

foresee of river state. This can be used to create controlling system, which could protect river from ecological crash. Above considerations concern case when river speed is constant. On Fig. 6 and 7 results of algorithm work are presented. The marked line represents the one characteristic of river state.

Conclusion

In the paper solution of estimation problem for pollution river based on deficit DO measurement only and artificial neural networks was proposed. Mathematical model described by partial differential equations was substitute by model with large number of ordinary differential equations and discrete in time measurements. The two separate artificial neural networks that realize filtration and prediction in system with feedback were proposed for estimation of river state. The proposed characteristics coordination algorithm allows to continues generate of state estimations. Results of numerical experiments are satisfactory. This can be used to create controlling system, which could protect river from ecological crash. Future research will concern that problems.

1. Demuth H, Beale M.: Neural Networks Toolbox User's Guide The Math Works Inc.
2. Hertz J, Krogh A, Palme G.R.: Introduction to the theory of neural computation, Massachusetts, 1991.
3. Kwiatkowski T., Kedzior Z., Pekala R. The Mathematical Model Of Long River And Neural Network In Estymation Process. MATHMOD 97 Viena, Austria.
4. Rinaldi B., SonciniSessa R., Stehfest H., Tamura H.: Modeling and control of river quality Mc Graw-Hill Inter Book Company 1979.
5. Tadeusiewicz R.: Neural Networks PWN: Warsaw, 1993.
6. David Allan J. Ekologia wod plynacych PWN, Warszawa, 1998

В. Юзевич, О. Гук*, П. Сопрунюк

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАНУ,

* Інститут управління, м. Дрогобич Львівської обл.

УДК 681.3:551.568.85:539.2

МОДЕЛЮВАННЯ АДГЕЗІЙНИХ ЗВ'ЯЗКІВ У ТВЕРДИХ ТІЛАХ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ РОЗКЛАДУ ЗА МАЛИМ ПАРАМЕТРОМ

© Юзевич В., Гук О., Сопрунюк П., 2003

Описано застосування термодинамічного підходу до проблеми оцінки кількісних характеристик адгезійних зв'язків у твердих тілах системи адгезив – суб-

страт. Досліджено енергетичні параметри поверхні розділу контактуючих металів “Cu – Fe”, “Cu – Al”.

Applications of the thermodynamic approach to a problem of an estimation of quantitative characteristics adhesive connections in firm bodies of system adhesive - substratum are described. Power parameters of an interface of contacting metals “Cu – Fe”, “Cu – Al” are investigated.

Явище виникнення зв'язку між поверхневими шарами різнорідних конденсованих тіл, приведених у зіткнення, одержало назву адгезії. З фізичної точки зору адгезія визначається силами міжмолекулярної взаємодії, наявністю іонного, ковалентного, металевого й іншого типів зв'язку. Виникає необхідність визначення характеристик адгезійної взаємодії різних матеріалів як з погляду прикладної, так і фундаментальної науки про поверхневі явища.

Розглянемо аналітичну модель для оцінки параметрів, що характеризують адгезійні зв'язки поверхневих шарів контактуючих металів у межах фізики поверхні [1]. Відповідні щодо математичної моделі зразки металів належать чутливим елементам інформаційно-вимірjuвальних систем (ІВС), які використовуються для діагностики поверхні металів та захисних покриттів. Для ефективного функціонування ІВС [2,3] потрібно знати особливості взаємодії електричного й механічного полів в області такої неоднорідності, як поверхневий шар металу, зокрема під час температурних змін.

Важливою проблемою є розробка математичного апарату для дослідження адгезійних покриттів неруйнівними методами. Для обґрунтування методики оцінки енергії адгезійних зв'язків та її змін залежно від будови перехідного проміжку між контактуючими середовищами розроблено обчислювальну процедуру на основі діелектричного формалізму [1].

Один такий підхід громіздкий і вимагає розгалуженої інформації про фізичні характеристики міжфазних шарів, яку отримати дуже важко. Тому доцільно для математичного моделювання адгезійних покриттів використати систему макроскопічних термодинамічних рівнянь [2,3], оскільки термодинамічний підхід є значно простішим порівняно з підходом, який базується на діелектричному формалізмі [1].

