

УДК 621.81: 621.753.2

І.Б. Кузнецов, Б.Т. Кузнецов, І.С. Ішутін, А.Б. Гаврилов

КОНТРОЛЬ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ НАВАНТАЖЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Узагальнюються результати досліджень у галузі розвитку теорії енергетичного контролю тонких поверхневих шарів металевих виробів, розробки методу і засобів для оцінки напружено-деформованого стану поверхневих шарів навантажених деталей промислового виробництва. Стаття спрямована на вирішення однієї з найважливіших науково-технічних проблем: підвищення вірогідності оцінки технічного стану поверхні виробів машинобудування у виробництві, експлуатації та при ремонті.

Постановка проблеми та аналіз літератури

При аналізі матеріалів, які викладені у використаній літературі [1 – 14], з позицій системного підходу узагальнені уявлення про фізичні процеси в зоні енергетичного контролю структурно-фазових (с.-ф.) неоднорідностей тонких поверхневих шарів металевих вузлів і деталей. У використаній літературі показано, що на основі обробки багатопараметричної інформації над місцями локалізації с.-ф. неоднорідностей отриманої вимірювачами системи енергетичного контролю забезпечується виділення інформації про мікродеформацію кристалічних решіток металу в тонких поверхневих шарах у діапазоні мікродеформації кристалічних решіток на фоні впливу плівок оксидів і адсорбованого забруднення на глибині до 10 мкм у діапазоні значень площ поверхні металевих деталей.

У сучасних умовах експлуатації та ремонту виробів машинобудування за технічним станом утруднено через відсутність достовірної інформації про тонкі поверхневі шари деталей і вузлів з наявними с.-ф. неоднорідностями. Зародження і розвиток небезпечних дефектів, що призводять до руйнування деталей і вузлів, починається в поверхневому шарі глибиною до 10 мкм.

Разом з тим можливості сучасних методів неруйнівного контролю за оцінкою стану поверхневого шару на глибинах від 0,1 до 10 мкм обмежені.

Рішення проблеми підвищення вірогідності оцінки стану поверхні деталей і вузлів розширює можливості з реалізації стратегії експлуатації та ремонту виробів машинобудування за технічним станом.

Таким чином, в даній статті буде розглянуто питання розробки методу вибору управління процесом енергетичного контролю, що забезпечує мінімальні

втрати інформації щодо вірогідності виявлення локальних с.-ф. неоднорідностей та їх виділення, за допомогою розробленої апаратури із сукупності діючих факторів у тонких (до 10 мкм) поверхневих шарах металевих деталей і вузлів виробів машинобудування.

Сучасна фізика твердого тіла досягла значних успіхів в оцінці поверхневої енергії (W) металів та їх сплавів, виходячи з потенціалів взаємодії компонентів, які утворюють кристалічну структуру. В основу такого роду оцінок покладене уявлення про деякий граничний стан, що досягається в об'ємі кристала всіма його зв'язками. В узагальненому вигляді така оцінка може бути представлена функціонально залежністю у вигляді

$$W = W(C_k, \mu_i, \dots, d, D_s, l_t, \dots, T, \varepsilon', P_{ij}, t, m), \quad (1)$$

де C_k – концентрація компонентів;

μ_i – потенціали взаємодії компонентів (атомів, іонів, молекул) у твердій фазі і на межі розподілу метал – середовище;

d – параметр кристалічної решітки;

D_s – щільність дислокацій;

l_t – довжина мікротріщин;

T – температура;

ε' – швидкість деформації;

P_{ij} – характер та інтенсивність напруженого стану (описані тензором);

t – час контакту із середовищем;

m – кількість адсорбованих на поверхні речовин.

Будь-яка стійка кристалічна система визначається мінімумом енергії W , яка може бути представлена у вигляді [1]:

$$W = W_0 + W_e + W_{bs}, \quad (2)$$

де W_0 – енергія, що не залежить від структури забрудненої атомної сфери;

W_e – електростатична енергія системи точкових зарядів в однорідному електронному газі;

W_{bs} – енергія зонної структури.

Повна енергія W_0 у розрахунку на атом визначена в ряді робіт [2] зокрема, у [3].

Основна частина енергії W , як наведено в [4], є компонентом W_0 , а залишкова швидко зростає при будь-якому спотворенні кристалічної решітки, тобто сприяє стабілізації структури. Це найважливіший висновок з розв'язуваної у даній статті проблеми. Він є основним з погляду на можливість ідентифікації спотворень кристалічної решітки за величиною поверхневої енергії W .

Використання теорії збурень [5] дозволяє проводити підсумовування за сферою вільних електронів, не враховуючи фактичну формулу поверхні Фермі.

