ISSN 1993-9981 Методи та прилади контролю якості, № 23, 2009

УДК 622.692.4

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

Ю.В. Банахевич

Дочірня компанія «Укртрансгаз», Кловський узвіз, 9/1, м. Київ, 01021,
e-mail: banahevych.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, которие определенны 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, знакозмінні, 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 незрелаксованих залишкових напружень в околошовній зоні. Оскільки навіть після високого відпуску в зоні зварного шва переважно незрелаксовані 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 багатошарових 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 багатошарових кільцевих зварних швів МТ і наведених результатів досліджень в літературних джерелах [4, 6, 8, 9] розподіл несумісних залишкових деформацій апроксимуємо виразами:

$$e^0_{\beta\beta}(\alpha,\gamma) = -E^*_1 f_1(\gamma)\varphi_1(\alpha)S^0_1(\alpha),$$
$$e^0_{\alpha\alpha}(\alpha,\gamma) = -E^*_2 f_2(\gamma)\varphi_{23}(\alpha),$$
$$e^0_{\alpha\gamma}(\alpha,\gamma) = -\mathrm{E}^*_0 f_0(\gamma)\varphi_0(\alpha)S^0_0(\alpha), \qquad (1)$$

де

$$\varphi_{23}(\alpha) = \varphi_2(\alpha)S^0_2(\alpha) - \rho\,\varphi_3(\alpha)S^0_3(\alpha),$$
$$\varphi_i(\alpha) = 1 + s_i\frac{\alpha^2}{\alpha_i^2} - (3+2s_i)\frac{\alpha^4}{\alpha_i^4} + (2+s_i)\frac{\alpha^6}{\alpha_i^6},$$
$$\varphi(\alpha) = \frac{\alpha}{\alpha} - 3\frac{\alpha^3}{\alpha^3} + 3\frac{\alpha^5}{\alpha^5} - \frac{\alpha^7}{\alpha^7},$$
$$f_i(\gamma) = 1 + q_i\frac{\gamma}{h} - n_i\frac{\gamma^2}{h^2},\ n_0 = 1 - q_0,\ q_0 > 1,$$
$$i = 1,2,3; \qquad (2)$$

$S^0_i(\alpha)$ – функції Хевісайда; $S^0_i(\alpha) = 1$, $|\alpha| \le \alpha_i$; $S^0_i(\alpha) = 0$, $|\alpha| > \alpha$; $\alpha = \frac{b}{R}$, $i = 0,1,2,3$; b_i – координати границь зон залишкових деформацій; E^*_i, α_i, ρ, 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

$$\sigma_{\alpha\alpha}(\alpha,\gamma) = k_1\sigma_T\,\hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha,\gamma),$$
$$\sigma_{\beta\beta}(\alpha,\gamma) = k_1\sigma_T\,\hat{\sigma}_{\beta\beta}(\alpha,\gamma), \qquad (3)$$

де

$$\hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha,\gamma) = \frac{\lambda}{2(1-\mu^2)}\frac{\gamma}{h}\Bigg\{-\sqrt{3(1-\mu^2)}\times$$
$$\times\left(1-\frac{n_1}{3}\right)F_{21}(\alpha) + \mu q_1 F_{11}(\alpha) +$$
$$+ Kq_2\left[F_{12}(\alpha) - \rho F_{13}(\alpha)\right]\Bigg\} +$$
$$+\frac{1}{1-\mu^2}\left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2}\right)\Big\{\mu n_1\varphi_1(\alpha)S^0_1(\alpha) +$$
$$+ K n\left[\varphi(\alpha)S(\alpha) - \rho\,\varphi(\alpha)S(\alpha)\right]\Big\},$$
$$\hat{\sigma}_{\beta\beta}(\alpha,\gamma) = \hat{W}(\alpha) + \mu\hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha,\gamma) + f_1(\gamma)\varphi_1(\alpha)S^0_1(\alpha). \qquad (4)$$

Тут $F_{ij}(\alpha) = \int_{-\alpha_j}^{\alpha_j}\varphi_j(\zeta)\exp\left[-\lambda|\alpha-\zeta|\right]\times$

$$\times\left[\cos\lambda(\alpha-\zeta) + (-1)^{i-1}\sin\lambda|\alpha-\zeta|\right]d\zeta, \qquad (5)$$
$$i = 1,2;\ j = 1,2,3.$$

У вирази (3) – (5) входять σ_T – межа текучості; μ – коефіцієнт Пуассона; ζ - змінна інтегрування і довільні числові параметри k_1, k, α_i, s_i, q_i, n_i, які потрібно визначати у кожному випадку для конкретного зварного з'єднання. Для відшукання 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 $I^E_m(\sigma_{ii})$. Аналогічні характеристики, отримані розрахунковим способом позначимо через $I^T_m(\sigma_{ii})$. На цій основі будуємо функціонал нев'язки між експериментальними I^E_m і розрахунковими I^T_m значеннями характеристик залишкових напружень у такому вигляді [10]:

$$g(E^*_1,\alpha_i,s_i,q_i,n_i) =$$
$$= \sum_{c=1}^{C_1}\sum_{n=1}^{N_1}\rho_{cn}\left[I^T_c(\Omega_n;E^*_1,\alpha_i,s_i,q_i,n_i) - I^E_c(\Omega_n)\right]^2, \qquad (6)$$

