

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Проаналізовано світову практику використання методу цифрової кореляції зображень для випробування, моніторингу та аналізу будівельних конструкцій. За результатами лабораторних експериментальних досліджень попередньо напружених залізобетонних балок порівняно метод цифрової кореляції зображень із стандартними методиками (механічні прилади, тензодатчики). Зроблено висновок про перспективність використання методу цифрової кореляції зображень при дослідженнях будівельних конструкцій.

Ключові слова: метод цифрової кореляції зображень, попередньо напружені залізобетонні балки.

Вступ. При лабораторних та натурних випробуваннях будівельних конструкцій для вимірювання відносних деформацій та переміщень, а також для візуального спостереження за утворенням і розвитком тріщин використовують механічні прилади, тензодатчики, оптичні мікроскопи та ін. Часто фіксувати складний напружено-деформований стан будівельних конструкцій з використанням традиційних методів досліджень досить важко, тому розробляються методи, які б давали можливість у процесі досліджень отримувати повну картину деформування конструкції. До таких методів належать фотограмметричні методи, що полягають у визначенні просторових точок дослідних зразків у процесі деформування [1]. При фотограмметричних вимірюваннях значна кількість точок фіксується в один фізичний елемент. Порівняння знімків, зроблених у різний час (при різному навантаженні), дає змогу оцінювати взаємну деформацію. Фотограмметричні методи використовуються в Україні для дослідження будівельних конструкцій [2], але вони мають і ряд недоліків.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Метод цифрової кореляції зображень (надалі – ЦКЗ) останнім часом широко застосовується при розв'язанні різних задач механіки і дозволяє безконтактно вимірювати повне поле зміщень та деформації найрізноманітніших об'єктів [3]. Двовимірний метод ЦКЗ (2D DIC (Digital image correlation)) дозволяє вимірювати деформації на площині та заокругленій поверхні за допомогою спеціального обчислення результатів [4]. Для об'ємних і вигнутих поверхонь застосовують 3D ЦКЗ, що ґрунтується на принципі бінокулярної стереоскопії [5].

Як представник неінтерферометричної оптичної техніки (не потребує спеціального освітлення досліджуваної поверхні), метод ЦКЗ отримав визнання і широко використовується як потужний і гнучкий інструмент для вимірювання деформації поверхні в галузі експериментальної механіки деформованого твердого тіла. Він забезпечує отримання повного поля зміщень і деформацій у зоні вимірювань завдяки порівнянню цифрових зображень поверхні зразка недеформованого та деформованого стану відповідно. ЦКЗ є оптичним вимірюванням на основі цифрової обробки зображень і чисельних обчислень. Він був уперше розроблений групою дослідників з Університету Південної Кароліни в 1980-ті роки, коли ще цифрова обробка зображення і чисельні обчислення були в зародковому стані [6]. Протягом останніх метод ЦКЗ значно удосконалився, а саме: вчені досягнули зниження складності обчислень, високої точності вимірювання деформацій та розширення сфери застосування (переважно завдяки використанню 3D

ЦКЗ). Багато дослідників приклали зусиль до перетворення методу ЦКЗ на ефективний і гнучкий метод вимірювання деформації поверхні від макроскопічного до мікро- або навіть нанорівня.

Основні принципи. Цей оптичний метод ґрунтується на цифровій обробці за відповідним алгоритмом ряду зображень поверхні зразка, отриманих за відомих значень зусилля навантаження за допомогою фотокамери [7]. На кожному наступному зображенні по відношенню до попереднього визначають переміщення поверхні в межах фрагмента, а віднісши величину переміщення до розміру фрагмента, встановлюють значення деформації (рис. 1).

Крім розподілу поля деформації та визначення переміщень будь-якої точки досліджуваної ділянки, метод дозволяє визначити дві складові відносних деформацій ϵ_{xx} і ϵ_{yy} за допомогою спеціальних віртуальних екстензометрів, які можуть замінити стандартні тензодатчики або індикатори на базах (рис. 11, б – в), що є дуже актуальним при проведенні випробувань будівельних конструкцій.

