

ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗРАЗКІВ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ СПЕКЛ-ЗОБРАЖЕНЬ

The method for measurement of displacements field a cylindrical surface in two directions is offered and hardware realization is described. The method is used for determination the deformations of the cylindrical sample. On the basis of the measured deformations Poisson ratio is calculate.

Запропоновано метод вимірювання полів переміщень циліндричної поверхні у двох напрямках і описано його технічну реалізацію. Метод застосовано для визначення деформацій циліндричного зразка. На основі виміряних деформацій розраховано коефіцієнт Пуассона.

Досі для вимірювання деформацій зразків, деталей та елементів конструкцій з циліндричною поверхнею переважно використовували тензометричні перетворювачі різних типів. Хоча техніка тензовимірювань добре відпрацьована і дає змогу отримати достатньо малі похибки вимірювання, вона трудомістка, потребує безпосереднього контакту з об'єктом, а просторова дискретність вимірювання обмежена мінімальними розмірами тензоперетворювача 1×1 мм [2].

Відомо метод вимірювання деформацій циліндричної поверхні за допомогою реєстрації спеклів на фотоплівку прикладену впритул до досліджуваної поверхні, яка освітлюється лампою спалахом [10]. Суттєвим недоліком цього методу є наявність трудомісткого процесу фотореєстрації і обробки.

У роботі [8] запропоновано вимірювання деформації циліндричного прутка методом цифрової кореляції спеклів (ЦКС). Зображення розжареного циліндричного прутка діаметром 20 мм реєструється цифровою камерою з великої відстані так, що спостерігається весь пруток на темному фоні. Після реєстрації зображень до і після прикладання навантаження визначаються переміщення всього прутка як цілого тіла і розраховуються переміщення на ділянці поверхні прутка розміром 5×5 мм. Чутливість вимірювання переміщень становить 3,5 мкм. У цій роботі, при відомому діаметрі прутка і положенні системи реєстрації за переміщеннями, визначаються деформації зсуву і розтягу з похибкою 0,05% і дотичні до поверхні деформації з похибкою 0,08%. Недоліком цього методу є невисока чутливість, зумовлена значною відстанню до об'єкта вимірювання.

У роботі [12] описано методику вимірювання деформацій і форми поверхні, яка утворюється при згині алюмінієвої пластини під кутом 90° . Оптична схема побудована на основі цифрової відеокамери з телецентричним об'єктивом і має поле спостереження $15,2 \times 11,4$ мм. Для визначення переміщень і деформацій поверхні пластини реєструють шість зображень, при повороті алюмінієвої пластини на задані фіксовані кути. Три зображення до деформації і три після деформації. Похибка вимірювання переміщень у площині поверхні пластини становить ± 5 мкм, а в повздовжньому напрямку – ± 25 мкм. Максимальна похибка визначення деформацій не перевищує 0,1%. Недоліком цієї методики є невисока точність вимірювання, зумовлена необхідністю використання спеціального механізму позиціонування об'єкта та реєстрації значної кількості зображень.

Для вимірювання деформацій циліндричного зразка і коефіцієнта Пуассона використовують також стереовідеосистеми [9]. Похибка вимірювання відносних деформацій за допомогою такої системи у пружної зоні деформування зразка становить 0,03%, а у пластичній – 0,08%. Недоліком цього способу є значна вартість апаратури та складність калібрування стереовідеосистеми.

Відомі також оптичні методи визначення деформацій зігнутої поверхні з попереднім нанесенням різних маркерів (точок, ліній) на поверхню, які характеризуються невисокою точністю вимірювання 2–3% [11].

У ФМІ використовується і удосконалюється сучасні безконтактні оптичні методи вимірювання деформацій плоских поверхонь, один з яких – метод ЦКС [3, 4]. У цій роботі запропоновано метод прецизійного вимірювання переміщень на малій базі у двох взаємно-перпендикулярних напрямках, який застосовано для визначення полів деформацій зразків з циліндричною поверхнею та описано його технічну реалізацію у вигляді оптико-цифрового деформометра (ОЦД). Запропоновано також методику розрахунку коефіцієнта Пуассона досліджуваного матеріалу на основі вимірювань деформацій.

