

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯ ДЕФОРМАЦІЇ ПЛОСКОЇ ПОВЕРХНІ ЗРАЗКІВ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ КОРЕЛЯЦІЇ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ. (СТАТИЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ)

**В. Б. БЕРЕЗІН, М. Г. ЧАУСОВ** (Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України)

*Аналізуються показники точності розробленого програмного комплексу для експериментального визначення поля деформації за допомогою методу кореляції цифрових зображень. Для підвищення точності роботи запропоновано використання зміни контрасту зображення в методі кореляції цифрових зображень. Продемонстровано роботу комплексу на реальних зразках при статичному навантаженні.*

*Characteristics of accuracy of the developed program package for experimental determination of deformation field are analyzed using the method of digital image correlation. To improve operation accuracy, it is proposed to apply the change of image contrast in the method of digital image correlation. Complex operation is demonstrated on real samples at static loading.*

Сучасне машинобудування неможливе без використання деталей складної геометричної форми, нових конструкційних матеріалів з заданими фізико-механічними властивостями. Проте температурні градієнти, дефекти у зварних швах та концентрація напружень часто призводять до руйнування об'єкту. Щоб цьому запобігти, доводиться збільшувати коефіцієнт запасу міцності, що призводить до зниження економічних показників конструкції.

У зв'язку з цим актуальним є вдосконалення відомих та розробка нових сучасних методів та способів контролю напружено-деформованого стану машин та конструкцій.

Зокрема методи вимірювання поля деформації дозволяють отримати важливу інформацію як про механічну поведінку матеріалів, так і про стан деталей і конструкцій. На даний момент існує ряд експериментальних методів для вимірювання поля деформації: фотопружність, муар-інтерферометрія, оптична голографія, електронна спекл-інтерферометрія, метод кореляції цифрових зображень та ін. [1].

З цього ряду можна виділити метод кореляції цифрових зображень (КЦЗ) як дешевий, простий та точний інструмент для експериментального дослідження поля деформації як в лабораторних, так і в польових умовах. Робочий діапазон методу по деформаціям становить 0...1000 %. Типова точність визначення локальної деформації методом КЦЗ становить до 0,01 % абсолютної похибки [2]. Також він дає можливість досліджувати швидкоплинні процеси деформування за допомогою високошвидкісних цифрових камер [3]. З деякими апаратними модифікаціями метод КЦЗ дозволяє вимірювати поле деформації на криволінійних поверхнях та розподілення деформації у об'ємі матеріалу [1].

Для технічної реалізації цього методу на кафедрі механіки, опору матеріалів та будівництва Національного університету біоресурсів і природокористування України було розроблено експериментально-вимірювальний комплекс для проведення обробки цифрових зображень [4].

Метод КЦЗ складається з трьох етапів:

- підготовки досліджуваної поверхні — нанесення стохастичної текстури (літографія, розпилення фарби чи тонеру або інші методи);
- запису процесу деформування (рис. 1), який полягає в отриманні послідовності фотографій (чи відеозапису) досліджуваної поверхні;
- аналізу отриманих зображень поверхні.

Суть методу КЦЗ полягає в аналізі зображень поверхні. Очевидно, що при деформації матеріалу деформується і нанесена на нього текстура. При цьому поле деформації текстури відповідає дійсному полю деформації матеріалу. Це і є основною ідеєю методу.



Рис. 1. Апаратна частина для реєстрації поля деформації: 1 — цифрова камера; 2 — джерело світла; 3 — зразок з нанесеною стохастичною текстурою; 4 — динамометр



Розглянемо два зображення деякої ділянки поверхні з текстурою до і після її деформації (рис. 2).

Основна задача методу КЦЗ полягає у встановленні відповідності між точками цих двох зображень. Розглянемо два масиви чисел, що відповідають базовому зображенню поверхні та зображенню цієї поверхні після твердотільного переміщення на ціле число пікселів (рис. 3).

З рис. 3 видно, що положення точки у зміщеному зображенні можна однозначно встановити, відслідковуючи переміщення деякої області (елемента), до якої належить ця точка.