Розглянемо покриття (плівку) металу (область V_+) в неактивному неполяризованому газовому середовищі (повітрі) $x > H$. Область $H > x > 0$ (V_+) займає метал 1, а $x < 0$ (V_-) – метал 2 (x, y, z – декартові координати). Тут H – товщина плівки (покриття).

Подамо основні рівняння термодинамічної моделі [2,4], яка описує фізико-механічні процеси поблизу границі розділу $x = 0$, тобто в області $h_{\Pi}^+ > x > h_{\Pi}^-$.

Міжфазний натяг σ_M^s ($\sigma_M^s = s_m$) визначимо за допомогою співвідношень, які аналогічні до наведених у праці [5]

$$\sigma_M^s = \int_{h_{\Pi}^-}^{h_{\Pi}^+} \sigma_y dr = \int_0^{h_{\Pi}^+} \sigma_y^+ dr + \int_{h_{\Pi}^-}^0 \sigma_y^- dr = (\sigma_M^s)_1 + (\sigma_M^s)_2. \quad (1)$$

Тут $h_M = h_{\Pi}^+ + h_{\Pi}^-$ – товщина міжфазного шару, складові якої h_{Π}^+ і h_{Π}^- визначимо за допомогою рівнянь

$$\sigma_y^+ + P_a = 0 \quad (\text{для } x = h_{\Pi}^+), \quad \sigma_y^- + P_a = 0 \quad (\text{для } x = h_{\Pi}^-), \quad (P_a = 0,1 \text{ МПа}). \quad (2)$$

Введемо означення міжфазної енергії W_M аналогічно як поверхневої W_S у працях [1,5]:

$$W_M = W_E^M + \xi_M W_{\Pi}^M, \quad W_{\Pi}^M = \int_{-h_{\Pi}}^{h_{\Pi}^+} w_{\Pi} dx; \quad W_E^M = \int_{-h_{\Pi}}^{h_{\Pi}^+} w_E dx. \quad (3)$$

Для оцінки безрозмірної фізичної характеристики матеріалу ξ_M запишемо відповідне співвідношення:

$$\delta W_M / \delta C_e = \delta(W_E^M + \xi_M W_{\Pi}^M) / \delta C_e = 0, \quad (4)$$

вважаючи C_e варіаційним параметром аналогічно як у праці [6]. Оскільки енергія W_M залежить від характеристик C_e^+ , C_e^- , то в даному випадку прийємо $C_e = C_e^+$ і виразимо C_e^- через C_e так:

$$C_e^- = \xi_e C_e \quad (\text{якщо } \xi_e = C_e^- / C_e^+). \quad (5)$$

Шукаючи екстремум функціоналу W_M відповідно до формули (4), вважаємо $\xi_e = \text{const}$.

Якщо значення W_M у рівноважному стані відоме з експерименту або на основі теоретичних розрахунків, то характеристику матеріалу перехідного шару плівкою і підкладкою ξ_M визначимо за допомогою співвідношення (4).

В інших випадках для оцінки ξ_M наближено прийємо, що

$$\xi_M = (\xi_S^+ + \xi_S^-) / 2, \quad (6)$$

де ξ_S^+ , ξ_S^- – характеристики контактуючих середовищ, які можна визначити за допомогою співвідношення (4) для системи “тверде тіло – повітря”.

Достовірність оцінки (6) було перевірено для системи “цинк (тверде тіло) – ртуть”, значення міжфазної енергії $W_M = 0,053 \text{ Дж/м}^2$ якої встановлено експериментально [7].

Значення $W_M = 0,053 \text{ Дж/м}^2$ для системи “цинк (тверде тіло) – ртуть” прийнято як тестовий приклад для розрахунку поверхневих W_S , σ_S , а також міжфазних енергій W_M і натягів σ_M^S методом підрахунку парних взаємодій у граничних шарах ряду металів. Для цього використано відповідну методику [8, 9] з урахуванням вдосконалених між-іонних парних потенціалів для поверхневих областей простих металів [10].

