

УДК 624.012.6+624.073.132

Т.Ю. Осадчук, Б.Г. Демчина

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ БАГАТОШАРОВИХ СКЛЯНИХ ПЛИТ ЗА ДОПОМОГОЮ КОРЕЛЯЦІЇ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Описано методику експериментальних досліджень багатошарових скляних плит опертих по чотирьох кутах, які працюють на згин від локального навантаження посередині плит за допомогою кореляції цифрових зображень. Подано результати досліджень деформативності згідно з прийнятою схемою випробування. Експериментально доведено доцільність застосування оптичного методу дослідження деформативності скляних конструкцій.

Ключові слова: скляні багатошарові плити, вимірювання деформацій, кореляція цифрових зображень, обробка зображень.

Постановка проблеми

Використання кореляції цифрових зображень (КЦЗ) у якості контролю напружено-деформованого стану конструкцій характеризується дешевизною, простотою та точністю даного методу [1]. Він дозволяє отримувати повну картину деформування конструкції [2].

Для крихких матеріалів, таких як скло, фіксація деформативних параметрів за допомогою механічних приладів є складною у зв'язку з раптовим характером руйнування цих матеріалів і, відповідно, обмеженим часом для зняття показів безпосередньо перед руйнуванням. Застосування КЦЗ дозволяє зменшити трудомісткість та охопити всі стадії завантаження на відміну від механічних приладів, які можуть виходити з ладу в проміжку між етапами завантаження. У зв'язку з цим актуальним є застосування даного методу для дослідження деформативності скла.

КЦЗ – безконтактний оптичний метод для вимірювання деформацій і переміщень [3–7]. Цифрові зображення поділяються на субзображення розміром $m \times n$ пікселів (як правило, квадратних), які називаються фасетами [8]. Фасет є множиною пікселів, які містять кілька відтінків сірого кольору та визначають його положення в контурах зображення [6, 8, 9]. Принцип вимірювання деформацій заснований на відслідковуванні субзображень в ході деформування матеріалу під дією навантаження. Використовуючи стохастичний розподіл на поверхні об'єкту, положення кожної точки об'єкта в двох зображеннях можуть бути ідентифіковані шляхом застосування алгоритму кореляції [5, 10], і таким чином, можна визначити характер та величину переміщення між точками зображення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основні теоретичні положення КЦЗ описано в дослідженнях Я. Ковальчика, К. Сарразіна, М. Хелфріка, Б. Пена, С. Йоніями та інших [2, 10–13]. Основні принципи застосування КЦЗ в експериментальних дослідженнях представлені в роботах В. Березіна, М. Паланки, А. Фредді, В. Пікерд, Т. Проулькса, М. Саттона та інших [1, 8, 14–17].

Дослідження деформативності скляних багатошарових плит, що працюють на згин під дією статичного навантаження за допомогою КЦЗ у проаналізованих публікаціях не наведені. Дана методика застосовувалась для дослідження скляних одно- і багатошарових плит на динамічні навантаження [16, 18, 19] та температурні впливи [20, 21], а також для випробувань спеціальних зразків скла для визначення міцності на розтяг [22].

Тому, застосування оптичного методу вимірювання деформацій скляних багатошарових конструкцій, зокрема плит, під дією статичного навантаження є недостатньо вивченим питанням, що обумовлює доцільність даного дослідження.

Формулювання мети статті

Мета даного дослідження – дослідити скляні багатошарові плити, оперті по чотирьох кутах, які працюють на згин від локального навантаження посередині плит для встановлення деформацій скла у стиснутій зоні за допомогою КЦЗ.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі задачі:

1) виконати експериментальні дослідження багатошарових скляних плит, опертих по чотирьох кутах, які працюють на згин під дією статичного

навантаження, прикладеного через штамп посередині зразків;

2) виконати фотофіксацію поверхонь дослідних зразків при навантаженні;

3) провести аналіз отриманих зображень за допомогою інструментів методу КЦЗ та функцій обробки зображень.

Виклад основного матеріалу

Для порівняльного аналізу деформативності різних типів скляних багатошарових плит за допомогою КЦЗ були прийняті дослідні зразки-близнюки з розмірами в плані 500x500 мм, виготовлені за технологією триплексування, конструкція яких представлена на рис. 1.

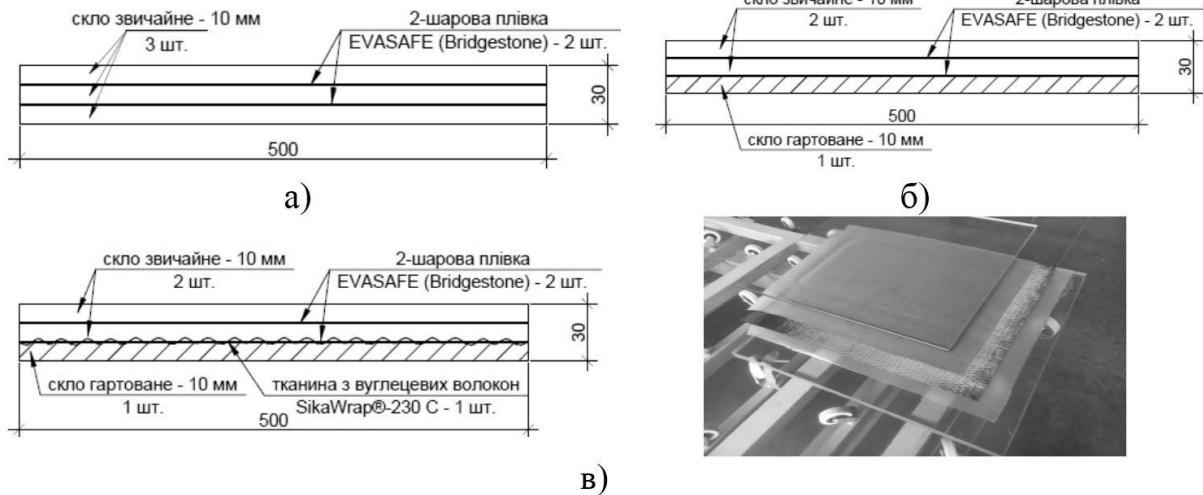


Рис. 1. Експериментальні зразки плит:
а) марки ПСБ-1.7; б) марки ПСБ-2.2; в) марки ПСБ-3.2

Плита марки ПСБ-1.7 складалась із трьох шарів звичайного скла (див. рис. 1, а), плита марки ПСБ-2.2 – із нижнім гартованим склом та двома іншими шарами із звичайного скла (див. рис. 1, б), плита марки ПСБ-3.2 – аналогічно плиті марки ПСБ-2.2 з додатковим використанням підсилюючої тканини із однонаправлених вуглецевих волокон SikaWrap-230 C між нижнім гартованим шаром скла та середнім шаром із звичайного скла (див. рис. 1, в). Для міжшарового ламінування плит застосовувалась плівка EVASAFE (Bridgestone, Японія).

