

П.Г. Столярчук<sup>1</sup>, П.М. Сопрунюк<sup>2</sup>, В.М. Юзевич<sup>2</sup><sup>1</sup>Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут НАН України

## ЯКІСТЬ НЕРУЙНІВНОГО МЕТОДУ АНАЛІЗУ АДГЕЗІЙНИХ ЗВ'ЯЗКІВ

© Столярчук П.Г., Сопрунюк П.М., Юзевич В.М., 2004

**Викладено теоретичні основи неруйнівного методу визначення енергетичних характеристик міжфазних шарів у системі металева підкладка – діелектрична плівка з урахуванням зондування поверхні розділу інфрачервоними променями. Обґрунтовано вищу якість запропонованого методу порівняно з руйнівним методом мікротискування на основі порівняння кількості потенційно визначальних параметрів.**

**Theoretical bases of nondestructive method of definition of power characteristics of interphase layers in system a metal substrate - a dielectric film are submitted in view of sounding an interface by infra-red beams. The substantiation of the first-rate quality of the offered method concerning a destroying method of microcave-in is resulted on the basis of comparison of number of potentially determined parameters.**

Проблема якості може стосуватися відбору та передачі інформації в інформаційно-вимірювальних системах. Проаналізуємо сучасний стан якості інформації про адгезійні зв'язки у системі плівка (адгезив, діелектрик) – підкладка (субстрат, метал) з урахуванням даних, які отримують на основі інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів поверхневих та міжфазних шарів твердих тіл [1–3].

У пам'ять ЕОМ заносимо масиви даних. Оскільки інформація про поверхню твердих тіл характеризується широкою розгалуженістю, складною структурою, то інформаційні потоки повинні постійно нарощуватися в банках даних. Тому обмежимося, зокрема, твердими тілами, які у вихідному стані контактують із достатньо сухим повітрям. В кінцевому стані два тіла контактують між собою і їх взаємодія характеризується адгезійними зв'язками. Поверхню металу (підкладки) вважаємо гладкою, без виступів і западин, достатньо добре відшліфованою. Локальні бази даних, які створюють для детального вивчення фізичних характеристик поверхонь, повинні бути систематизовані й використані для формування необхідних знань. Ці знання потрібні для розроблення нових досконаліших зміцнювальних покриттів металів [4] і виведення їх на якісно новий рівень.

У матеріалознавстві існують проблеми, в яких важливо встановити не тільки якість об'єкта і інформації про нього. Зокрема, це проблеми якості поверхні твердих тіл (підкладки), якості нанесення плівки на поверхню підкладки, а також якості адгезійних зв'язків між плівкою і підкладкою, які забезпечують достатню міцність композиції. Ці питання тісно пов'язані з однією з центральних проблем матеріалознавства – дослідження поверхневих та міжфазних наночарів, товщина яких  $h = [1; 5 \text{ нм}]$ .

Обмежимося проблемами якості металевої підкладки (наприклад, із міді) і якості зв'язків між прозорою плівкою (наприклад, із скла) та підкладкою, які забезпечують достатню адгезійну міцність композиції.

Для теоретичного аналізу стану поверхневих та міжфазних шарів металів і діелектриків використаємо модельні подання у межах макроскопічного підходу нерівноважної термодинаміки та фізики поверхні [5, 6].

Важливим фундаментальним напрямком дослідження приграничних і міжфазних шарів є контроль параметрів, які зв'язані термодинамічними співвідношеннями. Зокрема, це поверхневі енергія  $W_s$  та натяг  $\sigma_s$ , міжфазні енергія  $W_m$  та натяг  $\sigma_m$ , а також робота адгезії [7]:

$$\sigma_{ad} = \sigma_{h+} + \sigma_{h-} - \sigma_m . \quad (1)$$

де індекси (+), (–) відповідають металу та діелектрику.

