

Ю. Пороховський

Магістр,
Національний університет
«Львівська політехніка»,
м. Львів

УДК 539.3

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ КУСКОВО- ОДНОРІДНИХ ОБОЛОНОК НА ОСНОВІ УТОЧНЕНОЇ ТЕОРІЇ ОБОЛОНОК

На основі уточненої теорії оболонок побудовано математичну модель розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень у зонах зварних швів кусково-однорідних оболонок у машинобудівних конструкціях. Побудовано розв'язки ключових рівнянь уточненої теорії оболонок та отримано вирази для обчислення залишкових напружень у довільній точці зварного з'єднання. Проведено числовий аналіз задачі.

кусково-однорідна оболонка, машинобудівна конструкція, зварний шов, залишкові напруження, ширина зони пластичних деформацій, уточнена теорія оболонок

Оболонкові машинобудівні конструкції (ОМБК) зі зварними з'єднаннями широко застосовують у різних галузях сучасного машинобудування. Зокрема, в машинах і устаткуванні для підвищення тиску води, комунальному господарстві, системах пом'якшення води та її демінералізації (рис. 1), промислових системах охолодження.

Більшість таких конструкцій експлуатується тривалий час в агресивному середовищі, постійно зростає їх відсоток з відпрацьованим нормативним терміном. У зв'язку з цим з кожним роком загострюється проблема діагностування таких конструкцій з рекомендаціями щодо можливостей подальшого їх використання. При цьому особливе місце займають кільцеві зварні з'єднання, оскільки вони є однією з причин високої концентрації напружень.

Досить часто в ОМБК доводиться зварювати деталі, які виготовлені з різних за фізичними характеристиками матеріалів. Зварні з'єднання займають особливе місце при проведенні діагностування технічного стану машинобу-

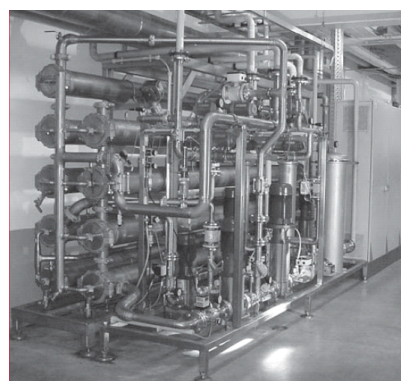


Рис. 1. Установа для пом'якшення та демінералізації води

дівних конструкцій оскільки на концентрацію напружень крім експлуатаційних навантажень впливають ще і знакозмінні та нерівномірно розподілені по довжині труби

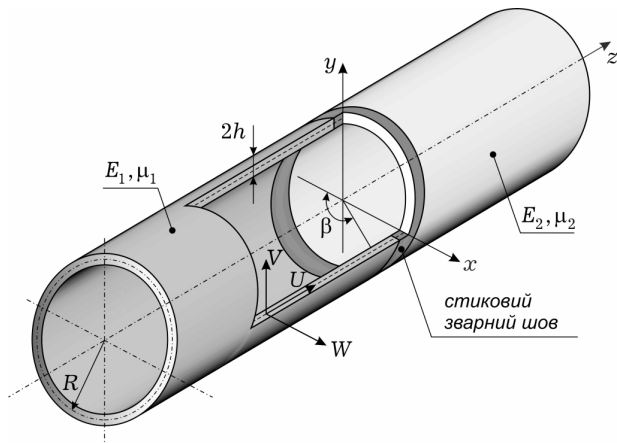


Рис. 2. Схема зварного з'єднання

залишкові зварювальні напруження. Для їх визначення існують розрахункові, експериментальні та розрахунково-експериментальні методи, які базуються на поєднанні математичного моделювання з експериментальними даними. Результати визначення залишкових напружень за допомогою розрахунково-експериментального методу для зварного з'єднання сталої товщини висвітлені у працях [1, 2], аналогічні результати для різнотовщинного зварного з'єднання подані у статтях [3–6].