В ході досліджень згідно з методом КЦЗ поетапно вимірювалися деформації зразка на зображеннях за допомогою різних квадратних або прямокутних деталей зображення (фасетів) [9].

Основні параметри (поняття), що використовуються у КЦЗ – це: плямиста (нерівномірно-забарвлена) або стохастична текстура, або ж спекл-поверхня з відповідним розміром спекла; розмір фасета, або розмір обчислення [14, 23]; розмір кроку фасетів, або точкова відстань [24, 25] чи крок сітки [8]; перекриття фасета.

Розмір фасета відстежувався із субпіксельною точністю і, зазвичай, знаходився в межах 5–

20 пікселів [26]. У багатьох літературних джерелах використовувались також інші типові розміри фасета, наприклад 21 × 21 піксель при кроці – 15 пікселів [7]. Стандартний фасет, як правило квадратний, розміром приблизно 15 × 15 пікселів [3, 11]. Субзображення такого розміру використовувалось в роботах Р. Еріксена [23], Б. Гіасці [27], Дж. Мерша [28].

В різних програмах у налаштуваннях за замовчуванням задано оптимізовані розміри параметрів, наприклад: в програмі ARAMIS (GOM mbH, Germany) – це 15 x 15 пікселів для розміру фасета, 13 пікселів для розміру кроку [9, 15, 23, 28]; в програмі GOM Correlate (GOM mbH, Germany) – 19 x 19 пікселів і 16 пікселів, відповідно [24, 25].

Графічне представлення основних параметрів КЦЗ наведено в ряді досліджень [3, 8, 14, 15, 23, 28, 29]. Вигляд розміщення фасетів в програмі GOM Correlate (GOM mbH, Germany), що використовувалась у нашому дослідженні, представлено на рис. 2.

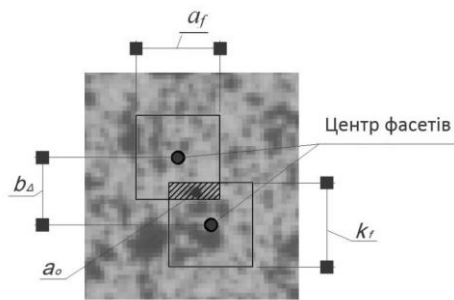


Рис. 2. Ілюстрація спекл–поверхні:
 a_f – розмір фасетів; k_f – крок між фасетами;
 a_0 – перекриття між фасетами; $b_Δ$ – перекриття

КЦЗ порівнює ряд напівтонових зображень зразка на різних етапах деформування, відстежує рух пікселів на ділянці (області) дослідження і обчислює переміщення та деформації за рахунок використання алгоритму кореляції [5].

Залежно від поставлених завдань вимірювання та стохастичної моделі, можна підвищити точність і скоротити час обчислень з використанням іншого розміру фасета a_f [24, 25]. Цей розмір може бути змінений в залежності від геометрії поверхні і точкового рисунку [3].

Для забезпечення необхідної точності при визначенні поля деформації скляних багатошарових плит за допомогою методу КЦЗ було необхідно провести підбір оптимальних параметрів фасетів a_f та їх кроку k_f для аналізу зображень (див. рис. 2) в програмі GOM Correlate з метою створення рекомендацій для використання методу КЦЗ при аналізі досліджуваних конструкцій.

Роздільна здатність плямистої поверхні визначає мінімальний розмір фасетів a_f , який може бути використаний. Спосіб нанесення спекул–аплікації впливає на розмір плям (спекулів) і їх розподіл, які, в свою чергу, впливають на точність отриманих деформацій [15]. Таким чином, розмір фасета безпосередньо визначає просторову роздільну здатність переміщень і деформацій, оскільки інформація про градацію сірого кольору в межах фасета використовується для співставлення зображень [23]. Менші фасети відповідають більшій

роздільній здатності даних, адже кожен фасет відповідає точці даних під час аналізу. Однак, якщо розмір фасета менший, ніж «оптимальний», фасет буде невизначений і точність вимірювання буде некоректною [15].

Розмір кроку між фасетами k_f має бути підібраний в залежності від розміру фасета a_f , адже він безпосередньо визначає базу заміру деформації $b_Δ$. Як правило, розмір кроку повинен бути завжди меншим, ніж розмір фасетів, щоб максимально використати інформацію, яка міститься на зображенні. У випадку компромісу між «просторовою роздільною здатністю – фасети менших розмірів» і «точністю деформацій – фасети більшого розміру», для забезпечення тимчасової максимальної роздільної здатності фотокамери локальними варіаціями деформацій можна знехтувати, тому можливим є використання зображення з низькою роздільною здатністю [23].

Крок між сусідніми фасетами k_f визначає величину перекриття a_0 між ними. Коли перекриття рівне нулю, фасети прилягають один до одного, тому наявність перекриття забезпечує більш надійну оцінку переміщень для зображень, отриманих під дією зовнішніх впливів. Максимальне перекриття обмежується розміром фасета зменшеного на 1 піксель. У цьому випадку максимально можлива кількість даних для обробки рівна роздільній здатності зображення [14].

Область зображення складається з площі, зайнятої спекул–поверхнею і фону [15]. У нашому випадку модель спекул–поверхні була утворена наступним чином: спочатку частину поверхні плити пофарбували у білий колір та створили білий фон; для отримання стохастичного зображення поверхні плит використовувалось ручне нанесення точок чорного кольору на підготовлений білий фон (рис. 3). Такий спосіб підготовки поверхні дослідного зірця застосовувався у дослідженні В. Пікерд [15].

