

Ткач Р. О., PhD, асистент (roman7tkach@gmail.com), Літвінова В. О. здобувач вищої освіти третього (освітньо-наукового) рівня (valentya.litvinova.bd.2024@lpnu.ua), Сурмай М. І., к.т.н., доцент (mychajlo_surmaj@ukr.net) (НУ «Львівська політехніка», Інститут будівництва та цивільної інженерії, м. Львів)

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ 3D-КОРЕЛЯЦІЇ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Цифрова кореляція зображень (ЦКЗ) – це безконтактний оптичний метод, який широко використовується для вимірювання деформації, вібрації, напруження і переміщення в різних матеріалах та середовищах. На відміну від контактних методів, ЦКЗ є дуже універсальним, адаптуючись до різноманітних умов. Метод працює шляхом порівняння послідовних зображень поверхні зразка до і після деформації, використовуючи кореляцію підмножин пікселів для визначення полів переміщень і деформацій з винятковою точністю.

Тривимірна цифрова кореляція зображень (3D-ЦКЗ) розширює цей підхід до тривимірних вимірювань повного спектра, дозволяючи детально оцінювати форми, переміщення і деформації в твердих матеріалах і елементах конструкцій. Його здатність аналізувати складну геометрію, гетерогенні матеріали і великі поля деформацій зробила його провідним методом в оптичній метрології. Однак метод стикається з проблемами при кількісній оцінці невизначеності (КОН), яка залишається недостатньо розвиненою і не має стандартизованих, ефективних підходів для оцінки похибок переміщення, специфічних для спекл-паттернів або вимірювальних установок. Високо нелінійне зростання похибок у складному вимірювальному ланцюжку 3D-ЦКЗ додає складності, обмежуючи його ширше застосування у критично важливих галузях.

Для вирішення цих проблем необхідна розробка передових методологій та стандартизованих методів вимірювання якості для підвищення точності та надійності 3D-КЦЗ. Ці досягнення мають вирішальне значення для розширення сфери застосування в таких галузях, як аерокосмічна промисловість, цивільне будівництво та

матеріалознавство, де точні, надійні та ефективні вимірювання мають вирішальне значення для досягнення успіху. Покращені можливості КОН не тільки розширяють сферу застосування 3D-ЦКЗ, але й зміцнюють його роль як незамінного інструменту в експериментальній механіці та структурних випробуваннях, стимулюючи інновації в різних дисциплінах.

Ключові слова: цифрова кореляція зображень; тривимірна цифрова кореляція зображень (3D-ЦКЗ); методи оптичного вимірювання; спекл-патерн; деформація будівельних конструкцій.

ВСТУП

Цифрова кореляція зображень (ЦКЗ) – це добре розроблений алгоритм для 2D вимірювання деформації поверхні по всьому спектру. Він відстежує спекл-патерн у блоках пікселів для отримання векторного поля переміщень і карти деформацій [1]. На основі цього ж принципу розроблено метод цифрової об'ємної кореляції (ЦОЗ) для забезпечення тривимірного вимірювання об'ємних переміщень по всьому полю.

Порівняно з експериментальними та моделюючими підходами до аналізу деформацій, методи вимірювання на основі зображень мають переваги безконтактності, нешкідливості, високої точності, фактографічності та простоти експлуатації.

Алгоритм субпіксельної реєстрації є ключовим для визначення точності вимірювання ЦКЗ. Оригінальним алгоритмом, що використовується в ЦКЗ, був алгоритм прямого додавання Ньютона – Рафсона (FA-NR), про який повідомили Брюк та ін.

Цифрова кореляція зображень (ЦКЗ) належить до безконтактного методу вимірювання деформації по всьому полю, який відстежує спотворення поверхневих візерунків на об'єкті під час деформації. Різноманітні механічні властивості композитної стрічки скло/епоксидна смола були отримані на основі простого спеціального випробування на зсув коротким променем (ЗКП) з використанням ЦКЗ при кімнатній температурі. Напруження були розраховані на основі простого рішення в замкнутій формі без спеціальних припущень про нелінійну залежність між напруженням і деформацією. Нещодавно ЦКЗ було застосовано для визначення коефіцієнта термічного розширення (КТР) для плівок при підвищених температурах. Методологія, що базується на ЦКЗ, була

запропонована для визначення асиметричних закономірностей кераміки при високих температурах [2].

