

Висновки. Отже, в роботі розроблена математична модель для аналізу роботи терморідного актюатора на функціонально-логічному рівні проектування.

1. <http://www.sysplan.com/>. 2. Menz, Wolfgang; Mohr, Jürgen: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*. VCH, Weinheim, New York, Basel, 2. Aufl. (1997). 3. Wagner, Hans-Joachim *Entwicklung von Technologien zur Herstellung von piezoelektrisch angeregten mikroinecфmтschen Resonatorstrukturen in Silizium und Quarz*. Shaker, Aachen (1995). 4. http://www.eecs.umich.edu/~jchae/pdf/Sirius_abstract.pdf. 5. Флетчер К. *Вычислительные методы в динамике жидкостей. Том 1.* – М.: Мир, 1991, – с. 37 – 41. 6. Флетчер К. *Вычислительные методы в динамике жидкостей. Том 2.* – М.: Мир, 1991, – с. 423 – 430. 7. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер П. *Вычислительная гидромеханика и теплообмен. Том 2.* – М.: Мир, 1990, – с. 550 – 559. 8. Латин Ю. В., Стрелец М. Х., *Внутренние течения газовых смесей.* – М.: Наука, 1989 – 38 с. 9. Б. Боли и Дж. Уэйнер. *Теория температурных напряжений. Пер. с англ. Ж. С. Сисляна и Б. Ф. Шорра/ Под ред. Э. И. Григолоука.* – М.: Мир, 1964.

УДК 517.513: 539.3: 935.3

В.Г. Горопацький¹, А.Ф. Обшта², М.Г. Стащук³

¹ДП “НДІ ”Система””

²Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра обчислювальної математики

³Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка
НАН України, м. Львів

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ВЗАЄМОВПЛИВУ РОБОЧИХ СЕРЕДОВИЩ, КОНСТРУКЦІЙ ТА ЕЛЕМЕНТІВ ДАВАЧІВ ПІД ЧАС ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

© Горопацький В.Г., Обшта А.Ф., Стащук М.Г., 2004

Запропоновано аналітичний підхід до врахування впливу фізико-механічних характеристик металу давача та фізико-хімічних характеристик середовища на достеменність показів засобу вимірювальної техніки під час вимірювання. Наведено результати досліджень, виконаних на основі запропонованого підходу.

An analytical approach for taking into account the influence of the metal physical and mechanical characteristics of the sensor and the environment physical and chemical characteristics on the accuracy of measuring technique means work during the measurements of electric field of electricity conducting constructions is proposed. The research results that are done on the basis of proposed approach are presented.

Вступ. Засоби вимірювальної техніки та діагностики використовуються зазвичай в складних робочих умовах: впливу електромагнітного, температурного полів, фізико-хімічних факторів середовища, дії механічних навантажень тощо. Первинні перетворювачі (або давачі), які є основними функційними елементами цих приладів, перебувають під дією означених чинників. Крім того, ці елементи виготовлені з металу, тобто вони мають свої фізичні, механічні властивості, вони здатні кородувати тощо. Все це спричинює появу додаткових збурень під час вимірювань (діагностування). Однак існуючі методики проведення вимірювань не враховують взаємодії металу й середовища, що, на наш погляд, є суттєвим недоліком.

У статті описані результати досліджень [1–8], які підтверджують необхідність врахування означених аспектів для визначення достеменності показів вимірювально-діагностичної апаратури.

Металеve тіло з плоскою границею контакту з середовищем. Розглянемо випадок двох металевих тіл, які перебувають під дією одноосних механічних навантажень і простір між плоскими й паралельними поверхнями яких заповнений електропровідним середовищем – електролітом (рис. 1). Поверхню тіла при його взаємодії з середовищем можна вважати поверхнею електрода, зануреного у розчин. Під час окисно-відновних процесів у міжфазній області на електродах встановлюється динамічна рівновага і різниця потенціалів між розчином і поверхнею металу. У цьому випадку густини прямого (до поверхні) та зворотного (від поверхні) струмів рівні між собою. Динамічна рівновага струмів обміну, а також потенціалів у міжфазній області існує лише за відсутності сторонніх збудників струму. Механічне навантаження порушує динамічну рівновагу, що зумовлює перерозподіл електродного потенціалу, і в міжфазній області виникає додаткова електрорушійна сила. Оцінимо зміну електродного потенціалу $\Delta\varphi = \varphi_m - \varphi_c$ (φ_m – електричний потенціал металу, φ_c – електричний потенціал електроліту) на межі контакту тіла й середовища залежно від прикладеного навантаження, від віддалі між тілами та від зміни відношення електропровідності середовища до електропровідності металу.