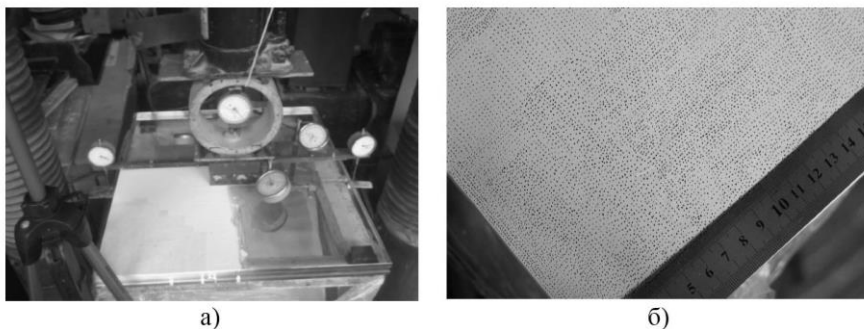


Рис. 3. Підготовка поверхні експериментального зразка: а) вигляд підготовленої поверхні зразка; б) збільшений вигляд спекул–поверхні зразка із нанесеною спекул–структурою із чорних точок на білому фоні

Недоліком цього способу підготовки поверхні була його трудомісткість. Альтернативними можуть бути варіанти використання шаблону–трафарету, розпилення або нанесення фарби губчастим матеріалом [15, 30].

Розмір спеклів у зв'язку з ручною підготовкою зразків є випадковим та змінним (див. рис. 3, б). Аналіз розміру спекла на зображенні виконано через перегляд значень пікселів за допомогою інструменту «Вибір області дослідження (Pixel Region Tool)» функції «imtool» з додатку «Image Processing Toolbox» програми MATLAB [31]. Згідно

з В. Пікерд [15] для визначення розміру фасета використовувався найбільший спекл або найбільша площа, зайнята одним кольором. У нашому випадку такою площею була частина білого фону (білий спекл) між чорними точками (чорні спекли). Для зручності представлення на рис. 4 показано розмір спеклів обох кольорів по відношенню один до одного як якісний показник (рис. 4, а) та орієнтовний (усереднений) розмір спеклів чорного кольору в пікселях як кількісний показник (рис. 4, б).

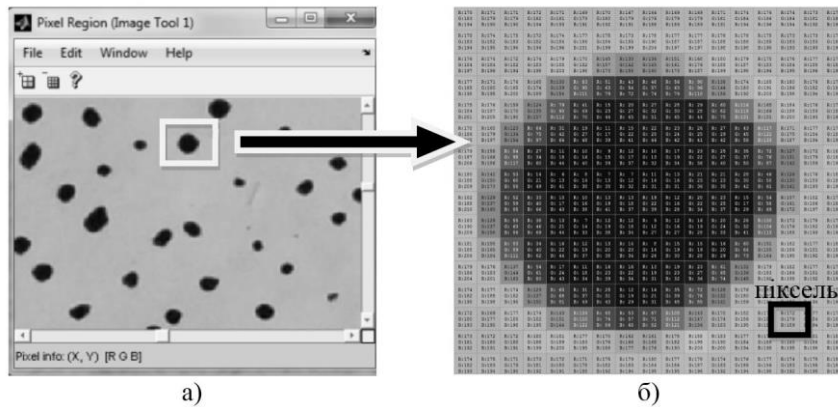


Рис. 4. Ділянка дослідження поверхні плити: а) виокремлена частина спекл–поверхні зразка; б) збільшене зображення спекла чорного кольору

Випробувальна установка для дослідження скляних багат шарових плит показана на рис. 5.

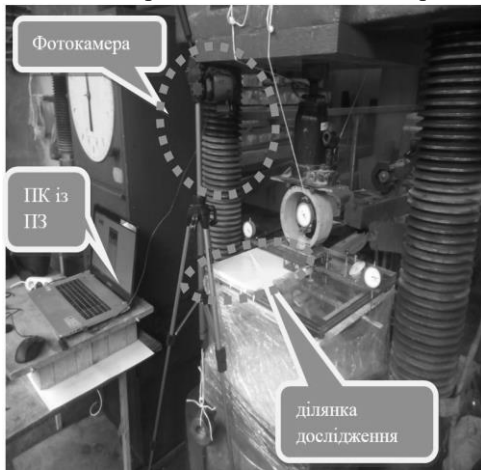


Рис. 5. Вигляд дослідної установки

Додатково до традиційного методу заміру деформацій поверхні дослідної плити за допомогою годинникових мікроіндикаторів точністю замірів 0,001 мм на базі 100 мм були визначені деформації скла у верхній зоні за допомогою методу КЦЗ. Для дистанційного отримання на всіх етапах завантаження після витримки 5 хв відповідних зображень окремої попередньо підготовленої ділянки зразка використовувались фотокамера SONY SLT–A58 та ПК з відповідним програмним забезпеченням.

Схема випробування відповідала методиці дослідження на згин скляних багат шарових плит вільно опертих по чотирьох кутах, описаній в попередніх дослідженнях [32]. Деформації скла у верхній зоні замірялись у двох взаємно–перпендикулярних напрямках годинниковими мікроіндикаторами Ів–1, Ів–2 та на діагоналі – Ів–3 (рис. 6).

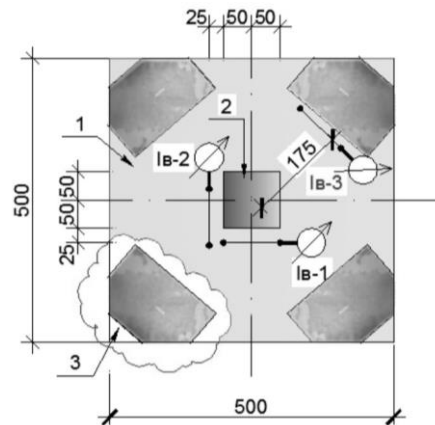


Рис. 6. Дослідження деформацій у верхній зоні плити (вигляд зверху):
1 – дослідний зразок скляної плити; 2 – штамп для прикладання навантаження; 3 – поле деформацій, заміряне за допомогою КЦЗ
Ів–1 ÷ Ів–3 – мікроіндикатори з базою заміру В=100 мм

Виміряне за допомогою КЦЗ поле деформацій 3 (при розмірі фасета $a_f=120$ пікселів та кроку $k_f=66$ пікселів) після його опрацювання з орієнтацією на верхній грані плити дзеркально відображалось в трьох інших кутах плити (див. рис. 6).

Оскільки розмір плям (спеклів) у зв'язку з точковим ручним нанесенням був змінним (див. рис. 4, а), було проведено ітераційний підбір оптимальних параметрів розміру фасетів a_f та їх кроку k_f для аналізу зображень в програмі GOM Correlate.