Однак, попри значні досягнення, застосування 3D-ЦКЗ стикається з певними викликами. Одним із найважливіших є кількісна оцінка невизначеності (КОН), яка залишається недостатньо розвиненою через складність нелінійних процесів поширення похибок у вимірювальному ланцюгу. Відсутність ефективних і стандартизованих підходів до оцінки невизначеностей суттєво обмежує використання 3D-ЦКЗ

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Метод цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) широко використовується для експериментального визначення механічної поведінки полімерних матеріалів. Однак практичне застосування ЦКЗ для випробування полімерів на розтяг часто стикається з серйозною декореляцією зображень, спричиненою розтріскуванням і надмірною деформацією. Було запропоновано використання флуоресцентної тривимірної цифрової кореляції зображень (3D-ЦКЗ) з адаптивною інкрементальною стратегією обчислення для надійного вимірювання великих деформацій полімерів шляхом усунення або пом'якшення декореляції зображень, спричиненої цими проблемами. Запропонована методика спочатку використовує флуоресцентну 3D-ЦКЗ для усунення декореляції зображення, спричиненої ефектом викривлення. Потім застосовується адаптивна стратегія інкрементних обчислень, яка може автоматично оновлювати еталонні зображення, щоб зменшити декореляцію зображень через надмірну деформацію. Ефективність і практичність запропонованої методики було продемонстровано при вимірюванні деформації повного поля у зразках хлоропренового каучуку, що зазнали великої деформації розтягу. Також запропонований метод було застосовано для дослідження механічної поведінки конкретного матеріалу для водонепроникного покриття. Експериментальні результати показують, що поєднання флуоресцентної 3D-ЦКЗ та адаптивної стратегії інкрементального обчислення може ефективно вирішувати проблеми декореляції зображень при великих деформаціях полімерів, забезпечуючи високу точність вимірювань переміщень і деформацій. Ця методика має потенціал для ширшого застосування у вивченні механічної поведінки інших матеріалів чи структур, що зазнають великих або надвеликих деформацій [3].

Також було запропоновано метод Монте-Карло для кількісної оцінки невизначеності вимірювань переміщень 3D-ЦКЗ. Метод ґрунтується на теоретичному аналізі випадкової похибки співставлення зображень і теоретичній оцінці невизначеності калібрування камери. Він дозволяє оцінити похибку вимірювань переміщень 3D-ЦКЗ без додаткових експериментальних процедур. Валідаційні експерименти показують, що оцінена похибка відповідає фактичній ситуації. На основі запропонованого методу також досліджено вплив якості спекл-патерну, розміру підмножини та якості калібрування камери на невизначеність вимірювання переміщень 3D-цифрової кореляції зображень. Результати показують, що порівняно з кореляцією зображень, калібрування камери має більш виражений вплив на точність вимірювань переміщень. Запропонований метод може бути інтегрований з існуючим програмним забезпеченням 3D-ЦКЗ для кількісної оцінки метрологічних характеристик 3D-ЦКЗ вимірювань і, отже, кращої інтерпретації результатів вимірювань [4].

Було досліджено потенційний внесок 3D-цифрової кореляції зображень для розуміння властивостей вогнетривкого бетону під час експериментів з високотемпературної повзучості. Проведено експериментальний аналіз якості високотемпературних зображень. Оцінено похибки вимірювань та проведено порівняння з чутливістю розрахованих кінематичних полів до параметрів моделі Друкера – Прагера, які контролюють дилатансію. Отримано багатообіцяючі результати: 1) щодо вимірювання прогину та положення нейтральної осі при випробуваннях на повзучість при згині; 2) щодо безконтактного вимірювання осьової деформації при випробуваннях на повзучість при стиску; 3) стосовно підкріплення припущення про дилатантну поведінку при випробуваннях на згин та діаметральний стиск; 4) отримання даних для грубої ідентифікації параметрів при випробуваннях на повзучість при стиску [5].

Для характеристики повзучості досліджуваного матеріалу були проведені випробування на згин, а для отримання полів деформацій після припинення випробувань використано кореляцію 3D-цифрових зображень. Положення нейтральної осі, визначене за залишковим полем непружних деформацій, дозволяє виділити асиметрію повзучості та оцінити коефіцієнт асиметрії [6].

