

Odstęp 5 cm

Rejestracja i analiza pola przemieszczeń i odkształceń za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazu 3D

Times New Roman, pogrubiona, 24 pkt., wyśrodkowanie

odstęp 5 cm

Kolokwium z Technologii Informatycznych

Times New Roman, pogrubiona, 16 pkt., wyśrodkowanie

odstęp 7 cm

Times New Roman,
pogrubiona, 14 pkt.,
wyrównanie do prawej, pozycja
14 cm

Tekst formatował:

Imię i Nazwisko

Tu wpisz swoje imię i nazwisko
Times New Roman, normalna,
14 pkt., wyrównanie do prawej,
pozycja 14 cm

Tu zmień styl
akapitu

1. WPROWADZENIE

Techniki pomiarowe przemieszczeń i odkształceń opierają się głównie na kontaktowych systemach pomiarowych. Stosowanie tych systemów często wiąże się z występowaniem problemów podczas zamocowania czujników pomiarowych na powierzchni próbki, a wyniki badań uzyskuje się jedynie w wybranych punktach próbki, w których czujniki te zostały zamocowane. Przeprowadzone w ten sposób pomiary nie dają pełnej informacji o deformacji badanej próbki. Często czujniki kontaktowe można stosować jednorazowo, a podczas badań np. rozciągania szybciej ulegają zniszczeniu niż badana próbka. Ograniczenia, jakie wynikają z tego faktu, nie pozwalają na pełną analizę mierzonych wielkości. Zastosowanie metod kontaktowych w badaniach laboratoryjnych, jak na przykład wykonanie pomiaru odkształceń z wykorzystaniem tensometrów umieszczonych w kilku czy kilkunastu punktach próbki jest czasochłonne i kosztowne, w związku z tym poszukuje się nowych technik pomiarowych, które zapewnią lepsze możliwości pomiaru przemieszczeń i odkształceń badanych obiektów.

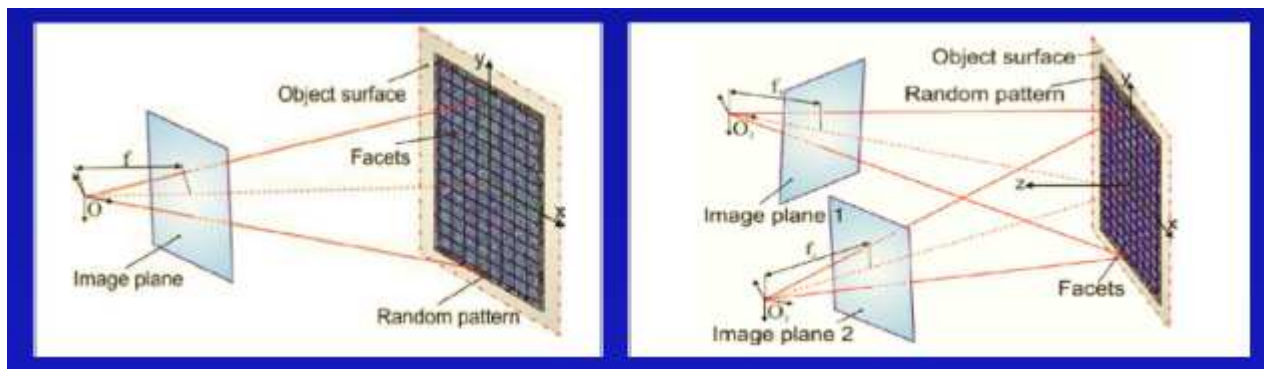
Ciągły rozwój systemów komputerowych, technologii informacyjnej, elektroniki, urządzeń optycznych i intensywne badania pozwoliły na stworzenie nowych metod badawczych. W ostatnich latach jako alternatywę dla tradycyjnych metod pomiarowych przemieszczeń i odkształceń zaczęto rozwijać metody bezkontaktowego pomiaru, które opierają się na systemach optyczno-elektronicznych. Metody te ogólnie zwane są metodami wizyjnymi. Jednym z takich bezkontaktowych systemów pomiarowych jest system cyfrowej korelacji obrazu, z angielskiego Digital Image Correlation (DIC), służący do identyfikacji przemieszczeń i odkształceń badanego obiektu w przestrzeni dwuwymiarowej lub trójwymiarowej poprzez porównywanie tzw. korelację obrazów cyfrowych badanego obiektu zarejestrowanych podczas jego przemieszczania się. Pojawiające się nowoczesne metody pomiarowe, jako alternatywa dla metod badawczych z wykorzystaniem kontaktowych czujników pomiarowych, nie eliminują wszystkich ograniczeń pomiarów, ale wyeliminowanie choć jednego z nich jest już dużą korzyścią. Nowe metody dają dodatkowe możliwości badawcze, jak na przykład umożliwiają analizę pola przemieszczeń i odkształceń badanych obiektów, nie ograniczając badań do pomiarów punktowych, czy też możliwość przeprowadzania badań zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych.

W artykule przedstawiono system cyfrowej korelacji obrazu 3D do pomiaru przemieszczeń i odkształceń na przykładzie systemu Q-450 firmy Dantec Dynamics, omówiono zasadę jego działania, etap rejestracji obrazu, przetwarzania danych i analizę wyników, zwracając uwagę na problemy, z jakimi może spotkać się użytkownik systemu. Ponadto w artykule opisano możliwości zastosowania systemu DIC, jego zalety i ograniczenia, a także przedstawiono przykładowe wyniki badań laboratoryjnych zrealizowanych za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazu 3D Q-450 firmy Dantec Dynamics w Zakładzie Mechaniki Konstrukcji Politechniki Rzeszowskiej.

2. SYSTEM CYFROWEJ KORELACJI OBRAZU 2D I 3D DO REJESTRACJI I ANALIZY PÓŁ PRZEMIESZCZEŃ I ODKSZTAŁCEŃ

Pod pojęciem „korelacji” rozumieć należy współzależność, wzajemny związek, proces ustalania wzajemnego powiązania, czy też związek między zmiennymi polegający na tym, że

zmianie jednej zmiennej towarzyszy zmiana drugiej. Idea działania systemu cyfrowej korelacji obrazu jest właśnie oparta na korelacji, a więc szukaniu i ustalaniu wzajemnego powiązania pomiędzy cyfrowymi obrazami badanego obiektu, zarejestrowanymi przez kamery lub aparaty cyfrowe. Cyfrową korelację obrazu można zatem rozumieć jako „znajdowanie odpowiednika” czy też „rozpoznanie podobnej cechy”, z ang. digital image matching. Praktyczne wykorzystanie matchingu sprowadza się głównie do czterech podstawowych etapów: wyboru elementów dopasowania, znalezienia ich odpowiedników na drugim obrazie lub kolejnych obrazach, obliczeniu położenia przestrzennego dopasowywanych elementów oraz oszacowania dokładności dopasowania.

