 & + U_L \cdot i \frac{\exp(i\xi_L^2)}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(n+1/2)}{(i\xi_L^2)^{(n+1/2)}} + \\
 & + U_T \cdot i \frac{\exp(i\xi_T^2)}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(n+1/2)}{(i\xi_T^2)^{(n+1/2)}}).
 \end{aligned} \tag{5}$$

Розривна функція $\chi(\xi)$ враховує геометрооптичну складову хвильового поля, яку в явному вигляді можна виразити так:

$U_{\text{диф}}(\varphi)$. Залишивши старший член в асимптотичному розкладанні інтеграла Френеля, можна спростити (9) для інженерних кількісних оцінок:

$$U_{\text{диф}}(\varphi) = A_{\text{ПР}} \cdot \frac{\exp(iKR + \pi/4)}{2\sqrt{2\pi KR} \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_0}{2})} +$$

$$+ A_L \cdot \frac{\exp(iK_L R + \pi/4)}{2\sqrt{2\pi K_L R} \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_L}{2})} + \quad (10)$$

$$+ A_T \cdot \frac{\exp(iK_T R + \pi/4)}{2\sqrt{2\pi K_T R} \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_T}{2})}$$

Запишемо останній вираз в явному вигляді для двох можливих випадків падіння УЗ хвилі на розріз. При падінні поздовжньої хвилі з амплітудою A_{PP} утворюються додатково трансформовані хвилі - поздовжня і поперечна і відповідно цим геометрооптичним складовим утворюються дифраговані хвилі, амплітуди яких ми будемо означати відповідно A_{LL} і A_{LT} . При падінні на розріз поперечної хвилі точно

$$A_{LL} = A_L \cdot \frac{\exp(iK_L R + \pi/4)}{2\sqrt{2\pi K_L R} \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_0}{2})} +$$

$$+ A_L \cdot \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi_T + \pi/2) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_T + \pi/2) - \operatorname{tg}(\varphi_L - \pi/2)}{\operatorname{tg}^2(2(\varphi_T + \pi/2)) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_T + \pi/2) + \operatorname{tg}(\varphi_L + \pi/2)} \cdot \frac{\exp(iK_L R + \pi/4)}{2\sqrt{2\pi K_L R} \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_L}{2})}, \quad (11)$$

$$A_{LT} = A_L \cdot \frac{2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_T + \pi/2) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_L + \pi/2)}{\operatorname{tg}^2(2(\varphi_T + \pi/2)) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_T + \pi/2) + \operatorname{tg}(\varphi_L + \pi/2)} \cdot \frac{\exp(iK_T R + \pi/4)}{2\sqrt{2\pi K_T R} \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_T}{2})}. \quad (12)$$

2. Падіння хвилі зрушення

$$A_{TT} = A_T \cdot \frac{\exp(iK_T R + \pi/4)}{2\sqrt{2\pi K_T R} \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_0}{2})} +$$

$$+ A_T \cdot \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi_T + \pi/2) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_T + \pi/2) - \operatorname{tg}(\varphi_L - \pi/2)}{\operatorname{tg}^2(2(\varphi_T + \pi/2)) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_T + \pi/2) + \operatorname{tg}(\varphi_L + \pi/2)} \cdot \frac{\exp(iK_T R + \pi/4)}{2\sqrt{2\pi K_T R} \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_T}{2})}, \quad (13)$$

$$A_{TL} = A_T \cdot \frac{2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_T + \pi/2) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_L + \pi/2)}{\operatorname{tg}^2(2(\varphi_T + \pi/2)) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_T + \pi/2) + \operatorname{tg}(\varphi_L + \pi/2)} \cdot \frac{\exp(iK_L R + \pi/4)}{2\sqrt{2\pi K_L R} \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_L}{2})}. \quad (14)$$

Відповідно отриманим виразам і прийнятим позначенням введемо коефіцієнти дифракції на розрізі $D_{LL}, D_{LT}, D_{TT}, D_{TL}$ тобто

$$A_{LL} = A_L D_{LL}, \quad A_{LT} = A_L D_{LT},$$

$$A_{TT} = A_T D_{TT}, \quad A_{TL} = A_T D_{TL}.$$

Отримані вирази для крайових хвиль нерівномірні. Вони перестають мати математичний сенс на межах світло тінь. У цьому випадку це є наслідком заміни строгого рішення його асимптотикою - променевим розкладанням. При більш строгому рішенні задачі вирази для крайових хвиль повинні забезпечувати безперервність полів на межах світло - тінь. Цей недолік не є істотним для практики УЗ контролю, оскільки техніка прийому УЗ полів не дозволяє розрізнити геометрооптичну хвилю від дифрагованої в кутовій області світло - тінь.