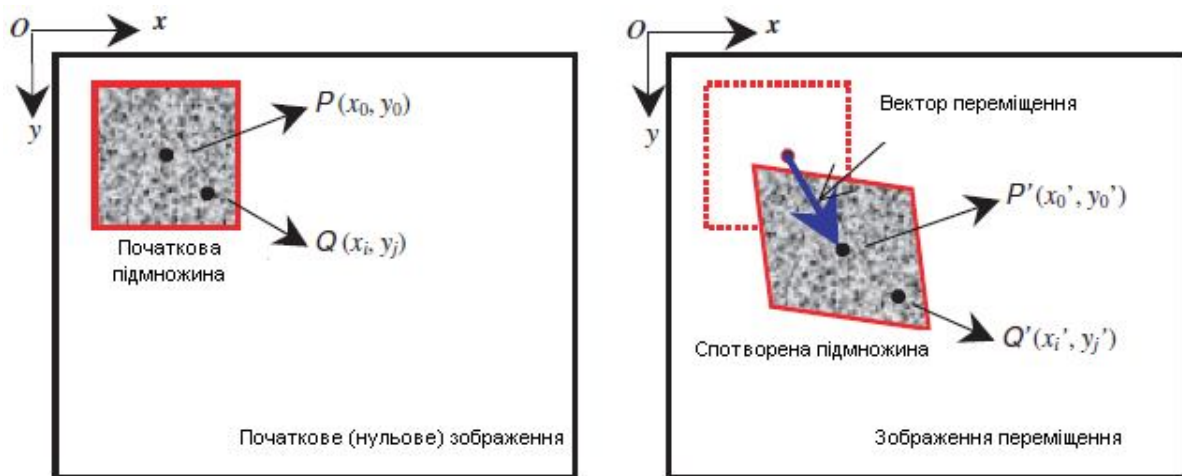


Рисунок 1 – Схематичне зображення розрахункової підмножини дослідної ділянки перед і після деформації: P, Q – точки підмножини з координатами x, y

Для потреб лабораторних випробувань переважно вистачає 2D ЦКЗ. Необхідно лише правильно підібрати оптику відповідно до дослідної ділянки та забезпечити достатнє освітлення.

Для вимірювання деформації макроскопічних об'єктів, таких як будівельні конструкції та споруди, доцільно використовувати 3D ЦКЗ, який є більш практичним і ефективним, оскільки він може використовувати 3D-профіль та вимірювання деформації як плоских, так і криволінійних поверхонь, а також нечутливий до поза площинних переміщень.

Переваги методу ЦКЗ [5]:

- проста експериментальна установка (фіксована камера (або камери) для запису цифрового зображення поверхні випробувального зразка до і після деформації) та підготовка зразка. У деяких випадках немає необхідності у підготовці зразка (якщо природні текстури поверхні зразка мають випадковий розподіл інтенсивності сірого) або ж спекл-поверхня може просто бути виготовленою шляхом розпилення фарби на поверхню зразка;

- низькі вимоги до навколишнього середовища при вимірюванні. 2D і 3D ЦКЗ не вимагає джерела лазера порівняно з деякими іншими оптичними методами. Під час випробування може бути використане джерело штучного або природного

світла. Таким чином, він підходить як для лабораторного, так і для польового застосування;

– широкий діапазон чутливості вимірювань та розширення. Оскільки метод ЦКЗ оперує цифровими зображеннями, які записані на різних цифрових пристроях, то зображення може бути безпосередньо оброблене програмним забезпеченням.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. За кордоном метод ЦКЗ широко застосовується для випробування та моніторингу будівельних конструкцій. Існує проблема відсутності бази напрацьованих випробувань будівельних конструкцій з використанням методу ЦКЗ в Україні для порівняння та застосування разом із стандартними методами.

Мета досліджень – визначити можливості використання методу цифрової кореляції зображень для дослідження будівельних конструкцій на підставі досвіду його застосування при натурних дослідженнях споруд та проведенні лабораторних випробувань балок з порівнянням результатів, отриманих даним методом і традиційними методами.

Основний матеріал і результати дослідження. За допомогою методу цифрової кореляції зображень проведено наступні дослідження:

Випробування залізничного моста в Nieporet (Польща) [3]. Дослідження залізничного моста (прогонова будова – металеві ферми) в Nieporet недалеко від Варшави було проведено Інститутом фундаментальних технологічних досліджень (IFTR) та Варшавським технологічним університетом (WUT). Локальний і глобальний датчики ЦКЗ фіксували зображення моста в той час, як через нього проходили локомотив та потяг. Вид на міст і розташування обох датчиків показано на рис. 2, а.

