

**КЛАСИФІКАЦІЯ МІКРОДЕФЕКТІВ ПОВЕРХНІ
НА ОСНОВІ КЛАСТЕРНОГО АНАЛІЗУ СИГНАТУР
СИГНАЛУ СЕНСОРА ДИФУЗНОГО ВІДБИВАННЯ СВІТЛА**

Р. М. Джала, І. Б. Івасів, Л. Є. Червінка, О. О. Червінка

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

E-mail: dzhala@ipm.lviv.ua, igreg@ukr.net

Розглянуто класифікацію на основі середнього розміру поверхневих мікроефектів, зібраних у субміліметрові скупчення, розміщені випадковим чином на поверхні матеріалів. Виділено інформативні ознаки сигналів давача дифузного відбиття світла. Зокрема, кількість локальних екстремумів сигналу разом із положенням субпікселя глобального максимуму сигналу створює добре розділені кластери, навіть для випадково розташованих агрегацій дефектів.

Ключові слова: *матеріали, поверхневі мікроефекти, класифікація за розміром, дифузне відбиття світла, сенсор, інформативні ознаки сигналу, кластерний аналіз.*

**CLASSIFICATION OF SURFACE MICRODEFECTS
BASED ON CLUSTER ANALYSIS OF DIFFUSE LIGHT
REFLECTION SENSOR SIGNAL**

R. M. Dzhala, I. B. Ivasiv, L. Ye. Chervinka, O. O. Chervinka

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

Early detection of operational microdefects of protective coatings and corrosion damage is important for reliable and long-term operation of materials and structures. Corrosion damage in the early stages is almost impossible to detect by visual testing methods, given the microscopic size of such damage. Laboratory microscopes are unsuitable for field conditions. Flash meters provide an estimate of surface roughness, but do not provide a surface concentration of microdefects, especially when these defects are heterogeneous or polydisperse.

A compact prismatic sensor of the angular characteristic of diffuse light reflection is proposed for the detection of microdefects and express diagnostics of surface quality. To increase the informativity of the sensor signal during measurements, the useful signal was calculated as the difference between the base values of the diffuse reflected signal for a surface without defects and the measured values for a surface with defects. The dependence of the signal distribution on the photoline on the geometry of the sensor was taken into account.

The article considers the problem of classification by the average size of surface microdefects collected in submillimeter clusters, randomly placed on the surface of materials. The use of numerical methods for solving inverse problems requires large computing power and time, which is not always acceptable for field measurements. The dependence of solution stability on signal measurement errors and random locations of clusters of microdefects on the illuminated area of the investigated surface is important.

An effective set of informative signal features is selected. The study explored the possibility of using alternative sets of informative parameters derived from the base set. It was proposed to determine the size of the defects based on the smoothness criteria of the contour signal of the diffuse light reflection sensor. To evaluate the characteristics of the spatial configuration of defects, the positions of the peaks of the signal distribution along the photoline, determined with subpixel accuracy, were used.

The classification is made for the selected information features of the signals of the diffuse light reflection sensor. In particular, the number of local signal extrema together with the subpixel position of the global signal maximum produces well-separated clusters, even for randomly located defect aggregations.

Keywords: *materials, surface microdefects, classification by size, light diffuse reflection, sensor, signal informational features, cluster analysis.*

© Р. М. Джала, І. Б. Івасів, Л. Є. Червінка, О. О. Червінка, 2024

Вступ. Для надійної і тривалої експлуатації матеріалів та конструкцій важливе своєчасне виявлення експлуатаційних дефектів та корозійних ушкоджень [1]. Так, виявлення корозійних ушкоджень поверхонь конструкцій на ранніх стадіях дає змогу їх захистити ще до того, як пошкодження почнуть впливати на експлуатаційні властивості чи призводити до незворотних процесів. Водночас корозійні ушкодження на ранніх стадіях практично неможливо виявити традиційними візуальними методами контролю, з огляду на їх мікроскопічні розміри. З іншого боку, використовувати методи мікроскопії, якими в лабораторних умовах знаходять корозійні мікроушкодження на ранніх стадіях, практично неможливо у польових умовах.