Псевдопотенціал $v(q)$ атома з урахуванням К-простору [6] наведений на рис. 1. У точці q_0 Фу-р'є-образу псевдопотенціал перетворюється в нуль. При віддаленні від положення q_0 зростає ширина забороненої зони, отже, зростає повна енергія кристала. У загальному вигляді зсув вузла решітки з рівноважного стану q_0 може бути представлений схемою, наведеною на рис. 1.

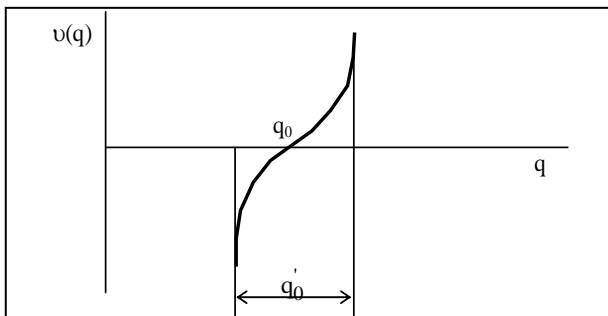


Рис. 1. Псевдопотенціал $v(q)$ атома з урахуванням К-простору поблизу точки q_0

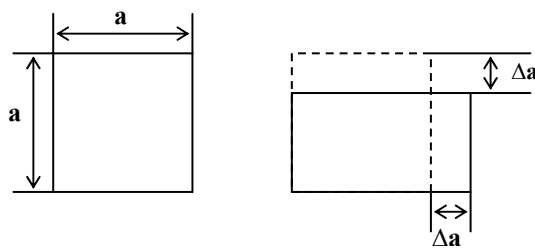


Рис. 2. Тетрагональне викривлення простої кубічної решітки з параметром (a) при її розтяганні в напрямку $\{100\}$

Найпростіший варіант, що ілюструє тетрагональне спотворення простих кубічних решіток з параметром a при її розтяганні в напрямку $\{100\}$, наведений на рис. 2. Схема зсуву вузла решітки з рівноважного стану наведена на рис. 3. Як при збільшенні параметра a кристалічних решіток, так і у випадку його зменшення відбувається зростання ширини забороненої зони, тобто збільшення повної енергії W_0 [7].

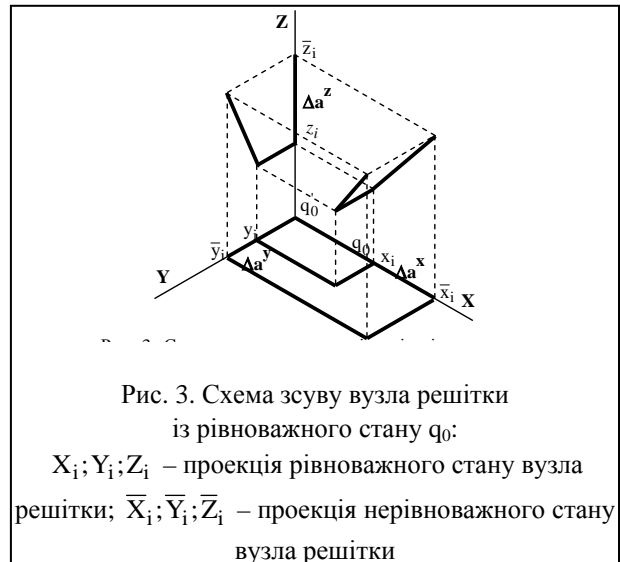


Рис. 3. Схема зсуву вузла решітки із рівноважного стану q_0 :
 $X_1; Y_1; Z_1$ – проекція рівноважного стану вузла решітки;
 $\bar{X}_1; \bar{Y}_1; \bar{Z}_1$ – проекція нерівноважного стану вузла решітки

Для всіх щільноупакованих структур, якими є метали, є набір обернених векторів q , типових для тих чи інших кристалічних решіток і комплексу пов'язаних з нею властивостей. Для ОЦК решіток є набір з 12 векторів $\{110\}$, для ГЦК решіток два набори векторів обернених решіток $\{111\}$ і $\{200\}$ тощо. При деформації решіток замість вектора обернених решіток, що слабо відрізняється від q_0 , з'являються два нових, зміщених від q_0 вліво і вправо (рис. 1).

У реальних навантажених конструкціях найбільш поширені металеві структури, що являють собою тверді розчини впровадження і заміщення. У цьому випадку багатокомпонентних металевих систем з урахуванням сторонніх атомів (іонів, молекул) атоми навколишнього середовища проникають у зону попереднього руйнування і включаються у взаємодію саме в момент розриву або перебудови зв'язку, викликаючи певне екранування впливу і компенсацію нових зв'язків [8]. У процесі впровадження або заміщення атомів відбувається подальше спотворення кристалічної решітки основного металу, що супроводжується значною зміною властивостей сплаву.