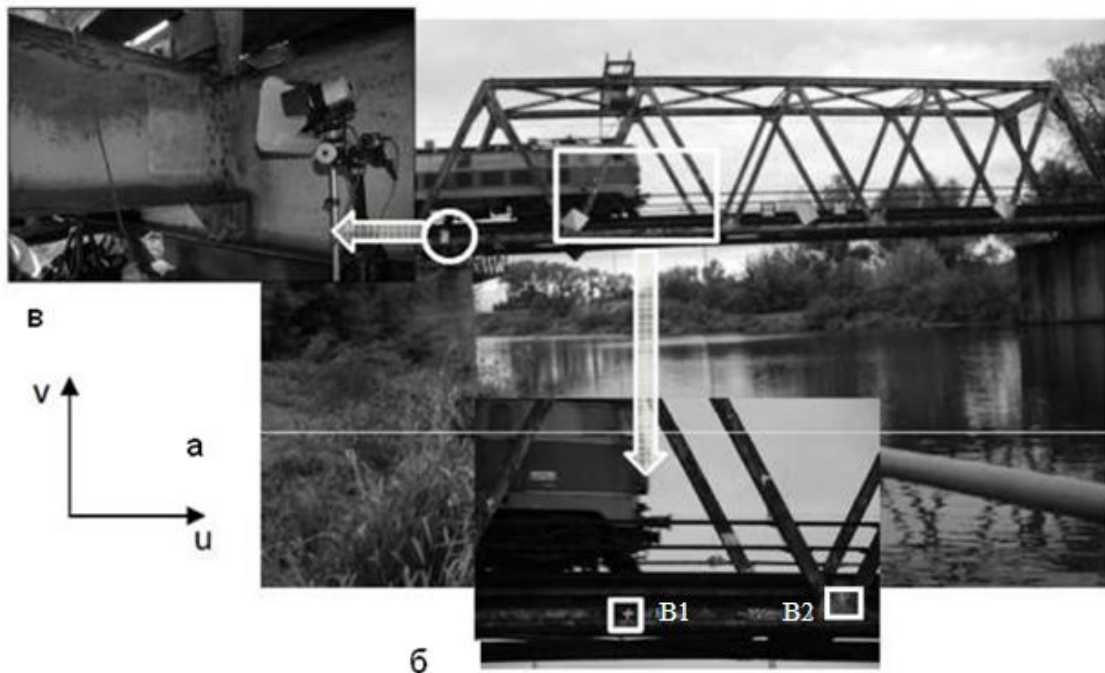


Рисунок 2 – Випробування залізничного моста в Nieporet:
а – загальний вид на міст; б – глобальний датчик ЦКЗ;
в – локальні датчики ЦКЗ

Під час експерименту чартерний локомотив (вагою 120 т) проходив через міст туди-назад з різними швидкостями (20, 40, 60, 80 км/год).

Місцевий датчик ЦКЗ був розміщений на залізобетонній опорі (рис. 2, в), тому можна припустити його стабільність стосовно до прогонової будови моста. Датчик вимірював переміщення нижнього пояса ферми. Як і місцевий датчик використано камеру

PointGrey Flea2 1 Mpx з об'єктивом 8 мм, що захоплює зображення площею 0,7×0,5 м із частотою 7,5 Hz, тобто кожний тест містить від 20 до 80 кадрів. Узагальнені результати трьох тестів наведено на рис. 3.