Аналіз було проведено для розміру субзображення по замовчуванню у програмі (розмір фасетів – 19 пікселів, крок між ними – 16 пікселів) та із поступовим збільшенням прийнятого

початкового значення розміру фасетів до 30 пікселів (подвоєний розмір найбільш використаного стандартного субзображення – 15 пікселів). Крок між фасетами був прийнятий згідно з рекомендаціями, поданими в довідці програмного продукту, та відповідно до особливостей матеріалу досліджуваних зразків. Так, для практичності ведення розрахунку і коректного представлення результатів вимірювань, область перекриття a_0 встановлювалась близько 20 % від площі фасета a_f , при цьому крок між фасетами k_f обчислювався за формулою (1):

$$a_0 \approx \sqrt{20\% \cdot a_f^2} \Rightarrow k_f \approx \frac{a_f}{2} + \left(\frac{a_f}{2} - a_0 \right) = a_f - a_0, \quad (1)$$

де a_0 – розмір перекриття, a_f^2 – площа фасета.

Щоб спростити фіксацію та, відповідно, збільшити точність вимірювання деформацій для крихкого матеріалу, було враховано, що більший відсоток відповідає меншій довжині (базі) виміру деформацій та меншому кроку між субзображеннями. Разом з тим, повне перекриття фасета сусідніми субзображеннями (по 50 % із протилежних сторін) могло призвести до

спотворення результатів через заповнення площі одного фасета крайовими неточностями із інших фасетів.

Вплив розміру фасета на якість очікуваних результатів через зображення поверхні зразка на нульовому етапі перед завантаженням представлено на рис. 7.

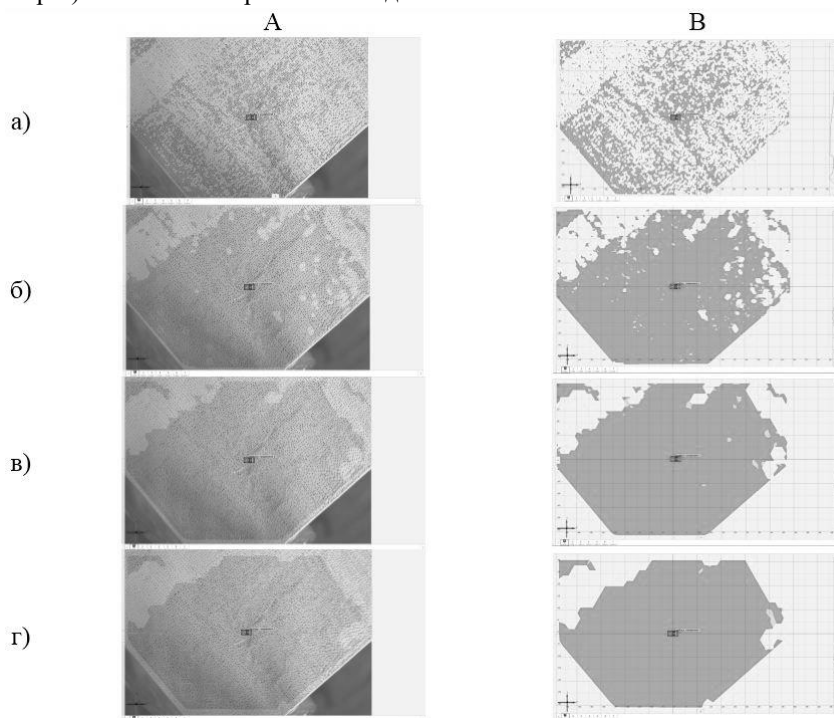


Рис. 7. Компонент поверхні зразка (А) та якість моделі (В) при різних вихідних даних: а) $a_f=19$; $k_f=16$ (стандартні налаштування); б) $a_f=60$; $k_f=33$; в) $a_f=120$; $k_f=66$; г) $a_f=180$; $k_f=100$

Поля деформацій (поля переміщень) скла у верхній зоні при збільшенні параметрів показали збільшення значень і діапазону вимірювання.

Відповідні зображення, отримані на останньому етапі завантаження перед руйнуванням, представлені на рис. 8.

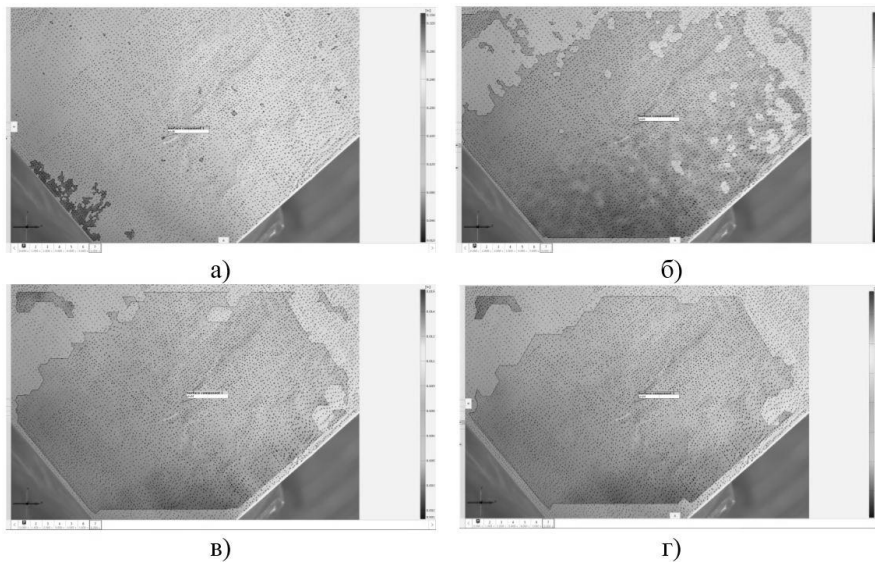


Рис. 8. Поля деформацій при різних вихідних даних:
 а) $a_f=19; k_f=16$; б) $a_f=60; k_f=33$; в) $a_f=120; k_f=66$; г) $a_f=180; k_f=100$

Для більших параметрів (див. рис. 8, г) характерним було незначне збільшення якості аналізованого зображення у порівнянні до попередніх значень. Тому, для подальшого аналізу розподілу деформацій на поверхні скляних багатoshарових плит при ручному нанесенні рисунку, були прийняті наступні параметри: розмір фасету – 120 пікселів, розмір крок між ними – 66 пікселів (див. рис. 8, в).

