

СЕНСОР ДИФУЗНОГО ВІДБИВАННЯ СВІТЛА ДЛЯ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ЛАКОФАРБОВИХ ПОКРИВІВ

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

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

E-mail: dzhala@ipm.lviv.ua, greg@ipm.lviv.ua

Розроблено сенсор дифузного відбивання світла для аналізу характеристик пошкоджень (мікрodefектів) лакофарбових покривів. Здійснено комп'ютерне моделювання сигналу сенсора для різних типів пошкоджень та виконано лабораторні випробування макета сенсора. Отримані покази відтворюють у першому наближенні результати моделювання.

Ключові слова: лакофарбові покриви, дефекти, неруйнівний контроль, сенсор, дифузне відбивання світла, моделювання, вимірювання.

SENSOR OF DIFFUSE LIGHT REFLECTION FOR EARLY DETECTION OF PAINT-AND-LACQUER COATINGS DAMAGES

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

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine

A sensor of diffuse light reflection has been elaborated for the detailed express-analysis of the characteristics of the paint-and-lacquer coatings' damages (micro defects) instead of the laboratory devices and the portable glossmeters. General optical configurations of the sensor as well as design of the optical and electronic parts are described. Computer modelling of the sensor's signal for various kinds of damages such as the solid and hollow defects, pitting corrosion has been performed. Also, the laboratory tests of a sensor prototype have been carried out for the pitting corrosion powder simulators. The obtained testing results reconstruct well the modeling results in the first approximation.

Keywords: paint-and-lacquer coatings, defects, non-destructive testing, sensor, diffuse light reflection, modelling, measurement.

Важливим засобом продовження тривалості експлуатації трубопроводів, резервуарів та інших металевих конструкцій в умовах впливу атмосферних факторів є нанесення захисних покривів. Найпоширеніші з них – лакофарбові. Оскільки ці покриви безпосередньо піддаються впливу атмосферних факторів (волога, перепади температур, сонячна радіація, пило-вітрова ерозія тощо), в них можуть розвиватися різноманітні мікро- та макродефекти: мікротріщини, мікрокаверни, проколи, пухирці, зморшки та складки [1]. Розвитку дефектів може також сприяти недостатньо строге дотримання технологій нанесення покривів.

З часом ці дефекти призводять до пошкодження покривів та корозії самих металевих конструкцій, що проявляється на поверхні покривів у вигляді корозійних точок і плямок, здуття, розтріскування та відшарування (рис. 1) [2].

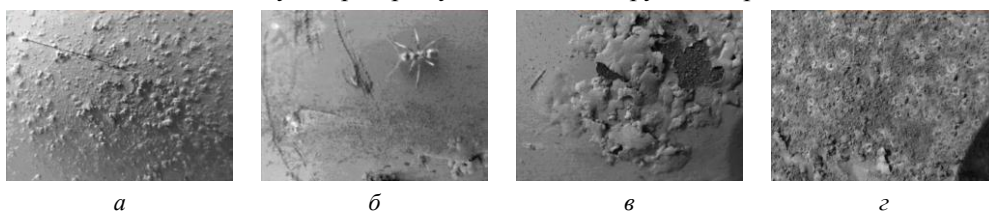


Рис. 1. Корозійні пошкодження реальних об'єктів: *a* – побічні вклучення; *b* – корозійні точки (пітінг) і плямки; *v* – відшарування; *z* – повне корозійне ураження.

Для своєчасного виявлення пошкоджень періодично контролюють стан поверхні захисних покриттів. Як правило, це здійснюють візуально, а отже, виявити мікродефекти, особливо на початкових та проміжних стадіях їх розвитку, неможливо. Ультрафіолетові, електролітичні та електроіскрові дефектоскопи виявляють лише ті з них, що порушують суцільність (наскрізні пошкодження).

Надійні результати дають сучасні засоби оптичної мікроскопії з цифровою обробкою зображень (рис. 2) і лабораторні пристрої вимірювання та аналізу кутових характеристик дифузного відбивання світла, зокрема, аналізатори TMS 2000 та DTM 2000 фірми Schmitt Measurement Systems Inc., Keyence LT-8010 фірми SiPHER Auto (рис. 3). Однак ці пристрої дорогі та непридатні для експрес-аналізу в польових умовах.

