

УДК 620.174.22;528.854

## ОПТИКО-ЦИФРОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛІВ ДЕФОРМАЦІЙ НА ЛОКАЛЬНИХ ДІЛЯНКАХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОСТІВ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ<sup>1</sup>, О. П. МАКСИМЕНКО<sup>1</sup>,  
Р. М. ЗАПОТОЧНИЙ<sup>2</sup>, Ю. В. МОЛЬКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка"

На основі цифрової кореляційної обробки зображень розроблено переносний оптико-цифровий корелятор для визначення розподілу деформацій у залізобетонних балках за їх статичного навантаження. Наведено розподіли деформацій прогонової балки в області стику, отримані під час експериментальних досліджень моделі мосту.

**Ключові слова:** балка, цифрова кореляція зображень, розподіли переміщень і деформацій, обробка зображень.

Мости є найуразливішими ділянками транспортних магістралей, тому потребують підвищеної уваги. Під час їх експлуатації поступово руйнуються елементи конструкції та втрачається несуча здатність в результаті нагромадження незворотних пошкоджень. В першу чергу це відбувається у місцях з'єднань під впливом періодичних циклічних навантажень, фізико-хімічних процесів корозії бетонів, зовнішнього середовища (температури, вітру) та технологічних дефектів. Періодичні та позапланові огляди мосту трудомісткі, мають суб'єктивний характер, а випробування мостів вимагає залучення великої кількості вантажного транспорту, встановлення систем вимірювання і тимчасового зупинення руху транспорту. Розроблення і застосування сучасних мобільних пристроїв для моніторингу технічного стану мостів, які дають можливість вимірювати під час експлуатації споруди, та впровадження нових методик оцінки залишкового ресурсу на основі цих вимірювань є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої обґрунтує встановлення міжремонтних періодів та підвищить безпечну експлуатацію транспортних споруд.

**Методи встановлення локальних деформацій конструктивних елементів мостів.** Враховуючи великі розміри мостів, доцільно спочатку розрахунковим шляхом із застосуванням методу кінцевих елементів або експериментально встановити критичні місця конструкції, де пошкодження можуть суттєво порушити її цілісність, після чого визначити локальні деформації на вибраних ділянках.

Для визначення деформацій мостових балок до цього часу використовують тензOMETричні і механічні індикатори. Вимірювання переміщень такими приладами можливі лише у визначених місцях балки і достатньо трудомісткі. Щоб забезпечити оперативний замір деформацій у реальному часі та підвищити точність визначення залишкового ресурсу конструкцій, використовують сучасні безконтактні оптичні методи.

Метод фотограмметрії [1, 2] дає можливість дистанційно визначити просторові переміщення і деформації на досить великій площі поверхні балки в натурних та лабораторних умовах з похибками міліметрового діапазону. Недоліком цього методу є апаратурна складність зумовлена використанням коштовних відеокамер та процедурою їх калібрування.

---

Контактна особа: О. П. МАКСИМЕНКО, e-mail: maksumenko@ipm.lviv.ua

Простіший у реалізації метод встановлення просторових деформацій поверхні розроблено на основі цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Його використовують у лабораторіях під час досліджень призматичних зразків бетону [3], вимірювання прогину балкових зразків [4] та циклічних і динамічних випробовувань стандартних зразків [5]. Основні переваги цього методу – безконтактність, мобільність та можливість отримати розподіли деформацій на поверхні балки [6].

Практичне застосування методу ЦКЗ для визначення локальних деформацій мостових балок в умовах експлуатації вимагає розробки переносних оптико-цифрових кореляторів (ОЦК), методик вимірювання та спеціальних алгоритмів оброблення зображень.

**Визначення локальних деформацій мостових балок.** Визначення локальних деформацій прогонових балок мосту в умовах експлуатації та моніторинг утворених дефектів, а саме, силових тріщин, реалізовано за допомогою переносного ОЦК. Апаратна частина ОЦК складається з відеокамери, закріпленої на штативі, освітлювача і персонального комп'ютера (ПК) (рис. 1).

