

УДК 621.397

АЛГОРИТМ ОБРОБКИ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ

О. Максименко, Л. Франкевич, О. Сахарук

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,
вул. Наукова, 5, 70601, МПС, м. Львів, Україна
maksymenko@ipm.lviv.ua*

На засадах цифрової кореляційної обробки зображень розроблено алгоритм вимірювання переміщень і деформацій поверхні балкових зразків під час їхнього навантаження та проведено його експериментальну апробацію. З використанням отриманих під час експерименту зображень поверхні зразка розраховано радіус викривлення і деформації дюралюмінієвого балкового зразка та модуль пружності матеріалу. Отримані результати засвідчують ефективність роботи розробленого алгоритму.

Ключові слова: цифрова кореляційна обробка зображень, поля деформацій, алгоритм вимірювання, модуль пружності, радіус кривизни, балкові зразки матеріалів.

В експериментальній механіці під час дослідження нових матеріалів визначають їхні деформаційні характеристики. За стандартними методиками вимірювання під час розтягу, стиску, кручення і згину зразків, зазвичай, використовують контактні тензоперетворювачі або механічні індикатори переміщень. Проте контактні системи вимірювання малопридатні для застосування під час дослідження нових сучасних матеріалів та у випадку дії агресивних середовищ, тиску й інших чинників.

Визначення деформацій безконтактними методами, зокрема оптичними, потребує розробки нових методик реєстрації зображень та алгоритмів їхнього опрацювання. Безконтактні методи визначення деформацій, до яких належить метод цифрової кореляційної обробки зображень (ЦКЗ), досить широко використовують в експериментальній механіці для безконтактного визначення переміщень поверхні плоских зразків [1], параметрів зони деформування і руйнування [2], модуля пружності матеріалів [3] та ін. За цим методом реєструють послідовність цифрових зображень поверхні досліджуваного зразка, який перебуває під змінним навантаженням, зіставлення яких дає змогу визначати необхідні характеристики матеріалів.

Одним з вагомих чинників, які обмежують точність вимірювання за методом ЦКЗ, є спотворення оптичної системи та наявність складного переміщення поверхні зразка як твердого тіла відносно системи реєстрації під час навантаження. Сукупна дія цих чинників разом з технічними можливостями просторового розділення відеосенсора та електронними шумами суттєво зменшує точність вимірювання за цим методом.

Для зменшення негативного впливу переміщень зразка як твердого тіла розроблено автоматичні [4] та інтерактивні алгоритми усунення руху твердого тіла [5], а також спеціальну систему кріплення оптичної системи на досліджуваному зразку [6].

Нижче запропоновано модифікувати алгоритм вимірювання деформацій [7] та визначати деформації зразка за радіусом кривини зразка, який змінюється пропорційно до навантаження і властивостей матеріалу. Для визначення радіуса кривини зразка за даними переміщень фрагментів використано процедуру апроксимації малої кількості точок колом. Пропонований алгоритм можна використовувати в ході визначення модуля пружності матеріалів на згин, а також у системах машинного зору для контролю форми деталей під час їх виготовлення.

1. Основні положення методу цифрової кореляції зображень.

Для того щоб визначити поле деформацій зразка методом ЦКЗ, реєструють послідовно два цифрові зображення поверхні – перше без навантаження і друге після прикладання певного зусилля. Зареєстровані зображення за допомогою ПК і спеціалізованої програми обробки автоматично розбивають на однакову кількість фрагментів, які відтворюють у певному масштабі відповідні елементарні площадки поверхні зразка. Відносні переміщення фрагментів першого і другого зображення визначають через зміщення положення максимуму крос-кореляційної функції цих фрагментів

$$\tilde{C}(k, l) = \sum_i^{N_1-1} \sum_j^{N_2-1} [f_{\text{Im}1}(i, j) \cdot f_{\text{Im}2}(k+i, l+j)], \quad (1)$$

де $f_{\text{Im}1}$ – фрагмент першого цифрового зображення розміром $n_1 \times n_2$ пікселів; $f_{\text{Im}2}$ – фрагмент другого цифрового зображення після навантаження розміром $n_1 \times n_2$ пікселів; $k, l = 0, 1, \dots, N-1$ – дискретні просторові відліки функції крос-кореляції, у цьому разі повинно виконуватись співвідношення $N_1 \cdot N_2 \geq (n_1 + n_2)^2$.

У випадку двовимірних цифрових сигналів для розрахунку крос-кореляційної функції (1) найліпше використовувати швидке перетворення Фур'є (ШПФ). Тоді вираз (1) для розрахунку крос-кореляції двох фрагментів набуває вигляду

$$\tilde{C}(k, l) = F^{-1}(H_{s1} * H_{s2}^*), \quad (2)$$

де $H_{s1}(r, s) = F(f_{\text{Im}1})$ і $H_{s2}^*(r, s) = F(f_{\text{Im}2})$ – ШПФ, відповідно, першого і другого фрагментів; $*$ – комплексно спряжена величина; $r, s = 0, 1, \dots, m-1$ – дискретні просторові частоти.

