

ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛЯНИХ БАЛОК НА ЧОТИРЬОХТОЧКОВИЙ ЗГИН З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КОРЕЛЯЦІЇ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Роман КОЗАК¹, Богдан ДЕМЧИНА²

¹ Національний університет «Львівська Політехніка»
вул. Карпінського, 6, Львів, Україна, 79013

² Державна вища техніко-економічна школа ім. Кс. Броніслава Маркевича в Ярославі
вул. Чарнецького, Ярослав, Польща, 37-500

¹ roman.p.kozak@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-9617-5128>

² bogdan195809@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-3498-1519>

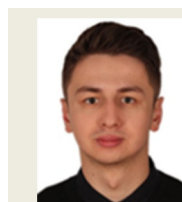
Анотація. Основні елементи скляних конструкцій, які зазвичай використовуються в будівництві це елементи які працюють на згин. Застосування скляних балок з великим співвідношенням висоти перерізу до його ширини найчастіше можна зустріти у практичному використанні. Для даного типу конструкцій характерне явище втрати стійкості із площини.

Оптичні методи дослідження все більше набувають популярності у зв'язку із зручністю та відсутністю прямого контакту із дослідним зразком. Таким методом дослідження є метод кореляції цифрових зображень. У загальному випадку метод потребує спеціалізованого апаратного забезпечення та для окремого експерименту без необхідності записувати зображення на високій швидкості, перспективним є і використання загальнодоступного користувацького без дзеркального фотоапарата у якості пристрою записування.

Предметом дослідження було вибрано скляні балки які працюють на чотириох точковий згин. Для дослідження було виготовлено шість скляних двох шарових балок. Дослідження балок відбувалось із ступеневим приростом навантаження на спеціальній дослідній установці, виготовленій для дослідження скляних балок. Відносні деформації було записано за допомогою методу кореляції цифрових зображень та механічних екстензо-метрів. Описано методику використання без дзеркальних фотокамер з кольоровою матрицею для дослідження скляних балок на чотириох точковий згин.

© Р.КОЗАК, Б.ДЕМЧИНА, 2023

Метод кореляції цифрових зображень при використанні загальнодоступного користуваць-



Роман КОЗАК
аспірант кафедри будівельних
конструкцій та мостів



Богдан ДЕМЧИНА
професор Інституту
технічної інженерії,
д.т.н., професор

Методика полягала у виборі правильного обладнання та визначенні характеристик фотокамери для отримання більше інформації з зображень та підготовки їх для аналізу. Зображення були обезбарвлені та налаштовано баланс білого з використанням фоторедактора. Готові до аналізу зображення передавались в спеціалізоване програмне забезпечення GOM Correlate Pro.

Виконано дослідження скляних балок на чотириох точковий згин. Значення максимальних напружень були отримані за допомогою рівняння рівноваги перерізу, відносних деформацій отриманих згідно з показами механічних приладів та методу кореляції цифрових зображень.

Руйнування скляних балок відбулось пошарово із початковим утворенням тріщини у нижній найбільш розтягненій зоні далі тріщина поширилась із тюльпаноподібним характером до верхньої зони

кого апаратного забезпечення показав себе добре, часто показуючи значення руйнівних на-

пружень близьких до теоретичних значень отриманих розрахунком. Рекомендовано використовувати даний метод для подальших досліджень.

Ключові слова. Скло; скляна балка; чотирих точковий згин; міцність скла на згин; кореляція цифрових зображень.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Як і будь яка сучасна галузь, будівництво розвивається стрімко. Появляються нові матеріали, що дозволяють архітекторам пропонувати все сміливіші ідеї та все частіше у їхніх роботах спостерігається використання скла. Уже звично скло використовують як огорожу-вальну конструкцію, та все більше на теренах України появляються скляні елементи як несучі конструкції. Зараз це здебільшого індивідуальні проекти малих архітектурних форм. Та не зважаючи на ріст популярності скляних конструкцій, в Україні досі немає розробленої нормативної документації та практичних рекомендацій що до проектування скляних конструкцій як несучих елементів.

Зазвичай скляні конструкції використовують в покриттях та перекриттях, тобто скляні несучі елементи працюють на згин, тобто такими елементами є балки та плити. Відштовхуючись від технологічного процесу виготовлення флоат скла, порізки скла, та триплексу значно ефективніше виконати балку із великим співвідношенням висоти до ширини її перерізу. Та такий підхід має свої недоліки. Головний з яких це проблема усіх тонких перерізів – бокова втрата стійкості. Та додатковим недоліком є аморфна структура матеріалу, що приводить до неможливості оцінювати міцність матеріалу за нормальним розподілом, а за двох параметричним розподілом Вей-булла [1], що враховує ймовірнісний розподіл випадкових величин.

Руйнування скляних конструкцій відбувається раптово та дуже часто із колапсом всієї конструкції під час навантаження. Це приводить до ускладнення під час досліджування конструкцій. Прилади які безпосередньо контактують із поверхнею скла є в зоні

ризик пошкодження. Виходом із цієї ситуації є використання безконтактних оптичних методів вимірювання. Одним із таких методів є кореляція цифрових зображень [2].

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В сучасній архітектурі помітна тенденція використання скла для великопролітних та знакових конструкцій. Прикладами такого їх використання уже відомі світу басейн «СкайПул» у Лондоні [3] та славнозвісні скляні куби компанії Apple [4]. В основі цих споруд лежать скляні елементи які працюють на згин.