Проте ця область може бути зміщена на нецілозначельні значення переміщення, або бути деформованою. Для врахування цих аспектів вводиться поняття функції переміщень для області, а для визначення інтенсивності в точці використовують бікубічну чи базисну сплайн-інтерполяцію (наприклад, чотирьохточкову) [1]. Функція переміщень задає відповідність між точками базового і деформованого зображень, в даному програмному комплексі вона має вигляд функції переміщення для чотирьохточкового ізопараметричного елемента [5]:

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{1}{4}X_0(1-r)(1-s) + \frac{1}{4}X_1(1+r)(1-s) + \\ &+ \frac{1}{4}X_2(1+r)(1+s) + \frac{1}{4}X_3(1-r)(1+s) = \\ &= \frac{1}{4}(X_0h_0 + X_1h_1 + X_2h_2 + X_3h_3), \\ y^* &= \frac{1}{4}Y_0(1-r)(1-s) + \frac{1}{4}Y_1(1+r)(1-s) + \\ &+ \frac{1}{4}Y_2(1+r)(1+s) + \frac{1}{4}Y_3(1-r)(1+s) = \\ &= \frac{1}{4}(Y_0h_0 + Y_1h_1 + Y_2h_2 + Y_3h_3), \end{aligned}$$

де  $r, s$  — локальні координати елемента;  $X_i, Y_i$  — координати відповідних вершин деформованого елемента (або параметри без геометричного змісту для елементів непрямокутної форми).

Для визначення координат вершин деформованого елемента використовують оптимізацію міри відповідності заданої для множини точок базового зображення (незмінна в процесі оптимізації) та множини точок, що визначається параметрами функції переміщень (змінюється в процесі оптимізації). При цьому, як правило, використовують одну із цих двох форм міри відповідності [1]:

1) квадратичне відхилення (мінімізується):

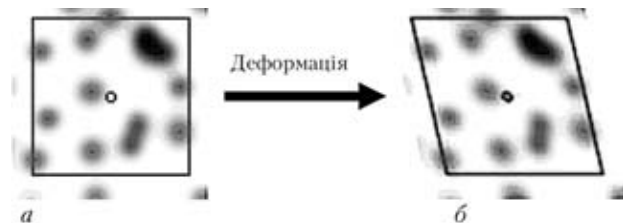


Рис. 2. Зображення поверхні відповідно до деформації (базове) (а) та після (деформоване) (б)

$$\sum \sum (A(x, y) - B(x^*, y^*))^2;$$

2) крос-кореляція (максимізується):

$$\frac{\sum \sum A(x, y) B(x^*, y^*)}{\sum \sum A(x, y) \sum \sum B(x^*, y^*)} \quad (1)$$

В даному комплексі використовується така форма міри відповідності [1]:

$$Q = \sum \sum (A(x, y) - C B(x^*, y^*) - D)^2, \quad (2)$$

де  $C$  — коефіцієнт, що враховує зміни в контрасті поверхні;  $D$  — коефіцієнт, що враховує лінійний зсув в освітленні;  $x, y$  — координати точки в базовому зображенні;  $x^*, y^*$  — координати точки в деформованому зображенні;  $A, B$  — інтенсивності базового і деформованого зображень відповідно.

Під знаками суми у виразі (2) слід розуміти, що обчислення проводяться для кожного пікселя елемента у базовому і для відповідного йому пікселя у деформованому зображеннях. При цьому масив пікселів, що утворюють елемент, може мати довільну форму.

Новим у формулі (2) є те, що коефіцієнт  $C$  в даному комплексі являє собою величину, що враховує не тільки освітленість, але й вплив деформації. При цьому модифікована формула (2) застосовується на ділянках з низьким значенням модуля градієнта інтенсивності (менше 30 % середнього значення по базовій ділянці), що продиктовано низьким значенням амплітудної похибки інтерпольованого значення інтенсивності.