Просторовий вигляд розрахованої за виразом (2) функції крос-кореляції показано на рис. 1, а. Унаслідок обробки всіх фрагментів зображення формується ґратка кореляційних піків. Для підвищення вірогідності виявлення крос-кореляційних піків і зменшення похибок визначення координат положення їхніх максимумів використовують різні методи фільтрації, зокрема, широко застосовують інверсний фільтр з певним підібраним коефіцієнтом α [8, 9] (див. рис. 1, б)

$$\tilde{C}(k, l) = F^{-1} \left[\frac{H_{s1} \cdot H_{s2}^*}{|H_{s1} \cdot H_{s2}^*|^{1-\alpha}} \right]. \quad (3)$$

Відомо, що зменшення розмірів фрагментів збільшує просторову роздільну здатність методу ЦКЗ, однак у цьому разі зростає випадкова складова похибки визначення переміщень. Аналіз зображень, зареєстрованих під час експерименту,

засвідчив, що задовільні результати за наявного обладнання можна отримати для фрагментів розміром $n_1 \times n_2 \geq 1 \cdot 10^4$ пікселів. Отже, усю поверхню об'єкта в зоні вимірювання умовно розбивали на певну кількість елементарних площадок, відносні переміщення яких $(\Delta x, \Delta y)$ у площині об'єкта визначають під час досліджень. Значення переміщення площадок розраховували за зміщенням координат максимуму функції крос-кореляції фрагментів (3) так:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \beta \cdot k_m, \\ \Delta y &= \beta \cdot l_m, \end{aligned} \quad (4)$$

де β – масштаб зображення.

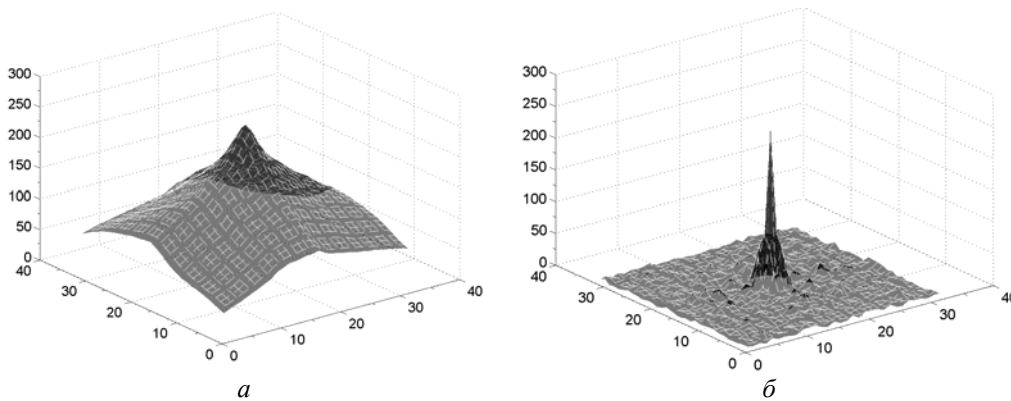


Рис. 1. Просторовий вигляд функції крос-кореляції.

Для точнішого визначення положення максимуму кореляційного піка (k_m, l_m) ми використовували спеціальні цифрові алгоритми обробки, які дають змогу отримати субпіксельне розділення до 0,01 пікселя [10].

2. Експериментальна установка для виконання вимірювань.

Реалізація методу ЦКЗ передбачає послідовну реєстрацію зображень поверхні зразка в різні моменти часу. Для формування зображень поверхні балкового зразка під час його навантаження згинальним моментом та виконання вимірювань розроблено експериментальну установку (рис. 2). Ця установка створена на базі механічної навантажувальної машини чотириточкового згину з ручним приводом 4. Вона дає змогу випробовувати зразки відповідно до ГОСТу 25.604-82 і одночасно реєструвати зображення поверхні зразка, необхідні для реалізації методу ЦКЗ, для безконтактного визначення деформацій.

Для реєстрації зображень в установці використано цифрову CMOS відеокамеру 1 (Pixelink PL-A661) з інтерфейсом FireWire, який дає змогу підключати цифрові пристрої безпосередньо до ПК без додаткового обладнання. Фоточутлива матриця відеокамери розмірами $1/2'$ ($7,68 \times 6,14 \text{ мм}^2$) забезпечує просторове розділення $1\,280 \times 1\,024$ пікселі. Зображення досліджуваної поверхні зразка 3 формували на фоточутливій матриці за допомогою об'єктива 2 (INDUSTAR-50). За паспортними даними цей об'єктив у білому світлі має розділення ≈ 50 лін./мм, що цілком достатньо для вимірювання

мікронних переміщень поверхні. Для освітлення поверхні зразка в установці використано потужний світлодіод 7 з колімувальним об'єктивом 6 (ОКС1-56). Світлодіод живиться від стабілізованого джерела постійного струму з вихідною напругою 5 В. Максимум потужності випромінювання світлодіода припадає на довжину хвилі $\lambda = 631 \text{ нм}$ ($\Delta\lambda = 10 \text{ нм}$).

