УДК 622.691.3.002.4

М.М. СЕМЕГЕН, З.П. ЛЮТАК
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГАЗОПРОВОДІВ АКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ

На основі законів акустопружності та теорії акустики запропонований підхід до визначення величини напружень в стінках трубопроводів. Проведено лабораторні дослідження механічних властивостей трубної сталі Х60 та встановлено залежність між швидкістю поширення ультразвукових хвиль від величини напружено-деформованого стану зразків виготовлених з даної сталі.

On the basis of theories of both acoustoelasticity and acoustics an approach of determination of size of tensions in the walls of pipeline is offered. The laboratory tests were carried out in order to research the mechanical properties of the X60 steel and certain dependences were obtained between velocity of ultrasonic wave propagation and stress value of the samples made of the above steel.

Ключові слова: ультразвук, напруження, напружено-деформований стан, навантаження, магістральний трубопровід.

Вступ

Газотранспортна система України є важливою складовою частиною соціально-економічного розвитку в державі. Забезпечення надійної експлуатації основної ланки газотранспортної системи – магістральних газопроводів – є важливою науковою та технічною задачею. Це особливо важливо для газопроводів і трубопровідних систем в цілому на їх небезпечних ділянках, відмова яких може призвести до забруднення навколишнього середовища, а також до аварій з важкими наслідками. На сьогоднішній день для газової галузі на перший план виходить завдання забезпечення високої надійності і ефективності роботи вже побудованих трубопроводів. Основним параметром, що визначає експлуатаційні характеристики газопроводу є величина напружень в стінці його труб, що залежать від ряду чинників, наприклад, товщини стінки, величини зусиль тощо. Тому згідно з нормативними документами основної експлуатаційної організації газотранспортної мережі "Укртрансгаз" основним критерієм виходу тієї чи іншої ділянки газопроводу з ладу є граничне значення величини напруження плинності, яке не виходить за межі допустимого значення. В зв'язку з цим все більш актуальною стає задача створення системних пристроїв і методик, які б стали невід'ємною частиною технологічних систем при обробці та визначенні даних напруженого стану трубопроводів на ремонтних ділянках.

Основним напрямком визначення величини напружень в металі стінки трубопроводу, що експлуатується, є неруйнівний контроль. На даний час з метою визначення напружень використовується ряд методів неруйнівного контролю: теоретичний, тензометричний, магнітний, ультразвуковий, проте найбільш перспективним для визначення фактичного значення напружень є ультразвуковий метод. Це викликано рядом об'єктивних та суб'єктивних факторів, що обмежують точність, достовірність та продуктивність використання інших неруйнівних методів для контролю напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів.

Основний розділ

Фізичним параметром, що відповідає величині фактичних напружень в досліджуваному металі є швидкість поширення ультразвукових коливань:

$$\sigma = f(\Delta v), \tag{1}$$

де s – напруження визначене ультразвуковим методом;

Δv – різниця швидкості ультразвукової хвилі в ненапруженому зразку та досліджуваному об'єкті;

f – функція.

Розроблена математична модель визначення напружень при використанні поздовжньої ультразвукової хвилі, що поширюється в деформованому середовищі описана в [1]. Коливання елементарних частинок середовища, які виникли внаслідок поширення даної хвилі, мають дуже малу величину і не створюють вплив на деформацію середовища в цілому. В результаті отримано рівняння акустопружності для проведення контролю напружено-деформованого стану металу стінки трубопроводу в довільному напрямку поширення ультразвукової хвилі [1]:

$$\left.\frac{\Delta v_{вим}}{v_0}\right|_{ij} = A_i\sigma_{ii} + A_j\sigma_{jj}\ , \tag{2}$$

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;

σ_{ii}, σ_{jj} – величина напружень;

A_i, A_j – акустопружні коефіцієнти, які визначаються експериментально для конкретної марки

сталі методом розтягу за допомогою розривної машини [2];

i, j – індекси координатних осей x, y, z .

Акустопружні коефіцієнти визначаються за формулою [2]:

$$A_i = \frac{1}{k \cdot v_0} \sum_{k=1}^{k} \left[\frac{\Delta v_{вим}}{\sigma_{ij}} \right]_k , \qquad (3)$$

де k – кількість кроків навантажень;

$\Delta v_{вим}$ – виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в середовищі з прикладеним навантаженням.

Залежність (2) знайшла своє пряме підтвердження при проведенні лабораторних досліджень механічних властивостей трубної сталі Х60, рис. 1. Дана сталь, виробником якої є фірма «KASHIMA STEEL WORKS» використана для будівництва магістральних газопроводів, які на сьогоднішній день експлуатуються в Україні вже тривалий термін.

