

1. ДНАОП 0.00-1.07-94 Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском.  
 2. ДНАОП 0.00-8.15-97 Порядок проведення експертизи газотранспортного обладнання.  
 3. ДСТУ 4046-2001 Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги.  
 4. ОСТ 26-01-163-84 Сосуды многослойные рулонированные стальные высокого давления. Методика ультразвукового контроля сварных соединений.  
 5. ГСТУ 3-037-2003 Посудини та апарати, що працюють під тиском. Методика

ультра звукового контролю зварних з'єднань.  
 6. ОСТ 26-01-221-86 Сосуды и аппараты многослойные рулонированные стальные высокого давления. Общие технические условия.  
 7. А.Я. Красовский, В.Н. Красику Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов. – К.: Наукова думка, 1980. – 173 с.  
 8. ДСТУ 4227-2003 Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки.  
 9. ГОСТ 14782-86 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.

УДК 622.692.4

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ РІЗНОТОВЩИНИХ КІЛЬЦЕВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

© Іванчук О.О., 2005  
 Підприємство „Трансгазбуд”, м. Київ

© Осадчук В.А., 2005  
 Національний університет „Львівська політехніка”

**Запропонована математична модель розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень в різновтовщинних кільцевих зварних з'єднаннях магістральних трубопроводів, яка базується на розв'язанні оберненої задачі теорії оболонок з власними деформаціями з використанням експериментальної інформації, отриманої неруйнівними методами**

Термін експлуатації магістральних трубопроводів (МТ) в значній мірі зумовлений корозійною стійкістю основного металу та надійністю зварних з'єднань труб [2]. Особливе місце серед зварних з'єднань займають кільцеві різновтовщинні з'єднання, які є однією із причин високої концентрації напружень. При проведенні діагностування таких з'єднань в МТ тривалості експлуатації найскладнішим є визначення рівня і характеру розподілу в тілі труби залишкових технологічних напружень, зумовлених зварюванням, оскільки ні розрахункові, ні існуючі неруйнівні методи контролю окремо взяті не дозволяють розв'язати цю проблему. Нижче запропоновано модель розрахунково-експериментального визначення залишкових технологічних напружень в різновтовщинних зварних з'єднаннях з використанням експериментальної інформації, здобутої

неруйнівними методами. Для її побудови застосовано розрахунково-експериментальний метод, що ґрунтується на розв'язанні обернених задач теорії оболонок з використанням експериментальних даних, отриманих неруйнівними методами [4]. При цьому розглянуто з'єднання різновтовщинних труб одного діаметру, коли різниця товщин стінок (максимальна з яких більша ніж 12 мм) не перевищує 3 мм. За таких умов зварювання труб проводиться без застосування перехідників проміжкової товщини [1].

Для побудови рівнянь, що описують напружений стан зварного різновтовщинного з'єднання, моделюватимемо його круговими циліндричними оболонками завтовшки  $2h_1$  і  $2h_2$  (зліва і справа від осі зварного шва) під дією локалізованих власних залишкових деформацій, зумовлених зварюванням (рис. 1).

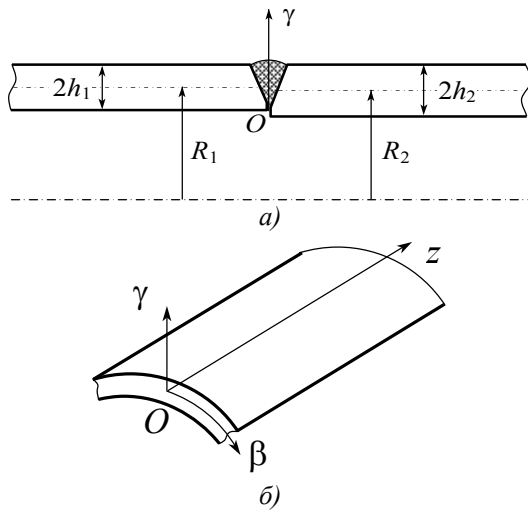


Рис. 1. Осьовий переріз зварного з'єднання (а) і триортогональна система координат (б)

Віднесемо оболонку до триортогональної системи координат  $\alpha, \beta, \gamma$ , де  $\alpha = z/R$ ,  $z$  – координата вздовж осі оболонки (початок координат вибрано в площині шва),  $R_i$  – радіуси серединних поверхонь оболонок,  $\beta$  – кутова координата,  $\gamma$  – координата вздовж зовнішньої нормалі до серединних поверхонь труби.

