

УДК 621.791; 622.692; 539.3

Назар І. Б., Палаш Р. В., Дзюбик А. Р.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЯХ З РІЗНОТОВЩИННИМИ ЗВАРНИМИ З'ЄДНАННЯМИ

Одним із основних завдань державної науково-технічної програми «Ресурс» [1] є розроблення засобів і методів неруйнівного контролю та діагностики технічного стану об'єктів нафтогазової промисловості України. З метою надійної оцінки працездатності таких об'єктів, серед яких значну кількість складають зварні оболонкові конструкції та споруди, необхідно застосовувати комплексний підхід, однією з важливих складових якого є визначення їх напруженого стану. Адже відомо, що залишкові напруження і деформації, зумовлені різними технологічними процесами, зокрема зварюванням, впливають на працездатність конструкцій. Як рівень, так і розподіл напружень необхідно враховувати при виготовленні та експлуатації оболонкових конструкцій, зокрема трубопроводів. Тому важливим є питання розробки і застосування сучасних методів і засобів визначення залишкових напружень, зокрема, при діагностуванні технічного стану споруд тривалої експлуатації.

Відомі різні експериментальні неруйнівні методи визначення залишкових напружень [2]. Однак вони не завжди придатні для діагностування зварних з'єднань через недостатню повну інформацію про розподіл напружень в певному об'ємі елемента конструкції. Щоб застосувати розрахункові методи [3] треба знати режими зварювання і механізми зниження напружень після зварювання. Це здебільшого не дає змоги використати ці методи для діагностики напружень у оболонкових конструкціях.

Метою роботи є пристосування для визначення напруженого стану, зокрема у різнотовщинному зварному з'єднанні розрахунково-експериментальних методів, що є важливим та актуальним завдання технічної діагностики.

Відомі приклади застосування розрахунково-експериментальних методів для визначення залишкових напружень в оболонкових конструкціях з низьколегованих сталей із зварними з'єднаннями однакової товщини [4], у випадку зварювання труб, які виготовлені з високолегованих сталей [5]. Водночас надійна оцінка працездатності зварних різнотовщинних оболонкових конструкцій вимагає комплексного підходу, важливою складовою якого є напружений стан в їх елементах, особливо в зонах зварних з'єднань, які є концентраторами напружень.

В різнотовщинних зварних з'єднаннях зварювальні залишкові напруження знакозмінні, нерівномірно розподілені за товщиною стінки та вздовж осі труби і можуть суттєво впливати на рівень та характер розподілу сумарних експлуатаційних напружень.

Для моделювання напруженого стану в зоні кільцевих зварних з'єднань різнотовщинних труб застосовано розвинутий в роботах [5–7] розрахунково-експериментальний метод, який ґрунтується на експериментальній інформації, що отримана із застосуванням експериментальних методів, і розв'язках обернених задач теорії оболонок з власними напруженнями. Для побудови ключових рівнянь, які описують напружений стан кільцевих швів стикових зварних з'єднань різнотовщинних труб, прийнято модель циліндричної оболонки, складеної із частин постійної товщини (рис. 1).

Елементи розглянутої оболонки віднесено до триортогональних систем координат  $a, b, g_i$ , де  $a = z/R$ ,  $z$  – координата вздовж осі оболонки (початок координат вибрано в площині шва);  $b$  – кутова координата;  $g_i$  – координата вздовж зовнішніх нормалей до серединних поверхонь  $i$ -х складових, радіуси яких позначимо через  $R_1, R_2$  (рис. 1). Локалізовані біля шва коліві  $e_{bb}^0$  і осьові  $e_{aa}^0$  несумісні залишкові деформації подано у вигляді:

$$e_{ll}^0(a, g) = \begin{cases} e_{ll}^{01}(a, g), & a \leq 0, \\ e_{ll}^{02}(a, g), & a \geq 0, \end{cases} \quad l = a, b. \quad (1)$$

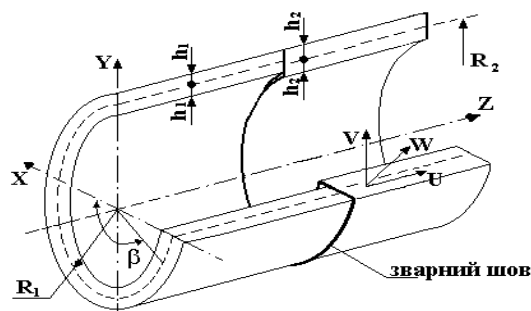


Рис. 1. Модель циліндричної оболонки із двох частин різної товщини

При цьому на основі узагальнення розрахункових і експериментальних даних з літературних джерел про розподіл термопластичних залишкових деформацій біля зварного шва множини функцій  $e_{ij}^0$  апроксимовано виразами:

$$e_{bb}^{0i}(\mathbf{a}, g_i) = -E_{1i}^* f_{1i}(g_i) j_{1i}(\mathbf{a}) S_{1i}^0(\mathbf{a}); \quad (2)$$

$$e_{aa}^{0i}(\mathbf{a}, g_i) = -E_{2i}^* f_{2i}(g_i) j_{2i}(\mathbf{a}) S_{2i}^0(\mathbf{a});$$

$$f_{ij}(g) = 1 - m_{ij} \left[ 1 - \frac{g}{h_i} \right]^2; \quad j_{ij} = 1 + p_{ij} \frac{a^2}{a_{ij}^2} - (3 + 2p_{ij}) \frac{a^4}{a_{ij}^4} + (2 + p_{ij}) \frac{a^6}{a_{ij}^6}, \quad i, j = 1, 2. \quad (3)$$

Тут  $f_{ij}, j_{ij}$  – функції, що описують зміну термопластичних деформацій за товщиною та вздовж осі труби відповідно [5,7];  $S_{ij}^0(\mathbf{a})$  – одиничні східчасті функції:

$$S_{ij}^0(\mathbf{a}) = 1, \quad |\mathbf{a}| \leq |\mathbf{a}_{ij}|; \quad S_{ij}^0(\mathbf{a}) = 0, \quad |\mathbf{a}| > |\mathbf{a}_{ij}|; \quad (w_{12}(\mathbf{a}) = e^{-L_2 a} \cos L_2 a, \quad w_{22}(\mathbf{a}) = e^{-L_2 a} \sin L_2 a),$$

$E_{ij}^*, m_{ij}, p_{ij}$  – числові параметри;  $\mathbf{a}_{ij} = z_{ij} / R_1$ ,  $z_{ij}$  – координати меж зон колових  $e_{bb}^0$  і осьових  $w_{11}(\mathbf{a}) = e^{L_1 a} \cos L_1 a$ ,  $w_{21}(\mathbf{a}) = e^{L_1 a} \sin L_1 a$ , деформацій.

З умови неперервності цих деформацій в перерізі  $a = 0$  встановлено наступні зв'язки між параметрами  $E_{ij}^*, m_{ij}$ :

$$\overline{W}_i(\mathbf{j}) = A_{1i} w_{1i}(\mathbf{a}) + A_{2i} w_{2i}(\mathbf{a}) + \overline{W}_{0i}(\mathbf{j}), \quad i = 1, 2; \quad E_{21}^* = E_{22}^* = E_2^*; \quad m_{12} = y_2^2 m_1; \quad \overline{W}_i(\mathbf{j}), \quad (4)$$

де позначено  $m_{11} = m_1$ ,  $m_{21} = m_2$ ,  $y_2 = h_2 / h_1$ .

Графіки функцій:

$$j_i(\mathbf{a}) = j_{i1}(\mathbf{a}) S_{i1}^0(\mathbf{a}) + j_{i2}(\mathbf{a}) S_{i2}^0(\mathbf{a}), \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

Для деяких значень параметрів  $S_{ij}, z_{ij}$  зображені на рис. 2 і 3.

Прогин оболонки  $I_i^4 = \frac{3R_1^2 \hat{m} r_i^2}{4h_i^2}$ ,  $r_i = \frac{R_1}{R_i}$ ,  $k = \frac{E_2^*}{E_1^*}$ ,  $y_1 = 1$ ,  $\hat{m} = 1 - m^2$ ,  $m$  позначено через  $W_1(\mathbf{j})$  для  $a \leq 0$  і  $W_2(\mathbf{j})$  для  $i = 1, 2$ , а безрозмірні функції:

$$\overline{W}_i(\mathbf{a}) = \frac{1}{E_1^* R_1} W_i(\mathbf{a}), \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

Використавши вихідні співвідношення класичної теорії оболонок з власними напруженнями і вирази (1)–(6), ключові рівняння для визначення функцій прогину  $\overline{W}_i(\mathbf{j})$  подано у вигляді:

$$\left( \frac{d^4}{da^4} + 4I_i^4 \right) \overline{W}_i = -2 \frac{R_i}{R_1} \left[ 2I_i^4 \left( 1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1 \right) - m y_i^2 m_1 \frac{R_1 r_i}{h_i} \frac{d^2}{da^2} \right] \times$$

$$\times j_{1i}(a) S_{i1}^0(a) + 2k y_i^2 m_2 \frac{R_1}{h_i} \frac{d^2}{da^2} [j_{2i}(a) S_{i2}^0(a)], \quad i = 1, 2, \quad (7)$$

де  $I_i^4 = \frac{3R_1^2 \hat{m} r_i^2}{4h_i^2}$ ,  $r_i = \frac{R_1}{R_i}$ ,  $k = \frac{E_2^*}{E_1^*}$ ,  $y_1 = 1$ ,  $\hat{m} = 1 - m^2$ ,  $m$  – коефіцієнт Пуассона.

