

За ефективністю види теплообміну розташовуються так: радіаційний, кондуктивний, вимушений та природний конвективний. При охолодженні поверхонь гальмівного шківа радіаційний теплообмін реалізується разом з кондуктивним або вимушеним конвективним, або природним конвективним теплообміном.

Із аналізу кількості теплоти, що генерується у тілі гальмівного шківа та розсіюється його поверхнею за рахунок різних видів теплообміну випливає, що темп охолодження у десятки разів менший за темп нагрівання. Для усунення такої диспропорції у тепловому балансі гальмівного шківа теплоту, що генерується у процесі гальмування, необхідно відразу ж відводити від його робочої поверхні. Це досягається за рахунок застосування ефекту термо-

напружень в тілі труби біля шва. Нижче проаналізовано вплив ширини зони пластичних деформацій і їх перепаду по товщині труби на просторовий розподіл залишкових напружень в околі монтажного кільцевого шва МТ.

Для аналізу розподілу залишкових напружень у зварному з'єднанні труби моделюватимемо її круговою циліндричною оболонкою

Література

1. Александров М.П. Грузоподъемные машины. – М.: Из-во МГТУ им. Н. Э. Баумана – Высшая школа, 2000. – 552 с.
2. Вольченко А. И. Тепловой расчет тормозных устройств. - Львов: Высшая школа,

УДК 622.692.4

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПЕРЕПАДУ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПО ТОВЩИНІ ТРУБИ НА РОЗПОДІЛ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗОНІ МОНТАЖНОГО ЗВАРНОГО ШВА МАГІСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ

А.В. Драгілев

Підприємство «Інжинірингові технології», Україна, 03151, м. Київ, вул. Волинська, 60, тел/факс 380-044-559-99-33, E-mail:kraft@krafst.com.ua

Исследовано влияние ширины зоны пластических деформаций и их градиента по толщине трубы на пространственное распределение остаточных напряжений в кольцевом сварном соединении магистрального трубопровода. Показано, что кольцевые и осевые остаточные напряжения на внутренней поверхности трубы с увеличением градиента пластических деформаций по ее толщине уменьшаются, а на внешней увеличиваются. При этом для малых перепадов этих деформаций по толщине трубы с увеличением ширины их зоны распределения кольцевые напряжения на внешней поверхности уменьшаются и достигают максимального значения на внутренней поверхности трубы.

Influence of the zone width of plastic deformations and their gradient pipe thickness on spatial distribution of residual stresses in the circumferential welded pipeline joint has been investigated. It is shown that hoop and axial residual stresses on the internal pipe surface decrease with the increase of gradient plastic deformations on its thickness, and increase on the external surface correspondingly. Herewith for small differences in these deformations in pipe thickness, hoop stresses on the external surface decrease with the increase of the zone width and reach the maximum value on the internal surface of the pipe.

електричного охолодження.

Таким чином, запропоновано розрахунково-експериментальний метод за оцінкою складових теплового балансу гальмівного шківа, який дає змогу прогнозувати ще на стадії проектування його теплонавантаженість.

Відомо, що надійність зварних з'єднань труб суттєво впливає на термін безпечної експлуатації магістральних трубопроводів (МТ). Особливу увагу при обстеженні МТ приділяють монтажним зварним швам, оскільки вони є однією із головних причин виникнення аварій [1]. При цьому, враховуючи, що залишкові напруження є самозрівноваженими, важливою є інформація про зони розтягальних і стискальних

1987. – 133с.

3. Грошев А. М., Барахтанов Л. В., Успенский И. П. Расчет установившейся температуры элементов тормоза при повторно-кратковременном режиме. - М.: Из-в. высш. учебн. завед. МВ и ССО СССР: Машиностроение, №3, 1985. – С. 93-96.

4. Ильский А. М., Миронов Ю. В., Чернобыльский А. Г. Расчет и конструирование бурового оборудования. – М.: Недра, 1985. – 452 с.