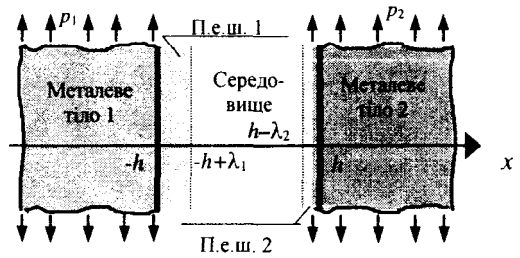


Рис. 1. Два металевих тіла під дією одноосних розтягувальних навантажень

Після розв'язання відповідної задачі теорії пружності про розтяг півплощини одноосними механічними навантаженнями система рівнянь для визначення розподілів потенціалів записується у вигляді [1, 3]

$$\frac{d^2\varphi_{m1}}{dx^2} = \chi_{m1}^2\varphi_{m1}(x) + \frac{2\beta_1(1+\nu_1)}{3(1+4\nu_1)\epsilon_0} p_1 \quad (x \leq -h), \quad \frac{d^2\varphi_{mc1}}{dx^2} = \chi_{mc1}^2\varphi_{mc1}(x) \quad (-h < x \leq -h + \lambda_1),$$

$$\frac{d^2\varphi_c}{dx^2} = \chi_c^2\varphi_c(x) \quad (-h + \lambda_1 < x < h - \lambda_2), \quad \frac{d^2\varphi_{mc2}}{dx^2} = \chi_{mc2}^2\varphi_{mc2}(x) \quad (h - \lambda_2 \leq x < h),$$

$$\frac{d^2\varphi_{m2}}{dx^2} = \chi_{m2}^2\varphi_{m2}(x) + \frac{2\beta_2(1+\nu_2)}{3(1+4\nu_2)\epsilon_0} p_2 \quad (x \geq h),$$

де $\varphi_{mi}, \varphi_{mci}, \varphi_c, \chi_{mi}, \chi_{mci}, \chi_c$ – електричні потенціали та характеристичні параметри металів, подвійних електричних шарів і середовища, $\chi_m^2 = \rho_m C_m / \epsilon_0$, $\chi_{mc}^2 = 2F^2 I / (\epsilon_{mc} RT)$, $\chi_c^2 = e^2 \sum z_i^2 n_i / (kT \epsilon_c \epsilon_0)$ [9,10], C_m – питома електроємність металу, ρ_m – густина розподілу його заряду, F – число Фарадея, I – іонна сила розчину, ϵ_{mc} – відносна діелектрична проникливість подвійного електричного шару, T – абсолютна температура, ϵ_c – відносна діелектрична проникливість середовища, ez_i – заряд i -го сорту іонів, n – число зарядів, k – стала Больцмана, β_i – електрострикційні коефіцієнти об'ємного розширення металів, ν_i – коефіцієнти Пуассона, ϵ_0 – діелектрична стала, $2h$ – товщина простору, заповненого середовищем ($i = 1, 2$).

Граничні умови мають вигляд

$$\sigma_{m1} \left. \frac{d\varphi_{m1}}{dx} \right|_{x=-h} = \sigma_{mc1} \left. \frac{d\varphi_{mc1}}{dx} \right|_{x=-h}, \quad \varphi_{m1}(-h) = \varphi_{mc1}(-h),$$

$$\sigma_{mc1} \left. \frac{d\varphi_{mc1}}{dx} \right|_{x=-h+\lambda_1} = \sigma_c \left. \frac{d\varphi_c}{dx} \right|_{x=-h+\lambda_1}, \quad \varphi_{mc1}(-h+\lambda_1) = \varphi_c(-h+\lambda_1),$$

$$\sigma_c \left. \frac{d\varphi_c}{dx} \right|_{x=h-\lambda_2} = \sigma_{mc2} \left. \frac{d\varphi_{mc2}}{dx} \right|_{x=h-\lambda_2}, \quad \varphi_c(h-\lambda_2) = \varphi_{mc2}(h-\lambda_2),$$

$$\sigma_{mc2} \left. \frac{d\varphi_{mc2}}{dx} \right|_{x=h} = \sigma_{m2} \left. \frac{d\varphi_{m2}}{dx} \right|_{x=h}, \quad \varphi_{mc2}(h) = \varphi_{m2}(h),$$

де σ_{mi}, σ_c – електропровідності металу і середовища, σ_{mci} – приведена електропровідність подвійного електричного шару, λ_i – товщина подвійного електричного шару вздовж поверхні тіла, $i = 1, 2$.