Значення коефіцієнта  $C$  обчислюється таким чином:

$$C = C_0 + k\varepsilon_x\varepsilon_y,$$

де  $C_0$  — зміна в контрасті зображення внаслідок освітлення;  $k$  — коефіцієнт чутливості контрасту зображення до деформації;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  — деформації в даній точці згідно поточних параметрів функції переміщень.

Використання такої модифікації формули (2) дозволило зменшити похибку визначення деформації на 5...20 % при аналізі синтетично згенерованих зображень поверхні [4].

Наступним етапом роботи комплексу є оптимізація міри відповідності, що проводиться у два етапи:

– грубий пошук положення елемента у базовому зображенні (пошук області, зміщеної на ціле число пікселів відносно базової, що мінімізує міру відповідності в деякому околі);

– оптимізація міри відповідності методом Левенберга–Маквардта. На цьому етапі визначаються оптимізовані значення параметрів, що входять до міри відповідності, а отже, і координати вершин деформованого елемента.

Останнім етапом роботи комплексу є збирання елементів у сітку, тобто встановлюється

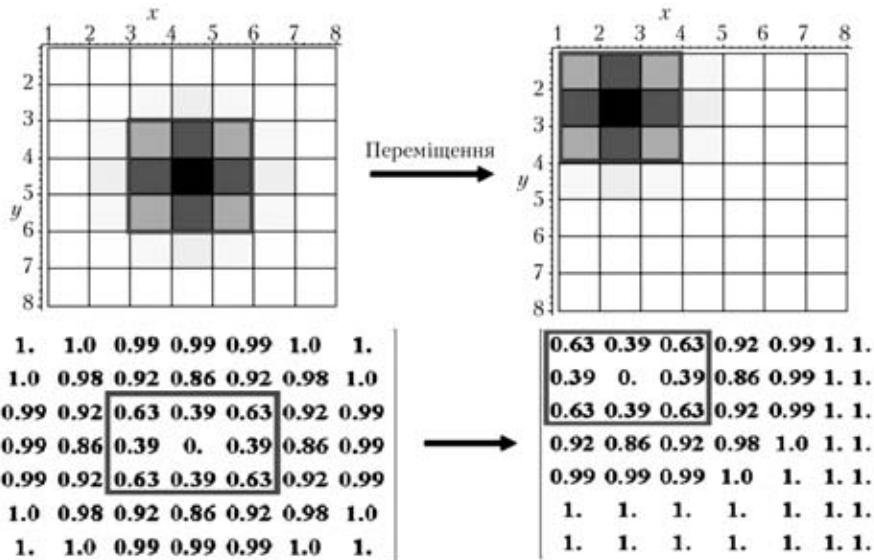


Рис. 3. Вплив твердотільного переміщення на цифрове зображення

відповідність між точками елемента та координатами вершин сітки. Це проводиться з метою утворення неперервного поля переміщень. Утворення сітки елементів наведено на рис. 4.

Створення такої сітки аналогічне утворенню глобальної матриці жорсткості у методі скінчених елементів і часто використовується у КЦЗ [5]. При цьому проводиться додаткова оптимізація міри відповідності з точки зору утворення елементами сітки. Проте в даному комплексі використовується не повна матриця жорсткості, а лише її головна діагональ з метою підвищення швидкості роботи. Детальніше про алгоритм роботи комплексу можна дізнатись з роботи [4].

Наприкінці проводиться згладжування отриманого поля переміщень на основі сітки методом плаваючих найменших квадратів [6]. Значення деформації у точці визначається диференціюванням згладженого поля переміщень.