Подібною важливою задачею є контроль дефектів захисних покриттів [1]. Їх небезпека полягає в тому, що вони, залишаючись малопомітними, можуть бути наскрізними, допускаючи контакт зовнішнього середовища з поверхнею матеріалів. Оскільки на ці покриття безпосередньо впливають атмосферні чинники (волога, перепади температур, сонячна радіація, пиловітрова ерозія тощо), в них можуть розвиватися різноманітні мікро- та макродефекти, мікротріщини, мікрокаверни, проколи, пухирці, зморшки та складки (рис. 1). Розвитку дефектів може також сприяти недостатньо строге дотримання технологій нанесення покриттів. Для виявлення наскрізних пошкоджень діелектричних лакофарбових покриттів металу застосовують електроіскрові, електролітичні дефектоскопи.

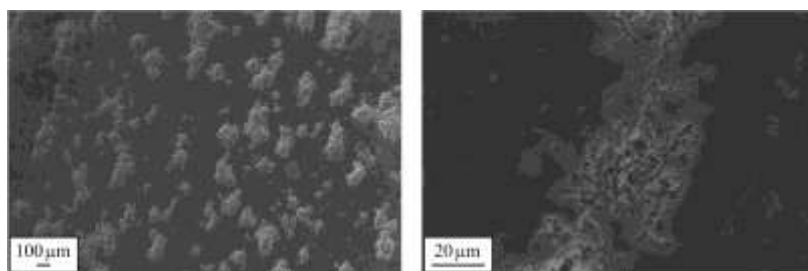


Рис. 1. Зображення гетерогенних субміліметрових дефектів на поверхні металу за різного збільшення.

Аналіз стану проблеми. Одним із найпоширеніших методів діагностики якості поверхонь лакофарбових покриттів є міряння зміни їх блиску, зумовленої зростанням мікросорсткості поверхні внаслідок розвитку мікродефектів. Однак наявні блискоміри [2] оцінюють лише середню шорсткість поверхні, що не дає можливості однозначно проаналізувати поверхневі концентрації мікродефектів, особливо, коли ці дефекти є гетерогенними чи полідисперсними.

Таким чином, вибір і розроблення методів та засобів для виявлення і контролю корозійних ушкоджень конструкцій та пошкодження захисних покривів на ранніх стадіях їх деградації, які повинні надійно виявляти мікроушкодження (мікродефекти) та бути придатними для роботи у польових умовах, є актуальною задачею.

Для виявлення мікродефектів та експрес-діагностики якості поверхонь запропоновано компактний призматичний сенсор кутової характеристики дифузного відбивання світла (ДВС) [1, 3]. Оптична конфігурація сенсора показана на рис. 2. Міряння кутової характеристики в заданому діапазоні кутів відбивання, на відміну від мірянь для одного-двох фіксованих кутів, які застосовують у блискомірах, дає змогу вносити корекцію на зміну дисперсного складу та характеру мікродефектів, підвищуючи надійність результатів контролю. Перевагами такої конфігурації є відмова від дорогої техніки сканування зі збереженням репрезентативності досліджуваної ділянки поверхні, що є важливим для польових умов.

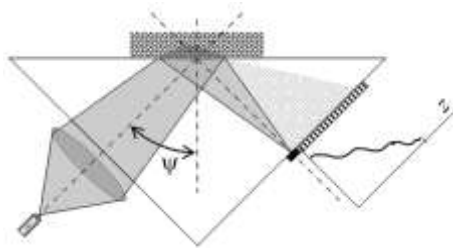


Рис. 2. Оптична конфігурація призматичного сенсора дифузного відбивання світла.