В Україні дослідженнями скляних конструкцій, зокрема тих які працюють на згин, починаючи із 2012 року, займаються під керівництвом проф. Демчини Б. в НУ «Львівська політехніка». Експериментальні дослідження скляних балок не є новинкою. У роботі [5], було випробувано скляні балки на чотирьох точковий згин із скла товщиною 19 мм. Балки мали відношення сторін 1:1 та 1:2 В практичному використанні такі перерізи є сировино затратним і переважають саме балки із великим співвідношенням висоти до ширини її перерізу. Найбільшою проблемою таких перерізів, які працюють на згин, є втрата стійкості поперечного перерізу [6–9].

В університеті Цінхуа [6] досліджували стійкість скляних балок з різною кількістю шарів від одного до шести. Вони порівнювали експериментальні значення з тими, які отримали за допомогою методу скінчених елементів. Більшість результатів були однаковими, але були деякі випадки випадкового руйнування та втрати стійкості, що відповідали стандартним формам для балок з однією зосередженою силою.

Також були виконані спроби оцінки вогнестійкості скляних балок під дією навантаження [10].

Метод кореляції цифрових зображень [2] (далі КЦЗ) – це оптичний метод дослідження який використовує методику реєстрації двох вимірних змін поверхонь у пікселях зображення.

Історично дана методика з'явилася у 80-х роках минулого століття, коли з'явилися цифрові фотокамери, які дозволяли записувати інформацію на світлочутливих матрицях [11]. Крос-кореляція є методом вимірювання подібності двох серій функцій, які мають зсув одна відносно одної. У загальному випадку, КЦЗ можна поділити на два підвиди: моно (2D) [12] та стерео (3D) [13]. Кореляція - це пошук взаємозалежності між двома випадковими величинами. Тобто у випадку КЦЗ – це взаємозв'язок між деформацією групи пікселів та деформацією досліджуваного зразку.

Даний метод зарекомендував себе для дослідження дерев'яних [14], залізобетонних [15] та сталевих [16] конструкцій.

У вище згаданих дослідженнях використано спеціалізоване апаратне забезпечення – це КЦЗ камери із монохромними матрицями, що дозволяють записувати зображення на високій швидкості. Міжнародна спільнота із КЦЗ [17] рекомендує використовувати такі камери, та у той же час не скасовує можливість використання загальнодоступного апаратного забезпечення. Якщо розглянути умови експерименту де немає необхідності у записі великої кількості кадрів за короткий час, то використання користувацьких камер із кольоровою матрицею є цілком виправданим рішенням.

Спроби використати саме користувацьке апаратне забезпечення були у [18,19]. При застосуванні методу КЦЗ був допущений ряд помилок, що давав задовільний результат, та не зважаючи на це даний метод показав себе добре.

Виходячи із аналізу літератури, можна зробити наступні висновки:

- Скляні балки із великим співвідношенням висоти перерізу до ширини є одним із найчастіше застосованих скляних конструкцій. Та мають ряд недоліків один з яких це втрата стійкості з площини.

- Метод КЦЗ є популярним оптичним методом дослідження серед науковців різних напрямків. Для застосування даного методу

Табл.1. Геометричні характеристики скляних балок. **Tabl.1.** Geometric characteristics of glass beams.

необхідне спеціалізоване апаратне забезпечення, але за певних умов експерименту можна розглянути використання загальнодоступних користувацьких фотокамер.

МЕТА І МЕТОДИ

Метою роботи було виконати експериментальні дослідження скляних балок, які працюють на чотирьох точковий згин із використанням методу кореляції цифрових зображень. А також апробувати метод кореляції цифрових зображень з уточненням параметрів його використання з використанням загальнодоступної користувацької без дзеркальної фотокамери із кольоровою матрицею для визначення деформацій бокових поверхонь скляних балок.

Для проведення дослідження було виготовлено зразки двох шарових скляних балок компанією «Склоресурс» із флоат скла методом триплексу. Матеріал балок відповідав вимогам [20]. Зразки були поділені на серії відносно висоти перерізу:

- Серія 1 – 100 мм;
- Серія 2 – 150 мм;
- Серія 3 – 200 мм.

Геометричні параметри зразків наведені на рис.1.

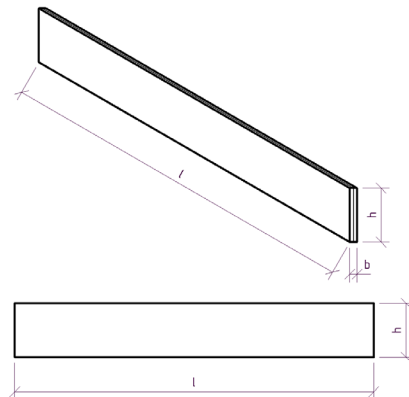


Рис.1. Геометрична схема скляних балок.
Fig.1. Geometric scheme of glass beams.

Геометричні параметри усіх зразків були визначені як середнє арифметичне декількох замірів для ширини та довжини, та трьох замірів для товщини. Розміри дослідних балок подано у табл.1.

Серія	Марка	Довжина l	Висота h	Ширина b	Маса m
		[мм]	[мм]	[мм]	[г]
1	Vm-1.1	1001.00	100.53	20.72	5050
	Vm-1.2	1001.00	100.11	20.85	5050
2	Vm-2.1	1000.00	150.02	20.80	7802
	Vm-2.2	1001.00	150.00	20.16	7566
3	Vm-3.1	1000.75	200.00	20.70	10356
	Vm-3.2	1000.75	200.00	20.78	10398

Дослідження були виконані на базі науково-дослідної лабораторії НДЛ-23 НУ «Львівська політехніка». Температура повітря була близька до 20 °С, а відносна вологість становила 40%...70%.