Як впливає з отриманих виразів, амплітуда крайових хвиль в \sqrt{K} разів менша, ніж амплітуда породжуючих їх первинного УЗ поля. Це досить важлива обставина, яка буде впливати істотним чином на технологічні умови проведення УЗ контролю.

так само утворюються дві дифраговані хвилі, амплітуди яких ми позначимо A_{TL} (поздовжня) і A_{TT} (поперечна). Оскільки в подальшому викладі ми будемо розглядати конкретні варіанти, то для більшої ясності формальних записів будемо замінювати раніше використані позначення A_{PP} на A_L при падінні поздовжньої хвилі і на A_T у разі падіння поперечної. Послідовно запишемо всі вирази для амплітуд дифрагованих хвиль на розрізі, використовуючи асимптотичний вираз (10) формулу, (9) і зауваження до неї

1. Падіння хвилі стиснення.

Сильне ослаблення, природно, буде створювати труднощі у виділенні дифрагованих хвиль і їх аналізі, що вимагає спеціальних технічних рішень в програмно-апаратному пристрої дефектоскопу.

На рис. 3 приведений приклад графічного звіставлення результатів чисельного аналізу викладеної моделі (умовно - ГТД) і моделі роботи [4] (умовно будемо називати- Маує), чисельно виконаної в роботі [5].

Більш обширне порівняння цих моделей дозволяє зробити наступний висновок. Для ПЕП, розташованих по різні сторони від розрізу, різниця в обчислюваннях по різних моделях не перевищує 10 дб. Якщо використовуються суміщені схеми контролю, то відмінність в результатах може досягати 25-30 дб.

Як резюме відмітимо, що відмінність в результатах розрахунків пояснюється, насамперед, зробленими спрощеннями. Розглянута тут модель (ГТД) не враховує умов на розрізі (наявність напружень, стан поверхні і інш.), не враховує виникнення поверхневих хвиль. Відмітимо, що реальна тріщина має зна-

чні відмінності від ідеального розрізу. Якщо досліджувана тріщина, наприклад, має шорстку поверхню, що порушує закон відбиття для рівної поверхні і що затруднює виникнення поверхневих хвиль, то приведена тут модель дозволяє процес адаптації, при розумінні основних фізичних процесів дифракції. У протилежність цьому, моделі робіт [2...5] практично неможливо використати, оскільки, по суті, потрібно вирішити нову крайову задачу математич-

ної фізики. При цьому складністю є вже формалізація шорсткості поверхні. Тому вибір моделі, що використовується повинен вибиратися виходячи з конкретної задачі і параметрів об'єкта контролю. У загальному випадку застосування апарату ГТД більш виправдане, оскільки він носить прикладний характер і досить добре розвинений, що дозволяє застосовувати теорію ГТД в інженерній практиці.