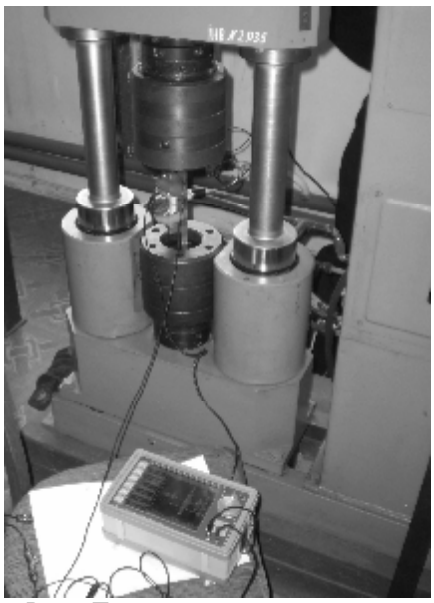

Рис. 1. Проведення експериментальних досліджень

В роботі надані результати лабораторних досліджень залежності швидкості поширення поздовжньої ультразвукової хвилі з частотою коливання 5 МГц від величини напружено-деформованого стану зразків, виготовлених з даної сталі. Також проведено порівняння їх з результатами, які отримані теоретичним, тензометричним і магнітним методами. Для навантаження зразків при проведенні випробування на одноосний розтяг використовувалась стандартна випробувальна машина моделі РМ-50 з допустимим навантаженням 50 т. Заготовки для виготовлення зразків вирізались з частини труби, які орієнтовані вздовж її осі та в напрямку по околу труби. Труба з якої виготовлені зразки не знаходилась під впливом будь-яких навантажень, тобто стан труби не напружений. При виготовленні зразків застосовувались міри, які виключають можливість зміни властивостей металу при нагріванні або наклепі, які можуть виникнути в результаті механічної обробки (охолодження, відповідні режими обробки, глибина різання при останньому проході не повинна перевищувати 0,3 мм) [3]. Тензометричним методом за допомогою мостової схеми вимірювались величини деформацій зразків використовуючи спеціальні фольгові тензодавачі марки КФ5П1. Магнітним методом напруження визначались за допомогою приладу "КРМ-Ц-К2М", який вимірює величину коерцитивної сили під час навантаження зразка. Дефектоскоп УД4-Т використовувався при ультразвуковому контролі, відстань між п'єзоперетворювачами була фіксована та не змінювалась при видовженні зразка під час розтягу. На рис. 2 та рис. 3 показані результати лабораторних досліджень, зміни швидкості ультразвуку від величини напружень, ультразвуковим методом для зразка товщиною 11 мм.

Вимірювання, проведені протягом всього процесу розтягу зразка, призвели до виявлення закономірностей між швидкістю поширення ультразвукових хвиль та величиною напружень, які виникають в зразку.

На рис. 4 показано залежність величини напружень визначених різними методами, які виникають в зразку товщиною 20 мм внаслідок його навантаження. Отримані результати залежності коерцитивної сили від величини напружено-деформованого стану показали значну нелінійність та складність для застосування на практиці. 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 значення напруження плинності, яке наведене в паспорті для даної сталі, ніж значення, визначене тензометричним методом та магнітним, як видно з рис. 4.

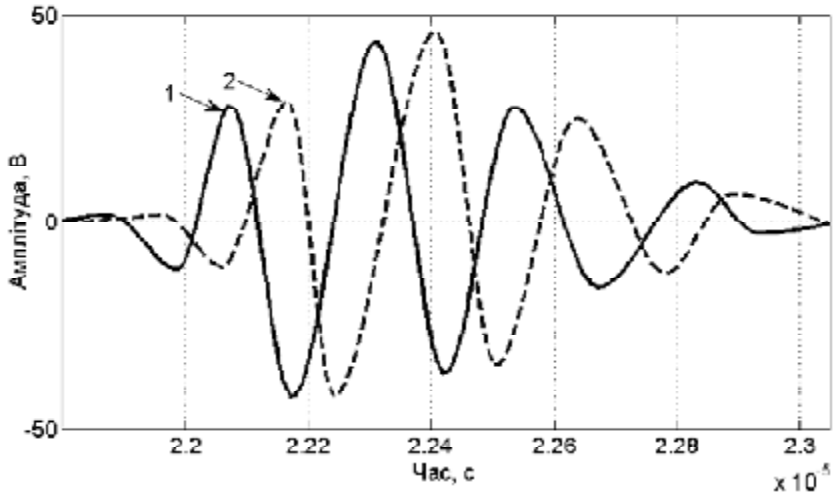

Рис. 2. Зміщення в часі сигналу ультразвукової поздовжньої хвилі від величини напружено-деформованого стану: 1 – напруження в зразку відсутні, 2 – напруження в зразку дорівнюють 376 МПа