Формулювання завдання. Розглянемо задачу класифікації за середнім розміром поверхневих мікрodefektів, агломерованих у субміліметрові скупчення, хаотично розміщені на поверхні матеріалів. Таку класифікацію пропонуємо здійснювати на основі сигналу розробленого призматичного сенсора ДВС [1, 3], який формується як розподіл на 14 елементах фотолінійки інтенсивності світла, дифузно відбитого поверхнею матеріалу.

Щоб підвищити інформативність сигналу сенсора $I_r(q)$, під час мірянь корисний сигнал розраховували як різницю між базовими значеннями $I_{rBL}(q)$ дифузно відбитого сигналу для поверхні без defektів та вимірними значеннями $I_{rM}(q)$ для поверхні з defekтами:

$$I_r(q) = I_{rBL}(q) - I_{rM}(q). \quad (1)$$

Вважали, що поверхня без defektів у першому наближенні є плоскою і абсолютно гладкою, для якої характерне дзеркальне відбивання світла.

Враховуючи, що розподіл сигналу на фотолінійці залежить від геометрії сенсора, заданої функцією $K_s(x, y, q)$, та двонаправленої функції розподілу відбивання світла $f_r(\theta^i, \theta^s; \sigma_s(\gamma, d), n(d), g_{jk}; x, y)$, де x, y – координати точки на досліджуваній поверхні, q – лінійна координата (номер) елемента фотолінійки, $\theta^i = \theta^i(x, y, q)$, $\theta^s = \theta^s(x, y, q)$ – напрямки падаючого та дифузно відбитого променів, $\sigma_s(\gamma, d)$ – диференціальний переріз розсіювання для кута γ та розміру розсіювача світла (мікрodefektу) d , $n(d)$ – дисперсний склад (розподіл лічильних концентрацій розсіювачів світла за діаметрами), $g_{jk}(r)$ – парціальні функції радіального розподілу. Вираз для сигналу сенсора ДВС є у вигляді

$$I_r(q \neq q_0) = \frac{N}{S_{cell} \sum_{S_i \subset S_{illum}} \iint f_r(\theta^i, \theta^s; \sigma_s(\gamma, d), n(d), g_{jk}(r); x, y) K_s(x, y, q) dx dy - \frac{N}{S_{cell} \sum_{S_i \subset S_{illum}} \iint f_{rBL}(\theta^i = \theta^s; x, y) K_s(x, y, q) dx dy, \quad (2)$$

де q_0 – координата точки фокусування зондувального променя для гладкої поверхні, N – загальна лічильна концентрація розсіювачів світла на досліджуваній поверхні, S_{cell} – площа окремого елемента фотолінійки, S_i – площа i -го скупчення мікрodefektів, S_{illum} – освітлена площа досліджуваної поверхні, $f_{rBL}(\theta^i = \theta^s; x, y)$ – двонаправлена функція розподілу відбивання світла від гладкої поверхні (фактично – функція дзеркального відбивання).

Знаходження величин і функцій, які характеризують розміри і просторовий розподіл мікрodefektів (N , $n(d)$ і $g_{jk}(r)$), з рівняння (2) є складною оберненою

задачею, яка в загальному випадку не має аналітичного розв'язку [4]. Навіть якщо спростити формулювання задачі, покладаючи, що можна знехтувати багаторазовим розсіюванням світла між дефектами (вилучити з розгляду $g_{jk}(r)$), та вважаючи, що дисперсний склад мікрodefektів близький до монодисперсного (розподіл $n(d)$ вузький), знаходження розв'язку рівняння (2) залишається складним через конфігурацію оптичного сенсора.

Застосування числових методів розв'язування обернених задач (зокрема, розглядали зворотний метод Монте-Карло [5]) вимагає великих обчислювальних потужностей та часу, що не завжди є прийнятним для польових умов. Іншою важливою проблемою є сильна залежність стійкості розв'язку від похибок мірювання сигналу, зумовлених, зокрема, випадковим розташуванням скупчень мікрodefektів на освітленій ділянці досліджуваної поверхні.