Методику вимірювання локальних деформацій та роботу програмного забезпечення ОЦК перевіряли за статичного навантаження дослідної конструкції прогонової будови мосту із збірно-монолітного залізобетону, виконаної у масштабі 1:10 [7]. Ця конструкція двобалкова, нерозрізна (рис. 2), по довжині поділена на збірні прогони 1 і надопорні монолітні 2 головні балки. Стики 5 головних балок розміщені в зонах нульових згинальних моментів (рис. 2b). Плита дослідної конструкції 3 монолітна. Поперечні балки 4 розміщені над опорами і у зонах стиків головних балок. Між опорами і балкою розташовані опорні частини 6. На бокову поверхню балки 7 аерозольною фарбою нанесено спеціальний крапковий малюнок для коректного вимірювання переміщень методом ЦКЗ. Навантажували конструкцію за допомогою пересувного пристрою 8. Для реєстрації зображень в ОЦК використали цифрову промислову відеокамеру "TourCam" з USB інтерфейсом. Розміри матриці відеокамери  $m \times n = 6,44 \times 4,62 \text{ mm}^2$ , роздільна здатність зображень  $P^2 = 3584 \times 2748$  точок (пікселів), площа пікселя  $p^2 \approx 3 \text{ }\mu\text{m}^2$ . Освітлювали поверхню балки фотолампою потужністю 1000 W. За попередніми вимірюваннями переміщень поверхні балки між опорами В і С за допомогою ОЦК встановили суттєву неоднорідність полів переміщень біля опори С, що свідчить про концентрацію напружень на цій ділянці (рис. 2). Щоб отримати розподіли деформацій за різного навантаження (від 0 до 72 kN), реєстрували низку зображень цієї ділянки та, використовуючи розроблені алгоритми обробки зображень, будували поля деформацій.

Для встановлення полів деформацій бокової поверхні балки за методом ЦКЗ зареєстровані зображення поверхні до і після прикладання навантаження за допомогою ПК і спеціалізованої програми автоматично розбиваються на однакову кількість фрагментів, які відтворюють в певному масштабі відповідні елементарні площадки поверхні балки. Переміщення фрагментів зображення визначали за зміщенням максимуму їх крос-кореляційної функції, яку розраховують на основі швидкого перетворення Фур'є [8]. Переміщення кожного фрагмента відповідає переміщенню  $u$ ,  $v$  елементарних площадок у площині бокової поверхні балки з врахуванням масштабу  $\beta$

Для встановлення полів деформацій бокової поверхні балки за методом ЦКЗ зареєстровані зображення поверхні до і після прикладання навантаження за допомогою ПК і спеціалізованої програми автоматично розбиваються на однакову кількість фрагментів, які відтворюють в певному масштабі відповідні елементарні площадки поверхні балки. Переміщення фрагментів зображення визначали за зміщенням максимуму їх крос-кореляційної функції, яку розраховують на основі швидкого перетворення Фур'є [8]. Переміщення кожного фрагмента відповідає переміщенню  $u$ ,  $v$  елементарних площадок у площині бокової поверхні балки з врахуванням масштабу  $\beta$

$$u = p \cdot \beta \cdot l_m, \quad v = p \cdot \beta \cdot k_m, \quad (1)$$



Рис. 1. Макет мосту і апаратури ОЦК.

Fig. 1. Model of a bridge and digital image correlation (DIC) equipment.

де  $l_m, k_m$  – координати максимуму крос-кореляційної функції відносно центра фрагмента в пікселях.

