

скопії. Це підтверджує високу ефективність вихрострумowego методу і одночасно обґрунтовує необхідність застосування комплексного контролю. Водночас необхідно наголосити, що продуктивність вихрострумowego контролю є в 3-4 рази більшою за продуктивність контролю кольоровим методом, що дозволяє значно зменшити загальний час зупинки компресорів при проведенні ремонтів.

1. Берник З.А., Учанин В.М. Комплексна дефектоскопія деталей газоперекачуючих агрегатів довготривалої експлуатації // Методи і прилади контролю якості. - № 13, 2005. - С. 13-18.
2. Дефектоскопія при технічному діагностуванні автомобілей / З.А. Берник Б.М. Ладницький, І.П. Белокур, В.Н. Учанин В.Н. - К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 1993. - 143 с.
3. Учанин В.М., Берник З.А. Вихрострумний контроль деталей агрегатів компресорних станцій. В зб. "Фізичні

методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів", вип. 7, 2002. - С.103 - 105.
4. Учанин В.Н., Черленевский В.В. Вихретоковий дефектоскоп для обнаруження поверхностных трещин // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. - Львів: ФМІ НАН України, 1999. - С. 108 - 110.
5. Учанин В.В., Черленевский В.В. Вихретоковий высокочастотний статический дефектоскоп для обнаруження поверхностных трещин. В сб. "Неруйнівний контроль та технічна діагностика" - Дніпропетровськ, - 2000. - С. 43 - 47.
6. ГСТУ В.2.3-0001201.02-2000. Експлуатація, технічне обслуговування і ремонт обладнання і споруд нафтоперекачуювальних станцій. Ч.2. Дефектоскопія валів нафтоперекачуювальних насосів // Корнійчук В.А., Стоян Б.І., Дуля В.І., Смолка С.О., Учанин В.М.). - К.: Держнафтогазпром України, 2000. - 54 с.

УДК 622.692.4

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ В ЗОНІ КІЛЬЦЕВИХ ЗВАРНИХ ШВІВ ТРУБОПРОВІДІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ МЕТОДОМ

© Драгілев А.В., 2005

ПП "Інжиніровані технології", м.Київ

Розрахунково-експериментальним методом, який базується на розв'язках обернених задач теорії оболонок з власними напруженнями і експериментальних даних, отриманих електромагнітним методом, визначено і вивчено розподілення залишкових напружень біля кільцевого зварного шва в магістральному газопроводі. При цьому враховується нерівномірність їх розподілення під електромагнітним давачем приладу. Експериментально визначені усереднені характеристики різниці головних напружень з врахуванням впливу на показники вимірювального приладу структурних змін в зоні термічного впливу

Корозійна стійкість основного металу та надійність зварних з'єднань магістральних трубопроводів (МТ) суттєво впливають на термін їх безпечної експлуатації. При обстеженні МТ особливу увагу приділяють монтажним зварним швам, як однієї із головних причин виникнення аварій [1]. Тому для підвищення надійності трубопровідного транспорту постійно удосконалюються методики визначення граничного стану трубопроводів, однією з важливих складових яких є розвиток способів оцінки напруженого стану труб, зокрема технологічних залишкових напружень у зварних з'єднаннях.

Для оцінки напруженого стану біля кільцевого зварного шва МТ використано математичну модель, описану в роботах [2], в рамках якої труба моделюється круговою циліндричною оболонкою під дією локалізованих власних пластичних осесиметричних залишкових деформацій, зумовлених зварюванням. При цьому приймається, що зварний кільцевий шов виконано за однакових умов відносно перерізу, що проходить через його вісь перпендикулярно до твірної труби.

Співвідношення для визначення прогину w , осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і колових $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень у зварному з'єднанні з урахуванням залежностей,

що наведені в роботі [3], стосовно кільцевих зварних швів трубопроводів подамо так:

$$w(\alpha) = -\epsilon_1^* R \lambda \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4}{3} m_1 \right) F_{11}(\alpha) + \frac{1}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} [\mu m_1 F_{21}(\alpha) + k m_2 F_{22}(\alpha)] \right\}; \quad (1)$$

$$\sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) = \frac{E \epsilon_1^* \lambda \gamma}{1-\mu^2} h \left[-\frac{\sqrt{3(1-\mu^2)}}{2} \left(1 - \frac{4}{3} m_1 \right) F_{21}(\alpha) + \mu m_1 F_{11}(\alpha) + k m_2 F_{12}(\alpha) \right] + \frac{1}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) \times \left[\mu m_1 \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha) + k m_2 \varphi_2(\alpha) S_2^0(\alpha) \right]; \quad (2)$$

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

де $F_{ij}(\alpha) = \int_{-\alpha_j}^{\alpha_j} \varphi_j(\zeta) \exp[-\lambda|\zeta - \alpha|] [\cos \lambda(\zeta - \alpha) + (-1)^{i-1} \sin \lambda|\zeta - \alpha|] d\zeta$, $j = 1, \dots, 20$; $k = \epsilon_2^*/\epsilon_1^*$, E – модуль Юнга; $\lambda^2 = 3R^2(1-\mu^2)/(4h^2)$; μ – коефіцієнт Пуассона.

