

УДК 622.692.4

ДІАГНОСТУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАГАТОШАРОВИХ КІЛЬЦЕВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБОПРОВІДІВ

Ю. В. БАНАХЕВИЧ¹, А. В. ДРАГІЛЄВ², А. О. КИЧМА³

¹ ПАТ "УКРТРАНСГАЗ", Київ;

² Приватне підприємство "Інжинірингові технології", Київ;

³ Національний університет "Львівська політехніка"

В межах теорії оболонки побудовано математичну модель, що описує осесиметричний напружено-деформований стан багатошарових кільцевих зварних з'єднань труб під дією локалізованих біля шва залишкових несумісних деформацій. Залишкові напруження визначали на основі розв'язку обернених задач теорії оболонки з власними напруженнями та експериментальної інформації, отриманої методом спекл-інтерферометрії. Створено дослідницьке устаткування і програмне забезпечення, які дають можливість визначати і відтворювати залишкові напруження в зоні багатошарового зварного з'єднання. Наведені графічні залежності колових залишкових напружень від відстані до осі шва.

Ключові слова: багатошарове зварне з'єднання труб, залишкові напруження, функціонал нев'язки, метод спекл-інтерферометрії, діагностика напруженого стану, дослідницьке устаткування.

Надійні методи оцінювання небезпечності різного роду дефектів та пошкоджень у трубопроводах тривалої експлуатації – необхідна умова створення ефективних систем діагностування та контролю їх технічного стану [1]. Незважаючи на достатньо високий рівень розвитку діагностики стану трубопровідних систем, практичні методи розрахунку стосовно газо- та нафтопроводів ще не забезпечують бажаної точності. В елементах системи трубопровідного транспорту виникає складний, переважно двовісний напружений стан, що є результатом сумування напружень від зовнішніх навантажень та залишкових напружень. Особливе місце займають багатошарові кільцеві зварні з'єднання труб, які є однією з причин високої концентрації напружень. Залишкові напруження в цих зонах знакозмінні і нерівномірно розподілені за товщиною труби [2]. Найскладніше під час діагностування напруженого стану таких з'єднань – встановити рівень і характер розподілу в тілі труби залишкових технологічних напружень, зумовлених зварюванням. Особливо це стосується зварних кільцевих швів, виконаних у трасових умовах, які, як правило, додатково термічно не обробляють [3]. Тому однією із важливих задач діагностування технічного стану зварних з'єднань магістральних трубопроводів (МТ) тривалої експлуатації є визначення незрелаксованих залишкових напружень у біляшовній зоні.

Теоретичне формулювання задачі. Одним з ефективних підходів до визначення напружено-деформованого стану у трубопроводах є розрахунково-експериментальний метод, який ґрунтується на використанні розв'язків рівнянь теорії оболонки з власними напруженнями і експериментальної інформації, отриманої неруйнівними методами [4, 5].

Контактна особа: А. О. КИЧМА, e-mail: akychma@gmail.com

Багатошарове кільцеве з'єднання труб моделюємо круговою циліндричною оболонкою з товщиною стінки $2h$, що знаходиться у рівновазі під дією поля залишкових деформацій e_{jj}^0 . Матеріал оболонки вважаємо ізотропним.

За відсутності осьових зусиль рівняння для визначення функції прогину $W(\alpha)$ в межах класичної теорії оболонок можна записати у вигляді

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4\lambda^4 \right) W = -2R E_1^* \left[2\lambda^4 \left(1 - \frac{4}{3} m_1 \right) - \nu m_1 \frac{R}{h} \frac{d^2}{d\alpha^2} \right] \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha) + 2 E_2^* m_2 \frac{R^2}{h} \frac{d^2}{d\alpha^2} \varphi_2(\alpha) S_2^0(\alpha), \quad (1)$$

де α – безрозмірна координата, $\alpha = z/R$, z – відстань точки вздовж осі труби від початкового поперечного перерізу, який суміщатимемо з площиною, що проходить через середину зварного шва; R – радіус серединної поверхні труби; $\lambda^4 = -3R(1-\nu^2)/4h^2$; ν – коефіцієнт Пуассона, $\varphi_i(\alpha)$ – функції, що характеризують розподіл пластичних деформацій вздовж твірної труби.