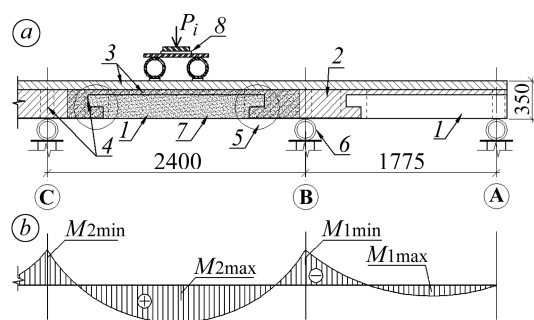


Рис. 2. Схема мосту і розподіл зусиль під час навантаження: *a* – прямолінійна частина мосту; *b* – розподіл згинальних моментів по довжині конструкції: 1 – збірна залізобетонна балка; 2 – монолітна надопорна балка; 3 – монолітна залізобетонна плита; 4 – діафрагма; 5 – зона стику; 6 – опорна частина; 7 – ділянка з нанесеною фарбою; 8 – візок навантаження.

Fig. 2. Scheme of a bridge and forces distribution under loading: *a* – straight part of the experimental design; *b* – distribution of bending moments along the construction length: 1, 2 – precast and cast-in-place concrete beam; 3 – cast-in-place concrete deck; 4 – cast-in-place diaphragm; 5 – joint area; 6 – roller bearing; 7 – painted zone; 8 – loading trolley.

Тоді поля деформацій поверхні балки у двох напрямках можна розрахувати, використовуючи такі залежності деформацій від переміщень [8]:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right], \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Перед використанням виразів (2) дискретні поля переміщень  $u, v$  фільтрували низькочастотним фільтром та інтерполювали [8]. Отримані методом ЦКЗ поля деформацій в області стику за максимального навантаження показані на рис. 3. Кружечками позначено місця (1–1', 2–2', 3–3') кріплення трьох годинникових індикаторів, які використовували для контролю деформацій балки на різній висоті в області стику: 1–1' на рівні верхнього ряду арматури, 2–2' на середині балки та 3–3' на рівні нижнього ряду арматури.

**Результати експериментальних досліджень стику та визначення деформацій.** На розподілах осьових деформацій  $\varepsilon_{xx}$  (рис. 3а), отриманих під час експериментів, встановили локальну область їх концентрацій біля стику 4 (див. рис. 2а) з амплітудним значенням 0,0011. При цьому над стиком осьові деформації значно менші. Аналіз полів деформацій показує, що межа максимальних і мінімальних осьових деформацій проходить по лінії стику і вказує на послаблення місця з'єднання 4, при цьому на поверхні балки візуально тріщини ще не спостерігаються. Для полів поперечних деформацій  $\varepsilon_{yy}$  (рис. 3б) також існує область їх концентрацій, яка розташована нижче стику, ближче до нижнього краю балки з амплітудним значенням 0,0009.

Експерименти показали, що за навантажень досліджуваної балки менших за 20 kN чутливість розробленого ОЦК недостатня, що проявляється у виникненні розривів полів деформацій. За більших навантажень відносна похибка вимірювання ОЦК зменшується і розраховані поля деформацій є гладкими, що відповідає принципу неперервності переміщень поверхні суцільного матеріалу балки.

Для оцінювання достовірності отриманих результатів методом ЦКЗ їх порівнювали з даними індикаторів годинникового типу. На графіку рис. 4 штриховою лінією показано результати вимірювання деформацій  $\varepsilon_{200}$  індикаторами годинникового типу з базою вимірювання 200 mm за різного навантаження. За показами індикаторів деформації розраховували діленням приросту переміщень на базу

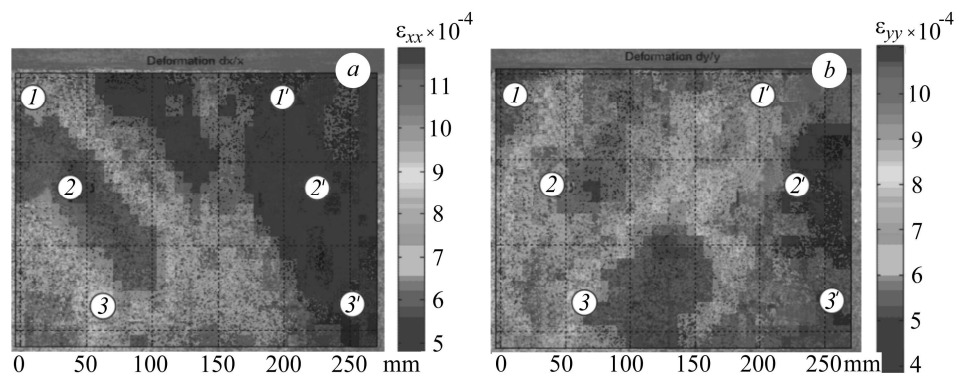


Рис. 3. Осеві  $\epsilon_{xx}$  (a) і поперечні  $\epsilon_{yy}$  (b) деформації за навантаження 72 kN.