Оптична схема для реєстрації спекл-зображень циліндричної поверхні зображена на рис. 1. Для технічної реалізації ОЦД застосували USB відеокамеру Slim 1320 з фоточутливою матрицею розміром $1/3'$ ($4,8 \times 3,6$ мм), яка має 1280×1024 пікселів. Щоб повною мірою використати роздільну здатність матриці, в ОЦД встановили мікрооб'єктив ИМ8. Цей об'єктив добре скорегований у жовто-зеленій області спектра і має роздільну здатність у відбитому світлі ≥ 380 лін./мм [5]. Для визначення полів переміщень поверхні використовується алгоритм обробки спекл-зображень, описаний у роботі [4]. При цьому зображення, отримані при різних ступенях статичного навантаження розтягом циліндричного зразка, розбивались на фрагменти розміром 32 на 32 піксела. Загальна кількість фрагментів у зображенні становила 1280. Для кожної відповідної пари фрагментів, які належать різним зображенням, визначались їх відносні переміщення у двох взаємно перпендикулярних напрямках (U , V), і таким чином отримували дискретні значення переміщень досліджуваної поверхні в 1280 точках (фрагментах зображення), які відбувались при зміні навантаження. Після фільтрації і інтерполяції цих значень будували просторові поля переміщень за якими визначали деформації зразка.

При проведенні вимірювань деформацій циліндричних зразків, для освітлення їх поверхні використовували яскравий зелений світлодіод BVZ 922GE4, максимум потужності випромінювання якого припадає на довжину хвилі $\lambda=520$ нм. При масштабі зйомки, коли одному пікселу фоточутливої матриці відповідала прямокутна площадка в полі спостереження розміром 2,6 на 2,6 мкм, відстань від передньої лінзи мікрооб'єктива до поверхні об'єкта і фоточутливої матриці були відповідно $a = 33$ мм і $b = 48$ мм (рис. 1).

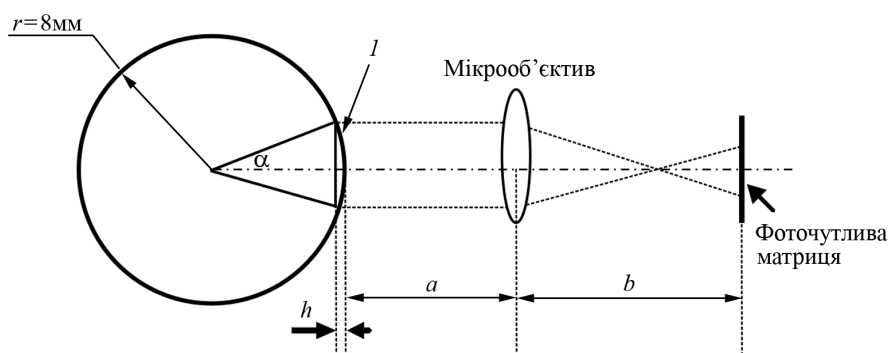


Рис. 1. Оптична схема реєстрації спекл-зображень циліндричної поверхні.

Під час реєстрації спекл-зображень поверхні зразків з малими радіусами кривизни складно реалізувати оптичну схему, як б забезпечила достатньо велику глибини різкості і однорідність яскравості у зображенні. Кривизна поверхні

досліджуваного зразка приводить також до зміни масштабу по полю зображення, які зумовлені похибкою фокусування оптичної системи. Тому для визначення відносних деформацій зразка за допомогою ОЦД будемо реєструвати частину поверхні циліндричного зразка розміром $m \times l$ (зона спостереження).

Задавши розміри зони спостереження в поперечному до осі зразка напрямку l , при відомому радіусі циліндричного зразка r , можна розрахувати максимальне відхилення циліндричної поверхні в зоні спостереження від площинності h , скориставшись виразами [1]

$$l = 2r \sin(\alpha/2), \quad h = \frac{l}{2} \operatorname{tg}(\alpha/4), \quad (1)$$

де l – розмір зони спостереження в поперечному напрямку; h – максимальне відхилення від площини; α – центральний кут, що опирається на хорду довжиною l рис. 1.