На основі узагальнення існуючих в літературі даних поле локалізованих біля шва колових  $e_{\beta\beta}^0$  і осьових  $e_{\alpha\alpha}^0$  залишкових деформацій, що зумовлюють залишкові напруження, з урахуванням їх рівності на межі контакту двох труб апроксимуємо виразами

$$e_{\beta\beta}^{0i}(\beta, \gamma) = -\mathbf{E}_1^* f_i(\gamma) \Pi_{1i}(\beta) S_{1i}^0(\beta);$$

$$e_{\alpha\alpha}^{0i}(\beta, \gamma) = -\mathbf{E}_2^* f_i(\gamma) \Pi_{2i}(\beta) S_{2i}^0(\beta); \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

де

$$f_i(\gamma) = 1 - m_i \left( 1 - \frac{\gamma}{h_i} \right)^2,$$

$$\varphi_{ji}(\alpha) = 1 + s_{ji} \frac{\alpha^2}{\alpha_{ji}^2} - (3 + 2s_{ji}) \frac{\alpha^4}{\alpha_{ji}^4} + (2 + s_{ji}) \frac{\alpha^6}{\alpha_{ji}^6},$$

$j = 1, 2;$

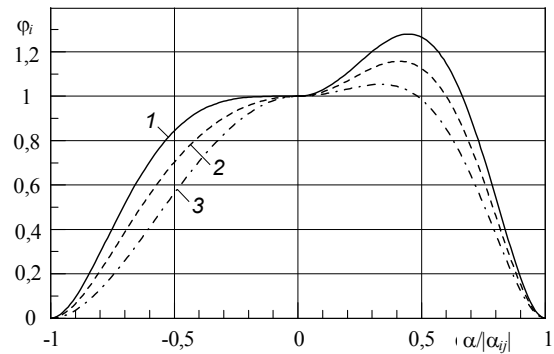
$$S_{1i}^0(\alpha) = 1, \quad |\alpha| \leq |\alpha_{1i}|; \quad S_{1i}^0(\alpha) = 0, \quad |\alpha| > |\alpha_{1i}|;$$

$$S_{2i}^0(\alpha) = 1, \quad |\alpha| \leq |\alpha_{2i}|; \quad S_{2i}^0(\alpha) = 0, \quad |\alpha| > |\alpha_{2i}|;$$

$$i = 1, \alpha \leq 0; \quad i = 2, \alpha \geq 0;$$

$\mathbf{E}_i^*, s_{ji}, m_i$  – числові параметри.

Графіки функцій  $\varphi_i(\alpha)$  для деяких значень параметрів  $s$  зображені на рис. 2.



1:  $s_{11} = 0, s_{12} = 3$ ; 2:  $s_{11} = -1, s_{12} = 2$ ;  
3:  $s_{11} = -2, s_{12} = 1$

Рис. 2. Графіки функції  $\varphi_i(\alpha)$

У цьому випадку вираз для функції прогину  $w(\alpha)$ , за допомогою якої отримуються співвідношення для обчислення колових і осьових напружень в зварному з'єднанні [3], буде таким:

$$w(\alpha) = \begin{cases} w_1(\alpha), & \alpha \leq 0, \\ w_2(\alpha), & \alpha \geq 0, \end{cases} \quad (2)$$

а ключові диференціальні рівняння для визначення функцій  $w_i(\alpha)$  будуть такими:

$$\left( \frac{d^4}{d\beta^4} + 4\lambda_i^4 \right) w_i = -2R_i \mathbf{E}_i^* \left[ 2\lambda_i^4 \left( 1 - \frac{4}{3} m_i \right) - \right.$$

$$\left. - m m_i \frac{R_i}{h_i} \frac{d^2}{d\beta^2} \right] \Pi_{1i}(\beta) S_{1i}^0(\beta) +$$

$$+ 2\mathbf{E}_2^* m_2 \frac{R^2}{h} \frac{d^2}{d\beta^2} \Pi_{2i}(\beta) S_{2i}^0(\beta), \quad (3)$$