Нижче для оцінки розподілу залишкових напружень у зоні кусково-однорідного зварного з'єднання запропоновано математичну модель, побудовану на основі уточненої теорії оболонок, що враховує скінченну жорсткість на зсув в напрямку нормалі до серединної поверхні оболонки.

Постановка і розв'язання задачі. Розглянемо стикове зварне з'єднання двох різнорідних труб однакової товщини. Нехай E_1, μ_1 та E_2, μ_2 пружні характеристики кусково-однорідного зварного з'єднання (зліва і справа від осі зварного шва, рис. 2), а $2h$ – товщина оболонки. Віднесемо таку оболонку до безрозмірної триортгональної системи координат α, β, γ , де $\alpha = z/R$, z – координата вздовж осі оболонки, R – радіус серединної поверхні кусково-однорідної оболонки, β – кутова координата, γ – координата вздовж зовнішньої нормалі до серединної поверхні труби.

Позначимо прогин серединної поверхні лівої частини від зварного шва оболонки з пружними характеристиками E_1, μ_1 через $W_1(\alpha)$ та правої частини зварного з'єднання з пружними параметрами E_2, μ_2 – через $W_2(\alpha)$. Колові залишкові деформації $e_{\beta\beta}^0$ для лівої та правої частин кусково-однорідного зварного з'єднання позначимо відповідно через $e_{\beta\beta}^{01}$ та $e_{\beta\beta}^{02}$, а осьові залишкові деформації $e_{\alpha\alpha}^0$ – через $e_{\alpha\alpha}^{01}$ та $e_{\alpha\alpha}^{02}$.

Використовуючи введені вище позначення запишемо

$$W(\alpha) = \begin{cases} W_1(\alpha), & \alpha \leq 0 \quad (z \leq 0), \\ W_2(\alpha), & \alpha \geq 0 \quad (z \geq 0); \end{cases} \quad (1)$$

$$e_{ij}^0(\alpha, \gamma) = \begin{cases} e_{ij}^{01}(\alpha, \gamma), & \alpha \leq 0, \\ e_{ij}^{02}(\alpha, \gamma), & \alpha \geq 0; \end{cases} \quad i, j = \alpha, \beta, \gamma. \quad (2)$$

На основі уточненої теорії оболонок з власними напруженнями [7, 8], і виразів (1), (2), ключові рівняння для визначення функцій $W_i(\alpha)$ ($i = 1, 2$) подамо у вигляді

$$\frac{d^4 W_i}{d\alpha^4} - 2g_i^2 \frac{d^2 W_i}{d\alpha^2} + 4\lambda_i^4 W_i = F_i(\alpha), \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Тут

$$F_i(\alpha) = 4\lambda_i^4 R \mathcal{E}_{\beta\beta}^{0i} - R^2 \frac{d^2}{d\alpha^2} (\kappa_{\alpha\alpha}^{0i} + \mu_i \kappa_{\beta\beta}^{0i}) - 2g_i^2 R \frac{d^2 \mathcal{E}_{\beta\beta}^{0i}}{d\alpha^2} + R \frac{d^3 \mathcal{E}_{\alpha\gamma}^{0i}}{d\alpha^3} - 4 \frac{\mu_i R^3}{D_{1i}} N_1^0, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

$$\mathcal{E}_{jj}^{0i}(\alpha) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h e_{jj}^{0i}(\alpha, \gamma) d\gamma, \quad \kappa_{jj}^{0i}(\alpha) = \frac{3}{2h^3} \int_{-h}^h e_{jj}^{0i}(\alpha, \gamma) \gamma d\gamma,$$

$$\mathcal{E}_{\alpha\gamma}^{0i}(\alpha) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h e_{\alpha\gamma}^{0i}(\alpha, \gamma) d\gamma, \quad j = \alpha, \beta; \quad i = 1, 2,$$

$$2g_i^2 = \frac{E_i}{K_i' G_i'}; \quad D_{1i} = \frac{2E_i h^3}{3(1-\mu_i^2)}; \quad \lambda_i^4 = \frac{3R^2(1-\mu_i^2)}{4h^2}; \quad E_i -$$

модуль Юнга лівої ($i = 1$) та правої ($i = 2$) частин кусково-однорідної зварної конструкції; μ_i – коефіцієнти Пуасона матеріалів цих частин; G_i' – модуль зсуву на площадках, перпендикулярних до серединних поверхонь; K_i' – коефіцієнт зсуву.

