

О. Чабан, В. Юзевич*

Державний науково-дослідний інститут метрології
вимірювальних і управляючих систем (ДНДІ "Система"),

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

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ, ОТРИМАНОЇ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ ІНФРАЧЕРВОНОГО ТА ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ПОРОШКОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ

О. Чабан О., Юзевич В., 2010

Запропоновано методику математичного моделювання інформації, отриманої при розсіюванні інфрачервоного та оптичного випромінювання поверхнею порошкового матеріалу, сформованого з паралельних циліндричних частинок.

The method of mathematical design of information, got at dispersion of infra-red and optical radiation the surface of powder-like material, formed from parallel cylindrical particles is offered.

Вступ

Для оцінювання розмірів частинок (дисперсного складу) на поверхні зразків порошкових матеріалів доцільно використовувати метод зондування електромагнітним випромінюванням інфрачервоного та оптичного діапазонів, оскільки такий метод неруйнівний і не вимагає великих фінансових вкладень.

Розглядаємо непрозорі порошкові матеріали, плоска поверхня яких заповнена циліндричними паралельними частинками одного розміру. Новизна проблематики в тому, що у цій праці для оцінювання якості інформації, отриманої при розсіянні інфрачервоного та оптичного випромінювання системами циліндричних частинок в діапазоні радіусів $R = [1; 20 \text{ мкм}]$, запропоновано використовувати коефіцієнт кореляції, коефіцієнт невідповідності та інші параметри, які характеризують окремі ділянки індикатриси розсіяння.

Зв'язок проблеми з практичними та науковими завданнями

У практичному плані проведені дослідження дають змогу розробити методику визначення розмірів частинок для поверхневої області порошкового матеріалу з використанням даних зондування випромінюванням інфрачервоного та оптичного діапазонів.

У науковому плані дослідження сприятимуть розробленню методики вибору оптимальної кількості параметрів, які характеризують якість інформації, отриманої при аналізі ділянок індикатриси розсіяння електромагнітного випромінювання від системи циліндричних частинок у діапазоні радіусів $R = [1; 20 \text{ мкм}]$.

Методика розрахунку інтенсивності відбитого випромінювання (інфрачервоного та оптичного діапазонів) від системи циліндричних частинок в діапазоні радіусів $R = [1; 20 \text{ мкм}]$ з урахуванням залежностей від довжини хвилі, розсіяння під різними кутами та змін комплексного показника заломлення поверхневих шарів матеріалу подана у працях [1–4].

Серед не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття, слід виділити наступне. Оптимізацію параметрів, що відповідають дисперсному складу, усередненим значенням інтенсивності випромінювання $S(a)$ для кількох ділянок індикатриси розсіювання (математичному сподіванню Δ_{R_s}), коефіцієнту кореляції, коефіцієнту невідповідності тощо і які можуть характеризувати якість інформації, отриманої при аналізі ділянок індикатриси розсіювання

інфрачервоного та оптичного випромінювання від систем циліндричних частинок в діапазоні радіусів $R = [1; 20 \text{ мкм}]$, раніше не проводили.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою статті було оптимізувати параметри (усереднені значення інтенсивності випромінювання $S(a)$ для кількох ділянок індикатриси розсіювання, значення коефіцієнта кореляції, коефіцієнта невідповідності тощо), що характеризують ділянки індикатриси розсіювання інфрачервоного та оптичного випромінювання від систем циліндричних частинок в діапазоні радіусів $R = [1; 20 \text{ мкм}]$ і пов'язати їх з показниками якості інформації про дисперсний склад порошкового матеріалу.

Основна частина

Якість пристроїв оптичного приладобудування оцінюється за допомогою їх оптичних характеристик за коефіцієнтом відбивання та індикатрисою розсіювання [4–6].

Нехай електромагнітне випромінювання, довжина хвилі якого λ , падає на систему безмежно довгих паралельних циліндрів під кутом a_0 (рис. 1). На цьому рисунку відображено один з діапазонів $a = [a_1; a_2]$, в якому розглядається інтенсивність відбитого випромінювання. Обмежуємось випадком, коли радіуси циліндрів цієї системи (набору) однакові і набувають значення R . Вводимо $q = p - a - a_0$ як кут розсіяних променів відносно продовження падаючого променя ($q_i = p - a_i - a_0$; у співвідношеннях теорії розсіювання фігурує кут q , який відраховують від напрямку розсіювання вперед) [5,6].