Граничні умови мають вигляд

$$\Phi_g = -F_0, \quad \sigma_x = -(\epsilon_0/2)(\partial\Psi/\partial x)^2 \quad \text{при } x = 0, \quad (7)$$

Рівняння стану, які зв’язують параметри електричного поля і поля механічних взаємодій, подамо так

$$\sigma_{ij} = E(ne/(1+n) - b\phi/3)\delta_{ij}/(1-2n) + Ee_j/(1+n) \quad \text{і} \quad \omega_v = \rho\omega = \epsilon_0 k^2 \phi + bEe/(3(1+n)). \quad (9)$$

Тут b, k, ξ – фізичні характеристики матеріалу; σ_{ij}, e_{ij} – компоненти тензорів напружень $\hat{\sigma}$ і деформацій ($ij = 1,2,3$); $\sigma_{11} = \sigma_x$; $\sigma_{22} = \sigma_y$; δ_{ij} – символи Кронекера; e – перший інваріант тензора деформацій; ρ – густина матеріалу; ω_v, ω – просторова і масова густини електричного заряду; E, n – пружні постійні (модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона); $\varphi = F - F_0$ – відхилення модифікованого хімічного потенціалу електронів провідності (МХПЕП) F електричних зарядів від його рівноважного значення F_0 в об’ємі тіла далеко від поверхні (F прямо пропорційний хімічному потенціалу електронів провідності і обернено пропорційний густині їхніх електричних зарядів; φ_g – граничне значення параметра φ ; Ψ – скалярний потенціал напруженості електричного поля ($\Delta\Psi$ – зміна потенціалу напруженості електричного поля в межах подвійного електричного шару поблизу границі тіла); $w_n = (\epsilon_0/2)(\partial\Psi/\partial x)^2$; $w_E = \sigma_x(\sigma_x - 4n\sigma_y)/(2E) + (1-n)(\sigma_y)^2/E$; співвідношення (6) – рівняння стану.

З рівнянь стану (6) і співвідношення (3) випливають означення коефіцієнтів b, k, ξ : $k^2 = (\rho/\epsilon_0)\partial\omega/\partial\varphi|_{e=\text{const}}$; $b = 3((1+n)/E)\partial\omega/\partial e|_{\varphi=\text{const}}$; $\xi^{-1} = \partial g_2/\partial g_1|_{g^1=\text{const}}$. Коефіцієнт ξ – безрозмірний, а розмірності b, k відповідно в В^{-1} і м^{-1} . Фізичну величину b називають електрострикційним коефіцієнтом об’ємного розширення, $k = (\rho C_e/\epsilon_0)^{0.5}$; C_e – питома електроємність локального елемента тіла ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна). Можна вважати, що k^{-1} чисельно дорівнює віддалі, на якій потенціал електричного поля зменшується в e разів із віддаленням від поверхні електропровідного тіла в його глибину ($e = 2,718$ – основа натуральних логарифмів).

Співвідношення (1)–(4) являють собою систему чотирьох рівнянь для визначення фізичних ξ, b, k і геометричної h характеристик поверхневого шару металів, (7) – граничні умови.

Для обґрунтування моделі (1)–(4) використано також методику [9] мікроскопічного підходу до взаємодії атомів металу з врахуванням радіально симетричного потенціалу центральних сил (Борна-Майєра) [2]

$$U_{\alpha\beta} = q^2/R_{\alpha\beta} - C_{\alpha\beta}/(R_{\alpha\beta})^6 - d_{\alpha\beta}/(R_{\alpha\beta})^8 + b_{\alpha\beta}\exp(-R_{\alpha\beta}/\rho_v), \quad (10)$$

Тут q – електричний заряд частинок; $R_{\alpha\beta}$ – довжина вектора, що з’єднує частинки “а” і “б”; $C_{\alpha\beta}, d_{\alpha\beta}, b_{\alpha\beta}$ – постійні (фізичні характеристики матеріалу); ρ_v – параметр “жорсткості”.