Уведемо енергію адгезійних зв'язків  $\gamma_{ad}$  аналогічно, як у виразі (1):

$$W_{ad} = W_{s+} + W_{s-} - W_m . \quad (2)$$

Ці вісім параметрів  $\sigma_{h+}$ ,  $\sigma_{h-}$ ,  $W_{s+}$ ,  $W_{s-}$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_{ad}$ ,  $W_m$ ,  $W_{ad}$  і визначатимуть якість поверхонь. Для їх оцінки використовують різні методи діагностики поверхні [8–10]. Фізична діагностика поверхні – сукупність методів дослідження процесів на поверхні та вимірювання її характеристик (густини, енергії тощо) [8–10].

Жоден з відомих методів та приладів діагностики поверхні не є універсальним і не може повністю задовольнити вимоги практики [11]. Тому бажано поєднувати методи та створювати нові інформаційно-вимірювальні системи (ІВС), в яких постає питання якості передачі інформації.

Детальний теоретичний аналіз процесів, що проходять у поверхневих шарах металів з використанням багатьох відомих способів обробки тіл та їх поверхонь показав, що структуру та властивості міжфазних шарів можна впорядкувати. Але жоден із відомих способів не дає змогу стабільно змінювати в необхідному напрямі параметри та фізичні характеристики поверхневих та міжфазних шарів.

Тому наведемо необхідну інформацію стосовно термодинамічних параметрів поверхневих та міжфазних шарів, за допомогою якої можна прогнозувати якість неруйнівного методу діагностики, який ґрунтується на використанні електромагнітних хвиль інфрачервоного діапазону.

У [3] запропоновано структуру й набір руйнівних методів для вимірювання мікротвердості, а також поверхневих енергій  $W_s$  та натягів  $\sigma_h$ .

Розглянемо неруйнівний метод оцінки міжфазних напружень і відповідно характеристик адгезійних зв'язків в системі діелектрична плівка – металева підкладка, що базується на зондуванні поверхні розділу середовищ електромагнітним випромінюванням.

Взаємодію інфрачервоного випромінювання з поверхневим чи міжфазним шаром опишемо за допомогою інтегрального співвідношення [11, 12]

$$\int_{-h_1}^{h_2} Q(x, \lambda, m - i \cdot \kappa) \cdot dx = \frac{1}{\pi \cdot l} \cdot \ln \left[ \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \right] , \quad (3)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі зондувального випромінювання;

$h_1$ ,  $h_2$  – товщини приграничних шарів у двох середовищах ( $h_i$ ,  $i=1, 2$ );

$l = h_1 + h_2$  – загальна товщина приграничного шару;

$I_0(\lambda)$  – інтенсивність електромагнітної хвилі, що падає на поверхневий шар;

$I(\lambda)$  – інтенсивність електромагнітної хвилі, що двічі пройшла тонкий наносар, товщиною  $l$ ;

$m - i \cdot \kappa$  – комплексний показник заломлення речовини, яка відповідає поверхневому шару поблизу межі метал – діелектрик;

$Q(x, \lambda, m - i \cdot \kappa)$  – диференціальний коефіцієнт екстинкції для поверхневого шару, що описує поглинання й розсіювання електромагнітної хвилі.

Обмежимося розглядом тонкого приграничного (поверхневого або міжфазного) наносару. Вважаємо, що оптичні характеристики  $m$ ,  $\kappa$  в межах приграничного шару змінюються неперервно. Враховуємо подвійний електричний шар, а також адсорбовані частинки зовнішнього середовища.

Для оцінки компонент напружень  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$ , а також товщин приграничних шарів використаємо результати [5, 6] Вважатимемо, що характеристики матеріалу, за допомогою яких можна описати для поверхневих шарів перерозподіл електронів провідності в металі та зв'язаних електричних зарядів у діелектрику, є сталими.

Як приклад розглянемо метал (мідь), зразок якого у першому випадку контактує з повітрям, а в другому – з тонкою плівкою скла.

