

Рис. 2. Залежність критичного тиску руйнування мембран, виготовлених з двох (1-2) різних заготовок сірого чавуну від мінімальної товщини в послаблюючій канавці

1. Тарко Я.Б. Аналіз гідродинамічних методів впливу на привибійну зону пласта // Держ. міжвід. НТЗ „Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ”, вип. 38. - Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2001. - С. 128-133. 2. Результати промислових випробувань технології очищення привибійної зони пластів за допомогою пристрою УОП / Я.Б. Тарко, Р.К. Рапій, М.М. Лилак та ін. // Тези виступів на науково-практичній конференції „Проблеми і перспективи

науково-технічного прогресу АТ „Укрнафта” в умовах ринку” (м. Івано-Франківськ, 27-29 вересня 1995р.). - Івано-Франківськ: „Західний кур’єр”. - 1996. - С. 88. 3. Отливки из серого чугуна с пластинчатым графитом. Общие технические условия. ГОСТ 1412-79. 4. Отливки из чугуна. Методы механических испытаний. ГОСТ 27208-87. 5. Чугун. Упругие свойства. ГСССД 11-80. - М.: Из-во стандартов, 1980. -4 с.

УДК 622.691.4.5

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГАЗОПРОВІДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ЛЕМБА

© Мандра А. А., Лютак З. П., 2004

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Запропоновано новий метод визначення технічного стану газопроводів з використанням ультразвукових хвиль Лемба. Виведено формулу залежності величини напружено-деформованого стану від зміни швидкості ультразвукових хвиль. Проведено моделювання зміни швидкості хвиль Лемба від зміни товщини та представлені результати цього моделювання

Трубопровідний транспорт є однією із найефективніших транспортних галузей із економічної та експлуатаційної точок зору. Підтримування технологічного обладнання цієї галузі на задовільному для їх експлуатації рівні є першочерговим завданням технічного персоналу, включаючи і служби неруйнівного контролю.

Із зростанням питомої ваги трубопроводів в нафто- та газотранспортній галузях України, які експлуатуються понад встановлений термін, зростають вимоги як до кількісної, так і до якісної оцінок технічного стану труб. Основними критеріями оцінки їх технічного стану є допустима товщина стінок труб

та граничне значення величини напружень.

На даний час найбільшого поширення для визначення технічного стану трубопроводів набули ультразвукові методи неруйнівного контролю. Ці методи контролю поділяються на два основні напрямки:

- визначення товщини металу стінок труб,
- визначення напружено-деформованого стану стінок труб.

Для визначення товщини металу стінок труб за допомогою ультразвуку найбільшого поширення набули луно-імпульсний та тіньовий методи контролю (рис. 1), які використовують об’ємні хвилі.

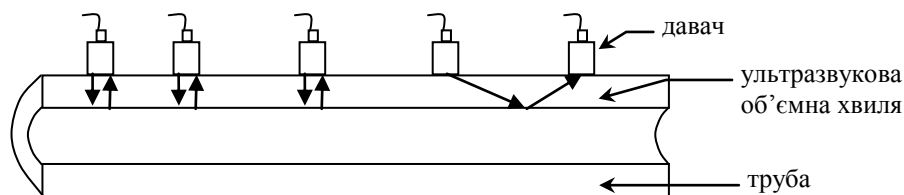


Рис. 1. Ультразвукові методи неруйнівного контролю

Методи, в яких використовуються об'ємні ультразвукові хвилі (луно-імпульсний, тінювий тощо), дозволяють визначити товщину об'єкту контролю локально (в точці вимірювання). Для інтегральної характеристики товщини об'єкту контролю розроблені спеціальні методики, в яких описується послідовність проведення вимірювання, визначається мінімальна та максимальна відстань між точками вимірювання в залежності від геометрії, місцеположення та вибухонебезпечності досліджуваного об'єкту. Для газопроводів існують відмінності контролю товщини металу стінок труби між лінійною частиною магістральних трубопроводів та тими, які експлуатуються на компресорних станціях. Відносно недавно для визначення товщини пружних тіл поча-

ли використовувати хвилі Лемба [1]. Основною особливістю хвиль Лемба є поширення їх вздовж об'єкту контролю на великі відстані, що дозволяє точно визначити мінімальну товщину досліджуваної ділянки, яка знаходиться між генеруючим та приймаючим здавачами (рис. 2).