Потенціал $U_{\alpha\beta}$ являє собою суму кулонівської, вандерваальсівської та відштовхуючої складових. В розрахунках поверхневого натягу і поверхневої енергії ігнорувалась кінетична енергія атомного руху, а потенціальна енергія кристала оцінювалась методами сумування за статичною ґраткою. Крім того враховано поправки на неідеальність кристала (наявність границь зерен, дислокацій і т. д.), а також поправки для вдосконалення міжіонних парних потенціалів поверхневих областей простих металів.

Механічні параметри стану σ_x і σ_y у поверхневому шарі тіла знаходимо за допомогою формул (1)–(9), подаючи напруження і деформації у ряди за малим параметром $b_v = bF_0$ аналогічно, як у працях [10,11]. Для вдосконалення процедури проведення числових розрахунків у випадку конкретних задач використано результати, отримані для металів за допомогою нових алгоритмів. Алгоритми запропоновано на основі базових структур керування та елементарних вбудованих типів даних, а також

за допомогою механізму створення нових складених структур даних, таких як масиви і структури.

Подальший аналіз адгезії у твердих тілах буде присвячений дослідженню поверхневих параметрів та фізичних характеристик, які дадуть можливість достатньо різнобічно описати енергетичні характеристики міжфазного шару і їх зв'язок з енергією адгезії. Такого типу дослідження у межах підходу нерівноважної термодинаміки не проводився. Не проводились також обчислювальні експерименти (математичне моделювання), які дали б змогу оцінити термодинамічні параметри поверхневих шарів та їх внесок у роботу адгезії.

Тому метою даної наукової праці є розробка методами нерівноважної термодинаміки макроскопічної моделі і на її основі аналіз роботи адгезії та енергії адгезійних зв'язків на основі обчислювального експерименту для систем контактуючих тіл "Cu – Al", "Cu – Fe"

На першому етапі досліджень обчислювальний експеримент проведено для міді, алюмінію й заліза, які контактують з неактивним газовим середовищем (повітрям). Відповідні числові розрахунки досить складні та громіздкі. Автоматизацію математичних обчислень реалізовано за допомогою двох програм.

Доступ до даних на ПЕОМ здійснено через інтерфейс, в якому закладено синтаксис та семантику операцій над даними. Зміст абстрактності даних полягає в тому, що властивості типу даних визначаються інтерфейсом, а від деталей його реалізації абстрагуються.

Для комп'ютерних розрахунків алгоритми запрограмовано на основі базових структур керування та елементарних вбудованих типів даних, а також за допомогою механізму створення нових складених структур даних, таких як масиви й структури [13]. Доступ до даних на ПЕОМ здійснено через інтерфейс, в якому закладено синтаксис та семантику операцій над даними. Зміст абстрактності даних полягає в тому, що властивості типу даних визначаються інтерфейсом, а від деталей його реалізації абстрагуються.

Результати обчислювального експерименту стосовно визначення фізичних ξ , b , k , $C_{\alpha\beta}$, $d_{\alpha\beta}$, $b_{\alpha\beta}$, ρ_q і геометричних h характеристик поверхневого шару металів (Cu, Al, Fe) отримані на основі пасивного обчислювального експерименту, що робить досить проблематичним одержання відповідної стійкої моделі, яка би адекватно відображала вказані характеристики.

Подані вище співвідношення використаємо для визначення рівноважної роботи адгезії [9]

$$A_{ad} = \sigma_{s^+} + \sigma_{s^-} - \sigma_m, \quad (11)$$

а також рівноважної енергії адгезійних зв'язків, яка наведена в даній праці

$$W_{ad} = W_{s^+} + W_{s^-} - W_m. \quad (12)$$

Тут σ_{s^+} , σ_{s^-} – поверхневі натяги контактуючих тіл; σ_m – міжфазний натяг; W_{s^+} , W_{s^-} – поверхневі енергії контактуючих тіл; W_m – міжфазна енергія. Слід зазначити, що співвідношення (11) традиційне і постійно використовуються для оцінки енергетичного

стану зчеплення між плівкою і підкладкою. Співвідношення (12) в такому вигляді вперше уведено в даній праці.