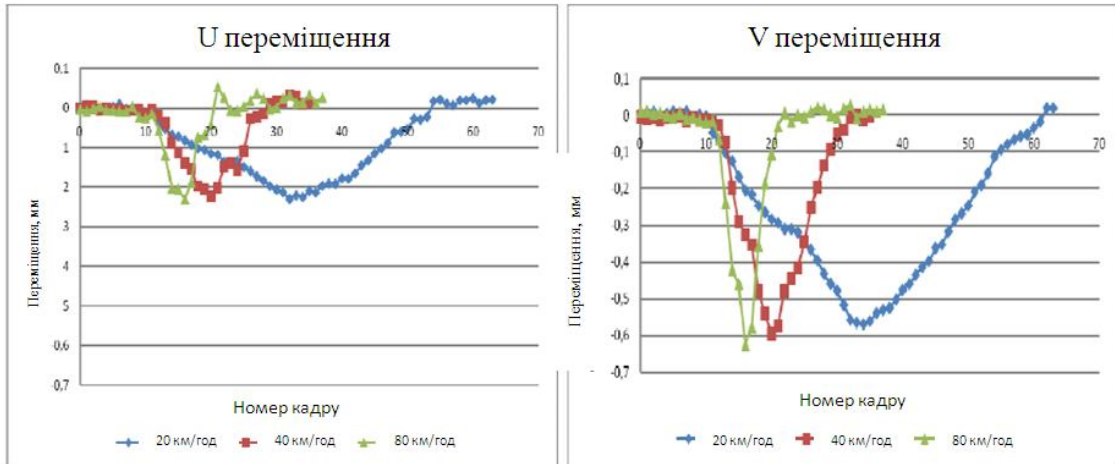


Рисунок 3 – Результати тестів:
U – горизонтальне та *V* – вертикальне переміщення

Вплив швидкості локомотива на значення переміщень можна чітко спостерігати на рис. 3. Висока швидкість спричиняє дещо більше переміщення в напрямку *U*, в той час як максимальні зміщення в напрямку *V* залишаються незмінними. Швидкість утворення відмінностей між послідовними тестами можна легко простежити зі зміною форми графіків. Наведені результати показують, що виміряна дослідна ділянка проявляє деякі незначні зміщення, що пов'язані з його зміщенням вліво від фіксованої точки з'єднання опори і поперечної балки (нульовий зсув).

Глобальний датчик ЦКЗ спостерігав переміщення нижнього пояса ферми посередині моста за точками *B1* і *B2* (див. рис. 2, б) Як глобальний датчик використано цифрова камера Canon S7 з об'єктивом 150 мм. Для збільшення точності кореляції до поверхні були прикріплені спеціальні маркери. Переміщення пунктів *B1* та *B2* під час руху короткого потягу наведено на рис. 4.

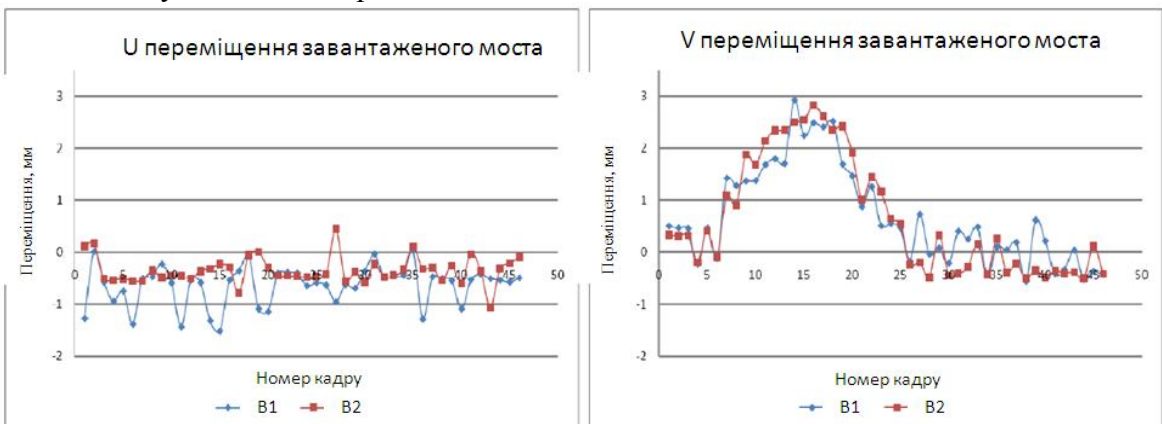


Рисунок 4 – Результати тестів: *U* та *V* переміщення точок *B1* і *B2*

Випробування моста *Vernon Avenue Bridge* [7]. Міст *Vernon Avenue Bridge* (Масачусетс, США) побудований улітку 2009 р. і відкритий для руху в вересні того ж року. Цей міст довжиною 45,7 м має три прогони (рис. 5). Прогонова будова моста складається із залізобетонної плити, влаштованої на шести металевих балках. Залізобетонна плита товщиною 20,3 см була замонолічена за один неперервний підхід. Завдяки проекту *National Science Foundation* стан східної балки моста відстежувався за допомогою методу ЦКЗ з моменту виготовлення та монтажу (рис. 6).