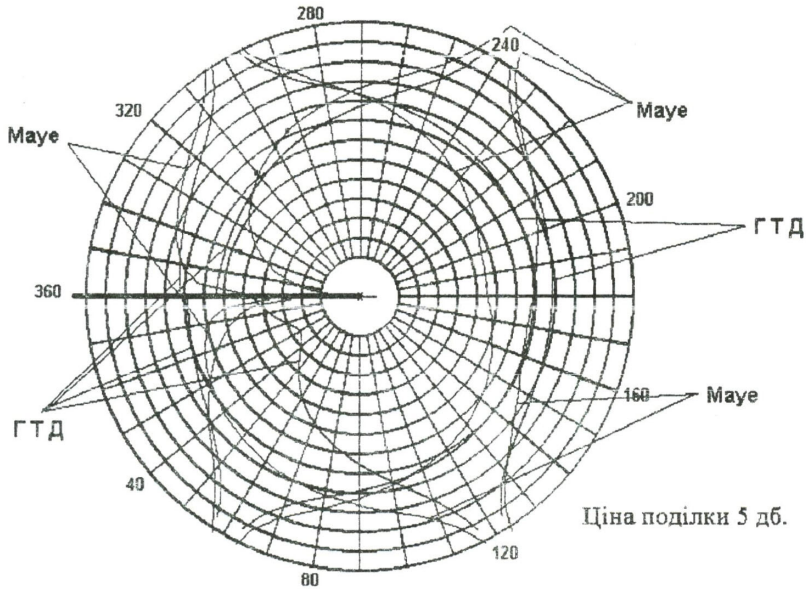


Рис. 3. Порівняння результатів розрахунку для двох моделей дифракції плоскої хвилі на напівнескінченному розрізі. Приведені два випадки залежності амплітуди дифрагованої позовжньої хвилі від кута спостереження при падінні позовжньої під кутами 60° і 120°.

Ультразвуковий тракт дефектоскопа

На основі отриманих раніше кількісних характеристик дифрагованої хвилі на розрізі, що імітує тріщиноподібні несущільності, можна виразити ультразвуковий тракт дефектоскопа для тріщиноподібних несущільностей.

У загальному вигляді формула акустичного тракту записується як

$$A(x, y) = A_0(r) D_1 \Phi_1 D_{диф} \Phi_2 D_2, \quad (15)$$

де $A(x, y)$ - амплітуда прийнятої дифрагованої хвилі, $A_0(r)$ - амплітуда звукової хвилі на акустичній осі випромінюючого ПЕП, r - відстань між ПЕП і вершиною тріщини, x, y - координати джерела дифрагованої хвилі, D_1 - коефіцієнт прозорості межі випромінюючий ПЕП - середовище, Φ_1 - діаграма спрямованості випромінюючого ПЕП, $D_{диф}$ - коефіцієнт дифракції (згідно з типом падаючої хвилі), Φ_2 - діаграма спрямованості приймаючого ПЕП, D_2 - коефіцієнт прозорості межі середовище - ви-

промінюючий ПЕП. Значення D_1, D_2 визначаються формулами [10] згідно з типами падаючих і хвиль, що пройшли через межу розділу:

$$D_{LL} = \frac{2Z_1}{\Delta \cos \theta_2} \cos 2\varphi_1 \cdot \cos 2\varphi_2,$$

$$D_{LT} = \frac{2Z_1}{\Delta \cos \varphi_2} \cos 2\varphi_1 \cdot \sin 2\varphi_2,$$

$$D_{TL} = \frac{2w_1}{\Delta \cos \theta_2} \sin 2\varphi_1 \cdot \cos 2\varphi_2,$$

$$D_{TT} = \frac{2w_1}{\Delta \cos \varphi_2} \sin 2\varphi_1 \cdot \sin 2\varphi_2,$$

$$\Delta = \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cos^2 2\varphi_1 + \frac{w_1}{\cos \varphi_1} \sin^2 2\varphi_1$$

$$+ \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \cos^2 2\varphi_2 + \frac{w_2}{\cos \varphi_2} \sin^2 2\varphi_2,$$

$$Z_1 = \rho_1 C_{1L}, \quad Z_2 = \rho_2 C_{2L},$$

$$w_1 = \rho_1 C_{1T}, \quad w_2 = \rho_2 C_{2T},$$

де $D_{LL}, D_{LT}, D_{TL}, D_{TT}$ - коефіцієнти прозорості межі розділу двох твердих тіл, що являють собою відношення амплітуд зміщень заломленої і падаючої хвиль, як і раніше, перший індекс в позначенні вказує на тип падаючої хвилі, а другої за типом заломленої хвилі (індекс L - відноситься до поздовжньої хвилі, T - до поперечної), Z_1, Z_2 - питомі акустичні опори першого і другого середовища для поздовжніх хвиль, w_1, w_2 - питомі акустичні опори першого і другого середовища для поперечних хвиль, θ_1, φ_1 - кути падіння і відображення відповідно поздовжніх і поперечних хвиль в першому середовищі, θ_2, φ_2 - кути падіння і відображення відповідно поздовжніх і поперечних хвиль у другій середі, ρ_1, ρ_2 - густина першого і другого середовища, C_{1L}, C_{2L} - швидкість поздовжніх хвиль в першому і другому середовищі, C_{1T}, C_{2T} - швидкість поперечних хвиль в першому і другому середовищі.