Задачу визначення механічних напружень σ_x, σ_y розв'язуємо аналітично в переміщеннях з використанням методу розкладу компонент механічних напружень σ_x, σ_y , в ряди за малим параметром $b_m = bF_0$.

Громіздкі співвідношення для відхилень потенціалу φ і механічних напружень отримано для областей " V_+ " і " V_- ". Їх запишемо у символічній скороченій формі

$$\varphi_x^{(j)} = f_\varphi^{(j)}(x), \quad \sigma_x^{(j)} = f_x^{(j)}(x), \quad \sigma_y^{(j)} \approx f_y^{(j)}(x), \quad (13)$$

де $f_u^{(j)}, f_x^{(j)}, f_y^{(j)}$ – символізують громіздкі співвідношення, оскільки враховано три наближення розкладу за малим параметром.

З врахуванням виразів для механічних напружень (13) співвідношення (1) – (4) становлять систему чотирьох трансцендентних рівнянь для визначення фізичних характеристик матеріалу ξ, b, k , а також МХПЕП F_0 .

Числові розрахунки для ряду металів (*Cu, Ag, Au, Zn, Sn, Ni, Hg*) показали, що внесок нульового наближення розкладу за малим параметром b_m становить 40...50 %, першого – 50...60 %, другого – 4 %, третього – не перевищує 1 %. На основі аналізу аналітичних співвідношень типу (13) встановлено, що починаючи з четвертого кожне наступне наближення менше за попереднє приблизно у 18 разів. Ця особливість дозволяє стверджувати, що ряди для потенціалу φ і напружень σ_x, σ_y , які відповідають методу малого параметра, збіжні за умови $0 < b_m < 1$.

Задачі числового аналізу фізичних величин, які входять у вирази (11), (12) характеризуються великими обсягами інформації, складністю та формалізованістю правил. Такі особливості відповідних проблем зумовлюють постійну актуальність вдосконалення засобів аналізу на основі широкого застосування комп'ютерних технологій на всіх етапах обчислювального експерименту.

Результати числових розрахунків

Використовуючи дані про відомі фізичні характеристики металів [14–16], на основі обчислювального експерименту розраховано фізичні характеристики ξ, b, k , поверхневих шарів для металів (*Cu, Fe, Al*). Деякі з отриманих характеристик мають значення

$$b_m = bF_0 = 0,659 \text{ (Cu)}; \quad b_m = bF_0 = 0,491 \text{ (Al)}; \quad b_m = bF_0 = 0,351 \text{ (Fe)}. \quad (14)$$

Енергія адгезії для системи "*Cu – Fe*" становить 4 Дж/м² [3]. Енергія адгезії для системи "*Cu – Al*" набуває значення 3,05 Дж/м² [3]. Будемо вважати, що це енергія адгезії W_{ad} .

У результаті обчислювального експерименту для контактуючих "*Cu – Al*" металів знаходимо малий параметр

$$b_m = bF_0 = 0,0187 \text{ (Cu – Al)}.$$

Також встановлено, що для системи “Cu – Al” $A_{ad} = 3,175$ Дж/м². Відхилення між числовими значеннями A_{ad} і W_{ad} становить 4 %.

Аналогічно для системи “Cu – Fe” $A_{ad} = 3,841$ Дж/м² (на основі розрахунків) і відхилення між числовими значеннями A_{ad} і W_{ad} як і у попередньому варіанті становить 4 %.

Як бачимо на цих двох прикладах (“Cu – Al”, “Cu – Fe”), відхилення між A_{ad} і W_{ad} може мати різний знак.

Аналіз адгезії між плівкою та підкладкою неруйнівним методом

Для аналізу адгезії між покриттям і підкладкою можна використати методи акустики [17], зокрема поверхневі хвилі Релея. Нехай на поверхню плівки, яка покриває металеве тіло, падають поздовжня і поперечна хвиля. Може бути ситуація, що відбиті хвилі мають безмежні амплітуди.