Механічне навантаження, яке прикладали до зразка 3 під час експерименту, вимірювали за допомогою динамометра 5 і цифрового контролера ХКЗ118Т1. Абсолютна похибка вимірювання навантаження становила 0,1 Н. Під час експерименту мікрометричним індикатором 8 вимірювали також прогин зразка з похибкою $\pm 1 \text{ мкм}$.

Зразки для випробовувань виготовляли з дюралюмінію марки Д16Т товщиною $h = 3,6 \text{ мм}$ і шириною $b = 22,3 \text{ мм}$.

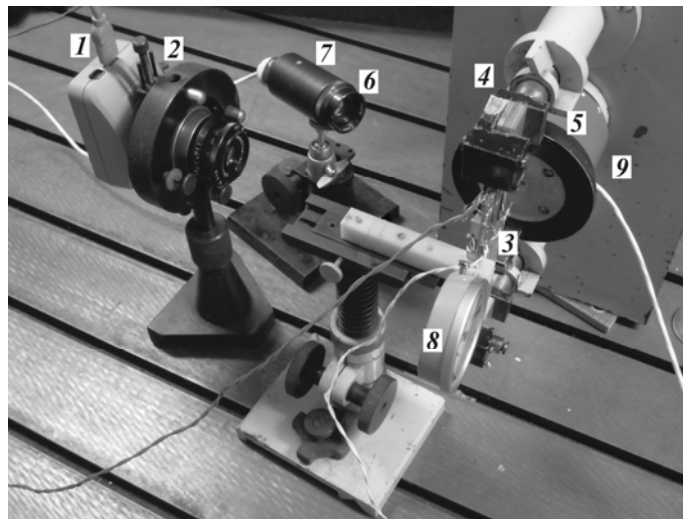


Рис. 2. Експериментальна установка для проведення досліджень.

Для оцінки похибок методу ЦКЗ під час експерименту ми визначали деформації балкового зразка за значенням прогину в центральній його частині. Припускаючи, що пружна лінія балкового зразка на ділянці з постійним моментом $M = P \cdot a$ є дугою кола, деформації зразка можна розрахувати за значенням прогину [11]:

$$\varepsilon_y = \frac{4b\Delta w}{l^2}, \quad (5)$$

де Δw – величина прогину балкового зразка; l – відстань між опорами; b – ширина зразка.

Докладна оцінка похибок вимірювання розподілів деформацій на поверхні широкого балкового зразка методом ЦКЗ за виразом (3), виконана раніше, засвідчила добру

збіжність результатів вимірювання порівняно зі стандартизованими методами вимірювання [7]. Розбіжність результатів вимірювання різними методами становила 10 %. Тому можна вважати, що отримана в експерименті похибка визначення деформації за методом ЦКЗ не перевищує похибок стандартних методів вимірювання.

Алгоритм реєстрації та обробки зображень включає такі основні етапи.

1. Калібрування оптичної системи для виправлення геометричних спотворень об'єктива. У цьому разі ми використовували тестове зображення і спеціальну процедуру обробки, після якої отримували коефіцієнти для коригування геометричних спотворень.

2. Корекція положення зображення об'єкта відносно краю кадру з похибкою в межах одного пікселя зміщенням і поворотом зареєстрованих зображень. Після корекції положення об'єкта визначали масштаб зображення за відомим розміром об'єкта.

3. Виділення області розрахунку на зображеннях, у межах якої визначатимуть переміщення фрагментів. Розбиття області розрахунку на фрагменти і визначення їхніх відносних переміщень після прикладеного навантаження до зразка.

4. Апроксимація координат центрів фрагментів, які перебувають на однаковій відстані від нейтрального шару $0-0'$ дугою кола. Розрахунок радіусу кола і положення центра. Розрахунок деформації і модуль пружності балки за радіусом (рис. 3).

Загальна блок-схема алгоритму обробки зображень, показана на рис. 4, складається з трьох основних блоків. Перший передбачає оцінку коефіцієнтів дисторсії зображень та коригування зображень. Другий блок забезпечує вирівнювання положення об'єкта на зображенні та усуває рух зразка як твердого тіла. Третій блок охоплює вимірювання переміщень фрагментів та процедури апроксимації координат центрів фрагментів і розрахунок деформації.

3. Корекція оптичних спотворень.

Розробка алгоритмів обробки зображень, у яких визначають форму об'єкта, потребує проведення процедури калібрування оптичної системи для виправлення спотворень зображення об'єкта. Найбільший вплив на спотворення має геометрична дисторсія.

