

УДК 620.179

**УЛЬТРАЗВУКОВА ДЕФЕКТОСКОПІЯ РІЗЕВИХ З'ЄДНАНЬ  
ОБВАЖНЕНИХ БУРИЛЬНИХ ТРУБ В ЗІБРАНІМУ СТАНІ**

© Криничний П. Я., Карнаш О. М., Кійко Л. М., 2000  
Науково-виробнича фірма "Зонд", м. Івано-Франківськ

**Описані способи ультразвукового контролю зібраних замкових з'єднань елементів бурильної колони. Наведені залежності для визначення основних параметрів способу контролю, в якому конструктивні особливості замкового з'єднання використовуються для підвищення достовірності отриманих результатів.**

При розробці та експлуатації нафтових і газових родовищ використовуються трубні колони, елементи яких з'єднуються між собою за допомогою різі. Однією з найпоширеніших є замкова різь, яка призначена для згвинчування з'єднувальних елементів та обважнених бурильних труб (ОБТ) колони. Вона, на відмінну від інших різей, піддається активному зношуванню внаслідок постійного згвинчування й розгвинчування елементів бурильної колони під час спуско-підіймальних операцій. Зміна геометрії спряжених елементів призводить до зниження міцності і герметичності – згвинчене з'єднання втрачає здатність належним чином протидіяти впливу експлуатаційних навантажень. Наслідком цього є втома металу, яка й провокує руйнування замкового з'єднання. В більшості випадків замкові з'єднання руйнуються по першому спряженому витку різі ніпеля (на віддалі 24 мм від упорного виступу) і по останньому спряженому витку муфти (на віддалі 10 мм від торця ніпеля) [1]. Переважна більшість (понад 55 %) відмов бурильних колон пов'язана з полумками різевих з'єднань, тому розробка способів їх неруйнівного контролю з метою своєчасного вилучення дефектних з'єднувальних елементів колони є особливо актуальною.

Заходи з неруйнівного контролю повинні вписуватись в загальний технологічний процес проводки свердловини. Оптимальним є їх поєднання зі спуско-підіймальними операціями. Але якщо для з'єднувальних елементів колони такий підхід є цілком прийнятним, то для обважнених бурильних труб проведення дефектоскопії ускладнюється їх великою вагою та небезпекою, що виникає під час розгвинчування з'єднань безпосередньо над гирлом свердловини. Існуюча методика контролю різі ОБТ ультразвуковим луно-імпульсним методом з торця за допомогою прямих п'єзоперетворювачів зі спеціально підібраною діаграмою спрямованості є досить недосконалою і небезпечною. До того ж під час спуско-підіймальних операцій не всі замкові з'єднання бурильної колони підлягають розгвинчуванню. В

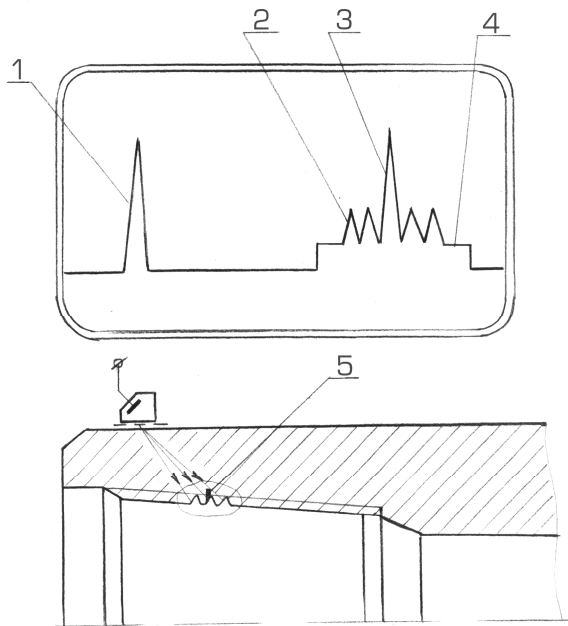
зв'язку з цим постала задача здійснення дефектоскопії замкових з'єднань без їх попереднього розгвинчування.

Складність вирішення цієї задачі обумовлена конструктивними особливостями замкових з'єднань: великими товщинами стінок ніпеля та муфти і, відповідно, значною глибиною залягання дефектів; наявністю значної висоти упорного виступу в ніпельній частині тощо.