Крім того, граничні умови повинні забезпечувати природну вимогу обмеженості електричних потенціалів на нескінченності. Тобто також повинні виконуватись умови $|\varphi_{m1}(x)| < \infty$ при $x \rightarrow -\infty$ та $|\varphi_{m2}(x)| < \infty$ при $x \rightarrow +\infty$.

Внаслідок розв'язання означеної крайової задачі в [1,3] виведено аналітичні вирази для розрахунку впливу одноосних навантажень на зміну електричних і електродних потенціалів у системі “металеве тіло 1 – середовище–металеве тіло 2”. У табл. 1 наведено результати обчислень зміни електродних потенціалів залежно від прикладеного механічного навантаження та пружних характеристик металів [3].

У [5] наведено результати досліджень залежності величини електродних потенціалів від віддалі між плоскими і паралельними поверхнями навантажених тіл та від відношення електропровідності середовища до електропровідностей тіл. Встановлено, що за умови

$$2h \geq \max \left\{ \lambda_1 + \lambda_2 + \frac{1 + 2(\chi_{mci}\lambda_1 + \chi_{mc2}\lambda_2)}{\chi_c}; \lambda_1 + \lambda_2 + \frac{50}{\chi_c} \right\}, \quad (1)$$

тобто, коли віддаль між поверхнями тіл перевищує сумарну ширину подвійних електричних шарів, які виникають вздовж поверхні контакту кожного з тіл з середовищем, зміну електродних потенціалів залежно від навантаження можна обчислювати за формулою

$$\Delta\varphi_i - \Delta\varphi_{0i} = \frac{2\beta_i(1 + \nu_i)}{3(1 + 4\nu_i)\epsilon_0\chi_{mi}^2} p_i \times$$

$$\times \frac{\frac{\sigma_c\chi_c}{\sigma_{mci}\chi_{mci}} (e^{-\chi_{mci}\lambda_i} - e^{\chi_{mci}\lambda_i}) - (e^{-\chi_{mci}\lambda_i} + e^{\chi_{mci}\lambda_i}) + 2}{\left(\frac{\sigma_c\chi_c}{\sigma_{mi}\chi_{mi}} + 1 \right) (e^{-\chi_{mci}\lambda_i} + e^{\chi_{mci}\lambda_i}) - \left(\frac{\sigma_{mci}\chi_{mci}}{\sigma_{mi}\chi_{mi}} + \frac{\sigma_c\chi_c}{\sigma_{mci}\chi_{mci}} \right) (e^{-\chi_{mci}\lambda_i} - e^{\chi_{mci}\lambda_i})}$$

($\Delta\varphi_{0i}$ – електродний потенціал на межі i -ве металеве тіло – середовище, зумовлений тільки їх електрохімічною взаємодією, $i = 1, 2$).

Таблиця 1

Зміна електродних потенціалів в системі “металеве тіло 1–середовище–металеве тіло 2” залежно від прикладеного до тіла механічного навантаження