де  $\lambda_i^2 = 3R_i^2(1 - \mu^2)/(4h_i^2)$ ;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Розв'язок цих рівнянь подамо у формі

$$\bar{w}_i(\beta) = A_{1i} \Pi_{1i}(\beta) + A_{2i} \Pi_{2i}(\beta) - \lambda_i \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{4}{3} m_i \right) F_{11}^{(i)}(\beta) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\sqrt{3(1 - \mu^2)}} \left[ \mu m_1 F_{21}^{(i)}(\alpha) + k m_2 F_{22}^{(i)}(\alpha) \right] \right\}, \quad (4)$$

де  $\bar{w}_i(\beta) = w_i(\beta)/(E_i^* R_i)$ ;  $\omega_{11}(\alpha) = e^{\lambda_1 \alpha} \cos \lambda_1 \alpha$ ;

$\omega_{21}(\alpha) = e^{\lambda_1 \alpha} \sin \lambda_1 \alpha$ ;  $\omega_{12}(\alpha) = e^{-\lambda_2 \alpha} \cos \lambda_2 \alpha$ ;

$\omega_{22}(\alpha) = e^{-\lambda_2 \alpha} \sin \lambda_2 \alpha$ ;

$$F_{1j}^{(1)}(\alpha) = \int_{-\alpha_{j1}}^0 \varphi_{j1}(\zeta) K_1^{(1)}(\zeta - \alpha) d\zeta;$$

$$F_{2j}^{(1)}(\alpha) = \int_{-\alpha_{j1}}^0 \varphi_{j1}(\zeta) K_2^{(1)}(\zeta - \alpha) d\zeta; \quad (5)$$

$$F_{1j}^{(2)}(\alpha) = \int_0^{\alpha_{j2}} \varphi_{j2}(\zeta) K_1^{(2)}(\zeta - \alpha) d\zeta;$$

$$F_{2j}^{(2)}(\alpha) = \int_0^{\alpha_{j2}} \varphi_{j2}(\zeta) K_2^{(2)}(\zeta - \alpha) d\zeta;$$

$$K_j^{(i)}(\zeta - \alpha) = \exp[-\lambda_i |\zeta - \alpha|] \times \\ \times [\cos \lambda_i (\zeta - \alpha) + (-1)^{j-1} \sin \lambda_i |\zeta - \alpha|]; \quad i, j = 1, 2.$$

Сталі інтегрування  $A_{ij}$  визначаються із умов ідеального механічного контакту, тобто рівності переміщень  $w_i$ , кутів повороту  $\theta_{li}$ , моментів  $M_{li}$  і перерізуючих сил  $Q_{li}$  в перерізі  $\alpha = 0$ , які в рамках класичної теорії оболонок подамо у такому вигляді:

$$w_1 = w_2; \quad \frac{1}{R_1} \frac{dw_1}{d\alpha} = \frac{1}{R_2} \frac{dw_2}{d\alpha}; \quad M_{11} = M_{12}; \\ \frac{1}{R_1} \frac{dM_{11}}{d\alpha} = \frac{1}{R_2} \frac{dM_{12}}{d\alpha}, \quad (6)$$

де  $M_{li} = -\frac{D_{li}}{R_i^2} \left[ \frac{d^2 w_i}{d\alpha^2} + R_i^2 (\kappa_{\alpha\alpha}^{0i} + \mu \kappa_{\beta\beta}^{0i}) \right];$

$$\kappa_{ll}^{0i} = \frac{3}{2h_i^3} \int_{-h_i}^{h_i} e_{ll}^0(\alpha, \gamma) \gamma d\gamma \quad (l = \alpha, \beta);$$

$$D_{li} = \frac{2Eh_i^3}{3(1-\mu^2)}.$$

Підставляючи вирази (4), (6) у формули для визначення напружень [3], отримаємо співвідношення для обчислення осьових  $\sigma_{\alpha\alpha}$  і колових (кілецевих)  $\sigma_{\beta\beta}$  залишкових напружень у довільній точці різновтовщинного зварного з'єднання труб, тобто