Уважаємо, що загальна кількість розсіювальних елементів на одиничній площі – N . Показник заломлення матеріалу циліндрів $\bar{n} = x - i \cdot k$ – комплексний показник заломлення речовини (x , k – реальна та уявна частина комплексного показника заломлення відповідно).

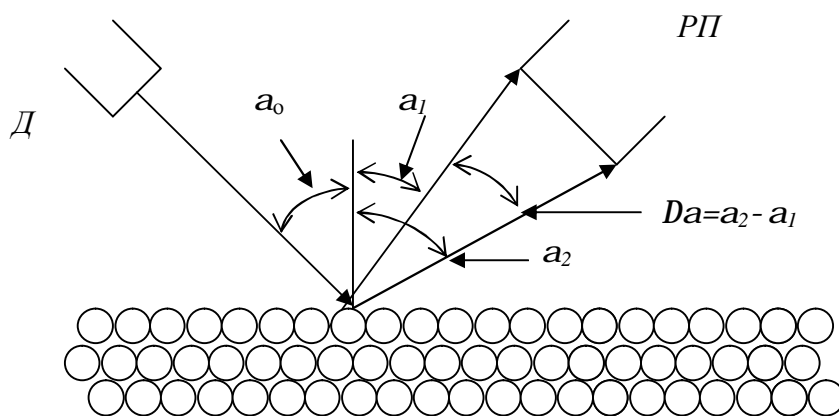


Рис. 1. Схема проходження випромінювання від джерела (Д) до реєструвального пристрою (РП) (фотолінійки)

Комплексне оцінювання якості інформації щодо дисперсного складу порошкових матеріалів можна розглядати як триетапний процес:

I етап – визначення переліку властивостей, які необхідно враховувати для побудови структурної схеми і плану експерименту; зокрема, вибір базового зразка, з індикатрисою якого порівнюємо індикатриси досліджуваних зразків з циліндричними паралельними частинками одного розміру;

II етап – оцінювання простих властивостей і нормування індикатриси розсіювання за кутами; особливістю методики є те, що індикатриса розсіювання нормована (безрозмірна) і приймається, що інтенсивність розсіювання вперед (тобто, при $q = 0$) дорівнює одиниці $S(q) = S(q=0) = 1$ [5];

III етап – оцінювання складних властивостей і якості отриманої інформації загалом.

Перший етап детально проаналізовано у працях [1–8].

На другому етапі визначення коефіцієнта розсіяння Q_{sca} та індикатриси розсіяння $S(\mathbf{a})$ за кутами для циліндричних частинок проводимо за допомогою відомих співвідношень [5]. Коефіцієнт розсіяння Q_{sca} (фактор ефективності розсіяння, безрозмірний параметр) зв'язаний з нормованою індикатрисою розсіяння $S(\mathbf{a})$ співвідношеннями [5]:

$$Q_{ext} = \frac{W_{ext}}{2RLI_i}; \quad Q_{sca} = \frac{W_{sca}}{2RLI_i}; \quad Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{sca}; \quad (1)$$

$$Q_{sca} = \int_0^p D_{11}(q) \sin(q) dq; \quad S(\mathbf{a}) = S(q) = \frac{2 \cdot D_{11}(q)}{\int_0^p D_{11}(q) \sin(q) dq}. \quad (2)$$

Тут $D_{11} = D_{11}(x \cdot i \cdot \mathbf{k}, 2\pi R/\lambda, q) = D_{11}(\bar{n}, r, q)$ – параметр матриці Стокса (діагональний елемент); $R, r = 2\pi R/\lambda$ – радіус поперечного перерізу (кола) і безрозмірний радіус частинки (циліндра); L – довжина циліндра (якщо $L \gg R$, то розглядають частину циліндра, тобто циліндр одиничної довжини); Q_{ext}, Q_{abs} – фактори ефективності екстинкції (екстинкція (*ext*) – характеризує сумарний ефект від розсіяння і поглинання) і поглинання (*abs*) світлової енергії відповідно (екстинкція – це зумовлене розсіянням і поглинанням зменшення інтенсивності електромагнітної хвилі при її проходженні через середовище з певним числом частинок); W_{ext}, W_{abs} – енергія електромагнітного поля екстинкції і поглинання, які відповідають циліндричній частинці; I_i – інтенсивність випромінювання, яке потрапляє на частинку з боку джерела (D) (енергія в розрахунку на одиницю площі перпендикулярно до напрямку поширення).