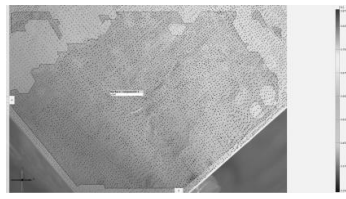
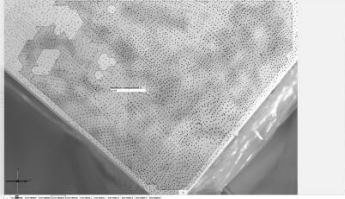
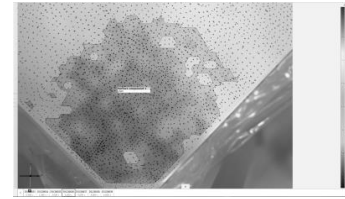

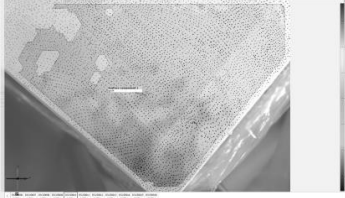
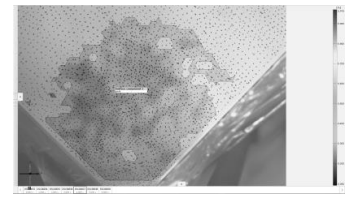
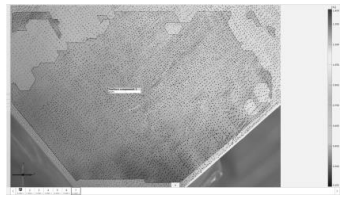
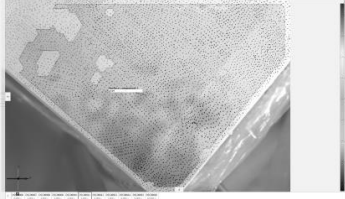
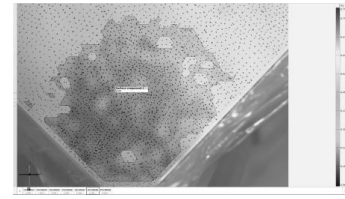
Порівняння переважуючих по значенню діапазонів відносних деформацій на різних етапах навантаження досліджуваних плит для прийнятих параметрів КЦЗ представлено у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння відносних деформацій ϵ на поверхні плит згідно з КЦЗ
 (прийняті параметри: $a_f = 120, k_f = 66$)

Навантаження, кН	Марка плити /діапазон відносних деформацій (%)		
	ПСБ-1.7	ПСБ-2.2	ПСБ-3.2
1	2	3	4
2			
	0,400÷0,500 %	0,225÷0,300 %	0,150÷0,225 %
4			
	0,500÷0,600 %	0,200÷0,300 %	0,150÷0,225 %

Продовження табл. 1

1	2	3	4
6			
	0,600÷0,675 %	0,300÷0,400 %	0,150÷0,225 %
8			
	0,300÷0,600 %	0,300÷0,400 %	0,200÷0,300 %
10			
	0,600÷0,900 %	0,300÷0,500 %	0,225÷0,300 %

Значення усереднених відносних деформацій ϵ , що займали більшу частину аналізованих зображень (КЦЗ), в залежності від навантаження для плит

марок ПСБ–1.7, ПСБ–2.2 та ПСБ–3.2 графічно зображено на рис. 9.

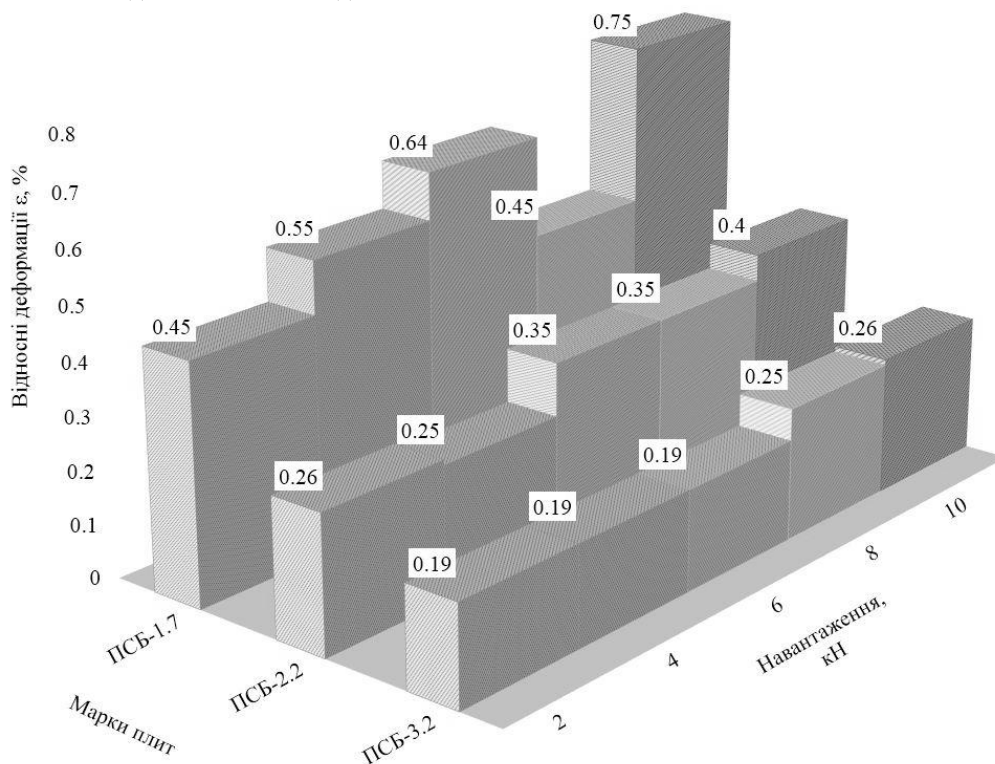


Рис. 9. Деформативність різних типів скляних багатoshарових плит

Таким чином, було встановлено, що плита марки ПСБ–1.7 (звичайне скло) характеризувалась найбільшими деформаціями у порівнянні з іншими

плитами при однакових навантаженнях. При цьому найменші деформації були зафіксовані у плиті марки ПСБ–3.2, що було досягнуто через

використання нижнього гартованого шару скла та вуглецевої волокняної тканини Sika над ним. Відповідно, середні значення деформативності показала плита марки ПСБ-2.2 із шаром гартованого скла у нижній зоні.

Для визначення характеру розподілу ізополів деформацій на прикладі плити ПСБ-1.7 додатково було проведено обробку цифрового зображення, отриманого за допомогою КЦЗ. Для цього

використовували основні операції обробки зображень [33, 34].

На рис. 10. показано зображення деформованої поверхні плити ПСБ-1.7 після КЦЗ з глибиною (якістю передачі) кольору 8 біт (256 кольорів) у однорідній палітрі (режим «8-бітний True Color») (див. рис. 10, а) та у чорно-білій палітрі (див. рис. 10, б).