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 $\left(\sigma_{+}^{E}\right)$, ультразвукового $\left(\sigma_{0}^{E}\right)$ методів та методу спекл-інтерферометрії $\left(\sigma_{\alpha\alpha}^{E}, \sigma_{\beta\beta}^{E}\right)$, то функціонал для визначення параметрів E_1^*, k, α_i, S_i, n_i, q_i можна записати у такому вигляді:

$$g(k_1,k,\alpha_i,s_i,q_i,n_i)=\sum_{n=1}^{n_1} p_n\left[k_1\sigma_T I_{+}^{(i)T}(\alpha_n)-\sigma_{+}^{E}(\alpha_n)\right]^2+$$
$$+\sum_{m=1}^{l_1} q_m\left[k_1\sigma_T I_{0}^{(i)T}(\alpha_m)-\sigma_{0}^{E}(\alpha_m)\right]^2+$$
$$+\sum_{\nu=1}^{\nu_1}\rho_\nu\left\{\left[k_1\sigma_T\hat{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha_\nu)-\sigma_{\alpha\alpha}^{E}(\alpha_\nu)\right]^2+\right.$$
$$\left.+\left[k_1\sigma_T\hat{\sigma}_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha_\nu)-\sigma_{\beta\beta}^{E}(\alpha_\nu)\right]^2\right\}, \qquad (7)$$

де n_1, l_1, ν_1 – кількість перерізів труби, в яких проводять вимірювання; p_n, q_m, ρ_ν – 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.

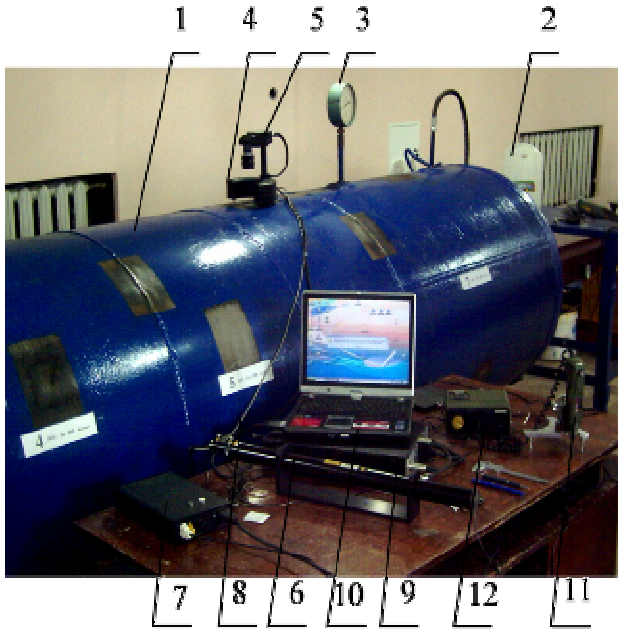


Рисунок 1 – Дослідно-вимірювальний комплекс для визначення напруженого стану зварних стиків труб

Труби з зовнішнім діаметром 1020 мм виготовлені згідно ТУ 14-3-1698-1985 з такими технічними характеристиками: допуск на відхилення в радіальному напрямку ± 3,0 мм, допуск на відхилення по торцях ± 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

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

де $t_{\min}$ - мінімальна товщина стінки труби в мм; R - розрахункове значення опору розтягу (стиску), яке приймаємо рівним 95 % від нормативної границі 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 багатошаровий 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 багатошарові монтажні зварні шви не піддавалися додатковій технологічній обробці. Контроль якості всіх багатошарових 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 х 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 $\sigma^{E}_{\beta\beta}$ 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.

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.

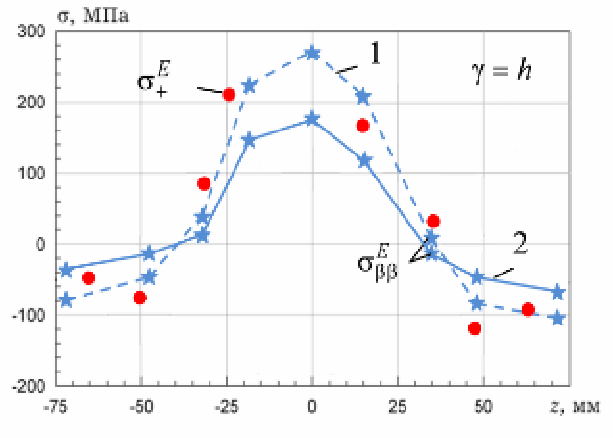


Рисунок 2 – Графічні залежності кільцевих залишкових напружень $\sigma^{E}_{\beta\beta}$ і усередненої різниці головних напружень σ^{E}_{+} в функції відстані від осі шва дослідного резервуара

ВИСНОВКИ

Застосування описаних вище дослідно-вимірювального комплексу і розрахунково-експериментального методу дозволять 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. междун. 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 метала / 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. Оперативний контроль качества и напряженного состояния сварных конструкций методами электронной ширографии 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 конструкцій / 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-вимірювальний 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.