Контроль різі муфтової частини не викликає особливих проблем – його можна здійснити за допомогою одного похилого п'єзоперетворювача, встановленого на зовнішній поверхні муфти так, щоб УЗК випромінювались в напрямку меншої основи конуса різі (рис. 1). Кут призми п'єзоперетворювача визначається з умови нормального падіння центрального променя пучка УЗК на бокову сторону профілю витка різі [2]. При відсутності дефекту на екрані дефектоскопа спостерігається характерна "гребінка" луно-імпульсів, відбитих від різі, які "переливаються" під час переміщення п'єзоперетворювача вздовж осі муфти. При появі дефекту на фоні гребінки з'являється відбитий від нього луно-імпульс 3. Отже дефектоскопія замкової різі муфтової частини може проводитись як при згвинченому, так і при розгвинченому з'єднанні елементів.

Контроль різі ніпельної частини, як уже зазначалось, здійснювався виключно після розгвинчування замкового з'єднання. Для вирішення задачі контролю ніпельної частини зібраного замкового з'єднання були опрацьовані теоретично й апробовані експериментально декілька способів.

1. Спосіб контролю головними хвилями за допомогою суміщеного призматичного перетворювача з використанням луно-методу, який базується на тому, що позадвожня хвиля УЗК, спрямована вздовж вільної поверхні тіла труби, спричиняє появу головної хвилі. Головна хвиля поширюється на границі з поверхнею труби і швидко затухає з глибиною. Встановлено, що амплітуда головної хвилі  $A$



1 – зонduючий імпульс, 2 – луно-імпульси, відбиті від витків різі (“гребінка”); 3 – луно-імпульс від дефекту; 4 – строб-імпульс зони АСД; 5 – дефект  
Рис. 1. Дефектоскопія муфтової частини замкового з’єднання.

зменшується за степеневою залежністю  $A = R^{-3/2}$  ( $R$  – радіус) і тому відстань її поширення  $\approx 300$  мм. Оптимальним кутом збудження й приймання головних хвиль є перший критичний кут, який визначається із закону Снелліуса [3]:

$$\beta_{1кр} = \arcsin \frac{C_{11}}{C_{12}} = \arcsin \frac{2670}{5847} = 27,17^\circ, \quad (1)$$

де  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  – відповідно швидкості поширення поздовжніх хвиль в матеріалі призми перетворювача (оргскло,  $C_{11}=2650$  м/с) та в матеріалі контрольованої труби (сталь,  $C_{12}=5847$  м/с).

Процес контролю за цим способом полягає в тому, що короткі імпульси ультразвукових коливань, збудженні в п’єзоперетворювачі, посиляються з зовнішньої поверхні ніпельної частини з’єднання в напрямку від більшої до меншої основи конуса різьової частини. Після відбиття від дефекту луно-імпульс приймається тим же перетворювачем, підсилюється й індидується на екрані дефектоскопа. Недоліком способу є відсутність додаткових, так званих опорних, сигналів сталої величини, порівняння яких з луно-імпульсами від дефекту дало б можливість локалізувати місце розташування дефекту та оцінити розміри.

2. Спосіб контролю поперечними хвилями за допомогою сумішеного призматичного перетворювача з використанням луно-методу, який за схемою реалізації принципово не відрізняється від попере-

днього. Здійснення дефектоскопії з’єднання “ніпель – муфта” цим способом значно підвищує інформативність контролю за рахунок більш повного використання ультразвукового поля пучка УЗК по всьому перерізу його діаграми спрямованості. Оскільки поле пучка УЗК в дальній зоні приймає форму зрізаного конуса, половина кута розходження якого визначається як

$$\varphi_p = \arcsin 0.61 \frac{C}{af}, \quad (2)$$

де  $C$  – швидкість УЗК в матеріалі труби,  $a$  – радіус п’єзопластини перетворювача,  $f$  – частота УЗК, то виявлення дефектів в різьбовій частині ніпеля, кут нахилу якого складає (в залежності від конусності різі) приблизно  $5^\circ$  або  $7^\circ$ , може здійснюватись центральним променем пучка. При цьому крайні бокові промені використовуються для отримання базових луно-імпульсів від упорного виступу та від торця. Співставлення між собою всіх трьох луно-імпульсів (від упорного виступу, від дефекту та від торця) дозволяє судити про місце розташування й розміри виявленого дефекту. Результати розрахунків показали, що для реалізації цього способу (на частоті 2.5 МГц при радіусі п’єзоелемента 9 мм) кут призми п’єзоперетворювача повинен становити  $53^\circ$  (при конусності 1:4) або  $54^\circ$  (при конусності 1:6). Суттєвим недоліком способу є його невисока чутливість, обумовлена розсіюванням хвиль внаслідок багатократного відбиття в метали.