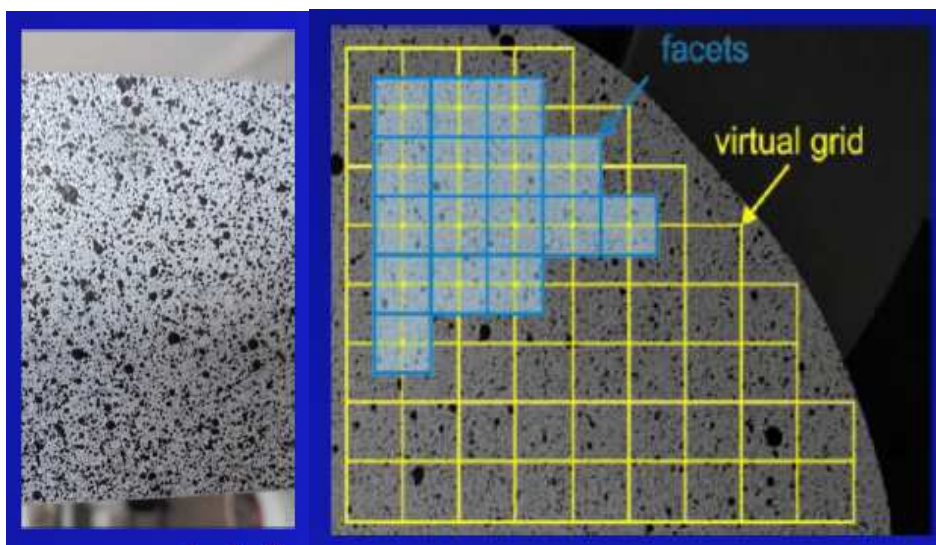


Rys. 1.1. Cyfrowa korelacja obrazu a) 2D-DIC, b) 3D-DIC

Pomiar metodą cyfrowej korelacji obrazu polega na skalibrowaniu układu pomiarowego składającego się z jednej, dwóch lub większej ilości kamer oraz zarejestrowaniu przy użyciu kamer serii obrazów badanego obiektu przed i po jego obciążeniu. Jeżeli zdjęcia rejestrowane są za pomocą jednej kamery, metoda cyfrowej korelacji obrazu pozwala określić przemieszczenia i odkształcenia badanej próbki tylko w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny obrazu kamery (kamera powinna być ustawiona w kierunku prostym do interesującej nas powierzchni próbki). Zastosowanie jednej kamery umożliwia zatem tylko przeprowadzenie badania w przestrzeni dwuwymiarowej, jest to tzw. dwuwymiarowa cyfrowa korelacja obrazu 2D-DIC (rys. 1.1 a)), którą stosuje się do badania obiektów płaskich. Korzystanie z układu pomiarowego składającego się z co najmniej dwóch kamer rejestrujących obraz badanego obiektu w dwóch różnych kierunkach daje możliwość pomiaru przemieszczeń i odkształceń każdego punktu badanego obiektu w przestrzeni trójwymiarowej, jest to tzw. przestrzenna cyfrowa korelacja obrazu 3D-DIC (rys. 1.1 b)). Przy zadanym położeniu kamer, wybranych ustawieniach obiektywu i określeniu wszystkich wymaganych parametrów obrazu, obliczane są przestrzenne współrzędne każdego punktu badanego obiektu i określany jest przestrzenny trójwymiarowy kontur obiektu, a następnie obliczane są przemieszczenia oraz odkształcenia wszystkich punktów próbki w dowolnie wybranym układzie współrzędnych kartezjańskich lub cylindrycznych. Aktualnie opracowywane są rozbudowane systemy cyfrowej korelacji obrazu składające się z trzech, czterech, sześciu a nawet ośmiu kamer, przeznaczone do obserwacji obiektów przestrzennych we wszystkich kierunkach, np. obiektów cylindrycznych, obiektów o skomplikowanym konturze przestrzennym.

W metodzie cyfrowej korelacji obrazu powierzchnia badanego obiektu musi posiadać plamkową strukturę (rys. 1.2 a), którą w większości przypadków należy nanieść na obiekt przed rozpoczęciem pomiarów (zdarza się, że próbka np. wykonana z materiału o niejednorodnej strukturze lub poddana procesowi obróbki jak np. piaskowanie posiada już naturalny nieregularny wzór na

swojej powierzchni, często w takim przypadku etap przygotowania powierzchni próbki do badania może zostać pominięty). Wzór naniesiony na obiekt przesuwa się i deformuje pod wpływem obciążenia razem z nim. Obrazy badanego obiektu są rejestrowane przez urządzenia cyfrowe (aparaty, kamery), archiwizowane, a następnie analizowane przez specjalistyczne oprogramowanie. Jedna z kamer oraz jeden z obrazów zarejestrowanych w serii pomiarowej wybierane są jako referencyjne. Obraz referencyjny służy do korelacji obrazów między poszczególnymi kamerami (najczęściej jest to obraz zarejestrowany przed obciążeniem obiektu). Następnie w specjalistycznym programie, stanowiącym część systemu cyfrowej korelacji obrazu, automatycznie tworzona jest wirtualna regularna siatka punktów, która nakładana jest na referencyjny obraz referencyjnej kamery. Każdy punkt tej siatki określa środek kwadratowego regionu obrazu zwanego facetką (rys. 1.2 b). W ten sposób obraz referencyjny jest dzielony na małe prostokątne regiony zawierające $N \times N$ pikseli. Wymiary facetek zależą od jakości i wielkości plamek naniesionej na próbkę. Każdy z kwadratów siatki musi zawierać biały i czarny kolor w celu zapewnienia prawidłowej korelacji, z kontrastowymi cechami. Facetki mają kształt kwadratu zwykle o wielkości od 15×15 do 30×30 pikseli. Algorytm cyfrowej korelacji obrazu śledzi pozycję każdej facetki z obrazu referencyjnego we wszystkich pozostałych obrazach serii pomiarowej, w celu ustalenia przestrzennych współrzędnych i płaszczyzny stycznej do powierzchni obiektu bazowego dla każdego punktu siatki. Dla każdej facetki obliczane są wektory przemieszczeń. Dane wyjściowe uzyskane z pomiarów stanowi zbiór map przemieszczeń, na podstawie których uzyskiwane są mapy odkształceń. Wyniki prezentowane w postaci barwnych map przemieszczeń i odkształceń umożliwiają np. weryfikację sformułowanych modeli numerycznych.