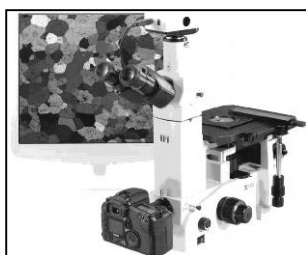
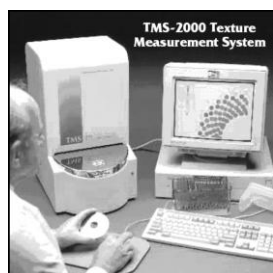


Рис. 2. Оптична мікроскопія з цифровим вводом та обробкою зображення.



a



б

Рис. 3. Аналізатори кутових характеристик дифузного відбивання світла: *a* – TMS 2000; *б* – Keyence LT-8010.

Одним зі стандартних універсальних методів діагностики якості поверхонь лакофарбових покриттів є вимірювання зміни їх блиску, зумовленої зростанням мікросорсткості поверхні внаслідок розвитку мікродефектів (рис. 4). Однак існуючі блискоміри (зокрема, прилади фірм Rhopoint Instrumentation Ltd, Англія, та Cole-Parmer Instrument Company, США; рис. 5) оцінюють лише середню шорсткість, через що не вдається однозначно визначати поверхневу концентрацію гетерогенних чи полідисперсних мікродефектів.

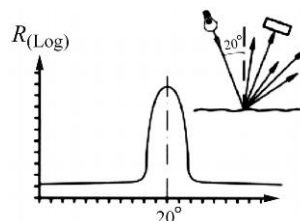


Рис. 4. Вимірювання зміни блиску поверхонь покриттів.



a



б



в

Рис. 5. Блискоміри: *a* – μ Scan (Schmitt Measurement Systems Inc.); *б* – EW-59600-05 (Cole-Parmer Instrument Company); *в* – Novo-Gloss IQ (Rhopoint Instrumentation Ltd).

Таким чином, актуально розробити достатньо універсальний метод та відповідні засоби для експрес-діагностики якості поверхонь лакофарбових захисних покриттів надземних ділянок магістральних трубопроводів на ранніх стадіях їх деградації.

Оптична конфігурація та задачі аналізу сигналу сенсора дифузного відбивання світла для виявлення пошкоджень лакофарбових покриттів. Запропоновано [3, 4] компактний сенсор кутової характеристики дифузного відбивання світла для діагностики поверхонь таких покриттів. Вимірювання в заданому діапазоні кутів відбивання, на відміну від вимірювань для одного–двох фіксованих кутів, що застосовують у блискомірах, дає змогу корегувати дисперсний склад та характер мікродфектів, а отже, підвищити надійність результатів вимірювання.

Зондують крізь прозору підкладку, виконану у вигляді перевернутої призми, основа якої служить робочою поверхнею, а скісні грані – для вводу зондувального пучка світла та вимірювання кутової характеристики (рис. 6) [4]. Така оптична схема забезпечує достатньо надійну роботу сенсора у промислових та польових умовах, оскільки підкладка є ще й основою для жорсткого кріплення блока формування зондувального пучка та світлочувливих елементів (фотолінійки).

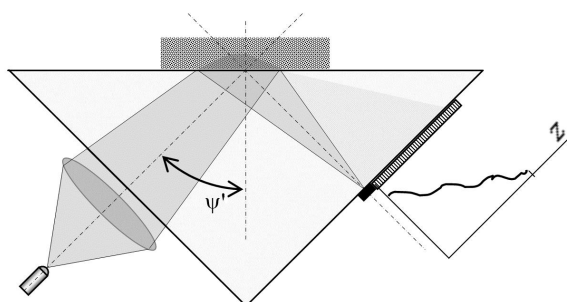


Рис. 6. Оптична конфігурація призматичного сенсора дифузного відбивання світла.

Світло, дифузно відбите дисперсним матеріалом на робочій поверхні сенсора, реєструє фотолінійка на вихідній скісній грані призми (рис. 6). Таким чином, за розподілом інтенсивності світла на елементах фотолінійки визначають кутову характеристику дифузного відбивання.

Переваги запропонованої оптичної схеми полягають у використанні достатньо широкого зондувального пучка з можливістю вимірювати кутову характеристику в околі кута дзеркального відбивання, а отже, отримувати сигнал з репрезентативної ділянки поверхні без застосування дорогої техніки сканування.

З іншого боку, через формування сигналу достатньо великою ділянкою поверхні ускладнюється його інтерпретація та необхідно розв'язати обернені задачі. Для цього важливо побудувати адекватну модель формування сигналу сенсора і далі верифікувати її шляхом створення і лабораторних випробувань макета сенсора.