На основі проведеного аналізу розподілу залишкових напружень і залишкових термопластичних деформацій в зоні зварних швів і наведених результатів досліджень [8–10] розподіл несумісних залишкових деформацій в зоні зварного шва e_{ij}^0 апроксимуємо виразами:

$$\begin{aligned} e_{\beta\beta}^{0i}(\alpha, \gamma) &= -\mathcal{E}_{1i}^{*} f_{1i}(\gamma) \varphi_{\beta i}(\alpha), \\ e_{\alpha\alpha}^{0i}(\alpha, \gamma) &= -\mathcal{E}_{2i}^{*} f_{2i}(\gamma) \varphi_{\alpha i}(\alpha), \\ e_{\alpha\gamma}^{0i}(\alpha, \gamma) &= -\mathcal{E}_{0i}^{*} f_{0i}(\gamma) \varphi_{0i}(\alpha), \end{aligned} \quad (5)$$

де

$$\varphi_{\beta i}(\alpha) = \varphi_{1i}(\alpha) S(\alpha_{1i} - |\alpha|);$$

$$\varphi_{\alpha i}(\alpha) = \varphi_{2i}(\alpha) S(\alpha_{2i} - |\alpha|) - \rho \varphi_{3i}(\alpha) S(\alpha_{3i} - |\alpha|);$$

$$\varphi_{0i}(\alpha) = \varphi_{0i}^0(\alpha) S(\alpha_{0i} - |\alpha|);$$

$$\varphi_{ni}(\alpha) = 1 + b_{ni} \frac{\alpha^2}{\alpha_{ni}^2} - (3 + 2b_{ni}) \frac{\alpha^4}{\alpha_{ni}^4} + (2 + b_{ni}) \frac{\alpha^6}{\alpha_{ni}^6}; \quad (6)$$

$$\varphi_{0i}^0(\alpha) = \frac{\alpha}{\alpha_{0i}} - 3 \frac{\alpha^3}{\alpha_{0i}^3} + 3 \frac{\alpha^5}{\alpha_{0i}^5} - \frac{\alpha^7}{\alpha_{0i}^7} = \frac{\alpha}{\alpha_{0i}} \left(1 - \frac{\alpha^2}{\alpha_{0i}^2} \right)^3;$$

$$f_{mi}(\gamma) = 1 + q_{mi} \frac{\gamma}{h} - p_{mi} \frac{\gamma^2}{h^2}, \quad i = 1, 2; \quad n = \overline{1, 3},$$

$$m = \overline{0, 2}.$$

Тут $S(x)$ – одинична функція Гевісайда, тобто $S(x) = 1, x \geq 0; S(x) = 0, x < 0$; $\mathcal{E}_{mi}^*, b_{ni}, q_{mi}, p_{mi}, \rho$ – числові параметри; $\alpha_{mi} = z_{mi}/R, z_{mi}$ – координати меж зон залишкових деформацій e_{mi}^0 .

З умов неперервності цих деформацій в перерізі $\alpha = 0$ ($z = 0$) встановлюємо, що $q_{m1} = q_{m2}, p_{m1} = p_{m2}, m = 0, 2$.