Основними інформаційними характеристиками хвиль Лемба є їх групова та фазові швидкості, які повинні бути однозначно визначеними для конкретного об'єкту контролю із наперед заданого матеріалу з врахуванням його товщини [2]. Така особливість хвиль Лемба дозволяє однозначно визначати зміну товщини стінки об'єкту контролю з однієї сторони і вимагає розробки математичної моделі для опису їх поширення з іншої сторони.

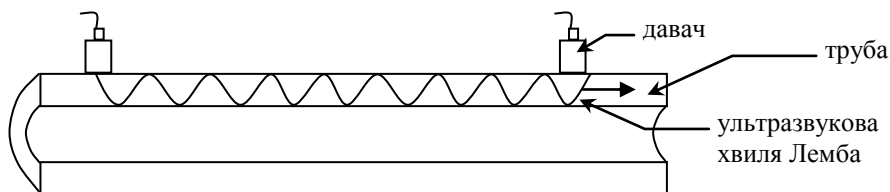


Рис. 2. Застосування хвиль Лемба

Для визначення напружено-деформованого стану на даний час використовують методику, суть якої полягає у визначенні зміни швидкості поширення поперечної об'ємної ультразвукової хвилі [3]. Для визначення напружено-деформованого стану використовується зміна часу проходження поперечної об'ємної ультразвукової хвилі [4]. Визначення зміни швидкості чи часу проходження ультразвуку у вказаних роботах реалізовано луно-імпульсним методом. Вказані методи вимагають визначення пружних констант другого та третього порядку.

Трудності такого методу пов'язані із визначенням пружних констант матеріалу досліджуваних об'єктів. З іншої сторони, використання луно-імпульсного методу дозволяє визначити інформаційні характеристики ультразвукової хвилі лише в точці прикладання давача.

Використання ультразвукових хвиль Лемба для визначення технічного стану газопроводів ставить такі вимоги:

- аналіз матеріалу та геометрії об'єкту контролю,

- розробка рівняння для визначення напружено-деформованого стану за значенням швидкості поширення хвиль Лемба,

- дослідження зміни швидкості хвиль Лемба від зміни геометричних розмірів досліджуваних трубопроводів з метою визначення мінімальної товщини стінки трубопроводу та вибору моди для визначення величини напружень.

Використання будь-якого методу контролю, зокрема, вище запропонованого, вимагає повноти значень їх фізико-механічних характеристик. Це дає можливість обмежитись вузькими рамками досліджень з підвищенням їх продуктивності і отриманням вірогідних результатів. Для будівництва газопроводів використовуються низьколеговані та низько вуглецеві марки сталей, клас міцності яких складає К-34, К-42, К-50, К-52 та К-60 вітчизняного та зарубіжного виробництва. Марками таких сталей згідно вітчизняного позначення є Ст10, Ст20, 17Г1С, 09Г2С, 08ГБЮ та 09ГБЮ. Основні механічні та хімічні характеристики вказаних сталей приведені в [5].

