УДК 681.7: 616-71

Н.І. Заболотна
Б.В. Вишневський

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ ОПТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНІ МАТЕРІАЛІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті проведено аналіз відомих методів та інформаційно-вимірювальних систем для дистанційного контролю якості поверхонь матеріалів. Розглянуто основні типи мікродефектів, а саме такі як тріщини, пори та сколи, які виникають у процесі виготовлення. Наведено характеристику порівняння інтерференційних, голографічних і поляриметричних методів дефектоскопії. Обґрунтовано перспективу використання матричного методу Мюллера з поєднанням цифрової оброблення зображень для автоматизованого виявлення структурних неоднорідностей матеріалів на початкових стадіях руйнування.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, матриця Мюллера, поляризаційно-фазовий контроль, дефектоскопія поверхонь, лазерна поляриметрія, аналіз зображень.

Abstract

This article analyzes known methods and information-measuring systems for remote quality control of material surfaces. It examines the main types of microdefects, namely cracks, pores, and chips, that arise during the manufacturing process. A comparative analysis of interferometric, holographic, and polarimetric defect detection methods is presented. The potential for using the Müller matrix method in combination with digital image processing for the automated detection of structural inhomogeneities in materials at the initial stages of failure is substantiated.

Keywords: information and measurement system, Mueller matrix, polarization-phase control, surface defect detection, laser polarimetry, image analysis.

Вступ

Актуальною є задача побудови інформаційно-вимірювальної системи для швидкого та якісного моніторингу стану поверхні матеріалів із визначенням можливих мікродефектів. Типовими дефектами поверхні матеріалів є тріщини, сколи, залишки механічної обробки, пори. Завдяки оптичним та лазерним методам контролю можливо проводити діагностику дистанційно, що є дуже важливим для виробничих ліній, у яких потрібна висока швидкість випуску продукції. Особлива увага приділяється оптичним методам контролю якості поверхонь, як безконтактним методам із високою чутливістю до дефектів [1–3].

Метою даної роботи є аналіз відомих методів і систем оптичного контролю мікродефектів матеріалів, можливості застосування в них технологій інтелектуалізації отриманих даних.

Порівняльний аналіз методів контролю якості поверхонь

До найбільш перспективних методів контролю якості поверхонь належать безконтактні оптичні та поляризаційно-фазові методи. Їх переваги порівняно із іншими методами наведено у таблиці 1.1. Серед безконтактних оптичних та лазерних методів контролю мікродефектів матеріалів виділяють: інтерферометричні методи; голографічні методи; лазерні оптичні методи (проілометрія) та ін.

Метод інтерефероментрії базується на явищі суперпозиції, тобто накладанні двох когерентних світлових хвиль: об'єктної, що відбилася від поверхні, та опорної. Результатом дії є інтерференційна картина, в якій чергуються світлі та темні смуги [2].

Голографія – це метод запису та відновлення хвильового фронту. На відміну від звичайної фотографії, голограма фіксує амплітуду та фазу світла. Принципом дії є порівнювання двох голограм об'єкта, у початковому стані та після певного впливу, наприклад нагріву або тиску. Це дозволяє побачити мікродеформації поверхні в реальному часі [4].

Оптична та лазерна профілометрія є сучасною альтернативою механічному щупу. Лазерний

промінь сканує поверхню, а відповідно система фіксує відхилення променя [5].

Лазерне сканування, як метод, схожий на профілометрію, але він орієнтований на швидке отримання хмари точок великих об'єктів. Лазерний сканер вимірює час прольоту променю до об'єкта і відповідно назад [6].

Лазерна поляриметрія є ключовим методом для даної роботи. Цей метод базується на аналізі зміни стану поляризації лазерного випромінювання після взаємодії з поверхнею

В таблиці 1 наведено характеристики методів контролю якості поверхонь із розглядом таких ознак для порівняння як: параметр контролю, тип впливу, швидкість методу, інформативність методу, чутливість до мікродефектів.