Оцінювання мікрореформації кристалічної решітки на автономно-електронному рівні показує, що

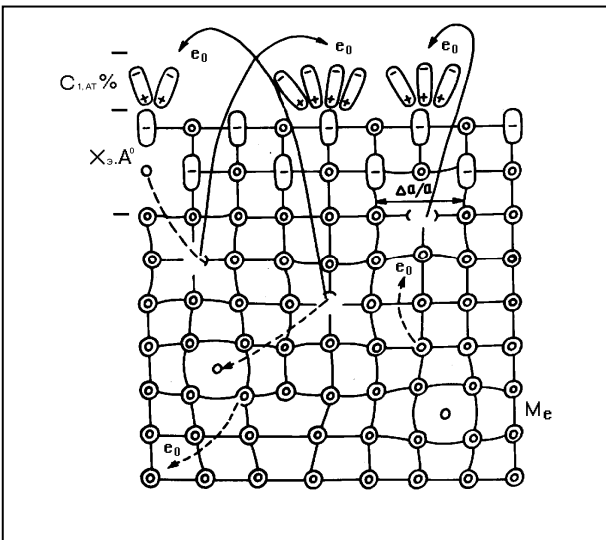


Рис. 4. Схема розподілу дефектів, які не виявляються, у поверхневому шарі на глибину до $h_H \leq 10$ мкм.

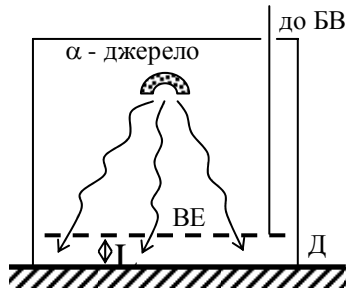


Рис. 5. Схема опромінювання металеві поверхні потоком іонізуючого випромінювання

енергія деформації сприймається електронами, здійснюючими зв'язок у кристалічній решітці, яка характеризується параметрами поверхневої енергії.

Оцінювана поверхнева енергія металу ϵ , власне кажучи, термодинамічною характеристикою. Її виникнення викликане такими причинами.

Першою причиною є розходження у величинах робіт виходу електронів СФН поверхневих шарів металів та їх сплавів:

$$W_a = W_{1\phi}F_{1\phi} + W_{2\phi}F_{2\phi} + \dots + W_{i\phi}F_{i\phi}, \quad (3)$$

де $W_{1\phi}, W_{2\phi}, \dots, W_{i\phi}$ – величини повних робіт виходу електронів для с.-ф. складових металу;

$F_{1\phi}, F_{2\phi}, \dots, F_{i\phi}$ – величини площ поверхні с.-ф. складових металу.

Другою причиною є розходження в концентраціях електронів провідності поверхневих шарів металів і сплавів із с.-ф. неоднорідностей:

$$n_{0a} = n_{01\phi}F_{1\phi} + n_{02\phi}F_{2\phi} + \dots + n_{0i\phi}F_{i\phi}, \quad (4)$$

де $n_{01\phi}, n_{02\phi}, \dots, n_{0i\phi}$ – значення концентрацій електронів провідності с.-ф. складових металу.

Величина поверхневої енергії змінюється при будь-якому спотворенні кристалічної решітки, що є основним з погляду на можливість ідентифікації напружено-деформованого стану металеві поверхні.

У статті запропоновано використовувати метод прямого вимірювання різниці поверхневого потенці-