У вересні 2009 р. статичні випробування моста були виконані до його відкриття. Випробування включало в себе 100 тензодатчиків, 16 акселерометрів, 24 прогиномірів на балках, а також датчики температури і в залізобетонній плиті. Метод ЦКЗ був включений у програму випробувань на додаток до вимірювальних приладів, щоб простежити повну роботу металевої балки на всіх етапах роботи. Вимірювання ЦКЗ були використані для калібрування та доповнення комп'ютерної структурної розрахункової моделі моста. До монтажу зовнішньої балки на східній стороні моста вона була поцяткована білими магнітами для збільшення інтенсивності та точності прив'язки пікселів для ЦКЗ (рис. 6, 7).



Рисунок 5 – Вид на мосту Vernon Avenue Bridge



Рисунок 6 – Східна зовнішня балка з Vernon Avenue Bridge зі спеціальною обробленою зоною під час монтажу

Для дослідження середнього прогону камери були встановлені на окремих штативах на відстані 3,04 м один від одного, щоб забезпечити достатню відстань для отримання даних по всіх трьох напрямках 3D ЦКЗ. Камери були розташовані на відстані 15,2 м і на 3,04 – 3,66 м нижче від балки (рис. 7).



Рисунок 7 – Обладнання ЦКЗ, встановлене на середньому прогоні моста

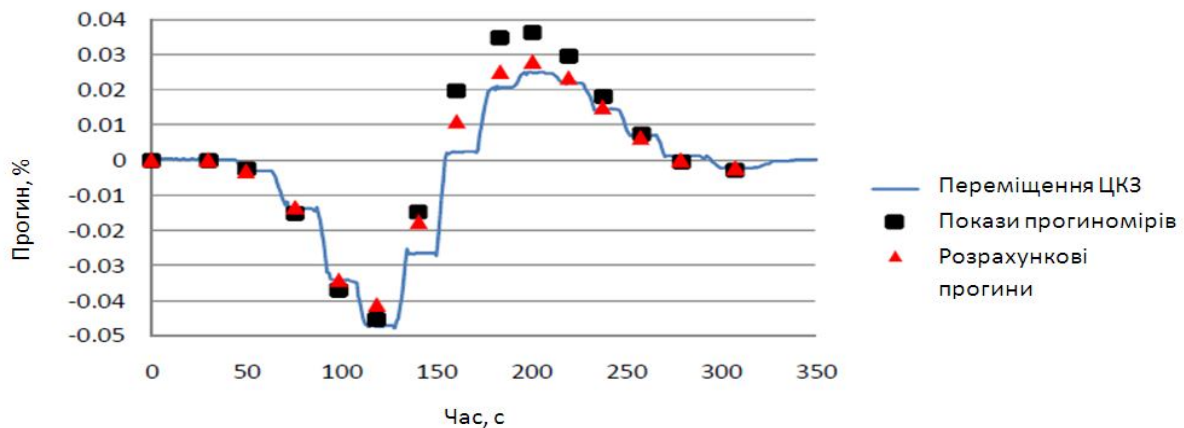


Рисунок 8 – Показання прогиномірів, ЦКЗ і розрахункові прогиномірів

При випробуванні моста показання прогиномірів та ЦКЗ дещо різнились, але приблизно співпадали між собою і з розрахунковими прогинами (рис. 8.)

Аналіз пожежі на пірсі Hastings Pier [8]. 5 жовтня 2010 року на пірсі Hastings Pier в East Sussex (Великобританія), що є історичною пам'яткою, сталася пожежа, яка знищила 95% споруди, занесеної до списку Grade II. Учені з Британської національної фізичної лабораторії (NPL) встановили, що стан пірса кращий, ніж очікувалось. Переконатись у цьому їм допомогли попередні фото пірса, зроблені раніше для реконструкції, моніторингу та відстеження його змін.

За допомогою методу ЦКЗ учені порівняли високороздільні фото до і після пожежі. Результати дослідження були дуже позитивні. Незважаючи на те, що надбудова серйозно пошкоджена і є великі візуальні зміни, структура металевого каркаса постраждала набагато менше. На західній стороні пірса металевий каркас після пожежі залишився практично цілим. На східній частині утворилися декілька незначних і одна велика ділянка металевого каркаса з істотними змінами внаслідок впливу на конструкції великої температури при пожежі. Але більшість металевого каркаса мала значною мірою незмінний вигляд.

