

УДК. 535.361

DOI: 10.31388/2078-0877-2020-20-4-186-193

ОПТИЧНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ

Дьоміна Н. А., к.т.н., доцент ORCID 0000-0002-1118-1834
Морозов М. В., к.ф-м.н., доцент ORCID 0000-0002-5122-8449
Назарова О. П., к.т.н., доцент ORCID 0000-0003-0636-4748
Халанчук Л. В., асистент ORCID 0000-0002-6055-6233
Солодов В. В., інженер ORCID 0000-0002-6697-2772
*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра
Моторного*
E-mail: larysa.khalanchuk@tsatu.edu.ua

Постановка проблеми. При розробці сучасних технологій виробництва сільськогосподарських машин важливе місце мають безконтактні методи експрес контролю параметрів шорсткості поверхні відповідальних деталей. Різноманітні оптичні методи вимірювання шорсткості поверхні використовують властивості відбитої хвилі. При освітленні дифузно відбиваючої поверхні когерентним лазерним випромінюванням утворюється спекл-структура. Дослідження параметрів спекл-структури та розробка оптичних методів вимірювання шорсткості поверхні є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень. У роботі [1] представлено огляд сучасних оптичних методів вимірювання шорсткості поверхні та їх застосування в техніці. Застосування спекл-інтерферометрії для визначення шорсткості прозорих транспарантів приведено у роботах [2, 3]. Цей метод базується на визначенні кількості сингулярностей хвильового фронту. Представляє значний інтерес модернізація та застосування цього метода для визначення шорсткості непрозорих дифузно відбиваючих об'єктів. В роботах [4-8] розглянуто модель формування спекл-структури та дослідження параметрів спекл-поля. Отримані значення розмірів окремих спеклів світлового поля, які не залежать від параметрів шорсткості поверхні. В роботах [9-12] досліджено сингулярності (невизначеності) фази хвильового фронту та застосування спіральних зондуючих пучків для вимірювання шорсткості поверхні та дефектоскопії і контролю відповідальних деталей. В статті [13] розглянуто спекл-еліпсометрія шорстких поверхонь з використанням комп'ютерних методів аналізу зображень. Особливості відбиття когерентного світла від дифракційних ґраток і

можливості застосування параметрів відбитої хвилі для вимірювання шорсткості поверхні приведено в праці [14].

Формулювання цілей статті – провести аналіз утворення спекл-структури хвильового поля при відбитті лазерного когерентного випромінювання від шорсткої поверхні та оптичних методів вимірювання параметрів шорсткості, в яких використовують визначення кількості сингулярностей хвильового фронту.

Основні матеріали дослідження. Сучасні технології виробництва сільськогосподарських машин потребують розробки безконтактних методів експрес вимірювань шорсткості поверхні відповідальних деталей. Найбільш перспективними та поширеними є оптичні методи, в яких використовують спекл-структуру відбитого когерентного випромінювання. У першому наближенні амплітуда окремого спекла у просторі реєстрації дорівнює:

$$a = \sum_{n=1}^N a_n \cdot e^{i(\varphi_n + \omega t - \vec{k}_n \cdot \vec{r})} = b + i \cdot c \quad (1)$$

$$\text{де } b = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \cos \varphi_n, \quad c = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \sin \varphi_n$$

N – кількість фазорів (джерел вторинних сферичних хвиль).

Для визначення кількості дислокацій (сингулярностей), тобто невизначеності фази хвильового фронту, коли одночасно обертаються в нуль дійсна b та уявна c частини амплітуди, використовується метод Монте-Карло моделювання випадкових процесів статистичної оптики. Умова гвинтової дислокації (невизначеності) хвильового фронту спекл-поля для фази має вигляд:

$$\varphi = \arctg \frac{c}{b} = \arctg \frac{0}{0} \quad (2)$$

Тобто виконується умова:

$$s = |b| + |c| = 0 \quad (3)$$

Щільність ймовірності для суми модулів дійсної $|b|$ та уявної $|c|$ частин амплітуди $s = |b| + |c|$ дорівнює:

$$\rho(s) = \frac{8}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{s^2}{2}} \cdot \phi(s) \quad (4)$$

де $\phi(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^s e^{-\frac{z^2}{2}} \cdot dz$ – функція Лапласа.