За допомогою матриці Стокса описують загальний випадок розсіяння і поглинання світлової енергії тілом довільної форми [5].

На третьому етапі підпрограма порівнює розраховану індикатрису розсіяння $S(\mathbf{a})$ з експериментальною залежністю інтенсивності випромінювання, зареєстрованою системою фотодіодів.

Для оцінювання якості матеріалу визначаємо розміри циліндричних частинок, аналізуючи частини індикатриси $S_j = S_j(\mathbf{a})$. Індекс “ j ” характеризуватиме кутовий діапазон $\mathbf{a}_j = [\mathbf{a}_1; \mathbf{a}_2]$.

Для аналізу та порівняння частин індикатриси $S_j = S_j(\mathbf{a})$ для циліндричних частинок у першому наближенні використовують коефіцієнт кореляції K_k та інші статистичні характеристики Δ_R, d_R, K_T [6]:

$$\Delta_R = \bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j; \quad \bar{S}_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_{1j}, \quad K_T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (S_j - \bar{S})^2} / \left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2} + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_{1j}^2} \right),$$

$$d_R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{S_j}{S_{1j}} - 1 \right)^2}, \quad K_k = \sum_{j=1}^n (S_j - \bar{S})(S_{1j} - \bar{S}_1) / \left(\sqrt{\sum_{j=1}^n (S_j - \bar{S})^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_{1j} - \bar{S}_1)^2} \right), \quad (3)$$

де n – задане число точок на графіку ($n=16$); $S_j = S_j(\mathbf{a})$ – інтенсивність відбитого випромінювання для зразка, розміри частинок якого порівнюють з базовим ($j = 1, 2, 3, \dots, n$; j – індекс, який відповідає конкретному значенню кута \mathbf{a}); $S_{1j} = S_{1j}(\mathbf{a})$ – інтенсивність відбитого випромінювання для еталонного (базового) набору частинок; Δ_R, Δ_{Rk} – середні значення інтенсивності випромінювання для заданих діапазонів кутів (зокрема, $\mathbf{a} = [\mathbf{a}_1; \mathbf{a}_2]$, $\mathbf{a} = [0; 15^\circ]$, $\mathbf{a} = [5; 20^\circ]$, $\mathbf{a} = [10; 25^\circ]$, $\mathbf{a} = [15; 30^\circ]$); d_R – нормоване математичне сподівання. У виразі для K_T (3) наявність знаменника характеризує нормування. При цьому завдяки нормуванню параметр K_T є безрозмірними. У ряді праць K_T називають коефіцієнтом невідповідності [9].

Розглянемо вплив поверхневих шарів на достовірність інформації щодо розмірів циліндричних частинок, визначених за даними діагностики поверхні напівпровідникового матеріалу інфрачервоним випромінюванням. Нехай реєструючий пристрій D (набір світлодіодів на

рис. 1) містить 16 каналів ($n=16$). При цьому початкові числові значення параметрів R , I , x , k , a_0 такі [1–3]:

$$R = 5 \text{ мкм}; I = 0,95 \text{ мкм}; x - ik = 4,5 - 6,7i; a_0 = 45^\circ, a = [45; 60^\circ]. \quad (4)$$

Як показали результати обчислювального експерименту, при визначенні параметрів, що характеризують дисперсний склад порошкового матеріалу з напівпровідників, слід використати інформацію про наявність у частинках тонкого поверхневого шару, в якому зосереджені зв'язані електричні заряди (диполі) і механічні напруження [10]. Для оцінювання впливу зв'язаних електричних зарядів на поверхневі взаємозв'язані оптичні, електричні і механічні поля враховуємо залишкові механічні напруження (напруження, що характеризують поверхневу енергію), оскільки прямий зв'язок між характеристиками поверхневого шару і функцією розподілу циліндричних частинок за розмірами у поверхневому шарі порошкового матеріалу експериментально встановити доволі важко.