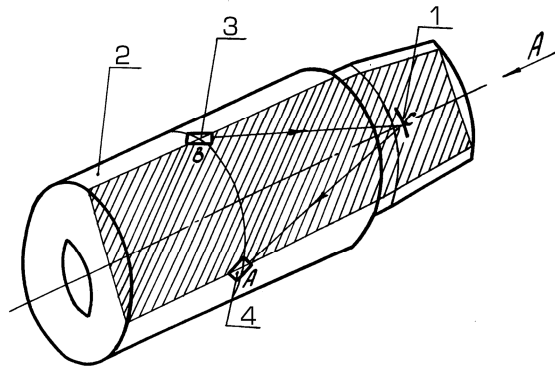
3. Спосіб контролю поперечними хвилями за допомогою двох роздільних призматичних п’єзоперетворювачів з використанням луно-дзеркального методу, який реалізується тому, що певним чином орієнтовані п’єзоперетворювачі, які встановлені на зовнішній поверхні ніпельної частини з’єднання, синхронно переміщують по гвинтовій лінії з кроком, який дорівнює кроку різі, в напрямку до упорного виступу.

Для реалізації даного способу акустичні осі п’єзоперетворювачів повинні лежати в одній площині, паралельній поздовжній осі труби, і перетинатись в точці, розташованій в площині очікуваного дефекту (рис. 2). Ця умова виконується тільки при певних кутах вводу УЗК і при деякій фіксованій віддалі між точками їх вводу, причому обидва параметри залежать від типорозміру з’єднання.

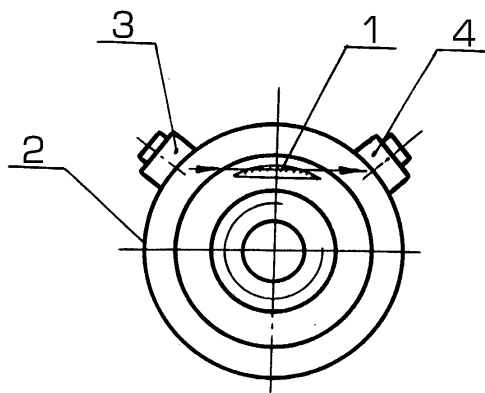
Для визначення кута падіння ультразвукових коливань на поверхню труби  $\alpha$  здійснимо необхідні геометричні побудови (рис. 3), які мають місце при реалізації запропонованого способу. Показані на рис. 3 позначення відповідають наступному:

$$BC = L, \quad (3)$$

де  $L$  – віддаль від лінії, що з’єднує точки вводу та приймання УЗК, до площини розташування дефекту,



Вид А



1 - дефект; 2 - труба, що піддається контролю; 3, 4 - відповідно випромінюючий та приймаючий п'єзоперетворювачі

Рис. 2. Схема реалізації способу контролю замкових з'єднань двома перетворювачами.

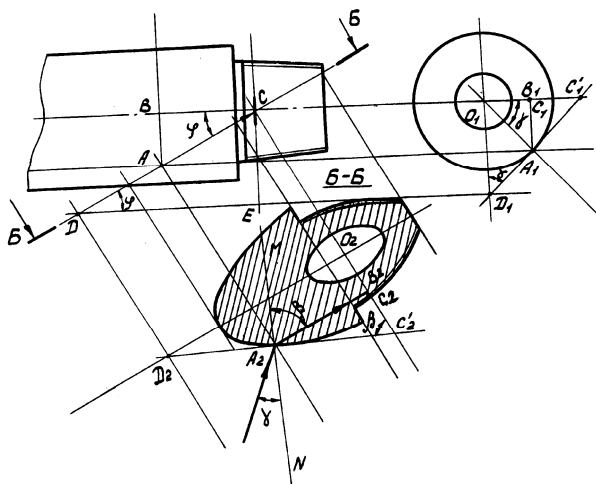


Рис. 3. Графічні побудови для визначення параметрів способу контролю.