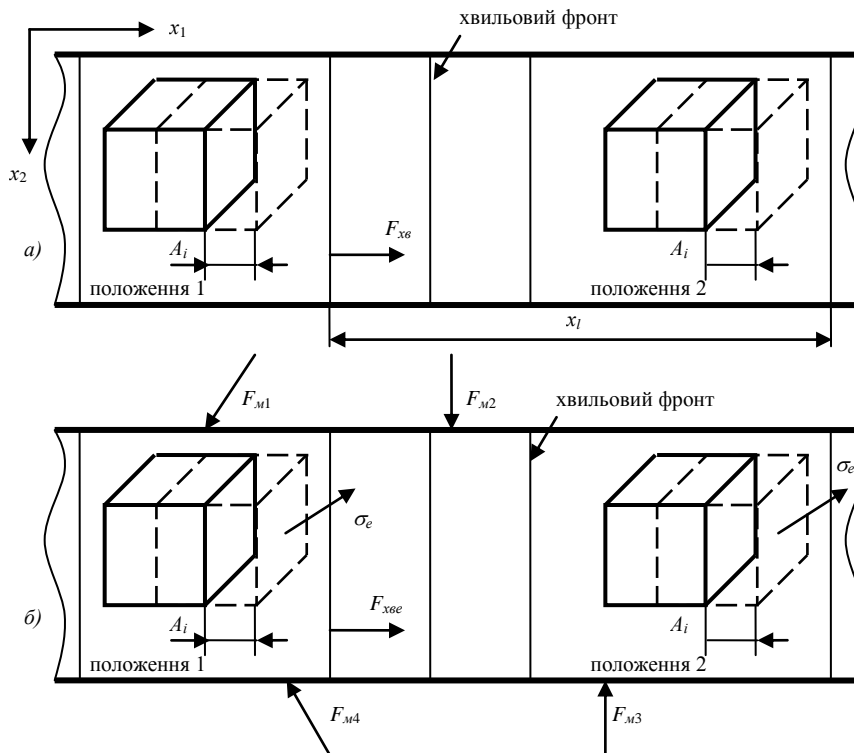
При будівництві компресорних станцій використовуються сталі марок X 52 та X 60. Труби із цієї сталі виготовляються вже протягом кількох десятиліть. За такий тривалий час змінилося багато способів виробництва сталі та труб, які покращували їх хімічні та механічні властивості [6].

Для визначення параметрів ультразвукових хвиль Лемба при їх поширенні в пружному середовищі, яким є трубопровід із прикладеними до нього зовнішніми силами, що створюють в матеріалі труби

напруження σ_m , розглянемо два випадки:

- поширення коливань в деякому одиничному об'ємі пружного тіла без прикладених зовнішніх зусиль (рис. 3а);

- поширення коливань в деякому одиничному об'ємі пружного тіла із прикладеним зовнішнім еквівалентним зусиллям F_m , яке створює еквівалентне напруження σ_m (рис. 3б).



$F_{m1}, F_{m2}, F_{m3}, F_{m4}$ – прикладені зовнішні зусилля довільного напрямку і величини; σ_e – еквівалентне напруження середовища; $F_{xв}, F_{xве}$ – сила, яка рухає хвильовий фронт; A_i – амплітуда коливань

Рис. 3. Поширення коливань в пружному середовищі

Розглянемо перший випадок положення хвильового фронту (без прикладених зовнішніх зусиль).

Хвильовий фронт, який складається із елементарних об'ємів dV пружного середовища, що коливаються, переміщується на відстань x_l . Коливання елементарного об'єму описується законом збереження енергії, де повна коливальна енергія дорівнює сумі потенціальної та кінетичної енергій. З іншого боку, при переміщенні елементарного об'єму на нього, згідно другого закону Ньютона, діє сила

$$F_{xв} = m \cdot a_{xв}, \quad (1)$$

де $a_{xв}$ – прискорення руху хвильового фронту; m – маса елементарного об'єму dV , що коливається.

Виразимо (1) через швидкість поширення хвильового фронту $c_{xв}$:

$$F_{xв} = m \cdot \frac{\partial c_{xв}}{\partial t}. \quad (2)$$

де t – час.

Повна енергія коливань $E_{нов}$, яка складається із потенціальної $E_{ном}$ та кінетичної $E_{кин}$ енергій дорівнюватиме [7]:

$$E_{нов} = E_{ном} + E_{кин} = \frac{m \cdot \omega \cdot A_u^2}{2}, \quad (3)$$

де ω – кутова частота.

