

УДК 620.179.16

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

М. М. Семеген, З.П. Лютак

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

Представлена удосконалена модель розрахунку амплітудно-частотної характеристики сигналів ультразвукових пристроїв. Описаний метод розрахунку перехідного процесу в електроакустичному тракту пристрою в режимах випромінювання та приймання. Приведена оцінка отриманих амплітудно-частотних характеристик системи.

Ключові слова: п'єзоелектричний перетворювач, луно-сигнал, ультразвуковий метод контролю, імпульсний режим, амплітудно-частотна характеристика, еквівалентна схема.

Представлена усовершенствованная модель расчета амплитудно-частотной характеристики сигналов ультразвуковых устройств. Описан метод расчета переходного процесса в электроакустическом тракте устройства в режимах излучения и приема. Приведена оценка сходимости полученных амплитудно-частотных характеристик системы.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, эхо-сигнал, ультразвуковой метод контроля, импульсный режим, амплитудно-частотная характеристика, эквивалентная схема.

The approach to account of decibel-log frequency characteristic of cues of defect scopes is observed. The transient phenomenon design technique in an electro acoustical section of a defect scope in emanation and reception regimes is presented. The estimation of convergence of the received decibel-log frequency characteristics of system is resulted.

Keywords: piezoelectric transformer, echo-signal, ultrasonic method of control, pulse-mode, gain-frequency description, equivalent chart.

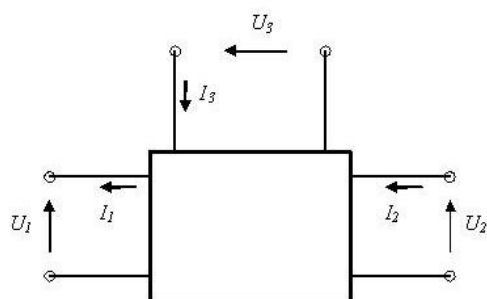
П'єзоелектричний перетворювач є основним вузлом при дослідженні фізико-механічних характеристик матеріалів ультразвуковим методом. При цьому, оцінку фізико-механічних властивостей виконують в залежності від параметрів прийнятого луно-сигналу для необхідного настроювання вторинних приладів, які проводяться на основі параметрів даних перетворювачів [1]. В більшості випадків в якості таких параметрів приймається амплітуда імпульсу або його часове положення. При дослідженні п'єзоелектричного перетворювача вхідними даними є механічні, електромеханічні й електричні характеристики використаних матеріалів при заданих умовах застосування перетворювача. Необхідно також знати ресурс роботи і зміну їх характеристик. У багатьох випадках потрібно проводити коригування параметрів вторинних приладів у процесі експлуатації системи контролю відповідно до зміни характеристик перетворювача. Тому необхідно досліджувати режим роботи п'єзоперетворювача, що може бути проведено на основі аналізу його роботи в імпульсному

режимі [2].

Вказана задача є досить складною, так як згадані характеристики визначаються параметрами електронних блоків ультразвукових пристроїв, зокрема, генератором та підсилювачем електроакустичного перетворювача та його тракту. Для того, щоб в результаті контролю отримати високу чутливість та точність вимірювань, необхідно з достатньою точністю описати роботу електроакустичного тракту дефектоскопа у часовій області. Однак до цього часу ця задача в повній мірі не вирішена. Відомі роботи, в яких розглядаються проблеми імпульсного режиму роботи п'єзоелектричного перетворювача [3]. Методи, які базуються на застосуванні перетворення Лапласа [4] та інтеграла Фур'є [5], досить трудомісткі для розрахунку навіть простих схем вмикання п'єзоелектричних перетворювачів. Викликано це тим, що вирішення таких задач є складною проблемою, оскільки відповідні рішення описати в аналітичному вигляді часто неможливо, а чисельні методи вирішення вимагають багато

часу і тому не завжди задовільні. Цей факт став основою для запропонованого підходу до розрахунку амплітудно-частотної характеристики сигналів дефектоскопів.

Розглянемо роботу чутливого елемента первинного перетворювача. При подаванні на електроди напруги у вигляді пікового імпульсу внаслідок п'єзоефекту пластина починає коливатись. У нашому випадку розглянемо поздовжні коливання, при яких п'єзопластина починає зміщуватись у напрямку поширення коливань. В цьому випадку чутливий елемент можна представити як електричну схему-аналог у вигляді шестиполюсника, в якому одному входу відповідає електрична складова, а двом іншим – дві поверхні п'єзопластини (рис. 1).



U_1, U_2 – напруги шестиполюсника, що відповідають силі деформації чутливого елемента; I_1, I_2 – струми шестиполюсника, які відповідають швидкості руху поверхні чутливого елемента; U_3, I_3 – напруга та струм на електродах чутливого елемента

Рисунок 1 - Еквівалентна схема роботи чутливого елемента первинного перетворювача у вигляді шестиполюсника

Розкриття електричної схеми-аналога чутливого елемента здійснено Н. Мезоном [6], при якому процес утворення коливання чутливого елемента внаслідок подавання електричного імпульсу на електроди представляється коливальним контуром паралельно з'єднаних конденсатора та котушки індуктивності. Більш удосконалену схему-аналог роботи чутливого елемента представлено в [1], де враховано навантаження проміжного шару, демпфера та об'єкта, в який вводяться ультразвукові коливання [1]. Недоліком представленої в [1] електричної схеми-аналогу є те, що в ній коливання чутливого елемента є ідеалізованими і продовжуються в часі без зменшення амплітуди. У реальному чутливому елементі коливання, що утворюються піковим електричним імпульсом, загасають в часі.