У вольтах

Система	Навантаження на правому тілі	$\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_{01}$	$\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_{02}$	$\Delta\varphi_{12} - \Delta\varphi_0$	$\Delta\varphi_c - \Delta\varphi_{0c}$	$\Sigma\Delta\varphi$
навантаження на лівому тілі: $p=p_1=23,5$ МПа						
мідне тіло-середовище-мідне тіло	$p=p_1$	$4.326 \cdot 10^{-4}$	$4.326 \cdot 10^{-4}$	$1.546 \cdot 10^{-11}$	$1.452 \cdot 10^{-13}$	$8.653 \cdot 10^{-4}$
	$p=0$	$4.326 \cdot 10^{-4}$	$-3.367 \cdot 10^{-7}$	$1.229 \cdot 10^{-2}$	$7.960 \cdot 10^{-4}$	$2.458 \cdot 10^{-3}$
	$p=-p_1$	$4.332 \cdot 10^{-4}$	$-4.332 \cdot 10^{-4}$	$2.458 \cdot 10^{-3}$	$1.592 \cdot 10^{-3}$	$4.917 \cdot 10^{-3}$
навантаження на лівому тілі: $p=p_1=23,5$ МПа						
мідне тіло-середовище-сталеве тіло	$p=p_2$	$4.326 \cdot 10^{-4}$	$1.261 \cdot 10^{-3}$	$-2.355 \cdot 10^{-3}$	$-1.526 \cdot 10^{-3}$	$5.575 \cdot 10^{-3}$
	$p=0$	$4.326 \cdot 10^{-4}$	0	$1.229 \cdot 10^{-3}$	$7.966 \cdot 10^{-4}$	$2.458 \cdot 10^{-3}$
	$p=-p_2$	$4.326 \cdot 10^{-4}$	$-1.261 \cdot 10^{-3}$	$4.814 \cdot 10^{-3}$	$3.119 \cdot 10^{-4}$	$9.628 \cdot 10^{-3}$
навантаження на лівому тілі: $p=p_2=68,6$ МПа						
сталеве тіло-середовище-сталеве тіло	$p=p_2$	$1.261 \cdot 10^{-3}$	$1.261 \cdot 10^{-3}$	$4.542 \cdot 10^{-11}$	$1.052 \cdot 10^{-12}$	$2.523 \cdot 10^{-3}$
	$p=0$	$1.262 \cdot 10^{-3}$	$-9.819 \cdot 10^{-7}$	$3.584 \cdot 10^{-3}$	$2.321 \cdot 10^{-3}$	$7.169 \cdot 10^{-3}$
	$p=-p_2$	$1.263 \cdot 10^{-3}$	$-1.263 \cdot 10^{-3}$	$7.169 \cdot 10^{-3}$	$4.642 \cdot 10^{-3}$	$1.433 \cdot 10^{-2}$

Якщо виконується умова (1), то величини електродних потенціалів на границях контактів кожного з металевих тіл з середовищем не залежать від віддалі між поверхнями тіл. У цьому ж випадку, крім того, електродний потенціал на межі одного з тіл не залежить від відношення електропровідності середовища до електропровідності другого тіла. Збільшення ж відношення електропровідності середовища до електропровідності тіла призводить до зростання (за абсолютним значенням) електродного потенціалу на межі цього тіла з середовищем (табл. 2).

Таблиця 2

Зміна електродних потенціалів в системі “метал–середовище” залежно від відношення електропровідності середовища до електропровідності металу при дії на тіло статичного навантаження ($p = 23,5 \text{ МПа}$ – для міді і $p = 68,6 \text{ МПа}$ – для сталі)

У вольтах

Відношення електропровідностей σ_c / σ_m	Значення зміни електродного потенціалу $\Delta\phi - \Delta\phi_0$	
	мідь	сталь
10^{-8}	$4.3266702 \cdot 10^{-4}$	$1.2616137 \cdot 10^{-3}$
10^{-6}	$4.3266825 \cdot 10^{-4}$	$1.2616177 \cdot 10^{-3}$
10^{-4}	$4.3279137 \cdot 10^{-4}$	$1.2620142 \cdot 10^{-3}$
10^{-2}	$4.4479531 \cdot 10^{-4}$	$1.3006165 \cdot 10^{-3}$

Металеве тіло з заповненим середовищем круговим отвором. Розглянемо випадок металевого тіла, яке перебуває під дією одноосних навантажень і містить заповнений електропровідним середовищем круговий отвір (рис. 2). Як відомо з теорії пружності, криволінійність контурів матеріалу суттєво впливає на розподіл механічних напружень біля них. У випадку дії статичного навантаження інтенсивності p величина дилатації в околі кругової порожнини пластини визначається з виразу [2]

$$\varepsilon_\sigma = \frac{2p(1+\nu)}{3K(1+4\nu)} \left(1 + \frac{2r_0^2}{r^2} \cos 2\theta \right),$$