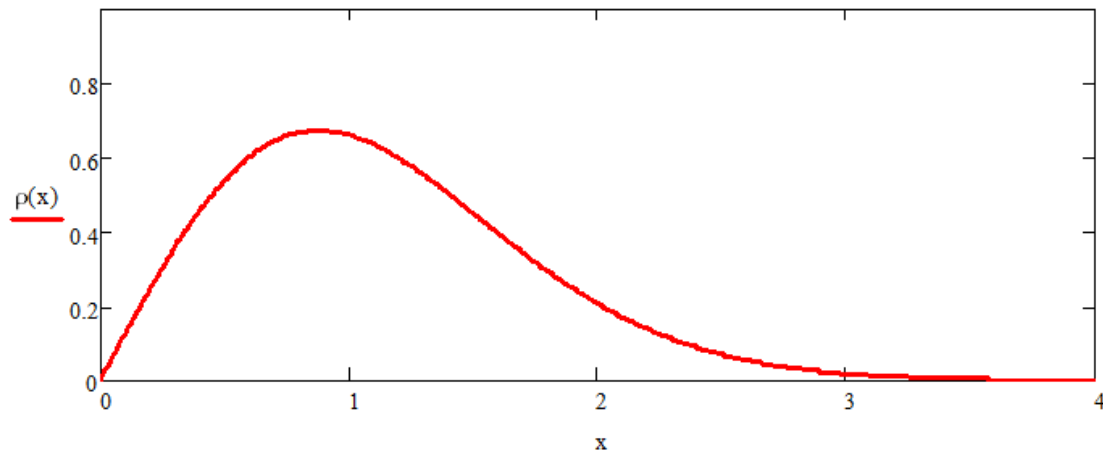


Рис. 1. Щільність ймовірності для суми модулів дійсної та уявної частин амплітуди

Тоді кількість сингулярностей $S1$, для яких випадкова умова $s = |b| + |c| < \Delta = 0,01$ дорівнює

$$S1 = W_1 \cdot N \quad (5)$$

де $W_1 = \int_0^{0,01} \varphi(s) ds$ – ймовірність знаходження суми S в інтервалі $[0; 0,01]$; N – загальна кількість фазорів.

Розглянемо залежність кількості фазорів N від параметрів шорсткості поверхні – висоти R_a виступів та середньої відстані h між ними (просторовою частотою). У першому наближенні у одновимірному випадку кількість фазорів (вторинних когерентних джерел) дорівнює числу зон Френеля на базовій довжині L . Середні значення висоти виступів дорівнюють $Z_m = R_z$, відстань між виступами $h = 2l$. Для випадку нормального освітлення та спостереження кількість фазорів (зон Френеля) для одного виступу дорівнює:

$$n_1 = 4z_m / \lambda \quad (6)$$

Середнє число виступів на базовій довжині L для однорідного випадку дорівнює:

$$n_2 = L / (2l) \quad (7)$$

Визначаємо кількість фазорів у випадку 1D моделі:

$$N_1 = n_1 \cdot n_2 = \frac{2z_m \cdot L}{\lambda \cdot l} \quad (8)$$

Якщо діаметр освітлюючого лазерного променя $D=2R$, кількість фазорів для $2D$ випадку буде:

$$N_2 = \frac{4z_m}{\lambda} \cdot \frac{R^2}{l^2} \quad (9)$$

Таким чином кількість сингулярностей дорівнює:

$$S1 = W_1 \cdot N_2 = W_1 \cdot \frac{4z_m}{\lambda} \cdot \frac{R^2}{l^2} \quad (10)$$

Визначивши кількість дислокацій можливо визначити параметри шорсткої поверхні Z_m та l . Дислокації фази поверхні хвильового фронту при відбитті когерентного лазерного випромінювання від шорсткої поверхні є виключно фазовим ефектом. Тому експериментально зареєструвати сингулярності можливо тільки інтерференційними методами. На рис. 2 представлена оптична схема візуалізації гвинтових дислокацій хвильового фронту.

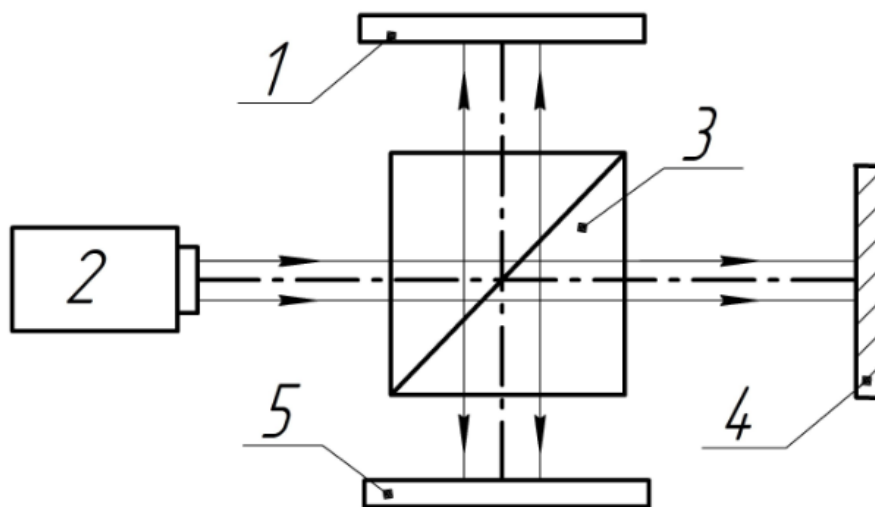


Рис. 2. Оптична схема візуалізації дислокацій (сингулярностей) спекл-структури відбитої хвилі: 1 – зразок, що досліджується; 2 – джерело когерентного випромінювання (лазер ЛГН-222); 3 – світлоподільник; 4 – дзеркало; 5 – реєструюча камера.

