

УДК 620.174.22;528.854

## ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

О. П. МАКСИМЕНКО, Л. Ф. ФРАНКЕВИЧ, О. М. САХАРУК

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів*

На основі цифрової кореляційної обробки зображень розроблено спосіб безконтактного визначення розподілів деформацій на поверхні балкових зразків та модуля пружності зразків, виготовлених з дюралюмінію та склотекстоліту, за навантаження згинальним моментом. Описано методику вимірювань і алгоритм обробки даних.

**Ключові слова:** *модуль пружності, цифрова кореляція, розподіл деформацій, обробка зображень.*

Під час створення нових композиційних матеріалів (КМ), проектування конструкцій і виробів з них, виникає потреба експериментального визначення їх механічних характеристик під час деформування аж до моменту спонтанного руйнування. Застосування існуючих методик випробувань зразків матеріалів передбачає механічний контакт з поверхнею композитного зразка, що призводить до появи додаткових похибок вимірювання. Використання контактних або наклеєних тензоперетворювачів для низькомодульних КМ зумовлює їх зміцнення, а відхилення осі чутливості перетворювача відносно орієнтації структури армування викликає значні похибки вимірювання деформацій [1].

У зв'язку з цим актуальною є розробка безконтактних способів і пристроїв для визначення переміщень поверхонь та деформацій зразків матеріалів під час навантаження. Крім того, безконтактні методи вимірювання можуть застосовувати для дослідження зразків матеріалів, які знаходяться під дією агресивних середовищ і температури.

Серед безконтактних методів чільне місце займають оптичні та інтерферометричні методи дослідження властивостей КМ [2], однак вони потребують складного лабораторного обладнання, трудомісткі, чутливі до вібрацій з малим діапазоном вимірювання  $D$  – за їх високої чутливості  $\Delta D$  динамічний діапазон

$V = \frac{D}{\Delta D} \approx 150 \dots 240$  [3]. Для дослідження деформаційних характеристик КМ та

нових низькомодульних матеріалів потрібні вимірювальні пристрої, які б забезпечували більший динамічний діапазон вимірювання деформацій і були завадостійкими до вібрацій. Серед безконтактних методів такі властивості має цифрова кореляція зображень (ЦКЗ) поверхні зразків матеріалів [4]. Цей метод має меншу чутливість, але забезпечує на порядок більший динамічний діапазон вимірювання  $V \approx 2000$  [5]. Раніше [6, 7] запропоновано і апробовано низку нових методик визначення деформацій зразків матеріалів на основі ЦКЗ, які мають просту технічну реалізацію і достатньо високу чутливість.

Тут запропоновано спосіб безконтактного визначення модуля пружності матеріалу за його згину на основі побудованих розподілів деформацій по перетину балкового зразка, які визначають експериментально за допомогою ЦКЗ.

**Підготовка і вимірювання.** Для апробації запропонованого способу вимірювання створили експериментальну установку, яка складається з навантажувальної машини з механічним ручним приводом, динамометра і цифрового контролера для вимірювання навантаження, оптичної частини та персонального комп'ютера (ПК) з програмним забезпеченням, яке реалізує алгоритм ЦКЗ (рис. 1).

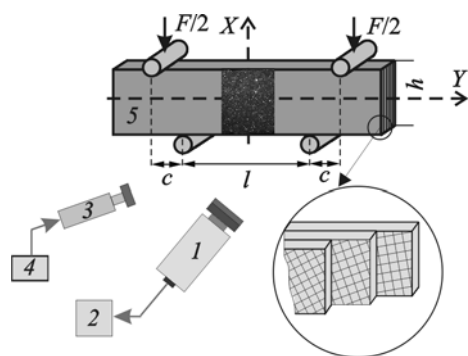


Рис. 1. Схема експериментальної установки для визначення модуля пружності матеріалів методом цифрової кореляції зображень: 1 – цифрова відеокамера; 2 – ПК; 3 – освітлювач; 4 – блок живлення; 5 – дослідний зразок.