Fig. 3. Axial  $\epsilon_{xx}$  (a) and transversal  $\epsilon_{yy}$  (b) strains under loading 72 kN.

вимірювання. Якщо прийняти за похибку відліку індикатора половину поділки його шкали  $\Delta/2 = 0,5 \mu\text{m}$ , то при базі  $l = 200 \text{ mm}$  відносна похибка вимірювання деформацій становитиме  $\pm 0,25 \cdot 10^{-5}$ . За методом ЦКЗ деформації визначали за різницею переміщень двох точок поверхні балки у напрямку її осі біля місць кріплення індикаторів, яку відносили до бази  $l$ .

Деформації, виміряні таким способом за різного навантаження, показані суцільною лінією (рис. 4). Тут похибка вимірювань залежить від параметрів апаратури, яку використовують для побудови ОЦК та розмірів ділянки спостереження. На основі законів геометричної оптики можна приблизно оцінити робочу відстань до поверхні балки  $D$ , розміри області спостереження  $M \times N$  та чутливість ОЦК до переміщень  $\Delta P(u, v)$ , використовуючи співвідношення

$$D \approx f \cdot (1 + \beta), \quad \beta = \sqrt{\frac{M \times N}{m \times n}}, \quad \Delta P(u, v) \approx \delta \cdot \beta \cdot p. \quad (3)$$

Результати оцінки чутливості ОЦК за різних розмірів ділянки спостереження із застосуванням алгоритмів, що забезпечують знаходження положення максимуму піка до соті частини пікселя  $\delta = 0,01$  [9] для об'єктива "Vega" з фокусною відстанню  $f = 20 \text{ mm}$  та відеокамери "TourCam", подано у таблиці. Під час експериментів визначали деформації на ділянці розміром  $M \times N = 250 \times 200 \text{ mm}$ , що відповідає чутливості ОЦК до переміщень  $0,7 \mu\text{m}$ . Таким чином, відносна похибка встановлення деформацій розробленим ОЦК на базі  $200 \text{ mm}$  не перевищувала  $\pm 0,35 \cdot 10^{-5}$  і була одного порядку з похибкою вимірювання індикаторами. Недоліком годинникових індикаторів є вимірювання переміщень тільки на одній лінії, на відміну від ОЦК, який дає змогу безконтактно встановити розподіл переміщень і деформацій на всій ділянці спостереження. Разом з тим зменшення площі ділянки спостереження ОЦК дозволяє підвищити точність вимірювання. Таким

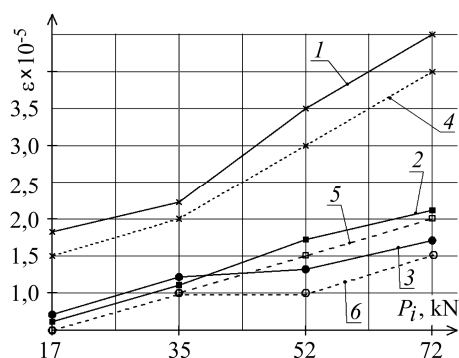


Рис. 4. Зіставлення деформацій, отриманих різними методами: 1–3 – за методом ЦКЗ; 4–6 – вимірювання механічними приладами; 3, 6 – 1–1'; 2, 5 – 2–2'; 1, 4 – 3–3'.

Fig. 4. Comparison of strains obtained by different methods: 1–3 – by DIC technique; 4–6 – measured with mechanical devices; 3, 6 – 1–1'; 2, 5 – 2–2'; 1, 4 – 3–3'.