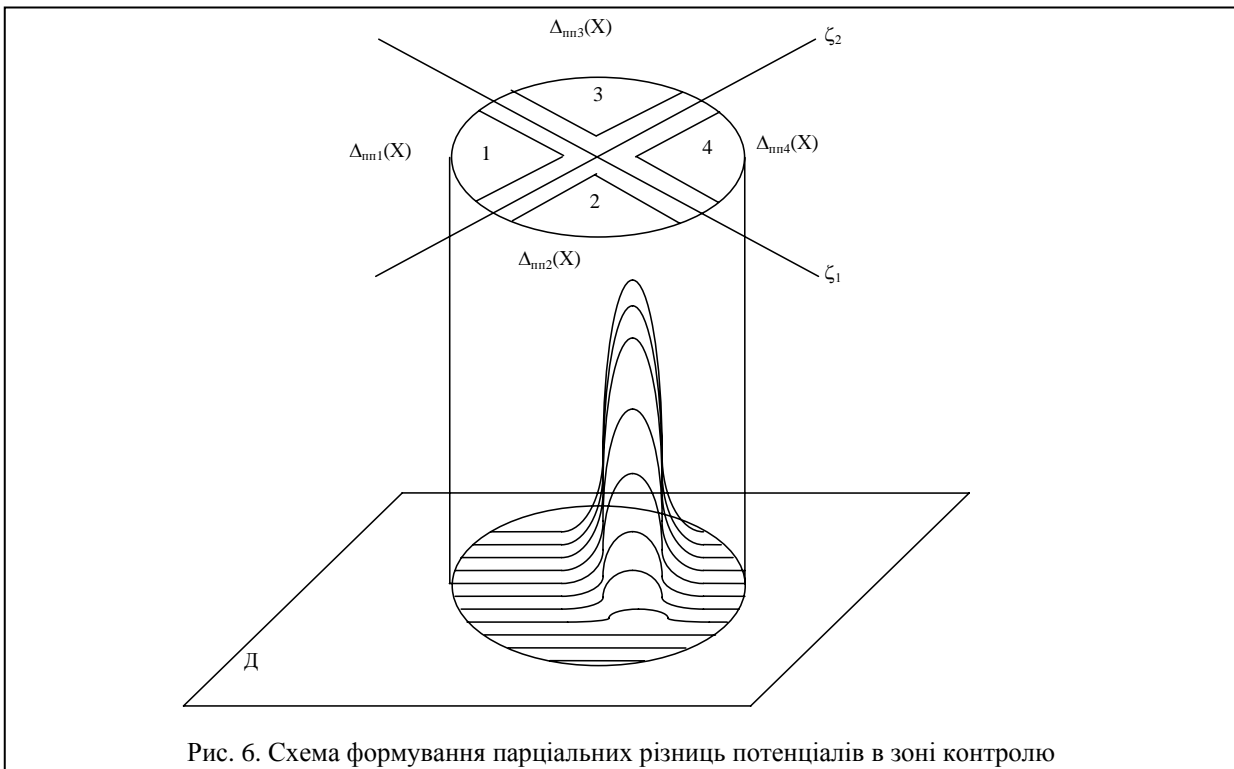


Рис. 6. Схема формування парціальних різниць потенціалів в зоні контролю

алу ($\Delta_{ПП}$) з іонізацією повітряного середовища між вимірювальним електродом (ВЕ) і контрольованою поверхнею деталі (Д).

Величина $\Delta_{ПП} = \Delta'_{ПП} + \Delta''_{ПП}$ обумовлена як розходженням у значеннях металів, з яких виготовлені ВЕ і контрольована Д, так і розходженням концентрації n_0 цих металів:

$$\Delta'_{ПП} = \frac{[W_{ВЕ} - W_{Д}]}{e_0} \quad \text{і} \quad \Delta''_{ПП} = \frac{kT}{e_0} \ln \frac{n_{0ВЕ}}{n_{0Д}}, \quad (5)$$

де e_0 – заряд електрона;

k – постійна Больцмана;

T – температура.

Таким чином, варіації пластичних характеристик приповерхневого шару під дією залишкових напружень повинні накладатися на їх первісну зміну безпосередньо під впливом зниження чи підвищення вільної поверхневої енергії металу. При цьому обидва зазначених ефекти будуть послабляти чи підсилювати один одного залежно від характеру зовнішніх впливів.

У зв'язку з наявністю на поверхні реальних металевих деталей оксидів і плівок забруднення утворюються поверхневі шари, збагачені чи збіднені носіями зарядів, а між поверхнею й об'ємом виникає різниця потенціалів, яка характеризується поверхневим вигином енергетичних зон, що отримала назву поверхневого потенціалу (ПП) [10]. Для металів характеристика ПП, як енергетичного параметра, що оцінює фізико-хімічний стан поверхні розподілення реального металу з газовою атмосферою, дана в [11]. Очевидною є чутливість ПП до великої кількості факторів, що визначають фізико-хімічний стан металеві поверхні. Для оцінювання зв'язку ПП-характеристики вільної поверхневої енергії з факторами, які визначають стан поверхні, застосовуються загальні залежності вигляду (1).

Найбільш загальна залежність величини ПП у момент часу t може бути представлена відповідно до схеми, наведеної на рис. 3, залежністю вигляду

$$ПП = F_1 \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} + F_2 \sqrt{\Delta a_x^2 + \Delta a_y^2 + \Delta a_z^2}, \quad (6)$$

де F_1 – вплив на поверхню металу з параметром решітки a , що не призводить до виникнення мікрodeформації $\Delta a/a$;

F_2 – вплив на поверхню металу з параметром решітки a , що призводить до виникнення мікрodeформації $\Delta a/a$.

Мета статті – виявлення неоднорідності за допомогою явища емісії електронів провідності з по-

верхні металевого виробу, що дає можливість знайти в повітряній атмосфері с.-ф. неоднорідності за різницею кількості електронів, що попадають на поверхню виробу з ділянки однорідної поверхні і ділянки з неоднорідністю.