а розподіл електричних потенціалів – з розв'язку системи рівнянь

$$\nabla^2 \varphi_m = \chi_m^2 \varphi_m + \frac{\beta K}{\varepsilon_0} \varepsilon_\sigma \quad (r_0 \leq r),$$

$$\nabla^2 \varphi_{mc} = \chi_{mc}^2 \varphi_{mc} \quad (r_0 - \lambda < r < r_0),$$

$$\nabla^2 \varphi_c = \chi_c^2 \varphi_c \quad (0 \leq r \leq r_0 - \lambda)$$

з граничними умовами

$$\sigma_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \sigma_{mc} \frac{\partial \varphi_{mc}}{\partial r} \Big|_{r=r_0}, \quad \varphi_m \Big|_{r=r_0} = \varphi_{mc} \Big|_{r=r_0},$$

$$\sigma_{mc} \frac{\partial \varphi_{mc}}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \sigma_c \frac{\partial \varphi_c}{\partial r} \Big|_{r=r_1}, \quad \varphi_{mc} \Big|_{r=r_1} = \varphi_c \Big|_{r=r_1} \quad (r_1 = r_0 - \lambda),$$

де K –модуль об'ємного розширення [10].

Розв'язок такої задачі записується через модифіковані циліндричні функції I_k та K_k ($k = 0, 2$) [2,4]. Однак, як показано в [4], цей розв'язок може бути поданий у наближеному, зручному для обчислень, вигляді. Співвідношення для визначення $\Delta\phi - \Delta\phi_0$ у цьому випадку має вигляд

$$\Delta\phi - \Delta\phi_0 = \frac{\alpha}{\chi_m^2} \left(\frac{\gamma_0}{d} - 1 \right) + \frac{2\alpha}{\chi_m^2} \left(\frac{\gamma}{d} - 1 \right) \cos 2\theta, \quad (2)$$

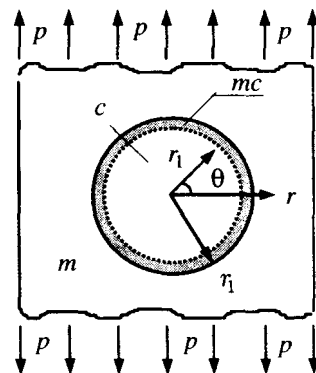


Рис. 2. Металеве тіло з заповненим корозійним середовищем круговим отвором радіуса r_0 під дією навантаження p : m – метал; mc – подвійний електричний шар заширишки λ ; c – корозійне середовище; (r, θ) – полярні координати; $r_1 = r_0 - \lambda$.

де

$$\alpha = \frac{2(1+\nu)p}{3K(1+4\nu)}, \quad \gamma_0 = \frac{\sigma_m \chi_{mc}}{\sigma_m \sqrt{\chi_m \chi_c}} e^- - \frac{\sigma_c \sqrt{\chi_c}}{\sigma_m \sqrt{\chi_m}} e^+ - 2\sqrt{\frac{r_0}{r_1}} \frac{\sqrt{\chi_m}}{\sqrt{\chi_c}},$$

$$\gamma = \left(\frac{\sigma_m \chi_{mc}}{\sigma_m \sqrt{\chi_m \chi_c}} + \frac{2\sigma_c \sqrt{\chi_c}}{\sigma_m \sqrt{\chi_m \chi_c} r_0} \right) e^- - \left(\frac{2}{r_0 \sqrt{\chi_m \chi_c}} + \frac{\sigma_c \sqrt{\chi_c}}{\sigma_m \sqrt{\chi_m}} \right) e^+ - 2\sqrt{\frac{r_0}{r_1}} \left(\frac{\sqrt{\chi_m}}{\sqrt{\chi_c}} - \frac{2}{r_0 \sqrt{\chi_m \chi_c}} \right),$$

$$d = \left(\frac{\sigma_c \sqrt{\chi_m \chi_c}}{\sigma_m \chi_{mc}} + \frac{\sigma_m \chi_{mc}}{\sigma_m \sqrt{\chi_m \chi_c}} \right) e^- - \left(\frac{\sqrt{\chi_m}}{\sqrt{\chi_c}} + \frac{\sigma_c \sqrt{\chi_c}}{\sigma_m \sqrt{\chi_m}} \right) e^+, \quad e^\pm = e^{-\chi_{mc} \lambda} \pm e^{\chi_{mc} \lambda},$$

У роботі [2,4,5] наведено результати аналітичних досліджень впливу одноосного навантаження на розподіл електричних потенціалів в околі заповненої середовищем кругової порожнини, а також на зміну електродного потенціалу $\Delta\varphi - \Delta\varphi_0$ вздовж контуру такого дефекту (рис.2).

