

буксовочные системы грузовых автомобилей, автобусов и прицепов. Обзорная информация. – М.: ЦНИИТЭИАВТОПРОМ, 1990. – 57 с. 3. Автоматизация процесса торможения автомобиля: Учеб. пособие / С.И. Ломака, Н.Н. Алекса, Е.М. Гецович. – К.: УМК ВО, 1988. – 88 с. 4. Демьянюк В.А., Нагорняк С.Г., Янко М.Д. О выборе вида регулирования и места установки регулятора тормозных сил: Сб. “Труды ВКЭИавтобуспрома”. – Львов, 1978. – С. 100–108. 5. Повышение эффективности торможения автотранспортных средств с пневматическим тормозным приводом / А.Н. Туренко, В.А. Богомолов, В.И. Клименко, В.И. Кирчатый. – Харьков: Издательство ХГАДТУ, 2000. – 472 с. 6. Нагорняк С., Дем’янюк В. Обґрунтування доцільності застосування автоматичних пристроїв у гальмовій системі автомобіля з позицій керованості процесом гальмування // *Мат. міжнародної конференції “Розрахункові та дослідницькі методи в розвитку систем автомобілів і машин”*. – Жешув: Жешувська політехніка, 1994. – С. 167–172. 7. Афанасьев В.Н., Колмановский В.В., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. – М.: Высш. шк., 1989. – 447 с. 8. Дем’янюк В.А. Критерії необхідності та ефективності регулювання гальмівних сил автобусів // *Зб. наук. пр. “Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів”*. 2000. – Вип. 5. – С. 77–86.

УДК 539.3

А.Р. Дзюбик

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра зварювального виробництва, діагностики
та відновлення металоконструкцій

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ВИКОНАННІ КІЛЬЦЕВИХ ШВІВ ЗВАРНИХ СТИКІВ ТРУБ

© Дзюбик А.Р., 2003

Запропоновано у вигляді інтегрального представлення математичну модель експериментально-розрахункового методу, яка дає змогу враховувати особливості формування поля напружень при двосторонньому виконанні кільцевих швів зварних стиків труб. Запропоновано функціональні залежності величини залишкових пластичних деформацій від відстані до осі шва вздовж твірної труби та за її товщиною. Досліджено напружений стан у зварному з’єднанні.

A mathematical model of experimental-computation method, which enables to take into account features of forming a field of tensions in case of bilateral implementation of circular stitches of welded joints of pipes is offered as integral presentation. Functional to dependence sizes of remaining plastic deformations are offered from distance to the stitch axis along the generatrix pipe and after its thickness. A tense state is explored in the welded halving.

Забезпечення високої міцнісної надійності трубопроводів є головним завданням під час їх будівництва, монтажу й експлуатації. Збільшення термінів експлуатації магістральних трубопроводів вимагає сучасних ефективних методів і технічних засобів діагнос-

тування напруженого стану. Для цього поряд із розрахунковими та експериментальними методами набув широкого застосування експериментально-розрахунковий метод. Він на основі доступної експериментальної інформації дає змогу відтворити максимально наближену до реальності картину напружень [1].

Математична модель методу для випадку одностороннього зварювання двох труб без розроблення або із V-подібним розробленням крайок є детально описана в літературі [2, 3]. Однак значна частина зварних стиків труб лінійної частини магістральних трубопроводів виготовляється на спеціальних трубозварювальних механізованих базах. При цьому переважно застосовується електродугове зварювання двостороннім автоматичним способом у нижньому положенні. Попереднє розроблення крайок, залежно від товщини, або не здійснюють, або має X-подібний характер. Формування поля пластичних деформацій, а отже, і поля напружень буде відмінним від описаного в літературі, але подібним, у цьому разі, для обох випадків двостороннього формування шва.