Для оцінки точності роботи комплексу було проведено ряд тестів на синтетичних зображеннях, перевагою яких є абсолютно точне завдання дійсного поля переміщення. На синтетичне зображення було нанесено поля переміщень, що відповідають розтягу, стиску, чистому зсуву, трьохпорному

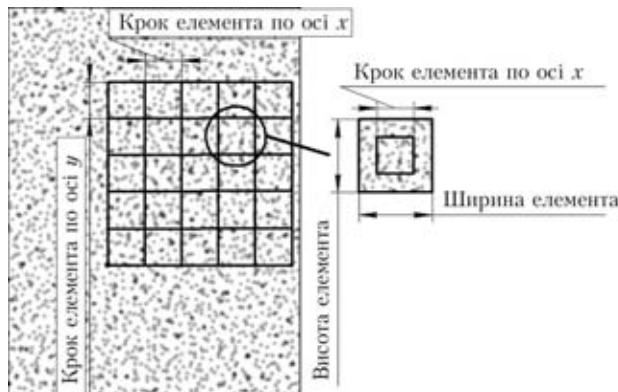


Рис. 4. Утворення сітки елементів для визначення поля переміщень

згину та їхній комбінації. Після визначення поля переміщень програмним комплексом на цих зображеннях обчислювалась похибка визначення деформації за максимальною різницею між локальною деформацією, отриманою методом кореляції цифрових зображень (без врахування зміни контрасту при деформуванні), та дійсним значенням деформації на синтетичному зображенні.

На основі аналізу відповідних даних вираз для похибки визначення деформації із імовірністю в 95 % при фільтрації з розміром вікна 5x5 еле-

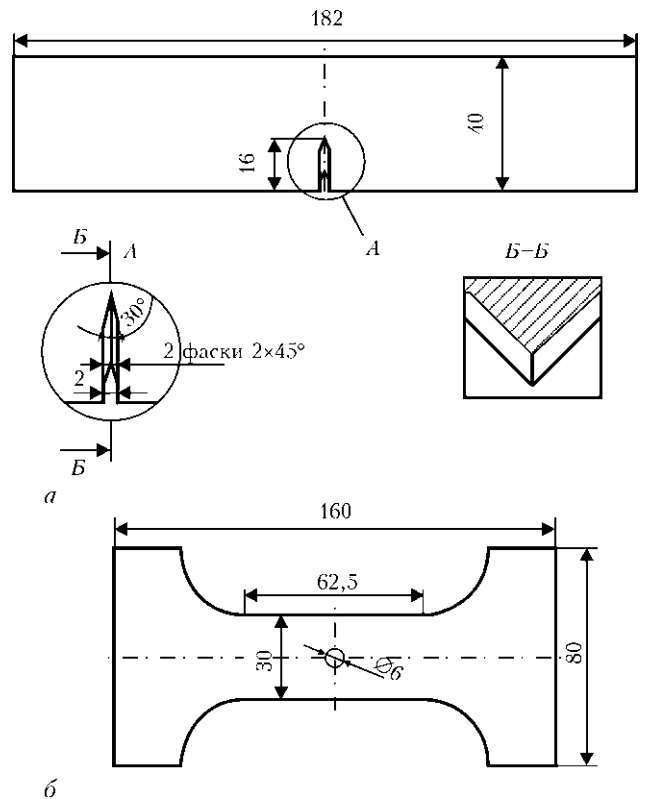


Рис. 5. Зразки для дослідження різних полів деформації: а — з реакторної сталі для трьохпорного згину; б — з авіаційної гуми з отвором для статичного розтягу



ментів базового поля та кроком сітки 10 пікс. методом плаваючих найменших квадратів можна подати у наступному вигляді:

$$\Delta \varepsilon = \frac{500 \text{ пікс } c}{k-1} + \frac{1}{2} \frac{0,003 \text{ пікс}^{-2}}{c^2} + 0,67 Q + 0,083 Q^2 + \frac{4,88 \cdot 10^5 + 8,77 \cdot 10^5 Q^{0,67}}{n^4 K}$$

де  $\Delta \varepsilon$  — середнє значення максимального відхилення при визначенні деформації, взяте у відсотках;  $n$  — розмір сторони елемента, пікс.;  $k$  — умовний порядок фільтру інтерполяції (для базисних сплайнів ця величина відповідає його порядку);  $c$  — середнє значення похідної по відповідній координаті зображення, пікс<sup>-1</sup>;  $Q$  — амплітудне значення білого шуму на зображенні, взяте у відсотках;  $K$  — коефіцієнт, що враховує вид інтерполяції (для базисних сплайнів  $K = 1 \text{ пікс}^{-4}$ ).