Основна частина

У даний час вимірники енергетичної неоднорідності металевих поверхонь дозволяють розрізнити лише одну неоднорідність і одержувати при цьому значення тільки невеликої частини її параметрів, що її характеризують. У свою чергу значення даних параметрів, як правило, вимірюються з невисокою точністю, залишаючи іншу частину параметрів невідомою оператору через втрату інформації.

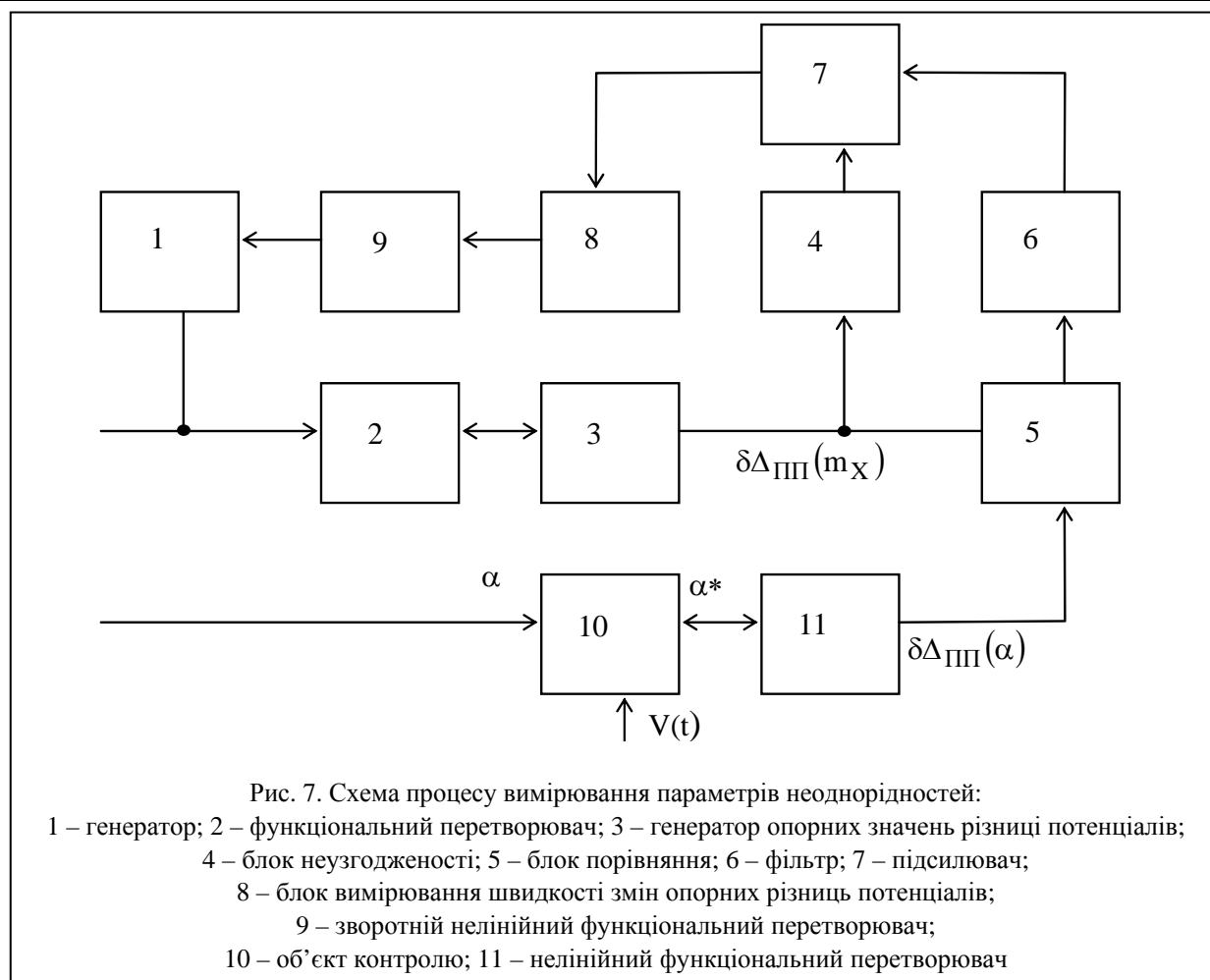
У зв'язку з цим необхідно забезпечити виявлення локальної неоднорідності в зоні контролю, розширення кількості типів неоднорідностей, що виявляються, і підвищення точності вимірювання значень параметрів неоднорідностей, що виявляються, як у самому металі, так і на його поверхні (рис. 4).

Поставлена мета досягається тим, що вимірювання параметрів неоднорідностей на поверхні металу здійснюється опромінюванням неоднорідностей потоком іонізуючого випромінювання (рис. 5).