Для довільно заданого згасаючого на нескінченності поля умовних пластичних деформацій задача зведена до побудови розв'язку диференційного рівняння четвертого порядку [4]. Положення довільної точки на серединній поверхні оболонки будемо визначати координатами z і φ , де: z – відстань точки вздовж твірної від початкового поперечного перерізу, φ – кут, який утворюється довільною меридіальною площиною з початковою. Надалі використаємо більш зручні безрозмірні координати: $\alpha = \frac{z}{R}$; $\beta = \frac{\pi}{2} + \varphi$. Для ключової функції прогину $W(\alpha)$ оболонки використаємо її інтегральне представлення [4]:

$$W(\alpha) = \frac{aR}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_{\beta\beta}^0(\xi) K_1(\xi - \alpha) d\xi + \frac{R^2}{4a} \int_{-\infty}^{\infty} [\varkappa_{\alpha\alpha}^0(\xi) + \mu \varkappa_{\beta\beta}^0(\xi)] K_2(\xi - \alpha) d\xi, \quad (1)$$

де $a^4 = 3R^2(1 - \mu^2)/(4h^2)$; μ – коефіцієнт Пуассона; $K_1(\xi - \alpha) = e^{-a|\xi - \alpha|} \cdot [\cos a(\xi - \alpha) + \sin a(\xi - \alpha)]$; $K_2(\xi - \alpha) = e^{-a|\xi - \alpha|} \cdot [\cos a(\xi - \alpha) - \sin a(\xi - \alpha)]$; $\varepsilon_{\beta\beta}^0$, $\varkappa_{\alpha\alpha}^0$, $\varkappa_{\beta\beta}^0$ – усередненні за товщиною характеристики поля пластичних деформацій:

$$\varepsilon_{ii}^0(\alpha) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h e_{ii}^0(\alpha, \gamma) d\gamma; \quad \varkappa_{ii}^0(\alpha) = \frac{3}{2h^3} \int_{-h}^h e_{ii}^0(\alpha, \gamma) \gamma d\gamma. \quad (2)$$

При цьому обчислення нормальних напружень у довільній точці оболонки виконуються згідно з наступними співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) &= \frac{1}{2h} \left(\frac{3M_1}{h^2} \gamma \right) + \frac{E\varepsilon_0^*}{1 - \mu^2} \sigma_{\alpha\alpha}^* \\ \sigma_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) &= \frac{1}{2h} \left(N_2 + \frac{3M_2}{2h^2} \gamma \right) + \frac{E\varepsilon_0^*}{1 - \mu^2} \sigma_{\beta\beta}^* \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де $N_2 = D_0 \left(\frac{W}{R} - \varepsilon_{\beta\beta}^0(\alpha) \right)$; $M_1 = -\frac{D_1}{R^2} \left[\frac{d^2 W}{d\alpha^2} + R^2 (\varkappa_{\alpha\alpha}^0 + \mu \varkappa_{\beta\beta}^0) \right]$; $M_2 = -\frac{D_1}{R^2} \left[\mu \frac{d^2 W}{d\alpha^2} + R^2 (\varkappa_{\beta\beta}^0 + \mu \varkappa_{\alpha\alpha}^0) \right]$; $D_0 = 2Eh$; $D_1 = \frac{2Eh^3}{3(1 - \mu^2)}$; $\sigma_{\alpha\alpha}^*(\alpha, \gamma) = \varepsilon_{\alpha\alpha}^0 + \varkappa_{\alpha\alpha}^0 \gamma - e_{\alpha\alpha}^0 + \mu (\varepsilon_{\beta\beta}^0 + \varkappa_{\beta\beta}^0 \gamma - e_{\beta\beta}^0)$; $\sigma_{\beta\beta}^*(\alpha, \gamma) = \varepsilon_{\beta\beta}^0 + \varkappa_{\beta\beta}^0 \gamma - e_{\beta\beta}^0 + \mu (\varepsilon_{\alpha\alpha}^0 + \varkappa_{\alpha\alpha}^0 \gamma - e_{\alpha\alpha}^0)$ – нелінійні доданки.