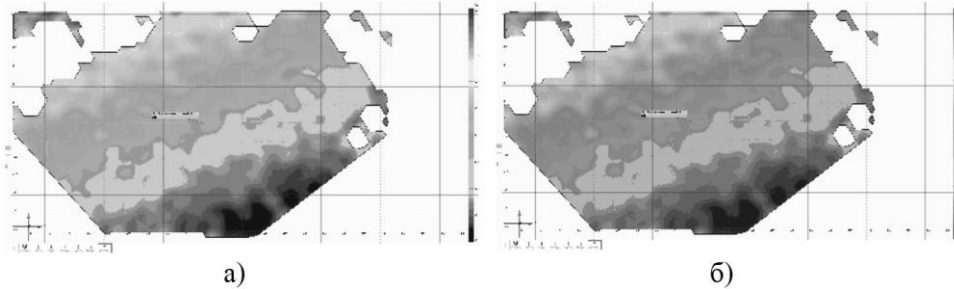


Рис. 10. Зображення деформованої поверхні плити марки ПСБ-1.7 після КЦЗ, представлене засобами MathCAD: а) зчитане (кольорове); б) відтворене у відтінках сірого

Зміну яскравості на зображенні було подано у вигляді графіка – гістограми. Гістограма показала кількість пікселів з відповідним рівнем яскравості по відношенню до шкали рівнів яскравості (контрасту). На рис. 11, а представлено загальний рівень яскравості оригінального RGB-зображення, кількість і різноманітність відтінків якого за необхідності можна представити через зображення складових кольорів (R,G,B) та відповідних їм гістограм. З огляду на рисунок було отримано спад

темних кольорів та максимальні значення в області яскравих кольорів. При дослідженні гістограми зображення у відтінках сірого кольору (див. рис.11, б) динамічний діапазон наближався до середини шкали, однак він все ще не мав характеру Гаусової кривої. Тому, для зручності ведення подальшого аналізу та швидкості обробки зображення у середовищі MathCAD використовувалось чорно-біле зображення, при цьому яскравість коливалася від 0 (чорний колір) до 255 (білий колір).

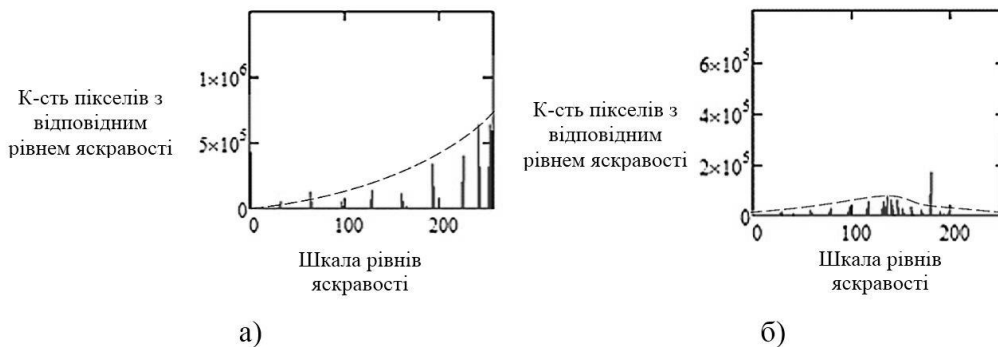


Рис. 11. Гістограми, побудовані за допомогою MathCAD: а) оригінального кольорового зображення; б) зображення у відтінках сірого кольору

Для отримання більш чіткої картини розподілу деформацій по ізополях були застосовані різні функції обробки зображень [33]. Найефективнішим засобом для отримання зображення із достатньо чітким розмежуванням між діапазонами деформацій

(позонова градація) було вирівнювання гістограми початкового зображення (рис. 12, а). Коректована гістограма із більш інтенсивним використанням темних відтінків представлена на рис. 12, б.



Рис. 12. Результати обробки зображення:

а) оброблене зображення деформованої поверхні плити; б) гістограма обробленого зображення

Висновки

1. Експериментально перевірено можливість застосування методу кореляції цифрових зображень для дослідження поверхонь скляних багатошарових плит та отримано оптимальні параметри для даної методики згідно з прийнятим способом підготовки поверхні, а саме: розмір фасету $a_f=120$ пікселів, розмір кроку між ними – $k_f=66$ пікселів.

2. Результати дослідження можна використати для подальшого розвитку оптичного методу дослідження деформацій будівельних конструкцій, зокрема скляних плит, з метою отримання тарувальних таблиць чи рівнянь для переведення інформації, отриманої за допомогою КЦЗ, у числові значення деформацій.

3. Проаналізовано застосування різних функцій обробки зображення деформованої поверхні скляної плити для отримання позовної градації ізополів деформацій та рекомендовано застосовувати вирівнювання гістограми початкового зображення.

Література

1. Березін В. Б. Дослідження поля деформації плоскої поверхні зразків матеріалів методом кореляції цифрових зображень. (Статичне навантаження) / В. Б. Березін, М. Г. Чаусов // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2011. – № 2. – С. 15–20.
2. Ковальчик Я. І. Перспективи використання методу цифрової кореляції зображень для дослідження будівельних конструкцій / Я. І. Ковальчик // *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер. : Галузеве машинобудування, будівництво*. – 2012. – Вип. 5. – С. 92–100.
3. *Digital Image Correlation Effort* [Electronic resource]. – Retrieved from https://www.uml.edu/docs/DOE_DE-EE0001374_AppendixE_tcm18-139823.pdf
4. *International Digital Image Correlation Society* [Electronic resource]. – Retrieved from <http://idics.org>
5. Lin S. *Strain Measurement by Digital Image Correlation* / S. Lin // *Presented at DESY Summer Student programme 2015. Hamburg, 2015*.