У площині 5 реєстрації інтерференції двох хвиль, відбитих від шорсткої поверхні 1 та дзеркальної поверхні 4, спостерігається подвоєння інтерференційних смуг. Визначивши кількість сингулярностей на одиницю площини спекл-поля, вимірюють параметри шорсткості поверхні. Використання аналізатора

зображення та відповідної програми забезпечує автоматизацію процесу вимірювання параметрів шорсткої поверхні.

Для визначення шорсткості досліджуваної поверхні деталі використовують зразки з відомою шорсткістю. Для цих зразків визначають кількість сингулярностей на одиницю площі поверхні за допомогою оптичної схеми візуалізації (рис. 2) та порівнюють з кількістю $S1$ сингулярностей для досліджуваної поверхні.

Висновки. Досліджено відбиття когерентного лазерного випромінювання від шорсткої поверхні та утворення спекл-структури. Розроблено метод вимірювання шорсткості поверхні, в якому використовують визначення кількості сингулярностей спекл-структури відбитого світла та зразки поверхні з відомою шорсткістю.

Список використаних джерел:

1. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов / Ю. Ф. Назаров и др. *Физическая инженерия поверхности*. 2007. Т. 5, № 3-4. С. 207–216.

2. Налимов А. Г., Котляров В. В., Скиданов Р. В. Определение шероховатости поверхности с помощью поля направлений. 2003. С. 71-73. URL: <http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO25/KO25113.pdf> (дата звернення: 13.09.2020).

3. Макеев А. В. Об оптических методах контроля шероховатости поверхности. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2016. Т. 5, № 1. С. 147-151.

4. Гудмен Дж. Статистическая оптика. Москва: Мир, 1980. 528 с.

5. Реконструкция изображения по пространственному распределению интенсивности дифракционного спекл-модулированного поля / Б. Б. Горбатенко и др. *Компьютерная оптика*. 2007. Т. 31, № 2. С. 26-33.

6. Морозов М. В. Дослідження спекл-структури методом моделювання. *Вісник Київського університету. Сер. Фізико-математичні науки*. 2004. Вип. 3. С. 401-406.

7. Морозов М. В. Дослідження сингулярностей хвильового фронту когерентного випромінювання при відбитті від шорсткої поверхні. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2014. Вип. 4, т. 2. С. 40-44.

8. Лазерная дистанционная спекл-интерферометрия. Модель формирования спекл-структуры / Н. П. Бадалян и др. *Квантовая электроника*. 2008. № 5 (38). С. 477-481.

9. Павлов П. В., Вольф И. Э., Бородин А. Н. Спекл-диагностика с использованием спиральных и сингулярных зондирующих пучков. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук: Физика и электроника*. 2009. Т. 11, № 3. С. 53-56.

10. Павлов П. В., Малов А. Н., Петров Н. В. Оценка технического состояния поверхностей деталей воздушного судна методом спекл-структур оптического излучения при зондировании спиральными лазерными пучками. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук: Механика и машиностроение*. 2012. Т. 14, № 4(2). С. 663-668.

11. Применение спиральных пучков для дефектоскопии и неразрушающего контроля / А. Н. Малов и др. *Доклады ТУСУРа*. 2010. № 2 (22), ч. 2. С. 70-74.

12. Малов А. Н., Павлов П. В. Определение параметров шероховатости поверхностей оптически непрозрачных деталей методом спекл-структур с применением спиральных пучков. *Компьютерная оптика*. 2012. Т. 36, № 3. С. 365-370.

13. Макеев А. В., Айрапетян В. С. Спекл-эллипсометрия шероховатых поверхностей с применением вейвлет-анализа. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2017. Т. 5, № 2. С. 41-45.

14. Дьоміна Н. А., Морозов М. В., Солодов В. В., Халанчук Л. В. Відбиття світла від дифракційної ґратки з трикутним профілем. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. Машинознавство та САПР*. 2020. № 1. С. 28-32.

ОПТИЧНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ

Дьоміна Н., Морозов М., Назарова О., Халанчук Л., Солодов В.