Слід відмітити, що типовий крок сітки становить 5 пікс., а розмір поля фільтрації 7×7 — 20×20 елементів, що дозволяє досягати середнього зна-

чення максимальної похибки визначення деформації менше ніж 0,01 % для зображень розміром 1000×1000 пікс. З метою оцінки точності роботи на зображеннях реальних поверхонь було проведено відповідні експерименти на зразках (рис. 5). Поле переміщень визначалося за допомогою прямокутних елементів розміром 25×25 пікс. та кроком 15×15 пікс.

Відповідні результати випробувань зразка з реакторної сталі на трьохточковий згин подані на рис. 6.

Визначення поля деформації гумового зразка з отвором при розтягу подано на рис. 7. Вісь прикладання зусилля —  $x$ .

З отриманого на рис. 6 поля деформації для реакторної сталі можна зробити висновок про достатню чутливість даного комплексу до місць з концентрацією деформації (чи про просторову роздільну здатність) та про значний вплив розміру елементів текстури (середній розмір близько 10 пікс.). Тобто для отримання точності по деформації 0,01 % чи

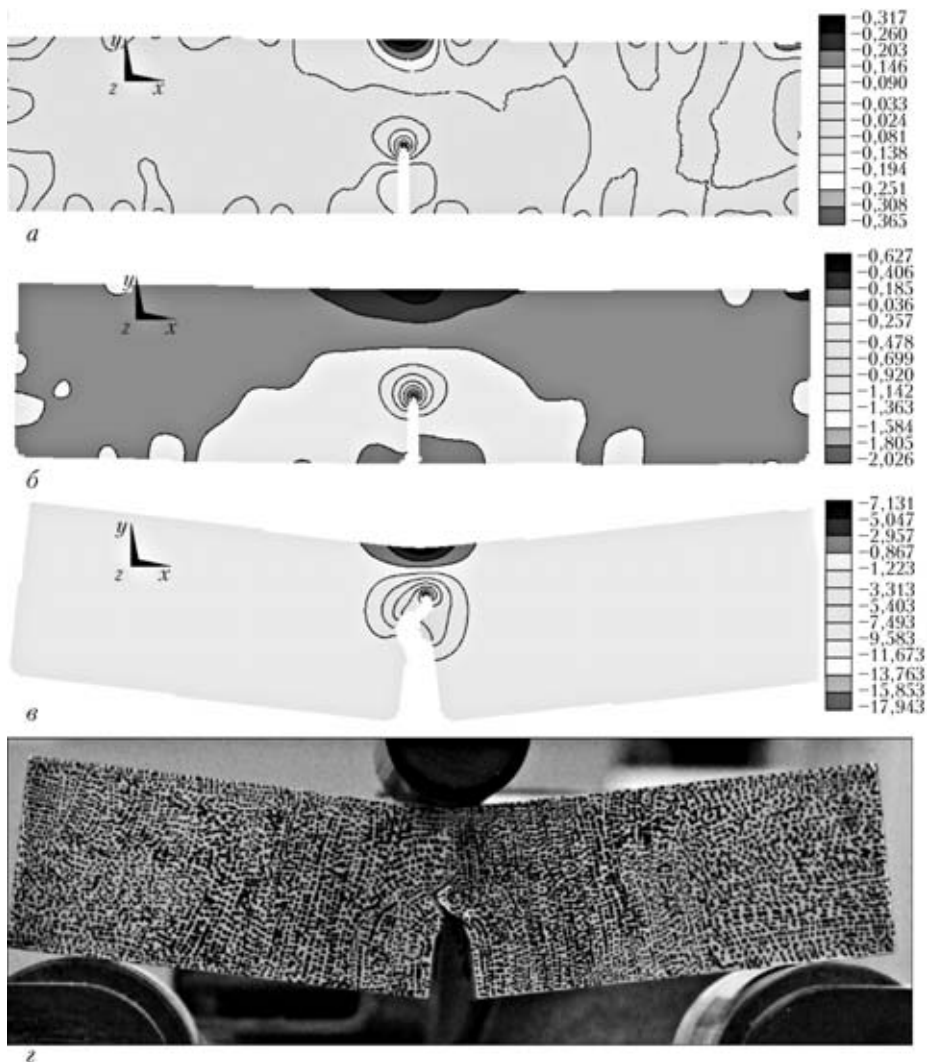


Рис. 6. Поле деформації  $\varepsilon_{xx}$ , %. Алгоритм автоматично видаляє елементи з коефіцієнтом крос-кореляції меншим за 80 % (за формулою (2)) для забезпечення достовірності результатів: а —  $F = 0,8 \text{ кН}$ ; б — 3,8; в — 7,8; з — вигляд зразка з нанесеною текстурою при  $F = 7,8 \text{ кН}$

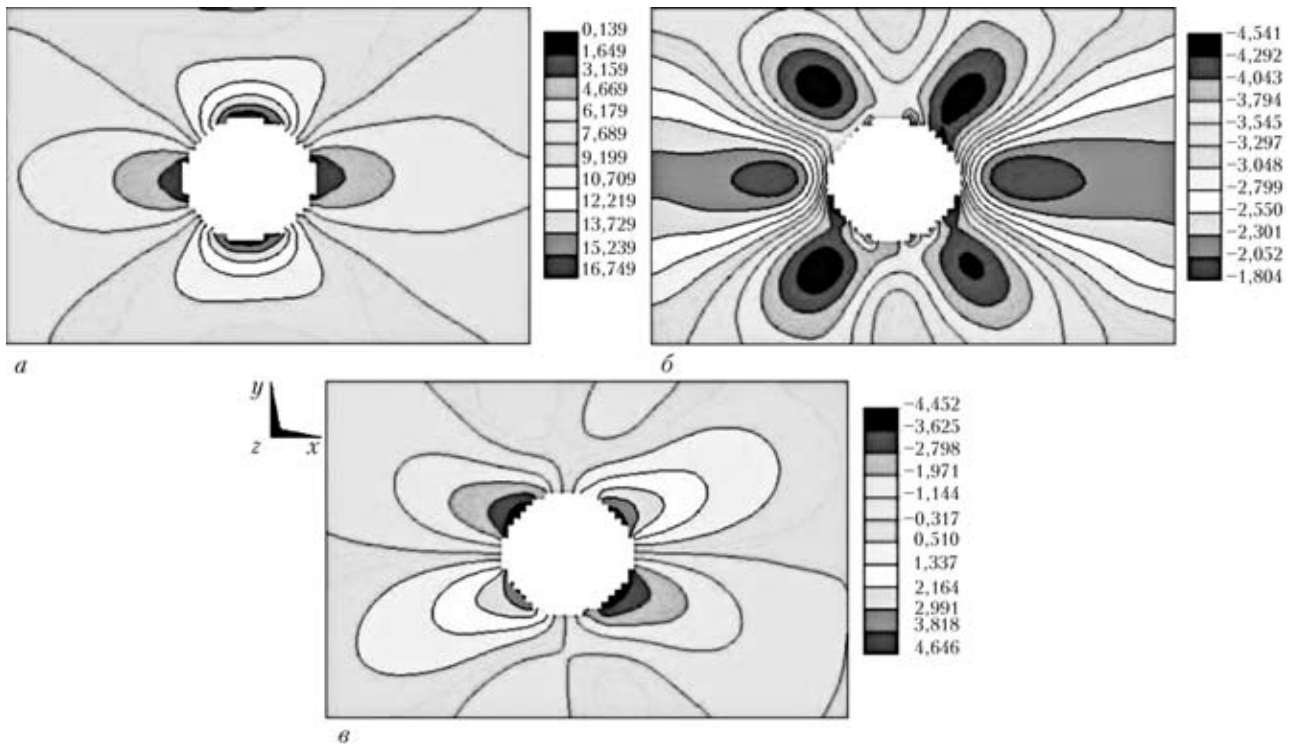


Рис. 7. Поля деформції для зразка з авіаційної гуми ( $F = 0,5$  кН), %:  $a — \epsilon_{xx}$ ;  $b — \epsilon_{yy}$ ;  $v — \epsilon_{xy}$

краще слід використовувати текстури з розміром елемента менш ніж 4 пікс., що підтверджується відповідними експериментами на синтетичних зображеннях.