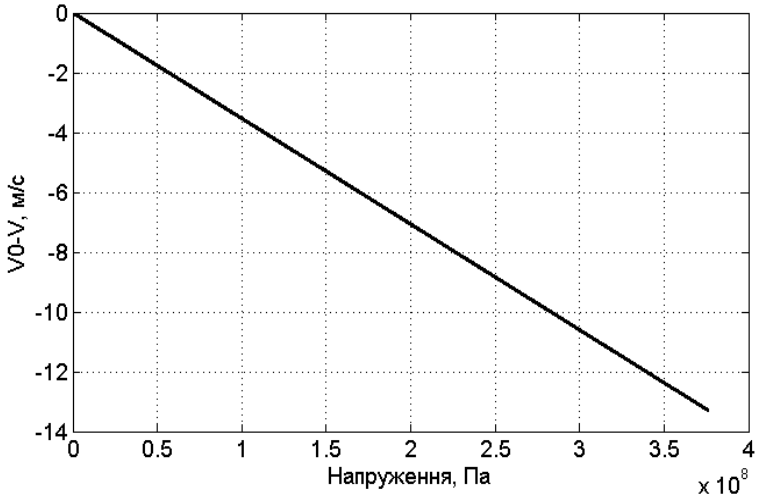

Рис. 3. Зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі від величини напружено-деформованого стану: v_0, v – відповідно швидкість ультразвуку в зразку до та під час збільшення зовнішнього розтягуючого зусилля

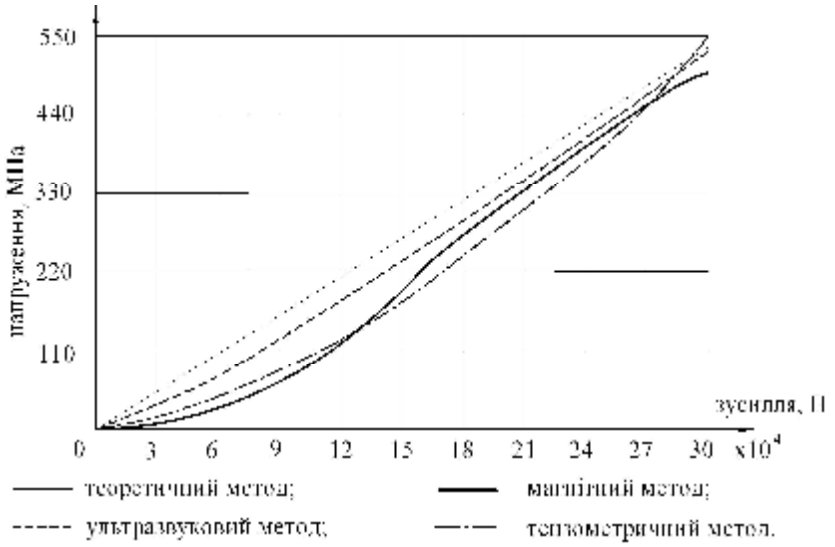

Рис. 4. Залежність величини напружень від прикладеного зусилля, визначених різними методами

Рівняння (2) може бути застосоване до визначення акустопружності в довільному напрямку поширення ультразвукової хвилі. Для визначення напружень у трьох взаємноперпендикулярних напрямках, які співпадають з напрямками головних осей трубопроводу, застосуємо теорію тензорного числення [4] до (2). При виведенні системи рівнянь враховано, що перше рівняння описує поширення ультразвукової хвилі нормально до поверхні трубопроводу, два наступні описують поширення хвилі під однаковими кутами до поверхні трубопроводу відповідно вздовж та в поперек трубопроводу [5]. В результаті отримаємо аналітичну залежність, яка пов'язує величину напружень в середовищі поширення ультразвукових поздовжніх хвиль у трьох напрямках із зміною величини їх швидкості:

$$\left.\frac{\Delta v_{вим}}{v_0}\right|_{xz} = A_x\sigma_{xx} + A_z\sigma_{zz},$$
$$\left.\frac{\Delta v_{вим}}{v_0^*}\right|_{yx} = 1{,}4142\quad (A_{x1}\sigma_{xx} + A_{z1}\sigma_{zz}), \qquad (4)$$
$$\left.\frac{\Delta v_{вим}}{v_0^*}\right|_{yz} = 1{,}4142\quad \left(A_{y2}\sigma_{yy} + A_{z2}\sigma_{zz}\right).$$

де $\Delta v_{вим}$ – виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в середовищі з прикладеним навантаженням у відповідних напрямках;

v_0^*, v_0 – відповідно швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в середовищі в ненапруженому стані у відповідних напрямках.