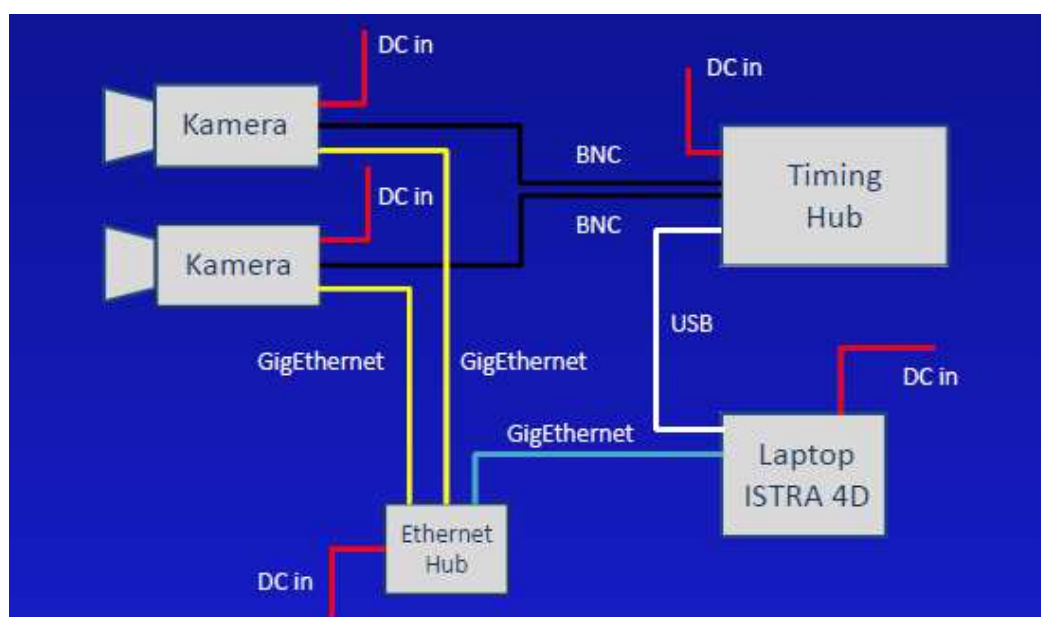


Rys. 1.2. Powierzchnia próbki: a) losowy wzór, b) wirtualna siatka punktów i facetek nałożona na powierzchnię badanej próbki na obrazie referencyjnym

3. PRZEBIEG REJESTRACJI I ANALIZA PÓL PRZEMIESZCZEŃ I ODKSZTAŁCEŃ Z ZASTOSOWANIEM SYSTEMU CYFROWEJ KORELACJI OBRAZU 3D NA PRZYKŁADZIE SYSTEMU Q-450 FIRMY DANTEC DYNAMICS

System cyfrowej korelacji obrazu Q-450 firmy Dantec Dynamics jest to zaawansowany

optyczno-elektroniczny system przeznaczony do bezkontaktowych, precyzyjnych, trójwymiarowych pomiarów konturu, przemieszczeń i odkształceń próbek i komponentów; w odróżnieniu od innych systemów cyfrowej korelacji obrazu system ten można wykorzystać do pomiarów podczas zdarzeń szybkozmiennych, gdyż podstawowymi jego elementami są dwie szybkie kamery z możliwością nagrywania obrazów z częstotliwością do 130 000 Hz. Pozostałe elementy systemu to przenośny komputer ze specjalistycznym oprogramowaniem Istra 4D, stacja wyzwalająco-sterująca Timing Hub, switch z architekturą sieci LAN Gigabit Ethernet oraz obiekty kalibracyjne. Schemat układu pomiarowego Q-450 przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Schemat połączenia elementów systemu cyfrowej korelacji obrazu Q-450

Szybkie kamery stanowiące najważniejszy element systemu to cyfrowe kamery Phantom v341, charakteryzujące się sensorem CMOS o rozdzielczości 4 Mpx i przepustowością 3 Gpx/s. Oznacza to, że maksymalna prędkość kamery przy pełnej rozdzielczości obrazu wynoszącej 2560 x 1600 pikseli wynosi 800 klatek na sekundę, a maksymalna prędkość rejestracji obrazów przy maksymalnie zredukowanej rozdzielczości do 256 x 8 pikseli wynosi 130 000 klatek na sekundę.

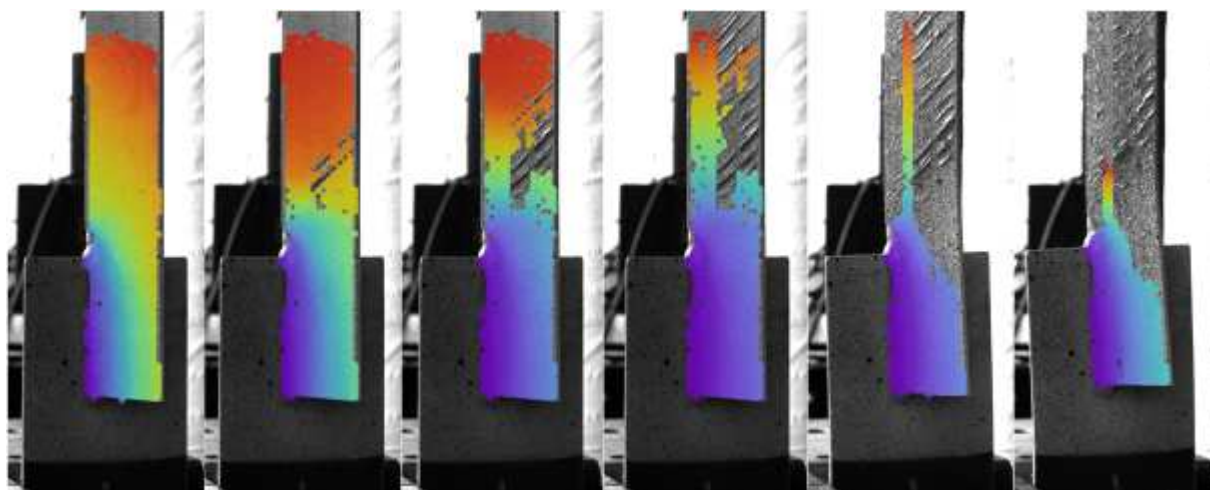
Oprogramowanie Istra 4D zapewnia podstawowe funkcje do obsługi systemów cyfrowej korelacji obrazu. Program Istra 4D stanowi zintegrowane narzędzie do rejestrowania obrazów, ich analizy, wizualizacji wyników oraz eksportu danych (dane z programu Istra 4D można eksportować do innych programów w celu post-processingu np. do programu Matlab). Oprogramowanie daje możliwość przetwarzania obrazów zarejestrowanych z jednej, dwóch lub większej ilości kamer. Program pozwala na wyznaczenie przestrzennego konturu badanego obiektu, deformacji w przestrzeni trójwymiarowej oraz pola odkształceń mierzonych powierzchni.