Наприклад, для циліндра радіусом $r = 8$ мм, за формулами (1), для області спостереження $m \times l = 3,3 \times 2,5$ мм отримаємо максимальне відхилення циліндричної поверхні від площинності $h \approx 98$ мкм.

Для забезпечення однакового масштабу по полю зображення встановимо діафрагму в задній фокальній площині об'єктива, створивши таким чином телецентричний хід променів у просторі предметів [7]. Зображення поверхні циліндричного зразка, яке отримане розробленою оптичною системою під час проведення експериментів, зображено на рис. 2. Як видно з фотографії, воно є достатньо контрастним по всьому полю.

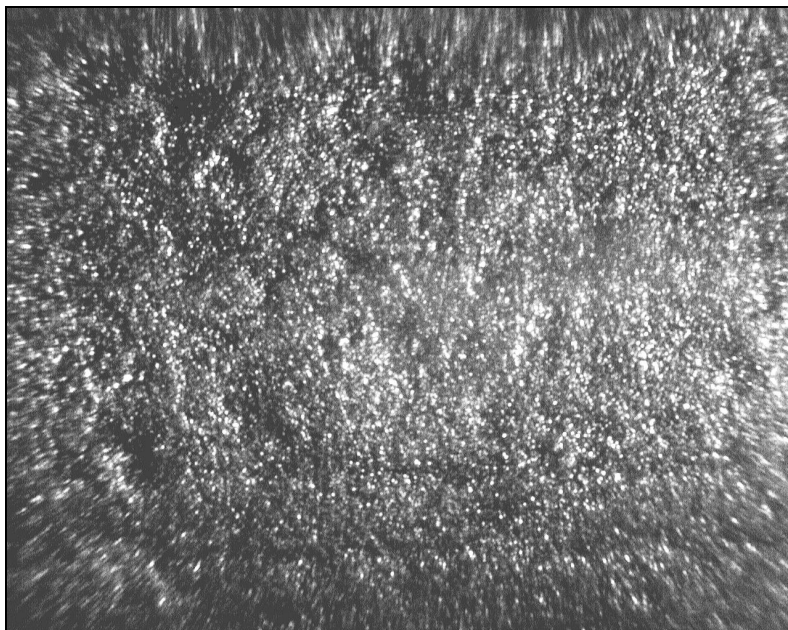


Рис. 2. Зображення циліндричної поверхні зразка.

Для визначення дійсних деформації зразка необхідно усунути можливі переміщення поверхні зразка відносно схеми реєстрації спекл-зображень. Для цього ОЦД жорстко закріплюємо на зразку за допомогою трьох стопорних гвинтів з гострим конічним кінцем, вісі яких розміщені в одній площині під кутом 120° так, що площина, яка проходить через точки кріплення, ділить область спостереження в напрямку m на дві рівні частини. Для забезпечення більшої жорсткості конструкції і зменшення плеча консольного кріплення ОЦД в оптичній схемі ви-

користано дзеркало, розміщене під кутом 45° до оптичної осі. При цьому світлодіод встановлено під дзеркалом, симетрично відносно центру зони спостереження, що дало змогу забезпечити більш рівномірне освітлення поверхні зразка рис. 3. Щоб зменшити негативний вплив зовнішніх джерел світла на точність вимірювання переміщень, за мікрооб'єктивом встановлено зелений світлофільтр. Загальний вигляд розробленого ОЦД зображено на рис. 4.