завтовшки $2h$ під дією поля локальних осесиметричних пластичних деформацій. Віднесемо трубу до триортогональної системи координат α, β, γ , де $\alpha = z/R$ – віднесена до радіуса середньої поверхні R координата вздовж твірної від осі шва (початок координат виберино на осі шва), β – кутова координата, γ – відстань по товщині труби вздовж зовнішньої нормальні до її серединної поверхні.

На основі узагальнення відомих в літературі розрахункових і експериментальних даних різних авторів [2–4] локалізовані біля шва колові $\epsilon_{\beta\beta}^0$ і осьові $\epsilon_{\alpha\alpha}^0$ пластичні деформації апроксимуємо виразами [5]

$$\epsilon_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma) = -\mathbf{E}_1^* f_1(\gamma) \varphi_1(\alpha) S^0(\alpha),$$

$$\epsilon_{\alpha\alpha}^0(\alpha, \gamma) = -\mathbf{E}_2^* f_2(\gamma) \varphi_2(\alpha) S^0(\alpha),$$

де

$$\varphi_i(\alpha) = 1 + s_i \frac{\alpha^2}{\alpha_0^2} - (3 + 2s_i) \frac{\alpha^4}{\alpha_0^4} + (2 + s_i) \frac{\alpha^6}{\alpha_0^6},$$

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

$$S^0(\alpha) = 1, \quad |\alpha| \leq \alpha_0, \quad S^0(\alpha) = 0, \quad |\alpha| > \alpha_0;$$

$$\alpha_0 = z_0 / R,$$

де: z_0 – півширина зони власних пластичних деформацій; \mathbf{E}_i^* , s_i , m_i – сталі параметри.

Функція $\varphi(\alpha)$ характеризує розподіл пластичних деформацій вздовж твірної труби, а $f(\gamma)$ – по її товщині. Графіки цих функцій для різних режимів зварювання наведені в роботі [5].

У випадку, коли $S_1 = S_2 = S$, в роботі [5] отримано вирази для визначення прогину труби $W(\alpha)$, осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ та колових $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень, які записано у вигляді

$$W(\alpha) = -\mathbf{E}_1^* R \lambda \left[\left(1 - \frac{4}{3} m_1\right) F_1(\alpha) + \frac{m_3}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} F_2(\alpha) \right],$$

$$\sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) = \frac{E \mathbf{E}_1^*}{1-\mu^2} \left\{ -\lambda \frac{\gamma}{h} \left[\frac{\sqrt{3(1-\mu^2)}}{2} \left(1 - \frac{4}{3} m_1\right) F_2(\alpha) - m_3 F_2(\alpha) \right] + m_3 \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) \varphi(\alpha) S^0(\alpha) \right\},$$

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

Тут

$$F_i(\alpha) = \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \varphi(\zeta) K_i(\zeta - \alpha) d\zeta, \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

$$K_i(\zeta - \alpha) = \exp[-\lambda|\zeta - \alpha|] \left[\cos \lambda(\zeta - \alpha) + (-1)^{i-1} \sin \lambda|\zeta - \alpha| \right],$$

$$i = 1, 2;$$

$$\lambda^4 = 3R^2(1-\mu^2)/(4h^2); \quad m_3 = \mu m_1 + k m_2;$$

$$k = \mathbf{E}_2^* / \mathbf{E}_1^*; \quad E - \text{модуль Юнга; } \mu - \text{коефіцієнт Пуассона.}$$

Якщо тепер врахувати, що

$$\frac{d^2 K_1(\xi - \alpha)}{d\alpha^2} = -2\lambda K_2(\xi - \alpha),$$

$$\frac{d^2 K_2(\xi - \alpha)}{d\alpha^2} = -2\lambda K_1(\xi - \alpha) - 4\lambda \delta(\xi - \alpha) \quad (5)$$