В свою чергу, результати, отримані на авіаційній гумі (рис. 7), підтверджують роботоздатність комплексу при значних деформаціях.

З метою перевірки впливу зміни в контрасті на точність визначення деформацій на зображеннях поверхні гумового зразка було проведено такий експеримент: спочатку визначалось поле деформації без врахування змін в контрасті (БЗК) поверхні, використовуючи елемент розміром  $28 \times 28$  пікс., а потім визначалося поле переміщення з врахуванням змін у контрасті (ВЗК) при розмірі елемента  $28 \times 28$  пікс. Отримані результати порівнювались з отриманими БЗК при розмірі елемента  $30 \times 30$ , тобто обчислювались відхилення значень деформації між ВЗК та БЗК з елементом  $30 \times 30$  пікс. і між БЗК з елементом  $28 \times 28$  пікс. та БЗК з елементом  $30 \times 30$  пікс.

Результати з ВЗК мали на 12 % менше абсолютне максимальне відхилення та на 5 % менше середнє відхилення порівняно з БЗК. Це свідчить про доцільність використання інформації про зміну контрасту поверхні від деформування.

Для безпосередньої перевірки точності визначення деформації зразок з алюмінієвого сплаву Д16 (рис. 8,  $a$ ) був статично розтягнутий з одночасною реєстрацією деформації екстензометром на базі 10 мм та оптичним комплексом (рис. 8,  $b$ ). При цьому методом КЦЗ деформація визна-

чалась як середнє арифметичне локальної деформації у точках, зазначених на рис. 8,  $a$ .

З рис. 8,  $b$  видно деяку різницю у деформаціях, визначених різними методами, що можна пояснити відносно малим розміром елемента кореляції —  $30 \times 30$  пікс. та рівнем шуму у 8 %. Також найбільше відхилення між деформаціями спостерігається у момент переходу від пружного до пластичного стану матеріалу. Це пояснюється тим, що екстензометр вимірює деформацію на базі 10 мм і відповідно менш чутливий до неоднорідностей, а експериментально-вимірювальний

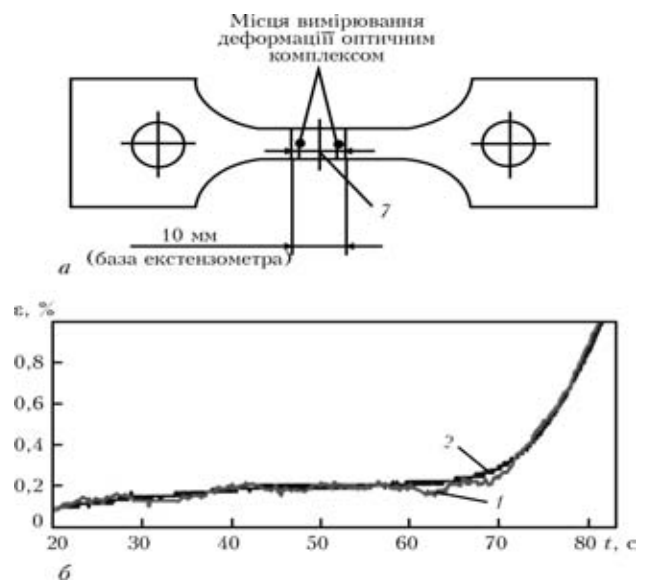


Рис. 8. Порівняння деформації, визначеної методом КЦЗ (1) та екстензометром (2):  $a —$  схема вимірювання деформації;  $b —$  розгортка деформації у часі



комплекс — усереднену локальну деформацію по двом точкам. При цьому максимальне відхилення між кривими 1 та 2 з рис. 8, б становить 0,03 %, а середнє відхилення — 0,006 %. Це можна вважати підтвердженням про точність комплексу до 0,01 % при визначенні деформації.