На дослідній установці (рис.2) була встановлена шарнірно обперта балка (9) на яку діяло дві зосереджені сили які передавалися на балку через траверсу (4). Зосереджені сили розташовувались на відстані по 10 см в різні сторони від середини балки по довжині. Відстань між опорами (7) та (8) скла-

дала 900 мм. Балка мала додаткові закріплення із площини (6) – підтримуючі металеві кутники що формували собою стабілізуючу струбцину, відстань між центрами інерції яких складала 800 мм. Важливим елементом була силова металева рама (5), яка виступала стабілізатором для траверси, що дозволяв лише вільні вертикальні переміщення траверси (4). Навантаження прикладалося за допомогою домкрату (2) далі через кільцевий динамометр (3).

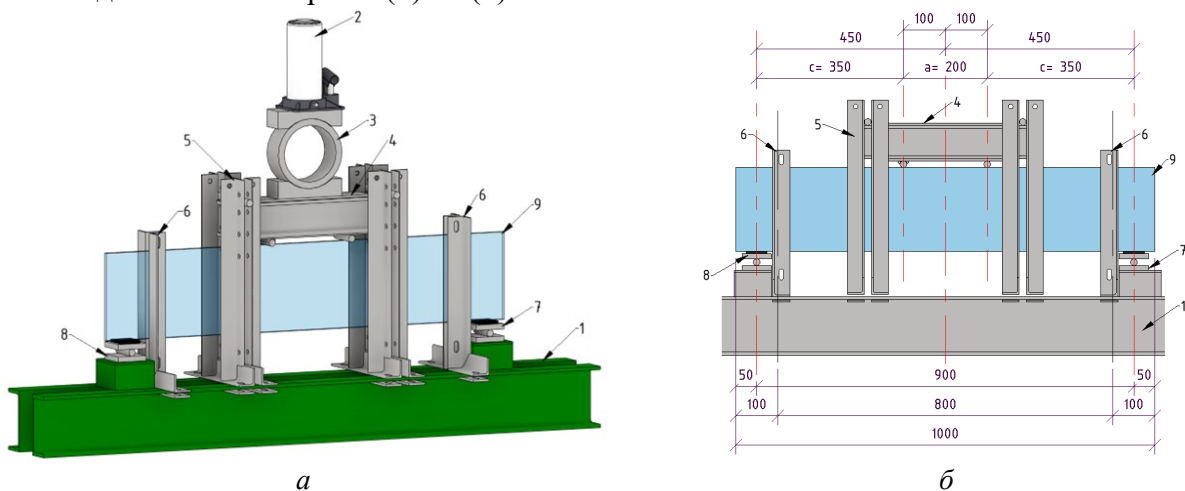


Рис.2. Загальний вигляд дослідної установки для випробування скляних балок:

a- аксонометричний вид; *б*- схема дослідної установки із основними розмірами.

1 – нерухома база; 2 – гідравлічний домкрат; 3 – кільцевий динамометр; 4 – траверса; 5 – силова металева рама; 6 – стабілізуюча струбцина; 7 – шарнірно нерухома опора; 8 – шарнірно рухома опора; 9 – скляна балка.

Fig.2. General view of the glass beam testing setup:

a- axonometric view; *b*- schematic of the experimental setup with main dimensions.

1 - fixed base; 2 - hydraulic jack; 3 - ring dynamometer; 4 - traverse; 5 - power metal frame; 6 - stabilizing clip; 7 - hinged fixed support; 8 - hinged movable support; 9 - glass beam.

Визначення відносних деформацій було визначено за допомогою механічних приладів та методу КЦЗ. Механічні прилади були розташовані на грані скла у верхній та нижній зоні по середині перерізу. Також за допомогою прогиномірів Аістова фіксувалось зміщення середину перерізу із площини.

Для визначення величин напруження σ_i за допомогою відносних деформацій отриманих за допомогою механічних приладів, а також методу КЦЗ, було використано формулу:

$$\sigma_i = \varepsilon_i \cdot E, \quad (1)$$

де, $E = 70\,000$ – значення модуля пружності для скла [МПа];
 ε_i – значення відносної деформації [мм/м].

Для обчислення теоретичного значення напруження було використано формулу:

$$\sigma_{u,teor} = \frac{3 \cdot N_u \cdot c}{h^2 \cdot b}, \quad (2)$$

де, N_u – руйнівне навантаження [Н];
 $c = 350$ – величина плеча зусилля (див. рис. 2(б)) [мм];
 h – висота перерізу балки (див. табл.1) [мм];
 b – ширина перерізу балки (див. табл.1) [мм].

Адаптація методу кореляції цифрових зображень була виконана згідно із п.2.1 [17], а саме були визначені параметри (рис.3):

- QOI – об’єкт дослідження – скляна балка на двох опорах.
- ROI – досліджуваний регіон – зона чистого згину балки.
- FOV – поле дослідження – відповідає ROI.

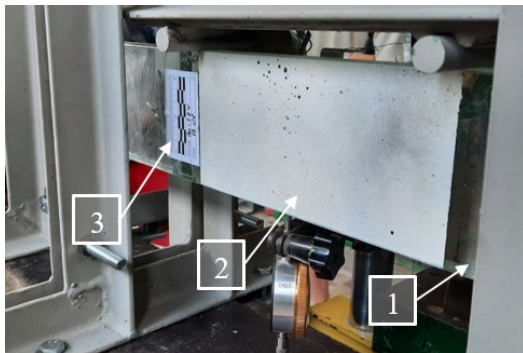


Рис.3. Дослідження скляних балок з використанням КЦЗ.