і двічі проінтегрувати (4) по частинах, то вирази для $F_i(\alpha)$ можна записати так:

$$F_1(\alpha) = \frac{1}{\lambda^2 \alpha_0^2} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \Psi(\zeta) K_2(\zeta - \alpha) d\zeta + F_1^*(\alpha),$$

$$F_2(\alpha) = -\frac{1}{\lambda^2 \alpha_0^2} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \Psi(\zeta) K_1(\zeta - \alpha) d\zeta. \quad (6)$$

Тут

$$\Psi(\alpha) = s - 6(3 + 2s) \frac{\alpha^2}{\alpha_0^2} + 15(2 + s) \frac{\alpha^4}{\alpha_0^4},$$

$$F_1^*(\alpha) = \frac{2}{\lambda \alpha_0^6} (\alpha_0^2 - \alpha^2) [\alpha_0^2 + (2 + s)\alpha^2] S^0(\alpha). \quad (7)$$

Проінтегрувавши вирази (6), функції $F_i(\alpha)$ подамо у вигляді

$$\begin{aligned} F_1(\alpha) = & \frac{1}{\lambda^7 \alpha_0^6} \left\{ e^{-\lambda(\alpha_0 + \alpha)} \left[6\lambda \alpha_0 [15(2 + s) + \lambda \alpha_0 (27 + 13s) + \lambda^2 \alpha_0^2 (7 + 3s)] \times \cos \lambda(\alpha_0 + \alpha) + \right. \right. \\ & \left. \left. + 2[-45(2 + s)(1 + \lambda \alpha_0) + 3\lambda^3 \alpha_0^3 (7 + 3s) + 2\lambda^4 \alpha_0^4 (3 + s)] \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \sin \lambda(\alpha_0 + \alpha) \right\} + 2e^{-\lambda(\alpha_0 + \alpha)} \times \right. \\ & \left. \times \left\{ 3\lambda \alpha_0 [15(2 + s) + \lambda \alpha_0 (27 + 13s) + \lambda^2 \alpha_0^2 (7 + 3s)] \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \cos \lambda(\alpha_0 - \alpha) + [45(2 + s)(\lambda \alpha_0 - 1) + 3\lambda^3 \alpha_0^3 (7 + s) + \right. \right. \\ & \left. \left. + 2\lambda^4 \alpha_0^4 (3 + s)] \times \sin \lambda(\alpha_0 - \alpha) \right\} + \right. \\ & \left. + 2 \left\{ 6[\alpha_0^2 (3 + 2s) - 15(2 + s)\alpha^2] \lambda^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. + (\alpha_0^2 - \alpha_0)^2 [\alpha_0^2 + (2 + s)\alpha^2] \lambda^6 + 6\lambda \alpha_0 \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times [\lambda \alpha_0 (27 + 13s) \cos \alpha(\alpha_0 - \alpha) + \right. \right. \\ & \left. \left. + (15(2 + s) + \lambda^2 \alpha_0^2 (7 + s)) \sin \lambda(\alpha_0 - \alpha) \right] \cosh \lambda(\alpha_0 - \alpha) + \right. \\ & \left. + 2[-3\lambda \alpha_0 (15(2 + s) + \lambda^2 \alpha_0^2 (7 + s)) \cos \lambda(\alpha_0 - \alpha) + \right. \\ & \left. + (45(2 + s) - 2\lambda^4 \alpha_0^4 (3 + s)) \sin \lambda(\alpha_0 - \alpha) \right] \times \\ & \left. \times \sinh \lambda(\alpha_0 - \alpha) \right\} S(\alpha_0 - \alpha), \\ F_2(\alpha) = & \frac{2}{\lambda^7 \alpha_0^6} \left\{ e^{-\lambda(\alpha_0 + \alpha)} \left\{ [-45(2 + s)(1 + \lambda \alpha_0) + \right. \right. \\ & \left. \left. + 3\lambda^3 \alpha_0^3 (7 + 3s) + 2\lambda^4 \alpha_0^4 (3 + s)] \times \cos \lambda(\alpha_0 - \alpha) + \right. \right. \\ & \left. \left. \times \sin \lambda(\alpha_0 + \alpha) \right\} + e^{-\lambda(\alpha_0 + \alpha)} \times \right. \\ & \left. \times \left\{ [45(2 + s)(1 - \lambda \alpha_0) + 3\lambda^3 \alpha_0^3 (7 + 3s) - 2\lambda^4 \alpha_0^4 (3 + s)] \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \cos \lambda(\alpha_0 - \alpha) + 3\lambda \alpha_0 [15(2 + s) - \lambda \alpha_0 (27 + 13s) + \lambda^2 \alpha_0^2 (7 + 3s)] \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \sin \lambda(\alpha_0 + \alpha) \right\} + \right. \\ & \left. - [s \alpha_0^4 - 6\alpha_0^2 (3 + 2s)\alpha^2 + 15(2 + s)\alpha^4] - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - 2 \left[45(2+s) - 2\lambda^4 \alpha_0^4 (3-s) \right] \cos \lambda(\alpha_0 - \alpha) + \\
 & + \left[15(2+s) + \lambda^2 \alpha_0^2 (7+s) \right] \sin \lambda(\alpha_0 - \alpha) \cosh \lambda(\alpha_0 - \alpha) + \\
 & + 6\lambda \alpha_0 \left[15(2+s) - \lambda^2 \alpha_0^2 (7+3s) \right] \cos \lambda(\alpha_0 - \alpha) + \\
 & + \lambda \alpha_0 (27+13s) \sin \lambda(\alpha_0 - \alpha) \sinh \lambda(\alpha_0 - \alpha) S(\alpha_0 - \alpha).
 \end{aligned}$$