Розв'язавши рівняння (1), отримуємо формули для обчислення залишкових осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і колових $\sigma_{\beta\beta}$ напружень у довільній точці труби, викликаних залишковими деформаціями після зварювання,

$$\sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) = \frac{E E_1^* \lambda}{1-\nu^2} \frac{\gamma}{h} \left[-\frac{\sqrt{3(1-\nu^2)}}{2} \left(1 - \frac{4}{3} m_1 \right) F_{21}(\alpha) + \nu m_1 F_{11}(\alpha) + k m_2 F_{12}(\alpha) \right] + \frac{1}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) [\nu m_1 \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha) + k m_2 \varphi_2(\alpha) S_2^0(\alpha)], \quad (2)$$

$$\sigma_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) = \frac{E}{R} W(\alpha) + \nu \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) - E e_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma), \quad (3)$$

де γ – координата вздовж зовнішньої нормалі до серединної поверхні труби; E – модуль пружності; $k = E_2^*/E_1^*$;

$$F_{ij}(\alpha) = \int_{-\alpha_j}^{\alpha_j} \varphi_j(\zeta) \exp[-\lambda|\alpha-\zeta|] \left[\cos \lambda(\alpha-\zeta) + (-1)^{i-1} \sin \lambda|\alpha-\zeta| \right] d\zeta, \quad i = 1, 2; \quad j = 1, 2, 3. \quad (4)$$

У вирази (2) і (3) входять довільні числові параметри E_i^* , k , α_i , m_i , s_i , що характеризують розподіл залишкових деформацій e_{jj}^0 ($j = \alpha, \beta$). Для конкретних зварних з'єднань ці параметри визначають за допомогою експериментальної інформації на основі розв'язку оберненої задачі теорії оболонок.

Щоб знайти параметри E_i^* , k , α_i , m_i , s_i , використаємо експериментальну інформацію, яку можна здобути за допомогою одного із неруйнівних методів або їх синтезу. Величини, які можна отримати експериментально, позначимо через $I_m^E(\sigma_{ii})$. Аналогічні вирази, отримані розрахунковим способом, позначимо через $I_m^T(\sigma_{ii})$. Функціонал нев'язки між експериментально визначеними і теоретично обчисленими величинами запишемо у вигляді

$$g(E_i^*, k, \alpha_i, m_i, s_i) = \sum_{m=1}^v \sum_{n=1}^{u^*} \rho_v \left[I_m^T(\Omega_n; E_i^*, k, \alpha_i, m_i, s_i) - I_m^E(\Omega_n) \right]^2, \quad (5)$$

де v – число, що відповідає кількості неруйнівних методів, які використані для одержання експериментальних результатів; u^* – кількість підобластей Ω_n , в яких вимірюються характеристики напруженого стану; ρ_v – вагові множники.

Якщо експериментально встановлені осьові та колові залишкові напруження $\sigma_{\alpha\alpha}^E$, $\sigma_{\beta\beta}^E$ отримали за результатами вимірів на зовнішній поверхні труби методом спекл-інтерферометрії [6], то функціонал для визначення параметрів E_i^* , k , α_i , m_i , s_i запишемо у вигляді

$$g(E_i^*, k, \alpha_i, m_i, s_i) = \sum_{u=1}^{u^*} \left\{ \left[k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha_{u^*}) - \sigma_{\alpha\alpha}^E(\alpha_{u^*}) \right]^2 + \left[k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha_{u^*}) - \sigma_{\beta\beta}^E(\alpha_{u^*}) \right]^2 \right\}, \quad (6)$$

де σ_T – границя текучості; $\hat{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}$ і $\hat{\sigma}_{\beta\beta}^{(i)}$ – безрозмірні осьові та колові залишкові напруження, визначені теоретично.

Використовуючи знайдені параметри, за формулами (2), (3) обчислюємо залишкові напруження $\sigma_{\alpha\alpha}$ і $\sigma_{\beta\beta}$ в будь-якій точці зварного з'єднання, включаючи і ті, які не можна отримати експериментально.

Дослідницьке устаткування для визначення напружено-деформованого стану зварних швів труб. Щоб визначити напружено-деформований стан трубопроводів, розробили дослідницьке устаткування, що складалося з напірного резервуара, виготовленого зі секцій труб зовнішнім діаметром 1020 mm, зварених між собою багатошаровими кільцевими швами, і привареними до них на торцях півсферичних днищ; комплекту вимірювальних засобів, а також пристроїв для створення необхідного тиску. Замикальний зварний шов резервуара виконували за температури 15°C ручним дуговим зварюванням, згідно з операційною технологічною картою. Циліндричні секції комплектували з труб тривалого терміну експлуатації з таких трубних сталей: 09Г2С, 13Г1С, 13Г1СУ, 17Г1С, 17Г1СУ.