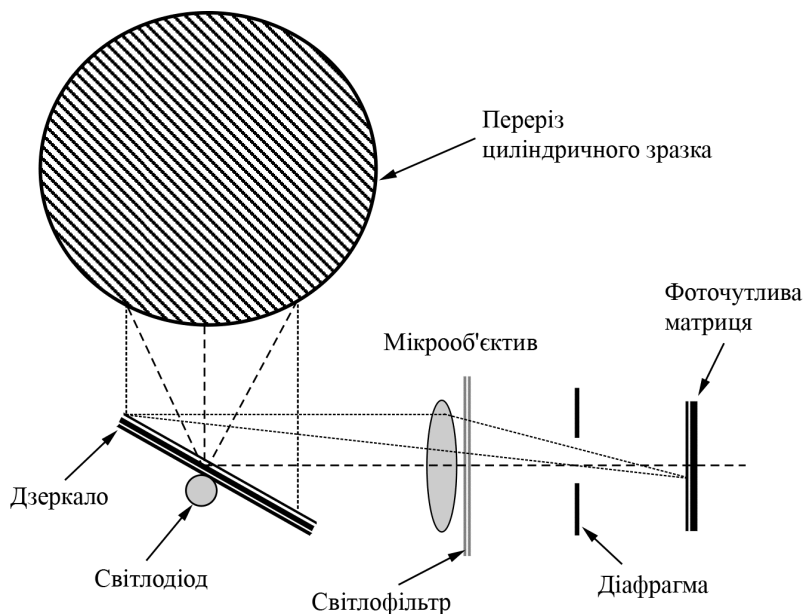


Рис. 3. Оптична схема ОЦД.

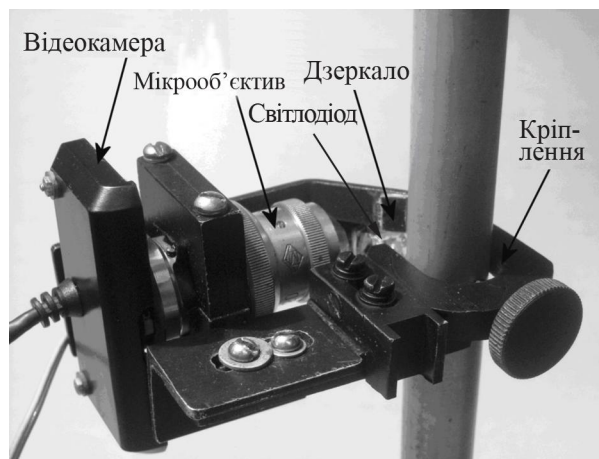


Рис. 4. Загальний вигляд ОЦД закріпленого на зразку.

Розроблений макет ОЦД дає змогу визначати переміщення циліндричної поверхні зразка в області спостереження, які відбуваються зі зміною статичного навантаження. За результатами обробки спекл-зображень будувались розподіли переміщень поверхні у двох напрямках, вздовж і поперек осі зразка відповідно U і V з дискретністю $\pm 0,1$ мкм рис. 5. На основі вимірних переміщень поверхні можна розрахувати відносні осьові деформації циліндричного зразка так:

$$\varepsilon_x = \frac{U}{t}, \quad (2)$$

де m – розмір ділянки спостереження в осьовому напрямку; $U = U^+ - U^-$ – осьові переміщення поверхні зразка в зоні спостереження; U^+ , U^- – усереднені значення переміщень відповідно у крайній правій і лівій ділянках області спостереження рис. 5а.

На рис. 6 схематично, у збільшеному вигляді, зображено зміну поперечного перерізу циліндричного зразка, яка відбувається при його навантаженні розтягом. При цьому точка 1 на поверхні зразка переміщується в положення 2. Відносні поперечні деформації циліндричного зразка тоді можна визначити так:

$$\varepsilon_y = \frac{N}{r}, \quad (3)$$

де $N = r - r'$ – величина, на яку змінюється початковий радіус зразка.

Величину N можна визначити за допомогою розробленого ОЦД таким способом. При жорсткій фіксації ОЦД до зразка кут $\alpha/2$ буде постійним. Його величина визначається за виразом (1), якщо відомі початковий радіус циліндричного зразка r і розміри зони спостереження $m \times l$. Тоді нормальні переміщення поверхні зразка від точки 1 до точки 2 можна розрахувати на основі виміряних ОЦД переміщень поверхні в поперечному напрямку $V = V^+ - V^-$, де V^+ , V^- – усереднені значення переміщень відповідно у крайній верхній і нижній ділянках області спостереження рис. 5б. З врахуванням (1) нормальні переміщення визначаються так: $N = \frac{V \cdot r}{l}$. Враховуючи (3), відносні поперечні деформації зразка можна визначити за виміряними ОЦД поперечними переміщеннями V таким способом:

$$\varepsilon_y = \frac{V}{l}. \quad (4)$$

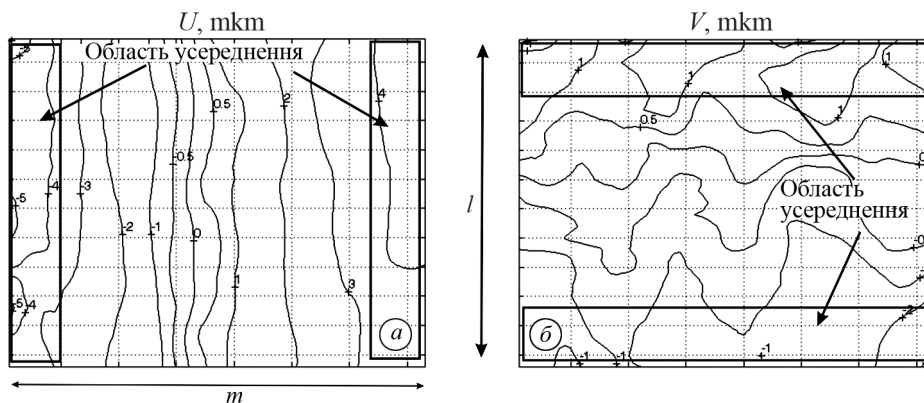


Рис. 5. Розподіли переміщень поверхні циліндричного зразка:
а – вздовж напрямку m ; б – вздовж напрямку l .

Відомо [6], що за поперечними і осьовими відносними деформаціями циліндричного зразка можна розрахувати коефіцієнт Пуассона досліджуваного матеріалу. В лінійній області закону Гука $\mu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right|$. Враховуючи вирази (2) і (4), коефіцієнт Пуассона μ буде визначатись на основі виміряних ОЦД переміщень U, V , при відомих розмірах зони спостереження $m \times l$ так:

$$\mu = \left| \frac{V \cdot m}{U \cdot l} \right|. \quad (5)$$

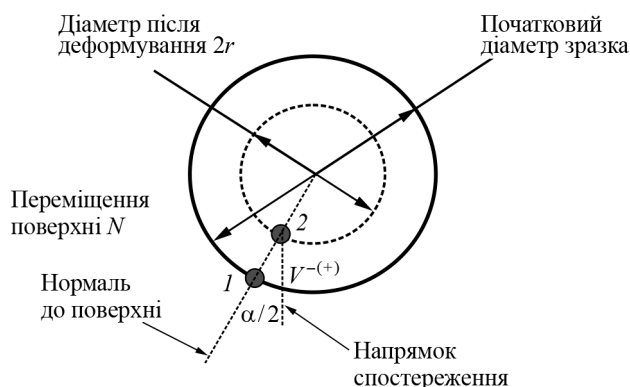


Рис. 6. Зміна поперечного перерізу циліндричного зразка.

Експериментальну апробацію розробленого макета ОЦД проводили, визначаючи деформації циліндричного сталю зразка діаметром $2r = 16$ мм, виготовленого зі сталі 60С2А, який розтягували на випробувальній машині EU-20. У лінійній області осьові деформації зразка можна оцінити, використовуючи вираз [6]:

$$\varepsilon_p = \frac{P}{E \cdot F}, \quad (6)$$

де P – сила прикладена до зразка в осьовому напрямку; F – початкова площа поперечного перерізу зразка; E – модуль Юнга, який для сталі 60С2А становить 21600 кг/мм^2 .