Таким чином, для заданого поля залишкових деформацій ϵ_{ij}^0 (1) отримано замкнуті формули для обчислення колових $\sigma_{\beta\beta}$ і осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ залишкових напружень в довільній точці труби. На основі цих формул проведено числовий аналіз залежності просторового розподілу напружень від величини області пластичних деформацій вздовж твірної і їх градієнта по товщині труби.

Числові розрахунки проведено для труби діаметром $D = 1020$ мм, товщиною $2h = 15.2$ мм, виготовленої зі сталі 17Г1С ($E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0.3$). Розглянуто випадок, коли величина пластичних деформацій на осі шва фіксована $\epsilon_1^* = 1.47 \cdot 10^{-3}$; $k = 0.1$; параметр $s = 1$; а перепад колових деформацій $\sigma_{\beta\beta}^0$ удвічі менший, ніж осьових $\sigma_{\alpha\alpha}^0$ ($m_1 = m$, $m_2 = 2m$).

На рис. 1 зображено графіки функції $\varphi(\alpha)$ для значень параметра $s = 1$ і $z_0 = 20$ мм та функції $f(\gamma)$ для різних значень параметра m .

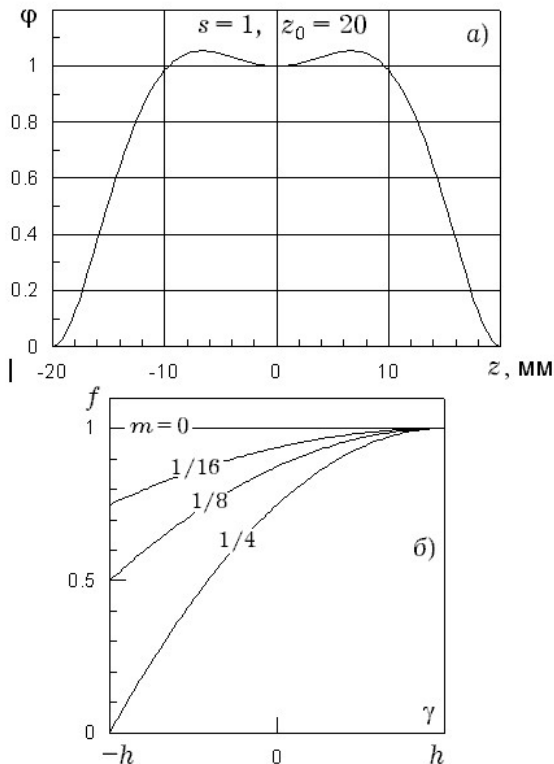


Рисунок 1 - Графіки функції $\varphi(\alpha)$ (а) і $f(\gamma)$ (б)