Комп'ютерне моделювання просторового розподілу сигналу сенсора дифузного відбивання світла. Сигнал сенсора $I_r(q)$ записували [4, 5] за допомогою функціонала

$$I_r(q) = \frac{1}{s_c} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{-y_m(x)}^{y_m(x)} \sigma_s[\theta_{sr}(x, y, q), Q(x, y)] K_s(x, y, q) dx dy, \quad (1)$$

$$K_s(x, y, q) = i_i(x, y) f_s(x, y, q), \quad (2)$$

де q – лінійна координата світлочувливого елемента на фотолінійці; s_c – його площа; $\sigma_s[\theta_{sr}, Q]$ – диференціальний переріз дифузного відбивання світла в напрямку чутливого елемента з координатою q для заданої елементарної ділянки досліджуваного матеріалу з координатами (x, y) ; $\theta_{sr}(x, y, q)$ – кут дифузного відбивання

відносно падаючого променя; $Q(x, y)$ – конфігураційний параметр випробовуваного матеріалу для елементарної ділянки; $K_s(x, y, q)$ – незалежна від параметрів цього матеріалу апаратна функція сенсора, яка містить “апаратну” функцію для дифузно відбитих променів $f_s(x, y, q)$ та розподіл інтенсивності світла на активній ділянці робочої поверхні сенсора $i_s(x, y)$.

Для щільноупакованих дисперсних середовищ і матеріалів кутову характеристику дифузного відбивання в спрощеному вигляді записують у вигляді [6]

$$\sigma_s[\theta_{sr}, Q] = Q_{sca} s^{(3)} i_s(\theta_{sr}) S(\theta_{sr}, Q), \quad (3)$$

де Q_{sca} – фактор розсіювання ізольованої частинки; $s^{(3)}$ – об’ємна концентрація площ поперечних перерізів частинок; $i_s(\theta_{sr}) = i_s(\theta_{sr}; d, \tilde{n})$ – індикатриса розсіювання ізольованої частинки, що залежить від її діаметра d та хімічного складу, закладеного в комплексний показник заломлення \tilde{n} ; $S(\theta_{sr}, Q)$ – структурний фактор, що залежить від просторової конфігурації (взаємного розміщення) частинок.

В окремих випадках (розріджена упаковка частинок, дуже щільна упаковка сильно поглинальних частинок) можна знехтувати багаторазове розсіювання і покласти $S(\theta_{sr}, Q) = S_0 = \text{const}$ [4]. Тоді вираз (3) набуде вигляду

$$\sigma_s(\theta_{sr}) = s^{(3)} S_0 Q_{sca} i_s(\theta_{sr}). \quad (4)$$

Також вважали, що між частинками і підкладкою є певний повітряний проміжок, а тому не враховували ефекти взаємодії у ближній зоні розсіювання в системі “частинка–підкладка”.

Для визначеного так значення θ_{sr} розраховували за формулами Мі фактор та індикатрису розсіювання Q_{sca} , $i_s(\theta_{sr})$ у виразі (4). Для цього використовували програму ВНМІЕ [1]. Індикатрису розсіювання знаходили, ґрунтуючись на двох основних моделях дефектів: моделі щільних сферичних включень (рис. 7а) з показниками заломлення $1,59\dots 0,66i$ (оптично жорсткі розсіювачі) і $1,446\dots 0,0i$ (оптично м’які розсіювачі) та моделі порожнистих включень (рис. 7б) з показником заломлення розсіювачів $1,0\dots 0,0i$ й показником заломлення основного середовища $1,446\dots 0,0i$.

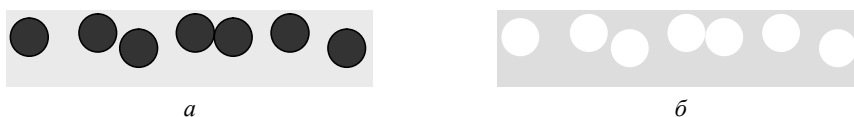


Рис. 7. Модель щільних (а) та порожнистих (б) сферичних включень.

Розраховували індикатрису розсіювання для оптично жорстких (рис. 8а) і оптично м’яких (рис. 8б) щільних сферичних включень, а також для порожнистих сферичних включень (рис. 8б).

Комп’ютерне моделювання сигналу сенсора (розподілу інтенсивності світла вздовж фотолінійки) здійснювали для таких параметрів оптичної схеми:

- відстань, яку долає центральний промінь пучка від вхідної грані призми до точки фокусування на вихідній грані, $f' = 50$ мм;
- кут падіння центрального променя пучка на робочу поверхню $\psi' = 30^\circ$;
- точкове джерело світла – інфрачервоний світлодіод SFH4301 (Infineon Technologies AG) з довжиною хвилі $0,95$ мкм.

Моделювали для двох положень фотолінійки: у площині падіння центрального променя зондувального пучка (схема 1) та перпендикулярно до неї (схема 2). Результати моделювання для порожнистих включень подано на рис. 9 [1].