Оскільки в ідеально пружному тілі коливальна енергія не виходить за границі розділу середовищ, то в другому положенні (рис. 3а) величина повної коливальної енергії буде незмінною. В такому випадку це означатиме, що всі змінні (3) є постійними, отже

$$m = const, \quad \omega = const, \quad A_u = const. \quad (4)$$

Розглянемо випадок, коли до пружного тіла прикладено зовнішні зусилля.

Енергія коливань залишиться в об'ємі пружного тіла, тому вираз (3) буде мати місце і при наявності зовнішніх зусиль. Таким чином, можна стверджувати, що маса, частота та амплітуда коливань елементарного об'єму пружного середовища при прикладених зовнішніх зусиллях залишаться незмінними.

З іншого боку, вплив зовнішніх зусиль приведе до зміни сили F_{x_0} на величину, що дорівнює еквівалентному значенню сумарних зовнішніх зусиль F_m :

$$F_{x_{0e}} = F_{x_0} + F_m = m \cdot a_{x_0} + m \cdot a_m, \quad (5)$$

де a_m – прискорення хвильового фронту, викликане зовнішніми зусиллями.

Виразимо F_m через швидкість хвильового фронту, викликану зовнішніми зусиллями c_m :

$$F_m = m \cdot \frac{\partial c_m}{\partial t}. \quad (6)$$

З іншої сторони, зовнішнє зусилля F_m створює напруження σ_e на площадці dS елементарного об'єму:

$$F_m = \sigma_e \cdot dS. \quad (7)$$

Співставивши (6) та (7) отримаємо, що

$$m \cdot \frac{\partial c_m}{\partial t} = \sigma_e \cdot dS. \quad (8)$$

Поділивши (8) на об'єм dV , отримаємо, що

$$\sigma_e = \rho \cdot \frac{\partial c_m \partial x}{\partial t} = \rho \cdot \partial^2 c_m. \quad (9)$$

Проінтегруємо (9):

$$\sigma_e = \rho \cdot (c_0^2 - c_e^2), \quad (10)$$

де ρ – густина пружного середовища, c_0 – швидкість поширення об'ємної ультразвукової хвилі в ненапруженому середовищі, c_e – швидкість поширення об'ємної ультразвукової хвилі в напруженому середовищі.

Отримане рівняння (10) визначає залежність між прикладеними зовнішніми зусиллями та швидкістю поширення ультразвукової хвилі.

З метою моделювання швидкості поширення хвиль Лемба від товщини стінки труби рівняння поширення хвиль Лемба в пружному середовищі запишемо у вигляді розділених хвильових полів: поздовжнього та поперечного згідно методу Хельмгольца, в якому визначаються два хвильові потенціали, скалярна функція ϕ та векторна функція ψ , що описують поздовжні U_L та поперечні U_S хвилі [8]:

$$U_L = \nabla \phi, \quad U_S = \nabla \times \psi, \quad (11)$$

де $\nabla = \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3}$ – оператор Набла; U_L – час-

тина хвильового простору хвиль Лемба, що формується поздовжніми хвилями; U_S – частина хвильового простору; що формується поперечними хвилями;

$\phi = A_{(L)} e^{i\omega(N \cdot X / c_l - t)}$ – рівняння поздовжньої об'ємної хвилі; $\psi = A_{(S)} e^{i\omega(N \cdot X / c_t - t)}$ – рівняння поз-

довжньої поперечної об'ємної хвилі; x_1, x_2, x_3 – декартові координати; $A_{(L)}, A_{(S)}$ – відповідно амплітуди поздовжньої та поперечної об'ємних хвиль; i – уявне число; X – вектор декартових координат $\{x_1, x_2, x_3\}$; c_l, c_t – відповідно швидкості поширення об'ємних поздовжніх та поперечних ультразвукових хвиль; t – час; ω – кутова частота об'ємних хвиль; N – одиничний вектор напрямку поширення хвилі Лемба.