Дифрагована хвиля з точки зору її прийому ПЕП нічим не відрізняється від практики прийому «звичайних» УЗ хвиль. По своїй суті це хвилі напруження (в твердому тілі). Тому всі розрахункові схеми діаграм спрямованості повністю застосовні для випадку, що розглядається. Конкретні вирази діаграм спрямованості поля випромінювання - прийому були отримані різними дослідниками і загалом мають хороший рівень наближення до експериментальних результатів. Тут використовувався вираз, отриманий в роботі [8].

Для приведеної на рис. 4 схеми розрахунку УЗ тракту і згідно з позначеннями на ній виконаємо необхідні перетворення, щоб отримати вирази для УЗ тракту в явному вигляді для поздовжніх хвиль.

$$D_1 = \frac{2Z_{H1}}{A_1 \cos \theta_{H2}} \cos 2\varphi_{H1} \cdot \cos 2\varphi_{H2},$$

$$D_2 = \frac{2Z_{H1}}{A_2 \cos \theta_{H2}} \cos 2\varphi_{H1} \cdot \cos 2\varphi_{H2},$$

$$\Delta_1 = \frac{Z_{H1}}{\cos \theta_{H1}} \cos^2 2\varphi_{H1} + \frac{w_{H1}}{\cos \varphi_{H1}} \sin^2 2\varphi_{H1} +$$

$$+ \frac{Z_{H2}}{\cos \theta_{H2}} \cos^2 2\varphi_{H2} + \frac{w_{H2}}{\cos \varphi_{H2}} \sin^2 2\varphi_{H2},$$

$$\Delta_2 = \frac{Z_{H1}}{\cos \theta_{H1}} \cos^2 2\varphi_{H1} + \frac{w_{H1}}{\cos \varphi_{H1}} \sin^2 2\varphi_{H1} +$$

$$+ \frac{Z_{H2}}{\cos \theta_{H2}} \cos^2 2\varphi_{H2} + \frac{w_{H2}}{\cos \varphi_{H2}} \sin^2 2\varphi_{H2},$$

$$Z_{H1} = \rho_{OK} C_{ЛОК}, Z_{H2} = \rho_{OK} C_{ЛОК}, Z_{H2} = \rho_{ПР2} C_{ЛПР2},$$

$$w_{H1} = \rho_{ПР1} C_{ТПР1}, w_{H2} = \rho_{OK} C_{ТОК}, w_{H1} = \rho_{OK} C_{ТОК},$$

$$w_{H2} = \rho_{ПР2} C_{ТПР2},$$

$$\frac{\sin \theta_{H1}}{C_{ЛПР1}} = \frac{\sin \varphi_{H1}}{C_{ТПР1}} = \frac{\sin \theta_{H2}}{C_{ЛОК}} = \frac{\sin \varphi_{H2}}{C_{ТОК}},$$

$$\frac{\sin \theta_{H1}}{C_{ЛОК}} = \frac{\sin \varphi_{H1}}{C_{ТОК}} = \frac{\sin \theta_{H2}}{C_{ЛПР2}},$$

де $\rho_{ПР1}$ - густина матеріалу призми ПЕП 1, $\rho_{ПР2}$ - густина матеріалу призми ПЕП 2, ρ_{OK} - густина матеріалу середовища об'єкта контролю, $C_{ЛПР1}, C_{ЛПР2}, C_{ТПР1}, C_{ТПР2}$ - швидкість поздовжніх і поперечних УЗ хвиль в матеріалах призм відповідно для ПЕП 1 і ПЕП 2, $C_{ЛОК}, C_{ТОК}$ - швидкість поздовжніх і поперечних УЗ хвиль в матеріалі об'єкта контролю, θ_{H1}, θ_{H2} - кути призм для ПЕП 1 і ПЕП 2 відповідно.

