

Коваль П.М., канд. техн. наук, Іваницький Я.Л., д-р техн. наук,  
Ковальчик Я.І., Мольков Ю.В.

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БЕТОННИХ ЗРАЗКІВ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

**Анотація.** Розглянуто результати випробування бетонних кубів на стиск з реєстрацією відносних деформацій методом цифрової кореляції зображень та сигналів тріщиноутворення акустичною емісією. Зроблено висновок, що методом цифрової кореляції зображень можна отримати достовірну інформацію про відносні деформації та утворення тріщин у бетонних конструкціях при дії на них зовнішніх навантажень.

**Ключові слова:** бетонні конструкції, відносні деформації, утворення тріщин, цифрова кореляція зображень, акустична емісія.

**Аннотация.** Рассмотрены результаты испытания бетонных кубов на сжатие с регистрацией относительных деформаций методом цифровой корреляции изображений и сигналов трещинообразования акустической эмиссии. Сделан вывод, что методом цифровой корреляции изображений можно получить информацию об относительных деформации и образования трещин в бетонных конструкциях при воздействии на них внешних нагрузок.

**Ключевые слова:** concrete structures, the relative deformation, cracks, цифровая корреляция изображений, акустическая эмиссия .

**Annotation.** Are considered the test results of the cube concrete compressive with the registration of the relative deformations using the method of digital image correlation and signal of the acoustic emission fracturing. It is concluded that the method of digital image correlation can obtain reliable information about the relative deformation and cracking in concrete structures exposed to external loads.

**Key words:** concrete structures, the relative deformation, cracks, digital image correlation, acoustic emission.

## Вступ

У вітчизняній практиці при лабораторних дослідженнях 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. Фіксувати складний напружено-деформований стан зразків та будівельних конструкцій з використанням традиційних методів досліджень досить важко, тому розробляються безконтактні методи, які б давали можливість у процесі досліджень отримувати повну картину деформування.

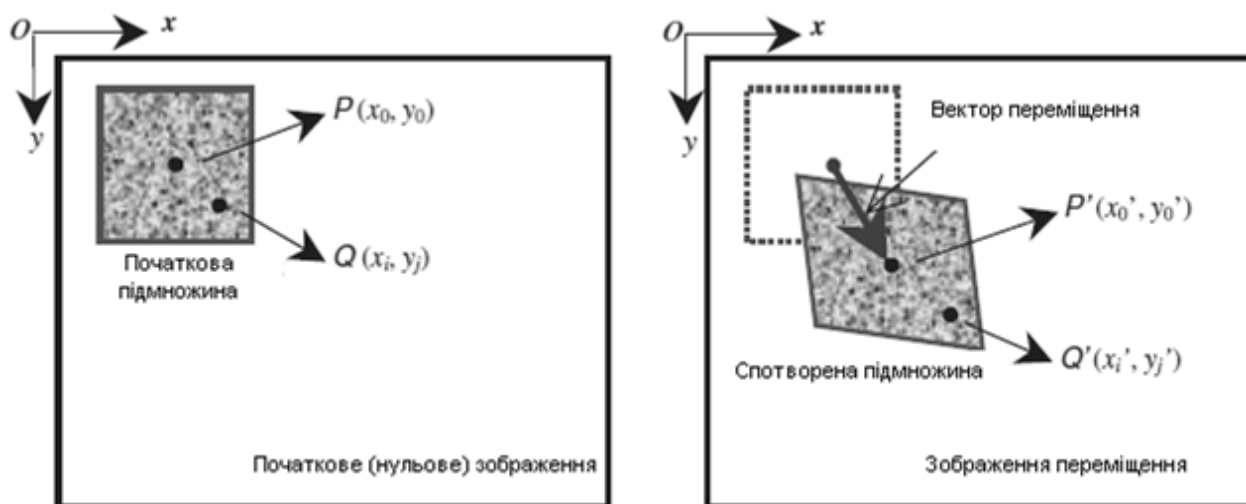
До таких методів належать фотограмметричні методи, що полягають у визначенні координат у просторі точок дослідних зразків у процесі деформування [1]. При фотограмметричних вимірюваннях значна кількість точок фіксується в один фізичний елемент. Порівняння фотографій, зроблених у різний час (при різному навантаженні), дає змогу оцінювати взаємну деформацію. Фотограмметричні методи використовуються в Україні для дослідження будівельних конструкцій [2], але вони мають і ряд недоліків, які обмежують можливості їх застосування.