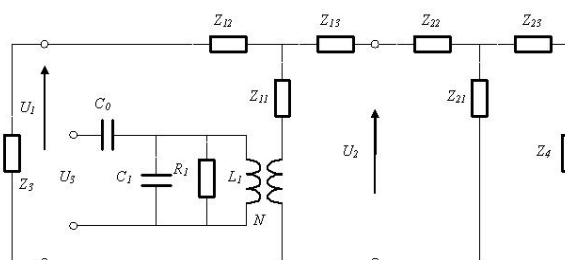
Для удосконалення схеми-аналогу

пропонуємо ввести в резонансний контур додатково резистор, що буде моделювати загасання коливань чутливого елемента, зменшення добротності коливального контура і відповідно зменшення тривалості його коливального процесу (рис. 2).

Ємність чутливого елемента обчислюється так [7]:

$$C_0 = \frac{\epsilon^s A}{L}, \quad (1)$$

де A – площа поверхні чутливого елемента, L – товщина чутливого елемента, ϵ^s – діелектрична проникність чутливого елемента.



Z_{11}, Z_{12}, Z_{13} – опори, що відповідають затримці сигналу внаслідок поляризації чутливого елемента; Z_{21}, Z_{22}, Z_{23} – опори, що відповідають затримці сигналу в проміжному шарі; Z_3 – опір демпфера; Z_4 – опір об'єкта в який вводиться ультразвукова хвиля; C_1, L_1, R_1 – електричні елементи, що утворюють коливання чутливого елемента; N – коефіцієнт трансформації ідеального трансформатора, що відповідає електромеханічному перетворенню в чутливому елементі; C_0 – ємність чутливого елемента

Рисунок 2 - Електрична схема-аналог чутливого елемента ультразвукового первинного перетворювача

Електричні параметри паралельного резонансного контура визначаються так [7]:

$$C_1 = \frac{C_0}{k_T^2}, \quad L_1 = \frac{k_T^2}{\omega^2 C_0}, \quad (2)$$

де k_T – коефіцієнт п'єзоелектричного зв'язку, ω – частота коливань чутливого елемента.

Величина опору R_1 вибирається із умови кількості коливань паралельного резонансного контура із амплітудою, не менше заданої. Коефіцієнт трансформації ідеального трансформатора знаходимо із такого співвідношення:

$$N = eA/L, \quad (3)$$

де e – п'єзоелектрична константа механічних напружень при відсутності прикладеного електричного поля.

Опори Z_3 та Z_4 відповідають акустичним імпедансам матеріалам відповідно демпфера та об'єкта введення ультразвукової хвилі.

Опори поверхні чутливого елемента обчислюються так:

$$Z_{12} = Z_{13} = jZ_c \tan\left(\frac{\beta_a L}{2}\right), \quad Z_{11} = jZ_c \operatorname{cosec}(\beta_a L),$$

$$\beta_a = \omega \sqrt{\frac{\rho}{c^D}}, \quad Z_c = A \sqrt{\rho c^D}, \quad (4)$$

де Z_c – акустичний імпеданс п'єзопластини, β_a – константа поширення акустичної хвилі в п'єзоматеріалі, ρ – густина п'єзоматеріалу, c^D – пружна константа п'єзоматеріалу при відсутності прикладеного електричного поля.

Опори, що відповідають за поширення ультразвукових коливань в проміжному шарі, обчислюються так:

$$Z_{22} = Z_{23} = jZ_{csh} \tan\left(\frac{\beta_{ash} L_{sh}}{2}\right),$$

$$Z_{21} = jZ_{csh} \operatorname{cosec}(\beta_{ash} L_{sh}),$$

$$\beta_{ash} = \frac{\omega}{c_{lsh}}, \quad Z_{csh} = A \rho_{sh} c_{lsh}, \quad (5)$$

де Z_{csh} – акустичний імпеданс проміжного шару, β_{ash} – константа поширення акустичної хвилі в проміжному шарі, ρ_{sh} – густина проміжного шару, ω – частота, c_{lsh} – швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в проміжному шарі, L_{sh} – товщина проміжного шару.

Як матеріал п'єзопластини для проведення розрахунків було використано чутливий елемент ЦТС-5А. Вхідні дані для проведення розрахунку приведені в табл. 1.

Схема-аналог розраховувалась виходячи з того, що струм I , який протікає через конденсатор ємністю C та котушку індуктивності L , є таким:

$$I = C \frac{dU}{dt}, \quad I = L \frac{dU}{dt}, \quad (6)$$

де U – напруга, t – час.

Для проведення розрахунків імпульс генератора моделювався у вигляді пікового сигналу великої амплітуди (рис. 3).

Результуючі коливання в залежності від величини опору R_1 показані на рис. 4. Напруга визначалась на виході проміжного шару та на вході в матеріал досліджуваного об'єкта (Z_4).