1 – QOI; 2 – ROI та FOV; 3 – масштабуючий маркер

Fig.3. Examination of glass beams using DIC.
1 - QOI; 2 - ROI and FOV; 3 - scaling marker

Схема досліду подана на рис.4. У дослідному зразку (1) був обраний регіон дослідження ROI (2). На фіксованій відстані так щоб ROI займав максимальну корисну площу матриці на штативі (3) була розташована фотокамера (4), позаду було розташовано джерело світла



Рис.4. Схема досліду із використанням КЦЗ.

1 – скляна балка; 2 – регіон дослідження; 3 – штатив; 4 – фотокамера; 5 – джерело світла.

Fig.4. Scheme of the experiment with the use of DIC.

1 – glass beam; 2 – research region; 3 – tripod; 4 – camera; 5 – light source.

У якості джерела зчитування інформації для дослідження була використана фотокамера SONY α6000. Із наступними характеристиками:

- Тип сенсору – Exmor HD CMOS;
- Розмір сенсору – 23.5 x 15.6 мм APSC;
- Площа сенсору – 366.6 мм²;
- Процесор обробки зображень – BIONZ Sony CXD4132;
- Розмір пікселя 3.92 μм.

Також був використаний об’єктив : E PZ 16-50 mm F3.5-5.6 OSS, у якому використовувалась фокусна віддаль в еквіваленті 50 мм, для того щоб уникнути впливу кривизни лінзи об’єктиву.

Згідно із рекомендацією 2.5 п.2.1 [17] дозволялося використовувати матриці із квадратними пікселями, що власне і було присутнє у даному сенсорі, та вимагало додаткового до-опрацювання зображення за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Зображення усіх етапів були зафіксовані у ручному режимі без автоматичного застосування параметрів які, теоретично та практично могли б вплинути на зчитування зображення.

Порядок підготовки зразків та створення спекул поверхні був аналогічний для дослідження [18,19].

Усі зображення були виконані у форматі ARW. Це дало змогу отримувати більше інформації із кожного зображення. Ще однією перевагою даного формату було монохромне вхідне зображення. Зображення формату ARW конвертувались в JPGE та остаточно обезбарвлювались за допомогою фоторедактора. Далі отримували свої порядкові номери та завантажувались в спеціалізоване програмне забезпечення.

Далі готові зображення звантажувались до GOM Correlate Pro. Де за допомогою інструментів програми визначались деформівні характеристики.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Було досліджено 6 скляних балок трьох серій. Руйнування балок відбувалось балок відбувалось миттєво на витримці після прикладання чергового ступеня навантаження. Фото зразків після руйнування зображено на

Усі балки зруйнувались із однаковим характером окрім однієї балки серії 3, руйнування відбулось від опори до ролика прикладання навантаження.

Результати дослідження скляних балок на чотирьох точковий згин подані в табл.2. Визначення максимального теоретичного напруження $\sigma_{u,teor}$ виконано згідно рівняння (2). В таблиці подані заміри максимальних відносних деформацій в момент руйнування для верху та низу перерізу балки. Визначення максимальних напружень отриманих експериментальним шляхом було виконано згідно рівняння (1).

На рисунку 5 подано типовий характер руйнування балки та приклад використання методу кореляції цифрових зображень на прикладі балки Vm-2.1. На ілюстрації зображено деформівні характеристики балок в момент руйнування за допомогою GOM Correlate та методу КЦЗ.

Табл.2. Результати дослідження скляних балок на чотирьох точковий згин.

Tabl.2. Results of the study of glass beams in four-point bending.

Серія	Марка	Макс. навант. N_u	Макс. напруження $\sigma_{u,teor}$	Механічні прилади			КЦЗ		
				Мак. від.деф (низ) $\epsilon_{i,exp}$	Мак. від.деф (верх) $\epsilon_{i,exp}$	Макс. напруження $\sigma_{i,exp}$	Мак. від.деф (низ) $\epsilon_{i,DIC}$	Мак. від.деф (верх) $\epsilon_{i,DIC}$	Макс. напруження $\sigma_{i,DIC}$
				[кН]	[МПа]	[$\mu\text{м/м}$]	[$\mu\text{м/м}$]	[МПа]	[$\mu\text{м/м}$]
1	Vm-1.1	4.21	21.09	1	31	2.19	94	151	29.16
	Vm-1.2	5.71	31.19	-14	52	3.67	253	413	19.63
2	Vm-2.1	13.2	28.31	-21	32	-1.48	335	360	25.42
	Vm-2.2	12.2	22.88	-38	17	-2.68	-14	-128	-9.04
3	Vm-3.1	24.3	30.85	-76	18	-5.37	-1	-19	-1.34
	Vm-3.2	26.3	33.25	-8	41	2.90	65	90	6.35

Балки серії 1. Балка Vm-1.1 зруйнувалась пошарово із початковим утворенням тріщини у нижній найбільш розтягненій зоні далі тріщина поширилась із тюльпано-подібним характером до верхньої зони, другий шар та третій шар скла зруйнувався ідентично до попереднього. Балка Vm-1.2 зруйнувалась аналогічно, але із зміщення місця утворення первинної тріщини другого шару.

Балки серії 2. Балка Vm-2.1 зруйнувалась пошарово із початковим утворенням тріщини у нижній найбільш розтягненій

зоні далі тріщина поширилась із тюльпано-подібним характером до верхньої зони, другий шар скла зруйнувався у ідентичному місці. Балка Vm-2.2 зруйнувалась аналогічно, але із зміщення місця утворення первинної тріщини другого шару.