### Результати оцінки чутливості ОЦК

Ділянка спостереження $M \times N, \text{mm}^2$	Фокусна відстань об'єкта $f, \text{mm}$	$\beta$	$D, \text{m}$	$\Delta P(u, v), \mu\text{m}$
100×80	20	16	0,34	0,3
250×200	20	41	0,84	0,7
1260×996	20	205	4,1	1,3

чином, використовуючи розроблені ОЦК та програмні засоби розрахунку деформацій, можна отримати не тільки значення деформацій у заданій точці, а розподіли по всій поверхні деформованої балки. Це дає змогу встановити концентратори напружень, які є джерелами імовірного зародження тріщин в елементі конструкції.

### ВИСНОВКИ

На основі ЦКЗ розроблено переносний ОЦК і програмне забезпечення для дистанційного визначення локальних деформацій у залізобетонних балках у найнавантажених ділянках. Побудовано розподіл деформацій у зоні стику збірної і монолітної частин головної балки прогонової будови мосту. Встановлено області підвищеної концентрації напружень, які є джерелами зародження тріщин. Результати, отримані за розробленим методом, в межах 5% збігаються із даними вимірювань індикаторами годинникового типу у відповідних місцях. Перевагою запропонованого методу є безконтактність вимірювань та можливість отримання розподілу деформацій на визначеній ділянці. Розроблений ОЦК і програмне забезпечення знайдуть застосування у системах оперативного контролю мостових конструкцій під час експлуатації.

*РЕЗЮМЕ* На основі цифрової кореляції зображень розроблено переносний оптико-цифровий корелятор для визначення розподілу деформацій в залізобетонних балках при статичній нарузці. Представлено розподіли деформацій прогонової балки в області стику, отримані при експериментальних дослідженнях моделі моста.

*SUMMARY* On the basis of digital image correlation a hand-held optical-digital correlator to determine the deformation distribution in reinforced concrete beams under static loading is developed. The distributions of the span beam strains in the joint area, obtained during experimental study of the model of the bridge, are presented.

1. *The measurement of deformation of a bridge by moire photography and photogrammetry / C. Forno, S. Brown, R. A. Hunt et al. // Strain. – 1991. – P. 83–87.*
2. *Noncontact Photogrammetric Measurement of Vertical Bridge Deflection / D. V. Jauregui, K. R. White, C. B. Woodward, and K. R. Leitch // J. Bridge Engng. – 2003. – P. 212–221.*
3. *Choi S. and Shah S. P. Measurement of Deformation on Concrete Subjected to Compression Using Image Correlation // Experimental Mechanics. – 1997. – 37, № 3. – P. 307–313.*
4. *Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних попередньо напружених балок методом цифрової кореляції зображень / П. М. Коваль, Я. Л. Іваницький, Ю. В. Мольков, Я. І. Ковалчик // Зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізничного транспорту ім. В. Лазаряна. – 2012. – Вип. 3. – С. 75–79.*
5. *Olaszek P. Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method // Measurement. – 1999. – № 25. – P. 227–236.*
6. *Bridge Deflection Measurement Using Digital Image Correlation / S. Yoneyama, A. Kitagawa, S. Iwata et al. // Experimental Techniques. – 2007. – 31, № 1. – P. 34–40.*
7. *Гнідець Б. Г., Запотоchnий Р. М. Двобалкові збірно-монолітні нерозрізні залізобетонні прогонові будови мостів для складних умов будівництва // Будівельні конструкції: Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону. – 2013. – Вип. 78, кн. 1. – С. 67–75.*
8. *Максименко О., Франкевич Л., Сахарук О. Алгоритм обробки цифрових зображень для визначення деформаційних характеристик матеріалів // Електроніка та інформаційні технології. – 2013. – Вип. 3. – С. 156–168.*
9. *Максименко О. П. Швидкий алгоритм субпіксельного суміщення зображень // Відбір і обробка інформації. – 2014. – Вип. 41 (117). – С. 70–76.*

Одержано 05.12.2014