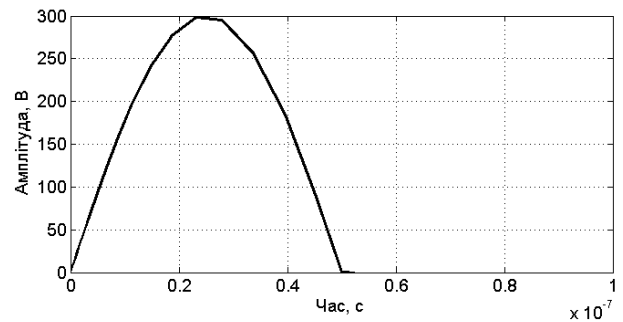


Рисунок 3 - Збуджуючий імпульс генератора напруги чутливого елемента

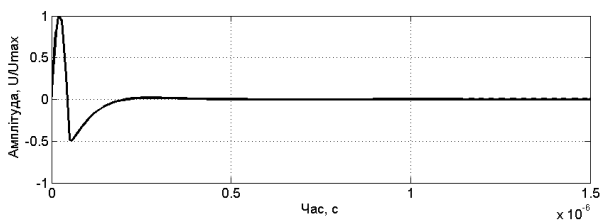
Таблиця 1 - Вхідні параметри проведення розрахунку чутливого елемента

Назва параметра	Значення
L , м	$7,6 \cdot 10^{-4}$
Радіус п'єзопластини, м	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Частота, МГц	2,5
ρ , кг/м ³	7,75
e , Кл/м ²	15,8
c^D , Н/м ²	$14,7 \cdot 10^{10}$
k_T	0,49
ρ_{sh} , кг/м ³	1190
c_{lsh} , м/с	2700
L_{sh} , м	$6,802 \cdot 10^{-3}$
Густина сталі, кг/м ³	7,85
Швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі в сталі, м/с	5900

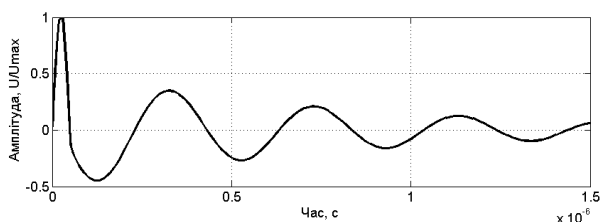
Як можна побачити із рис. 4, опір R_1 вносить зміни у робочу частоту коливання чутливого елемента. При малому значенні опору R_1 (рис. 4,а), коливання мають різкий загасаючий характер. Це вказує на значні механічні втрати чутливого елемента. Протилежний випадок роботи чутливого елемента показаний на рис. 4, в, де механічні втрати при перетворенні електричного імпульсу є незначними, що відповідає роботі в ненавантаженому режимі. На рис. 4,б зображено роботу чутливого елемента у режимі проведення неруйнівного контролю. У цьому режимі чутливий елемент збуджується електричним імпульсом, при якому проходить декілька коливань п'єзоелемента, що відповідає експериментальним даним.

В реальному чутливому елементі, як правило, поряд із основною частотою коливання є присутні і додаткові частоти. Ці додаткові частоти можуть вносити завади в зондуєчий сигнал акустичної частини чутливого елемента як в режимі випромінювання, так і в режимі приймання акустичного сигналу. З метою проведення аналізу роботи чутливого елемента

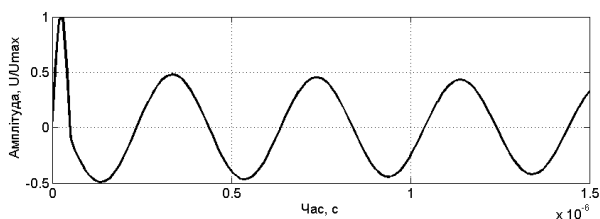
із присутніми бічними додатковими частотами удосконалимо електричну схему-аналог роботи чутливого елемента (рис.5).



а)



б)



в)

а) – $R_1 = 25 \text{ Ом}$; б) – $R_1 = 250 \text{ Ом}$; в) – $R_1 = 2500 \text{ Ом}$

Рисунок 4 - Форма ультразвукового сигналу на виході із чутливого елемента

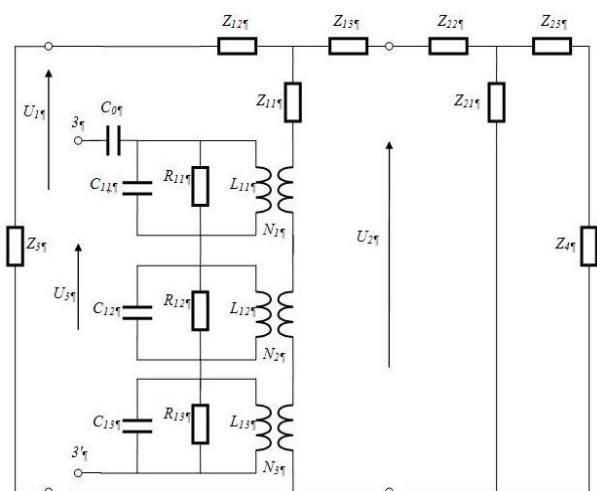


Рисунок 5 - Електрична схема-аналог чутливого елемента ультразвукового первинного перетворювача

Для побудови амплітудно-частотної характеристики схеми, зображеної на рис. 5, враховані наступні залежності [7]:

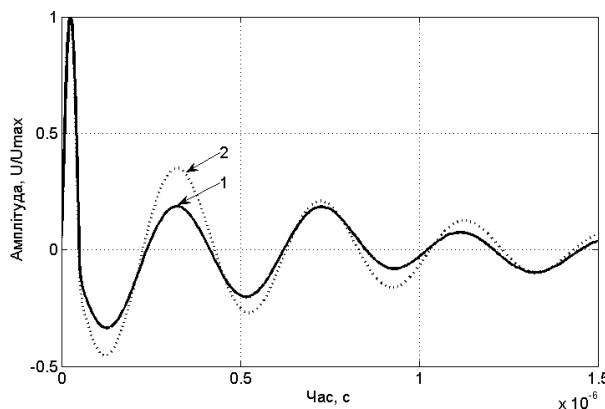
– вхідний опір на клеммах 3-3' (рис. 5)

$$Z_3 = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 - \sum_n k_{eff,n}^2 + \sum_n \frac{j\omega k_{eff,n}^2}{(\omega_{0n}^2 - \omega^2)C_0} \right] = \frac{1 - k_T^2}{j\omega C_0} + \sum_n \frac{j\omega k_{eff,n}^2}{(\omega_{0n}^2 - \omega^2)C_0} \quad (7)$$