У табл. 3 наведено результати обчислень змін електродних потенціалів $\Delta\varphi - \Delta\varphi_0$ вздовж контурів кругових дефектів, що зумовлені дією одноосних розтягальних навантажень на тіла з міді (при навантаженні $p = 23,5$ МПа) та маловуглецевої сталі (при навантаженні $p = 68,6$ МПа).

Таблиця 3

Зміна електродного потенціалу в околі кругового дефекту в системі “метал-середовище” залежно від відношення електропровідностей металу і середовища при дії на тіло статичного навантаження ($p = 23,5$ МПа – для міді і $p = 68,6$ МПа – для сталі)

У вольтах

θ^0	$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 10^{-8}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 10^{-6}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 10^{-4}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 10^{-2}$
	$\Delta\varphi - \Delta\varphi_0$	$\Delta\varphi - \Delta\varphi_0$	$\Delta\varphi - \Delta\varphi_0$	$\Delta\varphi - \Delta\varphi_0$
Мідь				
0	$1.30530 \cdot 10^{-3}$	$1.30530 \cdot 10^{-3}$	$1.30573 \cdot 10^{-3}$	$1.34726 \cdot 10^{-3}$
10	$1.25282 \cdot 10^{-3}$	$1.25282 \cdot 10^{-3}$	$1.25323 \cdot 10^{-3}$	$1.29310 \cdot 10^{-3}$
20	$1.10171 \cdot 10^{-3}$	$1.10171 \cdot 10^{-3}$	$1.10207 \cdot 10^{-3}$	$1.13713 \cdot 10^{-3}$
30	$8.70200 \cdot 10^{-4}$	$8.70203 \cdot 10^{-4}$	$8.70488 \cdot 10^{-4}$	$8.98179 \cdot 10^{-4}$
40	$5.86209 \cdot 10^{-4}$	$5.86211 \cdot 10^{-4}$	$5.86402 \cdot 10^{-4}$	$6.05057 \cdot 10^{-4}$
50	$2.83991 \cdot 10^{-4}$	$2.83992 \cdot 10^{-4}$	$2.84085 \cdot 10^{-4}$	$2.93122 \cdot 10^{-4}$
60	$-1.48444 \cdot 10^{-11}$	$-1.48445 \cdot 10^{-11}$	$-1.48497 \cdot 10^{-11}$	$-1.53222 \cdot 10^{-11}$
70	$-2.31512 \cdot 10^{-4}$	$-2.31512 \cdot 10^{-4}$	$-2.31588 \cdot 10^{-4}$	$-2.38955 \cdot 10^{-4}$
80	$-3.82620 \cdot 10^{-4}$	$-3.82622 \cdot 10^{-4}$	$-3.82747 \cdot 10^{-4}$	$-3.94922 \cdot 10^{-4}$
90	$-4.35100 \cdot 10^{-4}$	$-4.35101 \cdot 10^{-4}$	$-4.35244 \cdot 10^{-4}$	$-4.49089 \cdot 10^{-4}$