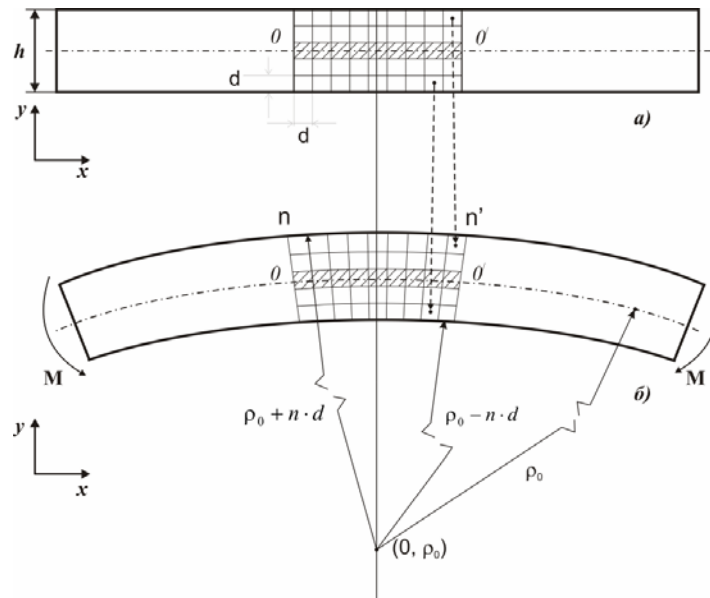


Рис. 3. Геометрія деформації балки.

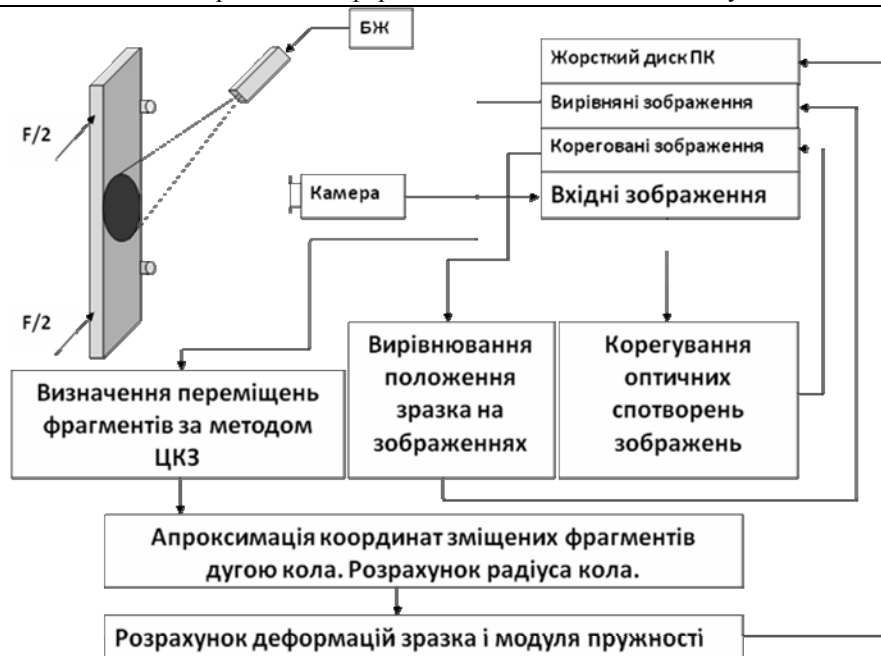


Рис. 4. Блок схема алгоритму обробки зображень.

Серед геометричних дисторсій радіальна дисторсія (спотворення відбувається вздовж радіального напрямку від центра зображення) трапляється найчастіше і найбільше впливає на точність вимірювання. Відповідно до цього типу геометричної дисторсії, прямі лінії на реальному предметі стають кривими на зображенні, зареєстрованому такою системою. Прямі лінії, що проходять через центр зображення, залишаються прямими, а коло, співвісне з центром зображення, залишається колом, хоча його радіус змінюється. Ці спотворення зазвичай коректують, застосовуючи параметричну модель радіальної дисторсії. За допомогою цієї моделі можна оцінити коефіцієнти дисторсії і виправити спотворене зображення. Така найпростіша корекція дає змогу звести спотворення в системах машинного зору до 0,3–1,0 пікселя [12].

Здебільшого радіальну дисторсію описують таким поліноміальним виразом:

$$U(r) = r + \Delta(r) = r + k_1 r^2 + k_2 r^3 + k_3 r^4 + \dots, \quad (6)$$

де $k = [k_1, k_2, k_3, \dots]$ – вектор коефіцієнтів дисторсії; r – дійсний радіус положення точки об'єкта відносно центра зображення; $\Delta(r)$ – радіальна функція, яка характеризує зміщення дійсного положення точки на спотвореному зображенні.

