УДК 622.691.4.002.5

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ НА РЕМОНТНИХ ДІЛЯНКАХ

М. М. Семеген, З. П. Лютак

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (8-03422)4-60-77

На основі законів акустопружності та теорії акустики запропонований підхід до визначення величини напружень в стінках трубопроводів. Визначена залежність між швидкістю поширення ультразвукової хвилі та величиною напружень в стінці трубопроводу. На основі отриманих залежностей та результатів, враховуючи визначені напруження в стінці трубопроводу, можна давати рекомендацію відносно проведення відновлюваних робіт на ремонтних ділянках, при цьому забезпечивши цілісність конструкції трубопроводу.

На основе законов акустопружности и теории акустики предложен подход к определению величины напряжений в стенках трубопроводов. Определена зависимость между скоростью распространения ультразвуковой волны и величиной напряжений в стенке трубопровода. На основе полученных зависимостей и результатов, учитывая определенные напряжения в стенке трубопровода, можно давать рекомендацию относительно проведения восстановительных работ на ремонтных участках, при этом обеспечив целостность конструкции трубопровода.

On the basis of theories of both acoustoelasticity and acoustics offered approach of determination of size of tensions in the walls of pipelines. Certain dependences are obtained between velocity of ultrasonic wave propagation and stress value in the wall of pipeline. On the basis of both the obtained dependences and results, it is possible to give recommendations how to repair arrears of pipeline taking into account stress in the wall of pipeline and providing integrity of pipeline.

Задача створення системних пристроїв і методик, які б стали невід'ємною частиною технологічних систем при обробці та визначенні даних напружено-деформованого стану трубопроводів на ремонтних ділянках, є актуальною. Це особливо важливо для нафтогазопроводів і трубопровідних систем на їх небезпечних ділянках, відмова яких може привести до забруднення навколишнього середовища, а також до аварій з важкими наслідками.

Відомі методи ультразвукового контролю напружено-деформованого стану трубопроводів, які були розроблені науковцями Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу [1, 2]. У вказаних роботах розроблені методи визначення величини сумарних напружень у стінках трубопроводів в залежності від часу або швидкості поширення поперечних ультразвукових хвиль та групової швидкості поширення нульових та перших мод пластинчатих хвиль.

На практиці, зокрема при виконанні ремонтних робіт на ділянках підземної частини трубопроводів, крім величини сумарного напруження в стінках трубопроводів необхідно знати та враховувати ще й величини головних векторів напружень, за якими можна визначати причини та напрям дії зусиль, що діють на трубопровід, та своєчасно реагувати на них для запобігання аварійних ситуацій. При цьому є можливість визначення звільнення від ґрунту оптимальної довжини ремонтної ділянки трубопроводу, що суттєво впливає на продуктивність проведення ремонтних робіт.

Деформація трубопроводу, яка виникає внаслідок впливу зовнішніх або внутрішніх навантажень чи будь-яких факторів впливу, пов'язана зі встановленням залежностей між розміщенням кожної елементарної частинки суцільного середовища в деформованому та в початковому станах.

Основне допущення механіки суцільного середовища в тому, що мінімальний із розглядуваних елементів володіє тими ж властивостями, що і тіло, яке складається з великої кількості таких елементів [3].

При деформації металу стінки трубопроводу відстань між його точками змінюється (рис. 1).

Розглянемо лінійний елемент металу стінки трубопроводу в декартовій системі координат, який має довжину *dl* в початковому стані. Позначимо початкові координати будь-якої елементарної частинки цього елементу $M^{поч}$ через x_i та відповідно її координати в деформованому стані $M^{деф}$ через x_i^*, де i=1, 2, 3. Нехай m_i - одиничний вектор напрямку руху частинки в початковому стані з координатами $x_i + \partial x_i$, а m_i^* - з координатами $x_i^* + \partial x_i^*$ в деформованому стані.