	$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 10^{-8}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 10^{-6}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 10^{-4}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 10^{-2}$
$\theta(^\circ)$	$\Delta\varphi - \Delta\varphi_0$	$\Delta\varphi - \Delta\varphi_0$	$\Delta\varphi - \Delta\varphi_0$	$\Delta\varphi - \Delta\varphi_0$
$\theta(^\circ)$	Сталь			
0	$3.78484 \cdot 10^{-3}$	$3.78485 \cdot 10^{-3}$	$3.78614 \cdot 10^{-3}$	$3.91184 \cdot 10^{-3}$
10	$3.63267 \cdot 10^{-3}$	$3.63268 \cdot 10^{-3}$	$3.63392 \cdot 10^{-3}$	$3.75457 \cdot 10^{-3}$
20	$3.19451 \cdot 10^{-3}$	$3.19452 \cdot 10^{-3}$	$3.19562 \cdot 10^{-3}$	$3.30171 \cdot 10^{-3}$
30	$2.52322 \cdot 10^{-3}$	$2.52323 \cdot 10^{-3}$	$2.52409 \cdot 10^{-3}$	$2.60789 \cdot 10^{-3}$
40	$1.69976 \cdot 10^{-3}$	$1.69977 \cdot 10^{-3}$	$1.70035 \cdot 10^{-3}$	$1.75680 \cdot 10^{-3}$
50	$8.23459 \cdot 10^{-4}$	$8.23462 \cdot 10^{-4}$	$8.23743 \cdot 10^{-4}$	$8.51091 \cdot 10^{-4}$
60	$-5.40863 \cdot 10^{-11}$	$-5.40866 \cdot 10^{-11}$	$-5.41051 \cdot 10^{-11}$	$-5.59011 \cdot 10^{-11}$
70	$-6.71290 \cdot 10^{-4}$	$-6.71292 \cdot 10^{-4}$	$-6.71522 \cdot 10^{-4}$	$-6.93816 \cdot 10^{-4}$
80	$-1.10944 \cdot 10^{-4}$	$-1.10944 \cdot 10^{-3}$	$-1.10982 \cdot 10^{-3}$	$-1.14667 \cdot 10^{-3}$
90	$-1.26161 \cdot 10^{-4}$	$-1.26161 \cdot 10^{-3}$	$-1.26204 \cdot 10^{-3}$	$-1.30394 \cdot 10^{-3}$

Механічне навантаження у цьому випадку локалізує електрохімічні процеси вздовж поверхні дефекту – внаслідок його дії на поверхні поділу тіло–середовище утворюються катодні та анодні ділянки. Межі анодних і катодних ділянок на поверхні кругового дефекту встановлюються з виразу (2) за умови $\Delta\varphi = 0$:

$$\theta^* = \pm \frac{1}{2} \arccos \frac{\alpha(d - \gamma_0) - \chi_m^2 d \Delta\varphi_0}{2\alpha(\gamma - d)} + 180^\circ k \quad (k = 0, 1). \quad (3)$$

Тобто, при кутах, визначених виразом (3), відбувається перехід від анодної ділянки поверхні отвору (коли $\Delta\varphi > 0$) до катодної (коли $\Delta\varphi < 0$), що дозволяє оцінювати інтенсивність корозійного руйнування цих ділянок поверхні.

Отже, якщо поверхня взаємодії металевго тіла з середовищем не є плоскою, а коловою, то величина електродного потенціалу і його розподіл вздовж поверхні змінюються. У випадку колового отвору, заповненого електролітом, на поверхні отвору виникають анодні і катодні зони. Однак встановлено [5], що величина електродного потенціалу вздовж плоскої поверхні навантаженого металевго тіла відповідає середньому арифметичному значенню алгебраїчної суми величини електродного потенціалу в анодній і катодній зонах поверхні отвору. Крім того, при дії на тіло з круговим отвором одноосних розтягальних навантажень абсолютне значення зміни величини електродного потенціалу в зоні анода (при $\theta = 0$) у 3 рази більше, ніж у зоні катода (при $\theta = 90^\circ$) (табл. 3). Це означає, що під час проведення вимірювань (діагностування) можуть виникнути додаткові неточності.

Висновки. Оскільки величина електродного потенціалу, який виникає на межі метал-електроліт, суттєво залежить від фізико-механічних характеристик металу і фізико-хімічних характеристик електроліту, від геометричної форми межі контакту метал-електроліт, а також від величини і характеру

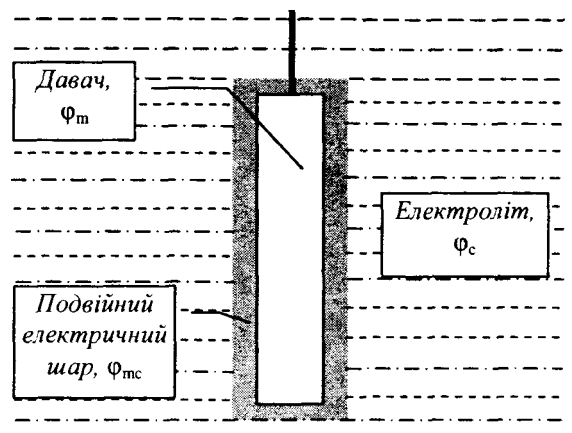


Рис. 3. Давач засобу вимірювань у середовищі (φ_m – електричний потенціал металу давача, φ_c – електричний потенціал електроліту, φ_{mc} – розподіл електричного потенціалу в подвійному електричному шарі)

дії механічних навантажень, то під час розроблення методик проведення вимірювань (діагностування) з метою забезпечення належної достеменності показів засобів вимірювань слід враховувати фізико-хімічні аспекти в системі „первинний перетворювач – електроліт” (рис. 3).