$$O_1B_1 = R - H, \quad (4)$$

де  $R$  - радіус труби,

$$R = A_1O_1, \quad (5)$$

$H$  - глибина залягання дефекту в різевій частині відносно зовнішньої поверхні гладкої ніпельної частини труби;  $A, A_1, A_2$  - точки вводу ультразвукових коливань в різних проекціях контрольованої ділянки труби;  $MN$  - нормаль, проведена до дотичної  $D_2C_2$  в точці вводу  $A_2$ ;  $\gamma$  - кут між нормаллю до дефекту в точці  $C$  та напрямком поширення падаючого центрального променя УЗК, які лежать в площині, що паралельна поздовжній осі труби і проходить через дефект. Під таким же кутом  $\gamma$  в цій площині має місце відбиття ультразвукових коливань від дефекту в точці  $C$ , які поширюються в напрямку приймаючого п'єзоперетворювача (на рис. 2 не показаний).

Згідно з законом заломлення хвиль УЗК на границі розподілу двох середовищ кут падіння  $\alpha$  визначаємо за рівнянням Снелліуса:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{C_1}{C_2} \sin \beta\right), \quad (6)$$

де  $C_1, C_2$  - відповідно швидкості розповсюдження УЗК в першому та другому середовищах.

Використовуючи тригонометричні залежності, знаходимо кут заломлення ультразвукових коливань  $\beta$  в стінці труби таким чином:

$$D_2O_2 / O_2C_2 = \operatorname{tg} \beta. \quad (7)$$

Визначаємо складову  $O_2C_2$ :

$$O_2C_2 = O_1C_1. \quad (8)$$

З прямокутного трикутника  $A_1C_1O_1$  маємо, що:

$$O_1C_1 = O_1A_1 / \cos \gamma = R / \cos \gamma. \quad (9)$$

Значення  $\cos \gamma$  через відомі параметри труби визначаємо з прямокутного трикутника  $A_1B_1O_1$  як

$$\cos \gamma = O_1B_1 / O_1A_1 = (R - H) / R. \quad (10)$$

Підставляючи (10) у вираз (9), знаходимо, що

$$O_2C_2 = R^2 / (R - H). \quad (11)$$

Визначаємо складову  $D_2O_2$

$$D_2O_2 = DC. \quad (12)$$

З прямокутного трикутника  $DCE$  записуємо, що:

$$DC = CE / \sin \varphi, \quad (13)$$

де

$$CE = O_1D_1. \quad (14)$$

В свою чергу  $O_1D_1$  може бути визначене як

$$O_1D_1 = A_1O_1 = R / \sin \gamma. \quad (15)$$

Значення  $\sin \gamma$  також може бути визначене через відомі параметри труби з прямокутного трикутника  $A_1B_1O_1$ , тобто

$$\begin{aligned} \sin \gamma &= A_1 B_1 / A_1 O_1 = A_1 B_1 / R = \\ &= \sqrt{A_1 O_1^2 - O_1 B_1^2} / R = \sqrt{R^2 - (R-H)^2} / R. \end{aligned} \quad (16)$$

Підставляючи у (15) замість  $\sin \gamma$  його вираз згідно (16), знаходимо, що:

$$CE = O_1 D_1 = R^2 / \sqrt{R^2 - (R-H)^2}. \quad (17)$$

Значення  $\sin \varphi$  на основі параметрів труби визначається так:

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= AB / BC = \\ &= \sqrt{R^2 - (R-H)^2} / \sqrt{L^2 - R^2 - (R-H)^2}, \end{aligned} \quad (18)$$

де

$$AB = A_1 B_1 = \sqrt{R^2 - (R-H)^2}, \quad (19)$$

$$AC = \sqrt{L^2 + AB^2} = \sqrt{L^2 + R^2 - (R-H)^2}. \quad (20)$$

Після підстановки (17) та (18) у вираз (13) знаходимо складову  $D_2 O_2$ :

$$D_2 O_2 = DC = \frac{R^2 \sqrt{L^2 - R^2 - (R-H)^2}}{R - (R-H)^2}. \quad (21)$$

