

УДК 519.6:531.4

Ю. Рудяк, канд. фіз.-мат. наук

ДВНЗ «Тернопільський державний медичний університет  
ім. І.Я. Горбачевського МОЗ України»

## ФІЗИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ДИФУЗНОГО ПОВЕРХНЕВОГО РОЗСІЮВАННЯ

**Резюме.** Теоретично обґрунтовано фізичні основи запропонованого автором експериментально-розрахункового оптичного методу визначення деформацій поверхні. Метод базується на ефекті перерозподілу інтенсивностей дзеркальної та дифузної складових розсіяного світлового потоку при локальній зміні кривизни дифузно-розсіюючої поверхні. Вимірюючи ці зміни, можна визначати напружено-деформований стан (НДС) об'єктів.

**Ключові слова:** оптичні методи, дифузне поверхнєве розсіювання, деформації поверхні.

Yu. Rudyak

## PHYSICAL BASES OF DIFFUSE SURFACE SCATTERING METHOD

**Summary.** Physical bases of the proposed by the author experimental-calculation optical method of determination the surface deformation are theoretically interpreted in the article. Available optical methods of the experimental mechanics can be conventionally divided into two groups: interference and optical-geometrical. The first comprises such well-known methods as polarization-optical (photoelasticity), holographic interference, optical sensitive coverings, interference pictures being decoded, resulted under the units loading and deformation. The second group method deal with some geometric measurements (beam deflection in the gradient photoelasticity and mirror-optical method curves radii in the caustic method), which are carried out under loading. The proposed method belongs neither to the first nor to the second group and is based on the creation of the diffuse optical fields and measurement of their parameters changes (intensity) under the unit loading. It is shown that under the unit deformation, which causes the decrease of its surface curvature, the intensity value of the diffuse component, reflected from the diffuse-scattering surface of the light beam, increases, and that of the mirror component, decreases. When the unit is subject to the deformation, caused by the decrease of its surface curvature, the intensity value of the diffuse component of the reflected from the diffuse-scattering surface of the light beam decreases, and that of the mirror component-increases. The effect in question occurs and can be used for the zero-initial curvature (flat), and convex (positive) and concave (negative). It can be used for the measurement of the surface deformation using optical meters. If the convex plate with the diffuse-reflected surface, the axis of which coincided with the direction of the measuring deformation, is fixed on the unit surface, the curvature of the plate will change under deformation and the effect in question can be identified. Thus, the proposed method can be used for the measurement of the local changes of the surface curvature and creation of the optical deformation meters

**Key word:** optical methods, diffuse surface scattering, surface deformation.

**Постановка проблеми.** Існуючі фундаментальні оптичні методи експериментальної механіки можна розділити на дві групи: інтерференційні та оптико-геометричні. До першої групи належать такі, досить поширені, як поляризаційно-оптичний (фотопружність), голографічної інтерференції, метод оптично-чутливих покриттів. При цьому розшифровують інтерференційні картини, які виникають при навантаженні та деформації об'єктів. Суть методів другої групи полягає у певних

геометричних вимірюваннях (відхилення променя у градієнтній фотопружності та дзеркально-оптичному методі, радіусів кривих у методі каустик), які необхідно проводити при навантаженні. Запропонований метод не відноситься ні до першої, ні до другої групи і базується на створенні дифузних оптичних полів та вимірюванні змін їх параметрів (інтенсивності) при навантаженні об'єктів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** До інтерференційних оптичних методів експериментальної механіки відносяться такі методи, як поляризаційно-оптичний (фотопружність), метод оптично-чутливих покриттів, метод ізодинамічний, голографічної інтерферометрії [1, 2, 3]. До оптико-геометричних відносяться методи градієнтної фотопружності, дзеркально-оптичні, метод каустик [1, 2].

Кожен з відомих оптичних методів механіки має свої області застосування, переваги й недоліки. Для розширення можливостей дослідження елементів машин та конструкцій запропоновано інший експериментально-розрахунковий метод, який аналізує дифузно-розсіяні поверхнею об'єкта оптичні поля [4, 5, 6].

