

УДК 539.4

М.Г. Стащук^{1,2}, д. ф. – м.н., проф.; П.Я. Пукач¹ д.т.н., проф.;М.І. Ігнатишин³, к.т. н., доц.; Р.С. Гром'як⁴, к. ф. – м.н., доц.¹Національний університет “Львівська політехніка”, Україна²Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України³Мукачівський державний університет, Україна⁴Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна**ЕЛЕКТРОДНИЙ ПОТЕНЦІАЛ В ЕЛЕМЕНТІ ЗВАРНОГО ШВА ВЗДОВЖ ТВІРНОЇ БАЛОНУ, ЗАПОВНЕНОГО ВОДЕНЬВМІСНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ****M. Stashchuk, Dr., Prof, P. Pukach, Dr., Prof,****M. Ihnatyshyn, Ph.D., Assoc. Prof., R. Hromyak, Ph.D., Assoc. Prof.****ELECTRODE POTENTIAL IN THE WELD ELEMENT ALONG THE CREATIVE CYLINDER FILLED WITH A HYDROGEN-CONTAINING ENVIRONMENT**

Abstract. The work examines the electrode potential in the tube element of the cylinder welded along the generator. The pipe element is filled with a hydrogen-containing medium and is under the influence of internal and external pressures. Analytical-mathematical relations are proposed. Appropriate calculations have been made.

Вступ. Дослідження явищ локальної деградації матеріалів, призначених для експлуатації в енергоустаткуванні, що перебувають в контакті із різної активності воденьвмісними середовищами, вимагає досконалого вивчення питань впливу напруженого стану на зміну фізико-механічних характеристик та їх параметрів на довговічність елементів конструкцій і відповідальних споруд.

Найбільш важливим є потреба встановлення критичних навантажень на локальну поведінку цих матеріалів біля технологічно-необхідних або небажаних різноманітностей. Такими є різноманітні з'єднання, зварні шви, неповари, щілини, заповнені воденьвмісними середовищами і т. п. Тому проблема визначення взаємодії матеріалів із вказаними для них недосконаlostями є актуальною та особливо важливою на даний час.

Розглянемо елемент балона типу циліндричної труби (рис. 1), звареної вздовж твірної, що знаходиться під дією внутрішнього p_1 й зовнішнього p_2 тисків та перебуває в контакті з агресивним середовищем. Визначення електродного потенціалу в трубці проводились на основі загальних співвідношень [1-3] та одержаної формули для дилатації при заданні усадки, перпендикулярної до площини шва [2,4].

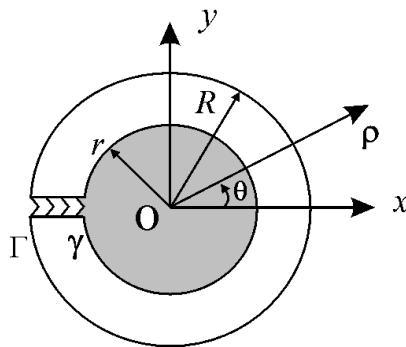


Рис. 1 Поперечний переріз елемента трубного елемента балону.

Аналітико - математичні співвідношення. Загальні співвідношення в полярних координатах в цьому випадку будуть мати наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi_m(\rho, \theta)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi_m(\rho, \theta)}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \varphi_m(\rho, \theta)}{\partial \theta^2} &= \chi_m^2 \varphi_m(\rho, \theta) + \beta K \varepsilon_\sigma \varepsilon_0^{-1}, \quad r < \rho < R; \\ \frac{\partial^2 \varphi_{mc}(\rho, \theta)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi_{mc}(\rho, \theta)}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \varphi_{mc}(\rho, \theta)}{\partial \theta^2} &= \chi_{mc}^2 \varphi_{mc}(\rho, \theta), \quad r - \lambda < \rho < r, \\ \frac{\partial^2 \varphi_c(\rho, \theta)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi_c(\rho, \theta)}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \varphi_c(\rho, \theta)}{\partial \theta^2} &= \chi_c^2 \varphi_c(\rho, \theta), \quad 0 < \rho < r - \lambda, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де $\chi_m^2 = \rho_m C_m \varepsilon_0^{-1}$, $\chi_{mc}^2 = \rho_{mc} C_{mc} \varepsilon_0^{-1}$, $\chi_c^2 = \rho_c C_c \varepsilon_0^{-1}$, $\varphi_m, \varphi_{mc}, \varphi_c$ - електричні потенціали відповідно в металі, подвійному нанопроміжковому електричному шарі (п.е.ш.) товщини λ та середовищі; β - електрострикційний коефіцієнт об'ємного розширення; K - модуль об'ємного розширення; ε_σ - дилатація металу; ε_0 - електрична стала; $\chi_m, \chi_{mc}, \chi_c$ - постійні характеристики металу, подвійного електричного шару та середовища, в яких C_m, C_{mc}, C_c електроємності. Граничні умови для труби з нескінченним швом, забезпечують неперервність струмів і електричних потенціалів відповідно на межі метал-подвійний електричний шар та подвійний електричний шар-середовище [5]:

$$\begin{aligned} \varphi_m(r, \theta) &= \varphi_{mc}(r, \theta), \quad \sigma_m \frac{\partial \varphi_m(r, \theta)}{\partial \rho} = \sigma_{mc} \frac{\partial \varphi_{mc}(r, \theta)}{\partial \rho}; \\ \varphi_{mc}(r - \lambda, \theta) &= \varphi_c(r - \lambda, \theta), \quad \sigma_{mc} \frac{\partial \varphi_{mc}(r - \lambda, \theta)}{\partial \rho} = \sigma_c \frac{\partial \varphi_c(r - \lambda, \theta)}{\partial \rho}. \end{aligned}$$

(2)

Використовуючи [3,4], знайдемо дилатацію металу.

$$\begin{aligned} \varepsilon_\sigma &= \frac{2(1+\nu)}{3K(1+4\nu)} (\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) = \frac{2(1+\nu)}{3K(1+4\nu)} (\sigma_{\rho\rho} + \sigma_{\theta\theta}) = \\ &= \frac{2(1+\nu)}{3K(1+4\nu)} \left(\frac{4\mu}{\pi(\kappa+1)} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{2\rho}{r^2 + R^2} \right) s_2 \cos\theta + 2 \frac{R^2 p_2 - r^2 p_1}{R^2 - r^2} \right); \end{aligned} \quad (3)$$

Тут ν - коефіцієнт Пуассона, $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$, μ - модуль зсуву [4]. Підставляючи формулу дилатації (3) в перше рівняння системи (1), з використанням методу Фур'є, розділенням змінних записуємо загальний розв'язок системи диференціальних рівнянь (1).

$$\begin{aligned} \varphi_m(\rho, \theta) = & \sum_{n=0}^{\infty} \cos n\theta \left(A_n^+ I_n(\chi_m \rho) + A_n^- K_n(\chi_m \rho) \right) + \\ & + \frac{8\beta(1+\nu)}{3 C_m \rho_m (1+4\nu)} \frac{\mu}{\pi(\kappa+1)} \left(\left(\frac{2\rho}{R^2+r^2} - \frac{1}{\rho} \right) s_2 \cos \theta \right) - \\ & - 4 \frac{\beta(1+\nu)}{3 \chi_m^2 \varepsilon_0 (1+4\nu)} \frac{R^2 p_2 - r^2 p_1}{R^2 - r^2}, \quad r \leq \rho < R; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{mc}(\rho, \theta) = & \sum_{n=0}^{\infty} \cos n\theta \left(B_n^+ I_n(\chi_m \rho) + B_n^- K_n(\chi_m \rho) \right), \\ & r - \lambda < \rho < R; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\varphi_c(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n^+ I_n(\chi_c \rho) \cos n\theta, \quad 0 < \rho \leq r - \lambda; \quad (6)$$

де $A_n^+, A_n^-, B_n^+, B_n^-, C_n^+$ - постійні, які знаходимо згідно граничних умов (2), $I_n(\dots), K_n(\dots)$ - функції Бесселя. Рівняння для електродного потенціалу:

$$\Delta\varphi(\theta) = \Delta\varphi_m(\rho, \theta) \Big|_{\rho=r} - \Delta\varphi_c(\rho, \theta) \Big|_{\rho=r-\lambda} \quad (7)$$

При розрахунках за анімацією моделей монографії [6] приймалися наступні пружні характеристики для сталі: коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$, модуль зсуву $\mu = 1,3 \cdot 10^4$ МПа. Вважалось, що усадка, зніційована зварним швом, була, $s_2 = 0,006$ м, а експлуатація труби з внутрішнім діаметром $d = 0,852$ м та товщиною стінки $h = 0,05$ м відбувалось під дією внутрішнього та зовнішнього тисків з величинами $p_1 = 35$ МПа, $p_2 = 1$ МПа.