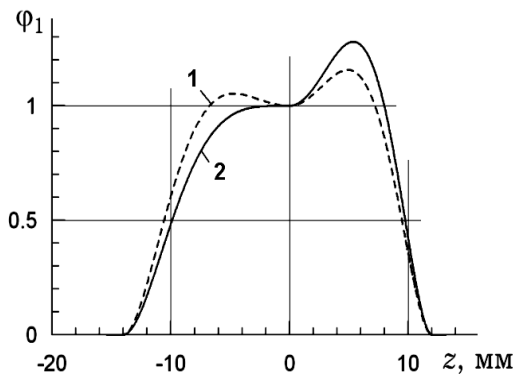


Рис. 2. Графіки функції  $j_1(a)$ :

$z_{11} = -14, z_{12} = 12$ ; 1 –  $p_{11} = 1, p_{12} = 2$ ;  
2 –  $p_{11} = 0, p_{12} = 3$

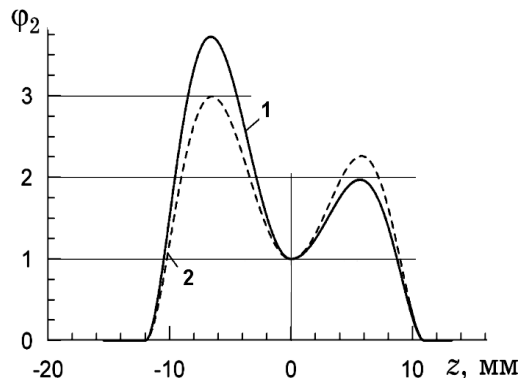


Рис. 3. Графіки функції  $j_2(a)$ :

$z_{11} = -12, z_{12} = 11$ ; 1 –  $p_{21} = 20, p_{22} = 8$ ;  
2 –  $p_{21} = 15, p_{22} = 10$

Застосувавши операцію згортки фундаментальних розв'язків рівнянь (7) з їх правими частинами і розв'язки однорідних рівнянь, після відповідних перетворень загальні розв'язки  $\overline{W}_i(j)$  зображено так [7]:

$$\overline{W}_i(j) = A_{1i} w_{1i}(a) + A_{2i} w_{2i}(a) + \overline{W}_{0i}(j), \quad i = 1, 2; \quad (8)$$

$$w_{11}(a) = e^{l_1 a} \cos l_1 a; \quad w_{21}(a) = e^{l_1 a} \sin l_1 a; \quad w_{12}(a) = e^{-l_2 a} \cos l_2 a; \quad w_{22}(a) = e^{-l_2 a} \sin l_2 a; \quad (9)$$

$$\overline{W}_{0i}(a) = -I_i \frac{R_i}{R_1} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1 \right) F_{11}^{(i)}(a) + \frac{y_i^2}{\sqrt{3\hat{m}}} [m m_1 F_{21}^{(i)}(a) + k m_2 F_{22}^{(i)}(a)] \right];$$

$$F_{ij}^{(1)}(a) = \int_{-a_{j1}}^0 j_{j1}(x) K_i^{(1)}(x-a) dx; \quad F_{ij}^{(2)}(a) = \int_0^{a_{j1}} j_{j2}(x) K_i^{(2)}(x-a) dx;$$

$$K_j^{(i)}(x-a) = e^{-l_i |x-a|} [\cos l_i |x-a| + (-1)^{j-1} \sin l_i |x-a|]. \quad (10)$$

Сталі інтегрування  $A_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ), що входять у формули (8), знайдено із умов ідеального механічного контакту, тобто рівності переміщень кутів повороту, моментів і поперечних сил в перерізі  $a = 0$ .

