

УДК 539.3

А.Дзюбик

Державний університет «Львівська політехніка»

## ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КІЛЬЦЕВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

*Застосовуючи функції, що описують поле пластичних деформацій та розрахунково-експериментальний метод визначення залишкових напружень, досліджено кільцеве зварне з'єднання сталевих труб магістрального газопроводу. Зварювання виконувалося при розробці крайок труб. Запропоновано новий функціонал для відшукування невідомих параметрів поля пластичних деформацій.*

### Умовні позначення

$\sigma_{\alpha\alpha}$ ,  $\sigma_{\beta\beta}$  - напруження (осьові, кільцеві);

$E$  - модуль пружності I роду;

$\mu$  - коефіцієнт Пуассона.

Забезпечення високої конструктивної надійності магістральних трубопроводів є головним завданням як у процесі їх будівництва і монтажу, так і в процесі експлуатації. Особливо це стосується місць їх технологічного ослаблення - зварних стиків труб, тому важливо знати рівень наявного в них напруженого стану. Для визначення напружень застосуємо розрахунково-експериментальний метод, що на основі доступної експериментальної інформації дозволяє відтворити максимально наближену до реальності картину [1]. Розв'язуючи дану задачу для випадку зварювання двох труб з розробкою крайок та записуючи для отриманих експериментальних даних спеціальний функціонал, що враховує особливості застосованих неруйнівних методів, отримаємо можливість визначати напруження в будь-якій точці зварного з'єднання.

Для розв'язання поставленого завдання розглянемо трубу товщиною  $2h$  і радіусом серединної поверхні  $R$ , що перебуває під дією поля умовних пластичних деформацій [2]. Матеріал оболонки вважатимемо однорідним та ізотропним. У кільцевих зварних з'єднаннях труб, що виконуються за один або декілька проходів, залишкові напруження можна вважати практично осесиметричними [3]. Місце зустрічі початку і кінця шва, як правило, становить незначну частину периметра, і це не робить великих збурень у симетрії розподілу залишкових напружень. Винятком є електрошлакові шви, напруження в яких через значну нерівномірність з'єднання на довжині шва, ймовірно, не мають бути осесиметричними.

Щоб описати поле залишкових пластичних деформацій після процесу зварювання двох труб з розробкою крайок, необхідно застосувати такі дві функції: ту, що описує епюру пластичних деформацій, спричинених зварюванням  $\varphi(\alpha)$ , та функцію, що задає зміну поля пластичних деформацій на товщині матеріалу  $f(\gamma)$ .

Параметри першої для кожного виду зварювання визначаються експериментально [2], а загалом функцію можна записати [4]:

$$\varphi(\alpha) = 1 - P \cdot \left( \frac{\alpha^2}{\alpha_0^2} \right) - (1 - P) \cdot \left( \frac{\alpha^4}{\alpha_0^4} \right), \quad (1)$$

де:  $P$  - коефіцієнт, що задає кривину графіка функції;  $\alpha_0$  - півширина зони пластичних деформацій.

Друга функція залежить від геометрії розробки крайок, і після деяких перетворень відомого виразу [5] виглядає так:

$$f(\gamma) = 1 - m \left[ 1 - 2 \cdot \left( \left| \frac{\gamma}{h} \right| + \left| \frac{\gamma^2}{h^2} \right| \right) \right], \quad (2)$$

де:  $m$  - коефіцієнт, що задає кут розробки крайок,  $0 \leq m \leq 0.25$ ;  $h$  - півтовщина матеріалу;  $\gamma$  - змінний на товщині параметр.

У даній функції її лінійна частина задає кут нахилу розробки, а квадратична показує, що поле пластичних деформацій змінюється на товщині матеріалу нерівномірно. На рис.1, 2 подано загальний вигляд функцій (1) і (2). Тип зварного з'єднання на рис.2 - С9 вибрано як такий, що найширше застосовується при виготовленні магістральних трубопроводів.

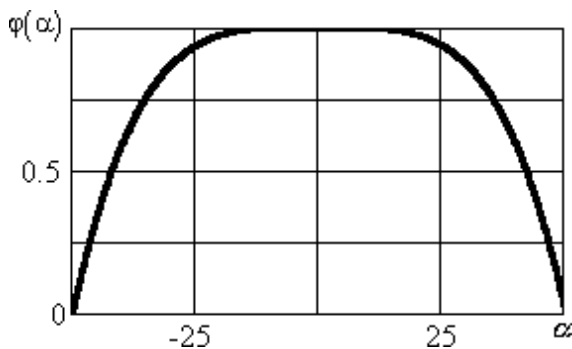


Рисунок 1. Епюра пластичних деформацій [2].