Балки серії 3. Балка Vm-3.1 зруйнувалась нетипово для інших балок, пошарово із початковим утворенням поперечної тріщини у верхній зоні, другий шар скла зруйнувався у ідентичному місці. Балка Vm-3.2 зруйнувалась пошарово із початковим утво-

ренням тріщини у нижній найбільш розтягненій зоні далі тріщина поширилась за тюльпаноподібним характером до верхньої

зони, другий шар скла зруйнувався у ідентичному місці.

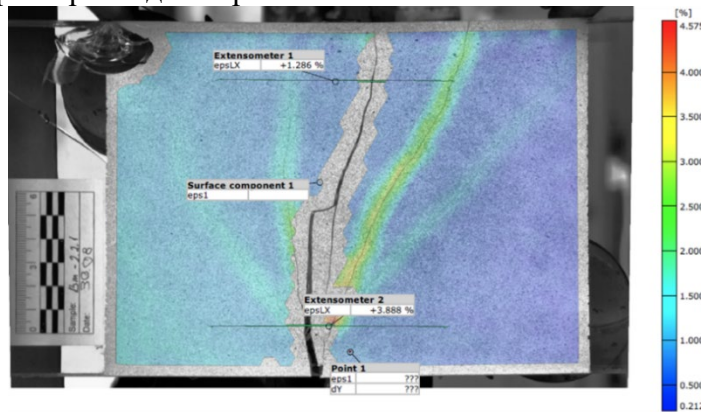


Рис. 5. Аналіз руйнування балки Вm-2.1 серії 2 із використанням КЦЗ.
Fig. 5. Failure analysis of beam Вm-2.1 series 2 using DIC.

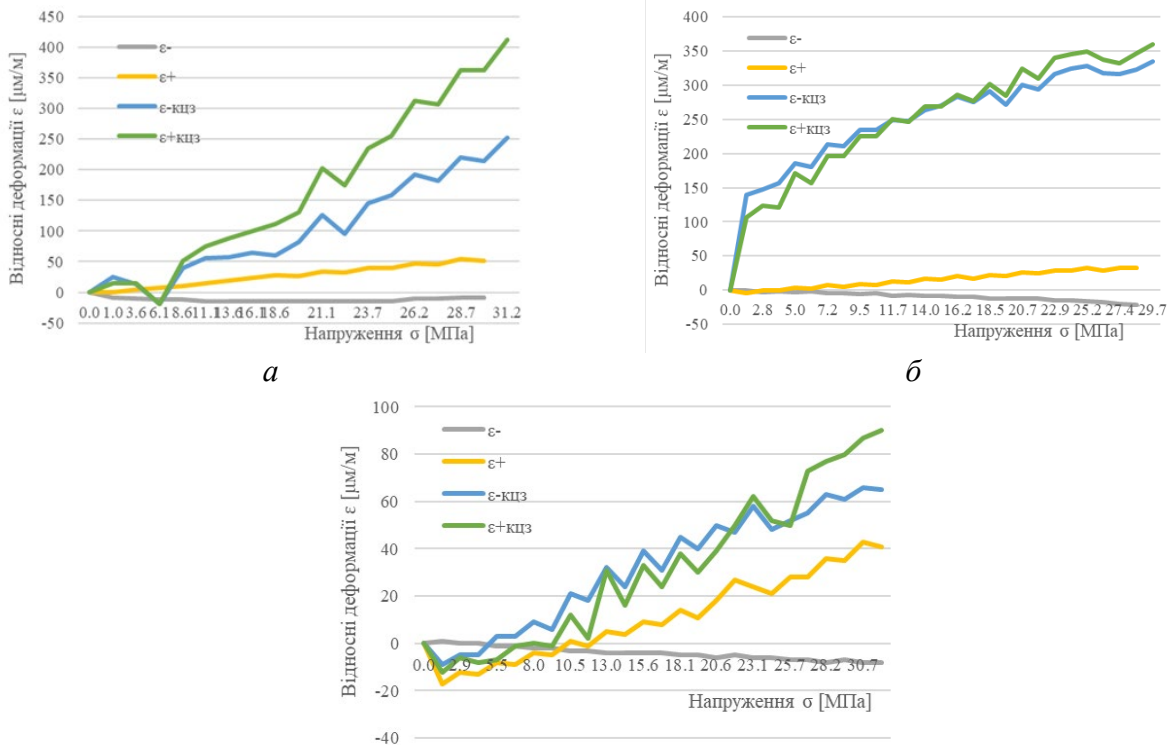


Рис. 6. Графіки залежності відносних деформацій ϵ_i від напруження σ_i :
 а -серія 1 балка Вm-1.2;
 б -серія 2 балка Вm-2.1;
 в - серія 3 балка Вm-3.2.

Fig. 6. Diagrams of the dependence of strain ϵ_i on stress σ_i :
 а - series 1 beam Вm-1.2;
 б - series 2 beam Вm-2.1;
 в - series 3 beam Вm-3.2.

Для кожного із балок було побудовано графіки залежності відносних деформацій ϵ_i від напруження σ_i . На рис.6. Зображено

характерні графіки для балок кожної із серій на прикладі балок Вm-1.2, Вm-2.1 та Вm-3.2.

За допомогою прогиномірів по середині прольоту балки також вдалось встановити

форму повороту та відхилення перерізу відносно власної осі в момент останнього ступеня прикладання навантаження (рис.7).