На основі обчислювального експерименту відповідно до методики [5, 6] встановлено, що для системи середовищ мідь – повітря, що контактують, напруження у першому атомному шарі поверхневої області металу мають значення:

$$\sigma_y = 7394 \text{ МПа (розтяг)}; \sigma_x = 1313 \text{ МПа (стиск)}; \sigma_0 = (2\sigma_y + \sigma_x)/3 = 5,4 \text{ МПа} \quad (4)$$

і товщина  $h_n \approx 0,9$  нм.

Експериментально визначено, що коефіцієнт заломлення електропровідних тіл  $m - i \cdot \kappa$  лінійно зростає, якщо зразок навантажено гідростатичним тиском  $p$ . Зокрема, для міді відповідно до [13] при  $p = 100$  МПа маємо таке зменшення складових  $m$  і  $\kappa$ :

$$\Delta m = 0,01; \quad \Delta \kappa = 0,003. \quad (5)$$

Використавши оцінки (5), отримаємо для першого атомного шару поверхневої ділянки металу, який контактує з повітрям, прирости:  $\Delta m = 0,54$ ;  $\Delta \kappa = 0,162$ .

Як відзначено у монографії [12], на показник заломлення електропровідного тіла впливають електрони провідності та дипольні частинки. Але оскільки вплив подвійного електричного шару на  $\Delta m$  і  $\Delta \kappa$  у межах термодинамічної моделі дослідити неможливо, то оцінимо поправки  $\Delta m$  і  $\Delta \kappa$  за допомогою механічних напружень поверхневого шару (4) і відповідних експериментальних оцінок (5).

Враховуючи, що усереднену товщину електронної хмарки за межами металу в повітрі наближено можна апроксимувати аналітичним співвідношенням  $h_e \approx \pi / k_F$  [14], отримаємо  $h_e \approx 0,23$  нм.

Обмежившись найхарактернішими для міді значеннями показника заломлення [13] (якщо  $\lambda_* = 1$  мкм):

$$m - i \cdot \kappa = 1,95 - 1,02i, \quad (6)$$

для першого атомного шару поверхневої області металу (відповідний індекс 1), який контактує з повітрям, одержимо:

$$m_1 - i \cdot \kappa_1 = 1,41 - 0,86i. \quad (7)$$

Аналогічно знаходимо  $m_2 - i \cdot \kappa_2$  для другого атомного шару поверхневої ділянки і т. д. ( $j = 1, 2, \dots$ ).

Отже, в інтегральному співвідношенні (3) буде коефіцієнт екстинкції:

$$Q^* = Q^*(x, \lambda, n_j - i \cdot \kappa_j). \quad (8)$$

Для визначення механічних напружень і відповідно енергетичних характеристик систем, що контактують, здійснимо зондування поверхневих та міжфазних шарів електромагнітним випромінюванням відповідно до методики [15] (джерела – світлодіоди типів АЛ 115 А і ЗЛ 341 В) для двох довжин хвиль:

$$\lambda_1 = 0,55 \text{ мкм}; \quad \lambda_2 = 0,95 \text{ мкм}.$$

Для дослідження залежності складових показника заломлення  $m - i \cdot \kappa$  від навантаження в межах поверхневого чи міжфазного шару використаємо співвідношення [12]

$$m = \sqrt{(\sqrt{\alpha_1^2 + \beta_1^2} + \alpha_1)/2}, \quad \kappa = \sqrt{(\sqrt{\alpha_1^2 + \beta_1^2} - \alpha_1)/2}, \quad (9)$$

де  $\alpha_1 = 1 + \omega_p^2 \cdot (\omega_i^2 - \omega_e^2) / ((\omega_i^2 - \omega_e^2)^2 + \gamma_1^2 \cdot \omega_e^2)$ ;

$\beta_1 = \omega_p^2 \cdot \gamma_1 \cdot \omega_e / ((\omega_i^2 - \omega_e^2)^2 + \gamma_1^2 \cdot \omega_e^2)$ ;

$\omega_p = (N_e \cdot q_0^2 / (m_e \cdot \epsilon_0))^{0,5}$  – плазмова частота;

$\omega_i$  – резонансна частота;

$N_e$  – концентрація вільних електронів;

$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – ефективна маса електрона;

$\omega_e$  – частота зондувального випромінювання;

$\epsilon_0 = \alpha_1 + \beta_1 \cdot i$  – комплексна діелектрична проникність матеріалу середовища;

$\gamma_1$  – коефіцієнт послаблення електромагнітних хвиль.