У вирази (1)–(3) входять довільні числові параметри ϵ_i^* , k , α_i , m_i , s_i , що характеризують поля залишкових деформацій. Для конкретних зварних з'єднань ці параметри визначаються за допомогою експериментальної інформації про характеристики залишкових напружень у трубопроводах, яку можна отримати неруйнівними методами, зокрема, електромагнітним і ультразвуковим [4].

Якщо використовувати електромагнітний метод, то отримують усереднену по поверхні контакту електромагнітного перетворювача вимірювального приладу і трубою різниці головних напружень σ_+^E , а ультразвуковий метод дозволяє визначити усереднену по об'єму металу труби, що знаходиться під п'єзоелектричним перетворювачем, різницю головних напружень σ_0^E .

Для знаходження параметрів ϵ_1^* , k , α_i , m_i , s_i будемо функціонал

$$g(\epsilon_1^*, k, \alpha_i, m_i, s_i) = \sum_{n=1}^{n_1} p_n \left[\sigma_+^T(\epsilon_1^*, k, \alpha_i, m_i, s_i; \alpha_n) - \sigma_+^E(\alpha_n) \right]^2 + \sum_{m=1}^{n_2} q_m \left[\sigma_0^T(\epsilon_1^*, k, \alpha_i, m_i, s_i; \alpha_m) - \sigma_0^E(\alpha_m) \right]^2, \quad (4)$$

що характеризує нев'язку між експериментально визначеними характеристиками напруженого стану σ_+^E і σ_0^E в перерізах труби $\alpha = \alpha_n$ та аналогічними величинами σ_+^T і σ_0^T , які отримані теоретично, використовуючи формули (2)–(3). Тут p_n , q_m – деякі вагові множники; n_1 , n_2 – кількість колових перерізів труби, в яких проводяться вимірювання.

Мінімізуючи функціонал (4), знаходять такі значення параметрів ϵ_1^* , k , α_i , m_i , s_i , які забезпечують найменшу нев'язку між експериментально визначеними і аналогічними теоретично обчисленими характеристиками полів напружень. Після знаходження цих параметрів за формулами (3) обчислюють залишкові напруження в довільній точці зварного з'єднання труби.

Використавши запропонований спосіб, визначено залишкові напруження біля кільцевого шва газопроводу «Б.Волиця–Долина» через р. Стрий ($\text{Ø}1420 \times 22,5$ мм; матеріал Ст. X70; $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$). Експериментальну інформацію отримано електромагнітним методом, який на даний час найбільш широко застосовується для оцінки напруженого стану магістральних газопроводів в експлуатаційних умовах. Для проведення вимірювань використано прилад MESTR-411 з електромагнітним перетворювачем трансформаторного типу [5]. Результати вимірювань цим приладом представляються у цифровій формі.

Відомо, що при використанні фізичних методів, зокрема, електромагнітного, на результати вимірювань впливає деформування зерен металу у напрямку прокатування листа–текстура, а в зоні термічного впливу біля зварного шва ще і структурні зміни металу. Для того, щоб урахувати цей вплив, необхідно визначити початкові покази приладу для марки сталі, з якої виготовлена досліджувана труба.

Вплив текстури на початкові покази приладу визначають на трубопроводі в ненавантаженому стані на певній відстані від зварного шва, або на стандартизованому зразку для даного матеріалу [6]. Для урахування впливу структурних перетворень в зоні зварного шва на магнітні властивості металу вирізають зразки із зварним швом і зоною основного металу (рис. 1) із матеріалу запасних труб, або з труби під час ремонту, термообробкою знімають в них залишкові технологічні напруження і встановлюють початкові покази приладу в зоні термічного впливу.

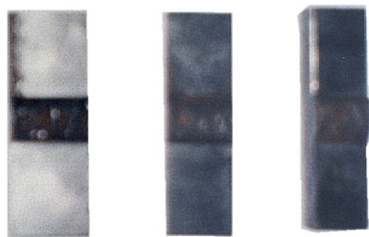


Рис. 1. Зразки із зварним швом і зоною основного металу

На основі початкових показів приладу MESTR-411 і відповідних його показів в навантаженому стані труби, використавши тарувальний коефіцієнт та методику для визначення різниці головних напружень [6], знаходять величину $\sigma_+^E(\alpha_n)$. У випадку, коли центр електромагнітного перетворювача знаходиться в різних перерізах труби, $\alpha = \alpha_n$.