З урахуванням (6) функція корекції зображення матиме вигляд

$$U(r)^{-1} = L(r) \approx r - \Delta(r), \quad (7)$$

що відповідає функціональній зміні поперечного збільшення зображення відносно центра

$$M(r) = \frac{dL(r)}{dr} \approx 1 - \Delta'(r). \quad (8)$$

Для оцінки вектора коефіцієнтів дисторсії використовували тестове зображення – поле чорних точок на білому фоні, між центрами яких по горизонталі було 1,25 мм, а по вертикалі – 1,5 мм. Застосовуючи тестове зображення з відомим кроком, ми знаходили відхилення точок зареєстрованого зображення від істинного положення (рис. 5) і на підставі цих даних визначали перші п'ять коефіцієнтів полінома, що описує геометричну дисторсію (6), та будували функцію для корекції геометричних спотворень наших зображень за виразом (7). За допомогою виразу (7) ми коригували отримані під час експерименту зображення спеціальною програмою [13]. Значення коефіцієнтів дисторсії оптичної системи розробленої експериментальної установки наведені у таблиці 1.

Таблиця 1.

Коефіцієнти полінома (6), який описує геометричну дисторсію.

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
-0.4257	3.4178	-12.2521	19.8627	-11.7819

Максимальне значення залишкової похибки (невиправленої радіальної дисторсії) на краю зображення становило 1,75 пікселя, тоді як середнє значення не виправленої дисторсії – 0.6 пікселя.

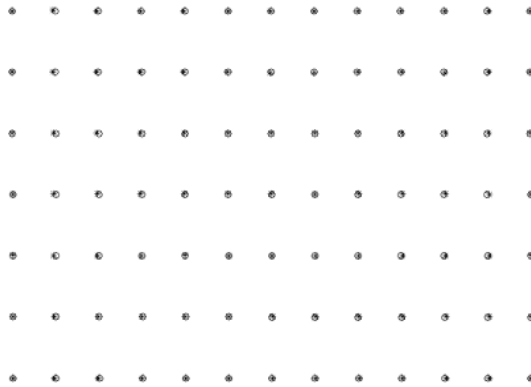


Рис. 5. Розраховані відхилення положення точок тестового зображення (*) від істинного положення (□).

4. Вирівнювання положення зразка на зображенні.

Під час визначення переміщень елементів поверхні зразка за методом ЦКЗ передбачено, що положення країв зразка строго паралельні до кадру зображення. Реально під час встановлення зразка в навантажувальну машину, щоб забезпечити його точне положення, потрібна довготривала процедура юстування або спеціальні засоби мікропозиціонування. Ми запропонували процедуру вирівнювання положення зразка на зображенні, яка дала змогу забезпечити похибку юстування в один піксель.

Ця процедура охоплює бінаризацію зображення глобальним порогом для виділення меж зразка, апроксимацію нерівних країв зразка прямими та знаходження необхідного кута повороту зображення за середнім кутом нахилу апроксимувальних прямих.

Оскільки під час реєстрації зображень поверхні зразка можна було забезпечити достатній контраст, регулюючи освітлення і фон, то використовували алгоритм бінаризації з глобальним порогом [14], який не потребує значних обчислюваних ресурсів ПК. За алгоритмом [14] будують гістограму зображення і виділяють два класи на зображенні за критерієм максимуму відношення міжкласової дисперсії до дисперсії всього зображення й автоматично визначають поріг бінаризації L . У разі бінаризації зображень, отриманих під час експерименту, розрахований поріг $L = 0,1-0,3$. Унаслідок застосування цього порогу ми отримали достатньо чіткі краї зразка на бінаризованому зображенні (рис. 6).

Краї зразка додатково апроксимували прямими лініями. Необхідність такої апроксимації зумовлена тим, що на бінаризованому зображенні краї зразка мали розриви, спричинені шорсткістю поверхні, яка залишається після його виготовлення. Така апроксимація дала змогу нам точніше визначити кут повороту і зміщення зразка та ліпше провести процедуру вирівнювання його положення.

Після вирівнювання положення об'єкта визначають масштаб зображення за відомим поперечним розміром зразка.

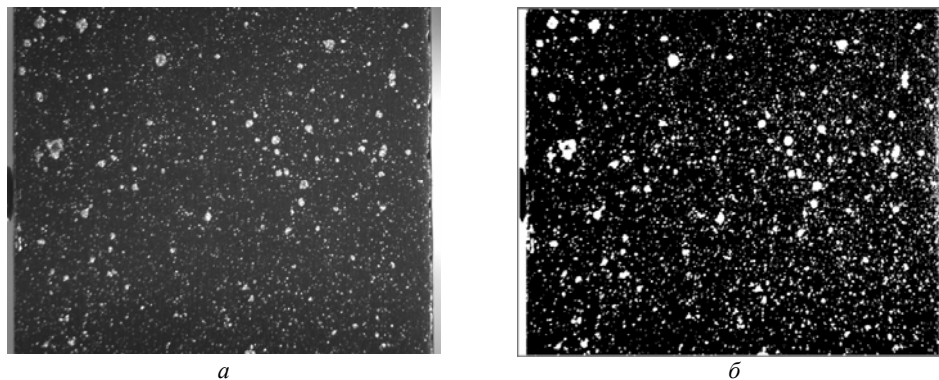


Рис. 6. Зображення досліджуваного зразка (а) та бінаризоване зображення (б).