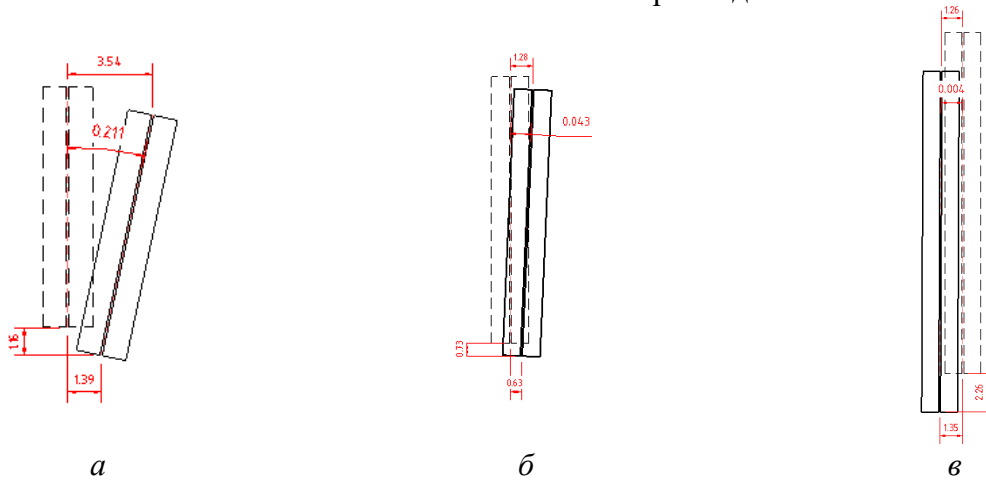


Рис. 7. Відхилення перерізу балки в момент останнього ступеня навантаження:

a -серія 1 балка Bm-1.2;

б -серія 2 балка Bm-2.1;

в -серія 3 балка Bm-3.2.

Fig. 7. Deflection of the beam section at the moment of the last stage of loading:

a - series 1 beam Bm-1.2;

б - series 2 beam Bm-2.1;

в - series 3 beam Bm-3.2.

За допомогою прогиномірів по середині прольоту балки також вдалось встановити форму повороту та відхилення перерізу відносно власної осі в момент останнього ступеня прикладання навантаження

За допомогою прогиномірів по середині прольоту балки також вдалось встановити форму повороту та відхилення перерізу відносно власної осі в момент останнього ступеня прикладання навантаження

Отже, як видно із рис.7 відхилення верхньої частини перерізу відносно нижньої було характерним для балок. Така форма деформації відповідає класичній формі втрати стійкості перерізу.

За результатами дослідження методи вимірювання відносних деформацій дали задовільний результат, та згідно із табл.2, значення отримані за допомогою методу кореляції цифрових зображень було близьке до руйнівного значення в балках серії 1 та 2. Також згідно із рис.6. Приріст відносних деформацій відносно напружень, для значень отриманих за допомогою методу кореляції цифрових зображень мав більш значення для такого роду досліджень.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Було отримано результати експериментальних досліджень скляних балок на чотирьох-точковий згин. Значення напруження максимальних напружень були отримані за допомогою двох методів заміру відносних деформацій похідне за допомогою механічних екстензометрів, та методу КЦЗ та віртуальних екстензометрів.

2. Під час проведення досліджень на балках було виявлено, що деформація балок під навантаженням характеризувалася більшим значенням у верхній зоні, що по суті повторює класичну, для таких балок, форму втрати стійкості.

3. Розроблено методику використання користувачьких без дзеркальних фотокамер із кольоровою матрицею для дослідження скляних балок на чотирьох точковий згин. Покрокова методика полягала у виборі правильного апаратного забезпечення та визначення характеристик фотокамери, що дозволяло отримувати більше інформації із готових зображень, та проводити подальшу підготовку зображення для аналізу.