За допомогою виразу (6) розрахуємо очікувані деформації зразка для сили $P = 11000$ кГ. Якщо площа перерізу зразка $F = \pi r^2 \approx 201 \text{ мм}^2$, то отримаємо $\varepsilon_p = 2,53 \cdot 10^{-3}$. Експериментально визначені ОЦД розподіли переміщень поверхні зразка, при тому ж значенні сили показані на рис. 5. На основі цих переміщень знайдемо осьові деформації зразка і порівняємо їх з розрахунковими. Розмір поля спостереження в осьовому напрямку m становить 3.3 мм, а середні значення переміщень у крайній лівій та правій області усереднення в цьому напрямку дорівнюють відповідно $U^- = -4,6$ мкм і $U^+ = +4,5$ мкм (див. рис. 5а), тоді осьові деформації розраховані за виразом (2) будуть $\varepsilon_{i \text{ } \ddot{a} \ddot{a}} = \frac{9,1}{3300} \approx 2,76 \cdot 10^{-3}$. Експериментально отримані ОЦД деформації зразка відрізняються від теоретично розрахованих на 9%, що можна пояснити похибками експерименту та припущеннями теоретичної моделі.

Під час експерименту, при різних навантаженнях розтягом, за вимірними ОЦД полями переміщень U , V використовуючи вираз (5), розраховували також коефіцієнт Пуассона досліджуваного матеріалу зразка. Отримані результати розрахунку коефіцієнта Пуассона залежно від навантаження наведені у таблиці. З довідникових даних відомо, що коефіцієнт Пуассона для багатьох сталей перебуває в межах від 0,25 до 0,33, тому експериментально отримані значення коефіцієнта Пуассона добре корелюють з довідниковими.

P , кГ	V , мкм	U , мкм	μ
11000	1,8	9,1	0,261
14000	2,3	11,2	0,271
17000	2,8	13,4	0,276
20000	3,3	15,5	0,281

Розроблено оптичну схему для реєстрації спекл-зображень циліндричних поверхонь з малими радіусами кривизни. На основі цієї схеми виготовлено макет ОЦД, для вимірювання полів локальних переміщень циліндричної поверхні у двох взаємно-перпендикулярних напрямках U , V . За вимірними локальними переміщеннями поверхні визначаються осьові і поперечні деформації циліндричного зразка та розраховується коефіцієнт Пуассона матеріалу на малій базі. Результати проведених експериментальних вимірювань деформацій на сталевих циліндричних зразках свідчать, що деформації і значення коефіцієнта Пуассона отримані за допомогою ОЦД перебувають в межах експериментальної похибки.

1. *Выгодский М. Я.* Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1964. – 870 с.
2. *Глаговский Б. А., Пивен И. Д.* Электротензометры сопротивления. – Л.: Энергия, 1972. – 88 с.
3. *Муравський Л. І., Максименко О. П., Сахарук О. М.* Оцінка поперечних зсувів поверхні матеріалу методами спекл-кореляції // Відбір і обробка інформації. – 2003. – Вип. 18(94). – С. 95–99.
4. *Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П.* Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 5. – С. 67–72.
5. *Панов В. А., Андреев Л. Н.* Оптика микроскопов. Расчет и проектирование. – Л.: Машиностроение, 1976. – 432 с.
6. *Тимошенко С. П., Гудьер Дж.* Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
7. *Чуриловский В. Н.* Теория оптических приборов. – М.: Машиностроение, 1966. – 560 с.
8. *Lu H., Vendroux G., Knauss W. G.* Surface Deformation Measurements of a Cylindrical Specimen by Digital Image Correlation // Experimental Mechanics. – 1997. – **3**, № 4. – P. 433–439.
9. *Luo P. F., Chen J. N.* Measurement of curved-surface deformation in cylindrical coordinates // Experimental mechanics. – 2000. – **40**, № 4. – P. 345–350.
10. *Meirong T., Minhua L., Jinhua H.* Strain determination on curved surfaces by objective white light speckles // Acta Mechanica Sinica. – 1987. – **3**, № 4. – P. 363–369.
11. *Swillo S. J., Iyer K., Hu S. J.* Angle line method for measuring continuously distributed strain in sheet bending // J. Manufacturing Science and Engineering. – 2006. – **128**. – P. 651–659.
12. *Tong W.* Plastic Surface Strain Mapping of Bent Sheets by Image Correlation // Experimental Mechanics. – 2004. – **44**, № 5. – P. 502–511.