**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].

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.

*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 [6]. 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). Метод дозволяє визначати поля деформацій двох складових відносних деформацій  $\epsilon_{xx}$  і  $\epsilon_{yy}$ .



**Рисунок 1** – Схематичне зображення розрахункової підмножини дослідної ділянки до 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.

#### **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.

Існує проблема відсутності бази напрацьованих випробувань будівельних зразків та конструкцій з використанням методу ЦКЗ в Україні для порівняння та застосування разом із стандартними методами.

Метод ЦКЗ переважно використовувався для дослідження металевих конструкцій. База досліджень бетонних і залізобетонних конструкцій з використанням даного методу недостатня для рекомендації його як стандартизованого.

**Метою** даного дослідження було визначення можливості використання методу цифрової кореляції зображень для дослідження напружено-деформованого стану бетонних конструкцій.

Були виготовлені 7 бетонних кубів розмірами 100×100×100мм з бетону класу В30 (табл. 1,2).

**Таблиця 1** – Склад бетонної суміші

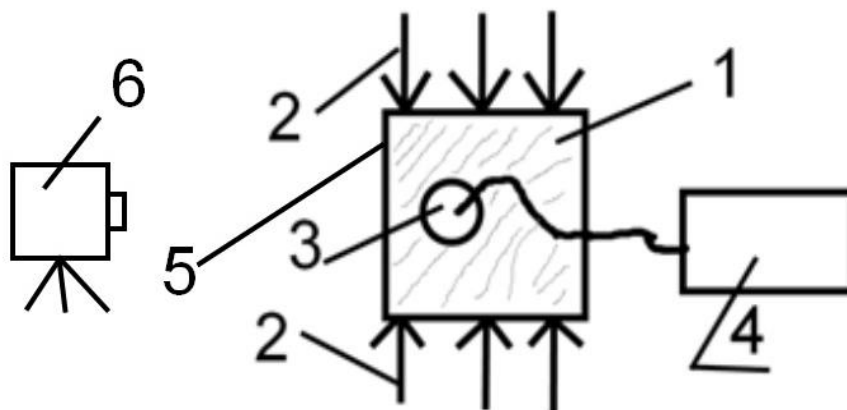
Склад бетонної суміші, кг/м <sup>3</sup>			В/Ц	Марка цементу	Добавка, кг/м <sup>3</sup>
Ц	П	Щ(5-10)			Stachement 2597
540	520	1200	0,32	500	3,8

**Таблиця 2** – Характеристики заповнювачів та цементу

Марка цементу (завод)	Дрібний заповнювач М <sub>к</sub> (Кар'єр)	Крупний заповнювач Р <sub>щ</sub> , фракція (Кар'єр)
500 (Івано-Франківський)	1,700 (с. Поляна, Хмельницька обл.)	1,300 (Іванівський спецкар'єр) 5-10

Випробування бетонних кубів проводилось на гідравлічному пресі МС-2000 згідно норм [7] за схемою вказаною на рис.2. При випробуванні проводилась реєстрація сигналів акустичної емісії (АЕ) в часі. На одну з граней

куба було нанесене спеціальне напилення аерозольною фарбою. Навпроти дослідної грані встановлена фотокамера Nikon D-40 на штативі. Фотофіксація проводилась через кожних 50 кН.



**Рисунок 2** – Схема випробування бетонного куба на осьовий стиск: 1 – дослідний зразок (куб), 2 – прикладене зусилля; 3 – приймач АЕ; 4 – програмно-технічний комплекс “АКЕМ”, 5 – грань куба зі спеціальним нанесеним напиленням, 6 – фотоапарат на штативі