Поле пластичних деформацій спричинених двостороннім зварюванням є неоднорідним за товщиною, що потребує його спеціального представлення:

$$e_{\beta\beta}^0(\alpha) = \begin{cases} -\varepsilon_0^* \cdot \varphi(\alpha) \cdot \psi(\gamma), & |\alpha| \leq \alpha_0; \\ 0, & |\alpha| \geq \alpha_0; \end{cases} \quad (4)$$

$$e_{\alpha\alpha}^0(\alpha) = k \cdot e_{\beta\beta}^0(\alpha),$$

де ε_0^* – максимальні пластичні деформації; $\varphi(\alpha)$ – функція, що описує епюру пластичних деформацій вздовж осі труби; $\psi(\gamma)$ – функція для опису зміни епюри пластичних деформацій за товщиною стінки труби; k – числовий параметр.

Відомі в літературі функції $\varphi(\alpha)$ не завжди задовольняють умови гладкості та монотонності, що не завжди відповідає реальним умовам зварювання механізованими способами низьковуглецевих та низьколегованих сталей [6]. Нижче отримано новий вираз, що задовольняє ці умови.

Нехай функція, що описує поле пластичних деформацій, має вигляд:

$$\varphi(\alpha) = 1 - p \cdot (\alpha^2 / \alpha_0^2) - p_4 \cdot (\alpha^4 / \alpha_0^4) - p_6 \cdot (\alpha^6 / \alpha_0^6),$$

де α – віднесена до радіуса труби відстань від осі шва; p, p_4, p_6 – коефіцієнти, що задають кривину графіка функції, α_0 – віднесена до радіуса труби півширина зони пластичних деформацій.

Тоді, задовольняючи умову гладкості функції, отримуємо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} 1 - p - p_4 - p_6 = 0 \\ p - 2p_4 - 3p_6 = 0 \end{cases}$$

Розв'язуючи її відносно p , отримуємо, що $p_4 = 3 - 2p$, $p_6 = p - 2$, або

$$\varphi(\alpha) = 1 - p \cdot (\alpha^2 / \alpha_0^2) - (3 - 2p) \cdot (\alpha^4 / \alpha_0^4) - (p - 2) \cdot (\alpha^6 / \alpha_0^6), \quad 0 \leq p \leq 2. \quad (5)$$

Параметри функцій $\varphi(\alpha)$ та $\psi(\gamma)$ для кожного конкретного випадку зварювання визначаються експериментально. У зв'язку з тим, що зміна пластичних деформацій за товщиною деталі відтворює характер зварного шва (для випадку зварювання із V-подібною розробкою крайок наведено в [3]), то при двосторонньому зварюванні деформації будуть змінюватися за деякою параболічною залежністю симетрично відносно серединної поверхні (рис.1). При цьому знаходження усереднених за товщиною характеристики поля пластичних деформацій $\varepsilon_{ii}^0(\alpha)$ та $\kappa_{ii}^0(\alpha)$, згідно з виразами (2) значно спрощується внаслідок їх симетричності відносно серединної поверхні труби.

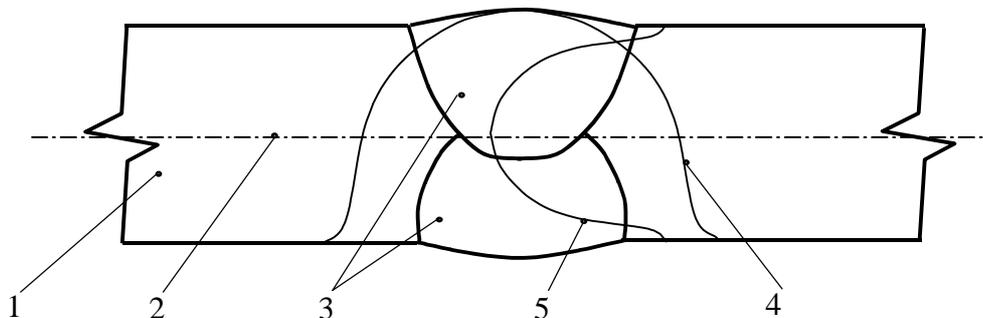


Рис. 1. Розподіл пластичних деформацій при двосторонньому зварюванні труб кільцевим швом:
1 – стінка труби; 2 – серединна поверхня; 3 – зварні шви; 4 – функція $\varphi(\alpha)$; 5 – функція $\psi(\gamma)$