6. McCormick N. *Digital image correlation* / N. McCormick, J. Lord // *Materials Today*. – 2010. – Vol. 13. – № 12. – P. 52–54.
7. Sarrazin C. *Image analysis of plates subjected to bird strike* / C. Sarrazin // *Universiteit Gent*. – 2012. – 135 p.
8. Palanca M. *The use of digital image correlation in the biomechanical area: a review* / M. Palanca, G. Tozzi, L. Cristofolini // *International Biomechanics*. – 2015. – Vol. 3. – №1. – P. 1–21.
9. ARAMIS. *User Manual – Software*. ARAMIS v6.1 [Electronic resource]. – Retrieved from <http://materials-science.phys.rug.nl/index.php/home/downloads/category/1-manuals?download=27%3Aaramis-v61>
10. *Digital Image Correlation (DIC) Measurement Principles* [Electronic resource]. – Retrieved from <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-dic>
11. Helfrick M. *An investigation of 3D digital image correlation for structural health monitoring and vibration measurement* / M. Helfrick // *ProQuest*. – 2008. – 192 p.
12. Pan B. *Study on Subset Size Selection in Digital Image Correlation for Speckle Patterns* / B. Pan, H. Xie, Z. Wang, K. Qian // *Opt Exp*. – 2008. – № 16(10). – P. 7037–7048.
13. Yoneyama S. *Digital Image Correlation* / S. Yoneyama, G. Murasawa // *In Experimental Mechanics, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Eolss Publishers, Oxford, UK, 2009.
14. Freddi A. *Experimental Stress Analysis for Materials and Structures: Stress Analysis Models for Developing Design Methodologies* / A. Freddi, G. Olmi, L. Cristofolini // *Springer*. – 2015. – 498 p.
15. Pickerd V. *Optimisation and Validation of the ARAMIS Digital Image Correlation System for use in Large-scale High Strain-rate Events* / V. Pickerd // *DSTO Defence Science and Technology Organisation*. – 2013. – 32 p.
16. Proulx, T. *Application of Imaging Techniques to Mechanics of Materials and Structures: Proceedings of the 2010 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics* / T. Proulx // *Springer Science & Business Media*. – 2012. – Vol. 4. – 462 p.
17. Sutton M. A. *An Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications* / M. A. Sutton, J. J. Orteu, H. Schreier // *Springer Science & Business Media*. – 2009. – 322 p.
18. Del Linz P. *Reaction forces of laminated glass windows subject to blast loads* / P. Del Linz, P.A. Hooper, H. Arora, D. Smith, L. Pascoe, D. Cormie, B.R.K. Blackman, J.P. Dear // *Composite Structures*. – 2015. – Vol. 131. – P. 193–206.

19. Sanz–Ablanedo E. Control de la Deformación en Sólidos Mediante Técnicas de Fotogrametría de Objeto Cercano: Aplicación a un Problema de Diseño Estructural / E. Sanz–Ablanedo // In Press. University of Vigo, Spain, Leon, Doctoral thesis. – 2009. – 256 p.
20. Tests of Fire Compartment Window Boundaries [Electronic resource]. – Retrieved from <https://www.uttyler.edu/ce/research/fire-activities.php>
21. Walraven J. Proceedings of the 5th International PhD Symposium in Civil Engineering / J. Walraven, J. Blaauwendraad // Taylor & Francis. – 2004. – 1532 p.
22. Louter C. Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference / C. Louter, F. Bos, J. Belis, J. P. Lebet // CRC Press. – 2014. – 852 p.
23. Eriksen R. Towards high velocity deformation characterisation of metals and composites using Digital Image Correlation / R. Eriksen, C. Berggreen, S. W. Boyd, J. M. Dulieu–Barton // EPJ Web of Conferences. – 2010. – Vol. 6. – Article № 31013 – P.1–8.
24. GOM Correlate (GOM mbH, Germany) [Electronic resource]. – Retrieved from <http://www.gom.com/3d-software/gom-correlate.html>
25. GOM Correlate Professional. V8 SR1 Manual Basic [Electronic resource]. – Retrieved from http://213.8.45.88/PDF/gom_correlate_prof_basic_v8.pdf
26. Reichman A. M. Development of Nano–characterization System for Polymer Film Measurement and Single BGA Solder Joint Forming Experiment / A. M. Reichman // ProQuest. – 2007. – 86 p.
27. Ghiassi B. Application of digital image correlation in investigating the bond between FRP and masonry / B. Ghiassi, J. Xavier, D. V. Oliveira, P. B. Lourenço // Compos. Struct. – 2013. – № 106. – P. 340–349.
28. Mersch J. P. On the Hydraulic Bulge Testing of Thin Sheet / J. P. Mersch // University of Texas – Austin, Master of Science in Engineering thesis. – 2013. – 94 p.
29. Jauffrès D. Discrete mesoscopic modeling for the simulation of woven–fabric reinforcement forming / D. Jauffrès, C. D. Morris., J. A. Sherwood, J. Chen // International Journal of Material Forming. – 2010. – Vol. 3. – № 2. – P.1205–1216.
30. GOM Correlate Video Tutorial – 2 – Object Preparation and 2D Image Acquisition [Electronic resource]. – Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=U9FTmAZK6Yo>
31. Image Processing Toolbox – Обработка сигналов и изображений [Electronic resource]. – Retrieved from <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/>
32. Осадчук Т. Ю. Дослідження міцності багатопарових скляних плит, які працюють на згин від зосередженого навантаження штампом / Т. Ю. Осадчук, Б. Г. Демчина // Будівельне виробництво: міжвідомчий науково–технічний збірник. – К.: НДІБВ, 2016. – № 60/2016. – С. 58–63.
33. Nixon M. S. Feature Extraction and Image Processing / M. S. Nixon, A. S. Aguado // Academic Press. – 2008. – 2nd Edition. – 424 p.
34. Журавель И. М. Краткий курс теории обработки изображений / И. М. Журавель. – М., 1999.
- navantazhennia). Tekhnicheskaiia dyahnostyka y nerazrushaiuschy kontrol, 2, 15–20.
2. Kovalchuk, Ya. I. (2012). Perspektyvy vykorystannia metodu tsyfrovoy koreliatsii zobrazhen dlia doslidzhennia budivelnnykh konstruksii. Zbirnyk naukovykh prats Poltavskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu im. Yu. Kondratiuka. Ser.: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo, 5, 92–100.
3. Digital Image Correlation Effort. Retrieved from https://www.uml.edu/docs/DOE_DE-EE0001374_AppendixE_tcm18-139823.pdf
4. International Digital Image Correlation Society. Retrieved from <http://idics.org>
5. Lin, S. (2011). Strain Measurement by Digital Image Correlation. Presented at DESY Summer Student programme. Hamburg.
6. McCormick, N., & Lord, J. (2010). Digital image correlation. Materials Today, 13, 12, 52–54.
7. Sarrazin, C. (2012). Image analysis of plates subjected to bird strike. Universiteit Gent.
8. Palanca, M., Tozzi, & G., Cristofolini, L. (2015). The use of digital image correlation in the biomechanical area: a review. International Biomechanics, 3, 1, 1–21.
9. ARAMIS. User Manual – Software. ARAMIS v6.1. Retrieved from <http://materials-science.phys.rug.nl/index.php/home/downloads/category/1-manuals?download=27%3Aaramis-v61>
10. Digital Image Correlation (DIC) Measurement Principles. Retrieved from <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-dic>
11. Helfrick, M. (2008). An investigation of 3D digital image correlation for structural health monitoring and vibration measurement. ProQuest.
12. Pan, B., Xie, H., Wang, Z., Qian, K. (2008). Study on Subset Size Selection in Digital Image Correlation for Speckle Patterns. Opt Exp., 16(10), 7037–7048.
13. Yoneyama, S., & Murasawa, G. (2009). Digital Image Correlation. In Experimental Mechanics, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Eolss Publishers, Oxford, UK.
14. Freddi, A., Olmi, G., Cristofolini, L. (2015). Experimental Stress Analysis for Materials and Structures: Stress Analysis Models for Developing Design Methodologies. Springer.
15. Pickerd, V. (2013). Optimisation and Validation of the ARAMIS Digital Image Correlation System for use in Large–scale High Strain–rate Events. DSTO Defence Science and Technology Organisation.
16. Proulx, T. (2012). Application of Imaging Techniques to Mechanics of Materials and Structures: Proceedings of the 2010 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics. Springer Science & Business Media, 4, 462.
17. Sutton, M. A., Orteu, J. J., Schreier, H. (2009). An Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications. Springer Science & Business Media.
18. Del Linz, P., Hooper, P.A., Arora, H., Smith, D., Pascoe, L., Cormie, D., Blackman, B.R.K., Dear, J.P. (2015). Reaction forces of laminated glass windows subject to blast loads. Composite Structures, 131, 193–206.
19. Sanz–Ablanedo, E. (2009). Control de la Deformación en Sólidos Mediante Técnicas de Fotogrametría de Objeto Cercano: Aplicación a un Problema de Diseño Estructural. In Press. University of Vigo, Spain, Leon, Doctoral thesis.