На рис. 2 подано розраховані на основі методики праці [5] в умовних одиницях значення індикатриси розсіювання інфрачервоного випромінювання $S = S(a)$ для набору частинок, розміри яких R . При цьому $\bar{n}_{об} = x - ik = 4,27 - 6i$ відповідає об'ємному матеріалу, а $\bar{n}_{пов} = x - ik = 4,5 - 6,7i$ – поверхневому шару цього ж матеріалу [10]. Тут враховано поправки $\Delta x_s = 0,23$ і $\Delta k_s = 0,69$, які уточнюють вихідну інформацію для розшифрування результатів діагностики поверхні порошкового матеріалу.

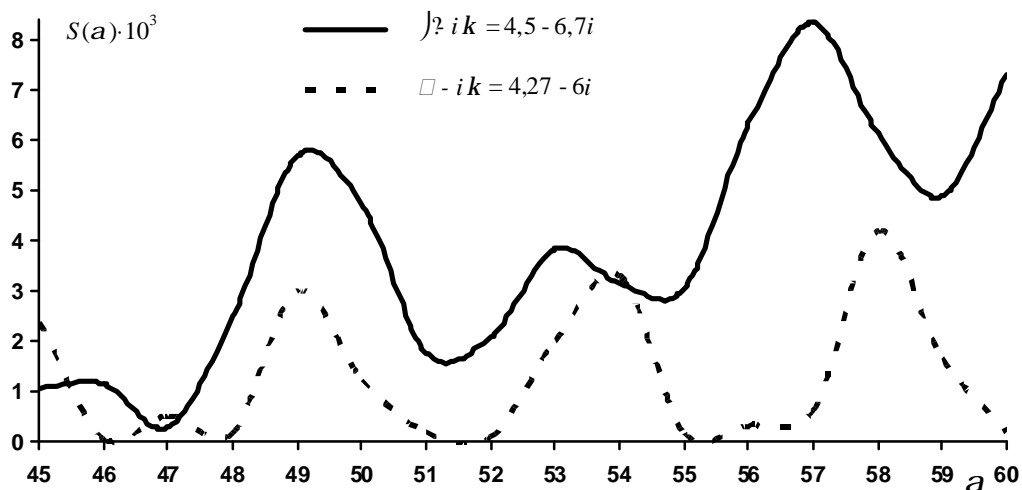


Рис. 2. Частина індикатриси розсіювання. Залежності $S(a)$ для двох типів даних; 1 – $x - ik = 4,5 - 6,7i$; 2 – $x - ik = 4,27 - 6i$; ($I = 0,95$ мкм; $R = 5$ мкм; $a_0 = 45^\circ$; $a = [45; 60^\circ]$)

Методика експериментальної реєстрації значень індикатриси розсіювання $S(a)$ і відповідний алгоритм числового розрахунку інших параметрів, які мають відношення до даної ситуації, наведені у працях [1–3, 5].

Коефіцієнт невідповідності між залежностями на рис. 2 становить $K_T = 0,263$.

Оскільки значення K_T достатньо істотне ($K_T = 0,263$), то відповідну поправку для показника заломлення речовини $Dx_s - iDk_s$ циліндричних частинок слід враховувати під час оцінювання якості процедури розшифрування відбитого від системи частинок зразка інфрачервоного випромінювання, тобто залежностей $S(a)$. Зокрема для даних, які відповідають рис. 2, поправка $Dx_s - iDk_s = 0,23 - 0,069i$ була врахована, і остаточні результати наведені для матеріалу поверхневого шару, для якого $x - ik = 4,5 - 6,7i$. Враховано також залежність показника заломлення $x - ik$ матеріалу від частоти зондувального випромінювання.

Оскільки слід враховувати можливість розміщення системи світлодіодів у конструктивному плані, розглянемо графічну залежність на рис. 3. На цьому рисунку для системи циліндричних

частинок зображено мінімум усередненої інтенсивності для заданого діапазону кутів $\Delta a = 4^\circ$. Тобто, якщо мінімум відповідає куту $a = 16^\circ$, то це означає, що на осі ординат відкладена сумарна інтенсивність для кутів $14^\circ, 15^\circ, 16^\circ, 17^\circ, 18^\circ$, поділена на 5 ($\Delta a = 18^\circ - 14^\circ = 4^\circ$).