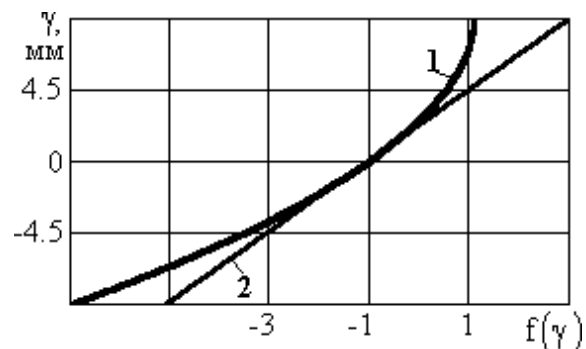


Рисунок 2. Зміна пластичних деформацій на товщині зварного з'єднання: 1 – графік функції  $f(\gamma)$ , 2 – лінійна частина  $f(\gamma)$ .

Тоді для поля пластичних деформацій справедливі нерівності:

$$e_{\beta\beta}^0(\alpha) = \begin{cases} -\varepsilon_0^* \cdot \varphi(\alpha) \cdot f(\gamma), & |\alpha| \leq \alpha_0; \\ 0, & |\alpha| \geq \alpha_0, \end{cases} \quad (3)$$

де  $\varepsilon_0^*$  - максимальні пластичні деформації.

Тепер, застосовуючи вирази для визначення компонентів деформації серединної поверхні [1] та підхід до розв'язання задачі даного розрахунково-експериментального методу [2], отримуємо вирази для визначення напружень у будь-якій точці зварного кільцевого з'єднання.

Для знаходження невідомих параметрів  $P$ ,  $\alpha_0$ ,  $\varepsilon_0^*$  використаємо експериментальну інформацію, зокрема лінійні інтегральні величини напружень, що вимірюють одним з фізичних методів або за допомогою їх синтезу. В даній роботі експериментальні дослідження проводилися ультразвуковим методом [6], що дозволяє отримувати середньоінтегральну на товщині оболонки різницю головних напружень  $\sigma_0^E(\alpha)$ , а також магнітним методом [5] і методом ТЕРС [7], що вимірюють різницю головних напружень на поверхні металу  $\sigma_0^{+E}$ . Для них через відповідні вирази

записуємо компоненти напружень. Загалом вони виглядатимуть так:  $\sigma_0 = \int_{-h}^{+h} \sigma_{\beta\beta}(\alpha, \varphi) - \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \varphi)$  та  $\sigma^{T+}(\alpha) = \sigma^+(\alpha) - \sigma^-(\alpha)$ , де  $\gamma = +h$ .

Однак слід врахувати, що не всі давачі у перерахованих методах мають локальну, майже точкову контактну площу, зокрема, це ультразвуковий та магнітний методи. Отже, отримуємо якусь узагальнену експериментально визначену величину, тому при записі функціоналу його теоретичну частину також необхідно проінтегрувати за нею. Для ультразвукового методу інтегрування виконується ще й на товщині матеріалу.

Тепер, записуючи та інтегруючи відповідні вирази, побудуємо наступний функціонал:

$$\Phi(p, \alpha, \varepsilon^*) = \sum_{n=1}^{n_1} P_n \left[ \iint_Z \sigma^T(\alpha) - \sigma^E(\alpha) \right]^2 + \sum_{m=1}^{m_1} Q_m \left[ \iint_{\Psi} \sigma^{+T}(\alpha) - \sigma^{+E}(\alpha) \right]^2 + \sum_{s=1}^{s_1} R_s \left[ \sigma_0^{+T}(\alpha_s) - \sigma_0^{+E}(\alpha_s) \right]^2, \quad (4)$$

де  $P_n$ ,  $Q_m$ ,  $R_s$  - якісь вагові множники відповідно ультразвукового, магнітного та методу ТЕРС;  $Z$  та  $\Psi$  - відповідні поверхні інтегрування.

За наближений розв'язок оберненої задачі приймемо величини  $p$ ,  $\varepsilon_0^*$ ,  $\alpha_0$ , що забезпечують найменше значення функціонала (4); підставивши їх у відповідні формули знайдемо розподіл напружень в кільцевому зварному з'єднанні для кожного конкретного випадку.

Запропонований новий функціонал  $\Phi(p, \varepsilon_0^*, \alpha)$  враховує особливості будови неруйнівних фізичних методів, а отже, є змога точніше визначити коефіцієнти, що описують поле пластичних деформацій, тобто описати поле залишкових напружень.

Із застосуванням вищенаведених положень досліджувався напружений стан зварного з'єднання двох труб магістрального газопроводу діаметром 1220 мм. Матеріал труб - сталь 17 ГС. Товщина стінки - 12 мм. Заміри проводилися так, щоб кожна наступна контрольна площа, не перекривала попередньої. Контактна поверхня давачів виконана у вигляді кола, розміри якого подані у табл. 1.

Таблиця 1

Величина контактної поверхні давача

Геометричний розмір, мм	Метод дослідження, марка приладу		
	Ультразвуковий, HUPETRON-Z	Магнітний, SMMT-3	ТЕРС
Діаметр	10	20	0.00007

Далі подаємо результати експериментального діагностування напруженого стану зварного з'єднання. Координата експериментальної точки  $\alpha$  задається відстанню від вісі шва до геометричного центру давача.