Istotnym elementem systemu cyfrowej korelacji obrazu Q-450 jest timing hub tj. urządzenie sterująco-wyzwalające synchronizujące układ pomiarowy, stanowiące interfejs pomiędzy komputerem kontrolnym a czujnikami pomiarowymi. W skład tego urządzenia wchodzi synchronizator DAQ timing, który gwarantuje, że obrazy dla wszystkich czujników pomiarowych nagrywane są dokładnie w tym samym czasie (sygnał synchronizacji jest dostępny w złączu SYNC-OUT, do którego muszą być podpięte wszystkie synchronizowane czujniki pomiarowe) oraz daje

możliwość wyzwalania pomiaru poprzez uzyskanie zewnętrznego sygnału wyzwalania w złączu TRIGGER IN, a także zintegrowane urządzenie rejestrujące sygnał analogowy z ośmioma kanałami wejścia ponumerowanymi od A0 do A7.

Badanie przemieszczeń i odkształceń z zastosowaniem systemu cyfrowej korelacji obrazu Q-450 firmy Dantec Dynamics można podzielić na kilka etapów: przygotowanie próbki do badania, ustawienie stanowiska pomiarowego, kalibrację systemu, pomiar właściwy tj. rejestrację obrazów, analizę obrazów tzw. ewaluację, wizualizację wyników pomiaru.

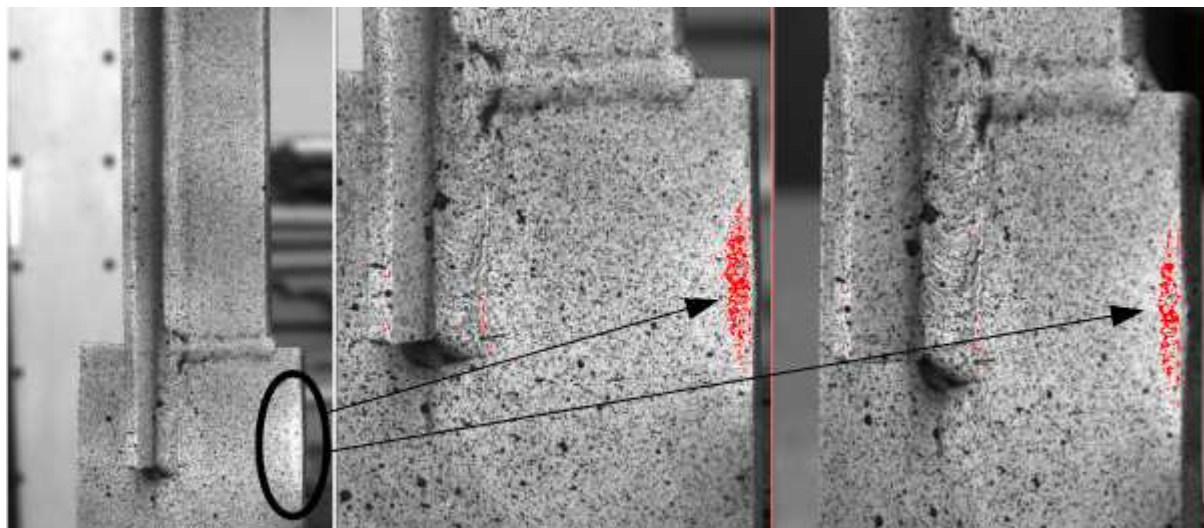
Przed rozpoczęciem pomiarów należy w odpowiedni sposób przygotować próbki, nanosząc na interesującą nas powierzchnię próbki losowy wzór punktów różnej wielkości. Należy najpierw przygotować warstwę bazową poprzez nałożenie białej farby na całą powierzchnię próbki, a następnie stworzyć stochastyczny wzór czarnych punktów na białym tle, poprzez natryskiwanie czarnej farby na powierzchnię próbki. Prawidłowe wykonanie wzoru wymaga precyzji i doświadczenia, dlatego już na tym etapie początkujący użytkownik systemu może spotkać się z trudnościami. Przygotowując próbkę do badania należy pamiętać o kilku kwestiach. Po pierwsze powierzchnia próbki musi być dokładnie oczyszczona przed malowaniem, jak wiadomo nanoszenie farby na brudną powierzchnię spowoduje późniejsze łuszczenie się farby. Szczególnie przy spodziewanych dużych odkształceniach próbki bardzo ważne jest, aby przyczepność farby do powierzchni próbki była jak największa, inaczej naniesiony na próbkę wzór prawdopodobnie ulegnie zniszczeniu podczas obciążania próbki (rys. 2.2). Bez losowego wzoru czarnych punktów na białym tle na powierzchni próbki (o ile próbka nie ma naturalnego nieregularnego wzoru na swojej powierzchni) nie ma możliwości wykonania cyfrowej korelacji obrazu, dlatego tak istotne jest usunięcie wszelkich zanieczyszczeń z powierzchni próbki przed jej malowaniem.



Rys. 2.2. Stopniowe zniszczenie podczas badania losowego wzoru naniesionego na powierzchnię próbki, spowodowane niedokładnym oczyszczeniem powierzchni przed malowaniem, prowadzące w konsekwencji do częściowej utraty wyników tj. fragmentów pola przemieszczeń i odkształceń

Po drugie gęstość i wielkość czarnych kropek na powierzchni próbki powinny być odpowiednio dobrane do wielkości badanego obszaru próbki, a tym samym do wielkości tablicy kalibracyjnej stosowanej do kalibracji systemu (tablica kalibracyjna dobierana jest do rozmiaru badanej próbki). Wielkość czarnych kropek powinna wynosić ok 2 piksele rejestrowanego obrazu, a w każdej facetce naniesionej przez program na obraz referencyjny próbki powinien znaleźć się

charakterystyczny fragment wzoru, zarówno z białymi jak i z czarnymi jego elementami. Po trzecie należy być ostrożnym przy zamalowywaniu powierzchni próbki białą farbą. Powierzchnia badanego obiektu powinna być jedynie zmatowiona, zbyt duża ilość białej farby spowoduje, że powierzchnia próbki stanie się błyszcząca i będzie odbijała światło w czasie badania, w konsekwencji obszary z dużą ilością białego podkładu na rejestrowanych przez kamery obrazach będą prześwieczone i pominięte w dalszej analizie (rys. 2.3).