– для спрощення опір Z_3 можна визначити так:

$$Z_3 \approx \frac{1 - k_T^2}{j\omega C_0} + \frac{8}{\pi^2} \frac{j\omega k_T^2 / C_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (8)$$

Результуючий сигнал на виході перехідного шару чутливого елемента з урахуванням бічних гармонік представлений на рис. 6, з якого можна побачити, що вплив бічних гармонік змінює амплітуду вихідного сигналу, перерозподіляючи його енергію між періодами коливань. Це дозволяє проводити більш точний аналіз луно-сигналу.



1 – вихідний сигнал, який сформований трьома резонансними контурами; 2 – одним контуром

Рисунок 6 - Форма ультразвукового сигналу на виході із чутливого елемента

ВИСНОВКИ

Вдосконалена модель ультразвукового первинного перетворювача, яка представлена у вигляді електричної схеми-аналога і полягає в урахуванні демпфувальних параметрів коливання п'єзопластини та наявності серії бічних резонансних частот. Це дає можливість більш точно враховувати вплив амплітудно-частотної характеристики акустичного тракту на ультразвуковий сигнал, підвищити точність визначення його параметрів.

1. Лютак І. З. Дослідження імпульсного режиму роботи ультразвукового перетворювача / І. З. Лютак, І. С. Кісіль // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2003. – №1. – С. 42 – 45. 2. Домаркас В. Й. Ультразвукова ехоскопія / В. Й. Домаркас, Э. Л. Пилецкас. – Л.: *Машиностроение*, 1972. – №3. – С. 45–52. 3. Касаткин Б. А. Об одном способе перестройки рабочей частоты пьезопреобразователя / Б. А. Касаткин, Н. Я. Павин // *Дефектоскопия*. – 1980. – №1. – С. 17 – 21. 4. Гитис М. Б. Применение теоремы об эквивалентном генераторе для расчета прямых пьезоэлектрических преобразователей / М. Б. Гитис, В. А. Чуприн // *Дефектоскопия*. – 1987. – №1. – С. 9 – 14. 5. Мельканович А. Ф.

Исследование спектральных и временных характеристик информативных сигналов ультразвуковых дефектоскопов / А. Ф. Мельканович, Л. М. Кушкулей, И. И. Арбит // Дефектоскопия. – 1986. – №5. – С. 11 – 18. 6. *Физическая акустика: т. 1. / Н. Мезон*. – М.: Мир, 1966 – 592 с. 7. Петров П.Н. *Акустика. Электроакустические преобразователи: учебн. пособие / П. Н. Петров*. – СПб.: СПбГУАП, 2003. – 80 с.

Поступила в редакцію 08.12.2009р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,
проф. Заміховський Л. М.

УДК 622.692.4

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБ МЕТОДОМ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Ю.В. Банахевич

Дочірна компанія «Укртрансгаз», Кловський узвіз, 9/1, м. Київ, 01021,
e-mail: banahevyuch.utg@naftogaz.net

Використовуючи розрахунково-експериментальний метод, вирішено обернену задачу теорії оболонок з залишковими деформаціями з використанням експериментальних даних, які визначені методом спекл-інтерферометрії. Отримано розподіл залишкових напружень біля кільцевих зварних швів магістральних трубопроводів.

Ключові слова: зварне з'єднання, спекл-інтерферометрія, напружено-деформований стан, трубопровід, метод скінченних елементів, залишкове напруження.

Используя расчетно-экспериментальный метод, решена обратная задача теории оболочек с остаточными деформациями с использованием экспериментальных данных, которые определены методом спекл-интерферометрии. Получено распределение остаточных напряжений около кольцевых сварных швов магистральных трубопроводов.

Ключевые слова: сварное соединение, спекл-интерферометрия, напряженно деформированное состояние, трубопровод, метод конечных элементов, остаточное напряжение.

Using the calculation-experimental method based on solution of inverse problems of the theory of a shell with residual strains and utilizing the experimental data obtained by speckle-interferometry, the distribution of residual stresses near the circumferential weld in pipelines is defined.

Keywords: welded connection, speckle-interferometry, tensely deformed state, pipeline, method of eventual elements, remaining tension.

Для оцінки працездатності трубопроводів необхідний комплексний підхід, однією з важливих складових якого є визначення напруженого стану труб, зокрема, в місцях із дефектами та в зварних з'єднаннях, з якими пов'язано 70–80% усіх відмов магістральних

трубопроводів (МТ). Технологічні напруження, що виникають при зварюванні труб, значущі, нерівномірно розподілені за їх товщиною і можуть істотно впливати на міцність і залишковий ресурс трубопроводів. Особливо це стосується зварних кільцевих швів,

які після зварювання, як правило, додатково не обробляються, щоб зменшити залишкові напруження. Тому однією із важливих задач обстеження технічного стану зварних з'єднань МТ тривалої експлуатації є визначення незреласованих залишкових напружень в околовшовній зоні. Поскілки навіть після високого відпуску в зоні зварного шва переважно незреласовані технологічні залишкові напруження залишаються на рівні 50–120 МПа [1]. Відомі випадки, коли залишкові зварювальні напруження, за певних умов експлуатації, можуть досягнути критичних значень і призвести до руйнування ділянок трубопроводу через утворення тріщин [2].