Визначали залишкові напруження в зоні швів напірного резервуара 1, використовуючи метод електронної спекл-інтерферометрії [6] (рис. 1). Спекл-інтерферометричний комплекс складається з малогабаритного спекл-інтерферометра (2) з оптичною системою і опорно-юстувальним пристроєм; CCD-камери (3) з роздільною здатністю 768×576 pixels, лазера (4) з блоком живлення (5) і світлопроводом (6); приставки “Dock-Station” (7) для перетворення оптичного сигналу в цифровий і занесення в пам'ять персонального комп'ютера (ПК) (8); дрилі з підставкою для свердління (9) і блоком живлення (10).

В основі методу використано здатність лазерного випромінювання створювати певну спекл-структуру під час відбивання від поверхні напірного резервуара. За переміщення внаслідок деформації, наприклад, під час висвердлювання отвору, 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 залишкові напруження у вибраній точці біля зварного шва в осьовому і коловому напрямках.

Резервуар заповнювали водою і створювали агрегатом МП-150 внутрішній тиск p заданого рівня, який контролювали зразковим манометром з класом точності вимірювань 0,4. Зменшували тиск зворотним переливанням води у накопичувальний бак. Можливий максимальний внутрішній тиск в напірному резервуарі до 15 МПа.

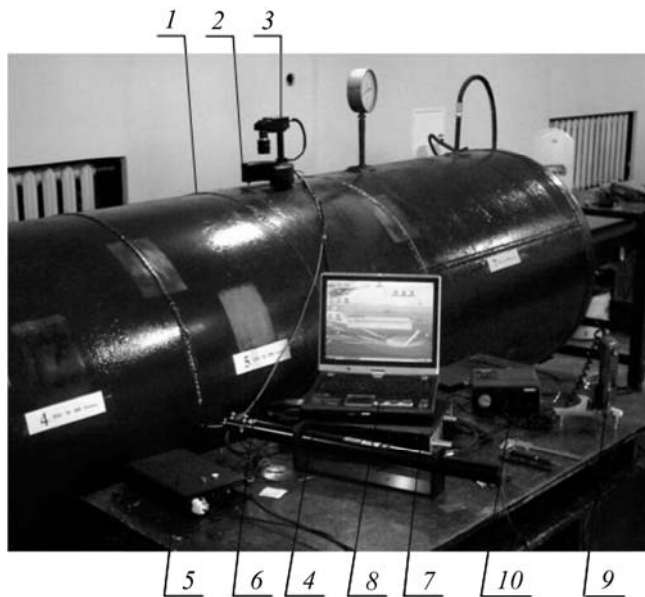


Рис. 1. Дослідницьке устаткування для визначення напружено-деформованого стану трубопроводів з використанням методу електронної спекл-інтерферометрії:
 1 – напірний резервуар; 2 – спекл-інтерферометр; 3 – CCD-камера; 4 – лазер;
 5, 10 – блоки живлення; 6 – світлопровід; 7 – приставка “Dock-Station”;
 8 – персональний комп’ютер; 9 – дріль з підставкою для свердління.

Fig. 1. The experimental device for evaluating the stress-strain state of pipelines using the electron speckle interferometry method:
 1 – pressure reservoir; 2 – speckle-interferometer; 3 – CCD-camera; 4 – laser;
 5, 10 – power unit; 6 – light diode; 7 – adaptor “Dock-Station”;
 8 – computer; 9 – drill with a drilling support.