References

1. Berezin, V. B., & Chausov, M. H. (2011). Doslidzhennia polia deformatsii ploskoi poverkhni zrazkiv materialiv metodom koreliatsii tsyfrovyykh zobrazhen. (Statychne

20. Tests of Fire Compartment Window Boundaries. Retrieved from <https://www.uttyler.edu/ce/research/fire-activities.php>
21. Walraven, J., & Blaauwendraad, J. (2004). *Proceedings of the 5th International PhD Symposium in Civil Engineering*. Taylor & Francis.
22. Louter, C., Bos, F., Belis, J., Lebet, J. P. (2014). *Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference*. CRC Press.
23. Eriksen, R., Berggreen C., Boyd S. W., Dulieu-Barton J. M. (2010). Towards high velocity deformation characterisation of metals and composites using Digital Image Correlation. *EPJ Web of Conferences*, 6, 31013, 1–8.
24. GOM Correlate (GOM mbH, Germany). Retrieved from <http://www.gom.com/3d-software/gom-correlate.html>
25. GOM Correlate Professional. V8 SR1 Manual Basic. Retrieved from http://213.8.45.88/PDF/gom_correlate_prof_basic_v8.pdf
26. Reichman, A. M. (2007). Development of Nano-characterization System for Polymer Film Measurement and Single BGA Solder Joint Forming Experiment. *ProQuest*.
27. Ghiassi, B, Xavier, J., Oliveira, D. V., Lourenço, P. B. (2013). Application of digital image correlation in investigating the bond between FRP and masonry. *Compos. Struct.*, 106, 340–349.
28. Mersch, J. P. (2013). *On the Hydraulic Bulge Testing of Thin Sheet*. University of Texas – Austin, Master of Science in Engineering thesis, 94.
29. Jauffrès, D., Morris, C. D., Sherwood, J. A., Chen, J. (2009). *Discrete mesoscopic modeling for the simulation of woven-fabric reinforcement forming*. *International Journal of Material Forming*, 3, 2, 1205–1216
30. GOM Correlate Video Tutorial – 2 – Object Preparation and 2D Image Acquisition. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=U9FTmAZK6Yo>
31. Image Processing Toolbox - Obrabotka syhnalov y yzobrazheniy. Retrieved from <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/>
32. Osadchuk, T. Yu., & Demchyna, B. H. (2016). *Doslidzhennia mitsnosti bahatosharovykh sklianykh plyt, yaki pratsiuut na zghyn vid zoseredzhenoho navantazhennia shtampom*. *Budivelne vyrobnytstvo: mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk*, 60/2016, 58–63.
33. Nixon, M. S., & Aguado A. S. (2008). *Feature Extraction and Image Processing [2 ed.]*. Academic Press.
34. Zhuravel, Y. M. (1999). *Kratkyi kurs teoryy obrabotky yzobrazheniy*.

Автор: ОСАДЧУК Тарас Юрійович
Національний університет «Львівська політехніка»,
аспірант
E-mail – osadchuktaras92@gmail.com

Автор: ДЕМЧИНА Богдан Григорович
Національний університет «Львівська політехніка»,
доктор технічних наук, професор
E-mail – bogdan195809@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ СТЕКЛЯННЫХ ПЛИТ С ПОМОЩЬЮ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ЗОБРАЖЕНИЙ

Т. Ю. Осадчук, Б. Г. Демчина

Национальный университет «Львовская политехника», Львов

Описана методика экспериментальных исследований многослойных стеклянных плит опирающихся по четырем углам, работающих на изгиб от локальной нагрузки посредине плит с помощью корреляции цифровых изображений. Представлены результаты экспериментальных исследований деформативности согласно принятой схеме испытания. Экспериментально доказана целесообразность применения оптического метода исследования деформативности стеклянных конструкций.

Ключевые слова: стеклянные многослойные плиты, измерения деформаций, корреляция цифровых изображений, обработка изображений.

STRAIN MEASUREMENT OF LAMINATED GLASS PLATES USING DIGITAL IMAGE CORRELATION

T. Osadchuk, B. Demchyna

Lviv Polytechnic National University, Lviv

The article deals with experimental researches of multilayered glass plates. The aim of the article is to investigate the corner-supported multilayered glass plates which working on bending under loading on the local area in the middle of plates. It is claimed that experimental data of image analysis method for determining the contour and the strain (displacement) of laminated glass plates are very limited. The technique of strain measuring of laminated glass plates using Digital Image Correlation is considered. The results of experimental researches in accordance with the test scheme are presented. Parameters of non-contact optical technique for strain measuring are proposed. Practical value and theoretical importance of results are especially emphasized. New experimental data may be of a particular interest to the specialists in design.

Keywords: laminated glass plates/multilayered glass laminates, strain measurement, Digital Image Correlation, Image Processing.