Графіки колових $\sigma_{\beta\beta}$ і осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ напружень в зоні зварного шва зображено на рис. 2. Як видно із наведених графіків для розглянутого випадку колові залишкові напруження на зовнішній і внутрішній поверхнях труби біля шва є розтягальні і досягають найбільшого значення на зовнішній поверхні труби; з віддаленням від осі шва вони переходять у стискальні. Осьові залишкові напруження є розтягальні на внутрішній поверхні труби та стискальні на зовнішній, а з віддаленням від осі шва вони змінюють знаки на протилежні.

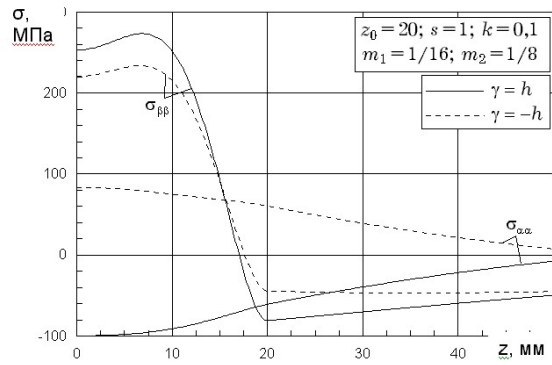
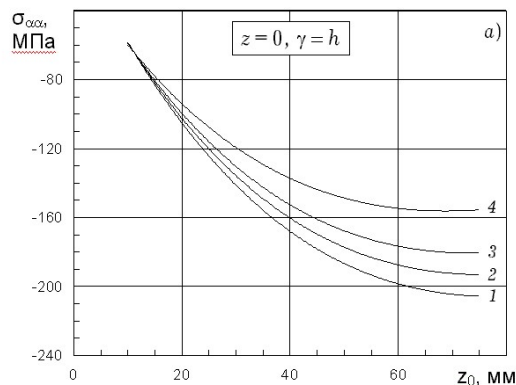


Рисунок 2 - Розподіл залишкових напружень в зоні зварного шва на поверхнях труби

На рис. 3 кривими 1–4 зображено графіки, що характеризують залежність осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ напружень в перерізі $z = 0$ на зовнішній (а) і внутрішній (б) поверхнях труби від ширини зони пластичних деформацій і величини їх градієнта по товщині труби, що характеризується величиною параметра m (рис. 1б). Криві 1–4 відповідають таким значенням параметра m : 1 – $m=0$, 2 – $m=1/32$, 3 – $m=1/16$, 4 – $m=1/8$, тобто більші числові номери кривих характеризують більші перепади пластичних деформацій по товщині труби.



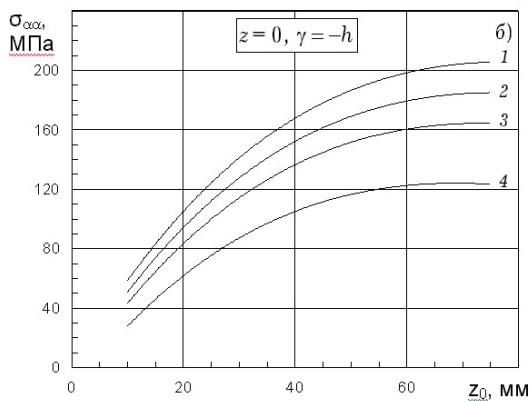


Рисунок 3 - Залежність осьових залишкових напружень в перерізі $z = 0$ на зовнішній (а) і внутрішній (б) поверхнях труби від величини зони пластичних деформацій і їх перепаду по товщині труби