Використовуючи співвідношення (9), знаходимо, що для ненавантаженої міді при  $\lambda_1 = 1,0$  мкм і  $\lambda_2 = 0,436$  мкм з урахуванням даних [13])

$$\omega_p = 1,64 \cdot 10^{16} \text{ Гц}; \omega_0 = 5,78 \cdot 10^{15} \text{ Гц}; \gamma_1 = 3,58 \cdot 10^{16} \text{ Гц}. \quad (10)$$

а в першому поверхневому шарі для атомних частинок міді:

$$\omega_p^C = 7,03 \cdot 10^{18} \text{ Гц}; \omega_0^C = 5,97 \cdot 10^{15} \text{ Гц}; \gamma_C = 3,13 \cdot 10^{16} \text{ Гц}. \quad (11)$$

За допомогою числових значень фізичних величин  $\gamma_1, \gamma_C, \omega_p, \omega_p^C, \omega_0, \omega_0^C$  (10), (11) знаходимо для зондувальних електромагнітних хвиль ( $\lambda_1 = 0,55$  мкм;  $\lambda_2 = 0,95$  мкм) залежності  $Q(x, \lambda)$  (тобто  $Q_1(x, \lambda_1), Q_2(x, \lambda_2)$ ), а експериментально  $I_1(\lambda_1)$  і  $I_2(\lambda_2)$  – інтенсивності електромагнітних хвиль, що двічі пройшли тонкий поверхневий наночастинок шар.

З використанням експериментальних значень  $I_1(\lambda_1)$  і  $I_2(\lambda_2)$  і відповідних значень диференціальних коефіцієнтів екстинкції  $Q_1(x, \lambda_1), Q_2(x, \lambda_2)$  отримуємо інформацію достатню, для оцінки механічних напружень у поверхневих та міжфазних шарах твердих тіл системи метал – діелектрик, які в першому випадку контактують із повітрям, а в другому – між собою.

Розглянемо приклад оцінки механічних напружень, на основі якого можна визначити характеристики адгезійних зв'язків у системі мідна підкладка – плівка скла.

Нехай область " $0 < x < h_m$ " (шар  $V^+$ ) – займає діелектрик (скло). Підкладку (неполяризований електропровідний метал (мідь)) моделюємо напівбезмежним середовищем (" $x < 0$ " область  $V^-$ ) у декартових координатах " $x, y, z$ ".

Запишемо міжфазну енергію  $W_m$  аналогічно як поверхневу  $W_s$  [5]:

$$W_m = W_E + \xi_m \cdot W_p, \quad W_E = \int_{-h_{\Pi}^-}^{h_{\Pi}^+} w_E \cdot dx; \quad W_p = \int_{-h_{\Pi}^-}^{h_{\Pi}^+} w_p \cdot dx. \quad (12)$$

де  $W_E, W_p$  – електрична та механічна (пружна) складові міжфазної енергії відповідно;  $\xi_m$  – емпіричний параметр (фізична характеристика матеріалу, яка відповідає рівноважному стану поверхні розділу  $S_{\Gamma}^S$ );  $w_E, w_p$  – густини енергії електростатичного поля й поля механічних напруг відповідно:

$$w_E = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{2} \cdot \left[ \frac{d\Psi}{dx} \right]^2 = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{2} \cdot [E_x]^2; \quad w_p = \frac{\sigma_x}{2 \cdot E} \cdot (\sigma_x - 4 \cdot \nu \cdot \sigma_y) + \frac{1 - \nu}{E} \cdot \sigma_y^2; \quad (13)$$