Також було проведено дослідження, під час якого були досліджені зразки еталонного матеріалу, а також зразки, зварені

методом стикового та кутового зварювання з маловуглецевої сталі S355. Перед зберіганням у камері соляного розпилення зразки були оброблені чистим абразивним струменем, як це зазвичай робиться для морських опорних конструкцій. Після одного місяця впливу зразки випробовували на втому і контролювали за допомогою цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Зразки були проскановані за допомогою 3D-сканерів з високою роздільною здатністю до і після корозійного впливу. Крім того, досліджували твердість матеріалу і залишкові напруження, щоб кількісно оцінити вплив корозії з боку матеріалу і вплив процесу зварювання. Показано, що корозія сильно впливає на геометрію зварного шва. Як окремі точки, так і рівномірну корозію виявлено на кінчику шва, що є важливим для втомленості. Також показано, що втомна міцність зварних зразків залежить не тільки від геометрії та її деградації під дією корозії, але більшою мірою від залишкових напружень, що виникають після корозії. Залишкові стискаючі напруження, що виникають при чистій абразивній обробці, були частково послаблені корозією. Випробування на втому показали збільшення межі міцності після чистої абразивної обробки і подальше її зменшення внаслідок корозії [7].

У 2018 році було проведене експериментальне дослідження багат шарових скляних колон квадратного перерізу, у ході якого для виміру поздовжніх деформацій було використано мікроіндикатори годинникового типу, методом кореляції цифрових зображень для якого на кожному зразку було підготовлено спекл-поверхню. У результаті дослідження була встановлена розбіжність між модулями пружності триплексованого скла дослідних зразків, яка становила 4,79%, що не перевищує допустимих 15%. Модуль пружності триплексного скла згідно з отриманих результатів проведеного дослідження коливається в межах 59,54-56,82 ГПа, тоді як модуль пружності листового скла становив 70 ГПа згідно з чинними нормами. Відносні деформації поверхонь скляних колон були отримані за допомогою мікроіндикаторів годинникового типу та методом КЦЗ [8].

Хао Чен та ін. провели інноваційне дослідження, що пропонує повний метод 3D-ЦКЗ моделювання, що включає оптичне моделювання та механічне моделювання, а також інтегрує 3D-ЦКЗ, віртуальний стереозір та технологію реконструкції зображень з надвисокою роздільною здатністю. Віртуальний стереозір може

зменшити витрати на обладнання та усунути помилки синхронізації камери. Реконструкція зображення з надвисокою роздільною здатністю може компенсувати зниження точності, спричинене втратою роздільної здатності зображення. Для реалізації цієї симуляції використовується низка програмних інструментів, таких як ANSYS SPEOS 2024R1, ZEMAX 2024R1, MECHANICAL 2024R1 та MULTIDIC v1.1.0. Побудовано та протестовано вимірювальні системи на основі стереобачення та віртуального стереобачення для використання в 3D-ЦКЗ. Результати модельного експерименту показують, що коли похибка синхронізації базової системи стереозору (БСЗ) знаходиться в межах 10–3 часових кроків, похибка реконструкції знаходиться в межах 0,005 мм, а точність віртуальної системи стереозору знаходиться між похибкою синхронізації БСЗ в 10–7 і 10–6 часових кроків. Крім того, після застосування технології реконструкції зображення з надвисокою роздільною здатністю похибка реконструкції зменшиться до 0,002 мм [9].

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Метою дослідження було провести аналіз можливостей і обмежень тривимірної цифрової кореляції зображень (3D-ЦКЗ) для вимірювання деформацій будівельних конструкцій та розробка рекомендацій щодо вдосконалення оцінки невизначеностей.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ

Застосування звичайних фотокамер із кольоровими матрицями має свої переваги та недоліки. До недоліків можна віднести складність підготовки до роботи та обробки отриманих даних. До переваг належать використання великих сенсорів із високою роздільною здатністю та дрібними пікселями, що забезпечує точніші результати. На відміну від використання класичних механічних методів вимірювання деформацій, метод КЦЗ дозволяє отримати інформацію про деформування поверхонь протягом усього експерименту, аж до руйнування зразка [10].

У порівнянні з 2D-ЦКЗ, 3D-ЦКЗ має більші можливості, ширший діапазон застосування і точніші вимірювання, що дає йому змогу ширше застосовуватися в різних галузях. Однак, у практичному застосуванні традиційні 3D-ЦКЗ також мають деякі очевидні обмеження, а саме (1) для вимірювання потрібні щонайменше дві синхронно запущені камери, що значно збільшує вартість

обладнання; (2) точна синхронізація камер часто є складною і вимагає великих зусиль у випадках, коли потрібні високошвидкісні або високоточні вимірювання; (3) немінучі варіації інтенсивності та нелінійні геометричні спотворення між парами зображень можуть спричинити труднощі з точним узгодженням двох зображень у форматі стерео, що призводить до зниження точності вимірювань. Тому деякі дослідники застосовують принципи віртуального стерео зору до 3D-ЦКЗ.