Як було відзначено раніше [1 – 14] формування різниці потенціалів здійснюється шляхом розщеплення зони іонізації на компоненти. Дану операцію можна здійснити одночасним зондуванням зони іонізації, наприклад, чотирма і більш електродами, а операції виявлення локальної неоднорідності, розташованої між зондувальними електродами, – порівнянням граничної різниці потенціалів з різницями потенціалів між електродами.

Формування парціальної різниці потенціалів варто робити за допомогою не менш чотирьох ізольованих один від одного квадрантів вимірювального електрода. Схема формування парціальної різниці потенціалів у зоні контролю наведена на рис. 6. Вимірювання параметрів неоднорідності на поверхні металів у загальному випадку визначається за схемою, наведеною на рис. 7.

Генератором (1) генеруються значення m_x параметрів α неоднорідностей λ , а генератором (3) – значення $\Delta_{ПП}^0$ опорних різниць потенціалів. Через функціональний перетворювач (2) установлюється зв'язок $\Delta_{ПП} - \Delta_{ПП}(m_x)$, який складається у блоці неузгодженості (4), $\Delta_{ПП}(m_x)$ між компонентами опорних різниць потенціалів і далі порівнюється у блоці порівняння (5) з отриманими в нелінійному функціональному перетворювачі (11) неузгодженостями різ-



ниць потенціалів $\delta\Delta_{\text{ПП}}(X)$ парціальних зон іонізації, у фільтрі (6) фільтрується результат $\delta\Delta_{\text{ПП}} = \delta\Delta_{\text{ПП}}(X) - \delta\Delta_{\text{ПП}}(m_x)$, потім підсилюється у підсилювачі (7) пропорційно швидкості $\vartheta(t)$ вимірювання параметра α неоднорідності λ , після чого здійснюється вплив $P(X) = K \times \delta\Delta_{\text{ПП}}(X)$ на генератор (1), і по закінченні впливу $P(X)$ значення параметрів неоднорідностей металеві поверхні зчитуються з виходу генератора (1).

Розташування зони іонізації на компоненти у вигляді парціальних різниць потенціалів забезпечують виявлення раніше відсутньої інформації про локальну неоднорідність, що міститься в різниці між ними. Також забезпечується можливість проведення операції виявлення цієї неоднорідності відповідно до правила, що має вигляд, наведений на рис. 6:

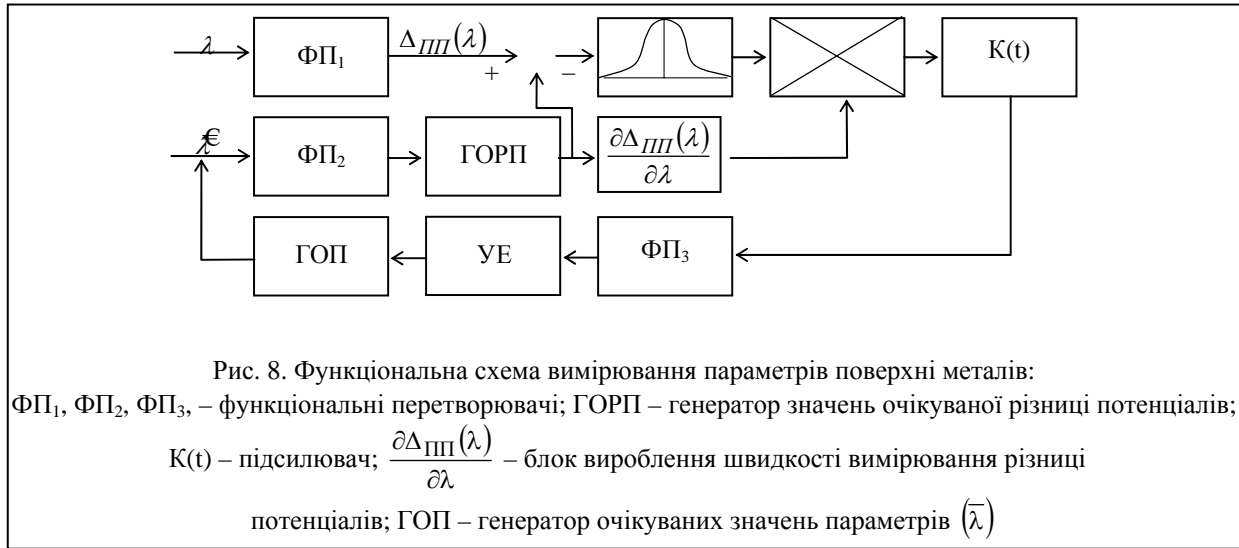
$$\chi_1 = \frac{[\Delta_{\text{ПП}}(X) + \Delta_{\text{ПП2}}(X)] - [\Delta_{\text{ПП3}}(X) + \Delta_{\text{ПП4}}(X)]}{\sum_{i=1}^n \Delta_{\text{ППi}}(X)} > \Delta_{\text{ПППОР}};$$

$$\chi_2 = \frac{[\Delta_{\text{ПП1}}(X) + \Delta_{\text{ПП3}}(X)] - [\Delta_{\text{ПП2}}(X) + \Delta_{\text{ПП4}}(X)]}{\sum_{i=1}^n \Delta_{\text{ППi}}(X)} > \Delta_{\text{ПППОР}}, \quad (8)$$

де $\Delta_{\text{ПППОР}}$ – граничне значення різниці потенціалів.