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень

Метод дослідження	Відстань від вісі шва, мм										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Величина напружень, МПа										
У/звуковий	33	30	22	10	-12	-32	-40	-22	0	7	10
Магнітний	125	-	85	-	-22	-	-95	-	-40	-	0
Терс	130	120	85	40	-25	-75	-100	-75	-40	-15	0

Застосовуючи відомий розрахунково-експериментальний метод [1, 2], на рис. 3 наведено результати обчислень розподілу залишкових напружень на внутрішній та зовнішній поверхнях досліджуваного трубного з'єднання.

Як бачимо, на основі застосування лише окремих неруйнівних методів складно відтворити повну картину поля напруженого стану зварного з'єднання, але відомий математичний апарат та синтез експериментальних методів дозволяє отримати величину напружень у будь-якій точці зварного стику двох труб. При цьому ідеологія даного розрахунково-експериментального методу дозволяє враховувати особливості експлуатації зварних кільцевих з'єднань трубопроводу (зміну його напруженого стану внаслідок техногенного чи природнього впливу).

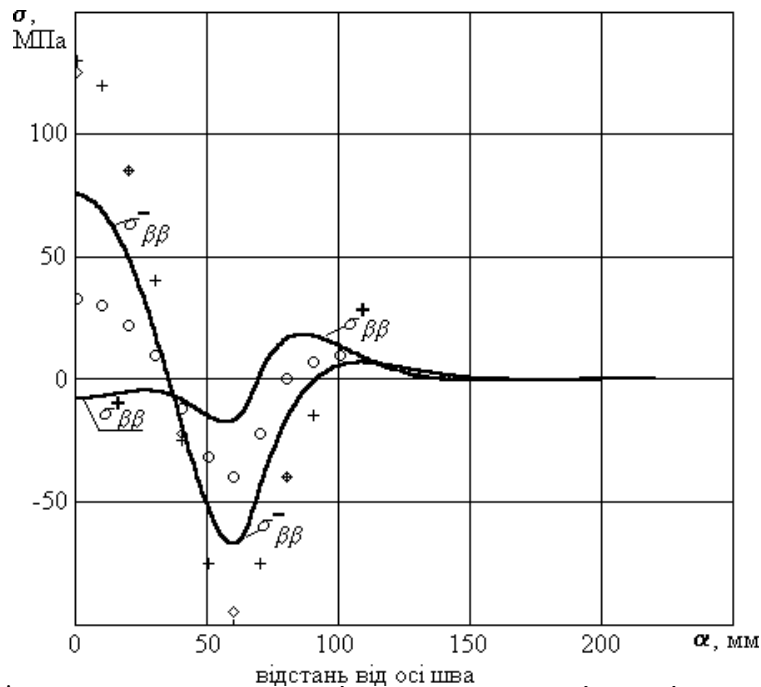


Рисунок 3. Розподіл залишкових напружень у кільцевому зварному з'єднанні.  $\sigma^-$ ,  $\sigma^+$  - напруження  $\beta\beta$   $\beta\beta$

на внутрішній та зовнішній поверхнях труби; експериментальні неруйнівні методи:  
 ○ - ультразвуковий, ◇ - магнітний, + - метод ТЕРС.

Запропоновано для розв'язання задачі розрахунково-експериментального методу новий функціонал, що враховує особливості будови устаткування експериментальних неруйнівних методів, а зокрема, їх давачів. Останнє є важливим кроком на шляху досягнення точного дешифрування результатів діагностування напруженого стану кільцевих стиків магістральних трубопроводів.

*It is explored a circular welding joint a gas main. Using functions wheech describe a field of plastic deformations and calculation-experimental method of remains tensions determination. Welding was fulfilled with exploited side. It is proposed a new functional for searding new quantities.*

### Література

1. Осадчук В., Большаков М., Палаш В. Неруйнівний метод визначення залишкових напружень у зварних оболонках // Машинознавство. - 1997.-№1.-С. 5-9.
2. Палаш В.М., Юськів В.М., Дзюбик А.Р. Напруження у трубах, з'єднаних зварним кільцевим швом // Фіз.-хім. механіка матеріалів.-2000.-№ 8.- С. 47-50.
3. Винокуров В. А., Григорьянц А. Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.
4. Осадчук В.А., Шелестовська М.Я. Розподіл залишкових зварювальних напружень у товстих плитах з круговими швами // Фіз.-хім.механіка матеріалів.-1998.-№ 3.- С. 31-35.
5. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций — К.: Индпром, 1998. – 640 с.

## **МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

6. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Введение в акустоупругость — К.: Наукова думка, 1977. - 150 с.
7. Палаш В.М., Юськів В.М., Дзюбик А.Р. Дослідження напруженого стану кільцевих швів трубних з'єднань зі сталі 17 ГС // *Машинознавство*. - 2000.-№3.-С. 58-60.

*Одержано 12.06.2000 р.*