$E_x$  – складова напруженості електричного поля;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – універсальна електрична стала;  $\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу ( $\varepsilon = 1$  для міді;  $\varepsilon = 4,5$  для кварцу [16]);  $\Psi$  – потенціал напруженості електричного поля (для діелектрика – поля зв'язаних зарядів);  $\sigma_x, \sigma_y$  – компоненти тензора механічних напруг;  $E, \nu$  – механічні модулі;  $h_M = h_{\Pi}^+ + h_{\Pi}^-$  – товщина міжфазного шару, складові якої  $h_{\Pi}^+$  і  $h_{\Pi}^-$  визначимо за допомогою рівнянь

$$\sigma_y^+ + P_a = 0 \quad (\text{для } x = h_{\Pi}^+), \quad \sigma_y^- + P_a = 0 \quad (\text{для } x = h_{\Pi}^-). \quad (14)$$

де  $P_a = 100$  кПа – атмосферний тиск.

Для оцінки фізичної характеристики матеріалу  $\xi_m$  запишемо:

$$\delta W_m / \delta C_e = \delta (W_E + \xi_m W_p) / \delta C_e = 0, \quad (15)$$

вважаючи  $C_e$  варіаційним параметром.  $C_e$  – питома електроємність матеріалу поверхневого шару ( $C_e^+, C_e^-$  – значення  $C_e$  для фаз  $V^+, V^-$ ). Оскільки енергія  $W_m$  залежить від характеристик  $C_e^+, C_e^-$ , то у такому разі приймемо  $C_e = C_e^+$  і виразимо  $C_e^-$  через  $C_e$ :

$$C_e^- = \xi_e \cdot C_e \quad (\text{якщо } \xi_e = C_e^- / C_e^+). \quad (16)$$

Шукаючи екстремум функціонала  $W_m$ , вважаємо:

$$\xi_e = \text{const}. \quad (17)$$

Для оцінки  $\xi_m$  наближено приймемо:

$$\xi_m = (\xi_S^+ + \xi_S^-) / 2, \quad (18)$$

де  $\xi_S^+$ ,  $\xi_S^-$  – характеристики середовищ, що контактують, які оцінимо для системи "тверде тіло – повітря".

Міжфазний натяг  $\sigma_m$  визначимо за допомогою співвідношення

$$\sigma_m = \int_{h_{\Pi}^-}^{h_{\Pi}^+} \sigma_y \cdot dr = \int_0^{h_{\Pi}^+} \sigma_y^+ \cdot dr + \int_{h_{\Pi}^-}^0 \sigma_y^- \cdot dr = (\sigma_m)_1 + (\sigma_m)_2. \quad (19)$$

Параметри  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  ( $\sigma_{11} = \sigma_x$ ;  $\sigma_{22} = \sigma_y$ ) знаходимо аналітично за допомогою рівнянь стану [5,6]:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij+} &= E(v_e/(1+v) - b\phi/3)\delta_{ij}/(1-2v) + Ee_{ij}/(1+v), \\ \omega_v &= \rho\omega = \varepsilon_0 k^2 \phi + bEe/(3(1+v)), \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ij-} &= E(v_e/(1+v) - b\phi_c/3)\delta_{ij}/(1-2v) + Ee_{ij}/(1+v), \\ \omega_{cv} &= \rho\omega_c = \varepsilon_0 k^2 \phi_c + bEe/(3(+v)). \end{aligned} \quad (21)$$