Обробляючи зображення до і після пожежі, вдалося швидше і дешевше порівняно зі стандартним попереднім обстеженням установити основні елементи споруди, які постраждали через пожежу. Після цього попереднього обстеження потрібно детальніше оглянути найбільш пошкоджені ділянки.

Випробування попередньо напружених залізобетонних балок. Як показав огляд виконаних натурних досліджень споруд, метод ЦКЗ застосовують переважно для металевих конструкцій. Але багато будівельних конструкцій виконується із залізобетону (мости – більше 90%), тому лабораторні дослідження методу ЦКЗ проведені на залізобетонних балках. Випробування виконані разом із науковцями Фізико-механічного інституту імені Г. В. Карпенка НАН України.

Випробовувалися дві попередньо напружені залізобетонні балки геометричних розмірів 100×210×2100 мм (рис. 9).

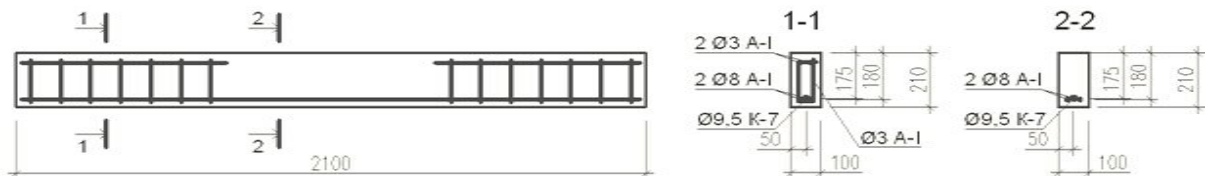


Рисунок 9 – Конструкція дослідних зразків

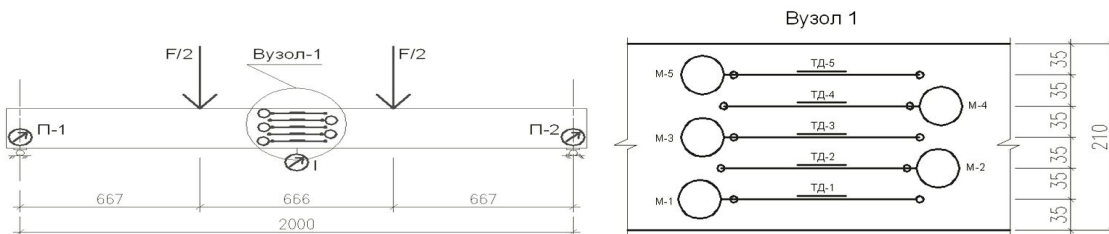


Рисунок 10 – Схема розташування приладів:

П-1, П-2 – прогиноміри Аістова;

I – індикатор годинникового типу із ціною поділки 0,01 мм; М1-М5 – індикатори годинникового типу із ціною поділки 0,001 мм на базі 200 мм;

ТД-1..ТД-5 – тензодатчики з базою 50 мм; АЕ – датчик акустичної емісії

Балки випробовувалися на гідравлічному пресі EUS-20. Навантаження передавалося через силорозподільну траверсу на балку двома зосередженими силами, створюючи таким чином зону чистого згину, в межах якої досліджували напружено-деформований стан нормальних перерізів по висоті балки. Для реєстрації поздовжніх відносних деформацій посередині сторони №1 балок рівномірно по висоті встановлені п'ять тензодатчиків з базою 50 мм опором 310 Ом. Їх показання дублюються п'ятьма індикаторами з ціною поділки 0,001 мм та базою 200 мм, прикріпленими паралельно до тензодатчиків (рис. 11, а).