Визначали залишкові напруження в зоні кільцевого зварного шва на зовнішній поверхні напірного резервуара (рис. 1) у такій послідовності. Спекл-інтерферометр встановлювали на попередньо підготовленій і розміченій з певним кроком по обидві сторони від зварного кільцевого багат шарового шва ділянці труби. Відбиту світлову хвилю, яка характеризує вихідний напружено-деформований стан контрольованої ділянки, за допомогою CCD-камери перетворювали в цифровий сигнал і вводили в пам’ять ПК. На відстані $z = -30$ mm від осі шва оболонки з товщиною стінки $2h_1 = 10$ mm просвердлювали ненаскрізний отвір діаметром $d = 2$ mm і глибиною $h^* = 2$ mm. Струменем стиснутого повітря звільняли отвір і контрольовану поверхню котушки від стружки і порохи. Потім розташовували спекл-інтерферометр так, як за вихідного стану. Після пружного розвантаження напружень внаслідок висвердлювання ненаскрізного отвору відбиту світлову хвилю фіксували у вигляді двох спекл-картин, отриманих до і після розвантаження залишкових напружень у тілі труби – на моніторі спостерігали інтерференційну картину смуг в околі отвору. На основі отриманої інформації за допомогою спеціального програмного забезпечення обчислювали залишкові напруження в контрольованій точці в осьовому $\sigma_{\alpha\alpha}$ і коловому $\sigma_{\beta\beta}$ напрямках. Згідно з програмою експерименту, аналогічно визначали осьові та колові залишкові напруження в зоні вищевказаного зварного шва за таких відстаней від осі шва: -20 mm, -10 mm, $+10$ mm, $+20$ mm і $+30$ mm.

Результати випроб. Наведені (рис. 2) залежності колових напружень $\sigma_{\beta\beta}^E$ на зовнішній поверхні, отриманих за допомогою спекл-інтерферометричного

комплексу, для зварного шва напірного резервуара дослідницького устаткування, що з'єднує дві котушки з товщинами стінок $t_1 = t_2 = 10$ mm, від відстані z до осі шва. Матеріал котушок: сталь 17Г1С. Під час опресування тиск у резервуарі досягав 6 МПа.

Для числових значень параметрів E_i^* , k , α_i , m_i , s_i , які характеризують градієнти розподілу вздовж труби залишкових термопластичних деформацій $e_{\beta\beta}^0$ і $e_{\alpha\alpha}^0$, проаналізовано вплив ширини зони їх локалізації на розподіл колових $\sigma_{\beta\beta}$ і осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ залишкових напружень у зоні зварного шва. Графічно зображено (рис. 3) результати числового аналізу впливу ширини зони (b_i , mm) залишкових термопластичних деформацій на розподіл колових залишкових напружень $\sigma_{\beta\beta}$ на зовнішній поверхні труби.

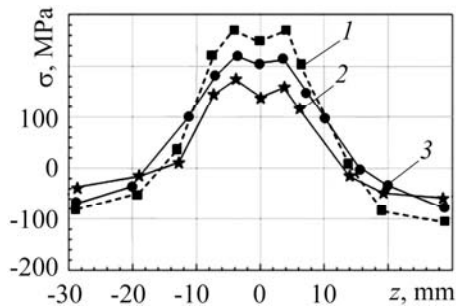


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Графічні залежності колових залишкових напружень $\sigma_{\beta\beta}^E$ від відстані z до осі шва: 1 – до опресування напірного резервуара; 2 – після опресування; 3 – залишкові колові напруження $\sigma_{\beta\beta}$, визначені згідно з виразом (3).

Fig. 2. Graphic dependences of the circumferential stresses $\sigma_{\beta\beta}^E$, depending on the distance from the weld axis z : 1 – before pressure test of the pressure reservoir; 2 – after pressure test; 3 – circular residual stresses $\sigma_{\beta\beta}$, evaluated by expression (3).

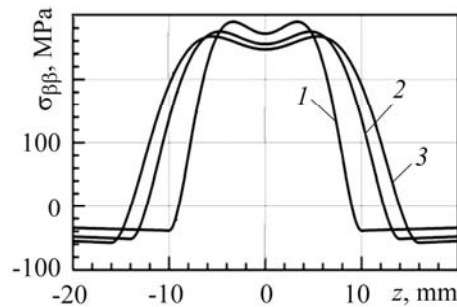


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Розподіл колових залишкових напружень $\sigma_{\beta\beta}$ на зовнішній поверхні труби залежно від ширини зони залишкових термопластичних деформацій b_i : 1 – $b_1 = 10$ mm, $b_2 = 8$ mm, $b_3 = 6$ mm; 2 – $b_1 = 14$ mm, $b_2 = 10$ mm, $b_3 = 8$ mm; 3 – $b_1 = 16$ mm, $b_2 = 12$ mm, $b_3 = 10$ mm.