Існують різні експериментальні неруйнівні методи визначення напружень у трубопроводах [3, 4, 11]. Однак, як відзначено в роботі [5], на сьогодні в реальних умовах експлуатації газотранспортної системи ні один із експериментальних методів неруйнівного контролю не може забезпечити повну і достовірну інформацію про рівень залишкових технологічних напружень у трубопроводах. При використанні розрахункових методів [6] необхідно знати режими зварювання труб і методи зменшення напружень у з'єднаннях після зварювання. Це значно ускладнює, а в більшості випадків не дає змоги використати ці методи для визначення сумарних напружень у зварних з'єднаннях труб МТ тривалої експлуатації.

Для вирішення вище описаних проблем опрацьовано методологію оцінки рівня і розподілу залишкових напружень в зонах кільцевих зварних з'єднань МТ методом скінченних елементів і розвинуто розрахунково-експериментальний метод визначення залишкових напружень в зонах багат шарових зварних швів з дефектами. При цьому трубопровід моделюємо оболонкою, яка віднесена до триортогональної системи координат α, β, γ , де α – координата вздовж осі оболонки; β – кутова координата, γ – координата вздовж зовнішньої нормалі до серединної поверхні труби.

На основі проведеного аналізу розподілу залишкових напружень і залишкових термопластичних деформацій в зоні багат шарових кільцевих зварних швів МТ і наведених результатів досліджень в літературних джерелах [4, 6, 8, 9] розподіл несумісних залишкових деформацій апроксимуємо виразами:

$$e_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma) = -E_1^* f_1(\gamma) \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha),$$

$$\begin{aligned} e_{\alpha\alpha}^0(\alpha, \gamma) &= -E_2^* f_2(\gamma) \varphi_{23}(\alpha), \\ e_{\alpha\gamma}^0(\alpha, \gamma) &= -E_0^* f_0(\gamma) \varphi_0(\alpha) S_0^0(\alpha), \end{aligned} \quad (1)$$

де

$$\begin{aligned} \varphi_{23}(\alpha) &= \varphi_2(\alpha) S_2^0(\alpha) - \rho \varphi_3(\alpha) S_3^0(\alpha), \\ \varphi_i(\alpha) &= 1 + s_i \frac{\alpha^2}{\alpha_i^2} - (3 + 2s_i) \frac{\alpha^4}{\alpha_i^4} + (2 + s_i) \frac{\alpha^6}{\alpha_i^6}, \\ \varphi_0(\alpha) &= \frac{\alpha}{\alpha_0} - 3 \frac{\alpha^3}{\alpha_0^3} + 3 \frac{\alpha^5}{\alpha_0^5} - \frac{\alpha^7}{\alpha_0^7}, \\ f_i(\gamma) &= 1 + q_i \frac{\gamma}{h} - n_i \frac{\gamma^2}{h^2}, \quad n_0 = 1 - q_0, \quad q_0 > 1, \\ & \quad i = 1, 2, 3; \end{aligned} \quad (2)$$

$S_i^0(\alpha)$ – функції Хевісайда; $S_i^0(\alpha) = 1, |\alpha| \leq \alpha_i$; $S_i^0(\alpha) = 0, |\alpha| > \alpha_i$; $\alpha = \frac{b}{R}, i = 0, 1, 2, 3$; b_i – координати границь зон залишкових деформацій; $E_i^*, \alpha_i, \rho, s_i, q_i, n$ – числові параметри; функції $f_i(\gamma)$ характеризують нерівномірність розподілу залишкових деформацій за товщиною труби; функції $\varphi_i(\alpha)$ характеризують зміну цих деформацій вздовж осі труби.

Вирази для обчислення осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і колових $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень в довільній точці труби зобразимо в формі

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) &= k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma), \\ \sigma_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) &= k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\beta\beta}(\alpha, \gamma), \end{aligned} \quad (3)$$

де

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) &= \frac{\lambda}{2(1-\mu^2)} \frac{\gamma}{h} \left\{ -\sqrt{3(1-\mu^2)} \times \right. \\ & \quad \times \left(1 - \frac{n_1}{3} \right) F_{21}(\alpha) + \mu q_1 F_{11}(\alpha) + \\ & \quad \left. + K q_2 [F_{12}(\alpha) - \rho F_{13}(\alpha)] \right\} + \\ & \quad + \frac{1}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) \left\{ \mu n_1 \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha) + \right. \\ & \quad \left. + K n [\varphi(\alpha) S(\alpha) - \rho \varphi(\alpha) S(\alpha)] \right\}, \\ \hat{\sigma}_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) &= \hat{W}(\alpha) + \mu \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) + f_1(\gamma) \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha). \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Тут } F_{ij}(\alpha) &= \int_{-\alpha_j}^{\alpha_j} \varphi_j(\zeta) \exp[-\lambda|\alpha - \zeta|] \times \\ &\times \left[\cos \lambda(\alpha - \zeta) + (-1)^{i-1} \sin \lambda|\alpha - \zeta| \right] d\zeta, \quad (5) \\ &i = 1, 2; j = 1, 2, 3. \end{aligned}$$