де для металу (20) (індекси «+» опущені); для діелектрика (21) (індекси «-» опущені);  $\phi = \Phi - \Phi_0$ ;  $\phi_c = Z_c - Z_{c0}$  – відхилення потенціалу  $Z_c$  від його рівноважного значення  $Z_{c0}$  далеко від поверхні в об'ємі тіла [6];  $k = (\rho C_e / \varepsilon_0)^{0,5}$  (тобто  $k_+$ ,  $k_-$ ) – характеристики матеріалу;  $\delta_{ij}$  – символи Кронекера;  $\sigma_{ij}$ ,  $e_{ij}$  – компоненти тензорів механічних напружень і деформацій ( $i, j = 1, 2, 3$ );  $e = (e_+, e_-)$  – перший інваріант тензора деформацій;  $\rho = (\rho_+, \rho_-)$  – густина матеріалу;  $\omega_v$ ,  $\omega$ ,  $\omega_{cv}$ ,  $\omega_c$  – густини електричного заряду, зв'язаного електричного заряду в розрахунку на одиницю об'єму і маси речовини відповідно для металу (індекси “-”) і діелектрика (c) (індекси “+”).

Подамо граничні умови для межі розділу середовищ, які впливають із [5, 6]:

$$\phi_+ = -\Phi_0; \quad \phi_c = \phi_c = -Z_{c0}; \quad \sigma_{x+} = \sigma_{x-}, \quad \sigma_{y+} = \sigma_{y-}, \quad \text{якщо } (x = 0). \quad (22)$$

Співвідношення (12) – (22) створюють систему рівнянь для визначення фізичних характеристик  $\xi_m$ ,  $b = (b_+, b_-)$ ,  $k = (k_+, k_-)$  і товщини  $h_m$  поверхневого шару ( $h_m = h_{\Pi}^+ + h_{\Pi}^-$ ).

Як видно з умов на межі (22), задачі визначення розподілу електричних зарядів – граничні, а задача визначення механічних напруг – контактна. Отже, співвідношення (12)–(22) є основою контактної-граничної задачі.

Для зразків кварцу й міді в повітрі за допомогою методу атомних взаємодій [17] отримано значення поверхневих енергій

$$W_{s-} = 0,737 \text{ Дж/м}^2, \quad W_{s+} = 1,623 \text{ Дж/м}^2. \quad (23)$$

Експериментальні значення поверхневого натягу  $\sigma_s$  і модулів  $\nu$ ,  $E$  для кварцу та міді [16]:

$$\sigma_{s+} = 1 \text{ Н/м}; \quad \nu_+ = 0,25; \quad E_+ = 70 \text{ ГПа}, \quad \sigma_{s-} = 2,13 \text{ Н/м}; \quad \nu_- = 0,34; \quad E_- = 110 \text{ ГПа} \quad (24)$$

З використанням значень  $W_s$  (23) і  $\sigma_s$  (24), а також співвідношень (12)–(22), для рівноважної системи мідь – кварц отримано

$$\begin{aligned} \xi_{m-} &= 18,3; \quad b_- = -0,29 \text{ 1/В}; \quad k_- = 1,14 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}; \quad \xi_{m+} = 14,9; \\ b_+ &= -0,15 \text{ 1/В}; \quad k_+ = 1,35 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}. \end{aligned} \quad (25)$$

На основі обчислювального експерименту оцінено потенціал зв'язаних електричних зарядів для кварцу  $Z_c$ , міжфазну енергію  $W_m$ , міжфазний натяг  $\sigma_m$ , а також роботу адгезії системи мідь – кварц  $\sigma_{ad}(1)$  і енергію адгезійних зв'язків (2):

$$Z_c = -1,07 \text{ В}, W_m = 0,73 \text{ Дж/м}^2, \sigma_m = 0,89 \text{ Н/м}, \sigma_{ad} = 2,24 \text{ Н/м}, W_{ad} = 1,63 \text{ Дж/м}^2. \quad (26)$$

Аналіз отриманих даних дає змогу встановити певні відношення:

$$W_{ad}/W_{s+} = 1,006; \sigma_{ad}/\sigma_{s+} = 1,052; \sigma_{ad}/W_{ad} = 1,368; \Delta\sigma_s = \sigma_{s+} - \sigma_{s-} = 1,125 \text{ Н/м}; \\ \sigma_{ad}/\Delta\sigma_s = 0,79; \Delta W_s = W_{s+} - W_{s-} = 0,888 \text{ Дж/м}^2; W_{ad}/\Delta W_s = 0,82. \quad (27)$$

Відношення  $\sigma_{ad}/\Delta\sigma_s$  характеризує відхилення від відомого співвідношення Антонова [6], яке експериментально підтверджується для більшості незмішуваних рідин, що контактують.