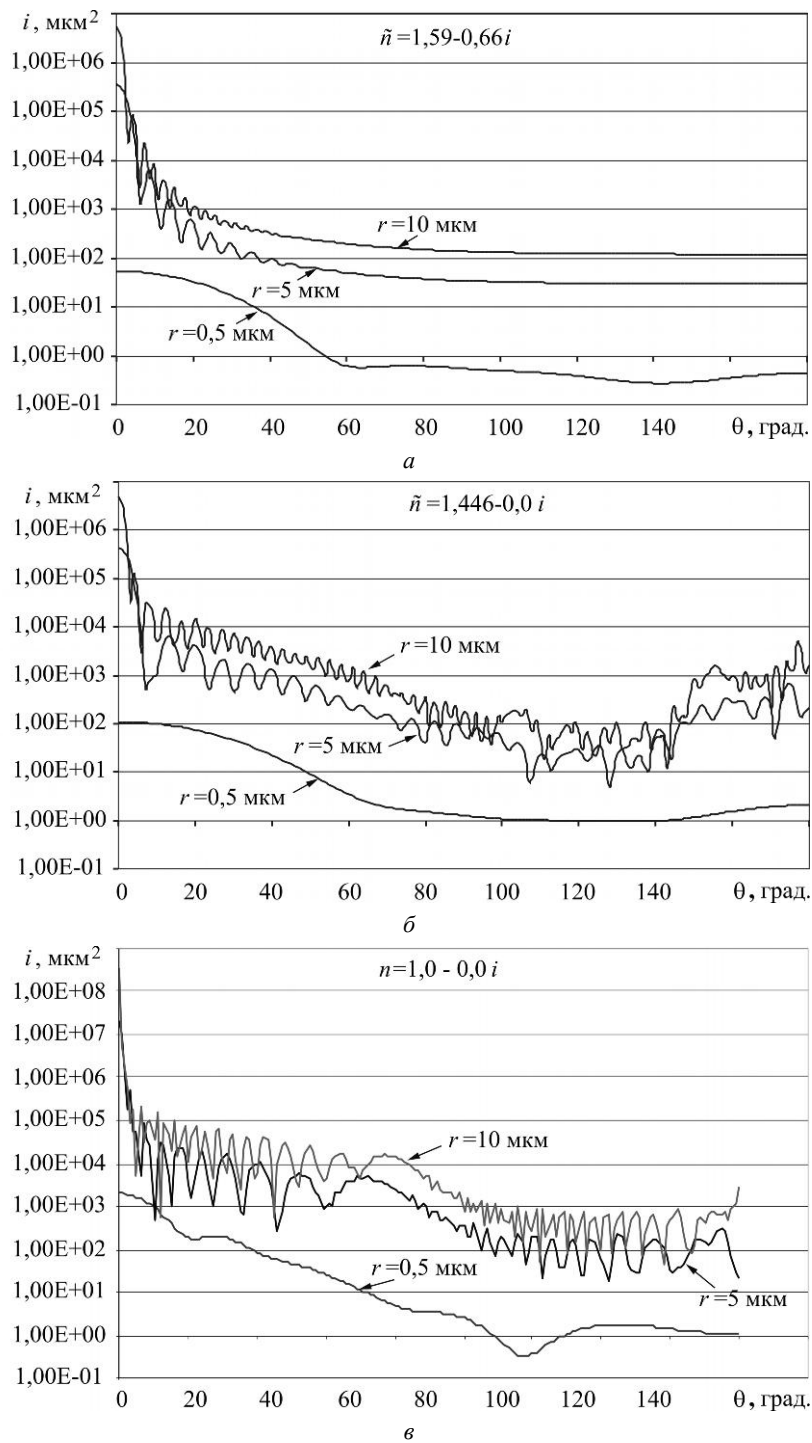


Рис. 8. Індикатриси розсіювання для оптично жорстких (а) та оптично м'яких (б) щільних сферичних розсіювачів, а також порожнистих сферичних включень (в).