При цьому встановлено, що падаючі і відбиті хвилі є неоднорідними, оскільки їх сліди або проекції хвильового руху на вибрану вісь (наприклад x) поширюються повільніше ніж поздовжні і поперечні хвилі. Кути падіння і відбивання виявляються при цьому комплексними, а самі хвилі зникають у напрямку нормалі до поверхні. Оскільки амплітуди безмежних хвиль набувають безмежних значень при кінцевих амплітудах падаючих хвиль, отримане відбите поле можна інтерпретувати як самостійну поверхневу хвилю складної структури, що існує в твердому тілі.

Встановлено, що релеєвська хвиля поширюється в твердому тілі вздовж поверхні з фазовою швидкістю $c_R = \omega_R/k_R$, яка менша за швидкість об’ємної хвилі зсуву. Значення c_R залежить від коефіцієнта Пуассона середовища n і монотонно змінюється від 0,87 c_i , $n = 0$ до 0,96 c_i , при $n = 0,5$. Тут $c_i = (G/\rho)^{0,5}$ – швидкість поширення поперечної звукової хвилі.

Встановлено, що амплітуди переміщень зменшуються в шарі завтовшки $l \sim \lambda_R = 2\pi/k_R$, тобто хвиля виявляється суттєво поверхневою. Оскільки компоненти зміщень в релеєвські хвилі зсунуті за фазою на $\pi/2$, траєкторіями руху частинок є еліпси. У системі координат, що використовується, обертання частинок відносно спостерігача, розміщеного за площиною схеми експерименту, проходить проти годинникової стрілки при поширенні хвилі в додатньому напрямі осі x . Отже, введено поняття поширення поверхневої хвилі, виходячи із задачі про відбивання. Більш прямим і строгим підходом є безпосереднє знаходження розв’язку поставленої крайової задачі у вигляді поверхневих хвиль [18,19].

Слід зазначити, що релеєвські хвилі мають багато спільного з хвилями на поверхні рідини. Це тому, що в обох випадках частинки рухаються по еліпсах. Еліпси проходять через хвильовий вектор і нормаль до поверхні, а амплітуда зміщень експоненціально зменшується з глибиною.

Загальність такого підходу особливо помітна, коли при розв’язанні задач про хвилі Релея врахувати сили поверхневого натягу. В загальному випадку довільного твердого тіла поверхневий натяг приводить до слабкої дисперсії швидкості релеєвської хвилі, що може бути використано для експериментальних оцінок величини поверхневого натягу і поверхневої енергії твердих тіл.

Поверхневий характер релеєвських хвиль особливо чітко проявляється в їх залежності від геометрії поверхні. Для поверхневої дефектоскопії широко застосовуються хвилі мегагерцевого діапазону [18, 19]. Гіперзвукові релеєвські хвилі використовуються для вивчення фізичних характеристик поверхні твердого тіла [17].

Слід зазначити, що у науковій літературі моделювання адгезійних зв'язків проведено в основному для покриттів на монокристалах та відповідні результати обґрунтовано методами теоретичної фізики [3]. Термодинамічний підхід, викладений у даній праці, має перспективу для аналізу адгезійних зв'язків між полікристалічними матеріалами, а також між лакофарбовими покриттями і металом.

Висновки

Моделювання адгезійних зв'язків проведено в основному для покриттів на монокристалах та обґрунтовано методами теоретичної фізики (як зазначено в науковій літературі). Термодинамічний підхід, викладений у даній праці, має перспективу для аналізу адгезійних зв'язків у полікристалічних матеріалах, а також для лакофарбових покриттів.

Застосування частково описаних у статті моделей, методів, методик, алгоритмів і програм дало можливість проаналізувати складні процеси обґрунтування "Cu – Al", "Cu – Fe". Різниця між числовими значеннями роботи адгезії та енергії адгезійних зв'язків не перевищує 4 %, якщо температура зовнішнього середовища незмінна.

Обґрунтовано можливість застосування для аналізу адгезійних зв'язків між адгезивом і субстратом поверхневих релеєвських хвиль мегагерцевого діапазону. При цьому слід розвинути термодинамічну модель твердого тіла і пов'язати її параметри з швидкістю поширення поверхневих релеєвських хвиль.