Генерація значень m_x параметрів α неоднорідностей λ і доступність спостерігача до них через операції відображення забезпечує можливість вибору з m_x саме такого значення m_x^* параметра α , що найбільш близьке до обмірюваної величини X^* за критерієм порівняння $r(m_x, X)$. Генерація значень опорної різниці потенціалів $\Delta_{\text{ПП}}^0$ забезпечує можливість порівняння необхідної величини X параметра α неоднорідності λ зі значеннями m_x параметра α_0 неоднорідності λ_0 , що спостерігаються, у силу їх функціонального зв'язку $\Delta_{\text{ПП}}(m_x)$.

Установлення зв'язків між $\Delta_{\text{ПП}}(X)$ парціальних



різниць потенціалів і m_x параметрів α неоднорідностей λ , що мають вигляд $\Delta_{\text{ПП}}(X)$, забезпечує досягнення спостереження неузгодженості ϵ між значеннями m_x і X .

Виявлення в блоці (4) неузгодженостей $\delta \Delta_{\text{ПП}}(X)$ між компонентами опорних різниць потенціалів можна представити у вигляді

$$\chi_1^0 = \frac{[\Delta_{\text{ПП1}}^0(m_x) + \Delta_{\text{ПП2}}^0(m_x)] - [\Delta_{\text{ППВ}}^0(m_x) + \Delta_{\text{ПП4}}^0(m_x)]}{\sum_{i=1}^n \Delta_{\text{ППi}}^0(m_x)}$$

$$\chi_2^0 = \frac{[\Delta_{\text{ПП1}}^0(m_x) + \Delta_{\text{ППВ}}^0(m_x)] - [\Delta_{\text{ПП2}}^0(m_x) + \Delta_{\text{ПП4}}^0(m_x)]}{\sum_{i=1}^n \Delta_{\text{ППi}}^0(m_x)}$$

(9)

Це забезпечує досягнення планованої точності вимірювання значень параметрів у блоці (5) порівняння неузгодженостей χ_1 і χ_1^0 , χ_2 і χ_2^0 , що дозволяє виявити за значеннями $\delta \Delta_{\text{ПП}}(\epsilon)$ амплітуду і напрямок впливу $P(\delta)$, які прикладаються до генератора (1) для забезпечення точного зчитування значень параметрів неоднорідностей. Фільтрація у фільтрі (6) значень $\delta \Delta_{\text{ПП}}(\epsilon)$ забезпечує зниження рівня $\Delta_{\text{ПП}}$ шумів, що виникають у процесі зондування поверхні пучком іонізуючого випромінювання в процесі генерації в генераторі (3) значень $\Delta_{\text{ПП}}^0$, які змішуються в різницю потенціалів $\Delta_{\text{ПП}}(X)$ і $\Delta_{\text{ПП}}^0(X)$, що визначається відповідно до виразу

$$\partial \Delta_{\text{ПП}}(\epsilon) = \int \partial \Delta_{\text{ПП}}(\epsilon) \times h(\epsilon - \epsilon_1) \partial \epsilon, \quad (10)$$

де h – імпульсна характеристика фільтра.

Посилення (7) результату фільтрації, яке здійснюється пропорційно швидкості зміни парціальних опорних різниць потенціалів, що виробляється блоком (8), забезпечує достатню амплітуду впливу $P(\delta)$ і тим самим сприяє підвищенню точності вимірювань.

Вплив $P(\delta)$ на генератор (1) дозволяє, змінюючи напрямок впливу $P(\delta)$ з частотою, яка дорівнює смугі займаної $\Delta_{\text{ПП}}$, забезпечувати максимальну точність вимірювання за час, відведений для спостереження.

Функціональна схема системи вимірювань параметрів металевої поверхні наведена на рис. 8.

Таким чином, для виявлення локальної неоднорідності, збільшення кількості виявлюваних неоднорідностей і підвищення точності виміру значень параметрів неоднорідностей необхідно дотримуватися таких принципів, що реалізовані в комплексі апаратури контролю:

1. Розщеплення зони іонізації відповідно до зони контролю не менше, ніж на чотири компоненти.
2. Зондування зони іонізації кожного компонента ізольованим електродом.
3. Підсумовування першого і другого, третього і четвертого, а також першого і третього, другого і четвертого компонентів (див. рис. 6) та порівняння різниці потенціалів парціальних зон іонізації між собою.
4. Установлення граничної різниці потенціалів, за якою приймається рішення про наявність неоднорідності.
5. Генерація значень параметрів неоднорідностей

і значень очікуваних різниць потенціалів через функціональний перетворювач, установлення зв'язку між ними, визначення неузгодженості між компонентами очікуваних різниць потенціалів.