Полімерна галузь стрімко розвинулася і зараз надійно закріпилася, а її зростання невід'ємне від розуміння механічної реакції полімерів. Традиційні кліпсові екстензометри, незважаючи на їх широке використання, мають кілька притаманних їм обмежень. По-перше, ці контактні датчики повинні бути механічно прикріплені до досліджуваного зразка, що може спричинити пошкодження та значні місцеві деформації поверхні зразка. По-друге, кліпсові екстензометри мають обмежений діапазон вимірювання і повинні бути зняті до закінчення випробування на розтяг. На противагу цьому, цифрова кореляція зображень (ЦКЗ), оптичний метод на основі обробки зображень, пропонує значні переваги безконтактного вимірювання деформації по всьому полю без обмеження діапазону вимірювання. Таким чином, методи ЦКЗ все частіше використовуються як потужний інструмент для вимірювання великих полів деформації полімерів шляхом порівняння зображень, записаних на різних етапах [11].

Однак безпосереднє застосування звичайної 3D-ЦКЗ для вимірювання великих деформацій полімерів в основному стикається з двома проблемами:

- 1) деякі полімерні матеріали мають властивість утворювати на поверхні крихітні тріщини або заглиблення, відомі як розтріскування, які виникають, коли матеріал зазнає великої пластичної деформації. Ці тріщини відбивають світло від поверхні, що призводить до появи глянцевого ефекту на поверхні, як показано на рис. 1. Віддзеркалення посилює місцеву інтенсивність зображення, створюючи проблеми для виконання точних кореляційних розрахунків між зображеннями [12];
- 2) коефіцієнти кореляції між деформованими зображеннями, отриманими на різних етапах, і вихідним зображенням (тобто

першим зображенням у звичайному розрахунку ЦКЗ) поступово зменшуються, оскільки деформація безперервно зростає.



Рис. 1. Тріщини в полі метилметакрилаті (ПММА):
(а) – до і (б) – після розтягу

На основі нещодавно розробленої макроскопічної флуоресцентної технології 3D-ЦКЗ, проблеми декореляції можуть бути ефективно вирішені шляхом поєднання флуоресцентної 3D-ЦКЗ зі стратегією інкрементних обчислень. По-перше, у флуоресцентній 3D-ЦКЗ флуоресцентні спекл-патерни використовуються як заміник звичайних спекл-патернів з розпиленням. Завдяки своїй властивості самосвітіння, а не відбивання світла, флуоресцентні спекл-патерни можуть ефективно пригнічувати ефекти місцевої декореляції, зумовлені крейзингом. По-друге, адаптивна схема інкрементного обчислення використовується для вирішення проблеми ефекту декореляції зображення внаслідок великої деформації. Запропонована адаптивна інкрементна схема розрахунку умовно оновлює вихідне зображення і автоматично переводить розрахункові точки на оновленому вихідному зображенні в найближчі до них точки з точністю до цілого пікселя. Використовуючи ці два способи, можна ефективно використовувати декореляцію зображень у полімерних матеріалах. Для перевірки було проведено експеримент з розтягування зразка хлоропренового каучуку (ХК) з відомими механічними параметрами. На поверхню зразків було нанесено як звичайні, так і флуоресцентні спекл-патерни. Результати експерименту не тільки доводять ефективність адаптивного методу інкрементального розрахунку, але й демонструють перевагу флуоресцентних спекл-патернів над звичайними спекл-патернами в умовах великих деформацій.

Використання флуоресцентної 3D-ЦКЗ дозволяє ефективно уникнути ефекту декореляції, спричиненого розтріскуванням, що виникає в деформованих полімерних зразках. Крім того, адаптивна стратегія інкрементного розрахунку може ефективно пом'якшити ефект декореляції, спричинений великими деформаціями. Незважаючи на те, що надійність та ефективність запропонованої

методики підтверджена виключно для вимірювання великих деформацій у полімерах, вона не має обмежень щодо досліджуваних матеріалів.

Цифрова кореляція зображень успішно використовується в багатьох видах експериментів. Зокрема, деякі автори повідомляють про його використання для спостереження за полем деформацій в експерименті з повзучості кераміки при згині при високій температурі [13; 14], що дозволяє отримати поглиблену характеристику поведінки повзучості. Такі експериментальні дані дуже корисні для порівняння результатів розрахунків з експериментальними та оцінки актуальності моделей і припущень [13; 14]. Однак його застосування при високих температурах не є простим через відомі експериментальні труднощі [14]. Леплей [14] використовував потужне біле світло, щоб мати значну кількість відбитого світла.