Підставляючи (9) та (21) у вираз (7), отримаємо, що:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= D_2 O_2 / O_2 C_2 = \frac{R^2 \sqrt{L^2 + R^2 - (R-H)^2}}{R^2 - (R-H)^2} \cdot \frac{R-H}{R^2} = \\ &= \frac{(R-H) \sqrt{L^2 + R^2 - (R-H)^2}}{R^2 - (R-H)^2}, \end{aligned} \quad (22)$$

Звідки отримаємо таку формулу для визначення кута заломлення  $\beta$ :

$$\beta = \arctg \left[ \frac{(R-H) \sqrt{L^2 + R^2 - (R-H)^2}}{R^2 - (R-H)^2} \right]. \quad (23)$$

Після підстановки (23) у (6) вираз для визначення кута падіння  $\alpha$  буде таким:

$$\alpha = \arcsin \left\{ \frac{C_1}{C_2} \sin \left[ \arctg \frac{(R-H) \sqrt{L^2 + R^2 - (R-H)^2}}{R^2 - (R-H)^2} \right] \right\}, \quad (24)$$

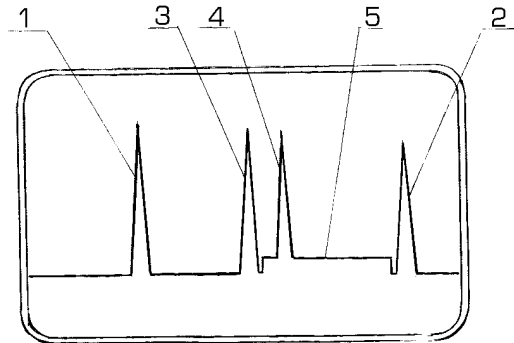
де  $C_1$  - швидкість поширення поздовжніх хвиль ультразвукових коливань в матеріалі призми похилого п'єзоперетворювача;  $C_2$  - швидкість поширення поперечних хвиль ультразвукових коливань в матеріалі контрольованої труби;  $R$  - радіус контрольованої труби;  $H$  - глибина залягання дефекту в різевій ділянці ОБТ відносно зовнішньої поверхні гладкої ніпельної частини труби;  $L$  - віддаль від лінії, що з'єднує точки вводу та приймання УЗК, до площини розташування дефекту.

Відстань  $l$  між випромінюючим та приймаючим перетворювачами вибирають із співвідношення

$$l = 2L \operatorname{tg} \varphi, \quad (25)$$

де  $\varphi$  - кут падіння центрального пучка променю УЗК на поверхню очікуваного дефекту.

При досягненні умов згідно (24) та (26) має місце нормальне падіння центрального променю пучка УЗК на площину дефекту (рис. 2), що забезпечує найкраще їх відбиття і, відповідно, максимальну амплітуду луно-імпульсу 4 (рис. 4). Підвищення якості контролю сприяє використанню опорних сигналів 2, 3. При їх одночасній наявності можна судити про стабільність акустичного контакту між п'єзоперетворювачами та об'єктом контролю. Співвідношення амплітуд луно-імпульсів 2, 3, 4 дозволяє визначити місце розташування та оцінити розміри дефекту.



1 – зондуєчий імпульс; 2, 3 – відповідно луно-імпульси від торця та від упорного виступу; 4 – луно-імпульс від дефекту; 5 – строб-імпульс  
Рис. 4. Зображення на екрані дефектоскопа під час контролю ніпельної частини замкового з'єднання в зібраному стані.

1. Щербюк Н. Д., Якубовский Н. В. Резьбовые соединения труб и забойных двигателей. – М.: Недра, 1974. 2. Звіт про науково-дослідну роботу по темі № 25/93 "Розробка, виготовлення та впровадження експериментального зразка установки для дефектоскопії різьбових з'єднань ОБТ в зібраному стані та замкових різьб елементів бурильної колони", УДК 620.179.16/162.001.89\*622.24.053.8, № держреєстрації 0193U032811, кер. теми - П. Я. Криничний, Науково-виробнича фірма "Зонд", 1993. 3. Алешин Н. П., Щербинский В. Г. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий. – М.: Высш. школа, 1991. – 271 с. 4. Пат. України № 4039 "Спосіб ультразвукового контролю конічних різьбових з'єднань з упорними виступами". Автори - О. М. Карпаш, Я. М. Зінчак, П. Я. Криничний, І. Г. Мігаль, Я. М. Бажалук, Л. М. Кійко, патентовласник - НВФ "Зонд".