На основі співвідношень (8)–(10) і відомих в літературі формул отримано вирази для обчислення осьових  $S_{aa}$  і колових (кільцевих)  $S_{bb}$  залишкових напружень в трубах в зоні зварного з'єднання:

$$s_{aa}^{(i)}(\mathbf{a}, \mathbf{g}_i) = -EE_1^* \sqrt{\frac{3}{\hat{m}}} \frac{R_1}{R_i} \frac{g_i}{h_i} \Omega_i(\mathbf{a}) + \frac{I_i}{\hat{m}} \frac{g_i}{h_i} \left[ \sqrt{\frac{3\hat{m}}{2}} \times \left( 1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1 \right) F_{21}^{(i)}(\mathbf{a}) + y_i^2 m m_1 F_{11}^{(i)}(\mathbf{a}) + y_i^2 k m_1 F_{12}^{(i)}(\mathbf{a}) \right] + \frac{y_i^2}{\hat{m}} \left( \frac{1}{3} - \frac{g_i^2}{h_i^2} \right) [m m_j j_{1i}(\mathbf{a}) S_{1i}^0(\mathbf{a}) + k m_j j_{2i}(\mathbf{a}) S_{2i}^0(\mathbf{a})]. \quad (11)$$

$$s_{bb}^{(i)}(\mathbf{a}, \mathbf{g}_i) = EE_1^* \frac{R_1}{R_i} \overline{W}_i(\mathbf{a}) + m s_{aa}^{(i)}(\mathbf{a}, \mathbf{g}_i) + \left[ 1 - y_i^2 m_1 \left( 1 - \frac{g_i}{h_i} \right)^2 \right] j_{1i}(\mathbf{a}) S_{1i}^0(\mathbf{a}), \quad (12)$$

де  $\Omega_1(\mathbf{a}) = -A_{11} w_{21}(\mathbf{a}) + A_{21} w_{11}(\mathbf{a})$ ;  $\Omega_2(\mathbf{a}) = A_{12} w_{22}(\mathbf{a}) - A_{22} w_{12}(\mathbf{a})$ ;  $E$  – модуль Юнга.

У формули (12) входять числові параметри  $E_1^*$ ,  $k$ ,  $m_i$ ,  $p_{ij}$ ,  $a_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ). З метою їх визначення необхідно мати експериментальну інформацію про залишкові напруження у в оболонкових конструкціях, отриману за допомогою неруйнівних методів. Для цього необхідно побудувати функціонал неув'язки між експериментально визначеними і теоретично обчисленими характеристиками напруженого стану. За найближчий розв'язок оберненої задачі [6, 7] приймаються величини, що забезпечують найменше значення функціонала.

Якщо у виразах (12) прийняти товщину труб однаковою ( $h_1 = h_2$ ) і врахувати, що модель циліндричної оболонки (рис. 1) є симетричною відносно осі зварного шва (умова  $\mathbf{a} = 0$ ), то отримаємо співвідношення для обчислення напружень в околі кільцевого зварного шва стикового зварного з'єднання труб рівної товщини [5, 6].

## ВИСНОВКИ

Виконаний чисельний аналіз отриманих виразів показав, що збільшення ширини зони пластичних деформацій розширює область дії кільцевих напружень та незначно впливає на їх характер розподілу на поверхнях труб. Протилежна картина спостерігається при зростанні градієнту вздовж осі труби. Також, на відміну від стиків рівної товщини, величина напружень в глибинних шарах труб може значно перевищувати їх рівень на поверхнях.

Отже, розроблений математичний апарат та доступні експериментальні дані дають змогу враховувати реальний стан експлуатації оболонкових конструкцій (зміну поля напружень внаслідок техногенного чи природного впливу) та отримати величину залишкових напружень у будь-якій точці різновтовщинного зварного з'єднання.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Постанова Кабінету міністрів України від 8 жовтня 2004 року № 1331. Державна науково-технічна програма «Ресурс». Розпорядження Кабміну України від 11 червня 2003 року № 351.
2. Экспериментальные методы исследования деформации и напряжений : справочное пособие / Б. С. Касаткин, А. Б. Кедрин, Х. М. Лобанов и др. – К. : Наукова думка, 1981. – 584 с.
3. Осадчук В. Неруйнівний метод визначення залишкових напружень у зварних оболонках / В. Осадчук, М. Большаков, В. Палаш. – *Машинознавство*, 1997. – С. 5–9.
4. Дзюбик А. Р. Метод визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях коловим швом сталей, схильних до гартування / А. Р. Дзюбик, І. Б. Назар, Р. В. Палаш // *Машинознавство*. – 2002. – № 4 – С. 33–36.
5. Палаш В. М. Напруження у трубах, з'єднаних зварним кільцевим швом / В. М. Палаш, В. М. Юськів, А. Р. Дзюбик // *Міжнародний науково-технічний журнал «Фізико-хімічна механіка матеріалів»*. – 2000. – № 4. – С. 95–99.
6. 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 р. – Том 42. – № 2. – С. 99–105.
7. Осадчук В. А. Діагностування залишкових напружень і оцінка їх впливу на статичну міцність зварних з'єднань різновтовщинних труб з дефектами типу тріщин / В. А. Осадчук, Ю. В. Пороховський, О. О. Іванчук // *Математичні методи та фізико-механічні поля*. – 2008. – 51. – № 2. – С. 133–146.