Rys. 2.3. Prześwieczone fragmenty obrazu w miejscu nałożenia zbyt dużej ilości białej farby na powierzchnię próbki rejestrowane przez kamery systemu Q-450

Drugim etapem badań jest przygotowanie stanowiska pomiarowego, a więc skonfigurowanie sprzętu, połączenie elementów systemu według schematu działania, aktywacja sprzętu komputerowego, uruchomienie programu Istra 4D oraz ustawienie kamer. Próbkę powinna być obserwowana przez czujniki pomiarowe z dwóch kierunków. Kamery należy ustawić tak, aby badany obszar próbki znajdował się centralnie w środku pola widzenia obu kamer. Należy wybrać odpowiednią rozdzielczość obrazu kamer. Kąt między kamerami powinien wynosić od 40 do 60 stopni. Po ustawieniu kamer należy wybrać częstotliwość z jaką będą rejestrowane obrazy oraz ustawić ostrość na obiektywie kamery. Bardzo ważną kwestią przy przygotowywaniu stanowiska pomiarowego jest zapewnienie prawidłowego oświetlenia badanej próbki poprzez wybór czasu ekspozycji (maksymalna wartość tego parametru jest ograniczona przez wartość częstotliwości rejestracji obrazów oraz rozdzielczość obrazu) oraz ustawienie przesłony na obiektywie (aby nie utracić głębi ostrości, przesłona powinna być ustawiona na wartości około 8). Zapewnienie wymaganego oświetlenia jest kłopotliwe, zatem na tym etapie mogą pojawić się kolejne trudności dla użytkownika systemu. Wykorzystując naturalne oświetlenie stanowiska pomiarowego światłem dziennym, istnieje ryzyko, że pomiary nie zostaną wykonane prawidłowo. Jak wiadomo oświetlenie naturalne jest zmienne i zależne od warunków pogodowych, przy dłuższych pomiarach oświetlenie takie może powodować chwilowe prześwieczenia lub zaciemnienia rejestrowanych obrazów, co w konsekwencji doprowadzi do tego, że na etapie ewaluacji program Istra 4D nie będzie w stanie przeanalizować zarejestrowanych obrazów (rys. 2.4). Pochmurny dzień zmniejsza ryzyko wahań natężenia oświetlenia, co w pewien sposób stabilizuje warunki oświetleniowe, ale w takie dni oświetlenie naturalne może nie być wystarczające do wykonania prawidłowych pomiarów, szczególnie przy pomiarach szybkimi kamerami z bardzo dużą częstotliwością. Aby uzyskać

stabilne warunki oświetlenia, zaleca się korzystanie ze światła sztucznego. Podsumowując, stosowanie światła naturalnego jest korzystne przy krótkich pomiarach lub kiedy możemy określić oświetlenie naturalne jako stabilne np. w pochmurne dni, przy pomiarach długich albo z dużą częstotliwością zalecane jest stosowanie oświetlenia sztucznego, jak np. lampy ksenonowe, oświetlenie stroboskopowe, ultra jasne LED.



Rys. 2.4. Zatrzymanie procesu ewaluacji zarejestrowanych przez kamery obrazów spowodowane chwilową zmianą oświetlenia naturalnego – wzrostem intensywności światła słonecznego

Kolejnym etapem pomiaru przemieszczeń i odkształceń z zastosowaniem systemu cyfrowej korelacji obrazu jest kalibracja systemu. W procesie tym określone są wartości tzw. parametrów kalibracji. Dla każdej kamery wyznaczone są parametry wewnętrzne kalibracji czyli parametry obrazu kamery oraz parametry zewnętrzne kalibracji, które opisują położenie i orientację jednej kamery względem drugiej. Ilekroć zmieniane jest położenie kamer albo ustawienia obrazu (ostrość, apertura), należy przeprowadzić nową kalibrację.

Podczas procesu kalibracji korzysta się ze specjalnych tablic kalibracyjnych (rys. 2.5). Do badanej próbki dobierana jest odpowiednia tablica kalibracyjna. Na każdej tablicy kalibracyjnej znajduje się wzór szachownicy tj. białe i czarne kwadraty oraz trzy charakterystyczne znaczniki w postaci białych i czarnych kółek, umiejscowione w centralnej części tablicy. Znaczniki te determinują orientację tablicy w następujący sposób: białe kółko znajdujące się w centralnym punkcie tablicy definiuje początek układu współrzędnych, sąsiadujące z nim czarne kółko określa kierunek osi x, natomiast trzeci charakterystyczny znacznik białe kółko znajdujące się powyżej zdefiniowanego początku układu współrzędnych określa kierunek osi y. Oś z układu kartezjańskiego jest położona w kierunku prostopadłym do wyznaczonej płaszczyzny xy i skierowana jest na zewnątrz próbki tj. w kierunku od tablicy kalibracyjnej do kamer, które rejestrują

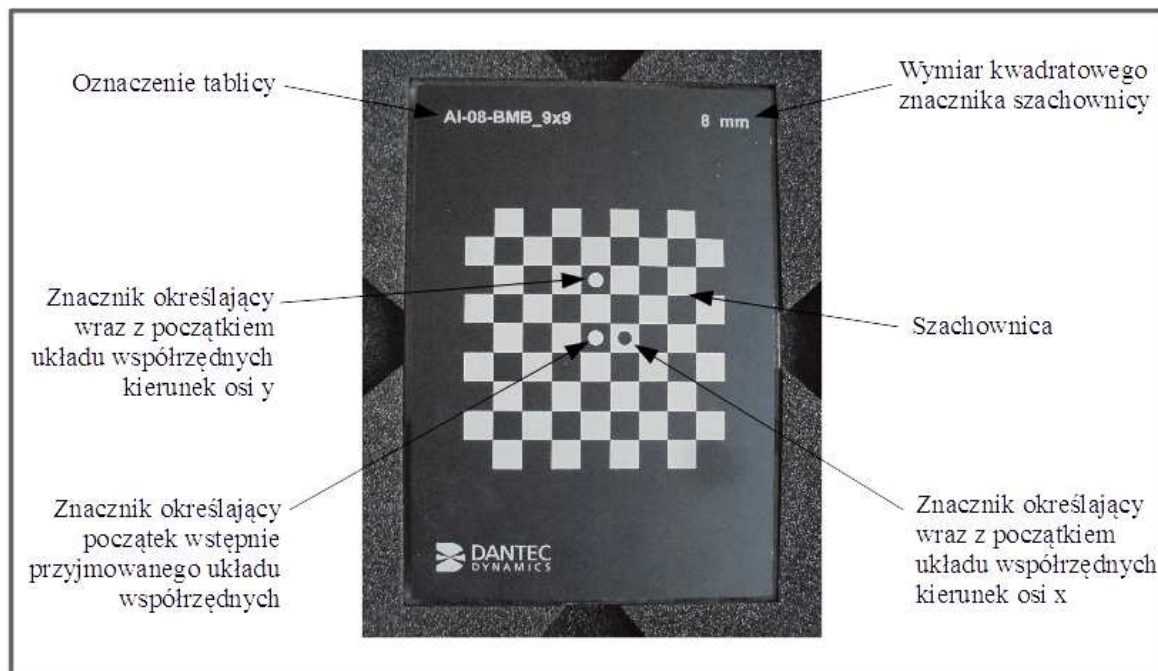
jej obraz. Tablice kalibracyjne różnią się między sobą wielkością, materiałem, z którego są wykonane oraz tłem, na które naniesiony jest wzór szachownicy. Wielkość tablicy kalibracyjnej powinna odpowiadać wielkości badanego obszaru próbki, w taki sposób, aby tablica (wzór szachownicy) wypełniała w pełni obraz w obu kamerach. Tablice kalibracyjne do systemu Q-450 firmy Dantec Dynamics zestawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Tablice kalibracyjne do systemu Q-450 firmy Dantec Dynamics