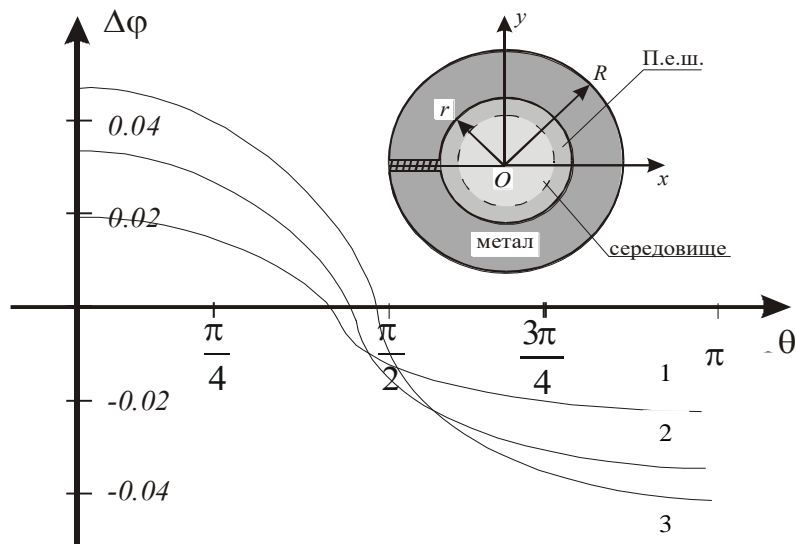


Рис. 2 Зміна електродного потенціалу в звареного швом балону, заповненого середовищем та проміжним електрошаром (п.е.ш)

На рис.2 зображено зміну електродного потенціалу. Криві 1, 2, 3 побудовані для різних відношень провідностей металу та середовища. Аналіз відношень провідностей $\frac{\sigma_m}{\sigma_c} = 10$ (крива 1), 100 (крива 2), 1000 (крива 3) показує, що із їх зростанням розмах

електродного потенціалу збільшується, що також підвищує силу збуджених залишковими напруженнями циркуляційних корозійних струмів.

Електродний потенціал, обумовлений залишковими напруженнями при зміні кута θ від 0 до π радіан міняє свій знак з плюса на мінус. Такий ефект зміни знаку електродного потенціалу можна пояснити саме наявністю зварного шва. Зміна знаку відбувається в чвертях, що містять ділянки зварного з'єднання.

Врахування одержаних досліджень із викирстанням розрахунків дислокаційних тріщин [7] стають перспективними в поясненні пластифікації в околі зварних швів балонних ємностей.

Висновок. Проведений розрахунок електродного потенціалу в зоні зварного шва, який знаходиться в умовах одночасної дії механічних навантажень та робочого воденьвмісного середовища, що дозволяє визначити ділянки підвищеної корозійної активності і можливості появи пітингів та тріщиноутворень на границі розділу зварного шва з основним матеріалом.

Література

1. Стащук Н.Г. Визначення електродного потенціалу та струмів корозії уздовж поверхонь концентраторів напружень // Механіка руйнування і міцність конструкцій: у 3т./ За заг. ред. Панасюка В. В (вип. 2). – Львів: Каменяр, 1999. – т.2. с. 213-219.
2. Стащук М.Г. Оцінка впливу пружної деформації на електродний потенціал металевого циліндра в середовищі // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2000. – №1. – С. 47-50.
3. Стащук М.Г. Аналітична оцінка стрибка електродного потенціалу на межі розділу “метал-середовище” // Праці наукового Товариства ім. Шевченка. Т VII. Матеріалознавство і механіка. – Львів – 2001. – С. 58-67.
4. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966.-707 с.
5. Mykola Stashchuk, Petro Pukach, Evgen Irza, Roman Hromyak, Nazar Stashchuk. Calculation of electric potentials on the surfaces of interaction of deformable metal bodies with hydrogen-containing environment // Scientific journal of she ternopil national technical university, 2021, №4(104). p. 98-108.
6. Ігнатишин М.І. Анімація механізмів та механіко – математичне моделювання реологічних моделей і напружено – деформованого стану конструкцій Mathcad / М.І Ігнатишин. – Мукачево: РВВ МДУ, 2022. – 206 с.
7. Стащук М.Г. Мікротріщина на продовженні ядра дислокації // Фіз.-хім. механіка матеріалів, 2022, 58, №2. С. 95 – 102.