Вибір ефективного набору інформативних ознак сигналу. Пряме використання метрик, які базуються на такому довгому (14 елементів) векторі амплітудних значень сигналу, у зворотному методі Монте-Карло призводить до великої кількості локальних мінімумів на множині можливих просторових конфігурацій дефектів, і, відповідно, суттєво збільшує тривалість роботи алгоритму. Також використання таких метрик призводить до значного впливу похибок мірювання амплітудних значень сигналу та похибок, зумовлених просторовими флуктуаціями розміщення дефектів, оскільки будь-яку зміну значень сигналу у міряться каналах можна інтерпретувати як спричинену зміною розмірів дефектів.

Тому вивчали можливість застосування альтернативних наборів інформативних параметрів, які виводили на основі базового набору. Сенс використання таких параметрів полягає у залученні додаткової інформації про співвідношення між компонентами вектора амплітудних значень сигналу.

Зокрема, пропонували [1, 6] визначати розмір дефектів на основі критеріїв гладкості обвідної сигналу сенсора дифузного відбивання світла. А в працях [1, 7] для оцінки характеристик просторової конфігурації дефектів використовували положення піків розподілу сигналу вздовж фотолінійки, визначених із субпіксельною точністю. При цьому пропонували застосовувати різноманітні алгоритми для визначення положень піків [8–11].

Тут пропонуємо оцінювати розмір мікрodefektів на основі методів машинного навчання, які базуються на ознаках сигналу сенсора, попередньо визначених на “тренувальних” наборах сигналів. Такий підхід дозволяє багатократно зменшити обчислювальні потужності та скоротити тривалість класифікації. При цьому можна також зменшити вплив похибок вимірів сигналу внаслідок розділення “тренування” класифікатора на великому наборі даних від самої класифікації ознак досліджуваних об'єктів.

Щоб отримати необхідний “тренувальний” набір даних, моделювали сигнали сенсора ДВС на основі формули (2) для різних фіксованих розмірів мікрodefektів у субміліметрових скупченнях та різних реалізацій випадкового розміщення цих скупчень на досліджуваній поверхні. Окремі результати такого моделювання показані на рис. 3.

Для класифікації мікрodefektів застосовували кластерний аналіз набору ознак сигналу. Використання положень екстремумів як наборів інформативних ознак для кластерного аналізу виявилось неефективним, оскільки кількість екстремумів змінюється залежно від розмірів дефектів.

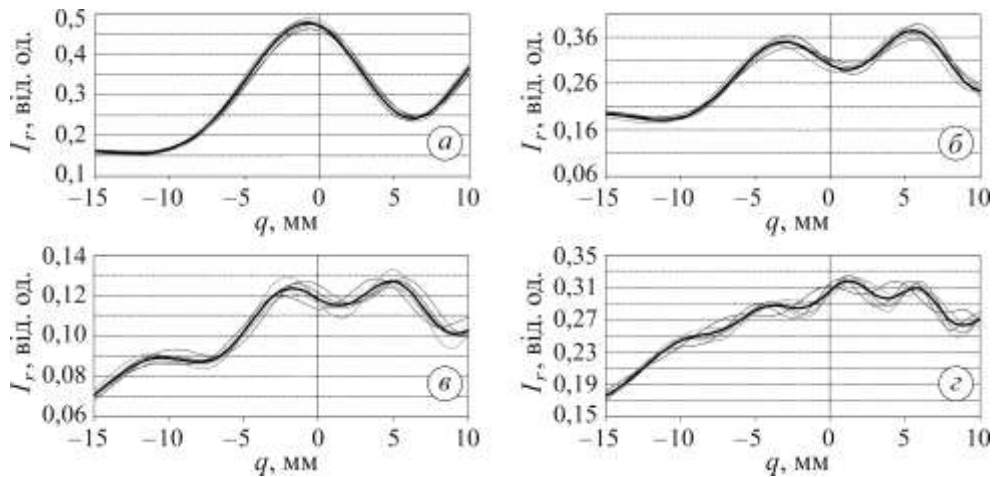


Рис. 3. Моделювання сигналів сенсора (шість реалізацій та середнє значення (жирна лінія)) для різних розмірів мікродфектів (*a* – 1,0 мкм; *б* – 1,6 мкм; *в* – 2,0 мкм; *г* – 3,0 мкм) у випадково розміщених скупченнях.