Розв'язки рівнянь (3) зобразимо у вигляді сум розв'язків однорідного рівняння $W_i^{(1)}$ і часткових розв'язків неоднорідного $W_i^{(2)}$, тобто

$$W_i(\alpha) = W_i^{(1)}(\alpha) + W_i^{(2)}(\alpha). \quad (7)$$

Розв'язок однорідного рівняння запишемо у вигляді

$$W_i^{(1)}(\alpha) = A_{1i} \omega_{1i}(\alpha) + A_{2i} \omega_{2i}(\alpha). \quad (8)$$

Тут

$$\begin{aligned} \omega_{11}(\alpha) &= e^{s_1 \alpha} \cos r_1 \alpha, & \omega_{21}(\alpha) &= e^{s_1 \alpha} \sin r_1 \alpha, \\ \omega_{12}(\alpha) &= e^{-s_2 \alpha} \cos r_2 \alpha, & \omega_{22}(\alpha) &= e^{-s_2 \alpha} \sin r_2 \alpha, \end{aligned} \quad (9)$$

де

$$s_i = \lambda_i \sqrt{1 + \frac{g_i^2}{2\lambda_i^2}}, \quad r_i = \lambda_i \sqrt{1 - \frac{g_i^2}{2\lambda_i^2}}, \quad (10)$$

A_{ji} – сталі інтегрування.

Для зручності подальших викладок, введемо безрозмірні прогини серединної поверхні труби так:

$$\bar{W}_i(\alpha) = \bar{W}_i^{(1)}(\alpha) + \bar{W}_i^{(2)}(\alpha). \quad (11)$$

де

$$\bar{W}_i(\alpha) = \frac{1}{\mathcal{E}_1^* R} W_i(\alpha), \quad \bar{W}_i^{(j)}(\alpha) = \frac{1}{\mathcal{E}_1^* R} W_i^{(j)}(\alpha), \quad (12)$$

а

$$\bar{W}_i^{(1)}(\alpha) = \bar{A}_{1i} \omega_{1i}(\alpha) + \bar{A}_{2i} \omega_{2i}(\alpha). \quad (13)$$

$$\bar{A}_{ij}(\alpha_i) = \frac{1}{\mathcal{E}_1^* R} A_{ij}(\alpha), \quad i, j = 1, 2.$$

Часткові розв'язки $\bar{W}_i^{(2)}(\alpha)$ зобразимо як згортку фундаментальних розв'язків рівнянь (3) з правими частинами $\bar{F}_i(\alpha) = F_i(\alpha)/(\mathcal{E}_1^* R)$. Для цього використаємо фундаментальний розв'язок рівняння

$$\frac{d^4 W_i^*}{d\alpha^4} - 2g_i^2 \frac{d^2 W_i^*}{d\alpha^2} + 4\lambda_i^4 W_i^* = \delta(\alpha - \zeta), \quad (14)$$

де $\delta(x)$ – дельта-функція Дірака.

Розв'язок рівняння (14) у випадку $g_i^2 < 2\lambda_i^2$ можна подати у вигляді [7]

$$W_i^*(\alpha - \zeta) = \frac{1}{8\lambda_i^4 \nu_{0i}} \Gamma_i(\alpha - \zeta), \quad (15)$$

де

$$\Gamma_i(\alpha - \zeta) = r_i \Gamma_{1i}(\alpha - \zeta) + s_i \Gamma_{2i}(\alpha - \zeta),$$

$$\Gamma_{1i}(\alpha - \zeta) = e^{-s_i |\alpha - \zeta|} \cos r_i (\alpha - \zeta),$$

$$\Gamma_{2i}(\alpha - \zeta) = e^{-s_i |\alpha - \zeta|} \sin r_i |\alpha - \zeta|,$$

$$\nu_{0i} = \sqrt{1 - g_i^4 / (4\lambda_i^4)}. \quad (16)$$

Використавши операцію згортки функцій $\bar{F}_i(\alpha)$ і $W_i^*(\alpha - \zeta)$, частковий розв'язок рівняння (3) в безрозмірних величинах подамо так:

$$\begin{aligned} \bar{W}_i^{(2)}(\alpha) &= -\delta_{1i} H_i^0(\alpha) - \delta_{2i} [H_{2i}(\alpha) - \rho H_{3i}(\alpha)] - \\ &\quad - \delta_{3i} H_{1i}(\alpha) + \delta_{4i} H_{0i}(\alpha), \end{aligned} \quad (17)$$