**Рисунок 3** – Загальний вигляд випробування

При випробуванні бетонних кубів 100x100x100 рівень навантаження контролювали за шкалою пресу та фіксуючим електронним пристроєм, зв'язаним з ЕОМ. Він складався з повзункового реостата, який кріпився до стрілки, зв'язаною з механізмом преса, та електронної схеми, що фіксувала положення реостата і була підключеною до ЕОМ. Електричний аналоговий сигнал поступав для подальшої обробки на ЕОМ за допомогою програмно-технічного комплексу "АКЕМ". Ця схема дозволила синхронізувати процес реєстрації АЕ з динамікою зміни навантаження на досліджуваний зразок. Сигнали АЕ, які виникали в бетоні при навантаженні, реєстрували за допомогою програмно-технічного комплексу "АКЕМ". ПАЕ через шар акустично-прозорого мастила кріпився за допомогою гумової стрічки або струщини до гладкої бокової поверхні куба. Сигнали з ПАЕ підсилювались і надходили на ЕОМ для обробки і подальшого аналізу з використанням пакету програм програмно-технічного комплексу "АКЕМ". Запис АЕ відбувався в один етап.

Кубикова міцність кубів на стиск дослідних зразків наведена в табл.3.

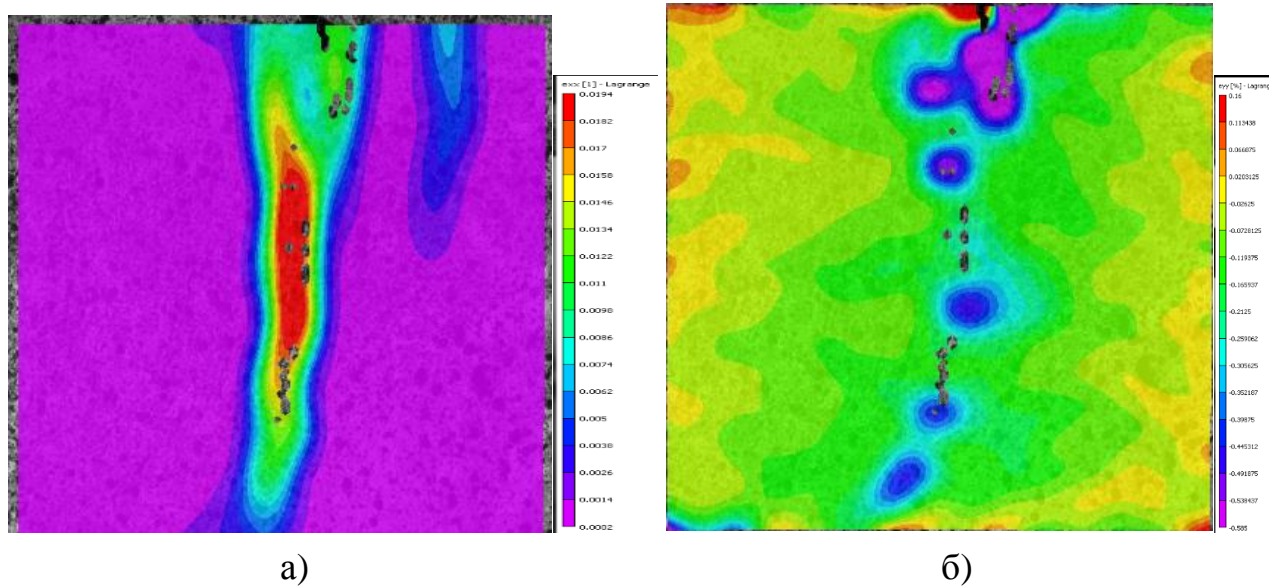
**Таблиця 3**

Куб	К-1	К-2	К-3	К-4	К-5	К-6	К-7	Середня кубикова міцність, кН
Міцність на стиск, кН	417	398	431	396	388	409	428	389,1

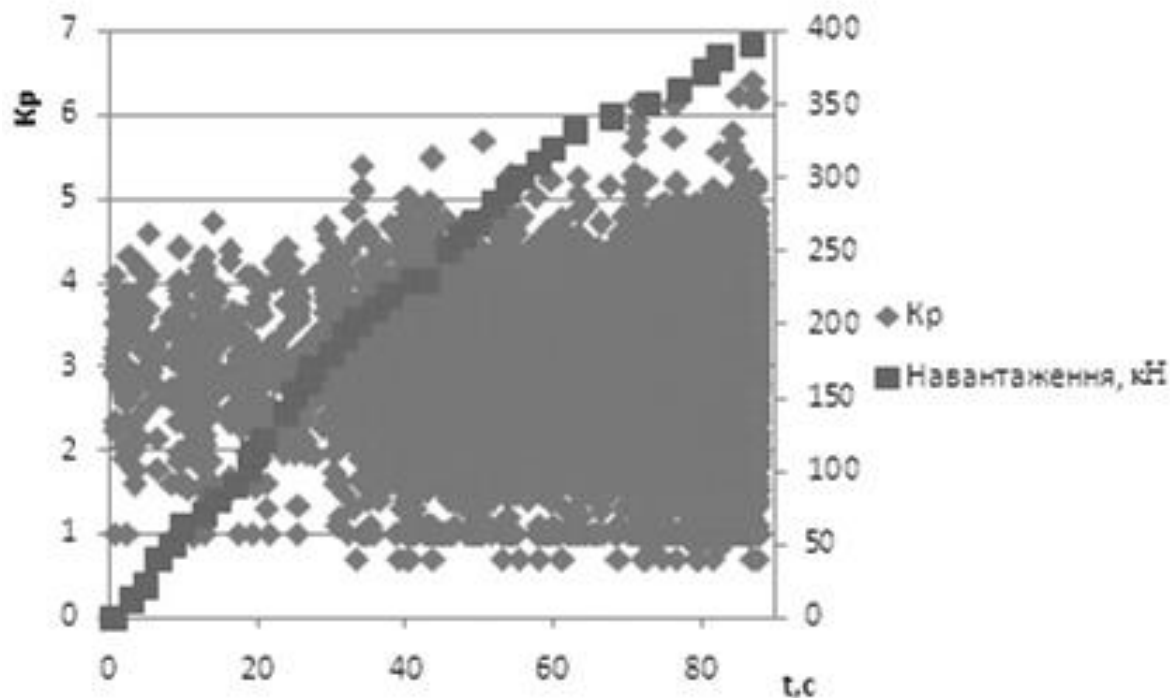
На рис. 4 для прикладу наведено картину з зафіксованими зонами деформаціями грані куба К-4 при навантаженні 350 кН(перед руйнуванням). Характер накопичення відносних деформацій по осі x ( $\epsilon_{xx}$ ) показано на рис. 4а, максимальне значення  $\epsilon_{xx}$  становить 0,0194. По осі у відносні деформації стиску найбільші в центрі куба (рис. 4б).

На рис. 5 наведено рівні критеріальної оцінки  $K_p$ , зафіксовані від сигналів АЕ при випробуванні куба К-4 безперервним одноступеневим навантаженням. Утворенню тріщини в бетоні відповідає величина  $K_p > 6$ . Як видно на рис. 5 така величина критеріальної оцінки  $K_p$  зафіксована при рівні навантаження 350кН на бетонний куб, і методом цифрової кореляції

зафіксовано утворення тріщини в бетоні куба К-4 при такій же величині навантаження 350кН(див. рис. 4а).



**Рисунок 4** – Значення відносних деформацій дослідної грані куба К-4 при  $P = 350$  кН: а –  $\epsilon_{xx}$ , б –  $\epsilon_{yy}$



**Рисунок 5** – Критеріальна оцінка  $K_p$  в часі зафіксована при випробуванні К-4

## Висновки

З використанням методу цифрової кореляції зображень можна отримати достовірну інформацію про процеси зміни відносних деформацій та утворення тріщин у бетонних конструкціях при дії на них зовнішніх навантажень. Збільшення відносних деформацій на гранях кубів, які були зафіксовані методом ЦКЗ, були пропорційні росту кількості і енергії сигналів АЕ, що зафіксовані методом акустичної емісії.

Рівні навантаження на куби, при яких утворились тріщини, зафіксовані методом АЕ, відповідають рівням навантаження тріщиноутворення, зафіксованих методом ЦКЗ.

## Література

1. Лучко Й.Й. Методи дослідження та випробування будівельних матеріалів та конструкцій/ Й.Й. Лучко, П.М. Коваль, М.Л. Дем'ян. – Львів, Каменяр, 2001.-436с.
2. Єрмоленко, Д. А. Об'ємний напружено-деформований стан трубо-бетонних 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. Kołakowski // 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.nbu.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. ДСТУ Б В.2.7-223:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за зразками, відібраними з конструкцій., Київ, Мінрегіонбуд України 2010.