Визначення параметрів базового зразка є дуже важливим етапом оцінювання якості інформації щодо дисперсного складу порошкового матеріалу. Зразок з певним значенням R_b , який буде базовим для заданої системи циліндричних частинок в діапазоні радіусів $R = [R_1; R_2]$ (з кроком $DR = 1$ мкм) для ряду кутових діапазонів a_{dn} ($a_0 = 30^\circ$; $a = [0; 15^\circ]$; $a = [5; 20^\circ]$; $a = [10; 25^\circ]$; $a = [15; 30^\circ]$;) вибираємо за допомогою критерію, який подано у праці співвідношенням [6]:

$$\Psi = \sqrt{(g_{\Delta slm})^2 + (g_{d slm})^2 + (g_{T slm})^2 + (g_{k slm})^2} \Rightarrow \max. \quad (5)$$

Тут порівняння параметрів Δ_R, d_R, K_T, K_k для зразків з різними радіусами частинок проводимо за допомогою співвідношень

$$g_{\Delta slm} = \frac{2(\Delta_{Rsl} - \Delta_{Rsm})}{\Delta_{Rsl} + \Delta_{Rsm}}; \quad g_{d slm} = \frac{2(d_{Rsl} - d_{Rsm})}{d_{Rsl} + d_{Rsm}}; \quad g_{T slm} = K_{Tslm}; \quad g_{k slm} = 1 - K_{k slm}. \quad (6)$$

($s = 1, 2, 3, 4$ – номер кутового діапазону c_s ; $m, l = 1, 2, \dots, 10$ – індекси, що відповідають радіусам частинок для $R = [R_1; R_2]$ ($\Delta R = 1$ мкм)). Оцінка показника K_T щодо дисперсного складу системи циліндричних частинок в діапазоні радіусів $R = [1; 20]$ мкм доволі важлива.

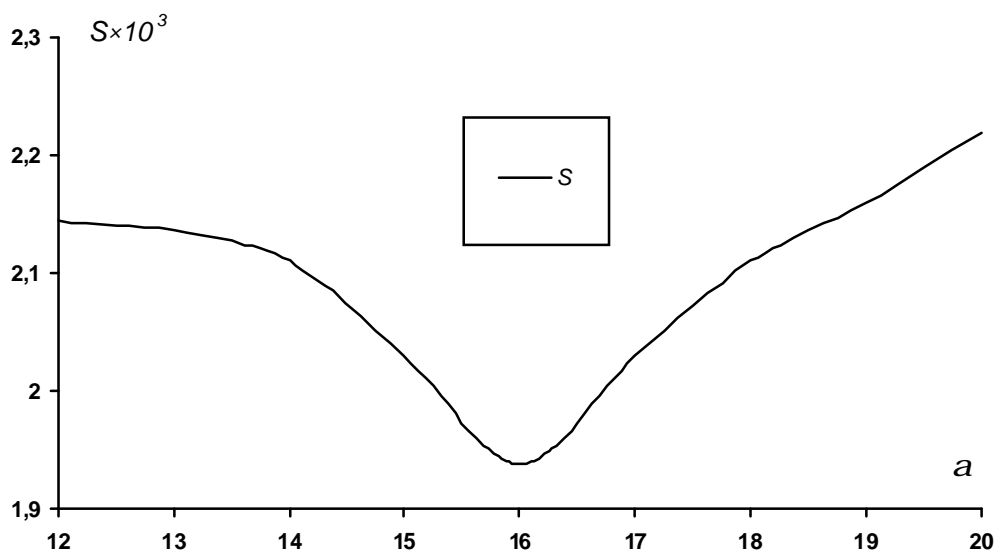


Рис. 3. Залежність між усередненою в діапазоні $\Delta a = 4^\circ$ інтенсивністю випромінювання $S = S(a)$, зареєстрованою системою фотодіодів, і кутом a розміщення фотодіода ($R = 5,0$ мкм; $a_0 = 45^\circ$) для діапазону $a = [12, 20^\circ]$.