Для пояснення фізичного змісту (11) запишемо його в декартовій системі координат в такому вигляді:

$$U_L = \text{grad}(\phi) = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} e_1 + \frac{\partial \phi}{\partial x_2} e_2 + \frac{\partial \phi}{\partial x_3} e_3, \\ U_S = \text{rot}(\psi) = e_1 \left(\frac{\partial \psi_3}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi_2}{\partial x_3} \right) + \\ + e_2 \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial x_3} - \frac{\partial \psi_3}{\partial x_1} \right) + e_3 \left(\frac{\partial \psi_2}{\partial x_1} - \frac{\partial \psi_1}{\partial x_2} \right), \quad (12)$$

де e_1, e_2, e_3 – одиничні вектори – орти, які направлені вздовж відповідних координатних осей.

Метою моделювання є дослідження зміни швидкості поширення мод Лемба з вибором оптимального режиму. Наприклад, якщо зміна швидкості якоїсь однієї моди від зміни геометричних параметрів досліджуваного об'єкту є більшою від зміни інших, то саме цю моду потрібно визначати.

З іншої сторони, нам потрібно взяти до уваги чутливість мод до можливих варіацій інших параметрів досліджуваного об'єкту, найважливішим з яких є зміна густини. Таке твердження вимагає розрахунку математичної моделі поширення хвиль Лемба для кожної марки металу окремо.

Результати моделювання зміни фазової швидкості поширення хвиль Лемба від зміни товщини металу хвилеводу досліджуваного трубопроводу, виготовленого із сталі марки X 60, для чотирьох мод хвиль Лемба представлено в табл. 1. Для порівняння в табл. 1 показана фазова швидкість мод Лемба у металі із незмінною товщиною.

Таблиця 1 – Зміна фазової швидкості чотирьох мод Лемба від зміни геометричних розмірів на 0.5 мм

Частота, МГц	Номинальна швидкість моди a_0 , км/с	Зміна швидкості моди s_0 , км/с	Номинальна швидкість моди a_0 , км/с	Зміна швидкості моди s_0 , км/с	Номинальна швидкість моди a_1 , км/с	Зміна швидкості моди s_1 , км/с	Номинальна швидкість моди a_1 , км/с	Зміна швидкості моди s_0 , км/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0001	0,0001	0,0370	3,7000	3,6480	–	–	–	–
0,0500	0,1805	0,2145	3,6919	3,6339	–	–	–	–
0,1000	0,3438	0,3768	3,6700	3,6130	–	–	–	–
0,1500	0,4852	0,5162	3,6381	3,5871	–	–	–	–
0,2000	0,6016	0,6310	3,6012	3,5500	–	–	–	–
0,2500	0,6919	0,7279	3,5446	3,4866	–	–	–	–
0,3000	0,7705	0,8030	3,4589	3,4079	–	–	–	–
0,3500	0,8381	0,8731	3,3438	3,2918	–	–	–	–
0,4000	0,9007	0,9310	3,2014	3,1440	8,2046	8,2940	–	–
0,4500	0,9613	0,9973	2,9064	2,8544	6,9492	7,0432	–	–
0,5000	1,0221	1,0530	2,4531	2,3960	5,8479	5,9399	4,5667	4,4467
0,5500	1,0688	1,1068	1,9936	1,9436	4,9727	5,0687	4,3375	4,2175
0,6000	1,1041	1,1380	1,7015	1,6410	4,4014	4,4930	4,2011	4,0790
0,6500	1,1177	1,1527	1,5529	1,4979	4,0655	4,1645	4,1359	4,0109
0,7000	1,1314	1,1654	1,4322	1,3782	3,8205	3,9175	4,0958	3,9758
0,7500	1,1419	1,1799	1,3454	1,2904	3,6153	3,7093	4,0578	3,9348
0,8000	1,1511	1,1880	1,3015	1,2470	3,4041	3,4970	4,0018	3,8740
0,8500	1,1565	1,1925	1,2814	1,2274	3,1563	3,2483	3,8944	3,7674
0,9000	1,1619	1,1999	1,2686	1,2166	2,9119	3,0059	3,7433	3,6173
1,0000	1,1708	1,2030	1,2505	1,1931	2,5032	2,5960	3,4018	3,2760
1,0500	1,1730	1,2052	1,2407	1,1857	2,3491	2,4411	3,2271	3,1031
1,1000	1,1754	1,2084	1,2322	1,1762	2,2165	2,3145	3,0421	2,9191
1,1500	1,1777	1,2127	1,2250	1,1730	2,1007	2,1967	2,8611	2,7401
1,2000	1,1807	1,2170	1,2201	1,1670	2,0034	2,0910	2,7032	2,5748
1,2500	1,1825	1,2155	1,2163	1,1593	1,9074	1,9994	2,5574	2,4314
1,3000	1,1854	1,2230	1,2131	1,1571	1,8219	1,9179	2,4240	2,2970
1,3500	1,1875	1,2225	1,2109	1,1569	1,7504	1,8464	2,3035	2,1795
1,4000	1,1904	1,2230	1,2108	1,1551	1,7021	1,7930	2,2038	2,0758
1,4500	1,1922	1,2292	1,2107	1,1530	1,6680	1,7630	2,1004	1,9794
1,5000	1,1942	1,2292	1,2106	1,1600	1,6438	1,7378	2,0031	1,8791
1,5500	1,1966	1,2306	1,2105	1,1540	1,6227	1,7127	1,9293	1,8023
1,6000	1,2010	1,2360	1,2104	1,1612	1,6087	1,6905	1,9266	1,7720
1,6500	1,2102	1,2462	1,2103	1,1560	1,5734	1,6664	1,9240	1,7782
1,7000	1,2271	1,2641	1,2102	1,1570	1,5458	1,6358	1,9213	1,7775