1. Вакилов А.Н., Мамонова М.В., Прудников В.В. Адгезионные свойства металлов и полупроводников в рамках диэлектрического формализма//Вестник Омского университета волн Релея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. – Вып. 1. – С. 37–40.
2. Юзевич В.Н. Моделирование влияния нейтронного излучения на напряженное состояние поверхностного слоя металла//Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – М.: Наука, 2000. – № 10. – С. 27–32.
3. Сопрунюк П. М., Юзевич В.М., Підгірняк Я. Є. Корогода І. І. Інформаційно-вимірювальна система контролю поверхневих параметрів твердих тіл // Фізичні методи та засоби контролю середовищ. матеріалів та виробів. – Київ; Львів: Центр "Леотест Медіум", 2001. – Вып. 6. – С. 256–261.
4. Rusanow A. J. On the thermodynamics of deformable solid surfaces//J. Colloid. and Interfacial Sci. 1978. Vol.63, No.2. P.330–334.
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. Партенский М. Б. Самосогласованная электронная теория металлической поверхности //Успехи физ.наук.– 1979. – Т. 128. – Вып.1. – С.69 – 106.
7. Вествуд А., Прис К., Камдар М. Хрупкое разрушение в среде жидкого металла // Разрушение. Инженерные основы и воздействие внешней среды / Ред. Г. Либовиц. – М.: Мир. 1976. – Т.3. – С. 635 – 691.
8. Price C. W., Hirth J. P. Surface energy and surface stress tensor in an atomistic model // Surface science. 1976. Vol. 57, № 2. P. 509–522.
9. Джейкок М., Парфит Дж., Химия поверхностей раздела фаз. – М. : Мир, 1984. – 269 с.
10. Mostoller M., Rasolt M. Pair potentials at simple metal surfaces//Physics Letters. 1982. Vol. 88A, No. 2. P. 93–96.
11. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. –

М.: Наука, 1974. – 504 с.

12. Митропольский Ю. А. Метод усреднения в нелинейной механике. – К.: Наук. думка, 1971. – 440 с.

13. Сопрунюк П.М., Юзевич В.М., Огірко О.І., Луговий П.В. Автоматизація математичних обчислень для оцінки параметрів поверхневих шарів/Відбір і обробка інформації. – К.: Наук. думка, 2000. – Вип. 14 (90).

Ель-Кхатір Хаймуді, Ю. Цимбал

Національний університет "Львівська політехніка"

УДК 681.142.37

ДВОВИМІРНА КАРТА КОХОНЕНА З ДВОМА ДОДАТКОВИМИ КОМПОНЕНТАМИ РЕАЛІЗАЦІЙ

© Ель-Кхатір Хаймуді, Цимбал Ю., 2003

Розглядаються способи побудови двовимірної карти Кохонена та особливості її застосування в задачах розпізнавання образів. Обговорено проблему лінійно залежних вхідних векторів, розроблено варіант карти з попередньою обробкою множини реалізацій для усунення даної проблеми та введенням двох додаткових компонентів. Проведено експерименти на тестових задачах для стандартного та модифікованого варіантів карти, побудовані двовимірні топографічні карти для візуалізації отриманих результатів.

The ways of construction of a two-dimensional Kohonen map along with the features of using in the tasks of pattern recognition have been considered in this paper. The problem of linearly dependent input vectors has been discussed. The variant of a map with preprocessing of set of input vectors and introduction of two additional components for elimination of the given problem has been developed. The experiments on the test tasks for standard and modified variants of the map have been performed, the two-dimensional topographical maps for visualization of the obtained results have been constructed.

Вступ

Технології на основі штучних нейронних мереж зарекомендували себе як ефективний засіб розпізнавання образів. Зокрема, однією з найбільш розповсюджених є модель нейронної мережі на основі карт із самоорганізацією (КІС), запропонована фінським ученим Т.Кохоненом [1]. Вектори навчальної множини упорядковуються на одно- або двовимірній карті, утвореній нейронами вихідного шару так, що вектори, близькі у вихідному просторі, будуть відображатися нейронами вихідного шару, що також близькі між собою. Мірою близькості може служити максимум скалярного