**Мета роботи** – фізичне обґрунтування експериментально-розрахункового оптичного методу визначення НДС об'єкта, який базується на ефекті дифузного поверхневого розсіювання.

**Постановка завдання.** Дати фізичне обґрунтування експериментально-розрахункового оптичного методу визначення НДС, який би пов'язав деформації поверхні та зміну інтенсивності дзеркальної та дифузних складових розсіяного поверхнею об'єкта світлового потоку при локальній зміні його кривизни.

**Результати дослідження.** Нехай на дифуздорозсіюючу поверхню об'єкта нормально поверхні падає пучок променів світла. Виділемо на поверхні (для спрощення опису фізичного процесу) три точки – К, L, M. Внаслідок попадання світлового потоку на дифузно відбиваючу поверхню, т. К, L, M виступають «вторинними осциляторами» та продукують три дифузні потоки.  $A(\gamma)$  – амплітуда відбитої світлової хвилі, виміряна під кутом дифузного розсіювання  $\gamma$  (рис. 1).

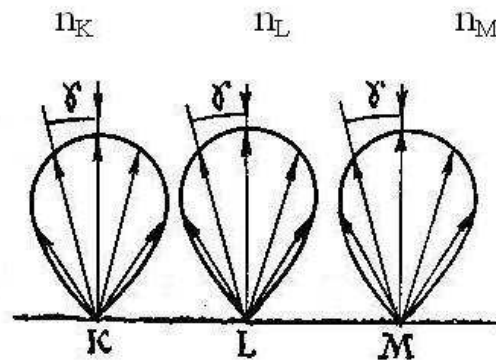


Рисунок 1. Поле дифузно відбитих світлових потоків до деформації об'єкта (показані три точкові «вторинні осцилятори» внаслідок падаючого потоку – К, L, M)

Figure 1. Field of the diffuse reflected light beams before unit deformation (three point “secondary osцилятори”, caused by the falling flow – K,L,M)

Якщо виміряти сумарну інтенсивність відбитого під кутом дифузного розсіювання  $\gamma$  світлового потоку, створеного трьома «вторинними осциляторами», ми отримаємо

$$I_0 = 3I_0', \quad (1)$$

де  $I_0 = A(\gamma)^2$  (інтенсивність дорівнює квадрату амплітуди світлової хвилі).

$$I_0 = 3A(\gamma)^2 = 3A^2. \quad (2)$$

Тут позначено  $A(\gamma)=A$ .

Нехай після прикладання навантаження кривизна поверхні змінюється. Це може бути викликано певними масштабними факторами (вплив крайових ефектів унаслідок кінцевих розмірів об'єктів дослідження; локальна зміна кривизни біля концентраторів, наприклад, зона «шийкоутворення» біля вершини тріщини). Нормалі до поверхні у точках К, L, М займають такі положення, що відповідні кути між падаючими променями у ці точки та нормаліми  $n_k, n_l, n_m$  будуть, відповідно, дорівнювати  $-\alpha, 0, +\alpha$ .

Розглянемо інтенсивність сумарного світлового потоку у деякій точці С, розміщеній під кутом  $\gamma$  (дифузна складова відбитого потоку). Вона буде дорівнювати сумі інтенсивностей, створюваних потоками  $a_1, a_2, a_3$ ,

$$I_c = I_k + I_L + I_m \quad (3)$$

З іншого боку,

$$I_c = A_k(\gamma)^2 + A_L(\gamma)^2 + A_m(\gamma)^2 \quad (4)$$

До деформації об'єкта

$$A_k(\gamma) = A_L(\gamma) = A_m(\gamma) = A(\gamma) \quad (5)$$

Після деформації

$$\begin{aligned} A_L(\gamma) &= A(\gamma) \\ A_k(\gamma) &= A(\gamma) + \Delta_1 A \\ A_m(\gamma) &= A(\gamma) - \Delta_2 A \end{aligned} \quad (6)$$