Базовий зразок вважаємо умовним і представляємо у вигляді прямокутного паралелепіпеда, зовнішня поверхня якого має розміри $l \times l = 5 \times 5$ мм. Товщина зразка принципового значення не має. Для подальших розрахунків площинку, від якої реєструємо відбитий потік випромінювання (зокрема, для системи циліндричних частинок), подумки розбиваємо на одиничні елементи (циліндри), в яких висота h дорівнює діаметру $D = 2R$ ($h = 2R$).

Початковими елементарними частинками (циліндрами) вважаємо такі: висота – $h = 2R = 10$ мкм; $R = 5$ мкм. Якщо зовнішня площадка має розміри $l \times l = 5 \times 5$ мм, то на такій площадці буде $2,5 \cdot 10^5$ елементарних циліндрів. На основі обчислювального експерименту встановлено, що індикатриса розсіювання від наборів частинок з іншими розмірами (наприклад, $R = 2, 3, 4, 6, 7, 8, \dots, 20$ мкм) доцільно порівнювати саме з цим набором ($R = 5$ мкм). Якщо порівнювати індикатрису для частинок розмірами $R = 7$ мкм чи $R = 8$ мкм (базові набори, які відповідають середині інтервалу $R_i = 1 \div 20$ мкм) з індикатрисами частинок, розміри яких $R = 11$ мкм, $R = 12$ мкм, чи $R = 15$ мкм, то параметри Δ_R, K_k, K_T

мають менші значення, ніж у випадку порівняння індикатрис для базового набору з $R = 5$ мкм і досліджуваних наборів частинок з розмірами $R = 11$ мкм, $R = 12$ мкм чи $R = 15$ мкм.

Відповідні теоретичні співвідношення (1)–(6) можуть бути аналогом і основою для проведення експресних експериментальних досліджень та оцінки дисперсного складу порошкових матеріалів у процесі термооброблення (спікання), у результаті якого густина матеріалу і розміри частинок змінюються.

Для цього створено та досліджено особливості функціонування двох типів сенсорів дифузного відбивання широких неколімованих пучків світла (інфрачервоного випромінювання) поверхнями щільноупакованих полідисперсних середовищ [7,8]. Один із них (півциліндричний) має циліндричну робочу поверхню прозорої підкладки, крізь яку зондувальні промені потрапляють на поверхню досліджуваного середовища, та плоску реєструвальну поверхню, де розміщена фотодіодна лінійка. Сенсор сконструйовано так, щоб дзеркальна компонента відбитих променів зосереджувалася вздовж осі реєструвальної поверхні. Натомість дифузна компонента дає пляму світла поза цією віссю. Розподіл інтенсивності світла у “дифузній” плямі, що реєструється фотолінійкою, і є інформативним сигналом.

Другий сенсор має плоску робочу поверхню і може, на відміну від першого, визначати характеристики дифузного відбивання світла не тільки для насипних зразків, але й для спресованих. Відділення дзеркальної і дифузної компонент в ньому забезпечується за рахунок особливого фокусування широкого пучка світла.

Аналогічні дослідження на основі оптичного зондування можна проводити для оцінювання якості шорсткої (шершавої) поверхні відшліфованих деталей з металів, напівпровідників, діелектриків. Спектри диференціального розсіяння світла (частини індикатриси розсіяння) є аналогами функціональних мір якості поверхні. Позначимо R_d – радіус кривизни дефектів на поверхні досліджуваного зразка.

Для поверхонь із $R_d \gg l$ розсіяння світла проходить за законами геометричної оптики [5]. Елементи поверхонь такого типу можуть бути апроксимовані за допомогою малих гладких дзеркальних фасеток. При цьому інтенсивність розсіяного випромінювання S виражається так [11]:

$$\frac{1}{S_i} \left(\frac{dS}{dw} \right)_i = \frac{1 + m_x^2 + m_y^2}{4 \cos q_i} R_v \cdot P(m_x, m_y), \quad (7)$$

де S_i – інтенсивність розсіяного випромінювання від i -ї ділянки; $i = 1, 2, 3, \dots, n$; n – кількість елементів, на які розділено досліджувану поверхню; w – кругова частота; m_x, m_y – параметри, які характеризують нахили поверхні; q_i – сферична координата, яка відповідає i -й ділянці поверхні; R_v – коефіцієнт відбивання; $P(m_x, m_y)$ – функція розподілу ймовірності нахилів поверхні. Із розподілу розсіяного випромінювання за допомогою (7) можна визначити частотний розподіл профільного кута.