Таблиця 1.1. Порівняльна характеристика методів контролю якості поверхонь

Параметр контролю	Тип впливу	Швидкість	Інформативність	Чутливість до мікродефектів	Використані джерела
Контактні методи	Контактний	Низька	Геометрія	Середня	[1]
Оптичні методи (базові)	Безконтактний	Середня	Геометрія/Колір	Низька	[2]
Поляризаційно-фазові методи	Безконтактний	Висока	Геометрія, структура, напруження	Висока	[3]

За параметрами точності оптичного контролю поверхні матеріалів та інформативності перевагу мають методи лазерної поляриметрії із цифровою обробкою та аналізом зображень. В роботі застосовується мюллер-матрична поляриметрія для визначення оптико-анізотропних характеристик досліджуваних зразків матеріалів. Інформаційно-вимірювальна система для її реалізації містить вимірювальний канал, побудований на основі фіксації лазерного поля випромінювання, відбитого від поверхні матеріалів, у відповідності до феноменологічного методу вимірювання.

Матриця Мюллера складається із 16 мюллер-матричних зображень і формується на основі 24 виміряних поляризаційно відфільтрованих інтенсивностей зображень досліджуваного зразка. Відомі інформаційно-вимірювальні системи на основі мюллер-поляриметрії включають у свою архітектуру програмне забезпечення комп'ютера, яке реалізує обробку та аналіз матриць Мюллера.

В даній роботі пропонується розширення функціональних можливостей таких інформаційно-вимірювальних системах шляхом проведення вимірювання на двох довжинах лазерного випромінювання з їх комп'ютерним аналізом для диференціації отриманих дефектів.

Висновки

В даній роботі обґрунтовано, що для високоточної дефектоскопії поверхонь матеріалів найкращим оптимальним рішенням є поєднання таких методів як лазерна поляриметрія та матричний аналіз Мюллера. Реалізація їх в структурі відповідної інформаційно-вимірювальної системи, доповненої інтелектуалізованим аналізом даних, та при проведенні дослідження на двох довжинах хвиль дозволять підвищити точність контролю дефектів поверхонь матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mueller H. The Foundations of Optics / H. Mueller // Journal of the Optical Society of America. – 1948. – Vol. 38, Issue 1. – P. 661-663.
2. Ушенко О. Г. Лазерна поляриметрія біологічних та шорстких поверхонь / О. Г. Ушенко. – Чернівці: ЧНУ, 2007. – 254 с.
3. Goldstein D. H. Polarized Light. — 3rd ed. — New York: CRC Press, 2011. — 726 p.
4. Zabolotna N. I. Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies / N. I. Zabolotna, V. V. Sholota, H. H. Okarskyi // Proc. SPIE. – 2020. – Vol. 11369. – 113691S.
5. Modern polarimetry of biological tissues / J. Vizet et al. – 2021. – Vol. 11. – 88515. URL: https://www.nature.com/articles/s41598-021-88515-x (дата звернення: 16.03.2026).
6. Schematic diagram of the scanning laser polarimeter. URL: https://www.researchgate.net/figure/fig1_8004263 (дата звернення: 16.03.2026).
7. Modern polarimetry of biological tissues / J. Vizet et al. – 2021. – Vol. 11. – 88515. URL: https://www.nature.com/articles/s41598-021-88515-x (дата звернення: 16.03.2026).

Заболотна Наталія Іванівна **–** професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, E-mail: natalia.zabolotna@gmail.com

Вишневський Богдан Вікторович — студент групи КОІС-22б факультету інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, E-mail: bgdnvsnvskij14@gmail.com

Zabolotna Nataliia I. - Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, E-mail: natalia.zabolotna@gmail.com

Vyshnevskyi Bohdan V. **–** student of Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, E-mail: bgdnvsnvskij14@gmail.com