Для малих змін кривизни поверхні, й, відповідно, малих змін кута  $\alpha$  вважаємо, що картина зміщення відбитих світлових потоків після деформації симетрична відносно нормалі до поверхні в т. L

$$\alpha_1 \approx \alpha_2 = \alpha, \Delta_1 A \approx \Delta_2 A = \Delta A \quad (7)$$

$$\begin{aligned} A(\gamma) &= A \\ A_k(\gamma) &= A + \Delta A \\ A_L(\gamma) &= A \\ A_m(\gamma) &= A - \Delta A \end{aligned} \quad (8)$$

Тоді інтенсивність у точці С після деформації об'єкта й відповідної зміни кривизни поверхні буде дорівнювати

$$I_c = 3A^2 + 2\Delta A^2 \quad (9)$$

Абсолютна зміна інтенсивності світлового потоку в точці С після деформації об'єкта буде дорівнювати

$$\Delta I_c = I_c - I_{0c} = 2\Delta A^2 \quad (10)$$

Відносна зміна інтенсивності світлового потоку у точці С після деформації об'єкта буде дорівнювати

$$\varepsilon = \frac{\Delta I_c}{I_{0c}} = \frac{2}{3} \left( \frac{\Delta A}{A} \right)^2 \quad (11)$$

Таким чином, формули (10) та (11) описують, відповідно, абсолютну та відносну зміни інтенсивності дифузної складової світлового потоку, відбитого дифузно-розсіюючою поверхнею. Отже, на основі формули (10) можна стверджувати, що при деформації об'єкта, яка викликає збільшення кривизни його поверхні, величина інтенсивності дифузної складової відбитого від дифузно-розсіюючої поверхні світлового потоку зростає. При деформації об'єкта, яка викликає зменшення кривизни його поверхні, величина інтенсивності дифузної складової відбитого від дифузно-розсіюючої поверхні світлового потоку зменшується.

Проведемо аналогічний аналіз для інтенсивності дзеркальної складової світлового потоку, відбитого від дифузно-розсіюючої поверхні при деформації об'єкта, який викликає зміну її кривизни.

Використовуючи аналогічні наведеним вище підходи для інтенсивності світла у деякій точці D, для якої кут відбивання  $\gamma = 0$ , до деформації об'єкта та відповідній їй зміні кривизни, можемо записати

$$I_{0D} = 3A_0^2, \quad (12)$$

де  $A_0$  – амплітуда дзеркальної складової світлового потоку, відбитого від дифузно-розсіюючої поверхні об'єкта до його деформації. При цьому для інтенсивності дзеркальної складової світлового потоку, відбитого від дифузно-розсіюючої поверхні об'єкта після деформації, яка викликала зміну його кривизни, можемо записати

$$I_D = A_K^2 + A_L^2 + A_M^2, \quad \text{де} \quad (13)$$

$$A_K = A_0 - \Delta A_0$$

$$A_L = A_0$$

$$A_M = A_0 - \Delta A_0 \quad (14)$$

Підставимо вирази (14) для інтенсивностей дзеркальних складових дифузно відбитих світлових потоків від точок K, L, M після деформації об'єкта у формулу (13) для визначення сумарної (інтегральної) інтенсивності дзеркальної складової відбитого світлового потоку

$$I_D = (A_0 + \Delta A_0)^2 + A_0^2 + (A_0 - \Delta A_0)^2 = 3A_0^2 - 4A_0\Delta A_0 + 2\Delta A_0^2 \quad (15)$$

Тоді абсолютна зміна інтенсивності дзеркальної складової відбитого світлового потоку після деформації буде дорівнювати

$$\Delta I_D = I_D - I_{OD} = -2\Delta A_0(2A_0 - \Delta A_0) \quad (16)$$

Відносна зміна інтенсивності дзеркальної складової відбитого світлового потоку після деформації буде дорівнювати

$$\varepsilon_D = \frac{\Delta I_D}{I_{OD}} = -\frac{2\Delta A_0(2A_0 - \Delta A_0)}{3A_0^2} \quad (17)$$

У випадку, коли  $\Delta A_0 \ll 2A_0$ , рівняння (17) набуде вигляду

$$\varepsilon_D = \frac{\Delta I_D}{I_{OD}} \approx -\frac{4\Delta A_0}{3A_0} \quad (18)$$