Для будь-якого проміжку часу $x_i^* = x_i^*\left(x_j^*\right)$, де j=1, 2, 3. Зв'язок між координатами елементарної частинки у деформованому середовищі $M^{деф}$ та недеформованому $M^{поч}$ покажемо у вигляді [4]:

$$D = \frac{\partial M^{деф}}{\partial M^{поч}} = \frac{\partial x_i^*}{\partial x_i} \ . \qquad (1)$$

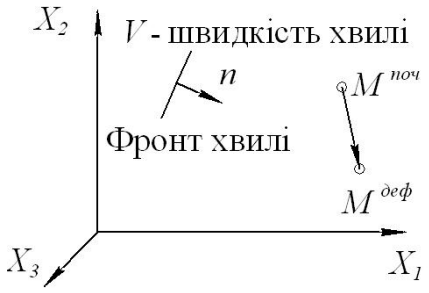


Рисунок 1 - Схема поширення ультразвукової хвилі в деформованому середовищі

Для опису явища акустопружності застосуємо підхід Лагранжа [4]. Виразимо квадрат довжини лінійного елементу деформованого середовища через тензор деформації Лагранжа $E_{ij}^{деф}$. Даний тензор визначає зв'язок довжини цього елементу в деформованому стані dl^* з довжиною в початковому стані:

$$\frac{\left(dl^*\right)^2 - \left(dl\right)^2}{\left(dl\right)^2} = 2E_{ij}^{деф} m_i m_i^* \ . \qquad (2)$$

З іншого боку, при поширенні ультразвукових коливань в пружному середовищі, вони створюють свої деформації елементарної частинки в цьому середовищі, які можна описати тензором деформацій Лагранжа так [4]:

$$E_{ij}^{хв} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial x_i^*}{\partial x_i}\frac{\partial x_i^*}{\partial x_j} - \delta_{ij}\right), \qquad (3)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера.

Тоді тензор деформацій середовища E_{ij} при поширенні ультразвукових коливань в деформованому середовищі буде мати вигляд:

$$E_{ij} = E_{ij}^{хв} + E_{ij}^{деф} \ . \qquad (4)$$

Тобто, якщо в будь-якій точці відомі незалежні компоненти симетричного тензору другого порядку E_{ij}, то дійсна довжина елементу, який проходить через цю точку, може бути виражена через початкову довжину цього елементу і його початкову орієнтацію.

Враховуючи те, що при деформації маса залишається постійною, рівняння руху елементарної частинки в пружному середовищі буде таким [5]:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j^*} + \rho F_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \ , \qquad (5)$$

де σ_{ij} – тензор напружень; ρ – густина деформованого середовища; F_i – зусилля, що діє на елементарну частинку; u_i – пружне зміщення частинки; t – час.

Вважаємо, що ультразвукові коливання поширюються за гармонійним законом:

$$u_i = U_i \cdot \exp\left(jk\left(n_m x_m - vt\right)\right) \ , \qquad (6)$$

де U_i – амплітуда хвилі, $j = \sqrt{-1}$, k – хвильове число, v – швидкість поширення ультразвукової хвилі, n_m – вектор напрямку поширення хвилі.

Виразимо зв'язок тензора напружень із тензором деформацій Лагранжа [5]:

$$\sigma_{ij} = \frac{S_{ij}}{D}\left(2E_{ij} + \delta_{ij}\right), \qquad (7)$$

де S_{ij} - тензор Піоли-Кірхгофа [5].

За допомогою виразу (7) можна описати напруження, які виникають в середовищі при його деформуванні та внаслідок поширення в ньому ультразвукових коливань.

З іншого боку, зусилля F_i, що діє на елемент площі ds, нормаль до якої має направляючі косинуси n_i, можна виразити через тензор напружень, які ним створюються [7]:

$$F_i = \sigma_{ij} n_i ds . \qquad (8)$$

Підставляючи вираз (8) та (7) в (5), рівняння руху елементарної частинки з врахуванням [6] прийме вигляд:

$$\left(K_{ijkm} n_i n_m + \left(\sigma_{ij} n_i n_m \quad \rho v^2\right)\delta_{ij}\right)U_i = 0 \ , \qquad (9)$$

де K_{ijkm} – тензор коефіцієнтів пружної деформації четвертого порядку, що є функцією від коефіцієнтів Ляме та Мурнагана.