На основі аналізу літературних даних [3] та отриманих викладок для опису зміни пластичних деформацій за товщиною стінки труби застосуємо таку функцію:

$$\varphi(\gamma) = 1 + n \cdot \left[p \cdot (\gamma^2 / h^2) - (3 - 2p) \cdot (\gamma^4 / h^4) - k \cdot (p - 2) \cdot (\gamma^6 / h^6) \right], \quad (6)$$

де n – коефіцієнт, що задає величину пластичних деформацій, при $n = 0$ зміна деформацій за товщиною відсутня; p , k – коефіцієнти, що визначають кривину епюри деформацій; h – півтовщина труби; γ – змінний за товщиною параметр.

Тоді при підстановці (6) в (2) вирази для визначення компонентів деформації серединної поверхні матимуть такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\beta\beta}^0 &= -\varepsilon_0^* \varphi(\alpha) A; \quad \varepsilon_{\alpha\alpha}^0 = -\varepsilon_0^* S \varphi(\alpha) A; \\ \varkappa_{\beta\beta}^0 &= \varkappa_{\alpha\alpha}^0 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\text{де } A = 1 + n \cdot \left[\frac{1}{5} \left(3 - \frac{1}{3} p \right) + \frac{1}{7} k (p - 2) \right].$$

Підставляючи (4 – 7) в (3), отримуємо формули (8, 9) для визначення осьових ($\sigma_{\alpha\alpha}(\alpha)$) та кільцевих ($\sigma_{\beta\beta}(\alpha)$) напружень в довільній точці зварного стикового з'єднання із кільцевим швом. Вони враховують особливості формування поля напружень при двосторонньому зварюванні без розроблення та з X-подібним розробленням крайок труб.

$$\sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) = -\frac{E\varepsilon_0^*}{1-\mu^2} \left[\frac{a^3 A}{R} \gamma \Gamma_2(\alpha) - \sigma_{\alpha\alpha}^*(\alpha, \gamma) \right], \quad (8)$$

$$\sigma_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) = -\frac{E\varepsilon_0^*}{1-\mu^2} \left[\frac{Aa}{2} \cdot (1-\mu^2) \Gamma_1(\alpha) + \sigma_{\beta\beta}^*(\alpha, \gamma) - \mu \cdot \sigma_{\alpha\alpha}^*(\alpha, \gamma) - A \cdot (1-\mu^2) \cdot \varphi(\alpha) \right] + \mu \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma), \quad (9)$$

де E – модуль Юнга; $\Gamma_{1,2}(\alpha) = \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \varphi(\xi) e^{-a|\xi-\alpha|} [\cos a(\xi-\alpha) \pm \sin a|\xi-\alpha|] d\xi$; S – коефіцієнт, який задає

співвідношення між величиною поля пластичності в осьовому та кільцевому напрямках; $\sigma_{\alpha\alpha}^*(\alpha, \gamma) = -\varepsilon_0^* (S + \mu) \varphi(\alpha) (A - \psi(\gamma))$; $\sigma_{\beta\beta}^*(\alpha, \gamma) = -\varepsilon_0^* (1 + \mu S) \varphi(\alpha) (A - \psi(\gamma))$.

У формули (1) – (4) входять невідомі параметри, що характеризують поле пластичних деформацій. Для їх знаходження будується функціонал, який є сумою середньоквадратичних відхилень між величинами теоретично розрахованих характеристик поля напружень та відповідними їм комбінаціями напружень, отримані експериментальними неруйнівними методами [2]. Приймаючи отримані дані за наближений розв'язок та підставивши їх у відповідні формули (8, 9), знайдемо розподіл напружень у зварному з'єднанні для кожного конкретного випадку.