Дослідження показали, що найвдалішим для надійної класифікації є набір ознак, який складається з положення глобального максимуму та кількості екстремумів обвідної сигналу. Розраховували положення глобального екстремуму з субпіксельною точністю на основі алгоритму медіани [12]. У цьому випадку, для кожного з модельованих розмірів мікродфектів набори вибраних ознак сигналу чітко групувалися у кластери, які легко відділялися один від одного, навіть попри варіації розміщення скупчень мікродфектів (рис. 4).

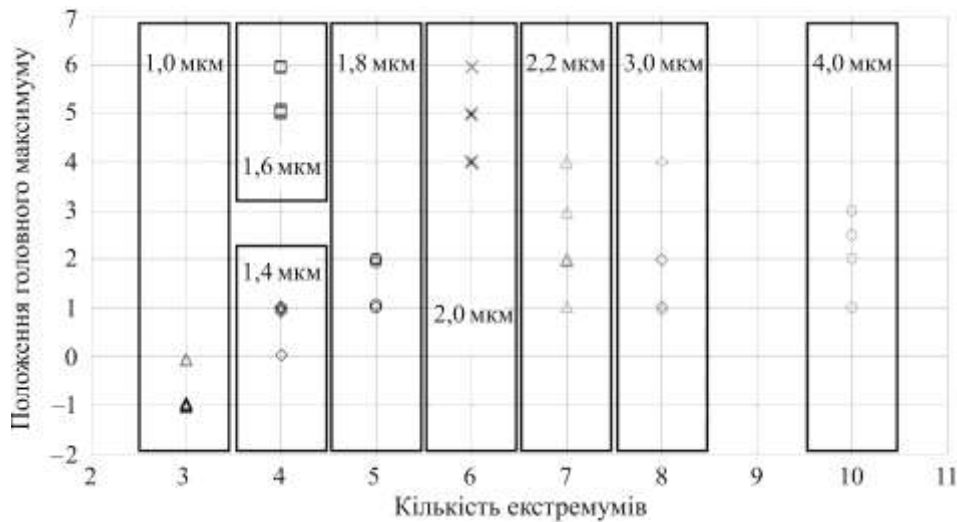


Рис. 4. Кластеризація інформативних ознак сигналу.

Отже, використання запропонованих інформативних ознак сигналу сенсора дифузного відбивання світла [13] дає змогу надійно класифікувати поверхневі мікродфекти матеріалів за середнім розміром навіть без застосування методу опорних векторів для визначення меж кластерів.

ВИСНОВКИ

Класифікація за середнім розміром поверхневих мікродфектів, зібраних у субміліметрові скупчення, розміщені випадковим чином на поверхні матеріалів,

виконана для виділених інформативних ознак сигналів давача дифузного відбиття світла.

Для надійної класифікації найвдалішим є набір ознак, що складається з положення глобального максимуму та кількості екстремумів обвідної сигналу.

Для кожного з модельованих розмірів мікрodefektів набори вибраних ознак сигналу чітко групувалися у кластери, які відділялися один від одного, незалежно від варіації розміщення скупчень мікрodefektів.