5. Розрахунок деформацій і модуля пружності досліджуваного матеріалу.

У разі чистого згину, відповідно до висловленої Бернуллі гіпотези плоских перерізів, яка неодноразово експериментально підтверджена, балка деформується по дузі кола. Знаючи радіус кривини цього кола ρ_0 , яке проходить через нейтральний шар, можна розрахувати розподіл деформацій по перерізу зразка [15]:

$$\varepsilon = \frac{y}{\rho_0}, \quad (9)$$

де y – відстань від нейтрального шару.

З використанням даних експерименту про переміщення фрагментів, які отримали методом ЦКЗ, ми могли розрахувати радіус кривизни балкового зразка за певного навантаження та положення центра кола. Тоді в ідеальному випадку для кожного ряду фрагментів, які перебувають на певній відстані від нейтрального шару $0-0'$, радіус кривини повинен змінюватися на значення розміру фрагмента, а координати центра $\{0, \rho_0\}$ – бути сталими (див. рис. 3).

Знайшовши таким способом радіус кривизни зразка за певного навантаження і знаючи розміри зразка, можна визначити його деформації, скориставшись виразом (9), та модуль пружності матеріалу [15]:

$$E = \frac{\Delta M \cdot y}{J_z \cdot \varepsilon}, \quad (10)$$

де J_z – момент інерції перерізу зразка відносно осі Oz ; ΔM – прикладений момент навантаження; y – відстань від нейтральної лінії.

Для оцінки достовірності виконаних вимірювань під час експерименту прогин балкового зразка вимірювали також мікрометричним індикатором. Виміряні значення прогину зразка використали для розрахунку модуля пружності за відомою формулою

$$E = \frac{3\Delta F a l^2}{4b h^3 \Delta w}, \quad (11)$$

де ΔF – приріст навантаження, МН; a – відстань між опорою і точкою прикладання сили, мм; l – відстань між внутрішніми опорами, мм; b , h – ширина і висота зразка, мм; Δw – приріст прогину посередині зразка, мм.

Апроксимація координат центрів зміщених фрагментів дугою кола.

Відомо, що за координатами точок ділянки кола можна визначити, з тою чи іншою похибкою, радіус цього кола ρ_0 і координати центра $\{0, y(\rho_0)\}$, використавши певну процедуру апроксимації.

Апроксимацію точок колом застосовують у різних прикладних задачах, що використовують методи цифрової обробки зображень: в офтальмології для діагностики зору, розпізнавання геометричних примітивів на зображеннях [16], у системах технічного зору, для вимірювання діаметрів циліндричних об'єктів [17] та ін. У цьому разі параметри апроксимуючого кола визначають різними способами, що ґрунтуються на виділенні характерних точок дуги [17], апроксимації точок параболою або колом з різними критеріальними функціями [16, 18].

Є багато праць, присвячених методам апроксимації точок колом. Задача оцінки параметрів кола є нелінійною, тому для її розв'язування головно використовують ітераційні методи [18]. Є також неітераційний – алгебричний підхід, що дає змогу отримати розв'язок в аналітичному вигляді, проте він дає зміщені оцінки параметрів [19].

Одним із найчастіше вживаних критеріїв оптимізації є критерій, що використовує метод найменших квадратів (МНК), за яким мінімізують середньоквадратичне відхилення експериментальних точок від апроксимуючого кола. Це так званий геометричний підхід, за якого мірою відхилення є геометрична відстань між точкою та колом. У разі реалізації цього критерію потрібно використовувати нелінійні методи оптимізації, що призводить до збільшення обчислювальних витрат, однак похибка визначення радіуса кола є мінімальною.

Для визначення параметрів апроксимуючого кола достатньо мати всього три точки, за координатами яких визначають радіус і положення центра кола. Для підвищення точності вимірювань використовували більше точок та статистичну обробку результатів. Математично критерій геометричної оптимізації МНК записують так:

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^N \left(\sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \right)^2 \right\}; \quad (12)$$

$$\rho_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad (13)$$

де (x_j, y_j) – вихідні точки на зображенні ($j = 1, \dots, N$); ρ_0 – радіус апроксимувальної кола; (x_0, y_0) – координати центра кола.

Дисперсія оцінок радіуса і координат суттєво залежить від кількості використаних під час апроксимації точок зображення N , тому для зменшення дисперсії за малих значень N потрібно збільшувати довжину опрацьованої послідовності зображень (кадрів) або усереднювати оцінки, використовуючи додаткові вибірки точок на зображенні.

Для зменшення дисперсії ефективним також є підвищення точності визначення координат вихідних точок зображення, що забезпечене використанням методів субпіксельної локалізації точок на зображенні та апаратних засобів, які збільшують роздільну здатність зображень [20].