Використавши запропоновану методику, можна розрахувати міжфазну енергію, міжфазний натяг й енергію адгезійних зв'язків на межі розділу між плівкою міді та напівпровідниковою підкладкою.

**Висновки.** Запропоновано новий неруйнівний підхід діагностики міжфазної поверхні метал – діелектрик з урахуванням зондування інфрачервоними променями. Формування такого підходу органічно впливає з потреби проектування матеріалу з найвищою якістю поверхні.

Вперше на прикладі системи твердих тіл метал – діелектрик, що контактують, показано, що якість адгезійних зв'язків міжфазної поверхні (з гладкою поверхнею розділу) можна характеризувати вісьмома енергетичними параметрами:  $\sigma_{h+}$ ,  $\sigma_{h-}$ ,  $W_{s+}$ ,  $W_{s-}$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_{ad}$ ,  $W_m$ ,  $W_{ad}$ .

Для оцінки якості міжфазного шару слід враховувати перспективу поверхні, тобто вірогідні зміни під час експлуатації, які можна контролювати за допомогою інфрачервоних світлодіодів та фотодіодів.

Перевага запропонованого неруйнівного методу контролю міжфазних поверхонь за допомогою інфрачервоних світлодіодів та фотодіодів порівняно з методом мікротискання не тільки якісна, але й кількісна, оскільки дає змогу визначити чотири параметри  $\sigma_m$ ,  $\sigma_{ad}$ ,  $W_m$ ,  $W_{ad}$ , чого не забезпечує метод мікротискання [10].

Наступна перевага ще й в тому, що для руйнівного методу мікротискання слід створити відтиск і фіксувати тріщину, а тріщина матеріалу плівки (діелектрика) призводить до поширення магістральної тріщини й втрати несучої здатності плівки.

1. Campbell D. S. *Механические свойства тонких пленок / Технология тонких пленок. Справочник* – М., 1977. – Т. 2. – С. 246–304. 2. Eustathopoulos N., Ionid I. – С. *Interfacial tension and adsorption of metallic systems//Current Topics in Material Sciences. Amsterdam; North-Holland Publishing Company. Edited by E. Kalolis, 1980.* – Р. 281 – 360. 3. Сопрунюк П. М., Юзевич В. М., Підгірняк Я. Є. Корогода І. І. *Інформаційно-вимірвальна система контролю поверхневих параметрів твердих тіл // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів "Леотест 2001".* – К. – Львів, 2001. – Випуск 6. – С. 256–261. 4. Куць В. Р., Юзевич В. М. *Інформаційно-вимірвальна система контролю параметрів для оцінювання якості поверхні твердих тіл // Вісник НУ "Львівська політехніка"* – Львів: 2002. – Вип. № 445. – С. 54–62. 5. Юзевич В. М. *Критерії міцності твердого тіла з урахуванням розмірного ефекту і впливу середовища // Фізико-хімічна механіка матеріалів.* – 1999. – № 2. – С. 80–85. 6. Юзевич В.Н. *Термодинамическое описание механоэлектротермодиффузионных процессов в деформируемых диэлектриках и соотношение Антонова // Термодинамика необратимых процессов.* – М., 1992 – С. 163–168. 7. Джейкок М., Парфит Дж. *Химия поверхностей раздела фаз.* – М., 1984. 8. Петров Н. Н., Аброян И.А. *Диагностика поверхности с помощью ионных пучков.* – Л. – 1977. 9. *Диагностика поверхностей.* // Всесоюз. конф. Тезисы оригинальных докладов. – Каунас – Черногловка, 1986. 10. Алёхин В. П., Бульчёв С. И., Шоршоров М. Х. *Новый эффективный метод исследования физико-механических свойств поверхностных слоев материалов // Информационный листок № 64.* – АН СССР: ИМЕТ им. А. А. Байкова. 11. Зуев В.Е., Наац И.Э. *Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы.* –