де

$$H_1^0(\alpha) = \int_{-\alpha_{11}}^0 \varphi_{11}(\alpha) \Gamma_1(\alpha - \zeta) d\zeta,$$

$$H_2^0(\alpha) = \int_0^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\alpha) \Gamma_2(\alpha - \zeta) d\zeta;$$

$$H_{j1}(\alpha) = \int_{-\alpha_{j1}}^0 \varphi_{j1}(\alpha) \psi_{11}(\alpha - \zeta) d\zeta,$$

$$H_{j2}(\alpha) = \int_0^{\alpha_{j2}} \varphi_{j2}(\alpha) \psi_{12}(\alpha - \zeta) d\zeta, \quad j = \overline{1, 3};$$

$$H_{01}(\alpha) = \int_{-\alpha_{01}}^0 \varphi'_{01}(\alpha) \psi_{11}(\alpha - \zeta) d\zeta,$$

$$H_{02}(\alpha) = \int_0^{\alpha_{02}} \varphi'_{02}(\alpha) \psi_{12}(\alpha - \zeta) d\zeta;$$

$$\delta_{1i} = \frac{1}{2\nu_{0i}} \left(1 - \frac{p_{1i}}{3} \right), \quad \delta_{2i} = \frac{k_{2i} q_{2i}}{4\lambda_i^2 \nu_{0i}} \frac{R}{h},$$

$$\delta_{3i} = \frac{1}{4\lambda_i^2 \nu_{0i}} \left[\frac{R}{h} \mu_i q_{1i} + 2g_i^2 \left(1 - \frac{p_{1i}}{3} \right) \right],$$

$$\delta_{4i} = \frac{1}{4\lambda_i^2 \nu_{0i}} \frac{k_{0i}}{\alpha_{0i}} \left(1 - \frac{p_{0i}}{3} \right), \quad k_{2i} = \frac{\mathcal{E}_{2i}^*}{\mathcal{E}_{1i}^*}, \quad k_{0i} = \frac{\mathcal{E}_{0i}^*}{\mathcal{E}_{1i}^*}. \quad (18)$$

Сталі інтегрування $\bar{A}_{ji}, i, j = 1, 2$ знаходимо з умов ідеального механічного контакту, тобто рівностей прогинів W_i , кутів повороту γ_{1i} , моментів M_{1i} та перерізуючих зусиль Q_{1i} у перерізі.

Підставивши тепер вищенаведені співвідношення у відомі загальні вирази для напружень [8] і здійснивши відповідні перетворення, формули для обчислення осювих $\sigma_{\alpha\alpha}$, колових (кільцевих) $\sigma_{\beta\beta}$ і зсувних $\sigma_{\alpha\gamma}$ залишкових напружень у зоні зварного з'єднання оболонок неоднакової товщини подано у вигляді:

$$\sigma_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma) = k_{1i} \sigma_T^* \bar{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma),$$

$$\sigma_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma) = k_{1i} \sigma_T^* \bar{\sigma}_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma),$$

$$\sigma_{\alpha\gamma}^{(i)}(\alpha, \gamma) = k_{1i} \sigma_T^* \bar{\sigma}_{\alpha\gamma}^{(i)}(\alpha, \gamma), \quad (19)$$