У вирази (3) – (5) входять σ_T – межа текучості; μ – коефіцієнт Пуассона; ζ – змінна інтегрування і довільні числові параметри $k_1, k, \alpha_i, s_i, q_i, n_i$, які потрібно визначати у кожному випадку для конкретного зварного з'єднання. Для відшукування цих параметрів використаємо інформацію, яку можна одержати за допомогою одного із експериментальних методів або їх синтезу. Характеристики напруженого стану, які визначаються за допомогою експериментальних методів позначимо через $I_m^E(\sigma_{ii})$. Аналогічні характеристики, отримані розрахунковим способом позначимо через $I_m^T(\sigma_{ii})$. На цій основі будемо функціонал нев'язки між експериментальними I_m^E і розрахунковими I_m^T значеннями характеристик залишкових напружень у такому вигляді [10]:

$$\begin{aligned} g(E_1^*, \alpha_i, s_i, q_i, n_i) &= \\ &= \sum_{c=1}^{C_1} \sum_{n=1}^{N_1} \rho_{cn} \left[I_c^T(\Omega_n; E_1^*, \alpha_i, s_i, q_i, n_i) - I_c^E(\Omega_n) \right]^2, \quad (6) \end{aligned}$$

де C_1 – число, що відповідає кількості експериментальних способів, які використані для проведення вимірювань; N_1 – кількість підобластей L_n , в яких вимірюються характеристики напруженого стану; ρ_{cn} – вагові множники.

Якщо експериментальні дані, отримані за результатами вимірів на зовнішній поверхні труби за допомогою електромагнітного (σ_+^E), ультразвукового (σ_0^E) методів та методу спекл-інтерферометрії ($\sigma_{\alpha\alpha}^E, \sigma_{\beta\beta}^E$), то функціонал для визначення параметрів $E_1^*, k, \alpha_i, S_i, n_i, q_i$ можна записати у такому вигляді:

$$g(k_1, k, \alpha_i, s_i, q_i, n_i) = \sum_{n=1}^{n_1} \rho_n \left[k_1 \sigma_T I_+^{(i)T}(\alpha_n) - \sigma_+^E(\alpha_n) \right]^2 +$$

$$\begin{aligned} &+ \sum_{m=1}^{l_1} q_m \left[k_1 \sigma_T I_0^{(i)T}(\alpha_m) - \sigma_0^E(\alpha_m) \right]^2 + \\ &+ \sum_{v=1}^{v_1} \rho_v \left\{ \left[k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha_v) - \sigma_{\alpha\alpha}^E(\alpha_v) \right]^2 + \right. \\ &\left. + \left[k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha_v) - \sigma_{\beta\beta}^E(\alpha_v) \right]^2 \right\}, \quad (7) \end{aligned}$$

де n_1, l_1, v_1 – кількість перерізів труби, в яких проводять вимірювання; ρ_n, q_m, ρ_v – вагові множники.

Мінімізуючи функціонал (7) за певних обмежувальних умов на шукані величини, знаходимо такі числові значення параметрів $k_1, k, \alpha_i, s_i, q_i, n_i$, за яких нев'язка між експериментальними і теоретично розрахованими характеристиками напруженого стану буде мінімальна. Знайшовши невідомі параметри, які характеризують несумісні залишкові деформації в конкретному кільцевому зварному з'єднанні труб, за формулами (3) і (4) обчислюємо залишкові напруження в довільній точці даного зварного з'єднання, зокрема ті, які не можна отримати експериментально. Отримані таким способом залишкові напруження задовольняють рівняння рівноваги, сумісності деформацій і крайові умови, а вірогідність їх рівня і розподілу залежить від обсягу і величини похибок експериментальних даних, які використовуються для конкретного зварного з'єднання.

Для перевірки адекватності математичних моделей для визначення напруженого стану зварних стиків труб розробили і виготовили дослідно-вимірювальний комплекс (рис. 1).

Запропонований комплекс дає можливість в лабораторних умовах якісно моделювати напружено-деформований стан в зоні зварних багатошарових з'єднань труб і проводити тарування і повірку різних вимірювальних трактів.

Дослідна установка складається з резервуара 1, який виготовлений з шести циліндричних котушок зовнішнім діаметром 1020 мм з різними товщинами стінок від 9,5 мм до 14 мм, з'єднаних між собою стиковими зварними багатошаровими швами і привареними на торцях півсферичними днищами. Резервуар заповнений водою, а зменшення тиску в ньому досягається за допомогою зворотнього переливання води у накопичувальний бачок 2. Створення надлишкового тиску здійснюється за допомогою об'ємного насосного агрегату МП –

150.

Величину тиску в резервуарі контролюють зразковим манометром 3 з класом точності 0,4. Насосна станція дозволяє досягати внутрішніх тисків в резервуарі до 15 МПа. Циліндричні котушки до дослідної установки комплектували з аварійного запасу і вирізаних в процесі ремонту котушок труб наступних марок сталей: 17Г1С, 17Г1СУ, 13Г1СУ.

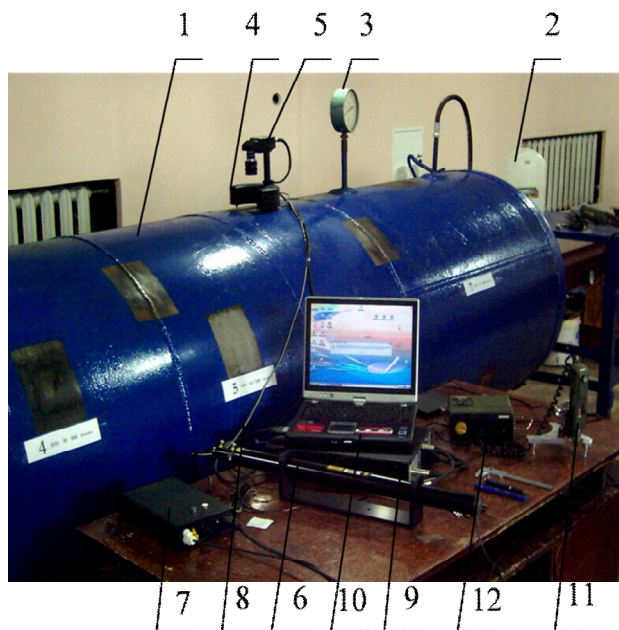


Рисунок 1 – Дослідно-вимірювальний комплекс для визначення напруженого стану зварних стиків труб