Формули (16) та (18) описують, відповідно, абсолютну та відносну зміни інтенсивності дзеркальної складової світлового потоку, відбитого від дифузно-розсіюючої поверхні об'єкта при його деформації, яка викликає зміну кривизни поверхні. Отже, на основі формули (16) можна стверджувати, що при деформації об'єкта, яка викликає збільшення кривизни його поверхні, величина інтенсивності дзеркальної складової відбитого від дифузно-розсіюючої поверхні світлового потоку зменшується. При деформації об'єкта, яка викликає зменшення кривизни його поверхні, величина інтенсивності дзеркальної складової відбитого від дифузно-розсіюючої поверхні світлового потоку зростає. Даний ефект має місце і може бути застосований для поверхонь з нульовою початковою кривизною (плоских), додатною (випуклих) та від'ємною (ввігнутих). Його можна застосувати для вимірювання деформацій поверхні за допомогою оптичних датчиків. Якщо на поверхню закріпити вигнуту пластинку з дифузно-відбиваючою поверхнею, вісь якої буде співпадати з напрямком вимірювальної деформації, то при деформації поверхні кривизна пластинки буде змінюватись, і ми можемо фіксувати вказаний ефект. Провівши попередньо таріровку датчиків, деформацію поверхні можна визначати за формулою

$$\varepsilon_i = \psi \left( \frac{\Delta I_i}{I_{0i}} \right) \quad (19)$$

Причому, для малих деформацій функціональна залежність  $\varepsilon_i = \psi \left( \frac{\Delta I_i}{I_{0i}} \right)$  буде наближатися до лінійної

$$\varepsilon_i = k \left( \frac{\Delta I_i}{I_{0i}} \right) \quad (20)$$

**Висновки.** Теоретично обґрунтовано фізичні основи експериментально-розрахункового оптичного методу визначення НДС, який базується на ефекті дифузного поверхневого розсіювання. Проаналізовано, як змінюються величини інтенсивностей дзеркальної та дифузних складових розсіяного поверхнею дифузного світлового потоку при зменшенні або збільшенні кривизни поверхні. Запропонований

метод не відноситься ні до однієї з двох основних груп експериментальних оптичних методів механіки: інтерференційних або оптико-геометричних. Метод може бути застосований для створення оптичних датчиків деформацій поверхні.

**Conclusions.** Physical bases of the experimental-calculation optical method for determination SSS, which is based on the diffuse surface scattering, has been interpreted theoretically. The intensity value of the mirror and diffuse components of the scattered by the surface diffuse light beam under decrease or increase of the surface curvature, has been analyzed. The proposed method does not belong to any of two main groups of the experimental optical methods of mechanics: interference or optical-geometric. This method can be used for creation of optical meters of the surface deformations.

### Список використаної літератури

1. Малежик, М.П. Метод фотопружності в двовимірних динамічних задачах механіки анізотропних тіл: автореф. дис. ... докт. фіз.-мат. наук [Текст] / Малежик М.П. – Львів, 2008. – 36 с.
2. Mylnikov, A.V. Investigation of glass structural elements with stress concentrators by optical method / A.V. Mylnikov, R.B. Tverdostaup, Yu. A. Rudyak Recent Advances in Experimental Mechanics // Proceedings of the 10th International conference on experimental mechanics. – Lisbon. – 18 – 22 July 1994. – P. 201 – 204.
3. Рудяк, Ю.А. Метод визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень для неоднорідного основного напруженого стану [Текст] / Ю.А. Рудяк // Вісник національного авіаційного університету. – Київ – 2012. – № 4. – С. 101 – 103.
4. Пат АС СССР, М5 кл. G01B11/18 Способ определения напряженно-деформированного состояния объекта [Текст] / Рудяк Ю.А., Пизар В.Г. – № 1668860 от 08.04.1991.
5. Пат АС СССР, М5 кл. G01B11/16 Способ определения деформаций поверхности [Текст] / Рудяк Ю.А. – № 1716317 от 01.11.1991.
6. Рудяк, Ю.А. Математичне обґрунтування методу дифузного поверхневого розсіювання [Текст] / Ю.А. Рудяк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 6. – С. 264 – 267.

*Отримано 20.12.2012*