де

$$\bar{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma) = -\sqrt{\frac{3}{1-\mu_i^2}} \frac{\gamma}{h} \left[\Omega_i(\alpha) + \frac{1}{2\lambda_i^2} \bar{L}_{2i}(\alpha) - v_{3i} \bar{W}_{0i}(\alpha) \right] + \frac{1}{1-\mu_i^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) \times \left[\mu_i p_{1i} \Phi_{\beta i}(\alpha) + k p_{2i} \Phi_{\alpha i}(\alpha) \right], \quad (20)$$

$$\bar{\sigma}_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma) = \bar{W}_i(\alpha) + \mu_i \bar{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma) + f_{1i}(\gamma) \Phi_{\beta i}(\alpha, \gamma),$$

$$\bar{\sigma}_{\alpha\gamma}^{(i)}(\alpha, \gamma) = -\frac{1}{2K_i'} \left[\frac{1}{\lambda_i} \Omega_i^0(\alpha) + \frac{1}{2\lambda_i^4} \bar{L}_{3i}(\alpha) - \frac{v_{3i}}{\lambda_i^2} \frac{d\bar{W}_{0i}(\alpha)}{d\alpha} \right] + \frac{G_i' k_0}{E_i} \left[p_{0i} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) + q_{0i} \frac{\gamma}{h} \right] \Phi_{0i}(\alpha),$$

$$\Omega_i^0(\alpha) = -A_{1i} \left[(-1)^{i-1} \mu_{1i} \omega_{1i}(\alpha) + \mu_{2i} \omega_{2i}(\alpha) \right] +$$

$$+ A_{2i} \left[\mu_{2i} \omega_{1i}(\alpha) - (-1)^{i-1} \mu_{1i} \omega_{2i}(\alpha) \right], \quad k_{1i} = \bar{\epsilon}_{1i}^* E_i / \sigma_T^*,$$

$\sigma_T^* = (\sigma_T^{(1)} + \sigma_T^{(2)})/2$ – усереднена межа плинності матеріалів.

У вирази для обчислення напружень входять числові параметри, які характеризують залишкові несумісні деформації e_{lm}^0 . Щоб їх знайти для конкретних зварних з'єднань, використовують експериментальні дані про залишкові напруження в таких з'єднаннях, які можна отримати неруйнівними експериментальними методами, як це показано, зокрема, в роботі [11].

Числовий аналіз проведено для зварених багатошаровим кільцевим зварним швом труб діаметром 219 мм, товщина труби $2h = 7$ мм для заданих залишкових термопластичних деформацій $e_{\beta\beta}^0$ і $e_{\alpha\alpha}^0$, які апроксимуються виразами (5). При цьому величини параметрів α_{mi} , b_{mi} , q_{mi} ($p_{mi} = q_{mi}/2$; $i = 1, 2$; $n = 1, 2, 3$; $m = 0, 1, 2$) вибирались наступним чином: $k_{11} = 0,7$; $k_{12} = 0,8$; $k_{11} = k_{12} = 0,1$; $k_{01} = k_{02} = 0,2$; $\alpha_{11} = \alpha_{12} = 8$; $\alpha_{21} = \alpha_{22} = 6$; $\alpha_{31} = \alpha_{32} = 5$; $\alpha_{01} = \alpha_{02} = 2$; $b_{11} = b_{12} = 1$; $b_{21} = b_{22} = 2$; $b_{31} = b_{32} = 1,5$; $q_{11} = q_{12} = 0,25$; $q_{21} = q_{22} = 0,25$; $\rho_1 = \rho_2 = 0,8$. Матеріал лівої частини труби – сталь марки 10Г2ФБЮ ($E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\mu_1 = 0,3$; $\sigma_T^{(1)} = 470$ МПа), а правої – сталь марки 17ГС ($E_2 = 1,9 \cdot 10^5$ МПа; $\mu_2 = 0,28$; $\sigma_T^{(2)} = 360$ МПа).

На рис. 3 – рис. 5 графічно зображено результати розподілу колових $\sigma_{\beta\beta}$ (рис. 3), осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ (рис. 4) та зсувних (рис. 5) залишкових напружень у зоні зварного шва на зовнішній ($\gamma = h$) та внутрішній ($\gamma = -h$) поверхнях труби.

З метою оцінювання впливу уточненої теорії оболонок на розрахунок розподілу залишкових напружень, на рис. 3 та рис. 4 штриховими лініями нанесено відповідні напруження, отримані за теорією оболонок Кірхгофа – Лява. Оскільки теорія оболонок Кірхгофа – Лява не враховує зсувних напружень (у цій теорії ними нехтують), то на рис. 5 такі лінії не нанесені.