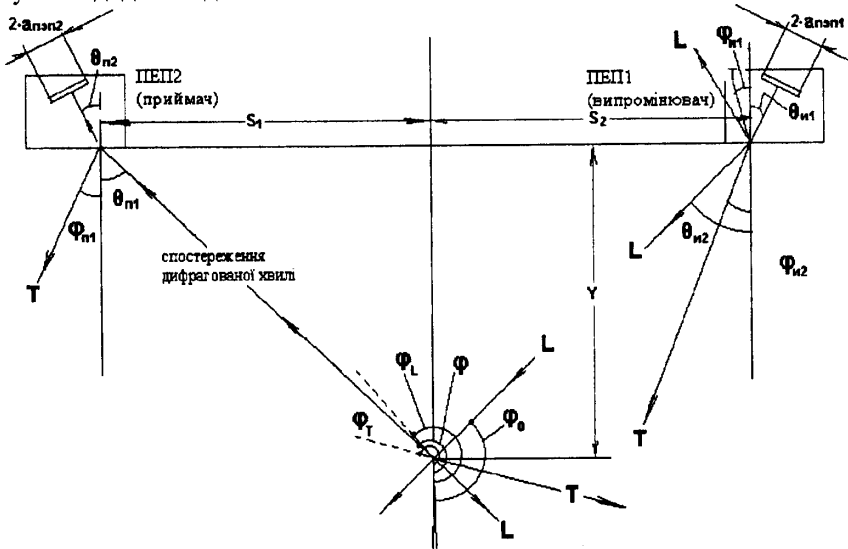


Рис. 4. Схема з умовними позначеннями для розрахунку ультразвукового тракту дефектоскопу.

Для $D_{диф}$ використовуємо конкретний вираз (11) (є окремим випадком (10)), яке ми будемо використовувати для визначення залежностей у виразі ультразвукового тракту

$$D_{диф} = \frac{\exp(iK_L R + \pi/4)}{2\sqrt{2\pi K_L R \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_0}{2})}} + \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi_T + \pi/2) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_T + \pi/2) - \operatorname{tg}(\varphi_L - \pi/2)}{\operatorname{tg}^2(2(\varphi_T + \pi/2)) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_T + \pi/2) + \operatorname{tg}(\varphi_L + \pi/2)} \cdot \frac{\exp(iK_L R + \pi/4)}{2\sqrt{2\pi K_L R \cdot \cos(\frac{\varphi - \varphi_L}{2})}},$$

де $\varphi_0 = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg}(\frac{Y}{S_1})$, $\varphi_L = 2\pi - \varphi_0$, $\varphi_T = \varphi_L - \frac{C_{ТОК}}{C_{ЛОК}} \sin(\frac{\pi}{2} - \varphi_0)$, $R = \sqrt{S_1^2 + Y^2}$.

Вираз для діаграм спрямованості ПЕП 1 і ПЕП 2 згідно з прийнятими позначеннями можна записати так:

$$\Phi_1(\pi - \varphi_0) = \frac{\sin[K_L \cdot a_{2ПЭП1}(\sin \theta_{Н2} - \sin(\pi - \varphi_0)) \cdot \cos^{-1} \theta_{Н1}]}{K_L \cdot a_{2ПЭП1}(\sin \theta_{Н2} - \sin(\pi - \varphi_0)) \cdot \cos^{-1} \theta_{Н1}},$$

$$\Phi_2(\varphi - \pi) = \frac{\sin[K_L \cdot a_{2ПЭП2}(\sin \theta_{П1} - \sin(\varphi - \pi)) \cdot \cos^{-1} \theta_{П2}]}{K_L \cdot a_{2ПЭП2}(\sin \theta_{П1} - \sin(\varphi - \pi)) \cdot \cos^{-1} \theta_{П2}}.$$

Амплітуду УЗ поля на осі ПЕП 1 виразимо кількісною залежністю [1, стор. 89]:

$$A_0 = 2 \sin\left(\frac{K_L}{2} \left(\sqrt{(a_{2ПЭП1})^2 + (S_1^2 + Y^2)} - \sqrt{S_1^2 + Y^2}\right)\right).$$

Таким чином, всі приведені вирази записані в явній формі і можуть бути розраховані для конкретних параметрів ПЕП і їх розташування відносно розрізу. Аналогічно можна сконструювати УЗ тракти для всіх випадків падіння і трансформацій, згідно рис. 4.