На основі (9) можна зробити висновок, що явище акустопружності є складним для безпосереднього застосування на практиці. Складність полягає у визначенні окремих компонент тензору четвертого порядку K_{ijkm}. При використанні поздовжньої хвилі у визначенні напружень тензор K_{ijkm} в порівнянні з використанням поперечної хвилі буде мати простішу форму. Це пов'язано з фізичним процесом поляризації коливань елементарного об'єму пружного середовища при поширенні ультразвукових хвиль.

Аналіз (9) проводився в напрямку спрощення обчислення коефіцієнтів K_{ijkm} (лінеаризація залежностей між напруженнями та деформаціями, використовуючи функцію енергії деформації виражену в рядах Тейлора [5]). В результаті отримано рівняння акустопружності для проведення контролю напружено-деформованого стану металу стінки трубопроводу [6]:

$$\left.\frac{\Delta v_{вим}}{v_0}\right|_{\perp ij} = A_i \sigma_{ii} + A_j \sigma_{jj} \ , \qquad (10)$$

де $\Delta v_{вим}$ – виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в напружено-деформованому середовищі; v_0 – швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в ненапруженому середовищі; A_i – акустопружні коефіцієнти, які визначаються експериментально для конкретної марки сталі методом розтягу за допомогою розривної машини; i, j = 1, 2, 3 – індекси координатних осей.

Рівняння (10) може бути застосоване до визначення акустопружності в довільному напрямку поширення ультразвукової хвилі. Для визначення напружень у трьох взаємно перпендикулярних напрямках застосуємо теорію тензорного числення до (10). Отримаємо:

$$\begin{aligned}
&\left.\frac{\Delta v_{вим}}{v_0}\right|_{\perp xz} = A_x \sigma_{xx} + A_z \sigma_{zz}, \\
&\left.\frac{\Delta v_{вим}}{v_0}\right|_{\angle yx} = 1{,}4142 \ \left(A_x \sigma_{xx} + A_z \sigma_{zz}\right), \\
&\left.\frac{\Delta v_{вим}}{v_0}\right|_{\angle yz} = 1{,}4142 \ \left(A_x \sigma_{xx} + A_y \sigma_{yy}\right).
\end{aligned} \qquad (11)$$

При виведенні системи рівнянь (11) враховано, що перше рівняння описує поширення ультразвукової хвилі нормально до площини *xz*, два наступні описують поширення хвилі під однаковими кутами до площин *yx* та *yz* (рис. 3).

На рис. 2 показано визначення акусопружних коефіцієнтів A_i в лабораторних умовах, методом навантаження на розтяг взірців за допомогою розривної машини.

Акустопружні коефіцієнти визначаються за формулою [7]:

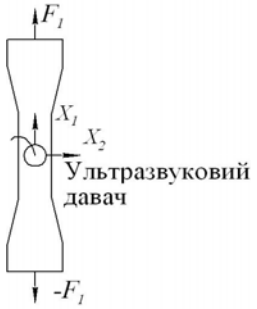
$$A_i = \frac{1}{k \cdot v_0} \sum_{k=1}^{k} \left[\frac{\Delta v_{вим}}{\sigma_{ij}} \right]_k \ , \qquad (12)$$

де k – кількість кроків навантажень, $\Delta v_{вим}$ – виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в середовищі з прикладеним навантаженням.

При визначенні даних коефіцієнтів орієнтація взірців вибирається згідно рис. 3. Для взірців із трубної сталі у випадку 1 визначаються коефіцієнти акустопружності $A_x = A_y$, а у випадку 2 – коефіцієнт акустопружності A_z.