Порівняння результатів обчислених залишкових напружень на рис. 3, рис. 4 при $g^2 = 1,56$ (уточнена теорія

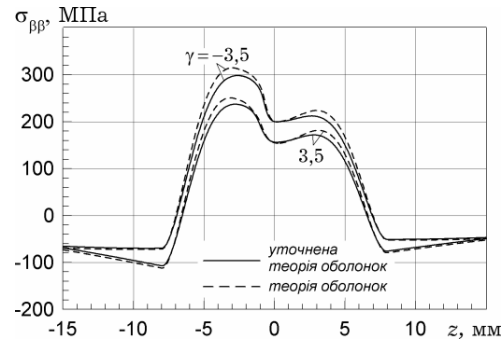


Рис. 3. Розподіл колових залишкових напружень $\sigma_{\beta\beta}$ на зовнішній та внутрішній поверхнях труби

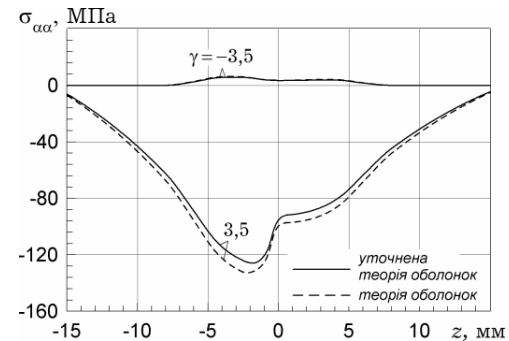


Рис. 4. Розподіл осьових залишкових напружень $\sigma_{\alpha\alpha}$ на зовнішній та внутрішній поверхнях труби

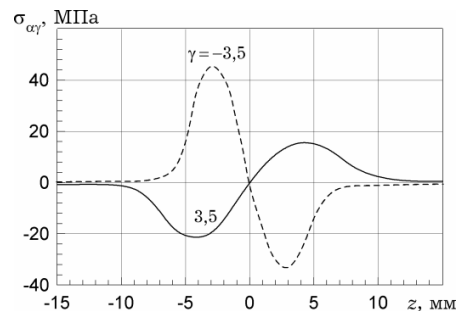


Рис. 5. Розподіл зсувних залишкових напружень $\sigma_{\alpha\gamma}$ на зовнішній та внутрішній поверхнях труби

оболонок) і $g^2 = 0$ (класична теорія оболонок) показано, що максимальні відхилення між ними не перевищують 3–7%. Це обґрунтовує достовірність застосування отриманих на базі уточненої теорії оболонок результатів для розрахунку залишкових технологічних напружень в зоні кільцевого зварного з'єднання труб. Крім цього, видно, що рівень залишкових напружень, обчислених за уточненою теорією нижчий від числових значень, отриманих за теорії оболонок Кірхгофа – Лява.

З наведених на рис. 3 – рис. 5 графіків розподілу залишкових напружень по різні сторони від зварного шва, видно, що для частини труби виготовленої зі сталі марки 10Г2ФБЮ напруження мають вищий рівень. З цього можна зробити висновок, що чим більші за числовим значенням пружні характеристики матеріалу тим вищі

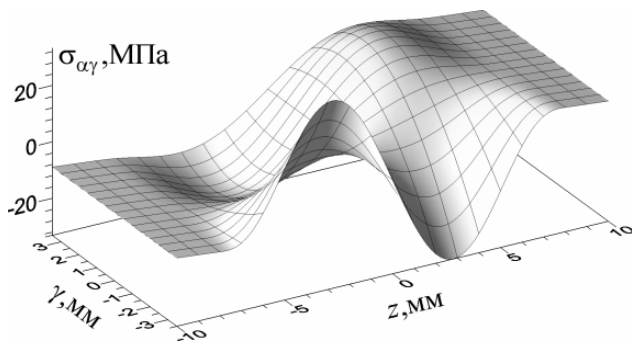


Рис. 6. Розподіл зсувних залишкових напружень $\sigma_{\alpha\gamma}$ в осьовому перерізі

залишкові напруження у трубі, виготовленій з цього матеріалу.