Труби з зовнішнім діаметром 1020 мм виготовлені згідно ТУ 14-3-1698-1985 з такими технічними характеристиками: допуск на відхилення в радіальному напрямку $\pm 3,0$ мм, допуск на відхилення по торцях $\pm 1,6$ мм, допуск на відхилення за товщиною стінки $+0,3 / - 5\%$ від номінальної. Тиск при гідровипробуваннях від 6,0 до 12,5 МПа визначається за величиною нормативної межі текучості матеріалу

$$P_{випр} = 2t_{\min} \times R / D_{вн}, \quad (8)$$

де t_{\min} - мінімальна товщина стінки труби в мм; R - розрахункове значення опору розтягу (стиску), яке приймаємо рівним 95 % від нормативної межі текучості, МПа; $D_{вн}$ - внутрішній діаметр труби, мм.

Зварювання циліндричних оболонок дослідної котушки проводили за технологією, що застосовують в польових умовах при

виконанні монтажного кільцевого шва без провороту. Здійснювали багат шаровий монтажний шов електродами марки УОНІ – 13/55 Р за три проходи: 1-й корінь $I = 90 - 130$ А - діаметр електрода 3,2 мм; 2-й і 3-й шар $I = 130 - 210$ А - діаметр електрода 4,0 мм. Отримані таким чином багат шарові монтажні зварні шви не піддавалися додатковій технологічній обробці. Контроль якості всіх багат шарових зварних з'єднань проводився зовнішнім оглядом, рентгенопросвічуванням та ультразвуковою дефектоскопією.

Визначення залишкових напружень в зоні швів дослідного стенду проводили з використанням методу електронної спекл-інтерферометрії [7]. В основу методу використано здатність лазерного випромінювання створювати певну спекл-структуру при відбиванні від поверхні резервуару 1. При переміщенні, що відбувається за рахунок деформації, наприклад, при висвердлюванні отвору глибиною 2 мм і діаметром 2 мм, виникає зміна спекл-картини. За різницею двох спекл-картин можна отримати інтерференційну картину смуг та визначити зміну координати точки між двома станами. Використовуючи отриману інформацію за допомогою спеціального програмного забезпечення, визначають величини залишкових напружень у вибраній точці біля кільцевого зварного шва котушок резервуара в осьовому і коловому напрямках. Спекл-інтерферометричний комплекс складається з малогабаритного спекл-інтерферометра 4 з оптичною системою і опорно-юстувальним пристроєм, CCD-камери 5 з роздільною здатністю 768 x 576 пікселів, лазера 6 з блоком живлення 7 і світловодом 8, приставки «Dock-Station» 9 для перетворення оптичного сигналу в цифровий і занесення в пам'ять персонального комп'ютера 10, дрелі «PROXXON» з підставкою для свердління 11 і блоком живлення 12.

Для прикладу, на рис. 2 наведені експериментальні результати визначених кільцевих напружень $\sigma_{\beta\beta}^E$ на зовнішній поверхні, які отримані за допомогою спекл-інтерферометричного комплексу для зварного шва дослідного резервуара, що з'єднує дві котушки з товщинами стінок $h_1, h_2 = 10$ мм у функції відстані від осі шва: крива – 1 до опресування резервуара, крива – 2 після опресування резервуара. Матеріал котушок – сталь 17Г1С. Основні механічні характеристики згідно сертифікатів на виготовлення приведені в таблиці 1. Під час опресування тиск в резервуарі досягав 6 МПа.

Таблиця 1 – Основні механічні характеристики матеріалу циліндричних котушок

№ котушки	Межа міцності, МПа	Межа текучості, МПа	Відносне видовження, %	Ударна в'язкість основного металу, % KCV, Дж/см ²
I	560	390	25	29,1
II	577	401	23	29,3

Визначали також усереднені характеристики залишкових напружень в зоні вище розглянутого зварного з'єднання дослідного резервуара електромагнітним методом. Використовували вимірювальний прилад «MESTR-411» з перетворювачем трансформаторного типу. Експериментальні роботи проводили згідно методики, яка затверджена комітетом з стандартизації ТК-78. При цьому враховували вплив неоднорідності напружень по площі контакту давача з трубою та вплив структурних змін на магнітну проникність металу в зоні термічних перетворень. На рис. 2 наведені експериментально одержані результати усередненої різниці головних напружень σ_+^E (позначені кружечками) в функції відстані від осі шва дослідного резервуара, які визначені електромагнітним методом.

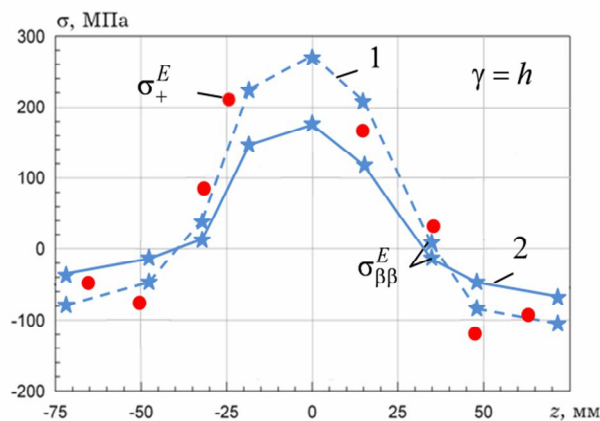


Рисунок 2 – Графічні залежності кільцевих залишкових напружень $\sigma_{\beta\beta}^E$ і усередненої різниці головних напружень σ_+^E в функції відстані від осі шва дослідного резервуара

Отримані дані свідчать про задовільне, якісне і кількісне узгодження

експериментальних результатів. В процесі опресування дослідного резервуара залишкові напруження в зоні зварного шва суттєво зменшуються, але все ж залишаються на рівні 100 – 170 МПа.