6. Порівняння очікуваних різниць потенціалів з отриманими неузгодженостями різниць потенціалів парціальних зон іонізації, фільтрація результату, його посилення пропорційно швидкості вимірювання параметра неоднорідності, вплив через функціональний перетворювач і керуючий елемент на генератор.

7. По закінченні впливу здійснюється зчитування з виходу генератора значення обмірюваного параметра неоднорідності.

Висновки

Виходячи з вищевикладеного можна зробити висновки, що виявлення неоднорідностей за допомогою явища емісії електронів провідності з металевої поверхні дає можливість знайти в повітряній атмосфері с.-ф. неоднорідності за різницею кількості електронів, які залишають ділянку однорідної поверхні і ділянку з неоднорідністю, що недоступно жодному сучасному методу неруйнівного контролю.

Таким чином, розроблений метод енергетичної оцінки технічного стану тонких поверхневих шарів металевих деталей і вузлів виробів машинобудування полягає в дослідженні розподілення поверхневого потенціалу над місцями локалізації неоднорідностей за допомогою вимірників, що дискримінують, а також обґрунтовані принципи побудови системи енергетичного контролю зі слідкуючими вимірниками с.-ф. неоднорідності металевої поверхні. Визначені шляхи технічної реалізації локальних вимірників с.-ф. неоднорідності металевої поверхні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузнецов І.Б., Крисанова С.В. Оцінка потенціальних можливостей енергетичного контролю поверхневих шарів металевих виробів // Збірник наукових праць ЦНДІ озброєння та військової техніки ЗС України. – К.: ЦНДІ ОВТ, 2000. – Вип. 7. – С. 72 – 76.
2. Хайніке Г. Трибохимия: Пер. с англ. М.М. Гольдфельда. – М.: Мир, 1987. – 584 с.
3. Кузнецов І.Б., Зенкін М.А., Бодак Ю.І. Основні принципи побудови системи енергетичного контролю

локальних неоднорідностей металевої поверхні // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». – К.: Машиностроение, 2000. – № 39. – С. 93 – 97.

4. Кузнецов І.Б., Зенкін М.А. Розробка технічних засобів для оцінки якості високонавантажених деталей і вузлів // Вимірювання та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Міжнар. наук.-техн. журнал. – 2002. – № 2. – С. 28 – 33.

5. Хейне В., Коэн М., Уэйр Д. Теория псевдопотенциала. – М.: Мир, 1973. – 557 с.

6. Барабаш О.М., Коваль Ю.Н. Структура и свойства металлов и сплавов. Кристаллическая структура металлов и сплавов. – К.: Наукова думка, 1986. – 598 с.

7. Кузнецов І.Б., Зенкін М.А. Оцінка функціональних можливостей вимірників енергетичних параметрів і обґрунтування можливості застосування для діагностики напружено-деформованого стану поверхневих шарів металів // Вимірювання та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Міжнар. наук.-техн. журнал. – 1998. – № 4. – С. 156 – 159.

8. Электронно-статическая теория металлов и ионных кристаллов / В.Ф. Ухов, Р.М. Кобелев и др. – М.: Наука, 1982. – 160 с.

9. Физика металлов с дефектами / А.А. Предводителев, Н.А. Тяпунина и др. – М.: Изд. МГУ, 1986. – 240 с.

10. Ребиндер П.А., Щукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах, в процессах их деформаций и разрушения // Поверхностные явления в дисперсных системах. – М.: Наука, 1979. – 270 с.

11. Савенко В.И., Щукин Е.Д. Об остаточных напряжениях, возникающих в поверхностно-активных средах путем изгиба // Поверхность, физика, химия, механика. – 1987. – № 12. – С. 20 – 25.

12. Робертс М., Макки И. Химия поверхности раздела метал-газ: Пер. с англ. / Под ред. В.М. Грязнова. – М.: Мир, 1981. – 539 с.

13. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 392 с.

14. Кузнецов І.Б., Зенкін М.А., Маамун Бакір Шишані. Методика та апаратне забезпечення оцінки якості високонавантажених деталей і вузлів виробів машинобудування // Експрес-новини: наука, техніка, виробництво. – 1999. – № 13 – 14. – С. 44 – 47.

Надійшла 30.01.2006

Рецензент: к-т техн. наук професор О.М. Сотніков, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба.