

Побудова повної діаграми напруження-деформації бетону, використовуючи кореляцію цифрового зображення

Я. З. Бліхарський, А. П. Павлів

У даній роботі розроблено та апробовано нову методику побудови повної діаграми “напруження-деформації” бетону з низхідною ділянкою деформування, використовуючи метод цифрової кореляції зображення. Представлено пропозиції нової методики створення спетклів на поверхні бетону. Це дає можливість досить точно відтворювати спектли на поверхні бетону та виконувати якісний аналіз деформацій при цифровій кореляції зображення. Встановлено переваги даного способу дослідження для можливості прогнозування утворення внутрішніх тріщин в бетону з їх поширенням. Також, використання методики цифрової кореляції зображення дозволяє отримання відносних деформацій всієї дослідженої площини зразка на кожному етапі навантаження. Дана методика створює можливість дослідити зміну відносних деформацій та переміщення окремих точок або ділянок при дослідженні бетонних поверхонь. Це є актуальним питанням, оскільки дає можливість більш детальної діагностики існуючих залізобетонних конструкцій. Для перевірки точності використання методики додатково було встановлено мікроіндикатор з точністю 0.001 мм. При визначенні деформацій бетону за методикою цифрової кореляції зображення було використано 2 високошвидкісні монохромні ССD камери з різними об’єктивами. Деформації контролювались з періодом часу кожні 250 мс. Навантаження контролювалось за допомогою додаткової третьої камери зі швидкістю 50 кадрів/секунду. В результаті експериментальних досліджень було побудовано повну діаграму руйнування бетону з низхідною ділянкою деформації. Відхилення результатів деформацій за мікроіндикатором з точністю 0.001 мм на базі 200 мм та за методикою цифрової кореляції зображення складала в основному до 10 %, що підтверджує достовірність результатів. Результати даної роботи дають можливість для більш точного розрахунку залізобетонних конструкцій в практиці проектування, обстаження чи підсилення існуючих конструкцій.

Ключові слова: цифрова кореляція зображення (*digital image correlation*), діаграма напруження-деформації (*stress-strain curve*), бетон, спектли (*spectle patterns*).

1. Вступ

Залізобетонні конструкції є одними з найпоширенішими в світі. Значна кількість праць присвячена дослідженню залізобетонних конструкцій. У роботі наведено [1] представлено розрахунок позацентрово-стиснутих залізобетонних елементів. Він базується на використанні в розрахунках прогнозованої кривизни при досягненні граничних деформацій стиску бетону та границі текучості

арматури. Теоретична повна діграма руйнування бетону використовується для розрахунку залізобетонних підпірних стінок [2]. Актуальним використанням граничних напружень бетону є для розрахунку залізобетонних рам [3] та залізобетонних контрафорс [4], оскільки в основу розрахунку таких конструкцій закладена деформаційна модель, яка базується на нелінійних діаграмах руйнування бетону. У роботі [5] представлено теоретичний розрахунок залізобетонних конструкцій круглого, прямокутного та тавроного перерізу. Розрахунок проведено згідно деформаційної моделю та закладено теоретичні нелінійні діаграми руйнування бетонів. Для експериментальних досліджень залізобетонних балок з попередньо напруженою робочою арматурою [6, 7] актуальним є гранична деформація та напруження бетону, оскільки для таких конструкцій це є одним з критеріїв вичерплення несучої здатності. Використання низхідною вітки деформування бетону є актуальним для розрахунку пошкоджених в процесі експлуатації залізобетонних конструкцій [8, 9]. Для визначення несучої здатності пошкоджених залізобетонних колон при різних поперечних перерізів та відсотку пошкодження необхідна повна діграма руйнування бетону [10, 11]. Через складність та неоднорідні властивості залізобетону [12] розрахунок пошкоджених конструкцій складнішим навідрізок від пошкоджених металевих конструкцій [13]. Саме тому, важливим є експериментальні випробування бетону для розрахунку пошкоджених конструкцій. Визначення повних характеристик бетону є актуальним для композитних бетонних конструкцій. У праці [14] представлено застосування теоретичної діаграми бетону для згинаних бетонних конструкцій, армованих композитною арматурою. Для раціонального проектування поперечного перерізу композитної залізобетонної прольотної конструкції мостів [15] застосовано теоретичні значення граничних напружень бетону. Для більш точного розрахунку підсилення залізобетонних колон з використанням залізобетонної [16] чи композитної бетонної [17] обойми необхідно враховувати повні характеристики бетону. Автори у даних працях використовували теоретичні нормативні дані. Одним з сучасних методів підсилення є використання карбонового полотна [18] та карбонової стрічки [19]. Діаграма руйнування карбону є лінійною, як і сталі, проте руйнування бетону є нелінійним і залежить від замісу, складу, міцності і т.д. Тому, для розрахунку підсилення таких конструкцій є важливим експериментальні характеристики бетону. Це дозволить спрогнозувати надійність таких конструкцій [20]. Ці всі праці підтверджують, що використання повної діаграми бетону є актуальним питанням і потребує нових способів для визначення цих характеристик. Зокрема, актуальним є розроблення нових методів експериментальних випробувань.

За актуальними нормативними документами [21, 22] залізобетонні конструкції розраховують за деформаційною моделлю. В основу розрахунку несучої здатності залізобетонних конструкцій покладено нелінійну деформаційну модель, яка використовує нелінійну діаграму руйнування бетону σ - ε та дволінійну діаграму арматури σ - ε і побудована на ітераційному методі. Даний метод полягає у тому, що на кожному етапі ітераційного розрахунку визначаються величини відносних усереднених деформацій розтягнутої фібри бетону $\varepsilon_{c(2)}$ за попередньо заданою величиною деформацій стиснутої фібри бетону $\varepsilon_{c(1)}$.

У рівняннях рівноваги [21, 22] підбирається значення моменту чи повздо-
вжньої сили таке, щоб виконувались умови рівноваги [21, 22]. При досягненні
заданої точності розрахунку при заданій величині деформацій розрахунок при-
пиняється і визначається відповідне значення моменту чи повздо-
вжньої сили з рівнянь рівноваги. Потім при заданій величині стиснутої фібри $\varepsilon_{c(1)}$ виконується
їх збільшення на величину $\Delta\varepsilon_{c(1)}$ та повторюється розрахунок до виконання
умови $\varepsilon_{c(1)} \geq \varepsilon_{cu1}$. Зупинення розрахунку є досягнення стиснутою фіброю гранич-
них деформацій бетону, що є з одним умов вичерплення несучої здатності. Після
завершення розрахунку одержували деформації стиснутої та розтягнутої фібри
бетону, основної арматури.

Розрахунок за деформаційною моделю дозволяє більш точно виконувати
розрахунки таких конструкцій, проте виникає проблема в побудові повної діаг-
рами руйнування бетону з низхідною віткою, що є важливим та актуальним пи-
танням. Для побудови діаграми “напруження-деформації” використовують бе-
тонні призми з співвідношенням висоти до ширини 1:4. Складність в побудові
такої діаграми полягає в тому, що у зразку під час випробовування при досягненні
максимальних деформацій $\varepsilon_{c(1)}$ відбувається раптове руйнування. Особливо для
бетонів вищої міцності.

Побудовою повної діаграми “напруження-деформації” бетону займались
починаючи з 1970-х років [23]. Зокрема, у праці [24], для побудови повної діаг-
рами руйнування використовували спеціально попередньо підготовлені цилінд-
ри. Для побудови діаграми використовували тензometri з точністю 0.001 мм та
використовували спеціально підготовлену установку. Проте, даний спосіб ви-
магає додаткових затрат по підготовці експерименту. Також, контроль за пока-
зами зміни переміщень для визначення деформацій є досить складним.

Саме тому, актуальним є питання створення нових методів випробовуван-
ня та побудови діаграми руйнування бетону, що дозволить більш точно вико-
нувати розрахунок залізобетонних конструкцій.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Значна кількість праць присвячено побудові повної діаграми “напружен-
ня-деформації” для сталі [25–27]. Зокрема, в роботі [25] представлено результа-
ти стандартного випробовування сталі з імітацією корозійного пошкодження.
Проте, дана методика не дозволяє ідентифікувати зміну деформацій для всього
зразка. У роботі [26] це питання вирішено з додатковим аналізом за методом
скінченних елементів. Проте, це не дає можливості аналізу за експерименталь-
ними результатами. Вирішення цього питання представлено у роботі [27]. Ви-
користано методику аналізу розтягу сталі з побудовою діаграми “напруження-
деформації” з використанням цифрової кореляції зображення. Проте, дані до-
слідження вирішують проблеми побудови діаграми для сталевих елементів.
Складність у побудові повної діаграми руйнування бетону є раптове руйнуван-
ня після досягнення максимального напруження та максимальних значень де-
формацій.

Вирішення проблеми визначення деформацій опубліковані результати по-
будови повної діаграми руйнування бетону представлено в роботі [28]. Для ви-

значення деформацій використовували LVDT датчики з точністю 0.001 мм та спеціально підготовлену уставку. Перевагою таких датчиків є віддалене реєстрування деформацій. Проте, даний спосіб вимагає дороговартісних датчиків та спеціально підготовлене обладнання.

Варіантом подолання проблеми для побудови діаграми бетону з використанням стандартних датчиків переміщення вирішено у роботі [29]. Випробувані бетони класу C50/60 на двох різних пресах з жорстким режимом навантаження. Першу частину досліджень виконували на спеціально підготовленій установці Instron 8806. Ця машина оснащена високо-жорсткою рамою, що дає змогу високоточному вирівнюванню і гідравлічними пристроями для контролю подачі навантаження. Прес використовує вдосконалені пристрої для цифрового контролю та датчики навантаження, що дає змогу побудови повної діаграми руйнування бетону.

Проте ці всі способи вимагають спеціально підготовлені складні високовартісні дослідні машини для таких випробувань. Також дані методики не дозволяють отримати розподіл напружень на всій поверхні бетону. Тому є важливим пошук нових способів для побудови повної діаграми “напруження-деформації” для бетонних зразків.

З розвитком технологій появився новий спосіб для контролю деформацій, а саме методика використання цифрової кореляції зображення (digital image correlation) [30, 31]. Загалом метод цифрової кореляції зображень (DIC) можна охарактеризувати як оптичне вимірювання з цифровою обробкою зображень та чисельними розрахунками. Для використання цього методу необхідно високошвидкісна камера з високою якістю цифрової матриці та хаотично розміщених чорних на світлому фоні або білих на чорному спектлів для аналізу. В основу програм закладений складний алгоритм, який визначає переміщення ділянок з високою точністю. Найбільший вплив на точність має камера та якість нанесення спектлів.

Метод цифрової кореляції зображень (DIC) зазвичай використовують при дослідженні напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, зокрема широко застосовуються в механіці руйнування сталевих конструкцій [32, 33]. У роботі [34] досліджено використання методики цифрової кореляції для згинаних залізобетонних конструкцій. Проте, не досліджено фізично-механічних характеристик бетону. Специфічні випробування з використанням методики цифрової кореляції зображення запропоновано авторами в праці [35]. Досліджено характеристики поширення тріщин в бетонних зразках у порівнянні з різним програмним забезпеченням. Проте, не достатньо досліджено використання методики цифрової кореляції для визначення фізико-механічних характеристик бетону.

Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого побудові повної діаграми “напруження-деформацій” бетону. Особливо важливо вирішити проблему щодо побудови низхідної ділянки деформування бетону та використання методики цифрової кореляції зображень. Це дозволить більш точно та детально дослідити фізико-механічних характеристики бетону для розрахунку конструкцій.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою дослідження є побудова повної діаграми “напруження-деформації” бетону з низхідною віткою, з використанням методики цифрової кореляції зображення. Це надасть можливість практично використовувати нелінійну діаграму при теоретичному розрахунку залізобетонних конструкцій за деформаційною моделю.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні задачі:

- дослідити повздовжні та поперечні деформації бетону за методикою кореляції цифрового зображення та визначити можливості її використання;
- виконати експериментальні дослідження з побудовою повної діаграми “напруження-деформації” бетону та визначити точність методики цифрової кореляції зображення.

4. Матеріали та методи дослідження

Було сформовано 4 кубики розмірами $100 \times 100 \times 100$ мм та 3 призми розмірами $100 \times 100 \times 400$ мм. Дослідження проводили експериментальним методом. Для визначення деформацій за методикою цифрової кореляції зображення використано 2 камери. А саме, було використано монохроматичні камери “Grasshopper 3” фірми Flir (Канада) з об’єктивом Computar F25/2.8 та з об’єктивом Canon EF 70-200MM F/2.8 L IS III USM (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд камер “Grasshopper 3” фірми Flir

Технічні характеристики камер подано в табл. 1.

Технічні характеристики камери було перевірено на спеціально виготовлених штампах з різними розмірами пікселів. Технічні характеристики повністю відповідають представленим фірмою-виробником (рис. 2).

Методика цифрової кореляції зображення для фіксації деформацій потребує створення спектлів на дослідженій поверхні.

Відомі різні способи створення спектлів. Найбільш популярні є напилення за допомогою аерозольного балончика або нанесення за допомогою спеціально виготовлених роликів з голками відповідного діаметра або штампами. Аерозо-

льне нанесення є досить складним для виконання точних розмірів спектів, а спеціальні ролики з голками або штампи є досить дороговартісні та мають також недоліки в якості нанесення.

Таблиця 1

Технічні характеристики камери “Grasshopper 3” фірми Flir (Канада)

| Найменування показника | Характеристика |
|-----------------------------|------------------|
| Назва моделі | GS3-U3-91S6M-C |
| Анлогово-цифровий конвертор | 14-bit |
| Кольоровість | Моно |
| Частота кадрів | 9 |
| Мегапікселі | 9.1 |
| Розмір пікселів | 3.69 |
| Розширення | 3376×2704 |
| Тип сенсору | CCD |
| Діапазон експозиції | 0.040 мс до 32 с |



Рис. 2. Перевірка технічних характеристик камери

У праці [36] запропоновано спосіб нанесення спектів на металеву поверхню. Даний метод полягає в попередньому роздруку на папері спектів необхідної конфігурації з використанням лазерного принтера. Після цього поверхню паперу прикладають до металевій поверхні та нагрівають. В подальшому спекти переносяться з паперу на поверхню сталі.

Цей спосіб дав ідею розроблення способу для нанесення спектів на поверхню бетону.

Суть методики створення спектлів, що пропонується, полягає в наступному. Попередньо поверхня бетону шліфується до максимального вирівнювання поверхні за допомогою болгарки та каменю для шліфування (рис. 3).

Після цього поверхня бетону очищається розчинником (рис. 4).



Рис. 3. Вирівнювання поверхні бетону дослідної призми



Рис. 4. Очищення поверхні бетону дослідних призм за допомогою розчинника

На наступному етапі роздруковуються спектли на папері за допомогою лазерного принтера та прикладаються до поверхні бетону. Після чого верхня поверхня папера ретельно просочується ацетоном (рис. 5) та вирівнюється поверхня паперу по бетону. Важливим моментом є час просочування, процедуру необхідно виконувати швидко, оскільки ацетон почне розчиняти спектли і вони стануть розмиті на поверхні бетону. Отриманий результат наведено на рис. 6.

В результаті виконання цієї методики отримано рівномірні контрастні спектли з ідеальними розмірами необхідної конфігурації.



Рис. 5. Створення спектлів на поверхні бетону. *а* – процес просочування роздрукерованих спектлів на поверхню; *б* – вирівнювання спектлів на поверхні

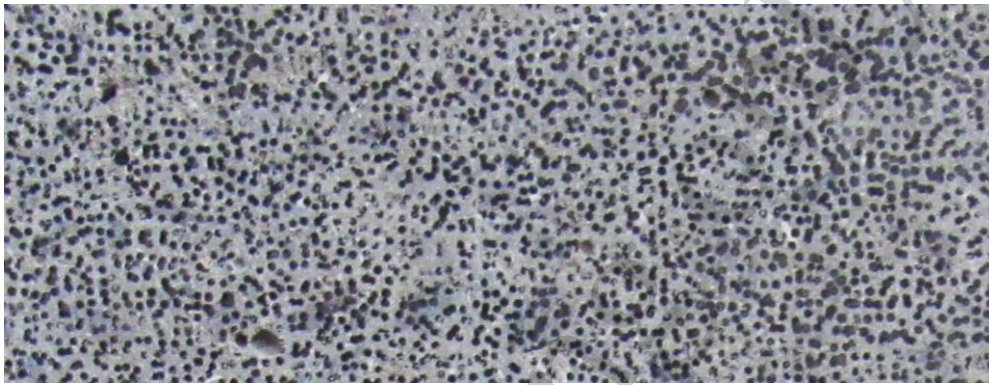


Рис. 6. Результат нанесення спектлів на поверхні бетону

Першим етапом було випробування бетонних кубиків з попередньо нанесеними чорними спеклами різної конфігурації. Метою цих випробувань було визначення оптимальних розмірів спектлів для можливості в подальшому обробки зображення. Попередньо планувались виконання спектлів діаметром 0.5 мм з густиною 70 % та варіацією 75 (рис. 7).

Після випробування кубиків 100×100×100 мм встановлено, що міцність склалала $f_{cm,cube}=63.8$ Мра, що відповідає класу бетону C50/60. Також діаметр спектлів для запланованої ділянки досліджень (100×400 мм) в бетонних призмах прийнято 1 мм з густиною 70 % та коефіцієнтом варіації 75 %.

Випробування бетонних призм 100×100×400 мм виконували на гідравлічному пресі з максимальним навантаженням 250 тс (рис. 8). Для перевірки методики цифрової кореляції зображення на бетонній призмі додатково встановлювали мікроіндикатор з ціною поділки 0.001 мм. Деформації контролювались з періодом часу кожні 250 мс. Оскільки прес не має можливості запису навантаження в часі, то для запису навантаження використовували додаткову третю камеру зі швидкості 50 кадрів/сек.

Для контролю та перевірки деформацій з методикою цифрової кореляції зображення на призму додатково встановлено мікроіндикатор з точністю 0.001 мм. База індикатора становила 200 мм.

Деформації для кореляції зображень записували 2 камери зі швидкість 250 мс. Для освітлення використовували 2 LED лампи.



Рис. 7. Загальний вигляд випробування бетонних кубиків 150x150x150 мм



Рис. 8. Загальний вигляд дослідної установки. 1 – LED освітлення, 2 – камера з об'єктивом Computar F25/2.8, 3 - камера з об'єктивом Canon EF 70-200MM F/2.8 L IS III USM, 4 – камера для контролю навантаження, 5 – ноутбук для запису зображень, 6 – ноутбук для запису навантаження, 7 – дослідний зразок (вигляд з камери 2)

Для обробки цифрових зображень та отримання в результаті деформацій бетону використовували програмне забезпечення VIC-2D. Програма VIC 2D розроблена компанією Correlated Solutions. У програму закладений алгоритм аналізу спектрів, що дає можливість отримання відносних переміщень.

5. Побудова повної діаграми “напруження-деформації” бетону з низхідною віткою, з використанням методики цифрової кореляції зображення.

5. 1. Дослідження повдзовжніх та поперечних деформацій бетону за методикою кореляції цифрового зображення

Метод кореляції зображення є можливість отримати деформації та відповідно напруження повної поверхні дослідного зразка.

При аналізі поперечних напружень призми, можливо виявити появу внутрішньої тріщини зразка до її виникнення назовні. Це дозволяє виявлення тріщин в момент, коли візуально тріщини ще не можливо зафіксувати (рис. 9).

Руйнування призми з класу бетону С50/60 відбулось раптово з поширенням внутрішньої тріщини назовні зразка, що є характерним для таких класів. Завдяки використанню високошвидкісної камери та фотофіксацією кожних 250 мс вдалось зафіксувати момент руйнування зразка (рис. 9, *г*).

Таким самим чином, методика дозволяє отримати вертикальні деформації зразка, при тому в кожній ділянці (рис. 10).

Це дозволяє дослідити характер деформацій з розподілом на повній поверхні зразка, що за допомогою стандартних методик неможливо.

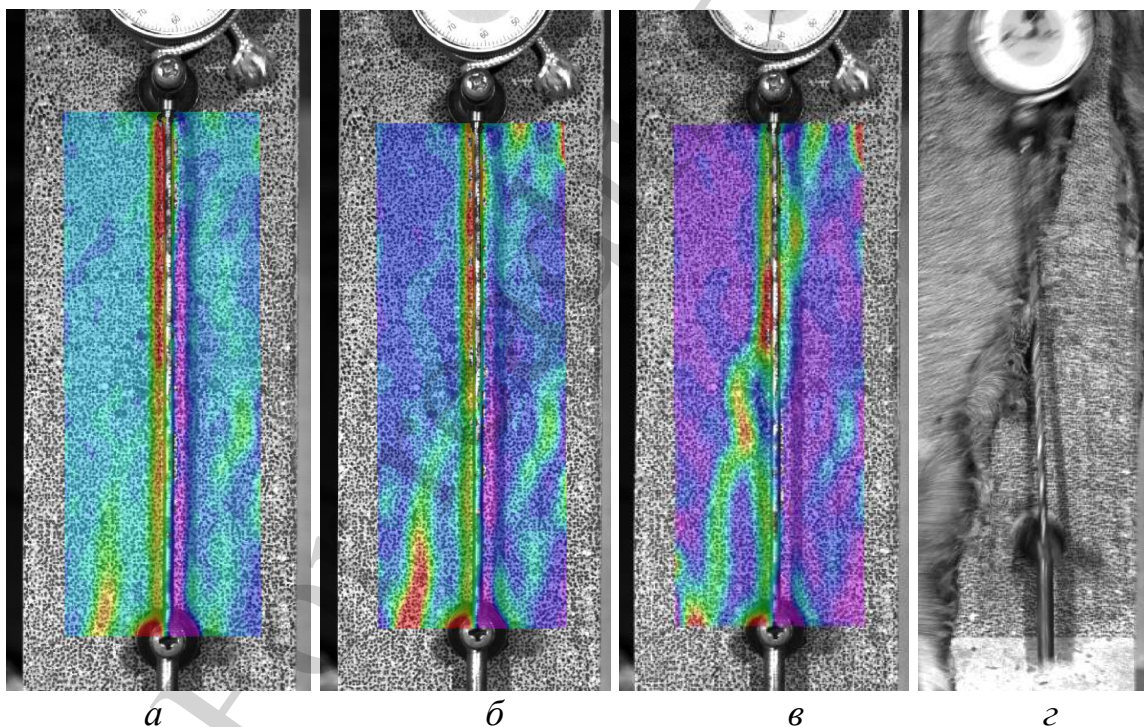


Рис. 9. Характер утворення тріщин, отриманих за методикою кореляції цифрового зображення. *а* – при напруженні 41.5 МПа, *б* – при напруженні 42 МПа, *в* – при напруженні 43 МПа, *г* – в момент руйнування

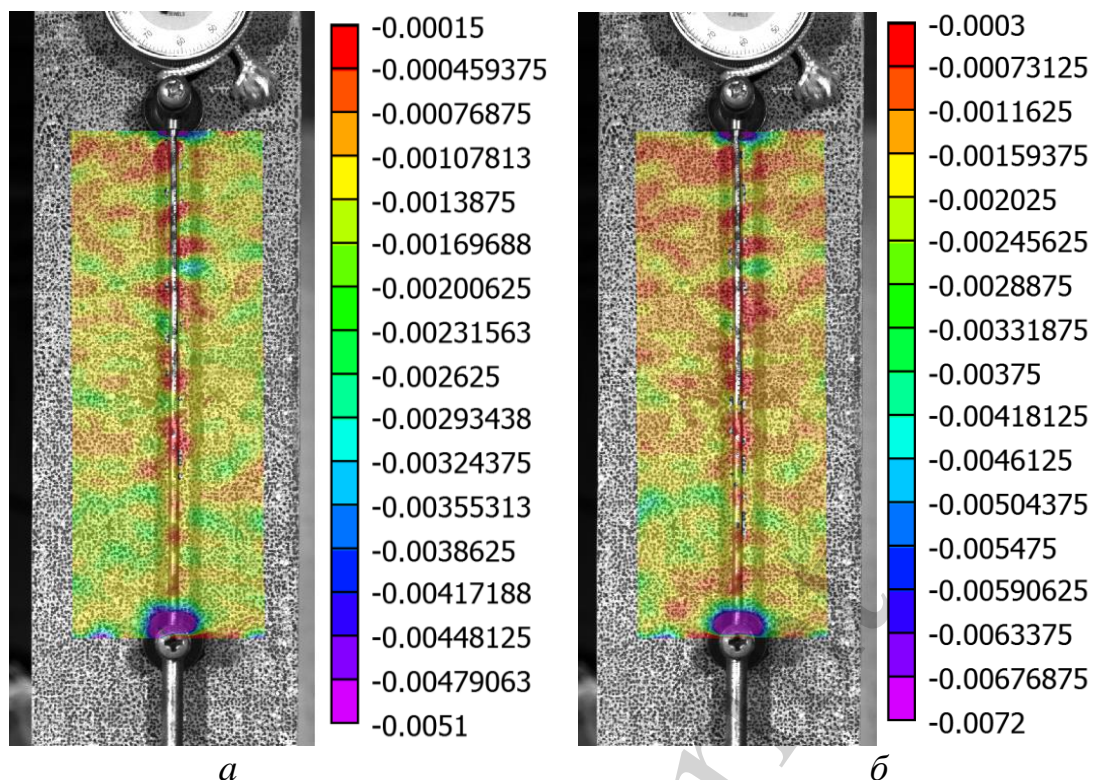


Рис. 10. Розподіл вертикальних напружень зразка. *a* – при напруженні 40.5 МПа, *б* – при напруженні 44.0 МПа

5. 2. Експериментальні дослідження з побудови повної діаграми “напруження-деформації” бетону за розробленою методикою

Для побудови повної діаграми навантаження відео навантаження розбивалось на фотографії 4 кадри/секунду. Таким чином, можливо було синхронізувати навантаження з деформаціями, отриманими методом цифрової кореляції зображень та отриманих за допомогою мікроіндикатор з точністю 0.001 мм з базою 200 мм.

Графік “напруження-деформації” для бетонної призми класу С50/60 наведений на рис. 11. Для визначення відносних деформацій за методикою цифрової кореляції зображення були встановлені віртуальні екстензометри в програмному забезпеченні в межах середині зразка та на базі 200 мм.

В результаті за запропонованими методиками отримано повну діаграму руйнування бетону без використання спеціально пристосованих стендів. При тому, що значення за приладом (gauges, рис. 1) та значення отриманими при цифровій кореляції зображень (DIC_Lense_Canon та DIC_Lense_Computar) мають відхилення в межах допуску, а характер діаграми відповідає орієнтовним значенням в нормативних документах.

При використанні об’єктиву Canon EF 70-200MM F/2.8 L IS III USM (DIC_Lense_Canon) помітні деякі відхилення при напруженнях 25...35 МПа. Це пов’язано з тим, що масштаб дослідженої ділянки при об’єктиві Canon в 3 рази більший чим для Computar F25/2.8, тому необхідно використовувати спектлі значно меншого розміру. Проте даний розмір спектлів є цілком достатній для об’єктиву Computar F25/2.8 при даній ділянці досліджень.

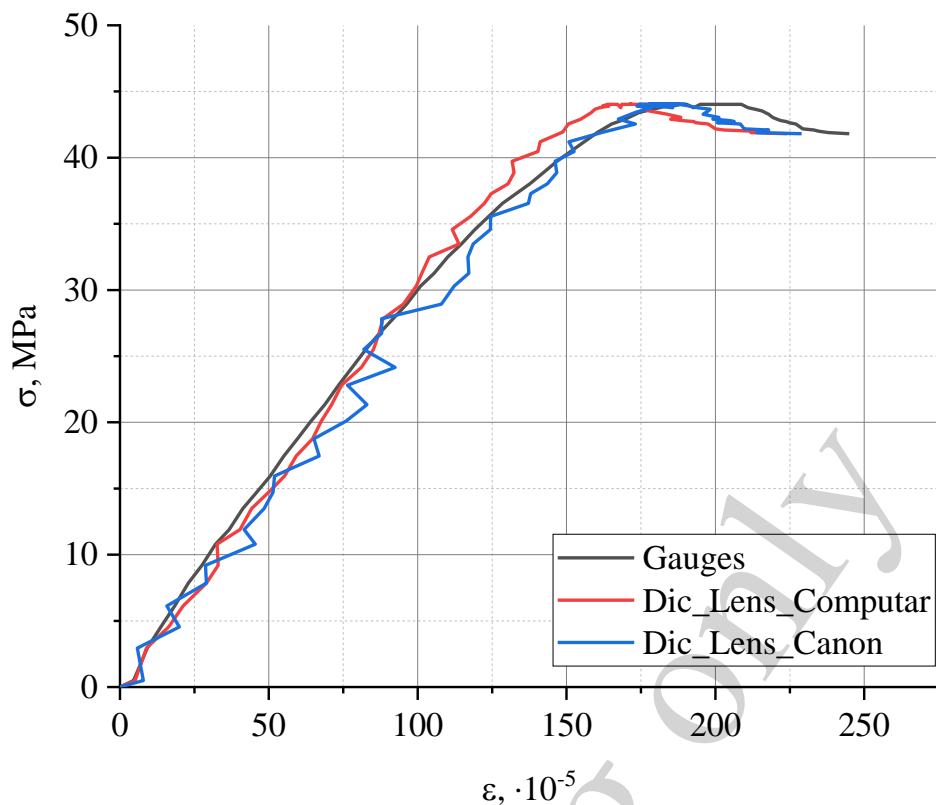


Рис. 11. Повна діаграма руйнування зразка бетону класу C50/60

Порівняння результатів відхилення напружень отриманими за допомогою мікроіндикатор та кореляції зображень з різними об'єктивними можна побачити в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння зміни відносних деформацій за мікроіндикатором та цифровою кореляцією зображень

| Напруження, МПа | Відносні деформації, $\times 10^{-5}$ | | | Відхилення об'єктив Computar відносно мікроіндикатора, % | Відхилення об'єктив Canon відносно мікроіндикатора, % |
|-----------------|---------------------------------------|---|--|--|---|
| | Мікроіндикатор на базі 200 мм | Цифрова кореляція зображення, об'єктив Computar | Цифрова кореляція зображення, об'єктив Canon | | |
| 12.1 | 36.7 | 40.32 | 41.72 | 9.88 | 13.68 |
| 19.1 | 59.6 | 64.73 | 65.14 | 8.55 | 9.23 |
| 26.0 | 82.6 | 85.16 | 81.89 | 3.14 | 0.82 |
| 31.9 | 105.5 | 101.4 | 117.2 | 3.89 | 11.09 |
| 38.0 | 133 | 124.73 | 137.97 | 6.24 | 3.71 |
| 42.0 | 156 | 141.14 | 150.81 | 9.5 | 3.3 |
| 44.5 | 178.9 | 159.56 | 176.69 | 10.81 | 1.23 |
| 44.875 | 201.8 | 171.87 | 177.65 | 14.84 | 11.98 |

Тобто відхилення значень відносних деформацій отриманих за мікроіндикатором та за методикою цифрової кореляції зображень до напруження 44.5 МПа складала в межах до 10–11 %, а при максимальному напруженні 44.875 МПа в межах до 15 %.

6. Обговорення результатів дослідження бетонних зразків з використанням методики цифрової кореляції зображення

В результаті роботи розроблено методику створення спектлів для кореляції цифрового зображення. Методика полягає в поступовому розчиненні роздрукованих на папері спектлів до бетонної поверхні з використанням ацетону. Даний спосіб дозволяє ефективно створювати спектли різноманітної конфігурації (рис. 6). За результатами випробовувань (табл. 2) розроблена методика дає можливість аналізу цифрової кореляції зображень для визначення відносних деформацій з точністю від 3 % до 10 %.

За розробленою методикою можливе прогнозування утворення тріщин (рис. 9), оскільки методика цифрової кореляції зображення дає поперечне переміщення всіх точок площини. Значною перевагою є можливість проаналізувати місця утворення внутрішніх тріщин, що візуально визначити неможливо. В результаті досліджень отримано повну діаграму руйнування бетону за допомогою кореляції цифрового зображення при використанні пресу не пристосованого для цього (рис. 11). Це дає змогу випробовувати бетонні зразки без затрат на переобладнання дослідного стенду. В результаті дослідження було отримано значення деформації на низхідній вітці діграми “напруження-деформації” для бетонних зразків. Дана методика дозволяє виконувати розрахунок залізобетонних конструкцій, використовуючі попередні експериментальні випробування бетонів та закладання в розрахунок нелінійної діграми. з більш достовірною точністю. Так само за діаграмою деформування можливо отримати більш достовірні коефіцієнти полінома 5-го порядку для покращення точності розрахунку. Також за даною методикою встановлено граничні напруження на низхідній вітці $\sigma_{cu1}=42.48$ МПа та граничні відносні деформації $\varepsilon_{cu1}=0.00229$. Саме ці параметри та нелінійна діграма закладаються в існуючі норми розрахунку залізобетонних конструкцій [21, 22]. Можливість отримати дані результати дало використання високошвидкісних монохромних камер та швидкість запису 250 мс.

Отримані експериментальні дані деформацій за значеннями мікроіндикатора та за методикою цифрової кореляції зображення. Результати відхилення цих даних складає в основному в межах до 10 %. Це дозволяє стверджувати, про достовірність результатів та можливість застосування даної методики. Перевага даної методики над існуючими полягає у можливості безконтактного визначення деформацій бетонного зразка та багаторазовому використанні. Існуючі методики використовують для визначення деформацій LVDT датчики [30] або тензорезистори [31]. При випробуванні за допомогою LVDT датчиків [30] є ризик їх пошкодження внаслідок різкого руйнування бетону, а тензорезистори [31] є одноразові. Також, даний спосіб не потребує спеціально розробленого дороговартісного стенду для випробовування на відміну від [29]. Існуючі методики дозволяють отримати діаграми, проте не дають можливості прогнозування тріщин та отримання деформацій на всій поверхні зразка.

Таким чином, методика цифрової кореляції зображення при дослідженні бетонних та залізобетонних зразків дозволяє на будь-якому етапі навантаження отримувати деформації на всій площині або в будь-яких з ділянок, що представляють інтерес. При тому, можливо отримати переміщення як окремих точок,

так і обраховані відносні деформації між точками або на всій площині. За результатами досліджень в порівнянні з механічними приладами є висока достовірність результатів, що дозволяє рекомендувати дану методику для досліджень таких конструкцій.

Проте, існують певні недоліки при використанні на практиці запропонованого методу. Зокрема, необхідно підібрати правильно розміри спектрів та об'єктів. При використанні об'єктива Computar збіжність результатів складала в межах до 10–11 %, а об'єктива Canon до 15 % (табл. 2). Це пояснюється тим, що розмір спектрів діаметром 1 мм занадто великий для об'єктива Canon. Також важливим є непопадання прямого природнього світла на об'єктив камер. Ще одним недоліком є доступ від камери до досліджуваного об'єкту. Датчики можливо встановити безпосередньо на призмі. Камери можуть реєструвати зображення на певній відстані, тому не повинно бути жодних сторонніх об'єктів між камерою та дослідним зразком. Обмеженнями при застосуванні методу кореляції цифрового зображення для визначення деформацій є розміри дослідних зразків. Камери "Grasshopper 3" фірми Flir (Канада) з об'єктивом Computar F25/2.8, які використовуються в даній роботі, дозволяють виміряти деформації для зразків розміром 400×400 мм. Це максимальні розміри, яких достатньо для визначення відносних деформацій бетону з точністю 0.1 мікрон.

Враховуючи позитивні результати даних досліджень, планується продовження вдосконалення використання методики цифрової кореляції зображення та розвиток досліджень. В майбутніх дослідженнях планується вдосконалення методики розрахунку для визначення ширини розкриття тріщин на кожному етапі навантаження. Також, планується вдосконалення даної методики для використання при експериментальних випробуваннях залізобетонних балок натурних розмірів.

7. Висновки

1. Отримано поперечні та повздовжні відносні деформації бетону на кожному етапі навантаження. На відміну від існуючих методів, запропонована методика дозволяє отримання відносних деформацій всієї дослідженої площини зразка. Це дає можливість дослідити зміну відносних деформацій та переміщення окремих точок або ділянок при дослідженні бетонних поверхонь. Це, в свою чергу, дозволяє дослідити місця та характер утворення тріщин та дає змогу практичного використання. Зокрема, при експертизі існуючих конструкцій можливо зафіксувати місця утворення майбутніх тріщин та відносні деформації окремих ділянок.

2. Побудовано експериментальном шляхом повну діаграму "напруження-деформації" бетону з низхідною віткою, використовуючу методику кореляції цифрового зображення. Відхилення значень відносних деформацій, отриманих за мікроіндикатором та за розробленою методикою цифрової кореляції зображень до напруження 44.5 МПа, складала в межах до 10–11 %, а при максимальному напруженні 44.875 МПа в межах до 15 %. Це дозволяє стверджувати можливість використання розробленої методики при випробуванні бетонних зразків.

Література

1. Бамбура, А. М., Дорогова, О. В., Сазонова, І. Р., Богдан, В. М. (2018). Розрахунок позацентрово стиснутих гнучких залізобетонних елементів за методом "реальної" кривизни. Наука та будівництво, 3, 10–20.
2. Mergos, P. E., Mantoglou, F. (2019). Optimum design of reinforced concrete retaining walls with the flower pollination algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 61 (2), 575–585. doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02380-x>
3. Martins, A. M. B., Simões, L. M. C., Negrão, J. H. J. O., Lopes, A. V. (2019). Sensitivity analysis and optimum design of reinforced concrete frames according to Eurocode 2. *Engineering Optimization*, 52 (12), 2011–2032. doi: <https://doi.org/10.1080/0305215x.2019.1693554>
4. Tahsin Öztürk, H., Dede, T., Türker, E. (2020). Optimum design of reinforced concrete counterfort retaining walls using TLBO, Jaya algorithm. *Structures*, 25, 285–296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.020>
5. Pavlikov, A., Harkava, O., Kochkarev, D. (2019). Calculation of reinforced concrete members strength by new concept. *Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures*, 820–827.
6. Bobalo, T., Blikharsky, Y., Kopyika, N., Volynets, M. (2021). Influence of the Percentage of Reinforcement on the Compressive Forces Loss in Pre-stressed RC Beams Strengthened with a Package of Steel Bars. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 53–62. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_7
7. Kovalchuk, B., Blikharsky, Y., Selejdak, J., Blikharsky, Z. (2020). Strength of Reinforced Concrete Beams Strengthened Under Loading with Additional Reinforcement with Different Levels of its Pre-tension. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 227–236. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_28
8. Kotes, P., Strieska, M., Brodnan, M. (2018). Sensitive analysis of calculation of corrosion rate according to standard approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 385, 012031. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/385/1/012031>
9. Koteš, P., Strieska, M., Brodňan, M. (2018). Long-time measurements of reinforcement due to air pollution corrosion on reinforced girder bridge. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*, 18 (4.2), 515–521. doi: <https://doi.org/10.5593/sgem2018/4.2/s19.067>
10. Klymenko, Y., Kos, Z., Grynyova, I., Maksyuta, O. (2020). Operation of Damaged H-Shaped Columns. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 192–201. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_24
11. Kos, Ž., Klimenko, Y. (2019). The development of prediction model for failure force of damaged reinforced-concrete slender columns. *Tehnički vjesnik*, 26 (6), 1635–1641. doi: <https://doi.org/10.17559/tv-20181219093612>
12. Blikharsky, Y., Kopyika, N., Selejdak, J. (2020). Non-uniform corrosion of steel rebar and its influence on reinforced concrete elements` reliability. *Production Engineering Archives*, 26 (2), 67–72. doi: <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.14>

13. Selejdak, J., Urbański, M., Winiarski, M. (2018). Assessment of a steel bridge corrosion degree. *E3S Web of Conferences*, 49, 00098. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184900098>
14. Vatulia, G., Berestianskaya, S., Opanasenko, E., Berestianskaya, A. (2017). Substantiation of concrete core rational parameters for bending composite structures. *MATEC Web of Conferences*, 107, 00044. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700044>
15. Vatulia, G. L., Lobiak, O. V., Deryzemlia, S. V., Verevicheva, M. A., Orel, Y. F. (2019). Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 664, 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/664/1/012014>
16. Khmil, R., Tytarenko, R., Blikharsky, Y., Vegera, P. (2020). The Probabilistic Calculation Model of RC Beams, Strengthened by RC Jacket. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 182–191. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_23
17. Mansour, W., Tayeh, B. A. (2020). Shear Behaviour of RC Beams Strengthened by Various Ultrahigh Performance Fibre-Reinforced Concrete Systems. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–18. doi: <https://doi.org/10.1155/2020/2139054>
18. Koteš, P., Vavruš, M., Jošt, J., Prokop, J. (2020). Strengthening of Concrete Column by Using the Wrapper Layer of Fibre Reinforced Concrete. *Materials*, 13 (23), 5432. doi: <https://doi.org/10.3390/ma13235432>
19. Brózda, K., Selejdak, J. (2018). The computational analysis of the crack width of beams reinforced with CFRP and steel bars. *MATEC Web of Conferences*, 183, 02003. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818302003>
20. Ye Khmil, R., Yu Tytarenko, R., Blikharsky, Y. Z., Vegera, P. I. (2021). Improvement of the method of probability evaluation of the failure-free operation of reinforced concrete beams strengthened under load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1021, 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012014>
21. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення (2011). К.: Мінрегіонбуд України, 72.
22. Eurocode EN 1990:2002. Basis of structural design. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
23. Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cement and Concrete Research*, 3 (5), 583–599. doi: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(73\)90096-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90096-3)
24. Barnard, P. R. (1964). Researches into the complete stress-strain curve for concrete. *Magazine of Concrete Research*, 16 (49), 203–210. doi: <https://doi.org/10.1680/mac.1964.16.49.203>
25. Lipiński, T. (2017). Roughness of 1.0721 steel after corrosion tests in 20% NaCl. *Production Engineering Archives*, 15 (15), 27–30. doi: <https://doi.org/10.30657/pea.2017.15.07>
26. Kweon, H. D., Kim, J. W., Song, O., Oh, D. (2021). Determination of true stress-strain curve of type 304 and 316 stainless steels using a typical tensile test

and finite element analysis. *Nuclear Engineering and Technology*, 53 (2), 647–656. doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.07.014>

27. Zhang, Q., Mol'kov, Y. V., Sobko, Y. M., Blikhars'kyi, Y. Z., Khmil', R. E. (2015). Determination of the Mechanical Characteristics and Specific Fracture Energy of Thermally Hardened Reinforcement. *Materials Science*, 50 (6), 824–829. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9789-9>

28. Watanabe, K., Niwa, J., Yokota, H., Iwanami, M. (2004). Experimental Study on Stress-Strain Curve of Concrete Considering Localized Failure in Compression. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2 (3), 395–407. doi: <https://doi.org/10.3151/jact.2.395>

29. Дохойда, М., Бабич, Є. М., Філіпчук, С. В., Савицький, В. В. (2019). Дослідження деформативних властивостей бетону класу C50/60 з урахуванням низхідної вітки деформування. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, 37, 175–183. doi: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i37.325>

30. Lavatelli, A., Turrisi, S., Zappa, E. (2018). A motion blur compensation algorithm for 2D DIC measurements of deformable bodies. *Measurement Science and Technology*, 30 (2), 025401. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aaf31a>

31. Zappa, E., Hasheminejad, N. (2017). Digital Image Correlation Technique in Dynamic Applications on Deformable Targets. *Experimental Techniques*, 41 (4), 377–387. doi: <https://doi.org/10.1007/s40799-017-0184-3>

32. Mai, B. V., Pham, C. H., Hancock, G. J., Nguyen, G. D. (2019). Block shear strength and behaviour of cold-reduced G450 steel bolted connections using DIC. *Journal of Constructional Steel Research*, 157, 151–160. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.025>

33. Tung, S.-H., Shih, M.-H., Kuo, J.-C. (2010). Application of digital image correlation for anisotropic plastic deformation during tension testing. *Optics and Lasers in Engineering*, 48 (5), 636–641. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.09.011>

34. Fayyad, T. M., Lees, J. M. (2014). Application of Digital Image Correlation to Reinforced Concrete Fracture. *Procedia Materials Science*, 3, 1585–1590. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.256>

35. Skarżyński, Ł., Kozicki, J., Tejchman, J. (2013). Application of DIC Technique to Concrete—Study on Objectivity of Measured Surface Displacements. *Experimental Mechanics*, 53 (9), 1545–1559. doi: <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9781-y>

36. Gualtieri, S. (2012). Novel technique for DIC speckle pattern optimization and generation. *Politecnico Di Milano*, 127.