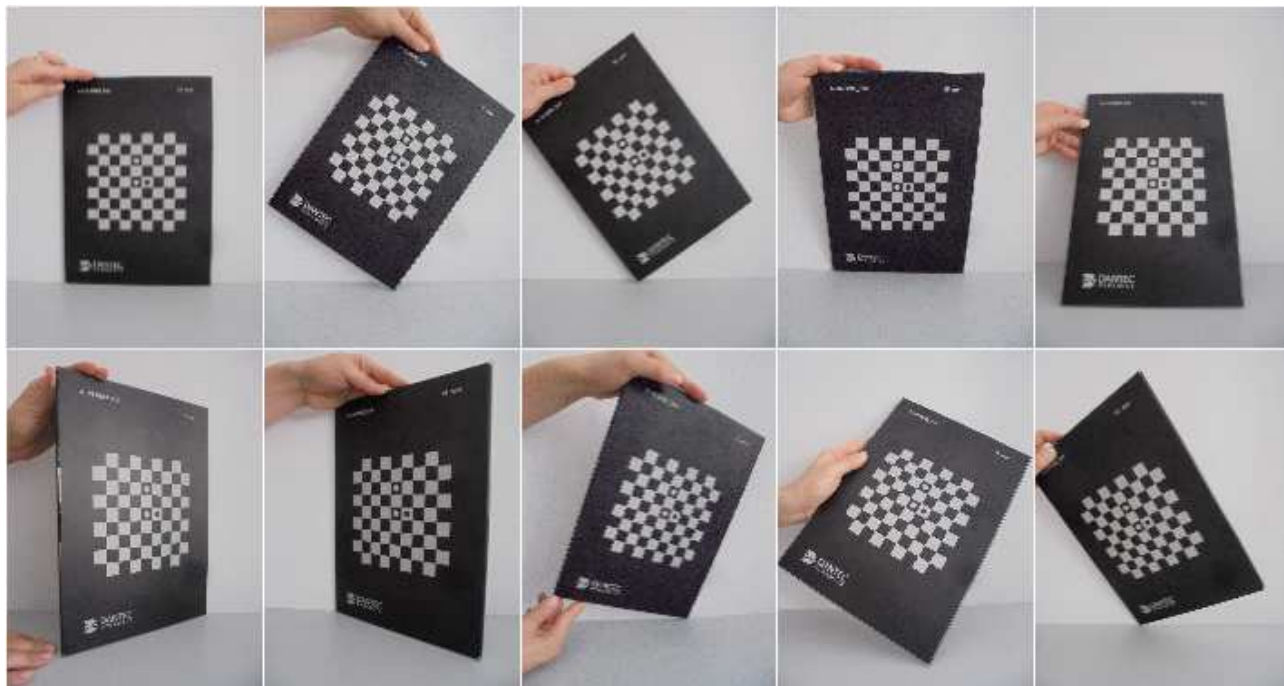
Oznaczenia tablic kalibracyjnych do systemu cyfrowej korelacji obrazu Q-450					
AI (aluminiowe)		GI (ze stali galwanizowanej)		PI (z tworzywa poliamidowego)	
AI_04_BMB_9x9	AI_04_BMF_9x9	GI_00-5_WMB_9x9		PI_04_WMB_9x9	PI_04_WMF_9x9
AI_06_BMB_9x9	AI_06_BMF_9x9	GI_01-5_WMB_9x9		PI_06_WMB_9x9	PI_06_WMF_9x9
AI_08_BMB_9x9	AI_08_BMF_9x9	GI_01_WMB_9x9	GI_01_WMF_9x9	PI_08_WMB_9x9	PI_08_WMF_9x9
AI_11_BMB_9x9	AI_11_BMF_9x9	GI_02_WMB_9x9	GI_02_WMF_9x9	PI_11_WMB_9x9	PI_11_WMF_9x9
AI_15_BMB_9x9	AI_15_BMF_9x9	GI_03_WMB_9x9	GI_03_WMF_9x9	PI_15_WMB_9x9	PI_15_WMF_9x9
AI_20_BMB_9x9	AI_20_BMF_9x9	GI_04_WMB_9x9	GI_04_WMF_9x9	PI_20_WMB_9x9	PI_20_WMF_9x9
AI_23_BMB_9x9	AI_23_BMF_9x9	GI_06_WMB_9x9	GI_06_WMF_9x9	PI_23_WMB_9x9	PI_23_WMF_9x9
				PI_35_WMB_9x9	
				PI_50_WMB_9x9	
				PI_70_WMB_9x9	
<p>Pierwsze dwie litery oznaczenia tablicy określają materiał, z jakiego wykonana jest tablica (AI – aluminium, GI – galvanised steel, PI – polyamide plastic)</p> <p>Kolejno dwie lub trzy liczby w nazwie tablicy oznaczają rozmiar wzoru na tablicy tj. wymiar pojedynczego kwadratowego znacznika podany w [mm].</p> <p>Następne trzy litery oznaczenia tablicy (BMB lub BMF) to kod specyfikacji tablicy: pierwsza litera B lub W oznacza kolor tła tablicy (czarna lub biała), druga litera M oznacza występowanie charakterystycznych znaczników określających orientację tablicy, trzecia litera B lub F określa, czy naroża kwadratów wzoru na tablicy pokazują kolor tła czy kolor pierwszoplanowy.</p> <p>Symbol 9x9 w oznaczeniu tablicy oznacza liczbę kwadratów w pionie i w poziomie na tablicy.</p>					

Proces kalibracji polega na zarejestrowaniu obrazów tablicy kalibracyjnej, umieszczonej w polu widzenia kamer i o ile jest to możliwe w płaszczyźnie badanej próbki lub jak najbliżej badanego obiektu. Pierwszym etapem procesu kalibracji jest dobór odpowiedniej tablicy kalibracyjnej, następnie po wskazaniu w programie Istra 4D wybranej tablicy rejestrowane są obrazy tablicy kalibracyjnej. Podczas rejestracji zdjęć należy zmieniać położenie tablicy (pierwsze

zdjęcie tablicy kalibracyjnej powinno być wykonane w położeniu wyjściowym tablicy tj. w płaszczyźnie próbki lub jak najbliższej badanego obiektu, kolejne zdjęcia najlepiej wykonać po obrocie tablicy w płaszczyźnie xy, w płaszczyźnie yz oraz w płaszczyźnie xz, a następnie przy zupełnie dowolnym położeniu tablicy). Zalecane pozycje tablicy kalibracyjnej w czasie kalibracji systemu Q-450 przedstawiono na rysunku 2.6. Zazwyczaj, do wyznaczenia parametrów kalibracyjnych wystarczy wykonać 8-12 zdjęć tablicy kalibracyjnej z różnej perspektywy.