4. Отримані результати відносних деформацій та похідні результати напружень, отримані шляхом кореляції цифрових зображень, показали значно ближчі значення до значень руйнівних напружень, ніж результати, отримані за допомогою механічних приладів. Що свідчить про подальшу перспективу використання методу КЦЗ для дослідження скляних конструкцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Демчина Б., Визначення фізико-механічних властивостей скла на згин за допомогою дво-параметричного розподілу Вейбулла. / Сурмай С., Ткач Р., Гула В // *Зб. наук. праць Будівельні конструкції. Теорія і практика.*, Київ.: КНУБА.-2020.- № 6. С. 94–113.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.94-113>.
2. Gdoutos E., Digital Image Correlation (DIC) // *Solid Mechanics and its Applications. Springer Science and Business Media B.V.*, 2022. Vol. 269. P. 251–259.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-89466-5_12.
3. Coult G., The skypeel: bringing architectural imagination to life // *Glass Structures and Engineering. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*, 2021. Vol. 6, № 3. P. 353–373.
<https://doi.org/10.1007/s40940-021-00158-6>.
4. O’Callaghan J., Coult G., An all-glass cube in New York city / *Proceedings of the 2008 Structures Congress - Structures Congress 2008: Crossing the Borders. American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 2008. Vol. 314.
[https://doi.org/10.1061/41016\(314\)74](https://doi.org/10.1061/41016(314)74).
5. Демчина Б.Г., Черевко М.В., Дослідження міцності та деформативності скляних балок з вертикальним розміщенням шарів // *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва*. 2015. № 823. 113–116 p.
6. X. Huang, The lateral torsional buckling behavior of laminated glass beams / M. Cui, Q. Liu, and J. Nie // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 20, no. 7, Jul. 2020.
<http://dx.doi.org/10.1142/S0219455420500807>.
7. A. Luible, D. Schärer, Lateral torsional buckling of glass beams with continuous lateral support // *Glass Structures & Engineering 2016 1:1*, vol. 1, no. 1, pp. 153–171, Mar. 2016.
DOI: [10.1007/s40940-016-0008-3](https://doi.org/10.1007/s40940-016-0008-3).
8. D. Sonck, J. Belis, Elastic lateral-torsional buckling of glass beams with continuous lateral restraints // *Glass Structures and Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 173–194, Jun. 2016.
DOI: [10.1007/s40940-016-0023-4](https://doi.org/10.1007/s40940-016-0023-4).
9. O. Pešek, J. Melcher, Lateral-Torsional Buckling of Structural Glass Beams. Experimental, Theoretical and Numerical Analysis // *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, pp. 323–330, 2018.
<http://dx.doi.org/10.18178/ijscer.7.4.323-330>.
10. C. Louter, Exploratory experimental investigations on post-tensioned structural glass beams / J. Cupać, J.-P. Lebet // *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 2, no. 1–2, pp. 3–18, 2014.
<http://dx.doi.org/10.3233/FDE-130012>.
11. W. H. Peters, W. F. Ranson, Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis, // *Optical Engineering* vol. 21, no.3, pp. 427–431, Jun. 1982
<https://doi.org/10.1117/12.7972925>.
12. M. Badaloni, Out-of-Plane motion evaluation and correction in 2D DIC / , P. Lava, M. Rossi, G. Chiappini, D. Debruyne // *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, vol. 3, pp. 181–187, 2016.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-22446-6_23.
13. R. Fouque, Stereo digital image correlation: Formulations and perspectives /, R. Bouclier, J. C. Passieux, J. N. Périe // *Comptes Rendus - Mecanique*, vol. 349, no. 3, pp. 453–463, 2021.
<http://dx.doi.org/10.5802/crmeca.93>.
14. H. C. Biscaia, Using digital image correlation to evaluate the bond between carbon fibre-reinforced polymers and timber / J. Canejo, S. Zhang, R. Almeida // *Struct Health Monit*, vol. 21, no. 2, pp. 534–557, Mar. 2022.
<https://doi.org/10.1177/14759217211006021>.
15. Y. Blikharskyy, Review of Development and Application of Digital Image Correlation Method for Study of Stress–Strain State of RC Structures / N. Kopiika, R. Khmil, J. Selejdak, Z. Blikharskyy // *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 19, Oct. 2022.
<http://dx.doi.org/10.3390/app121910157>.
16. K. H Kim, Strain Analysis of Multi-Phase Steel Using In-Situ EBSD Tensile Testing and Digital Image Correlation // *Metals and Materials International*, vol. 28, no. 5, pp. 1094–1104, May 2022.
<https://doi.org/10.1007/s12540-021-01044-0>.

17. **E. M. C. Jones, M. Iadicola**, A Good Practices Guide for Digital Image Correlation Standardization, Good Practices, and Uncertainty Quantification Committee. 2018. <https://doi.org/10.32720/idics/gpg.ed1>.
18. **Т. Ю. Осадчук, Б. Г. Демчина**, Дослідження деформацій багат шарових скляних плит за допомогою кореляції цифрових зображень // *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*, no. 134, pp. 153–163, 2017.
19. **B. Demchyna**, The experimental study of glass multilayer columns using digital image correlation / M. Surmai, R. Tkach // *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 96, no. 1, pp. 32–41, Mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0013.1990>.
20. ДСТУ Б В.2.7-122:2009 (EN 572:2004, NEQ). Будівельні матеріали. Скло листове. Технічні умови. Київ. Мінрегіонбуд України. 2010. – 48 с.
6. **X. Huang**, The lateral torsional buckling behavior of laminated glass beams / M. Cui, Q. Liu, and J. Nie // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 20, no. 7, Jul. 2020. <http://dx.doi.org/10.1142/S0219455420500807>.
7. **A. Luible, D. Schärer**, Lateral torsional buckling of glass beams with continuous lateral support // *Glass Structures & Engineering 2016 1:1*, vol. 1, no. 1, pp. 153–171, Mar. 2016. DOI: [10.1007/s40940-016-0008-3](https://doi.org/10.1007/s40940-016-0008-3).
8. **D. Sonck, J. Belis**, Elastic lateral-torsional buckling of glass beams with continuous lateral restraints // *Glass Structures and Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 173–194, Jun. 2016. DOI: [10.1007/s40940-016-0023-4](https://doi.org/10.1007/s40940-016-0023-4).
9. **O. Pešek, J. Melcher**, Lateral-Torsional Buckling of Structural Glass Beams. Experimental, Theoretical and Numerical Analysis // *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, pp. 323–330, 2018. <http://dx.doi.org/10.18178/ijscer.7.4.323-330>.
10. **C. Louter**, Exploratory experimental investigations on post-tensioned structural glass beams / J. Cupać, J.-P. Lebet // *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 2, no. 1–2, pp. 3–18, 2014. <http://dx.doi.org/10.3233/FDE-130012>.
11. **W. H. Peters, W. F. Ranson**, Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis, // *Optical Engineering* vol. 21, no.3, pp. 427–431, Jun. 1982. <https://doi.org/10.1117/12.7972925>.
12. **M. Badaloni**, Out-of-Plane motion evaluation and correction in 2D DIC / , P. Lava, M. Rossi, G. Chiappini, D. Debruyne // *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, vol. 3, pp. 181–187, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22446-6_23.
13. **R. Fouque**, Stereo digital image correlation: Formulations and perspectives /, R. Bouclier, J. C. Passieux, J. N. Périe // *Comptes Rendus - Mecanique*, vol. 349, no. 3, pp. 453–463, 2021. <http://dx.doi.org/10.5802/crmeca.93>.
14. **H. C. Biscaia**, Using digital image correlation to evaluate the bond between carbon fibre-reinforced polymers and timber / J. Canejo, S. Zhang, R. Almeida // *Struct Health Monit*, vol. 21, no. 2, pp. 534–557, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1177/14759217211006021>.
15. **Y. Blikharsky**, Review of Development and Application of Digital Image Correlation Method for Study of Stress–Strain State of RC