Fig. 1. Scheme of the experimental setup for determination of the material elastic modulus by image digital correlation technique: 1 – digital video camera; 2 – PC; 3 – illumination source; 4 – power supply; 5 – studied specimen.

Прямокутні зразки довжиною  $L = 172$  mm, висотою  $h = 22$  mm і товщиною  $b = 3,6$  mm виготовляли з листового багатошарового склотекстоліту марки СТ та дюралюмінію Д16. По товщині зразка зі склотекстоліту розміщувалось 14 шарів полотняної тканини на основі скловолкна, різноорієнтованих по утоку і просочених термореактивною смолою (рис. 1). Навантажували зразки згинальним моментом  $\Delta M = cF/2$  в площині  $Oxy$ , яка паралельна площині розміщення шарів зразка СТ. Центральну частину поверхні зразка, де вимірювали переміщення, фарбували чорною фарбою і створювали випадкову плямисту структуру, розпилюючи зверху сріблясту фарбу (рис. 1).

Встановивши зразок у навантажувальну машину і юстувавши оптичну систему за допомогою тестового об'єкта, визначали масштаб зображення  $\beta = 18 \mu\text{m}/\text{pixel}$  з похибкою  $\pm 0,2 \mu\text{m}/\text{pixel}$ . Оптична частина установки побудована так, що поле спостереження охоплює всю висоту  $h$  досліджуваного зразка.

Щоб визначити деформації зразка методом ЦКЗ, за допомогою цифрової відеокамери реєстрували послідовно два цифрових зображення поверхні зразка – без навантаження і після прикладання моменту  $\Delta M$ .

Далі зареєстровані зображення за допомогою ПК і спеціалізованої програми автоматично розбивали на однакову кількість фрагментів, які відтворюють в певному масштабі елементарні площадки поверхні зразка. Відносні переміщення фрагментів першого і наступного зображення відслідковували, розраховуючи зміщення положення максимуму крос-кореляційної функції цих фрагментів

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

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

Відомо, що зменшення розмірів фрагментів збільшує просторову роздільну здатність методу ЦКЗ, однак при цьому зростає випадкова складова похибки визначення переміщень. Аналіз зображень, зареєстрованих під час експерименту, показав, що задовільні результати з малою випадковою похибкою можна отрима-

ти для фрагментів розміром  $n_1 \times n_2 \geq 1 \cdot 10^4$  пікселів. Щоб забезпечити малу похибку вимірювання переміщень і не втратити просторову роздільну здатність, під час визначення деформацій по висоті зразка (за координатою  $0x$ ) використовували не квадратні, а прямокутні за формою фрагменти  $n_1 \times n_2 = 60 \times 140$  пікселів, які за координатою  $x$  розміщувались впритул один до одного, а за координатою  $y$  перекривали один одного з кроком  $p = 70$  пікселів. Враховуючи параметри розробленої оптичної схеми експериментальної установки, кожному фрагменту зображення відповідала елементарна прямокутна площадка на поверхні зразка розміром  $1,08 \times 2,52$  mm. Таким чином, всю поверхню зразка в зоні вимірювання умовно розбивали на  $21 \times 13$  елементарних площадок, відносні переміщення яких ( $\Delta x, \Delta y$ ) в площині зразка  $0xy$  і визначались під час експерименту (рис. 2).

Рис. 2. Положення елементарних площадок на поверхні балкового зразка: 3–3' і 6–6' – симетрично розміщені елементарні площадки за різних баз вимірювання;  $M$  – згинальний момент навантаження;  $p$  – крок перекриття елементарних площадок;  $L_6$  – найбільша база вимірювання;  $n_1 \times n_2$  – розміри площадок у пікселях.