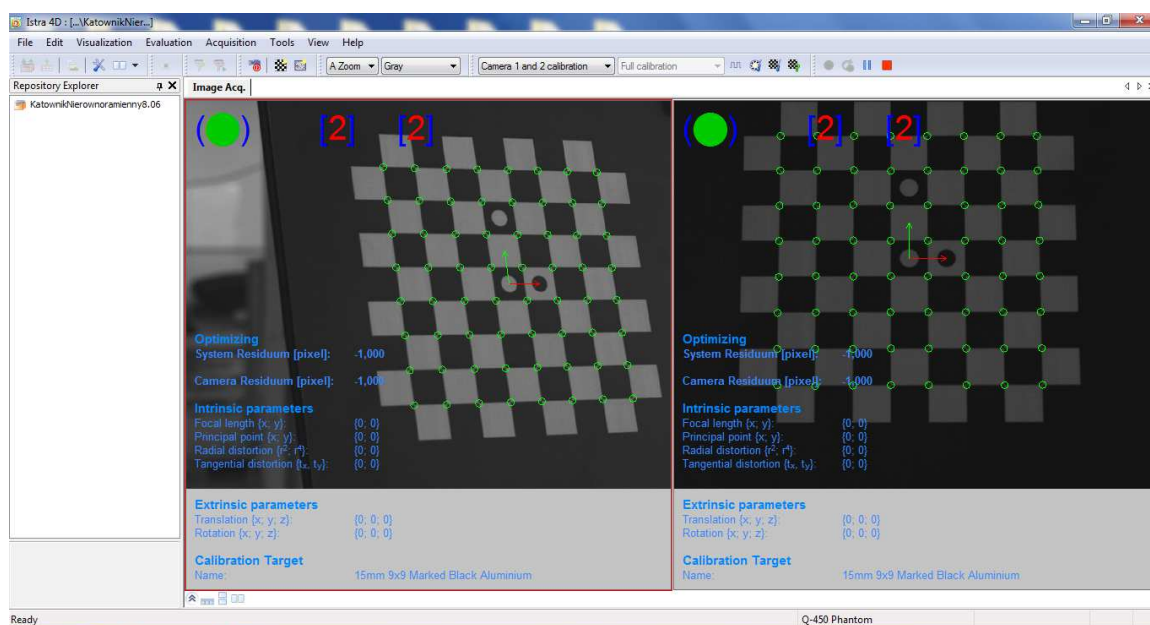
Rys. 2.5. Przykładowa tablica kalibracyjna z szachownicą i charakterystycznymi punktami
AI_08_BMB_9x9



Rys. 2.6. Zalecane pozycje tablicy kalibracyjnej w procesie kalibracji

Należy pamiętać, że wstępny układ współrzędnych w programie Istra 4D, w którym będą

obliczane wartości przemieszczeń i odkształceń, jest przyjmowany na podstawie pierwszego zdjęcia tablicy kalibracyjnej, dlatego ważne jest dokładne ustawienie pożądanego położenia tablicy kalibracyjnej na etapie rejestracji pierwszego zdjęcia. Kamery rejestrują obraz tablicy kalibracyjnej, oprogramowanie Istra 4D automatycznie wykrywa specyficzne znaczniki na tablicy. Program identyfikuje narożniki kwadratów wzoru znajdującego się na tablicy kalibracyjnej oraz ustala orientację tablicy na podstawie położenia trzech kół znajdujących się w środkowej części wzoru tablicy kalibracyjnej (rys. 2.7). System oblicza wewnętrzne i zewnętrzne parametry kalibracji, których ustalenie jest niezbędne do analizy geometrii obiektu i przeniesienia wszystkich punktów z obrazów zarejestrowanych przez kamery z płaszczyzny do przestrzeni. Kalibracja jest zawsze wykonywana przy maksymalnej rozdzielczości obrazu, a w przypadku kamer Phantom v341 jest to wartość 2560 pikseli x 1600 pikseli.

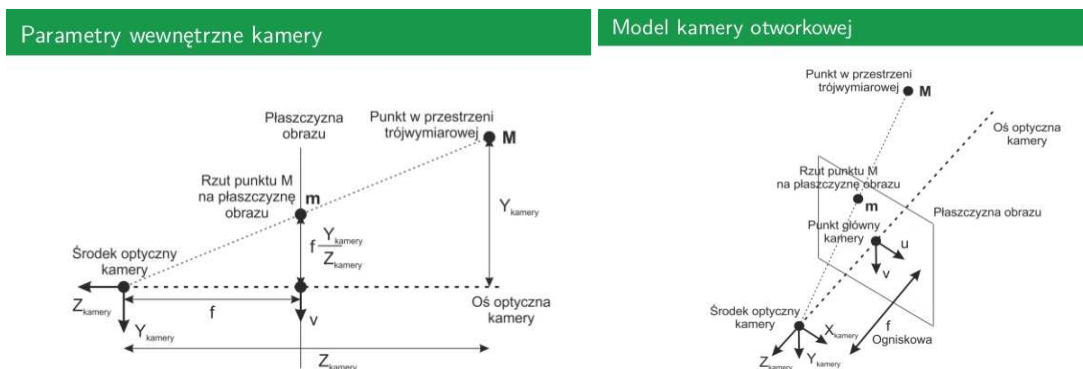


Rys. 2.7. Rejestracja obrazów tablicy kalibracyjnej podczas procesu kalibracji (wykrywanie przez program Istra 4D naroży znaczników na tablicy oraz ustalanie osi układu współrzędnych)

Na tym etapie badania przemieszczeń i odkształceń z zastosowaniem metody 3D-DIC trudność może stanowić odpowiednie pozycjonowanie tablicy kalibracyjnej podczas rejestrowania zdjęć w procesie kalibracji. Kalkulacja parametrów kalibracji odbywa się za pomocą algorytmu optymalizacji, który określa średnią niedokładność odnalezionych na zarejestrowanych obrazach znaczników (narożników kwadratów szachownicy tablicy kalibracyjnej) w jednostce pikseli tzw. residuum. Wartość ta jest miarą niedokładności obliczanych parametrów czyli parametrem jakości procesu kalibracji i powinna być mniejsza od wartości 0,3 do 0,5 w zależności od rodzaju zastosowanej tablicy kalibracyjnej. Wartość residuum powyżej 1,0 oznacza pojawienie się błędu podczas kalibracji i w takim przypadku proces kalibracji należy powtórzyć. Najczęstszym błędem popełnianym przy kalibracji jest nieodpowiednie pozycjonowanie tablicy kalibracyjnej (tablica wypełnia za mały obszar obrazu obu kamer lub jednej kamery, w takim przypadku należy wybrać inne ustawienie tablicy kalibracyjnej lub zmienić obiekt kalibracyjny). Powodem uzyskania za dużej wartości residuum może być zbyt małe oświetlenie obiektu kalibracyjnego (program nie identyfikuje prawidłowo naroży kwadratów szachownicy na ciemnych obrazach, jest zbyt mały kontrast pomiędzy białymi a czarnymi kwadratami szachownicy, wówczas należy zwiększyć czas

naświetlania, pamiętając, że ustawienie czasu naświetlania w procesie kalibracji jest niezależne od ustawienia czasu naświetlania przy rejestrowaniu obrazów podczas właściwego badania próbki) lub nieprawidłowo ustawiona ostrość obiektywu.