Якщо для моніторингу положення нейтральної осі в експериментах з повзучого згину потрібен лише 2D-ЦКЗ, то 3D-ЦКЗ дасть доступ до позаплощинного зміщення, яке в основному контролюється ефектом Пуассона та розширенням.

У цьому дослідженні придатність природної текстури для 3D-ЦКЗ буде оцінено при високій температурі на тому ж матеріалі. Експериментальні дослідження проводяться з використанням існуючої печі, яка обладнана двома вікнами, що дозволяє отримувати зображення з двох точок зору для 3D-ЦКЗ, але не дозволяє використовувати додаткове світло.

Чисельний аналіз показав, що для калібрування кута сили тертя від нейтрального положення осі в експерименті з повзучості при згині необхідне 3D-моделювання, оскільки 2D-моделювання не є достатньо точним для відтворення поля поверхневих деформацій, яке є опорними експериментальними даними.

Порівняння невизначеності вимірювань та чисельного аналізу чутливості показує, що 3D-ЦКЗ при високій температурі є перспективним способом отримання експериментальних даних, важливих для калібрування моделі:

1) Прогин в експериментах з повзучості при згині можна контролювати з достатнім рівнем неточності, але він недостатньо чутливий до кута відхилення, щоб вважати його точною оцінкою.

2) Зміщення поза площиною можна виміряти з достатнім рівнем похибки, щоб а) підтвердити здатність матеріалу до розтягування під

час випробувань на повзучість при згині та поперечному стиску; b) отримати кривизну циліндричних зразків, що дозволяє приблизно визначити кут розтягування або ексцентриситет.

3) Розташування нейтральної осі можна контролювати з достатнім рівнем невизначеності і воно майже не чутливе до кута відхилення та ексцентриситету, що підтверджує його актуальність для ідентифікації кута сили тертя.

Ці висновки відкривають шлях до більш повного методу калібрування з використанням високотемпературної 3D-ЦКЗ.

Вплив позаплощинного переміщення (включаючи позаплощинну трансформацію і обертання) на двовимірні (2D) і тривимірні (3D) цифрові кореляційні вимірювання зображень продемонстровано з використанням основних теоретичних рівнянь зображення у вигляді щілини і експериментально за допомогою синхронізованих, багатосистемних вимірювань. Результати повного поля, отримані під час руху жорсткого тіла поза площиною за допомогою однокамерної системи зору зі стандартним об'єктивом f55 мм Nikon (a-1) і телецентричним об'єктивом Schneider-Kreuznach Xenoplan (a-2), порівнюються з даними, отриманими за допомогою двокамерної системи стереобачення зі стандартними об'єктивами f55 мм Nikon.

Експерименти з 3D-ЦКЗ, що виконували Хао Чен та ін. були змодельовані в повному обсязі і з високою якістю завдяки поєднанню декількох програмних інструментів. Зокрема, поведінка зразка при розтягуванні була змодельована за допомогою MECHANICAL, а інформація про його динамічну геометричну деформацію була імпортована у внутрішнє оптичне середовище в SPEOS. ZEMAX був використаний для проєктування об'єтивів камер, плоских дзеркал і призм, які були імпортовані в SPEO. Було розроблено чотири вимірювальні системи, засновані на стереозорі та віртуальному стереозорі: BSS, MVSS, BVSS та QVSS. У середовищі оптичного моделювання кожна система виконала калібрування вимірювальної системи, а потім записала процес розтягування зразка. Отримані калібрувальні зображення потім використовувалися для калібрувальних розрахунків і аналізу, а зображення зразка використовувалися для 3D-ЦКЗ розрахунків і аналізу. Крім того, до зображень зразка були застосовані мережі відновлення з надвисокою роздільною здатністю [9].

На рисунку 2 показано результати перевірки точності для кожної вимірювальної системи. Зокрема, на рис. 2, а показано середню похибку проєкції $\bar{\epsilon}$ при калібруванні однією камерою, а на рис. 2, б – різницю δ_d між виміряними та істинними значеннями відстаней між кутовими точками. З погляду середньої похибки відтворення, найкращу точність і надійність при калібруванні однією камерою має BSS, за нею йде MVSS, потім BVSS, а найменшу точність має QVSS. З іншого боку, з точки зору δ_d , порядок точності вимірювань такий: QVSS > BSS > MVSS > BVSS.

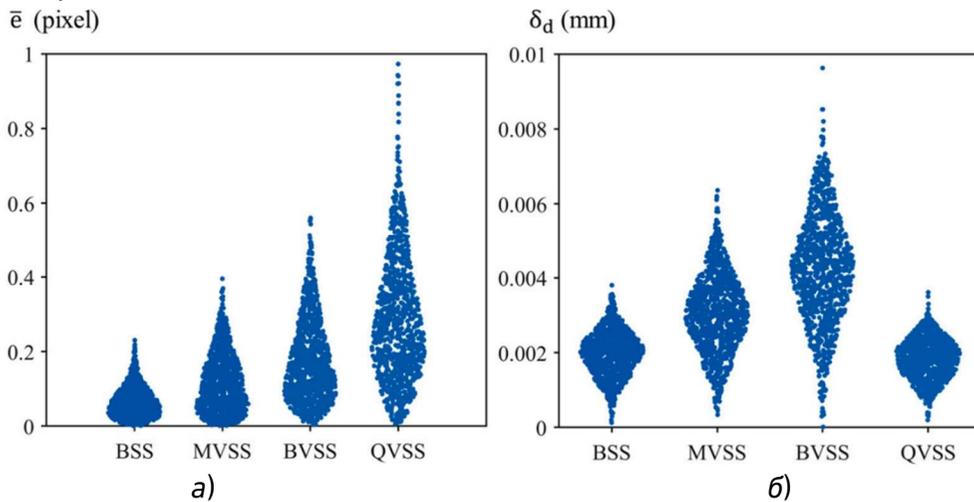


Рис. 2. Результати перевірки точності для чотирьох систем вимірювання: а) середня похибка проєкції $\bar{\epsilon}$; б) різниця δ_d між виміряними та істинними значеннями відстаней між кутовими точками δ_d

Як безконтактний метод безконтактного вимірювання, технологія ЦКЗ може бути застосована для вимірювання деформації бетонних матеріалів. Крива P-CMOD, отримана за допомогою методу ЦКЗ, майже така ж, як і крива, виміряна за допомогою традиційного екстензометра. Більше того, форма кривої P-CTOD відповідає формі кривої P-CMOD, отриманої методом ЦКЗ. Однак можна помітити, що CTOD завжди менша за CMOD при різних положеннях тесту.

За допомогою методу ЦКЗ отримано розвиток зони процесу руйнування ЗПР та ефективної тріщини на різних стадіях навантаження. При цьому встановлено, що зі збільшенням довжини діючої тріщини довжина ЗПР спочатку зростає, а потім зменшується. Максимального значення ЗПР досягає значення близько 60 мм при трьох значеннях навантаження, коли зсув розкриття тріщини

дорівнює критичному переміщенню розкриття тріщини. Навантаження, що відповідає максимальному значенню ЗПР, зростає зі збільшенням швидкості навантаження і становить 16%, 20% і 33% від пікового навантаження при швидкості навантаження 0,001 мм/с, 0,01 мм/с і 0,1 м/с [17].

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЇХ АПРОБАЦІЯ

У ході досліджень із використання методу 3D кореляції цифрових зображень (ЦКЗ) встановлено його високу ефективність і точність у визначенні напружено-деформованого стану будівельних конструкцій. Аналіз тривимірних карт деформацій дозволив точно виявляти зони концентрації напружень, що сприяє прогнозуванню можливих пошкоджень або руйнувань. Метод демонструє високу просторову точність навіть у складних геометричних конфігураціях.

Порівняння результатів, отриманих за допомогою ЦКЗ, із даними чисельного моделювання та теоретичних розрахунків підтвердило їх високу відповідність. Лабораторні випробування реальних зразків довели ефективність методу у визначенні критичних навантажень і оцінці залишкової міцності конструкцій.

Впровадження методу в практику дозволило забезпечити моніторинг стану будівельних конструкцій у реальних умовах. Це підвищує надійність та безпечність експлуатації об'єктів, підтверджуючи сучасність і ефективність методу.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗРОБОК

Метод 3D кореляції цифрових зображень (ЦКЗ) продемонстрував високу ефективність у виявленні зон концентрації напружень, оцінці локальних деформацій і моніторингу стану складних будівельних конструкцій. Точність і надійність методу забезпечуються використанням високороздільної цифрової апаратури з мінімізацією похибкою синхронізації камер, а його універсальність дозволяє застосовувати методику для аналізу як статичних, так і динамічних процесів. Практичне значення методу полягає у зменшенні часу і ресурсів для обстеження конструкцій та підвищенні точності виявлення дефектів, що сприяє зниженню аварійних ризиків.