Новосибирск 1982. 12. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами – М., 1986. 13 Waxler R.M., Weir C.E. Effect of hydrostatic pressure on the refractive indices of some solids // J. Res. Bur. Standards. – 1965. – A 69, No. 4. – P. 325–333. 14. Поверхностные свойства твердых тел / Под. ред. М. Грина. – М., 1972. 15. Сопрунюк П.М., Юзевич В.Н. Моделювання фізичних процесів взаємодії електромагнітних хвиль видимого та інфрачервоного діапазону з вугільним пилом // Відбір та обробка інформації. Зб. наук. пр. 1996. – Вип. 10 (86). – С. 44–49. 16. Таблицы физических величин: Справочник. – М., 1976. 17. Price C.W., Hirth J.P. Surface energy and surface stress tensor in an atomistic model // Surface science. – 1976. – Vol. 57, No. 2 – P. 509–522.

УДК 681.3

Р.В. Кочан

Тернопільська академія народного господарства,  
Інститут комп'ютерних інформаційних технологій

## ТЕСТУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ЗБИРАННЯ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТРОЛОГІЧНОГО ПРОГРАМНОГО ТЕСТУ

© Кочан Р.В., 2004

Проаналізовано особливості інтелектуальних систем збирання і обробки даних, які вимагають застосування імітаційного моделювання і пришвидшеного масштабу часу для метрологічних досліджень. Запропоновано структуру спеціалізованого програмного засобу – метрологічного програмного тесту – для досліджень інтелектуальних систем збирання і обробки даних від термопар. Наведено результати дослідження інтелектуальних і звичайних систем з використанням метрологічного програмного тесту.

The properties of intelligent data acquisition systems which demands simulation in the accelerated time scale during metrology testing are analyzed. Also there is proposed structure of the specialized software routine – metrology software test – for investigation of intelligent data acquisition systems using thermocouples. There are presented results of ordinary and intelligent data acquisition systems testing using metrology software test.

### 1. Вступ

Реальна точність вимірювання фізичних величин за допомогою сенсорів і прецизійних систем збирання даних (СЗД) визначається, здебільшого, похибкою сенсора. Точність вимірювання сигналів сенсорів за допомогою СЗД провідних фірм в декілька десятків разів вища за точність відповідних сенсорів. Наприклад, допустимі відхилення реальної характеристики перетворення (ХП) поширених нових термопар типу К класу 1 досягають 4 °С при вимірюванні температури 1000 °С [1]. А похибка вимірювання вихідного сигналу цих термопар за допомогою поширених блоків дистрибутивних СЗД FP–TC–120 фірми National Instrument не перевищує 0,35 °С [2].

Відомі спроби настроювання ХП вимірювального каналу (ВК) на ХП сенсора в згаданих СЗД-блоках [2] не забезпечують тривалого підвищення точності ВК через значний часовий дрейф ХП сенсора під час експлуатації. Методи коригування похибок сенсорів на базі прогнозу їх дрейфу мають порівняно низьку надійність в реальних умовах експлуатації. Це пов'язано з індивідуальним характером дрейфу сенсорів і його доволі великою випадковою складовою. Надійні методи підвищення точності всього ВК – періодична перевірка [3] або калібрування сенсорів [4] на місці експлуатації – досить трудомісткі. Перспективним є поєднання цих методів за допомогою побудови індивідуальних математичних моделей (ММ) коригування похибок сенсорів [5]. Такі системи, які