З зазначеного вище можна зробити висновок, що комплекс дозволяє отримувати надійні результати по розподілу деформації на плоскій поверхні для зображень, що відповідають реальним текстурованим поверхням, знятих при статичному розтягу.

Даний комплекс дозволяє досліджувати поле деформації і при динамічних процесах зміни деформації, оскільки як при достатньо високій швидкості кадрів та відповідному значенні експозиції, розмиттям зображень, отриманих при зйомці динамічних процесів, можна знехтувати.

### Висновки

Розроблено експериментально-вимірний комплекс з можливістю визначення поля деформації на плоскій поверхні з амплітудою локальної похибки до 0,01 %.

На реальних зразках із реакторної сталі і авіаційної гуми та алюмінію продемонстровано роботу комплексу при квазістатичних умовах на-

вантаження. Відповідні результати підтверджують працездатність комплексу на реальних текстурованих поверхнях.

Інформацію про зміну контрасту внаслідок деформування доцільно використовувати при обробці зображень реальних поверхонь.

1. *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics* / Jr. Sharpe, N. William (Ed.). – 2008. — XXX. — 1098 p.
2. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements Basic Concepts, Theory and Applications* / Michael A. Sutton, J.-J. Orteu, Hubert W. Schreier. — 2009. — 332 p.
3. *Madhu S. Kirugulige, Hareesh V. Tippur, Thomas S. Denny. Measurement of transient deformations using digital image correlation method and high-speed photography: application to dynamic fracture.* — *Appl. Opt.* 46. — 2007. — P. 5083–5096.
4. *Березін В. Б., Чаусов М. Г., Лучко Й. Й.* Оптичний комплекс для безконтактного дослідження поля деформації плоскої поверхні методом кореляції цифрових зображень // *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій: Зб. наук. пр.* — Львів: Каменяр, 2011. — Вип. 9. — С. 212–220.
5. *Besnard, G., Hild, F. & Roux, S.* «Finite-element» displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Chatelier bands // *Exp. Mech.* — 2006. — 46. — P. 789–803.
6. *Lancaster P., Salkauskas K.* Surfaces generated by moving least squares methods // *Math. Comp.* — 1981. — 37, № 155. — P. 141–158.

Надійшла до редакції  
21.03.2011

## Новые книги

**Скальський В. Р., Сулим Г. Т.**

Основи акустичних методів неруйнівного контролю : навч. посіб. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. – 386 с.

Викладено теоретичні основи та розглянуто методологію неруйнівного контролю матеріалів, виробів і елементів конструкцій акустичними методами. Наведено класифікацію акустичних методів неруйнівного контролю, детальний аналіз виникнення та поширення пружних хвиль у твердих тілах; сформульовано засади ультразвукового неруйнівного контролю; описано фізичні основи та методи акустико-емісійного неруйнівного контролю зародження та розвитку руйнування у твердих тілах, розглянуто принципи дії технічних засобів, які дають змогу перетворювати пружні хвилі в електричні сигнали акустичної емісії.

Для студентів вищих навчальних закладів, наукових працівників та інженерів-дослідників, аспірантів і викладачів.

**Троицкий В. А.**

Вихретоковый контроль: учеб. пособ. – Киев, Феникс. – 2011. – 140 с.

Во втором квартале 2011 г. выйдет в свет книга В.А. Троицкого «Вихретоковый контроль». В ней рассмотрены теоретические и практические вопросы вихретокового контроля качества материалов и изделий. Для задач диагностики элементов энергетического, аэрокосмического и др. комплексов рассмотрены методики обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов. Используются материалы для подготовки дефектоскопистов согласно уставам российского (РОНКТД), украинского (УОНКТД) и американского (ASNT) обществ неразрушающего контроля по трем уровням квалификации в соответствии с требованиями ISO 9712, EN 473, SNT-TC-1A, ДСТУ EN 473.

Пособие может быть использовано учебными и аттестационными центрами разной ведомственной принадлежности.