Якщо поверхню контакту між давачем приладу і трубою наближено апроксимувати кругом радіусом R_0 , то вираз для аналогічної теоретичної величини $\sigma_+^T(\alpha_n)$ можна подати у такому вигляді:

$$\sigma_+^T(\alpha_n; \xi_1^*, k, \alpha_i, m_i, s_i) = E \xi_1^* J_+^T(\alpha_n; k, \alpha_i, m_i, s_i), \quad (5)$$

де

$$J_+^T = \frac{2}{\pi r_0^2} \int_{\alpha_n - r_0}^{\alpha_n + r_0} [\sigma_{\beta\beta}^+(\alpha) - \sigma_{\alpha\alpha}^+(\alpha)] \sqrt{r_0^2 - (\alpha - \alpha_n)^2} d\alpha;$$

$\sigma_{jj}^+(\alpha) = \sigma_{jj}(\alpha, +h) / (E \xi_1^*)$; $j = \alpha, \beta$; $r_0 = R_0 / R$; α_n – координати центрів круга вздовж труби під час вимірювань.

Вимірювання проводились у перерізах вздовж осі труби на чотирьох рівновіддалених по поверхні труби поздовжніх лініях (тиск у трубопроводі під час вимірювань становив 4 МПа). Експериментальні дані усереднювались по кожному перерізу. Після їх обробки обчислено значення $\sigma_+^E(\alpha_n)$, які зображені на рис. 2 зірочками. Потім ці значення підставляли у функціонал і шляхом його мінімізації одержано такі значення невідомих параметрів: $\xi_1^* = 4 \cdot 10^{-4}$; $k = 1,5$; $z_1 = 22,5$ ($\alpha_1 = 0,032$); $z_2 = 12$ ($\alpha_2 = 0,017$); $m_1 = 0,08$; $m_2 = 0,15$; $s_1 = 4$; $s_2 = 5$.

Знайдені значення цих параметрів підставлено в формули (2)-(4) і обчислено колові $\sigma_{\beta\beta}$ та осьові $\sigma_{\alpha\alpha}$ напруження на поверхнях труби, графіки яких також зображені на рис. 2. Графік величини σ_+^T на рис. 2 зображено кривою 1.

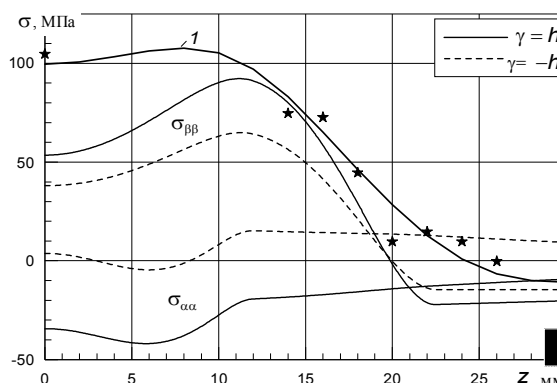


Рис. 2. Залежність напружень на поверхні труби від відстані до осі зварного шва газопроводу

Аналіз наведених графіків показує, що колові залишкові напруження для розглянутого кільцевого зварного шва є розтягальними біля шва, а з віддаленням від осі шва вони переходять у стискальні. Осьові напруження при віддаленні від осі шва є розтягальними на внутрішній і стискальними на зовнішній поверхнях. Одержана експериментально усереднена величина різниці головних напружень σ_+^E на зовнішній поверхні труби може значно перевищувати рівень максимальних залишкових напружень.

1. Гончарук М.І. Корозія та розгерметизація газопроводів // *Нафтова і газова промисловість*. – № 2, 2003. – С. 56–57. 2. 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*. – № 1, 2005. – С. 76–83. 3. Осадчук В.А. Діагностування залишкових технологічних напружень в елементах конструкції розрахунково-експериментальним методом // *Мат. методи та фіз.-мех. поля*. – 46, № 1, 2003. – 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. 5. Фомичев С.К., Минаков С.Н., Данильчик А.В., Татарников В.Г. Яременко М.Я. Измеритель механических напряжений серии MESTR-411 // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – № 1, 1998. – С. 58–60. 6. Особенности измерения механических напряжений электромагнитным методом в трубопроводах и сосудах давления газового и нефтяного комплекса (методические материалы) / Недосека А.Я., Фомичев С.К., Минаков С.Н. и др. // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – № 1, 1996. – С. 55–66.