$$\hat{y}_6^{(i)}(\beta, \gamma) = -\sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} \frac{\Gamma}{h_i} \mathbf{\Pi}(\beta) + \\ + \frac{\Lambda_i}{1-\mu^2} \frac{\Gamma}{h_i} \left[ -\frac{\sqrt{3(1-\mu^2)}}{2} \left( 1 - \frac{4}{3} m_1 \right) F_{21}^{(i)}(\beta) + \right. \\ \left. + m m_1 F_{11}^{(i)}(\beta) + k m_2 F_{12}^{(i)}(\beta) \right] + \frac{1}{1-\mu^2} \left( \frac{1}{3} - \frac{\Gamma^2}{h^2} \right) \times \\ \times \left[ m m_1 \psi_{1i}(\beta) S_{1i}^0(\beta) + k m_2 \psi_{2i}(\beta) S_{2i}^0(\beta) \right]; \\ \hat{y}_{\text{вв}}^{(i)}(\beta, \gamma) = \bar{w}_i(\beta) + m \bar{y}_{\text{оо}}^{(i)}(\beta, \gamma) + f_1(\gamma) \psi_{1i}(\beta) S_{1i}^0(\beta), \quad (7)$$

де  $\hat{\sigma}_{jj}^{(i)}(\alpha, \gamma) = \sigma_{jj}^{(i)} / (E \mathcal{E}_1^*); \quad k = \mathcal{E}_2^* / \mathcal{E}_1^*;$

$$\Omega_1(\alpha) = -A_{11} \omega_{21}(\alpha) + A_{21} \omega_{11}(\alpha);$$

$$\Omega_2(\alpha) = A_{12} \omega_{22}(\alpha) - A_{22} \omega_{12}(\alpha).$$

В залежності (7) для визначення залишкових напружень входять невідомі параметри  $\mathcal{E}_1^*, k, \alpha_{ji}, m_i, s_{ji}$ . Для їх знаходження використовують експериментальну інформацію про залишкові напруження в трубопроводах, яку можна отримати за допомогою неруйнівних методів.

Для оцінки напруженого стану трубопроводів в умовах експлуатації найбільш широкого застосування із фізичних методів набули електромагнітний та ультразвуковий. При цьому за допомогою електромагнітного методу визначають усереднену в приповерхневому шарі за площею контакту електромагнітного перетворювача з площею поверхні труби різницю головних напружень  $\sigma_+^E$ , а ультразвуковим методом – різницю головних напружень  $\sigma_0^E$  в об'ємі по всій товщині труби, що знаходиться під поверхнею її контакту з п'єзоелектричним перетворювачем. Перспективним неруйнівним методом для оцінки напруженого стану зварних з'єднань є розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України метод голографічної спеклінтерферометрії, за допомогою якого вимірюють головні напруження  $\sigma_{\alpha\alpha}^E, \sigma_{\beta\beta}^E$  в точках на поверхні зварного з'єднання.

Використавши експериментальну інформацію, отриману за допомогою електромагнітного методу і голографічної спеклінтерферометрії, будують функціонал у вигляді

$$g(\mathcal{E}_1^*, k, \alpha_{ji}, m_i, s_{ji}) = \sum_{n=1}^{N_1} p_n \left[ E \mathcal{E}_1^* J_+^T(\alpha_n) - \sigma_+^E(\alpha_n) \right]^2 + \\ + \sum_{v=1}^{N_2} \rho_v \left\{ \left[ E \mathcal{E}_1^* \hat{\sigma}_{\beta\beta}(\alpha_v, h) - \sigma_{\beta\beta}^E(\alpha_v, h) \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[ E \mathcal{E}_1^* \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha_v, h) - \sigma_{\alpha\alpha}^E(\alpha_v, h) \right]^2 \right\}; \quad (8)$$

де  $J_+^T = \frac{1}{\psi_0} \iint_{\psi} [\bar{w}_i(\beta_n) - (1-m) \bar{y}_{\text{оо}}^{(i)}(\beta_n) + \psi_{1i}(\beta_n) \times S_{1i}^0(\beta_n)] d\psi;$   $\psi$  – поверхня контакту електромагнітного перетворювача з поверхнею труби;  $\psi_0$  – її площа;  $\alpha_n$  – координати центра перетворювача;  $\alpha_v$  – точки поверхні труби, в яких проводились вимірювання за допомогою методу голографічної спеклінтерферометрії;  $N_1, N_2$  – кількість перерізів труби, в яких проводились вимірювання;  $p_n, \rho_v$  –

вагові множники.