У зв'язку з тим, що вищеописаний спосіб має переважне застосування при діагностуванні зварних з'єднань конструкцій, які ще не виведені із експлуатації, то експериментальні дані про напруження отримують неруйнівними методами, зокрема ультразвуковим та магнітопружним [3]. Однак при цьому слід враховувати особливості їх застосування в околі зварного шва.

Значний градієнт зварювальних напружень у зварному з'єднанні потребує від дослідників проведення його детального вивчення. Однак велика кількість експериментальних даних може порушити гладкість шуканого поля. Тому застосовують так званий згладжувачий функціонал, який є сумою функціонала основного і стабілізуючого функціоналів.

Експериментальні неруйнівні методи як правило дають інформацію не про окремі компоненти напруженого стану, а про їх комбінацію (різниця головних напружень тощо).

Отже, теоретичний розв'язок задачі слід також записати у вигляді відповідних співвідношень головних напружень.

Відомо, що давачі приладів зазначених вище методів через значні геометричні розміри переважно не забезпечують достатньої локальності досліджуваної області при проведенні вимірювань. У зв'язку з цим відповідно до експериментальних даних теоретично отримані вирази розв'язків задачі при підстановці у функціонал необхідно проінтегрувати за поверхнею по якій виконуються вимірювання (так звана область взаємодії) [3].

Врахування впливу зміни структурно-фазового складу матеріалу в околі зварного шва на діагностування напружень неруйнівними методами виконується по спеціальній методиці [6]. Вона передбачає визначається для кожного конкретного випадку визначення лінійних розмірів зони термічного впливу та побудову функції зміни початкових показів приладу залежно від відстані до осі шва. Для підвищення точності визначення напружень, цю функцію слід проінтегрувати по деякій області взаємодії між давачем та виробом. Зокрема для магнітопружного методу (областю взаємодії є поверхня матеріалу під давачем) це подвійний інтеграл по колу, що охоплює давач. Для акустичного методу (областю взаємодії є поверхня матеріалу під давачем за товщиною матеріалу), вважаючи, що ділянки зони термічного впливу є еквіпаралельні, у випадку двостороннього зварювання без розробки крайок або із Х-подібною розробкою крайок це потрійний інтеграл по об'єму, який є гіперболоїдом обертання.

Із застосуванням цього методу визначався напружений стан в трубних зварних стиках, які експлуатуються в газопровідному транспорті. Результати експериментально-розрахункового визначення напружень для одного із стиків наведено на рис. 2.