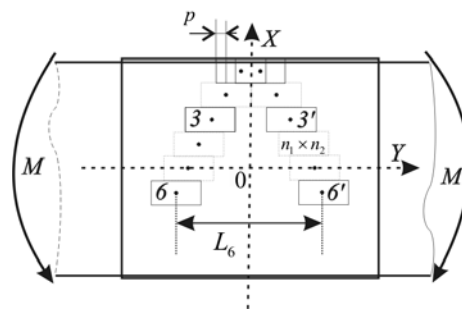


Fig. 2. Elementary areas location on the beam specimen surface: 3–3' and 6–6' – symmetrically located elementary areas for different measurement bases;  $M$  – loading bending moment;  $p$  – step of elementary areas overlapping;  $L_6$  – the biggest measurement base;  $n_1 \times n_2$  – area dimensions in pixels.

Переміщення площадок розраховували за зміщеннями координат максимуму функції крос-кореляції (1) так:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \beta \cdot k_m, \\ \Delta y &= \beta \cdot l_m, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\beta$  – масштаб зображення.

Щоб точніше визначити зміщення максимуму кореляційного піка ( $k_m, l_m$ ), використовували спеціальні цифрові алгоритми обробки, які дають змогу отримати субпіксельне розділення [4]. Розроблений алгоритм визначення положення максимуму кореляційного піка з імовірністю 0,95 забезпечує експериментальну похибку визначення відносних переміщень фрагментів зображення, яка не перевищує 0,1 пікселя, що відповідає абсолютній похибці визначення відносних переміщень елементарних площадок на поверхні зразка  $\Delta_{x,y} \approx 2 \mu\text{m}$ .

Враховуючи, що похибки вимірювання деформацій обернено пропорційні величині бази вимірювання, для збільшення точності вимірювання деформацій в напрямку осі зразка визначали переміщення елементарних площадок, які розміщені симетрично відносно осі  $0x$  на відстанях  $L_d = 2\beta p d$ , де величина  $d = 1 \dots 6$  відповідає базі вимірювань, тобто відстані між центрами симетрично розміщених елементарних площадок 1–1' і т. д. (рис. 2). Під час обробки результатів вимірювання для розрахунку модуля пружності матеріалу використовували три найбільші бази вимірювання 4–4', 5–5', 6–6'. Для бази  $L_6$  відносна похибка вимірювання деформацій поверхні зразка  $\delta \epsilon_y = \frac{\Delta y}{L_6}$  не перевищувала 0,013%. Дослідження з

оцінки похибок вимірювання деформацій балкових зразків за методом ЦКЗ показали, що вони одного порядку з похибками, які виникають за тензометрування або прогину зразка [8].

Під час деформування балкових зразків згинальним моментом відбувається складне переміщення поверхні зразка, яке має три компоненти – поворот, деформація і зміщення зразка як твердого тіла відносно осі оптичної системи. Щоб врахувати ці зміщення, поле спостереження вибирали трохи більшим за висоту зразка  $h$  і використовували спеціально розроблену процедуру обробки зображень з усуненням руху твердого тіла [9]. Застосування цього алгоритму дало змогу точніше побудувати поля переміщень поверхні і розрахувати деформації по всьому поперечному розміру зразка.

Під час експерименту до зразка прикладали зусилля  $F$  від 0 до 1000 N, яке контролювали цифровим контролером ХКЗ118Т1 з абсолютною похибкою 0,1 N, а прогин зразка вимірювали мікрометричним індикатором з похибкою  $\pm 1 \mu\text{m}$ .

**Обробка результатів вимірювання.** Визначивши переміщення елементарних площадок поверхні зразка за виразом (2), розраховували його відносні осьові деформації за різних баз вимірювання так:

$$\varepsilon_y^d(x) = \frac{\Delta y}{L_d} \quad (3)$$

На основі цих деформацій (3) будували графіки розподілів деформацій по висоті зразка (рис. 3).