Наведені на рис. 5 і рис. 6 графіки розподілу зсувних залишкових напружень дають можливість проаналізувати їх поведінку в осьовому та поздовжньому перерізах. З графіків видно, що зсувні напруження розподіляються, в основному, в зоні зварного шва і швидко зникають поза зоною шва. Величина цих напружень вказує на те, вони дають істотний вклад в загальну картину розподілу залишкових напружень.

Література

1. *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.
2. *Кир'ян В. І., Осадчук В. А., Николишин М. М.* Механіка руйнування зварних з'єднань металоконструкцій. – Львів: СПОЛІОМ, 2007. – 320 с.
3. *Іванчук О. О., Осадчук В. А.* Математична модель розрахунково-експериментального діагностування напруженого стану різновисинних кільцевих зварних з'єднань магістральних трубопроводів // *Методи та прилади контролю якості.* – 2005. – № 5. – С. 97–100.

4. *Осадчук В. А., Пороховський Ю. В., Іванчук О. О.* Діагностування залишкових напружень і оцінка їх впливу на статичну міцність зварних з'єднань різновисинних труб з дефектами типу тріщин // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* – 2008. – 51, № 2. – С. 133–146.

5. *Пороховський Ю., Кіндрацький Б., Осадчук В.* Визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях різновисинних трубчастих елементів машинобудівних конструкцій на основі уточненої теорії оболонки // *Машинознавство.* – 2011. – № 3–4 (165–166). – С. 9–15.

6. *Осадчук В., Пороховський Ю., Банахевич Ю.* Математична модель розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень в кільцевих зварних з'єднаннях труб на основі уточненої теорії оболонки // *Машинознавство.* – 2010. – № 3–4 (153–154). – С. 15–22.

7. *Пелех Б. Л.* Теория оболочек с конечной сдвиговой жесткостью. – К.: Наука думка, 1973. – 248 с.

8. *Подстригач Я. С., Осадчук В. А., Марголин А. М.* Остаточные напряжения, длительная прочность и надежность стеклоконструкций. – К.: Наук. думка, 1991. – 296 с.

9. *Винокуров В. А., Григорянц А. Г.* Теория сварочных деформаций и напряжений. – Москва: Машиностроение, 1984. – 280 с.

10. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных соединений. – К.: Изд-во ИНД ПРОМ, 1998. – 640 с.

11. *Осадчук В. А., Банахевич Ю. В., Іванчук О. О.* Визначення напруженого стану магістральних трубопроводів в зоні кільцевих зварних швів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2006. – 42, № 2. – С. 99–105.

Отримана 12.08.10

Yu. Porokhovs'ky

Determination of residual stresses in welded joints of piecewise-homogeneous shell based on the refined theory of shells

National University «Lvivska Politehnika», Lviv

Based on the refined theory of shells constructed a mathematical model of calculation-experimental method for measuring residual stresses in the zones of welds piecewise-homogeneous shells in machine building structures. We construct solutions of the governing equations refined theory of shells and obtained expressions for the calculation of residual stresses at any point of the weld. The parametric analysis of the problem has been made.

Диспропазіція

5th MPA Meeting (International Meeting on Developments in Materials, Processes and Applications of Emerging Technologies)

Alvor, Portugal, 27-29 June 2011

<http://www.mpa-meeting.com/>

Topics include:

1. Commercialisation of Nanotechnology
2. Surface Science, Engineering & Technology
3. Materials for Energy Applications
4. Applied Bio-Nanotechnology
5. Carbon Nanotubes/Wires/Rods & their Applications
6. Advanced Nanometrology and Nanomanufacturing