Подальші перспективи включають автоматизацію аналізу, адаптацію методу для специфічних галузей (аерокосмічна, енергетична, суднобудівна), інтеграцію з традиційними методами

контролю, дослідження сучасних матеріалів (композити, наноматеріали), розробку портативних ЦКЗ-систем і вдосконалення обчислювальних алгоритмів. Це сприятиме підвищенню оперативності, точності й ефективності діагностики, а також розширенню можливостей неруйнівного контролю.

1. N. McCormick and J. Lord. Digital image correlation. *Materials Today*. Dec. 2010. Vol. 13. № 12. Pp. 52–54.
2. P. Bing, X. Hui-Min, X. Bo-Qin and D. Fu-Long. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation. *Measurement Science and Technology*. Jun. 2006. Vol. 17. № 6. Pp. 1615–1621.
3. Haotian Yang, Bing Pan. Measuring large tensile deformation of polymers using fluorescent 3D-digital image correlation with adaptive incremental calculation strategy. *Polymer Testing*. March 2024. Vol. 132.
4. Jianhui Zhao, Bing Pan. *Optics and Lasers in Engineering*. November 2023. Vol. 170.
5. Gilles Dusserre, Thomas Pottier, Thierry Cutard. Contribution of high-temperature 3D-Digital Image Correlation to investigate the creep behaviour of refractory materials. *Open Ceramics*. September 2023. Vol. 15.
6. G. Dusserre, F. Nazaret, L. Robert, T. Cutard. Applicability of image correlation techniques to characterise asymmetric refractory creep during bending tests. *Journal of the European Ceramic Society*. February 2013. Vol. 33, Issue 2. Pp. 221–231.
7. Sulaiman Shojai, Tim Brömer, Elyas Ghafoori, Christian Woitzik, Moritz Braun, Markus Köhler, Peter Schaumann. Assessment of corrosion fatigue in welded joints using 3D surface scans, digital image correlation, hardness measurements, and residual stress analysis. *International Journal of Fatigue*. November 2023. Vol. 176.
8. Демчина Б. Г., Сурмай М. І, Ткач Р. О., Шидловський Я. М. Експериментальне дослідження багат шарових скляних колон квадратного перерізу. 2018.
9. Hao Chen, Hao Li, Guohua Liu and Zhenyu Wang. A Novel Simulation Method for 3D Digital-Image Correlation: Combining Virtual Stereo Vision and Image Super-Resolution Reconstruction. June 2024.
10. Козак Р. П. Несуча здатність тонких багат шарових скляних балок. Львів, 2023.
11. Becker T. H., Mostafavi M., Tait R. B., Marrow T. J. An approach to calculate the J-integral by digital image correlation displacement field measurement. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. April 2012. Pp. 971–984.
12. O. Grimaldo Ruiz et al. Design and mechanical characterization using digital image correlation of soft tissue-mimicking polymers. *Polymers*. June 2022.
13. P. Leplay, O. Lafforgue, F. Hild. Analysis of asymmetrical creep of a ceramic at 1350° C by digital image correlation. *Journal of the American Ceramic Society*. July 2015. Vol. 98, Issue 7. Pp. 2240–2247.
14. Lucas Breder Teixeira. Numerical Modeling and Experimental Characterization of the Asymmetric Creep Behavior of Refractory Materials,

PhD Thesis. France 2022. **15.** Jingwu Bu, Xudong Chen, Liangpeng Hu, Hanqing Yang and Saisai Liu. Experimental Study on Crack Propagation of Concrete Under Various Loading Rates with Digital Image Correlation Method. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. December 2020. Vol. 14, Issue 1.

REFERENCES:

- 1.** N. McCormick and J. Lord. Digital image correlation. *Materials Today*. Dec. 2010. Vol. 13. № 12. Pp. 52–54.
- 2.** P. Bing, X. Hui-Min, X. Bo-Qin and D. Fu-Long. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation. *Measurement Science and Technology*. Jun. 2006. Vol. 17. № 6. Pp. 1615–1621.
- 3.** Haotian Yang, Bing Pan. Measuring large tensile deformation of polymers using fluorescent 3D-digital image correlation with adaptive incremental calculation strategy. *Polymer Testing*. March 2024. Vol. 132.
- 4.** Jianhui Zhao, Bing Pan. *Optics and Lasers in Engineering*. November 2023. Vol. 170.
- 5.** Gilles Dusserre, Thomas Pottier, Thierry Cutard. Contribution of high-temperature 3D-Digital Image Correlation to investigate the creep behaviour of refractory materials. *Open Ceramics*. September 2023. Vol. 15.
- 6.** G. Dusserre, F. Nazaret, L. Robert, T. Cutard. Applicability of image correlation techniques to characterise asymmetric refractory creep during bending tests. *Journal of the European Ceramic Society*. February 2013. Vol. 33, Issue 2. Pp. 221–231.
- 7.** Sulaiman Shojai, Tim Brömer, Elyas Ghafoori, Christian Woitzik, Moritz Braun, Markus Köhler, Peter Schaumann. Assessment of corrosion fatigue in welded joints using 3D surface scans, digital image correlation, hardness measurements, and residual stress analysis. *International Journal of Fatigue*. November 2023. Vol. 176.
- 8.** Demchyna B. H., Surmai M. I., Tkach R. O., Shydlovskiy Ya. M. Eksperymentalne doslidzhennia bahatosharovykh sklianykh kolon kvadratnoho pererizu. 2018.
- 9.** Hao Chen, Hao Li, Guohua Liu and Zhenyu Wang. A Novel Simulation Method for 3D Digital-Image Correlation: Combining Virtual Stereo Vision and Image Super-Resolution Reconstruction. June 2024.
- 10.** Kozak R. P. Nesucha zdatnist tonkykh bahatosharovykh sklianykh balok. Lviv, 2023.
- 11.** Becker T. H., Mostafavi M., Tait R. B., Marrow T. J. An approach to calculate the J-integral by digital image correlation displacement field measurement. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. April 2012. Pp. 971–984.
- 12.** O. Grimaldo Ruiz et al. Design and mechanical characterization using digital image correlation of soft tissue-mimicking polymers. *Polymers*. June 2022.
- 13.** P. Leplay, O. Lafforgue, F. Hild. Analysis of asymmetrical creep of a ceramic at 1350° C by digital image correlation. *Journal of the American Ceramic Society*. July 2015. Vol. 98, Issue 7. Pp. 2240–

2247. **14.** Lucas Breder Teixeira. Numerical Modeling and Experimental Characterization of the Asymmetric Creep Behavior of Refractory Materials, PhD Thesis. France 2022. **15.** Jingwu Bu, Xudong Chen, Liangpeng Hu, Hanqing Yang and Saisai Liu. Experimental Study on Crack Propagation of Concrete Under Various Loading Rates with Digital Image Correlation Method. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. December 2020. Vol. 14, Issue 1.

Tkach R. O., PhD, Assistant (roman7tkach@gmail.com), **Litvinova V. O., Post-graduate Student** (valentyna.litvinova.bd.2024@lpnu.ua), **Surmaj M. I., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (mychajlo_surmaj@ukr.net) (Lviv Polytechnic National University, Institute of Building and Environmental Engineering, Lviv)

ANALYSIS OF RESEARCH ON BUILDING STRUCTURES USING THE METHOD OF 3D CORRELATION OF DIGITAL IMAGES

Digital Image Correlation (DIC) is a non-contact optical technique widely utilized for measuring deformation, vibration, strain, and displacement in various materials and environments. Unlike contact-based methods, DIC is highly versatile, adapting to diverse conditions. The method operates by comparing sequential images of a sample surface before and after deformation, using pixel subset correlation to determine displacement and strain fields with exceptional precision.

Three-Dimensional Digital Image Correlation (3D-DIC) extends this approach to three-dimensional full-field measurements, enabling detailed evaluation of shapes, displacements, and deformations in solid materials and structural elements. Its ability to analyze complex geometries, heterogeneous materials, and large deformation fields has established it as a leading technique in optical metrology. However, the method faces challenges in uncertainty quantification (UQ), which remains underdeveloped and lacks standardized, efficient approaches for assessing displacement uncertainties specific to

speckle patterns or measurement setups. The highly nonlinear propagation of uncertainties through the complex 3D-DIC measurement chain adds to this difficulty, limiting its broader adoption in critical applications.

To address these challenges, the development of advanced UQ methodologies and standardized practices is essential for improving the accuracy and reliability of 3D-DIC. These advancements are crucial for expanding its applicability in fields such as aerospace, civil engineering, and materials science, where precise, reliable, and efficient measurements are fundamental to success. Enhanced UQ capabilities will not only broaden the scope of 3D-DIC but also solidify its role as an indispensable tool in experimental mechanics and structural testing, driving innovation across various disciplines.

Keywords: digital image correlation; three-dimensional digital image correlation (3D-DIC); optical measurement methods; speckle pattern; deformation of building structures.