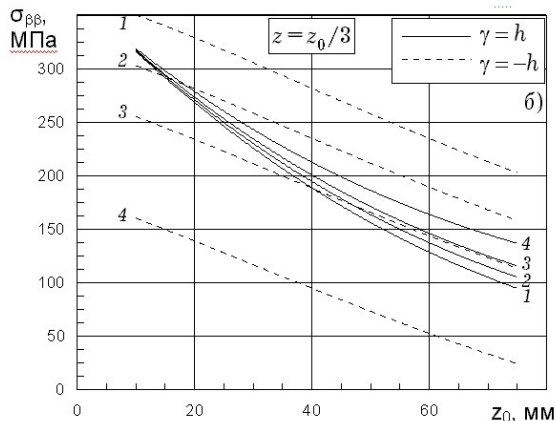
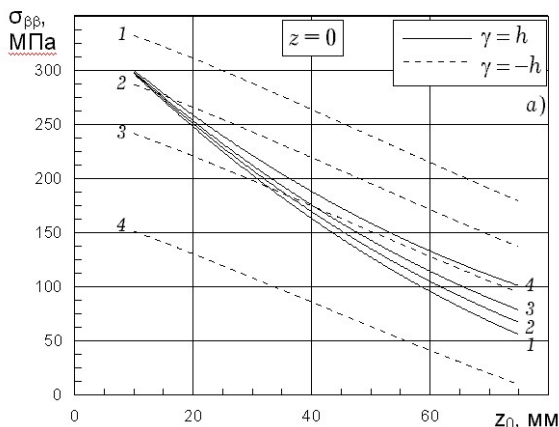


Рисунок 4 - Залежність колових залишкових напружень на зовнішній ($\gamma = h$) і внутрішній ($\gamma = -h$) поверхнях труби в перерізах $z = 0$ (а) і $z = z_0 / 3$ (б) від величини зони пластичних деформацій і їх перепаду по товщині труби

Графіки, що характеризують залежність колових $\sigma_{\beta\beta}$ напружень на зовнішній (суцільні лінії) і внутрішній (штрихові лінії) поверхнях труби від градієнта по товщині труби і ширини зони пластичних деформацій, наведено на рис. 4.

Як видно з графіків, колові $\sigma_{\beta\beta}$ та осьові $\sigma_{\alpha\alpha}$ напруження на внутрішній поверхні труби зі збільшенням градієнта залишкових деформацій ϵ_{ii}^0 по її товщині зменшуються, а на зовнішній – зростають. При цьому для малих перепадів цих деформацій по товщині труби зі збільшенням ширини їх зони колові напруження на зовнішній поверхні зменшуються і досягають найбільшої величини на внутрішній поверхні труби.

Література

1. Макаренко В.Д., Чернов В.Ю., Крижанівський Є.І., Прохоров М.М. Аналіз і оцінювання працездатності та тріщиностійкості зварних трубопроводів // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 4. – С. 47–50.
2. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – 320 с.
3. Винокуров В.А., Григорянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
4. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. – К.: Изд-во ИНДПРОМ, 2001. – 815 с.
5. Драгілев А.В., Осадчук В.А. Математична модель розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень в магістральних трубопроводах біля монтажних зварних швів // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 1.

Міжнародна науково-практична конференція

**УПРАВЛІННЯ
ПРОЕКТАМИ: СТАН
ТА ПЕРСПЕКТИВИ**

Напрямки роботи конференції:

- Проектно-орієнтоване державне управління
- Проектно-орієнтоване управління у виробництві, освіті, дозвіллі
- Управління проектами і програмами інноваційного розвитку