Fig. 3. Distribution of circumferential residual stresses $\sigma_{\beta\beta}$ on the external pipe surface, depending on the width of residual thermal-plastic deformation zone b_i :
1 – $b_1 = 10$ mm, $b_2 = 8$ mm, $b_3 = 6$ mm;
2 – $b_1 = 14$ mm, $b_2 = 10$ mm, $b_3 = 8$ mm;
3 – $b_1 = 16$ mm, $b_2 = 12$ mm, $b_3 = 10$ mm.

Зазначимо, що подібний підхід можна використовувати і для труб після їх тривалої експлуатації, яка призводить не тільки до зміни фізико-механічних властивостей сталей [7], але і розподілу залишкових напружень.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу розподілів залишкових термопластичних деформацій у зонах кільцевих зварних швів МТ для їх аналітичного подання в межах теорії оболонок отримано вирази для обчислення залишкових напружень у довільній точці зварного з'єднання. Використовуючи експериментальні результати, шляхом мінімізації функціоналу нев'язки одержали параметри залишкових деформацій і обчислили розподіл зумовлених ними напружень у зоні зварного з'єднання.

На дослідницькому устаткуванні виконано за допомогою спекл-інтерферометричного комплексу перевірку розробленої математичної моделі та отримано

задовільне для інженерних розрахунків узгодження між експериментальними та розрахунковими результатами. Відносна похибка вимірювань не перевищує 7%. Під час опресування розглянутого напірного резервуара залишкові напруження в зоні кільцевого зварного шва зменшились на 60%, залишаючись на рівні 175 МПа.

За результатами досліджень встановлено, що зі збільшенням ширини зони залишкових термопластичних деформацій колові залишкові напруження зростають несуттєво. При цьому їх збільшення від мінімального до максимального значення за менших b_i відбувається інтенсивніше. Таким чином, під час виконання зварних з'єднань МТ необхідно визначати і використовувати раціональну форму торців труб.

РЕЗЮМЕ. В рамках теорії оболонок побудована математическа модель, которая описывает осесимметричное напряженно-деформированное состояние многослойных кольцевых сварных соединений труб под действием локализованных возле шва остаточных несовместимых деформаций. Остаточные напряжения определяли на основе решения обратных задач теории оболочек с собственными напряжениями с использованием экспериментальной информации, полученной методом спекл-интерферометрии. Создано исследовательское оборудование и программное обеспечение, дающие возможность определять и воспроизводить остаточные напряжения в зоне многослойного сварного соединения. Приведены графические зависимости кольцевых остаточных напряжений от расстояния к оси шва.

SUMMARY. The mathematical model is built in the frame of the shell theory, which describes the axial-symmetric stress-strain state of the multilayer circumferential welded joints of pipes under action of residual incompatible deformations localized near the weld. The residual stresses were evaluated based on the solution of the inverse problems of the shell theory with own stresses using the experimental data obtained by the speckle interferometry method. The experimental devices and software were created that allow the evaluation and representation of the residual stresses in the area of multilayer welded joint. The graphic dependences of circumferential residual stresses, depending on the distance from the weld axis are presented.

1. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – 1134 с.*
2. *Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных соединений. – К.: Изд-во ИНДПРОМ, 1998. – 640 с.*
3. *Махненко В. И. Совершенствование методов оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций длительного срока эксплуатации // Автомат. сварка. – 2003. – № 10–11. – С. 3–12.*
4. *Подстригач Я. С., Осадчук В. А., Марголин А. М. Остаточные напряжения, длительная прочность и надежность стеклоконструкций. – К.: Наук. думка, 1991. – 296 с.*
5. *Патент № 7910 України. Спосіб визначення напруженого стану біля зварних з'єднань трубопроводів / А. В. Драгілев, В. А. Осадчук, Ю. В. Банахевич, А. О. Кичма. – Опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7.*
6. *Методика определения остаточных напряжений в сварочных соединениях и элементах конструкций с использованием спекл-интерферометрии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий, Г. И. Ткачук // Автомат. сварка. – 2006. – № 1. – С. 25–30.*
7. *Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М. Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 2. – С. 11–20.*

(Kryzhanivskyi E. I. and Nykyforchyn H. M. Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steels of gas and oil pipelines and oil storage reservoirs // Materials Science. – 2011. – 47, № 2. – P. 127–138.)

Одержано 03.07.2013