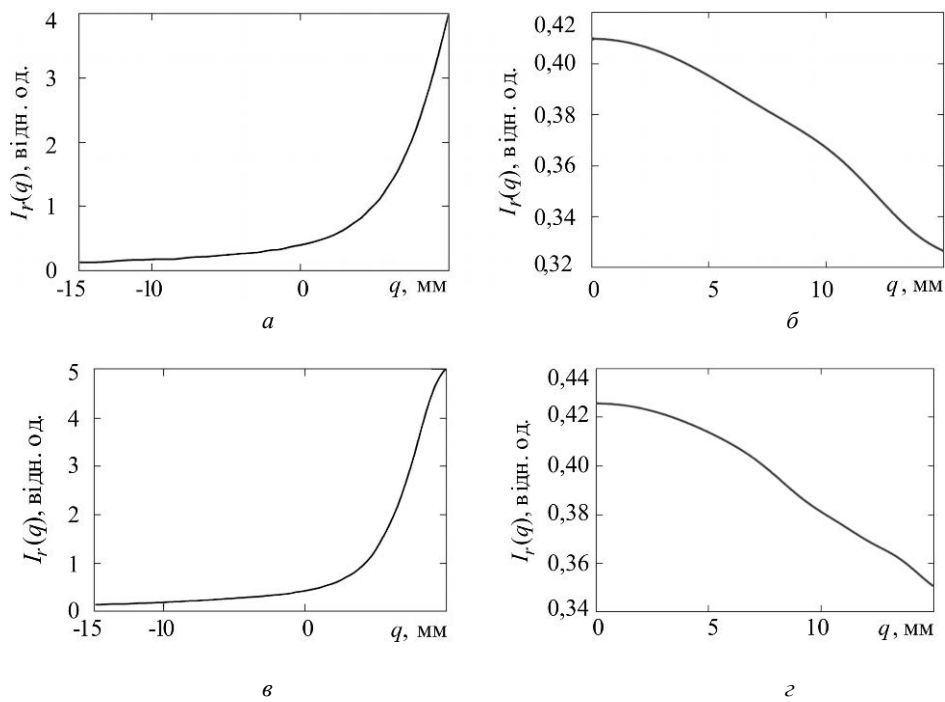


Рис. 9. Сигнал сенсора для включень з діаметрами 20 (а, б) та 50 мкм (в, г): а, б – схема 1; в, г – схема 2.

Також моделювали сигнал сенсора для поверхонь з пітинговою корозією. При цьому корозійні точки (зазвичай червоного кольору) моделювали як щільні сферичні включення з оптичними параметрами, що відповідають частинкам міді (теж такого кольору) з діаметром 1 мкм та комплексним показником заломлення $0,13...6,22i$ на довжині хвилі 0,95 мкм. Результат моделювання ілюструє рис. 10.

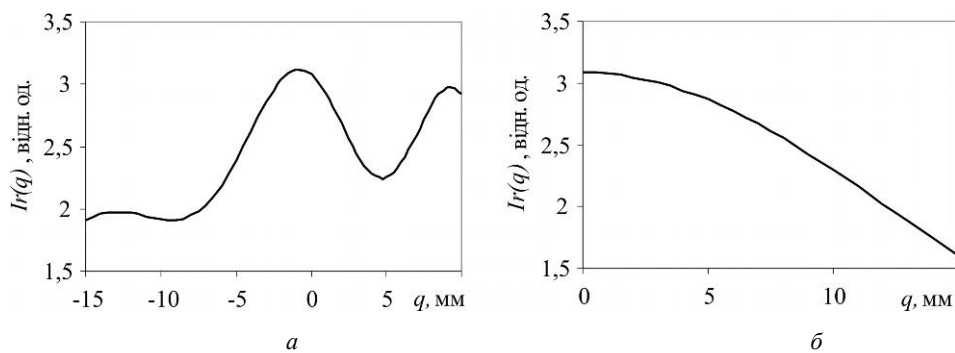


Рис. 10. Сигнал сенсора для частинок міді: а – схема 1; б – схема 2.

Раніше [2] запропоновано дещо іншу модель пітингової корозії. Освітлену зондувальним пучком ділянку вже не можна розглядати як однорідну (в мезоструктурному сенсі) полідисперсну розсіювальну поверхню (рис. 11а). Тут маємо набір окремих розсіювальних полідисперсних острівців субміліметрових розмірів (рис. 11б).

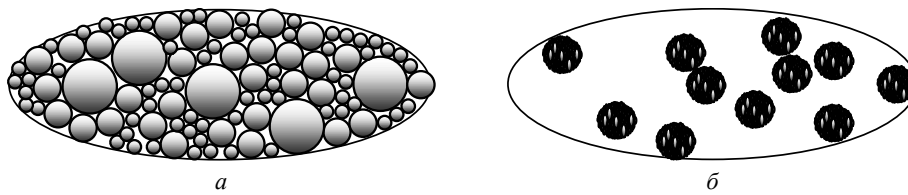


Рис. 11. Моделі систем розсіювачів: *a* – для суцільної корозії; *б* – для пітингової.