ВИСНОВКИ

Застосування описаних вище дослідно-вимірювального комплексу і розрахунково-експериментального методу дозволяють удосконалити методику діагностування напруженого стану в зоні зварних з'єднань труб в умовах тривалої їх експлуатації.

1. Махненко В.И. Совершенствование методов оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций длительного срока эксплуатации / В.И. Махненко // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10-11. – С. 3-12. 2. Лобанов Л. М. Компьютерная система для определения остаточных напряжений методом отверстий в сочетании с голографической интерферометрией / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, П.Д. Кротенко // Сварные конструкции: тезисы доклад. междунар. конф. – К. – 2000. – С. 5 – 9. 3. Касаткин Б.С. Оценка некоторых методов определения остаточных напряжений в сварных соединениях конструкционных сталей для диагностики (обзор) / Б.С. Касаткин // Техническая диагностика. – 2005. – № 4. – С. 13 –18. 4. Винокуров В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В. А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с. 5. Дубов А.А. Контроль напряженно-деформированного состояния трубопроводов, оборудования и конструкций с использованием метода магнитной памяти металла / А.А. Дубов // Научные труды 6-го международного симпозиума "Современные проблемы прочности" имени В.А. Лихачева. - Том 1. - Старая Русса, 20-24 октября 2003 г. - Старая Русса. Великий Новгород. - 2003. - С. 155-163. 6. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций / В.И. Махненко. – К.: Наукова думка, 1976. – 320 с. 7. Оперативный контроль качества и напряженного состояния сварных конструкций методами электронной шифрографии и спекл-интерферометрии / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, В.В. Савицкий, Г.И. и др. // Автоматическая сварка. – 2005. – № 8. – С. 39 – 44. 8. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В.И. Махненко. – К.: ДНВП Видавництво "Наук. думка", 2006. – 618 с. 9. Недосека А. Я. Основы расчета и

диагностики сварных конструкций / А.Я. Недосека. – К.: Индпром, 1998. – 640 с. 10. Осадчук В.А. Визначення напруженого стану магістральних трубопроводів в зоні кільцевих зварних швів / В.А. Осадчук, Ю.В. Банахевич, О.О. Іванчук // Міжнародний науково-технічний журнал “Фізико-хімічна механіка матеріалів”. – 2006 . – Том 42. – № 2. – С. 99-105. 11. Банахевич Ю.В. Дослідно-вимірвальний комплекс для експериментального визначення характеристик напружено-деформованого стану в зоні кільцевих зварних з’єднань труб магістральних газопроводів / Ю.В. Банахевич //

«Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового обладнання» : матеріали 5-ої міжн. наук.-техн. конф. і виставки, Івано-Франківськ, 2-5 грудня 2008 р. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2008. – С. 130-133.

Поступила в редакцію 11.12.2009р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Кісіль І.С.

УДК 622.691.4.052.012

МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ЗА ІНТЕГРАЛЬНИМИ ДІАГНОСТИЧНИМИ ОЗНАКАМИ

М. І. Горбійчук, О. А. Скріпка, С. Т. Самуляк

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (80342)504708

Запропонований метод прогнозування залишкового ресурсу відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату за допомогою політропного коефіцієнта корисної дії та внутрішньої потужності, які визначені як функції від приведених об’ємної та масової продуктивності відповідно. Вказані залежності досить повно характеризують роботу нагнітача і є основою для визначення запропонованих діагностичних ознак його технічного стану.

Ключові слова: газоперекачувальний агрегат, прогнозування ресурсу, інтегральна діагностична ознака, граничний ресурс, вібрація, ідентифікація.

Предложен метод прогнозирования остаточного ресурса центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата с помощью политропного коэффициента полезного действия и внутренней мощности, которые определены как функции от приведенных объемной и массовой продуктивностей нагнетателя соответственно. Указанные зависимости довольно полно характеризуют работу нагнетателя и являются основой для определения предложенных интегральных диагностических признаков его технического состояния.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, прогнозирование ресурса, интегральный диагностический признак, предельный ресурс, вибрация, идентификация.

A method for predicting a residual life of centrifugal blowers of gas pumping unit using the polytropic efficiency and internal power, which are defined as a functions of volume and mass productivity respectively, is proposed. Given dependencies quite fully characterize blower's operation and are the basis for determining the proposed integral diagnostic features of its technical condition.

Keywords: gas pumping aggregate, prognostication of resource, integral diagnostic sign, maximum resource, vibration, authentication.

Газоперекачувальний агрегат (ГПА) у процесі експлуатації знаходиться під дією інтенсивних навантажень, що зумовлює знос його вузлів і деталей. Тому виникає необхідність у плановій чи аварійній зупинці агрегату на виконання ремонту. Технічна діагностика дозволяє визначити технічний стан

ГПА та його вузлів на основі показів інформаційно-вимірвальних систем і прогнозувати його технічний стан, що є актуальною науково-практичною задачею [1].

У роботі [2] запропоновано обчислювати діагностичні ознаки як відхилення степені підвищення тиску, політропного коефіцієнта