Досліджуємо чисельно залежність амплітуди дифрагованої хвилі для симетричного розташування ПЕП відносно розрізу при умові, що край розрізу знаходиться точно на перетині акустичних осей ПЕП. При такому розташуванні ПЕП амплітуда дифрагованої хвилі буде знаходитися біля свого максимального значення. Відмітимо, що перетин акустичних осей випромінюючого і приймального ПЕП на вершині тріщини ще не означає досягнення максимального значення при заданій базі між ПЕП. Насправді воно дещо зміщено. Для звичайної технологічної практики це зміщення не є істотним і його можна не брати до уваги. Тут дослідження цієї залежності не приводиться внаслідок малозначимості отриманого результату. На якісному рівні такий результат пояснюється досить гострою діаграмою спрямованості реальних ПЕП. Тому прагнення прийти до цього розташування в процесі проведення вимірювань є природним. При проведенні розрахунків будемо виходити з традиційної технологічної практики проведення УЗ контролю: застосовуються п'єзоелектричні перетворювачі з призмами, виконаними з оргскла. Матеріал об'єкта контролю - звичайна конструкційна сталь. Затухання в оргсклі призми і в матеріалі об'єкта контролю не враховуємо, оскільки ці характеристики є специфічними константами конкретного матеріалу і не відображають

найбільш загальну практику УЗК.

На рис. 5 приведені результати розрахунку амплітуди дифрагованої хвилі в розглянутій моделі УЗ тракту.

На рис. 6 і рис. 7 приведені результати розрахунку амплітуди дифрагованої хвилі в розглянутій моделі УЗ тракту при різних частотах і діаметрах ПЕП.

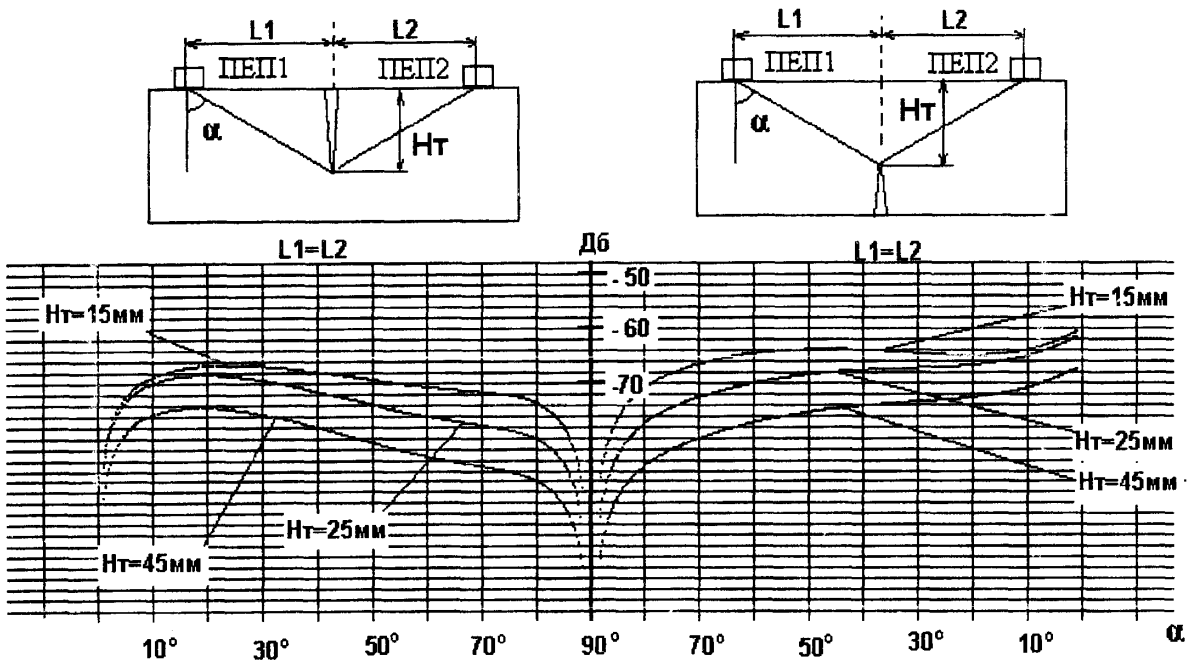
Співставлення результатів розрахунків, що проводяться за різними моделями подане на рис. 8.