REFERENCES

1. **Demchyna B.** Vyznachennia fizykomekhanichnykh vlastyvoستي skla na zghyn za dopomohoiu dvoparmetrychnoho rozpodilu Veibulla. / Surmai S., Tkach R., Hula V // *Zb. nauk. prats Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka.*, Kyiv.: KNUBA.-2020.- № 6. S. 94–113. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.94-113>.
2. **Gdoutos E.**, Digital Image Correlation (DIC) // *Solid Mechanics and its Applications. Springer Science and Business Media B.V.*, 2022. Vol. 269. P. 251–259. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-89466-5_12.
3. **Coult G.**, The skypeel: bringing architectural imagination to life // *Glass Structures and Engineering. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*, 2021. Vol. 6, № 3. P. 353–373. <https://doi.org/10.1007/s40940-021-00158-6>.
4. **O’Callaghan J., Coult G.**, An all-glass cube in New York city / *Proceedings of the 2008 Structures Congress - Structures Congress 2008: Crossing the Borders. American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 2008. Vol. 314. [https://doi.org/10.1061/41016\(314\)74](https://doi.org/10.1061/41016(314)74).
5. **Demchyna B.H., Cherevko M.V.**, Doslidzhenia mitsnosti ta deformatyvnosti sklianykh balok z vertykalnym rozmishchenniam shariv // *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politekhnika. Teoriia i praktyka budivnytstva*. 2015. № 823. 113–116 p.

Structures / N. Koppiika, R. Khmil, J. Selejdak, Z. Blikharskyy // *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 19, Oct. 2022.

<http://dx.doi.org/10.3390/app121910157>.

16. **K. Il Kim**, Strain Analysis of Multi-Phase Steel Using In-Situ EBSD Tensile Testing and Digital Image Correlation // *Metals and Materials International*, vol. 28, no. 5, pp. 1094–1104, May 2022.

<https://doi.org/10.1007/s12540-021-01044-0>.

17. **E. M. C. Jones, M. Iadicola**, A Good Practices Guide for Digital Image Correlation Standardization, Good Practices, and Uncertainty Quantification Committee. 2018.

<https://doi.org/10.32720/idics/gpg.ed1>.

18. **T. Y. Osadchuk, B. H. Demchyna**, Doslidzhennia deformatsii bahatosharovykh sklianykh plyt za dopomohoiu koreliatsii tsyfrovyykh zobrazhen // *Komunalne hospodarst-vo mist. Seriya : Tekhnichni nauky ta arkhitekturna*, no. 134, pp. 153–163, 2017,

19. **B. Demchyna**, The experimental study of glass multilayer columns using digital image correlation / M. Surmai, R. Tkach // *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 96, no. 1, pp. 32–41, Mar. 2019.

<http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0013.1990>.

20. **DSTU B V.2.7-122:2009 (EN 572:2004, NEQ)**. Budivelni materialy. Sklo lystove. Tekhnichni umovy. Kyiv. Minrehionbud Ukrainy. 2010. - 48 s.

RESEARCH OF GLASS BEAMS FOR FOUR-POINT BENDING USING THE METHOD OF DIGITAL IMAGE CORRELATION

*Roman KOZAK,
Bohdan DEMCHYNA*

Summary. The main elements of glass structures commonly used in construction are bending elements. The use of glass beams with a large ratio of cross-sectional height to width is most often encountered in practical use. This type of structure is characterized by the phenomenon of loss of stability from the plane.

Optical research methods are becoming more and more popular due to the convenience and lack

of direct contact with the test specimen. Such a research method is the method of digital image correlation. In general, the method requires specialized hardware and for a single experiment without the need to record images at high speed, it is also promising to use a publicly available user's mirrorless camera as a recording device.

The subject of the study was glass beams subjected to four-point bending. Six double-layer glass beams were manufactured for the study. The beams were tested with a stepwise increase in load on a special test rig made for the study of glass beams. The relative deformations were recorded using the method of correlation of digital images and mechanical strain gauges.

The paper describes the method of using mirrorless cameras with a colour matrix to study glass beams in four-point bending. The methodology consisted of selecting the right equipment and determining the characteristics of the camera to obtain more information from the images and prepare them for analysis. The images were de-colored and the white balance was adjusted using a photo editor. The images ready for analysis were transferred to the specialized software GOM Correlate Pro.

The glass beams were tested for four-point bending. The values of the maximum stresses were obtained using the equilibrium equation of the section, the relative deformations obtained according to the readings of mechanical devices, and the method of correlation of digital images.

Failure of the glass beams occurred in layers with the initial crack formation in the lower most tensile zone, then the crack propagated with a tulip-like pattern to the upper zone.

The study confirmed the disadvantage of glass beams with a large height-to-width ratio, namely the loss of in-plane stability.

The method of digital image correlation using publicly available user hardware performed well, often showing values of destructive stresses close to the theoretical values obtained by calculation. It is recommended to use this method for further research.

Keywords. Glass; glass beam; four-point bending; bending strength of glass; digital image correlation.

Стаття надійшла до редакції 28.04.2023