Під час вимірювань застосовуються декілька давачів, тому важливим є висновок про те, що величина електродного потенціалу вздовж поверхні одного з давачів не залежить від величини електродного потенціалу вздовж поверхні другого давача, якщо ці давачі розміщені на віддалі, яка перевищує сумарну ширину подвійних електричних шарів, що виникають вздовж поверхонь контакту давачів з електропровідним середовищем. Це означає, що для забезпечення необхідної достеменності вимірювань давачі повинні бути розміщені на деякій віддалі (що перевищує сумарну ширину подвійних електричних шарів) один від одного.

Наявні на поверхні та в об'ємі матеріалу неоднорідності та дефекти поверхні (порожнини, раковини, щілини, пітинги тощо) є концентраторами напружень та місцями електрохімічної корозії, яка інтенсифікується від дії механічних навантажень, оскільки механічне навантаження є причиною перерозподілу зарядів в деформованих електропровідних тілах [8, 10]. Тому при проведенні вимірювань (діагностування) електропровідних конструкцій слід також враховувати вплив неоднорідності деформації на корозійно-механічне руйнування матеріалу та на роботу засобів вимірювань.

Для вирішення проблем врахування впливу умов робочого середовища на достеменність показів засобів вимірювань та діагностики може бути застосована описана в [1–5] математична модель, яка дає змогу встановити зміну величини електродного потенціалу на межі напружено-деформованого металу і електроліту, тобто:

а) визначити напружено-деформований стан давача засобу вимірювань, спричинений дією на тіло зовнішніх силових навантажень;

б) встановити вплив цього напружено-деформованого стану на величину і характер зміни електродного потенціалу на межі контакту тіла з рідким електропровідним середовищем.

1. Стацук М.Г. Електродний потенціал на прямолінійній межі „напружений метал-середовище” // Проблеми корозії та корозійного захисту матеріалів. – 2000. – № 1. – С. 47–50
2. Стацук М.Г. Оцінка впливу пружної деформації на електродний потенціал металевого циліндра в середовищі // Фіз.хім.механіка матеріалів. – 2000. – №1. – С. 222–225
3. Горобацький В.Г., Дмитрах І.М., Стацук М.Г., Коваленко Р.В. Аналітичне визначення впливу пружних деформацій на електродні потенціали біля плоских поверхонь металевих тіл // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – 2001. Вип. 3. – С. 61–76
4. Жовтанецький М.І., Стацук М.Г., Паракуда В.В., Горобацький В.Г., Стацук А.М. Електродний потенціал вздовж криволінійної межі контакту електроліту з напружено-деформованим металом // Журнал фізичних досліджень. – 2001. – Т 5. – № 2. – С. 139–144.
5. Горобацький В.Г. Вплив неоднорідності деформації на характер розподілу електродного потенціалу вздовж границі металеве тіло – електроліт. Автореф. дис... канд. фіз.-мат. наук / Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. – Львів, 2002. – 20 с.
6. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
7. Обшта А. Ф., Притуляк Я.Г., Тасінкевич Ю.Г. Аналіз поля моделі поверхневого дефекту для відновлення зображення. // “Моделювання і діагностика складних процесів та систем”: Збірник наукових праць – К.: Ін-т проблем моделювання в енергетиці НАН України, 1999. Вип. 8. – С. 139–143
8. Дмитрах І.М., Панасюк В.В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. – Львів: Національна академія наук України. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, 1999. – 341с.
9. Антропов Л.І. Теоретична електрохімія. – К.: Либідь, 1993. – 544 с.
10. Бурак Я.Й., Галапац Б.П., Гнідець Б.М. Фізико-механічні процеси в електропровідних тілах. – К.: Наук. думка, 1978. – 232 с.