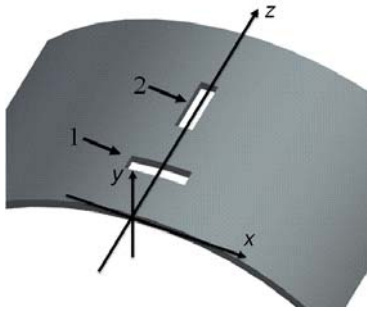
Отже, пропонується метод визначення напружень у трьох взаємноперпендикулярних напрямках, які співпадають з напрямками головних осей ділянки трубопроводу за допомогою системи первинних перетворювачів, які схематично зображено на рис. 4. Дана система первинних перетворювачів складається з п'яти п'єзоелектричних давачів, які встановлені в обоймах, що кріпляться до рами під певними кутами. Дві пари давачів розміщені

у взаємно перпендикулярних площинах, у кожній з яких один давач служить випромінювачем, а другий – приймачем ультразвукових коливань. Один п'єзоперетворювач розміщений у центральній частині системи давачів і встановлений перпендикулярно до досліджуваної поверхні. Таким чином, системою давачів визначається швидкість ультразвукових коливань у трьох площинах, що в свою чергу дає можливість визначати величину напружень відносно трьох осей.



F_i – навантаження; X_i – осі декартових координат

Рисунок 2 - Схема визначення акустопружних коефіцієнтів для трубної сталі



1 – поперечний взірець; 2 – поздовжній взірець

Рисунок 3 - Розміщення взірців на циліндричній поверхні труби

Проведено лабораторні дослідження механічних властивостей трубної сталі Х60 [8]. Для оцінки достовірності результатів досліджень ультразвуковим методом також проводилось визначення напружень теоретичним методом розрахунку напружень, тензометричним методом за допомогою приладу "ИДЦ – 1" та магнітним методом за допомогою приладу "КРМ-Ц-К2М", який вимірює величину коерцитивної сили.

Проведені лабораторні дослідження взірців із металу трубопроводів (сталь Х60, рис. 5), підтвердили теоретичні висновки про залежність швидкості поширення ультразвукової хвилі в металі від його напружень.

З рис. 5 видно, що ультразвуковий метод визначення напружено-деформованого стану металу труб є більш точним у порівнянні з тензометричним та магнітним, так як значення напруження, визначене ультразвуковим методом для сталі Х60, є ближчим до теоретичної кривої, ніж значення, визначене тензометричним методом та магнітним.

Для визначення напружень використано ультразвуковий пристрій, функціональна схема якого показана на рис. 5. На даний пристрій отримано патент на корисну модель [9]. Ультразвуковий пристрій вимірює швидкість поширення ультразвукової хвилі. При цьому використовуючи рівняння (11), визначаються величини напружень ремонтної ділянки трубопроводу. Порівнюючи визначені напруження з допустимим для даного матеріалу, можна робити висновки про подальшу експлуатацію даного трубопроводу.

Для проведення контролю технічного стану ділянки трубопроводу попередньо визначаються місця концентрації напружень (зварювальні з'єднання, місця защемлення і згинів). Проводиться підготовка поверхні до чистоти Rz = 40 мкм для проведення контролю. Первинний давач встановлюється на поверхні труби, проводиться регулювання положень п'єзоелектричних перетворювачів, при цьому для кращого контакту в якості контактної рідини використовується епоксидна смола (рис. 4).

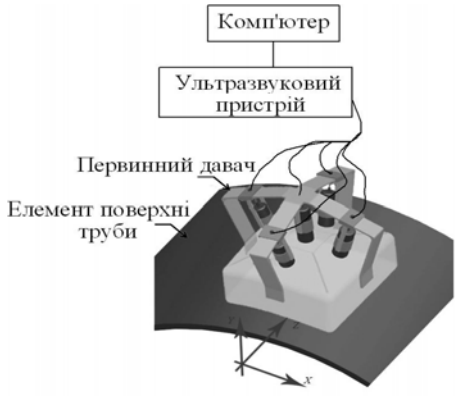


Рисунок 4 - Розміщення системи п'єзоелектричних перетворювачів для контролю напружено-деформованого стану металу стінки трубопроводу

П'єзоелектричні перетворювачі первинного давача з'єднуються з ультразвуковим пристроєм за допомогою коаксіальних кабелів. Пристрій має нормалізований вихід для зв'язку з персональним комп'ютером.