Нами розроблена конструкція первинного перетворювача для контролю напружень в стінках магістральних трубопроводів у трьох взаємоперпендикулярних напрямках рис. 5, яка реалізує

запропонований метод, а також розраховано його параметри.

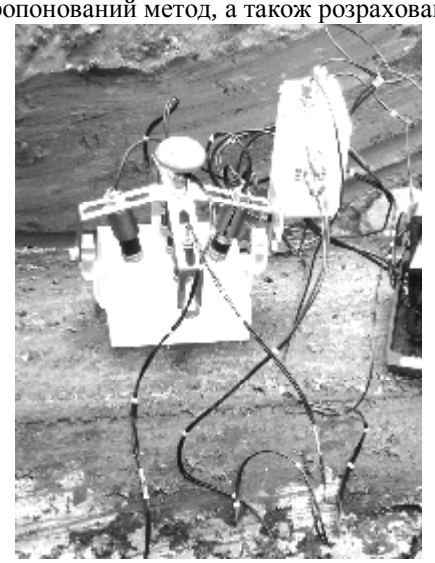

Рис. 5 Конструкція первинного перетворювача

Для визначення напружень запропонованим методом використовується ультразвуковий пристрій, функціональна схема якого показана на рис. 6, в якій використана конструкція первинного перетворювача. На даний пристрій отримано патент на корисну модель [6].

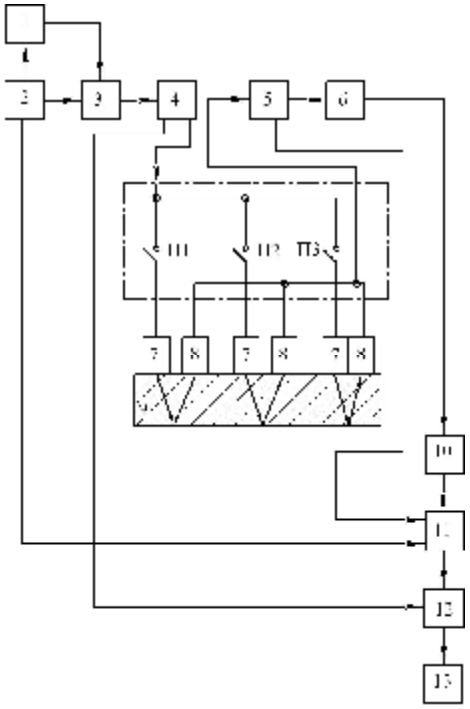

Рис. 6. Функціональна схема ультразвукового пристрою: 1 – схема керування; 2 – генератор синхронізуючих імпульсів; 3 – схема співпадіння «і»; 4 – генератор зондуючих імпульсів; 5 – підсилювач; 6 – детектор; 7 – випромінюючий п'єзоперетворювач; 8 – приймальний п'єзоперетворювач; 9 – об'єкт контролю; 10 – лічильник сигналів; П – перемикач; 11 – схема співпадіння; 12 – вимірювач часу поширення ультразвуку; 13 – відеоблок

Висновки

Експериментальні результати не суперечать теоретичним представленням та даним руйнівного випробування і збігаються із теорією акустопружності [7], показують перспективність використання акустопружного ефекту для контролю величини напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.

Треба зазначити, що дослідження в даному напрямку продовжуються і є перспективи отримання нових цікавих результатів.

Література

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

2. Семеген М. М. Визначення напружено-деформованого стану трубопроводів на ремонтних ділянках / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Методи та прилади контролю якості. – 2008. – № 21. – С. 43-47.

3. Металлы. Методы испытания на растяжение: ГОСТ 1497-84. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 111 с.

4. Димитриенко Ю. И. Тензорное исчисление / ДимитриенкоЮ. И. – М.: Высшая школа, 2001. – 575 с.

5. Семеген М. М. Метод акустичного контролю напруженого стану ремонтних ділянок трубопроводу / М. М. Семеген // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: тези доп. і повідомл. нац. наук. – техн. конф. і виставка, Київ, 9-12 червня 2009 р. – К., 2009. – С. 323-326.

6. Пат. 32624. G01H 5/00. Пристрій для вимірювання швидкості ультразвуку / Лютак І. З., Семеген М. М., Померенко А. В., Бедзір А. О.

7. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах / [А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорот, О. И. Гуща, В. К. Лебедев]. – К.: Наукова думка, 1974. – 108 с.

Надійшла 12.5.2010 р.