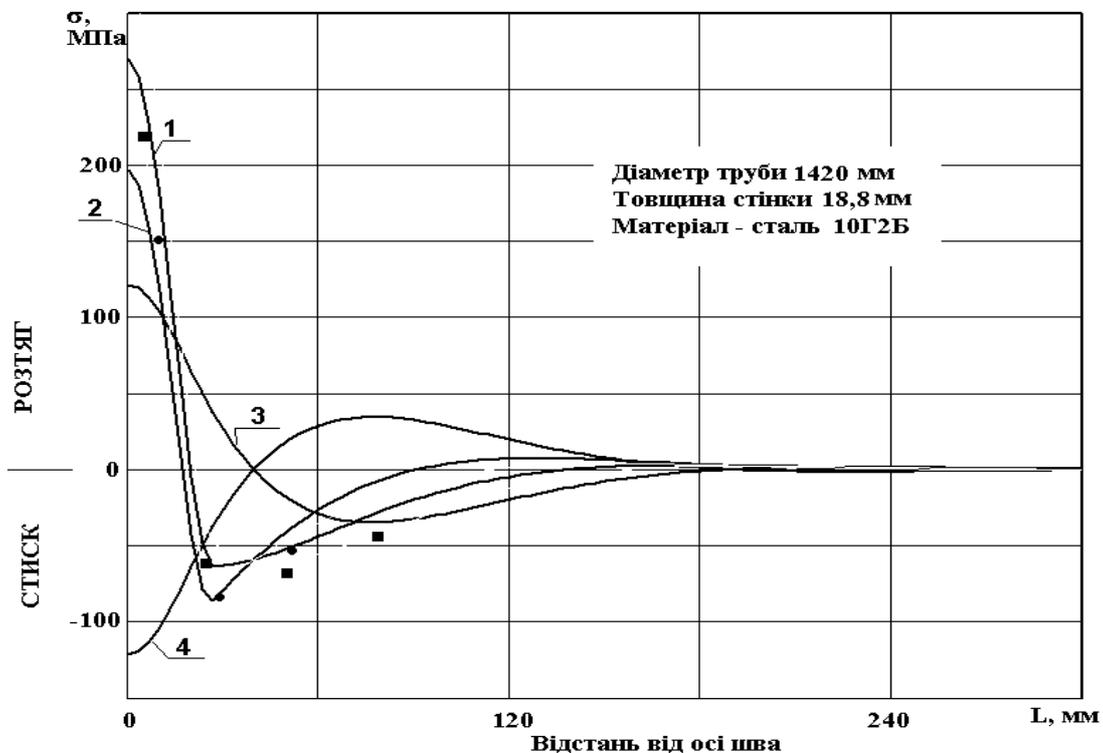


Рис. 2. Напруження у зварному стиковому з'єднанні труб: 1, 3 – кільцеві та осьові напруження на внутрішній поверхні труб; 2, 4 – кільцеві та осьові напруження на зовнішній поверхні труб; різниця головних напружень, що отримана експериментально: ● – ультразвуковий метод, ■ – магнітопружний метод

Як бачимо, на основі застосування лише окремих неруйнівних методів складно відтворити повну картину поля напруженого стану зварного з'єднання. У роботі запропоновано підхід до неруйнівного експериментального визначення напружень при двосторонньому зварюванні деталей без розробки або із Х-подібною розробкою крайок кільцевим швом оболонкових конструкцій. Зокрема розроблено функціональні залежності величини залишкових пластичних деформацій від відстані до осі шва вздовж твірної труби та за її товщиною. На їх основі отримано формули для обчислення експериментально-розрахункового визначення залишкових зварювальних напружень. Запропоновано підхід до врахування особливостей діагностування неруйнівними методами та структурно фазового складу зварного з'єднання.

Наведено результати експериментально-розрахункового визначення напружень у трубі діаметром 1420 мм.

Перспективною розвідкою в цьому напрямку є детальне вивчення розподілу залишкових зварювальних напружень за товщиною труби залежно від кута розробки її крайок.

1. Подстригач Я. С., Осадчук В. А. Исследование напряженного состояния цилиндрических оболочек, обусловленного заданным тензором несовместных деформаций и его приложения к определению сварочных напряжений // Физ.-хим. механика материалов. – 1968. – 4, № 4. – С. 400–407. 2. Палаш В. М., Юськів В. М., Дзюбик А. Р. Напряження у трубах, з'єднаних зварним кільцевим швом // Фіз. – хім. механіка матеріалів. – 2000. – № 4. – С. 95–99. 3. Дзюбик А. Р. Визначення напруженого стану кільцевих зварних з'єднань магістральних трубопроводів // Вісн. Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя. – 2000. – Т. 5, № 3. – С. 19–23. 4. Осадчук В., Большаков М., Палаш В. Неруйнівний метод визначення залишкових напружень у зварних оболонках // Машинознавство. – 1997. – №1. – С. 5–9. 5. Дзюбик А. Р. Моделювання залишкових пластичних деформацій в зварних з'єднаннях // Вісн. НУ "Львівська політехніка". – 2002. – № 412 – С. 75–78. 6. Банахевич Ю. В., Юськів В. М., Дзюбик А. Р. Дослідження напруженого стану в зварних з'єднаннях труб із врахуванням структурних змін // Науковий вісник національного технічного університету нафти і газу. – 2003. – С. 118–120.