У пропонуваному методі вимірювання на одному зображенні є декілька рядів точок $n-n'$, які відповідають центрам фрагментів і які, згідно з теорією чистого згину, повинні розміщуватись на дузі кола радіусом $\rho_0 + n \cdot d$, або $\rho_0 - n \cdot d$, де d – розмір фрагмента, n – кількість фрагментів у поперечному напрямі (див. рис. 3). Радіус кривизни балкового зразка в експерименті змінювався в межах від 10 до 2 м, а розміри фрагментів були близько 5×5 мм². З урахуванням того, що абсолютна похибка вимірювання радіуса кривизни становила $\pm 0,5$ м, та малих розмірів фрагментів ми отримали практично однакові значення радіуса кривизни для різних груп фрагментів. Отже, апроксимуючи координати цих точок методом МНК (вирази (12), (13)), ми визначали радіус для кожного ряду (див. рис. 3) і знаходили середнє $\bar{\rho}_0$. У табл. 2 наведено розраховані значення радіуса кривини і x координати зміщення центра кола для різних груп фрагментів за двох навантажень ΔM .

Таблиця 2

Ряди фрагментів	Розраховані значення радіуса кривини зразка і координати центра кола			
	$\Delta M = 11 \text{ Н*м}$		$\Delta M = 33 \text{ Н*м}$	
	$\rho_0, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$\rho_0, \text{ м}$	$x, \text{ м}$
-(2-2')	21,1	-0,011	8,7	-0,018
-(1-1')	20,4	0,015	8,4	-0,014
(0-0)	20,5	0,016	8,5	0,011
(1-1')	20,6	-0,013	8,1	0,012
(2-2')	20,3	0,014	7,9	-0,017
$\bar{\rho}_0, \text{ м}$	20,58		8,32	

Середнє значення радіуса кривизни $\bar{\rho}_0$, отримане під час експериментів, ми використовували для розрахунку деформацій зразка за виразом (9) та модуля пружності матеріалу за виразом (10). Разом з контрольними значеннями модуля пружності, які

розраховували за виразом (11), отримані результати наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Розрахунок деформацій і модуля пружності матеріалу за радіусом кривизни

Навантаження	$\varepsilon = \frac{y}{\rho_0}$, ($y = 0,011$ м)	$E = \frac{\Delta M \cdot y}{J_z \cdot \varepsilon}$, МПа ($J_z = 3,2 \cdot 10^{-9}$)	$E = \frac{3\Delta F a l^2}{4bh^3 \Delta w}$, МПа
$\Delta M = 11 \text{ Н} \cdot \text{м}$	0,00053	71 344	71 023
$\Delta M = 33 \text{ Н} \cdot \text{м}$	0,00132	85 937	77 127

Отже, на підставі цифрової кореляційної обробки зображень розроблено алгоритм вимірювання переміщень і деформацій балкових зразків та проведено його експериментальну апробацію. З використанням отриманих під час експерименту зображень розраховано радіус викривлення і деформації балкового зразка та модуль пружності досліджуваного матеріалу. Дані, отримані під час дослідження дюралюмінієвого балкового зразка, засвідчують достовірність та ефективність роботи розробленого алгоритму.

Для визначення радіуса кривизни зразка за переміщеннями фрагментів ми використовуємо алгоритм апроксимації малої кількості точок колом. Розробка алгоритмів обробки, у яких визначають форму об'єкта контролю, спонукає більше уваги приділити процедурам калібрування оптичної системи для виправлення геометричних спотворень зображення об'єкта та процедурам усунення руху зразка як твердого тіла. Для цього ми запропонували і програмно реалізували спеціальні алгоритми обробки зображень. Наведений алгоритм обробки зображень можна застосувати в системах машинного зору для контролю форми деталей під час їх виготовлення.

1. Муравський Л.І. Оцінка поперечних зсувів поверхні матеріалу методами спекл-кореляції / Л.І. Муравський, О.П. Максименко, О.М. Сахарук // Відбір і обробка інформації – 2003. – №18. – С. 95–99.
2. Панасюк В.В. Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони перед руйнування / В.В. Панасюк, Я.Л. Іваницький, О.П. Максименко / Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004 – № 5. – С. 67–72.
3. Nunes L.C.S. Parameter estimation using digital image correlation and inverse problems / L.C.S. Nunes, D.A. Castello, C.F. Matt, P.A.M. Santos // Mechanics of Solids in Brazil 2007, Marcilio Alves & H.S. da Costa Mattos (Editors). – 2007. – P. 432–443.
4. Муравський Л.І. Оценка перемещений поверхностей деформируемых объектов и твердых тел техникой оптической спекл-корреляции / Л.И. Муравский, Н.В. Фитьо // Оптич. журн. – 2005 – Т. 72, № 5. – С. 67–72.
5. Максименко О.П. Алгоритм обробки цифрових зображень з усуненням руху твердого тіла / О.П. Максименко, С.А. Нечипорук, А.Р. Дрималик // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів : XVI Міжнар. наук.-техн. конф., 21–26 лютого 2011 р., Славське Львівської обл. – Львів, 2011. – С. 197–200.