Продовження табл. 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,7500	1,2430	1,2820	1,2101	1,1520	1,5203	1,6133	1,9186	1,7718
1,8000	1,2511	1,2850	1,2114	1,1632	1,5047	1,5967	1,9164	1,7715
1,8500	1,2477	1,2857	1,2099	1,1530	1,4840	1,5740	1,9133	1,7712
1,9000	1,2406	1,2716	1,2098	1,1510	1,4698	1,5598	1,9107	1,7709
1,9500	1,2282	1,2672	1,2097	1,1510	1,4582	1,5542	1,9080	1,7708
2,0000	1,2123	1,2425	1,2096	1,1531	1,4527	1,5461	1,9053	1,7707

Як видно із табл. 1 на зміну товщини металу трубопроводу нульова антисиметрична мода практично не реагує. Найбільша зміна фазової швидкості є у першій симетричній моді (приблизно, 200 м/с). Таким чином, зміна швидкості нульової антисиметричної моди може описувати величину напружено-деформованого стану в стінці труби, а перша симетрична мода – зміну товщини.

При проведенні вимірювань ми отримуємо сигнал, який складається із чотирьох мод хвиль Лемба. Визначивши зміну фазових швидкостей цих мод, ми можемо визначити мінімальну товщину та напружено-деформований стан трубопроводу.

1. Dewen, P.N., Lowe, M.J.S., Cawley, P. *The determination of the cohesive properties of bonded joints using Lamb wave data - a feasibility study. Submitted to J. Nondestr. Eval.*, 1992. 2. Lamb, H. *On waves in an elastic plate. Proc. Roy. Soc.*, Vol 93 PT

Series A, 1917, pp 114-128. 3. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И., Лебедев В. К. *Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах.* - К.: "Наукова думка", 1974.- 108 с. 4. Лютак І. З., Кісіль І. С., Мандра А. А. *Модель поширення ультразвукових хвиль у металах трубопроводів при навантаженнях // Методи та прилади контролю якості.* – 2002. - № 8. – С. 10-13. 5. *Каталог ОАО "Костроматрубинвест - Волгоченский трубный завод".*- 2004.- 28 с. 6. R. Hubo, *VDI progress report series 18, book 80, VDI, Düsseldorf (Germany)*, 1990. 7. Яворський Б. М., Детлаф А. А. *Справочник по физике.*- М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980.- 507 с. 8. Malvern, L.E. *Introduction to the mechanics of a continuous medium.* Prentice-Hall, New Jersey, 1969.