Анотація

Проведено аналіз методів вимірювання параметрів шорсткості поверхні, в яких використовують характеристики відбитої оптичної хвилі, розроблено спосіб визначення шорсткості на базі аналізу спекл-структури та вимірювання кількості сингулярностей хвильового фронту при освітленні і спостереженні поверхні, що досліджується, та застосування зразків з відомою шорсткістю. В роботі розглянуто утворення та досліджено параметри спекл-полів при відбитті когерентного лазерного випромінювання від шорсткої поверхні. Застосовано методи статистичної оптики та метод Монте-Карло моделювання випадкових процесів. Отримано закон розподілу щільності ймовірності для суми модулів дійсної та уявної частин амплітуди окремого спекла поля. Розроблено алгоритм визначення кількості сингулярностей на одиницю площини поверхні спекл-поля. Обрано критерій сингулярності та розроблено метод визначення їх кількості в залежності від параметрів шорсткості поверхні для випадку нормального освітлення та спостереження. Кількість сингулярностей хвильового фронту визначається параметрами шорсткості поверхні: амплітудою та просторовою частотою виступів.

Ключові слова : дифузно відбиваюча поверхня, шорсткість, спекл структура, сингулярність хвильового фронту.

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Демина Н. , Морозов Н., Назарова О., Халанчук Л., Солодов В.

Аннотация

Проведен анализ методов измерения параметров шероховатости поверхности, в которых используются характеристики отраженной оптической волны, разработан способ определения шероховатости на базе анализа спекл-структуры и измерения количества сингулярности (дислокаций) волнового фронта и применения образцов с известной шероховатостью. В современных технологиях производства важное место имеют бесконтактные оптические методы измерения шероховатости. В работе рассмотрены возникновение и исследованы параметры спекл-полей при отражении когерентного лазерного излучения от шероховатой поверхности. Шероховатая поверхность исследуемого образца рассматривается как множество точечных когерентных источников (фазоров) с примерно одинаковой амплитудой излучения и случайной фазой (равномерное распределение значений фазы от 0 до 2π). Применены методы статистической оптики и метод Монте-Карло моделирования случайных процессов. Получен закон распределения плотности вероятности для суммы модулей действительной и мнимой частей амплитуды отдельного спекла поля. Используя условие получения сингулярности волнового фронта спекл-структуры, разработан алгоритм определения количества сингулярности на единицу площади поверхности спекл-поля. Условие получения сингулярности (неопределенности) фазы выполняется в случае, когда одновременно действительная и мнимая части комплексной амплитуды равны 0. Выбран критерий сингулярности и разработан метод определения их количества в зависимости от шероховатости поверхности (высоты выступлений и расстояния между ними) для случая нормального освещения и наблюдения. Количество сингулярности волнового фронта определяется параметрами шероховатости поверхности: амплитудой и пространственной частотой выступлений. Предложенная оптическая схема визуализации и определения количества сингулярности (дислокаций) волнового фронта и измерения шероховатости поверхности. Таким образом, определив количество сингулярности спекл-структуры, измеряют шероховатость диффузно отражающей поверхности.

Ключевые слова : диффузно отражающая поверхность, шероховатость, спекл структура, сингулярность волнового фронта.

OPTICAL METHODS FOR MEASURING SURFACE ROUGHNESS

N. Domina, M. Morozov, O. Nazarova, L. Khalanchuk, V. Solodov

Summary

The analysis of methods of measurement of parameters of surface roughness in which characteristics of the reflected optical wave are used is carried out, the method of definition of roughness on the basis of the analysis of speckle structure and measurement of quantity of singularities of a wave front at illumination and supervision of the investigated surface and application of samples. In modern production technologies, non-contact optical methods of radiation of roughness parameters play an important role. The formation and parameters of speckle fields in the reflection of coherent laser radiation from a rough surface are considered in the work. The rough surface of the sample under study is considered as a set of point coherent sources

(phasors) with approximately the same radiation amplitude and random phase (uniform distribution of phase values from 0 to 2π). The methods of statistical optics and the Monte Carlo method of modeling random processes are applied. The law of probability density distribution for the sum of modules of real and imaginary parts of amplitude of separate sintered field is obtained. Using the condition of obtaining the singularity of the wave front of the speckle structure, an algorithm for determining the number of singularities per unit plane of the speckle field surface was developed. The condition of obtaining the singularity (uncertainty) of the phase is fulfilled in the case when both the real and imaginary parts of the complex amplitude are 0. The criterion of singularity is chosen and developed a method for determining their number depending on surface roughness parameters (height of protrusions and distance between them). The number of singularities of the wavefront is determined by the parameters of surface roughness: amplitude and spatial frequency of the protrusions. An optical scheme for visualization and determination of the number of singularities (dislocations) of the wave front and measurement of surface roughness is proposed. Thus, determining the number of singularities of the speckle structure, measure the roughness of the diffusely reflecting surface.

Keywords : diffusely reflecting surface, roughness, speckle structure, wave front singularity.