6. *Maksymenko O.P.* Study the behavior of thin-sheet constructional material's plastic zone by using digital speckle correlation techniques / O.P. Maksymenko, L.I. Muravsky, Ya.L. Ivanytsky, S.T. Shtayura // 3th International Conference on Materials Testing, TEST 2005: Proceedings. – Nuremberg, 2005. – P. 169–174.
7. *Максименко О.П.* Застосування методу цифрової кореляції зображень для вимірюванні деформацій балкових зразків / О.П. Максименко, Л.Ф. Франкевич, О.М. Сахарук, А.Р. Дрималик // Відбір і обробка інформації. – 2011. – Вип. 35 (111). – С. 102–108.
8. *Половинко Т.І.* Критерій оптимізації параметра фільтра дробового степеня для цифрової кореляції спекл-зображень. / Т.І. Половинко, Л.І. Муравський, І.С. Голинський // Відбір і обробка інформації. – 2010. – Вип. 33(109). – С. 75–82.
9. *Максименко О.П.* Вибір параметра інверсного фільтра для цифрового методу вимірювання зміщень спеклів / О.П. Максименко, Л.І. Муравський, М.О. Литвин // Фіз. методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2003. – Вип. 8. – С. 151–156.
10. *Sutton M.A.* Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements (Basic Concepts, Theory and Applications) / M. A. Sutton, J.J. Orteu, H. Schreier. – Springer, 2009. – 364p.
11. *Писаренко Г.С.* Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев ; Отв. ред. Г.С. Писаренко. – Киев : Наук. думка, 1988. – 736 с.
12. *Жимбуева Л.Д.* Метод определения суммарной дисторсии цифровых изображений / Л.Д. Жимбуева // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 347–355.
13. Automatic correction of lens distortion by using digital image processing, — July 1999. — Режим доступу : <http://www.math.rutgers.edu/~ojanen/>
14. *Ostu N.* A threshold selection method from gray-level histogram, IEEE Trans. Systems Man Cybernet. SMC-8. – 1978. – P. 62–66.
15. *Тимошенко С.П.* Сопротивление материалов, в двух томах / С.П. Тимошенко. – М. : Наука, 1965. – Т.1. – 364 с.
16. *Грибов М.Г.* Определение геометрических параметров объектов по растровым изображениям / М.Г. Грибов, В.М. Хачумов // Автометрия. – 2001. – № 1. – С. 40–49.
17. *Demeyere M.* Measurement of cylindrical objects through laser telemetry: application to a new forest caliper / M. Demeyere, E. Dereine, C. Eugene, V. Naydenov // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. – 2002. – Vol. 51, N 4. – P. 645–649.
18. *Zhang Z.* Parameter estimation techniques: a tutorial with application to conic fitting / Z. Zhang // Image and Vision Computing. – 1997. – Vol. 15, N 1. – P. 59–76.
19. *Chernov N.* Least squares fitting of circles / N. Chernov, C. Lesort // J. of Math. Imaging and Vision. – 2005. – Vol. 23. – P. 239–251.
20. *Михляев С. В.* Аппроксимация окружности при измерении диаметра кристалла / С.В. Михляев // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, № 1. – С. 61–71.

**DIGITAL IMAGE PROCESSING ALGORITHM FOR MATERIAL
DEFORMATION CHARACTERISTICS DEFINITION****O. Maksymenko, L. Frankevych, O. Sakharuk**

*Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine,
5 Naukova St., UA-70601, Lviv, Ukraine
maksymenko@ipm.lviv.ua*

Algorithm for displacement and deformation measurements of a beam specimen surfaces during their loading was developed on the basis of Digital Speckle Correlation technique and its experimental verification was performed. Duralumin beam specimen's radius of curvatures, deformations and coefficients of elasticity was determined experimentally. Received results testify effectiveness of developed algorithm performance.

Key words: digital image correlation, deformation field, measurement algorithm, coefficient of elasticity, radius of curvatures, material beam specimen.

**АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАТЕРИАЛОВ****А. Максименко, Л. Франкевич, А. Сахарук**

*Физико-механический институт им. Г. В. Карпенка НАН Украины,
ул. Научная, 5, 70601, МПС, г. Львов, Украина
maksymenko@ipm.lviv.ua*

На основании цифровой корреляционной обработки изображений разработано алгоритм измерения перемещений и деформаций поверхности балочных образцов во время их нагрузки и проведено его экспериментальную апробацию. С использованием полученных во время эксперимента изображений поверхности образца рассчитано радиус кривизны, деформации дюралюминиевого балочного образца и модуль упругости материала. Полученные результаты демонстрируют эффективность работы разработанного алгоритма.

Ключевые слова: цифровая корреляционная обработка изображений, поля деформаций, алгоритм измерения, модуль упругости, радиус кривизны, балочные образцы материалов.

Стаття надійшла до редколегії 24.12.2012

Прийнята до друку 16.01.2013