При $R_d \ll l$ шосткість розглядають як набір синусоїдальних фазових ґраток з різними амплітудами, довжинами хвиль і напрямками. Інтенсивність розсіяного випромінювання визначається спектральною густиною розсіяння просторової структури об'єкта [11]:

$$\frac{1}{S_i} \left(\frac{dS}{dw} \right)_i = 4k^4 \cdot \cos q_i \cdot \cos^2 q_{si} \cdot W(p, q) \cdot Q. \quad (8)$$

Тут $k = 2\pi/l$ – хвильове число; q_{si} – усереднене кутове значення, яке характеризує орієнтацію i -го елемента поверхні; Q – емпіричний параметр, який характеризує матеріал поверхневого шару і поляризацію випромінювання; $W(p, q)$ – спектральна густина з просторовими хвильовими числами p і q .

Спектральна густина W є функцією відхилення контура поверхні від середнього значення. Якщо середнє значення W відповідає площині xOy , а $z(x, y)$ характеризує відхилення від неї, то

$$W(p, q) = \frac{1}{A} \left| \frac{1}{2\pi} \int dx \int dy \exp\{i(px + qy)\} z(x, y) \right|^2, \quad (9)$$

де A – область (площа поверхні) освітлення [11].

Спосіб вимірювання параметрів шорсткості ґрунтується на дифракції, аналіз якої дає змогу отримати інформацію про об'єкт за допомогою просторово-модульованої світлової хвилі на ультразвуковому полі, в результаті чого просторово-кутовий спектр цього поля переноситься в просторово-кутовий спектр дифракційних порядків [12,13].

Коли шорстка поверхня освітлюється колімованим когерентним променем світла, відбитий світловий потік створює картину дифракції Фраунгофера у безмежності. Елементами, які відповідають акустооптичному аналізуючому пристрою, є дві лінзи, між якими розміщено акустооптичну комірку. Перша лінза формує в просторі акустооптичної комірки зображення розподілу інтенсивності розсіяного випромінювання від шорсткої поверхні, що еквівалентно спостереженню дифракції Фраунгофера у безмежності. В акустооптичному модуляторі за допомогою імпульсного генератора створюється рухомий акустичний імпульс заданої тривалості, заповнений несучою частотою. Проходячи через акустооптичний модулятор, світло дифрагує на акустичному імпульсі як на дифракційній ґратці, причому в кожний момент дифрагують лише ті ділянки розсіяного хвильового фронту, поруч з яким проходить акустичний імпульс. Продифраговане і непродифраговане світло фокусується другою лінзою. Інтенсивність розсіяного світла реєструється фотодетектором, встановленим на перший порядок дифракції. Непродифраговане світло в нульовому порядку затримується діафрагмою. Інтенсивність світла в дифракційних порядках пропорціональна квадрату інтеграла розподілу амплітуди світла на довжині акустичного імпульса. Сигнал, який реєструється фотоприймачем, визначається миттєвим значенням інтенсивності світла і являє собою сигнал розгортки рядка зображення розподілу інтенсивності розсіяного випромінювання від шорсткої поверхні.

Отже, у випадку гладких поверхонь за допомогою цього способу вимірювання [11–13] можна отримати інформацію про якість поверхні на основі методу порівняння. Важливо, що з урахуванням моментних характеристик вимірюного спектрального розподілу густини можливо визначити статистичні параметри шорсткості поверхні. Крім того, акустооптичний аналізуючий пристрій можна використати для тестування метрологічних характеристик півциліндричного рефлектометричного оптичного сенсора.

Висновки

Запропоновано методику математичного моделювання і на її основі отримано відповідні аналітичні співвідношення, за допомогою яких на конкретному прикладі оцінено вплив поверхневого шару на ділянку індикатриси розсіювання для системи паралельних циліндричних частинок порошкового матеріалу, тобто на значення інтенсивності відбитих від поверхні зразків променів, що реєструються чутливими приймачами випромінювання в заданому діапазоні кутів.