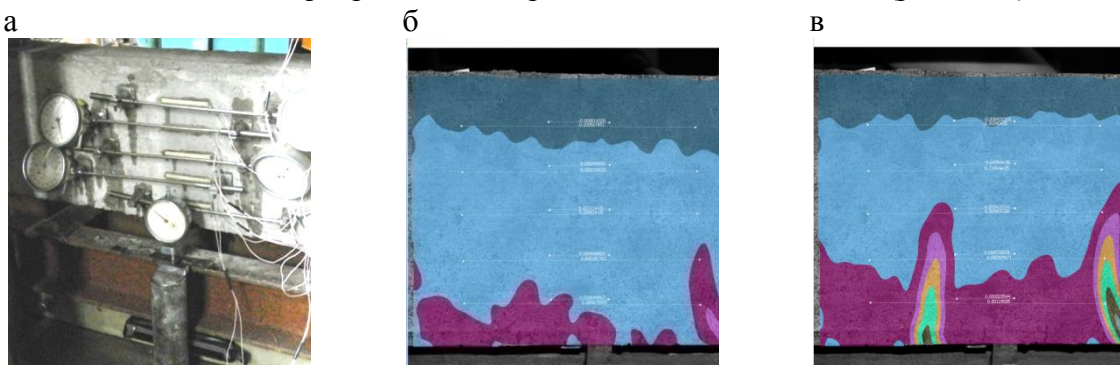


Рисунок 11 – Розміщення датчиків на балці:

а – сторона №1 балки з тензодатчиками та індикаторами;

б і в – сторона №2 балки з умовними екстензометрами

при навантаженні балки 16 і 32 кН

На рис. 11, б – в зображено зону відносних деформацій сторони №2 балки при різних рівнях навантаження балок, зафіксовану методом ЦКЗ із встановленими умовними екстензометрами. За допомогою цього методу вдалося чітко зафіксувати розтягнуту і стиснуту зону балки, визначити місця утворення тріщин і стежити за процесом їх розвитку.

За допомогою умовних екстензометрів сторони №2 вдалося продублювати покази мікроіндикаторів та тензодатчиків сторони №1 цієї ж балки (рис. 12).

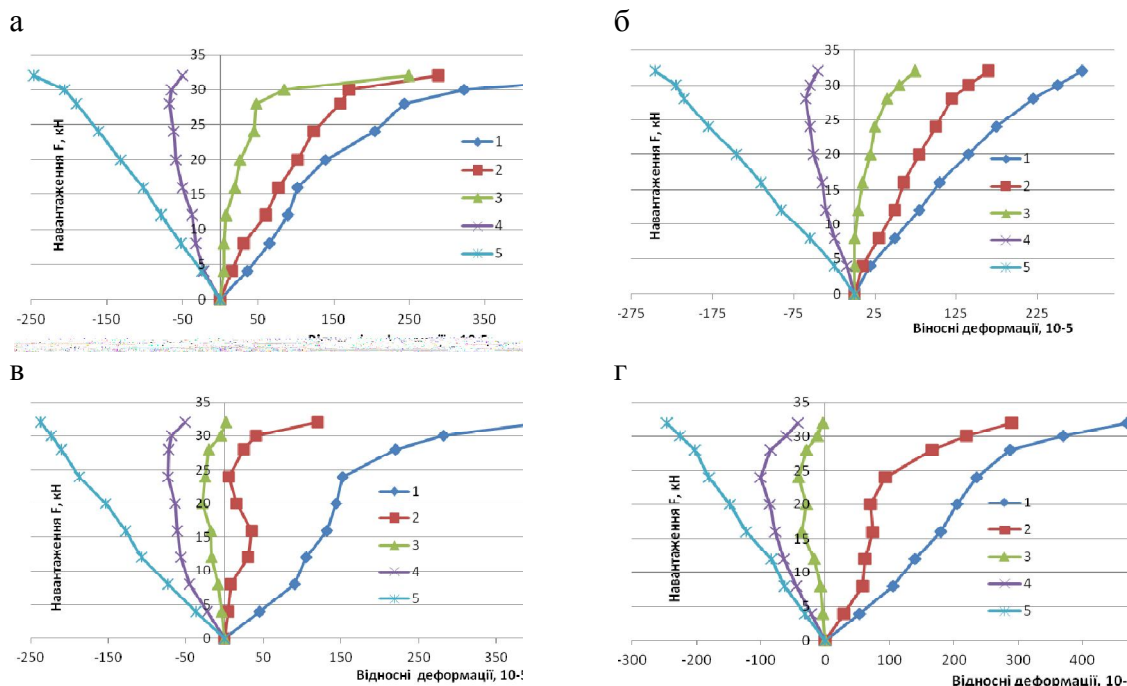


Рисунок 12 – Відносні деформації: а – тензодатчиків; б – мікроіндикаторів; в – екстензометрів навпроти тензодатчиків; г – екстензометрів навпроти мікроіндикаторів (розташування приладів по висоті балки див. рис. 10).