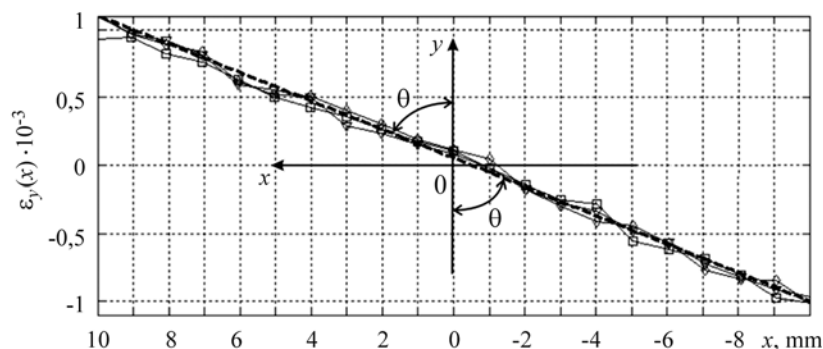


Рис. 3. Розподіли відносних деформацій  $\varepsilon_y(x)$  по перетину балкового зразка з КМ за навантаження моментом  $\Delta M = 9 \text{ N}\cdot\text{m}$  для трьох баз вимірювання 4–4' (◻); 5–5' (◊); 6–6' (▴):  $\theta$  – кут нахилу розподілу деформацій відносно осі  $Oy$ ,  $L$  (---) – апроксимувальна залежність.

Fig. 3. Distribution of relative deformations,  $\varepsilon_y(x)$  along the width of a beam specimen made of composite material, under loading by moment  $\Delta M = 9 \text{ N}\cdot\text{m}$ , for the three measurement bases 4–4' (◻); 5–5' (◊); 6–6' (▴):  $\theta$  – inclination angle of deformation distribution relative to the axis  $Oy$ ,  $L$  (---) – approximating dependence.

Як бачимо, деформації лінійно змінюються по висоті зразка і практично не залежать від бази вимірювання з певним розкидом даних, викликаним експериментальними похибками. Щоб зменшити вплив випадкових похибок, під час визначення модуля пружності матеріалу здійснювали лінійну апроксимацію кожного з отриманих розподілів за критерієм мінімуму середньоквадратичного відхилення даних

$$\varepsilon_y^d(x) = ax + d \quad (4)$$

а потім визначали середні значення коефіцієнтів апроксимації  $\bar{a}$  і  $\bar{d}$  за трьома розподілами, які наведені у таблиці.

За малих навантажень зразка залежність між напруженнями і деформаціями лінійна, тому, використовуючи елементарну теорію згину балки, можна визначити модуль пружності матеріалу за осьовими деформаціями з врахуванням розмірів зразка і прикладеного моменту так [10]:

$$E = \frac{\Delta M \cdot x}{J_z \cdot \varepsilon_y^d(x)}, \quad (5)$$

де  $J_z = b \int_{-h/2}^{h/2} y^2 dy = \frac{b \cdot h^3}{12}$  – момент інерції поперечного перерізу зразка відносно

осі  $Oz$ ;  $x$  – відстань від нейтральної лінії.

Коефіцієнт  $d$  у виразі (4) характеризує некомпенсовану методичну похибку, зумовлену зміщенням зразка як твердого тіла відносно оптичної системи і викривленням його осі. Він не впливає на значення модуля пружності матеріалу, який визначають за тангенсом кута  $\theta$  нахилу прямої  $L$  відносно осі зразка, яка апроксимує експериментально отримані розподіли деформацій (рис. 3). Враховуючи викладене, вираз (5) для розрахунку модуля пружності набуває вигляду

$$E = \frac{\Delta M}{J_z \cdot \bar{a}}, \quad (6)$$

де  $\bar{a}$  – коефіцієнт, який рівний тангенсу кута нахилу розподілу деформацій відносно осі зразка  $Oy$ .