Тоді функціонал (1) переписуємо у вигляді

$$I_r(q) = \frac{1}{s_c} \iint_{\sum S_i} \sigma_s [\theta_{sr}(x, y, q), Q(x, y)] K_s(x, y, q) dx dy, \quad (5)$$

де $\sum S_i \subset S: y \leq y_m(x), x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ – площа сукупності корозійних точок.

Очевидно, що за низьких концентрацій корозійних точок спостерігатиметься значна варіація сигналу на фотолінійці, зумовлена різною просторовою конфігурацією $Q_p(x, y)$ розміщення цих точок в освітленому полі. Тому важливо статистично моделювати залежності варіації сигналу від кількості корозійних точок та визначити порогові їх концентрації, для яких ця варіація несуттєва.

Апаратурна реалізація сенсора дифузного відбивання світла. Для більшої компактності сенсора та монтажу його в корпус усі оптичні елементи, що формують пучок, кріпили на рейці, прикріпленій до однієї зі скісних граней призми. Зондувальний пучок у призму вводили з допомогою допоміжної прямокутної дзеркальної призми. Спрощена оптико-механічна схема сенсора подана на рис. 12.

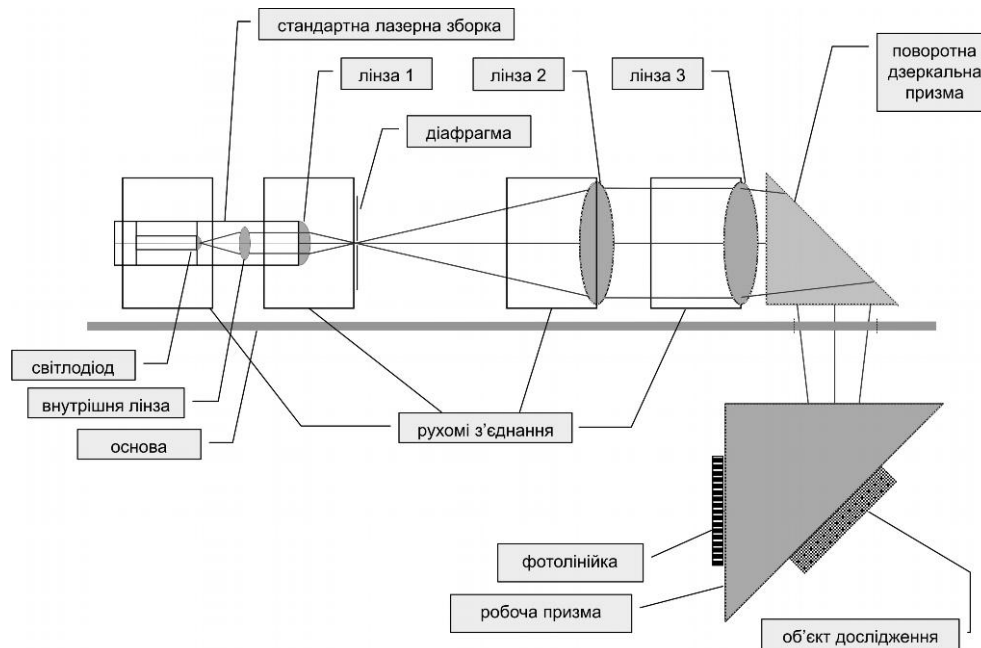


Рис. 12. Оптико-механічна схема призматичного сенсора дифузного відбивання світла.

Блок електроніки сенсора складається з генератора струму світлодіода (ГС), що керується генератором імпульсів (ГІ), 15-канальної схеми обробки сигналу (СОС), АЦП, рідкокристалічного цифрового індикатора (РКЦІ), схеми вибору каналів (СВК) з цифровим індикатором каналів (ЦІК) та блока живлення (рис. 13).

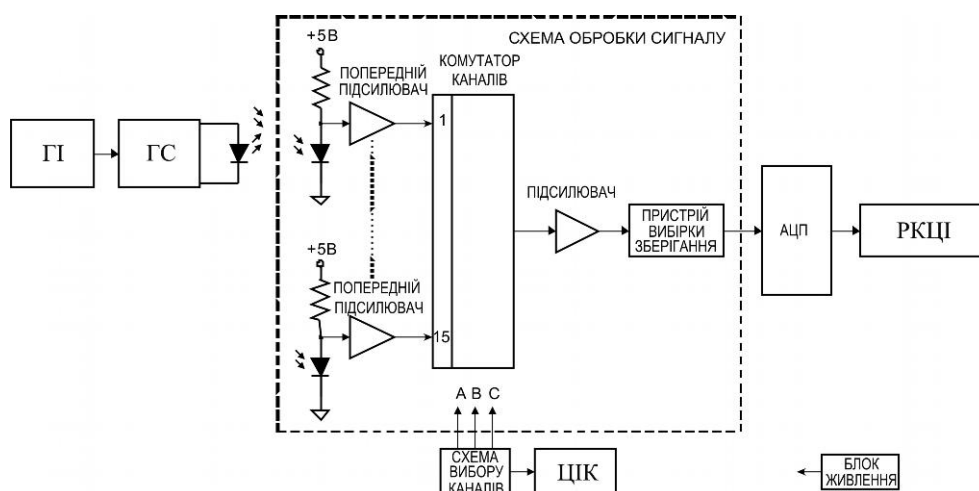


Рис. 13. Електрична блок-схема макета призматичного сенсора дифузного відбивання світла.