Порівняння відносних деформацій, отриманих методом ЦКЗ із зафіксованими традиційними приладами (індикаторами на базі 200 мм і тензодатчиками з базою 50 мм) показали, що при значних відносних деформаціях дані методу ЦКЗ корелюються з результатами, отриманими традиційними методами, а при незначних деформаціях (до $\epsilon=50 \times 10^{-5}$) одержані незадовільні результати. Це свідчить про певні недопрацювання при замірах та обробці даних.

Момент тріщиноутворення в балках (при навантаженні 22 кН), зафіксований методом ЦКЗ, відповідає зареєстрованому методом акустичної емісії моменту тріщиноутворення, що свідчить про достовірність отриманих методом ЦКЗ даних.

Висновки. Використання методу ЦКЗ при натурних дослідженнях споруд показало можливість його застосування для визначення напружено-деформованого стану будівельних конструкцій. Проведені лабораторні випробування залізобетонних попередньо напружених балок із порівнянням результатів, отриманих методом ЦКЗ і традиційними методами досліджень, показали, що методом ЦКЗ одержано достовірні дані про напружено-деформований стан балок при різних рівнях навантаження. Доцільно продовжувати роботу над удосконаленням цього методу для його ширшого застосування при дослідженні будівельних конструкцій.

Література

1. Руководство по наблюдениям за осадками и смещениями инженерных сооружений фотограмметрическими методами / Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. – М. : Недра, 1979. – 128 с.

2. Єрмоленко, Д. А. Об'ємний напружено-деформований стан трубобетонних елементів: Монографія / Д. А. Єрмоленко. – П., 2012. – 316 с.

3. *Monitoring of civil engineering structures using Digital Image Correlation technique* [Electronic resource] / M. Malesa, D. Szczepanek, M. Kujawińska, A. Świercz, P. Kolakowski // 14-th International Conference on Experimental Mechanics. – Mode of access: <http://smart.ippt.gov.pl>.

4. Максименко, О. П. Вимірювання деформацій циліндричних зразків методом цифрової кореляції спекл-зображень [Електронний ресурс] / О. П. Максименко. – Режим доступу: <http://dSPACE.nbuv.gov.ua>.

5. *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement* [Electronic resource] / B. Pan, K. Qian, H. Xie, A. Asundi. – Mode of access: <http://www.opticsinfobase.org>.

6. Schreier, H. W. *Investigation of two and three-dimensional image correlation techniques with applications in experimental mechanics* / H. W. Schreier. – University of South Carolina, 2003. – 348 p.

7. *Digital Imaging for Bridge Deflection Measurement of a Steel Girder Composite Bridge* [Electronic resource] / Erin Santini-Bell, Philip Brogan, Paul Lefebvre, Jason Peddle, Brian Brenner, Masoud Sanayei // TRB 2011 Annual Meeting. – Mode of access: / <http://amonline.trb.org>.

8. *Digital Image Correlation*. Science Daily (Apr. 18, 2011) [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.sciencedaily.com>.

Надійшла до редакції 08.11.12

© Я.І. Ковальчик

Я.І. Ковальчик, аспірант

Национальный транспортный университет, г. Киев

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Проанализирована мировая практика использования метода цифровой корреляции изображений для испытания, мониторинга и анализа строительных конструкций. По результатам лабораторных экспериментальных исследований предварительно напряженных железобетонных балок сравнены метод цифровой корреляции изображений со стандартными методиками (механические приборы, тензодатчики). Сделан вывод о перспективности использования метода цифровой корреляции изображений при исследованиях строительных конструкций.

Ключевые слова: метод цифровой корреляции изображений, предварительно напряженные железобетонные балки.

Y.I. Kovalchuk, Post-graduate,

National Transport University, Kyiv

POSSIBILITIES FOR THE USE OF THE METHOD OF DIGITAL IMAGE CORRELATION TO STUDY THE BUILDING STRUCTURES

The article analyzes the worldwide practice of the method of digital image correlation for testing, monitoring and analysis of building structures. The results of laboratory experimental research of prestressed concrete beams method of digital image correlation compared with standard methods (mechanical devices, load cells). The conclusion about the viability of the method of digital image correlation in studies of the building structures.

Keywords: digital image correlation method, prestressed concrete beams.