Далі шляхом мінімізації функціонала (8) знаходять такі значення параметрів  $\mathcal{E}_1^*$ ,  $k$ ,  $\alpha_{ji}$ ,  $m_i$ ,  $s_{ji}$ , які забезпечують мінімальну нев'язку між експериментально визначеними і аналогічними теоретично обчисленими характеристиками напружень. Після знаходження невідомих параметрів обчислюють залишкові напруження у довільній точці різновисинного зварного з'єднання, зокрема ті, які не можна отримати експериментально.

Для кільцевого зварного з'єднання труб різної товщини ( $\varnothing = 1420$  мм,  $2h_1 = 12$  мм,  $2h_2 = 15$  мм, матеріал Ст. 17Г1С,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0.3$ ) у випадку, коли залишкові деформації  $\sigma_{\beta\beta}^0$  і  $\sigma_{\alpha\alpha}^0$  описуються виразами (1), в яких задані такі значення параметрів:  $b_{11} = 12$  мм;  $b_{21} = 6$  мм;  $b_{12} = 15$  мм;  $b_{22} = 7,5$  мм;  $s_{11} = 0$ ;  $s_{12} = -1$ ;  $s_{21} = 3$ ;  $s_{22} = 2$ ;  $m_1 = 0,0625$ ;  $m_2 = 0,075$ ;  $k = 2$ ;  $EE_1^* = 4 \cdot 10^{-4}$ , проведено числові розрахунки і за формулами (7) обчислено залишкові напруження. Ці значення параметрів задані на основі аналізу апріорної інформації, отриманої шляхом розв'язування задачі про визначення для заданих режимів зварювання залишкових напружень у кільцевих з'єднаннях труб різної товщини методом скінченних елементів з використанням програмного забезпечення, розробленого в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. При цьому числові розрахунки проведені з урахуванням незначної різниці між величинами  $R_1$ ,  $R_2$  і було введено величину  $R = (R_1 + R_2)/2$  та прийнято, що  $R_1 = R_2 = R$ .

На рис. 3 графічно зображено розподіл колових  $\sigma_{\beta\beta}$  і осьових  $\sigma_{\alpha\alpha}$  залишкових напружень на внутрішніх і зовнішніх поверхнях труб. Суцільними лініями зображено розподіл напружень вздовж осей труб на їх зовнішніх, а штриховими – на внутрішніх поверхнях.

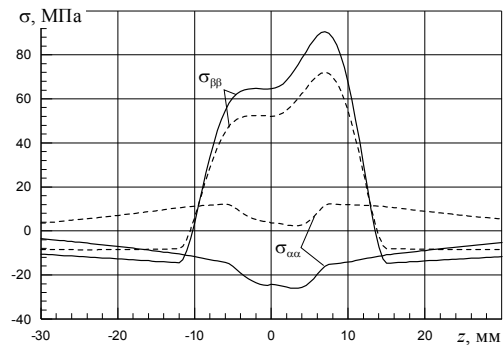


Рис. 3. Розподіл залишкових напружень в зварному з'єднанні на поверхнях труб

Як видно із графіків рис. 3 колові залишкові напруження на внутрішніх і зовнішніх поверхнях труб є розтягальними біля зварного шва і досягають максимальних значень у трубі більшої товщини. З віддаленням від осі шва вони переходять у стискальні. Осьові напруження є стискальними на зовнішніх поверхнях труб і розтягальними на внутрішніх поверхнях і меншими за величиною, ніж колові.

1. Березин В.Л., Суворов А.Ф. Сварка трубопроводов и конструкций. – М.: Недра, 1983.-328 с.
2. Ориняк І.В., Розгонюк В.В., Тороп В.М., Білик С.Ф. Ресурс, довговічність і надійність трубопроводів. Огляд сучасних підходів і проблеми нормативного забезпечення в Україні // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 4. – С. 54–57.
3. Осадчук В.А. Діагностування залишкових технологічних напружень в елементах конструкцій розрахунково-експериментальним методом // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2003. – 46, № 1. – С. 88–104.
4. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие / Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М. Пивторак В.А., Полухин П.И., Чиченев А.А. – К.: Наук. думка, 1981. – 584 с.