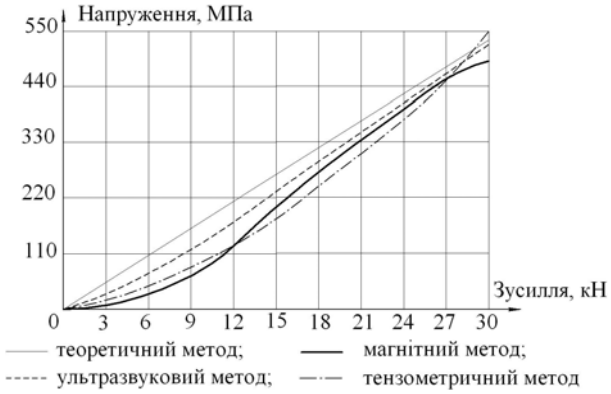
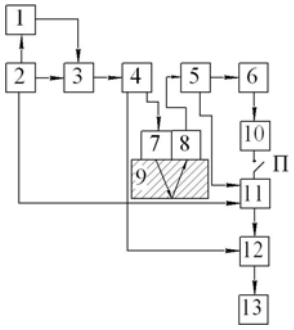


Рисунок 5 - Залежність напружень від прикладеного зусилля, визначена різними методами



1 – схема керування, 2 – генератор синхронізуючих імпульсів, 3 – схема співпадання «і», 4 – генератор зондуючих імпульсів, 5 – підсилювач, 6 – детектор, 7 – випромінююча частина роздільно-суміщеного п'єзоперетворювача, 8 – приймальна частина роздільно-суміщеного п'єзоперетворювача, 9 – об'єкт контролю, 10 – лічильник сигналів, П – переключатель, 11 – схема спів падання, 12 – вимірювач часу поширення ультразвуку, 13 – відеоблок

Рисунок 6 - Функціональна схема ультразвукового пристрою

ВИСНОВОК

В роботі розроблено метод неруйнівного контролю величини окремих компонентів тензору напружень, що дозволяє визначати як перевищення їх допустимих значень в стінках трубопроводу, так і напрям дії деструктивного зусилля. Така інформація є важливою при проведенні ремотних робіт на магістральних нафтогазопроводах для ефективного усунення можливих аварійних ситуацій. Теоретична частина методу містить готові для практичного застосування рівняння акустопружності, коефіцієнти яких визначаються запропонованим в роботі лабораторним дослідженням. Практична реалізація методу містить конструкцію первинного давача та функціональну схему ультразвукового пристрою, що дозволяє контролювати напруження на трубопроводах великого діаметру.

Подальші дослідження спрямовані на удосконалення пристрою та методики проведення неруйнівного контролю.

Література

1. Лютак І. З. Розробка методики та пристрою для контролю технічного стану технологічного обладнання автомобільних газонаповнюючих компресорних станцій: Дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: 05.11.13/ ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ, 2003. – 153 с.

2. Мандра А. А. Акустичний контроль напружено-деформованого стану обв'язки агрегатів газокомпресорних станцій: Дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: 05.11.13/ ІФНТУНГ.- Івано-Франківськ, 2006. – 156 с.

3. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1969. –578 с.

4. Бленд Д. Нелинейная динамическая теория упругости. –М.: Мир, 1972. –184 с.

5. Hamilton M. F., Blackstock D. T. Nonlinear Acoustics // Academic Press, San Diego, 1998.

6. Семеген М. М., Лютак З.П. Акустичний контроль складних ділянок газопроводу в осесиметричному напруженому стані // Наукові вісті. –2007. –№1(11). –с. 152–158.

7. D. J. Jonathon. An acoustoelastic technique using longitudinal waves for the evaluation of residual stresses. – Dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of PhD. – Berkeley. – 1989. – 183 p.

8. ГОСТ1497-84. Металлы. Методы испытания на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 1985. – 111 с.

9. Пат. 32624. G01H 5/00. Пристрій для вимірювання швидкості ультразвуку / Лютак І. З., Семеген М. М., Померенко А. В., Бедзір А. О. – №и200800077, Заявл. 02.01.2008, Опубл. 26.05.2008, Бюл. №10.

Рекомендована до друку Оргкомітетом 5-ої Міжнародної н/т конференції „Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання", яка відбулася в ІФНТУНГ 02–05.12.2008р.