**Коефіцієнти  $\bar{a}$  і  $\bar{d}$  апроксимаційної залежності (4) і результати вимірювання модуля пружності**

№ зразка	$\Delta M$ , N·m	$\bar{a} \times 10^{-3}$	$\bar{d} \times 10^{-5}$	$E$	$\bar{E}$	$\bar{E}_g$
				МПа		
1	0...9	0,11	1,1	27182	29197	27025
	9...18	0,1	8,5	29900		
	18...27	0,098	14	30510		
2	0...8	0,096	9,1	28657	31250	32605
	8...16	0,083	11,9	33497		
	16...24	0,088	35,2	31598		
3	0...11	0,044	0,16	75226	73964	71880
	11...22	0,0455	0,63	72702		
4	0...11	0,0427	4,31	77497	75455	72635
	11...22	0,0451	0,63	73414		

Наведені (див. таблицю) модулі пружності матеріалів, розраховані згідно з виразом (6) за різних навантажень  $\Delta M$  і середніх значень  $\bar{E}$  для зразків № 1 і 2, виготовлених зі склотекстоліту та № 3 і 4 – з дюралюмінію, а також модулі пружності цих матеріалів  $\bar{E}_g$ , визначені за величиною прогину відповідно до ГОСТ 25.604-82.

## ВИСНОВКИ

Розроблено спосіб і експериментальну установку для безконтактного визначення деформацій та модуля пружності матеріалу на основі цифрової кореляційної обробки зображень поверхні зразків під час їх випробувань на згин. Основна перевага запропонованої методики вимірювання – відсутність контакту з досліджуваним зразком та можливість побудови розподілів деформацій по висоті зразка. Зіставлення отриманих під час експерименту значень модуля пружності запропонованим способом з даними вимірювань за стандартною методикою показали, що розбіжність результатів вимірювання не перевищує 10%.

*РЕЗЮМЕ.* На основе цифровой корреляционной обработки изображений разработан способ бесконтактного определения распределений деформаций на поверхностях образцов и модуля упругости образцов, изготовленных из дюралюминия и стеклотекстолита, при нагрузке сгибающим моментом. Описано методику измерений и алгоритм обработки данных.

*SUMMARY.* The method of noncontact determination of deformation distributions on the duraluminium and glass-fibre plastic beam specimen surfaces and material elastic modulus under bending moment loading is developed on the basis of digital image correlation processing. Measurement method and data processing algorithm are described.

1. *Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites* // Ed. C. H. Jenkins // Society for Experimental Mechanics. – Lilburn: The Fairmont Press Inc., 1998. – 263 p.
2. *Tuttle M. E. and Brinson H. F. Resistance-foil Strain-gage Technology as Applied to Composite Materials* // *Experimental Mechanics*. – 1984. – **24**, № 1. – P. 54–65.
3. *Parks V. J. The rang of speckle metrology* // *Ibid.* – 1980. – **20**, № 6. – P. 181–191.
4. *Sutton M. A., Ortu J. J., and Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements (Basic Concepts, Theory and Applications)*. – New York: Springer, 2009. – 364 p.
5. *Chong K. P. Nano science and engineering in mechanics and materials* // *Advanced Materials Science*. – 2003. – **5**, № 2. – P. 110–116.
6. *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.
7. *Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П.* Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони перед руйнування // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2004. – **40**, № 5. – С. 67–72.  
(*Panasjuk V. V., Ivanyts'kyi Ya. L., and Maksymenko O. P.* Analysis of the elastoplastic deformation of the material in the process zone // *Materials Science*. – 2004. – **40**, № 5. – P. 648–645.)
8. *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.
9. *Максименко О. П., Нечипорук С. А., Дрималик А. Р.* Алгоритм обробки цифрових зображень з усуненням руху твердого тіла // *Матеріали XVI міжнар. наук.-техн. конф. "Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів"* (21–26 лютого 2011 р., смт. Славське, Україна). – Львів, 2011. – С. 197–200.
10. *Тимошенко С. П.* Сопротивление материалов. В 2-х т. – М: Наука, 1965. – 480 с.

Одержано 03.07.2012