Встановлено, що статистичні характеристики індикатрис розсіювання відбитого від порошкових матеріалів електромагнітного випромінювання Δ_R , d_R , K_T , K_k , дають змогу оцінити якість інформації щодо дисперсного складу порошкового матеріалу і вибрати оптимальний базовий зразок за результатами обчислювального експерименту.

Визначено кут $\alpha = 16^\circ$, для якого значення інтенсивності відбитого випромінювання екстремальне (мінімальне) (при цьому розглядається система циліндричних частинок з напівпровідникового матеріалу одного розміру $R = 5,0$ мкм при $\alpha_0 = 45^\circ$, $\Delta\alpha = 4^\circ$). Для того, щоб отримати більш значуще (інформативніше, якісніше) значення параметрів Δ_R , d_R , K_k і K_T , слід віддалятися від області мінімуму ($\alpha = 16^\circ$) праворуч або ліворуч, тобто оптимізувати ширину і розміщення кутового діапазону, враховуючи при цьому конструктивні можливості розміщення світлодіодів.

Зазначено, що за допомогою акустооптичного аналізуючого пристрою можна оцінити якість відшліфованої поверхні деталі, а також визначити статистичні параметри нерівностей. Крім того, акустооптичний аналізуючий пристрій може входити до переліку приладів екологічної лабораторії і використовуватись для тестування метрологічних характеристик півциліндричного рефлектометричного оптичного сенсора.

1. Сопрунюк П.М., Юзевич В.М., Чабан О. П. Оцінювання якості сигналу, відбитого від системи частинок порошкового матеріалу // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Неруйнівний контроль та технічна діагностика матеріалів і конструкцій: Зб. наук. праць.* – Львів: ФМІ НАН України, 2007. – Вип. 12. – С. 255–261. 2. Сопрунюк П.М., Юзевич В.М., Івасів І.Б. Оцінення інтенсивності оптичного випромінювання, відбитого від системи циліндричних частинок // *Відбір і обробка інформації.* – 2007. – Вип. № 26 (102). – С. 58–64. 3. Сопрунюк П.М., Юзевич В.М., Підгірняк Я.Є. Методи оцінки зміни оптичних констант на поверхневих неоднорідностях частинок порошкових матеріалів // *Відбір і обробка інформації.* – 2005. – Вип. № 99. – С. 5–10. 4. Топорец А.С. *Оптика шереховатой поверхности.* – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1988. – 191 с. 5. Борен К., Хафмен Д. *Поглощение и рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ.* – М.: Мир, 1986. – 660 с. 6. Юзевич В., Чабан О. Показники якості інформації базового зразка для порошкових матеріалів // *Метрологія та прилади.* – 2009. – № 1. – С. 22–26. 7. Сопрунюк П.М., Івасів І.Б., Семенюк О.М. Рефлектометричний сенсор для оцінки дисперсного складу порошків // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Збірник наукових праць.* – Хмельницький: 2002. – С.15–18. 8. Сопрунюк П.М., Івасів І.Б., Семенюк О.М., Червінка Л.Є., Червінка О.О. Оптимізація параметрів півциліндричного рефлектометричного оптичного сенсора аналізатора дисперсного складу порошкових матеріалів // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* – 2004. – № 2. – С. 26–30. 9. Грабовецький Б. Є. *Економічне прогнозування та планування: Навч. посібник.* – К.: Центр навчальної літератури, 2003. – 188 с. 10. Сопрунюк П., Юзевич В. Моделювання поверхневих ефектів при взаємодії оптичного випромінювання з порошковими матеріалами // *Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології: Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка".* – 2006. – № 565. – С. 117–125. 11. Church E. L. *The measurement of surface texture and topography by differential light scattering* // *Wear.* – 1978. – V. 57. – P. 93–106. 12. Балакиши В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Физические основы акустооптики.* – М.: Радио и связь, 1985. – 280 с. 13. А. С. № 1458703 (СССР). *Способ контроля шереховатости поверхности изделия / В.Е. Загребельный, В.И. Телешевский.* *Опубл. в Б. И. № 6.* – 15.02.89.