1. Dzhala, R.M.; Dzhala, V.R.; Ivasiv, I.B.; Rybachuk, V.G.; Uchanin, V.M. *Electrophysical methods for nondestructive testing of defects in structural elements*. Vol. 4; Dzhala, R.M., Ed.; In Technical diagnostics of materials and structures: Reference manual in 8 vol.; Nazarchuk, Z.T., Ed.; Prostir-M, 2018. (in Ukrainian).
2. *Glosmeters*. *Electronic resource*. 2024.
<https://lab-express.com.ua/ua/g94594705-bliskomiri-glosmetrio> (accessed 2024-07-21)
3. Dzhala, R.M.; Ivasiv, I.B.; Chervinka, L.Ye.; Chervinka, O.O. Sensor of diffuse light reflection for early detection of paint-and-lacquer coatings damages. *Information extraction and processing*. **2015**, 42(118), 58–67. (in Ukrainian)
4. Okhrimenko, M.G.; Fartushnyi, I.D.; Kulyk, A.B. *Ill-posed problems and methods for their solution*. Politekhnik, 2016, (in Ukrainian).
5. McGreevy, R.L.; Pusztai, L. Reverse Monte Carlo simulation: a new technique for the determination of disordered structures. *Mol. Simul.* **1988**, 1, 359–367.
<https://doi.org/10.1080/08927028808080958>
6. Ivasiv, I.B. Corrosion points sizing by smoothness criterion for signal envelope of light diffuse reflection sensor. *Information extraction and processing*. **2016**, 44(120), 45–50. (in Ukrainian)
7. Ivasiv, I.B.; Dzhala, R.M. Peaks' Positions Estimation in Diffuse Light Reflection Sensor's Signal for Pitting Corrosion Detection. In *Measuring and computing devices in technological processes 2016, Proceedings of XVI International Science and Technology Conference*, Odesa, Ukraine, June 10–15, 2016; p. 50.
8. Lange, E.; Gröpl, C.; Reinert, K.; Kohlbacher, O.; Hildebrandt, A. High-Accuracy Peak Picking of Proteomics Data Using Wavelet Techniques. In *Proc. Pacific Symp. on Biocomputing 2006*, Maui, Hawaii, USA, January 3–7, 2006, pp 243–254. https://doi.org/10.1142/9789812701626_0023
9. Blais, F.; Rioux, M. Real-time numerical peak detector. *Signal Proc.* **1986**, 11(2), 145–155.
[https://doi.org/10.1016/0165-1684\(86\)90033-2](https://doi.org/10.1016/0165-1684(86)90033-2)
10. Nagaraj, K.; Lewis, S.H.; Walden, R.W.; Offord, G.E.; Shariatdoust, R.S.; Sabnis, J.A., Peruzzi, R.O.; Barner, J.R.; Plany, J.; Mento, R.P.; Rakshani, V.A.; Hull, R.W. A median peak detecting analog signal processor for hard disk drive servo. *IEEE J. of Solid-State Circuits*. **1995**, 30(4), 461–470. <https://doi.org/10.1109/4.375967>
11. Ferguson, J.A.; Sawyers, W.G.; Waddell, K.A.; Ferrige, A.G.; Alecio, R.; Ray, S. Improved centroid peak detection and mass accuracy using a novel, fast data reconstruction method. In *Proc. of the 50th ASMS Conf. on Mass Spectrometry and Allied Topics*, Orlando, Florida, June 2–6, 2002, ASMS.
12. Ivasiv, I.B. Median based algorithm for sub-pixel estimation of extrema positions of diffuse light reflection signal. *Information. Extraction and Process.* **2021**, 47(125), 37–44.
<https://doi.org/10.15407/vidbir2021.49.037>
13. Ivasiv, I.B.; Chervinka, L.E.; Chervinka, O.O. Classification of surface microdefects of materials based on computer modeling and cluster analysis of diffuse reflection sensor signal signatures. In *Computer modeling and software of information systems and technologies 2024, Proceedings of CMS-2024*, Chernivtsi, Ukraine, June 30 – July 1, 2024. pp. 94–97. (in Ukrainian)

Одержано 12.08.2024