Конструктивно блок електроніки макета сенсора складається з модуля СОС та модуля блока управління (БУ). Модулі розміщені в окремих пластмасових корпусах, розміри яких 130×95×25 і 175×175×55 мм відповідно. В одному корпусі з СОС розташовано і оптичний блок сенсора.

У модулі БУ знаходяться плати ГС, ГД, СВК, ЦАП та блок живлення. На передню панель корпусу виведено кнопку ввімкнення/вимкнення живлення, МКЦ, кнопку вибору каналів та ЦК. Живлення та керуючі сигнали для СОС, а також імпульси струму для світлодіода виводять з корпусу за допомогою кабелів. У зібраному вигляді макет сенсора дифузного відбивання світла подано на рис. 14.

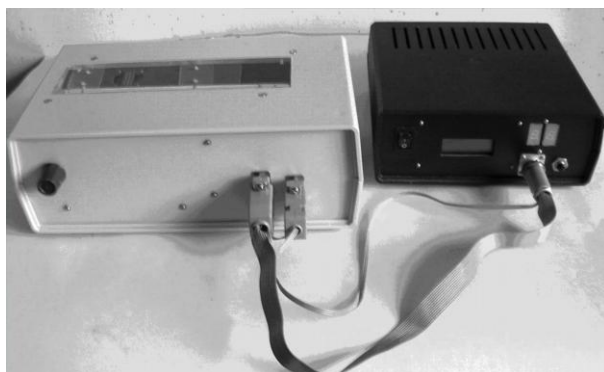


Рис. 14. Макет призматичного сенсора дифузного відбивання світла.

Лабораторні випробування оптичного сенсора. Досліджували макет призматичного сенсора дифузного відбивання світла з фотолінійкою, розміщеною у площині зондувального пучка. Лабораторні його випробування здійснювали за допомогою імітаторів металізованих захисних покривів. Імітували захисний покрив без дефектів, наносячи на активну ділянку робочої поверхні сенсора товстий шар порошку темно-сірого кольору FeSi (рис. 15а). Корозійні точки на захисному покриві (червоного кольору) імітували за допомогою частинок порошку міді (рис. 15б).

Лабораторні випробування охоплювали такі операції: 1) вимірювання сигналу (16 елементів фотолінійки) для чистої робочої поверхні; 2) вимірювання сигналу для порошку FeSi, що імітує металізований захисний покрив; 3) вимірюван-

ня сигналу для порошку міді низької концентрації; 4) вимірювання сигналу для порошку міді, покритого товстим шаром порошку FeSi.

Дані вимірювань підсумовано на рис. 16.

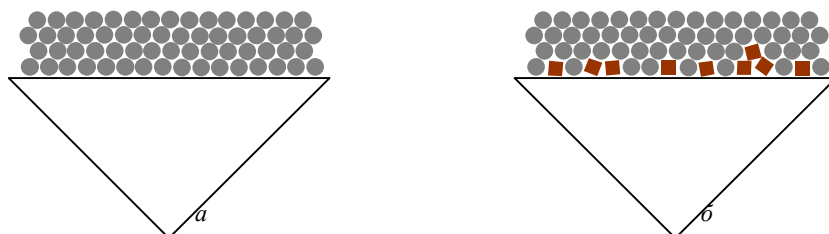


Рис. 15. Імітація захисного покриття без дефектів (а) та з корозійними точками (б) за допомогою металевих порошоків.