Більш обширна зміна параметрів УЗ тракту не виявила яких-небудь помітних особливостей в залежностях амплітуди дифрагованої хвилі в порівнянні з приведеними на рис. 5 ... рис. 8.

Кінцевою метою розрахунку УЗ тракту є знаходження найбільш оптимальних параметрів технологічних схем УЗ контролю для досягнення максимальної амплітуди дифрагованої хвилі. З цієї точки зору найбільш загальним висновком може бути рекомендація використати ПЕП з кутами вводу $60^\circ - 70^\circ$ для досягнення найбільших амплітуд дифрагованих хвиль. Такий висновок не є оптимальним з точки зору досягнення найбільшої точності вимірювань геометричних розмірів тріщин, що проводяться. Тому загальний підхід до контролю дифрагованими хвилями можна розбити, принаймні, на дві стадії:

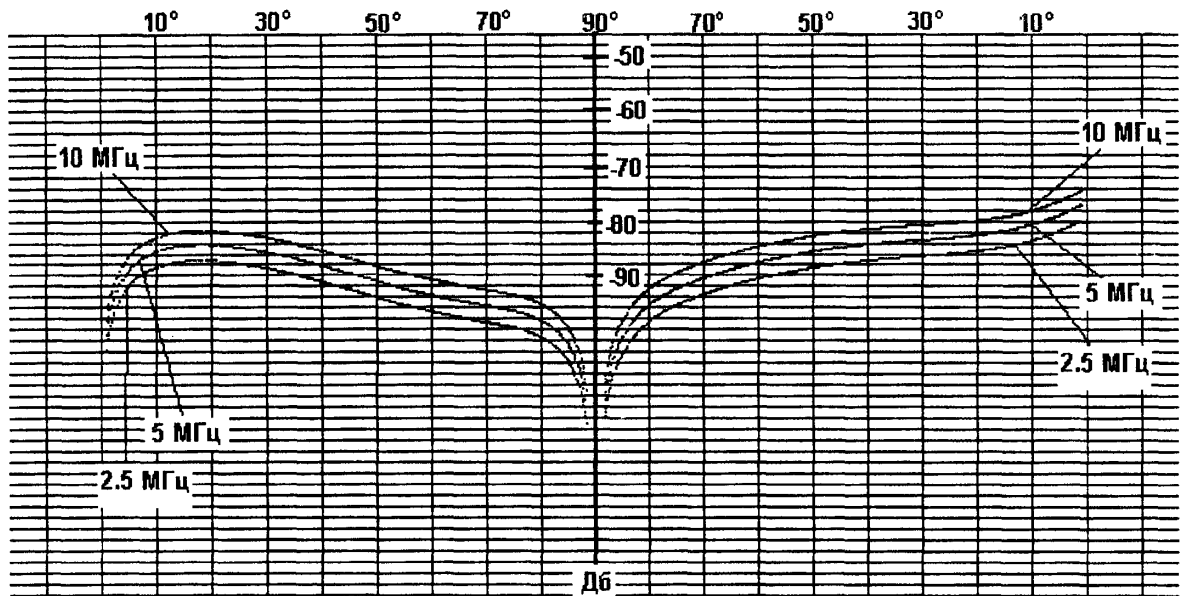
- 1) пошук дефектів,
- 2) визначення їх геометричних розмірів.

При такому підході в кожному конкретному випадку можна запропонувати найбільш оптимальні схематичні рішення.



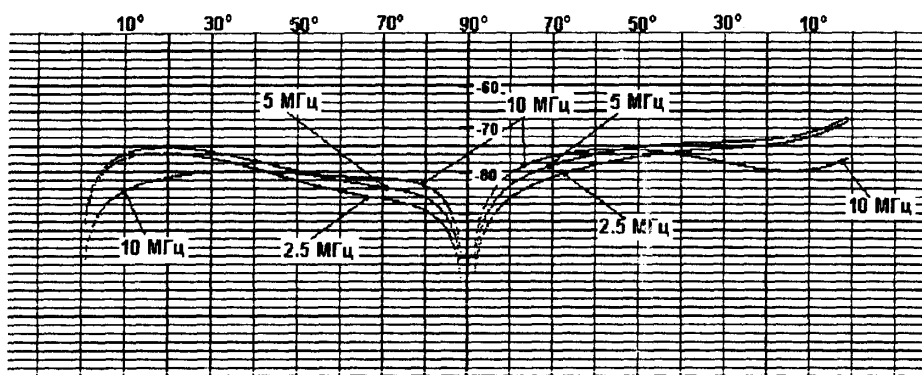
Ціна поділки - 2 дб. Діаметр п'єзоелементів ПЕП 10 мм. Частота ПЕП 5 МГц.

Рис. 5. Графічне представлення амплітуди дифрагованої хвилі для розглянутої розрахункової моделі УЗ тракту. Діаметр п'єзоелемента (випромінюючого і приймального) рівний 10 мм.



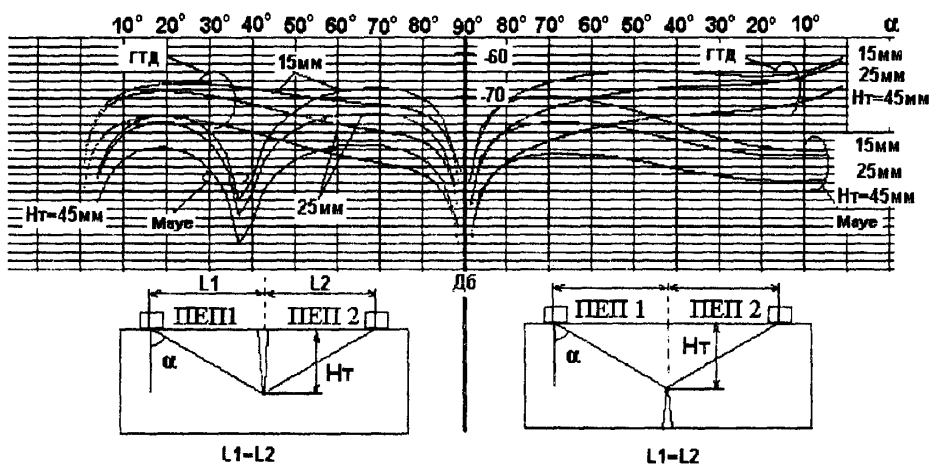
Діаметр ПЕП 10 мм.
 $H_t=100\text{ мм}$

Рис. 6. Графічне представлення амплітуди дифрагованої хвилі для різних частот ПЕП.



Діаметр ПЕП 20 мм.
Hт=100 мм.

Рис. 7. Графічне представлення амплітуди дифрагованої хвилі для різних частот ПЕП.



Ціна поділки - 2 дБ

Діаметр п'єзоелементів ПЕП 10 мм. Частота ПЕП - 5 МГц.

Рис. 8. Порівняння результатів розрахунку амплітуд дифрагованих хвиль для різних моделей (ГТД і Маус).

1. Ультразвуковой контроль материалов: Справочное издание Й. Крауткремер, Г. Крауткремер; Перевод с немецкого - М: Металлургия, 1991.
2. Филиппов А.Ф. Некоторые задачи дифракции плоских упругих волн Прикладная математика и механика. 1956, т. XX С. 688-703.
3. Фридман М. М. Дифракция плоской упругой волны относительно полубесконечного прямолинейного разреза, свободного от напряжений. ДАН СССР, 1949, т. 66, № 1 С. 21-24. 4. Маус А.В. Die Beugung elastischer Wellen an der Halbebene. Zeitschrift fur angewandte Mathematik und Mechanik, 1953, Bd. 33, Heft 1/2, P. 1-10. 5. Давыдов Е. А. Асимптотическое определение дифрагированных волн на полубесконечном

разрезах при ультразвуковом контроле. Техническая диагностика и неразрушающий контроль. №4, 1999, С. 12-19. 6. Боровиков В. А., Кинбер Б. Е. Геометрическая теория дифракции. М: Связь, 1978. 7. Дианов Д. В. Исследование направленности призматических преобразователей. Дефектоскопия № 2, 1965, С. 8-22. 8. Гребенник В. С., Тайц М. З., Расчёт направленности призматического искателя., Дефектоскопия № 1, 1981, С. 87-101. 9. Кайно Г. Акустические волны: Устройства визуализации и аналоговая обработка сигналов: Перевод с англ. - М: Мир, 1990. 10. Дианов Д. В. Труды семинара по физике и применению ультразвука. ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), 1958.