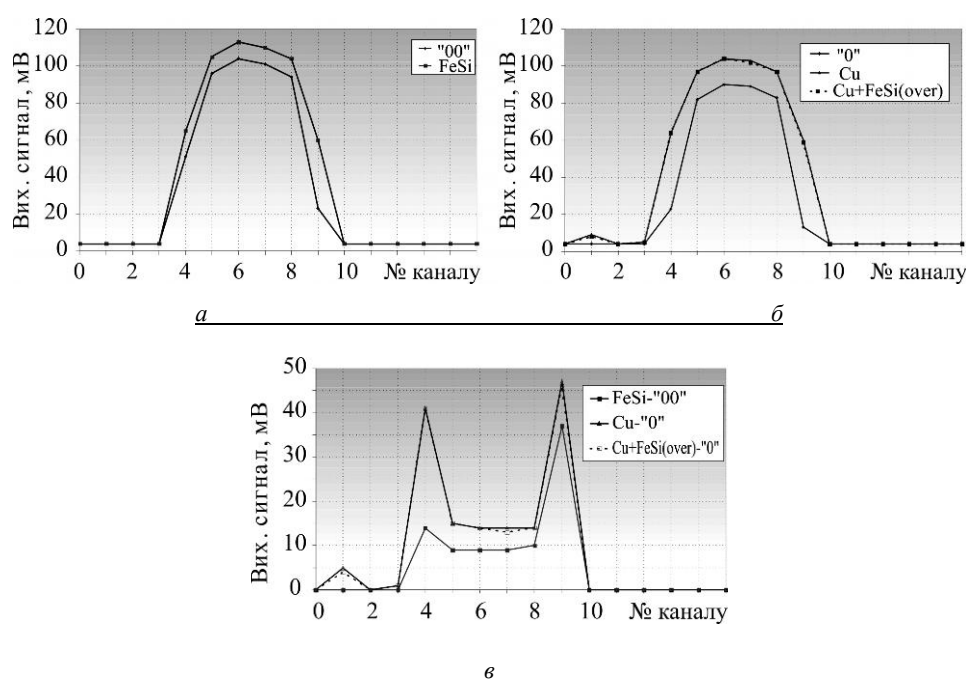


Рис. 16. Сигнал сенсора дифузного відбивання світла для: а – чистої поверхні ("00") та імітатора захисного покриття (FeSi); б – чистої поверхні ("0"), розрідженого порошку міді та імітатора захисного покриття з корозійними точками (Cu+FeSi); в – різницевий сигнал.

Як видно з рис. 16в, різницевий сигнал сенсора достатньо добре якісно узгоджується з результатами моделювання (див. рис. 10а).

ВИСНОВКИ

Розроблено діючий макет сенсора дифузного відбивання світла для аналізу характеристик пошкоджень (мікрodefektів) лакофарбових покриттів трубопроводів і конструкцій. Виконано лабораторні його випробування. Отримані результати випробувань відтворюють у першому наближенні результати моделювання. Для детальнішого аналізу одержаних характеристик сенсора необхідні складніші лабораторні дослідження, а також слід вдосконалити використану модель формування сигналу.

1. Джала Р. М., Івасів І. Б., Червінка Л. М. Моделювання сигналу призматичного сенсора дифузного відбивання світла для контролю лакофарбових покриттів трубопроводів і резервуарів // Зб. тез доп. Шостої міжнар. наук.-тех. конф. “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання”, Івано-Франківськ, 29 листопада–2 грудня 2011. – Івано-Франківськ: Вид-во НТУНГ, 2011. – С. 119–123.
2. Джала Р. М., Івасів І. Б., Ільницький Ю. В. Розроблення методу дифузного відбивання світла для контролю лакофарбових покриттів нафтогазопромислового обладнання // Зб. матеріалів доп. Сьомої міжнар. наук.-техн. конф. і виставки “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання”, Івано-Франківськ, 25–28 листопада 2014. – Івано-Франківськ: НТУНГ, 2014. – С. 22–25.
3. Івасів І. Б. Комп’ютерне моделювання сигналу компактного призматичного сенсора дифузного відбивання світла для аналізу характеристик аерозольних відкладень // Системи контролю навколишнього середовища. – Севастополь, 2011. – Вип. 16. – С. 84–90.
4. Івасів І. Б. Розподіл параметрів зондувального пучка на робочій поверхні компактного призматичного сенсора дифузного відбивання світла для аналізу характеристик аерозольних відкладень // Системи контролю навколишнього середовища. – Севастополь, 2010. – Вип. 14. – С.40–46.
5. Івасів І. Б. Формування сигналу компактного призматичного сенсора дифузного відбивання світла для контролю якості порошкових матеріалів і заготовок // Пр. XVI Міжнар. наук.-техн. конф. ЛЕОТЕСТ-2011 “Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів”, Славське Львівської обл., 21–26 лютого 2011 – Львів: Леотест-Медіум, 2011. – С.186–189.
6. Іванов А. П., Лойко В. А., Дик В. П. Распространение света в плотноупакованных дисперсных средах. – Минск: Наука и техника, 1988. – 192 с.
7. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 660 с.

Одержано 20.05.2015