Wewnętrzne parametry kalibracji opisujące obraz kamery ustalane podczas kalibracji systemu cyfrowej korelacji obrazu to długość ogniskowej (x, y), punkt główny (x, y) oraz składowe dystorsji (rys. 2.9). Wyznaczenie tych wielkości bazuje na modelu otworkowym (rys. 2.8). Długość ogniskowej jest określana za pomocą dwóch współrzędnych x i y i jest ona odległością mierzoną od środka optycznego kamery do płaszczyzny obrazu. Punkt główny określa pozycję środka optycznego kamery na płaszczyźnie obrazu xy . Błąd dystorsji określany jest przez dwie składowe: radialną (promień zniekształcenia soczewek) – w kierunku radialnym oraz tangencjalną (zniekształcenie stycznej soczewek) – w kierunku prostopadłym do radialnego.



Rys. 2.8. Model kamery otworkowej

Projection Parameters	
Focal length {x; y}:	{5422,1 ± 1,0; 5422,2 ± 0,9}
Principal point {x; y}:	{1298 ± 3; 822 ± 3}
Radial distortion {r ² ; r ⁴ }:	{-0,077 ± 0,004; 0,2 ± 0,3}
Tangential distortion {t _x , t _y }:	{0,00041 ± 0,00013; -0,00016 ± 0,00018}
Extrinsic Parameters camera_pos_1:	
Rotation vector {x; y; z}:	{3,0545 ± 0,0006; -0,0109 ± 0,0003; 0,7322 ± 0,0003}
Translation vector {x; y; z}:	{9,1 ± 0,6; -13,3 ± 0,5; 929,04 ± 0,18}
Intrinsic Parameters camera_pos_2:	
Focal length {x; y}:	{5441,4 ± 0,8; 5441,9 ± 0,7}
Principal point {x; y}:	{1299 ± 3; 781 ± 3}
Radial distortion {r ² ; r ⁴ }:	{-0,082 ± 0,004; 0,4 ± 0,3}
Tangential distortion {t _x , t _y }:	{0,00013 ± 0,00013; -0,00113 ± 0,00017}
Extrinsic Parameters camera_pos_2:	
Rotation vector {x; y; z}:	{-3,1352 ± 0,0005; 0,00311 ± 0,00016; -0,064 ± 0,0001}
Translation vector {x; y; z}:	{-8,7 ± 0,5; -17,2 ± 0,4; 876,73 ± 0,15}

Rys. 2.9. Parametry kalibracji obliczane w procesie kalibracji systemu cyfrowej korelacji obrazu przy zastosowaniu dwóch kamer

Zewnętrzne parametry kalibracji określają pozycję kamery w odniesieniu do wstępnego układu współrzędnych ustalonego na podstawie pierwszego zarejestrowanego obrazu tablicy kalibracyjnej w procesie kalibracji. Zewnętrzne parametry kalibracji to wektor przesunięcia (x, y, z) oraz wektor rotacji (x, y, z) (rys.2.9). Wektor przesunięcia jest wektorem położonym pomiędzy początkiem wstępnie przyjętego układu współrzędnych a punktem głównym kamery. Wektor rotacji określa obrót układu współrzędnych w taki sposób, że oś z pokrywa się z kierunkiem osi głównej, a oś x jest równoległa do rzędów pikseli obrazu.

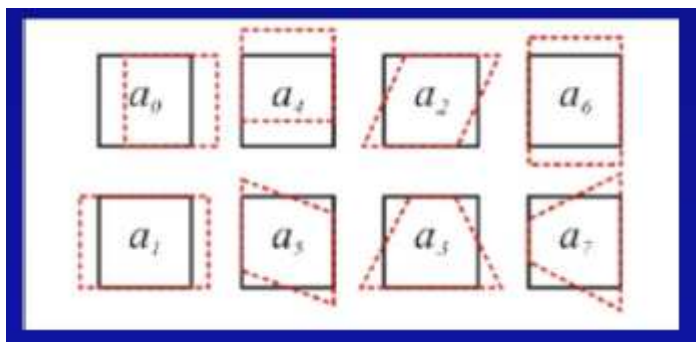
Proces kalibracji w systemie Q-450 firmy Dantec Dynamics można wykonywać na kilka różnych sposobów. Najczęstszym sposobem jest kalibracja dwóch kamer jednocześnie tzw. kalibracja pełna. W niektórych przypadkach konieczne jest niezależne ustalenie parametrów wewnętrznych i zewnętrznych kalibracji albo wykonanie kalibracji oddzielnie dla każdej kamery. Tak więc dostępne są następujące metody kalibracji systemu: kalibracja obu kamer jednocześnie charakteryzująca się tym, że w jednej kalibracji wyznaczane są wszystkie parametry wewnętrzne i zewnętrzne dla obu kamer jednocześnie tzw. kalibracja pełna, oddzielna kalibracja parametrów wewnętrznych i parametrów zewnętrznych kalibracji (wyznaczanie parametrów wewnętrznych i zewnętrznych odbywa się niezależnie, ale jednocześnie dla obu kamer, najpierw wyznaczane są parametry wewnętrzne dla obu kamer jednocześnie, potem wyznaczane są parametry zewnętrzne) oraz oddzielna kalibracja kamer (parametry kalibracji wyznaczane są niezależnie dla każdej kamery, najpierw określone są parametry wewnętrzne osobno dla każdej kamery, a następnie obliczane są parametry zewnętrzne).

System korelacji Dantec Dynamics realizuje obliczenia za pomocą algorytmu korelacji w oparciu o pseudo-afiniczną transformację współrzędnych punktów badanego obiektu z jednego obrazu do drugiego. Algorytm kalibracyjny opiera się na śledzeniu czarnych punktów tworzących wzór na powierzchni badanego obiektu $G_1(x,y)$ w facetkach. Współrzędne facetek są przekształcane we współrzędne (x_t, y_t) poprzez transformację uwzględniającą następujące parametry: translację (równoległe przesunięcie wszystkich punktów dziedziny bez deformacji i obracania), rozciągnięcie, ścinanie, zniekształcenie. Transformacje współrzędnych można wyrazić wzorami:

$$x_t(a_0, a_1, a_2, a_3, x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x \cdot y$$

$$y_t(a_4, a_5, a_6, a_7, x, y) = a_4 + a_5 x + a_6 y + a_7 x \cdot y$$

gdzie a_0 do a_7 są to parametry transformacji według rysunku 2.10.



Rys. 2.10. Parametry transformacji

Parametry te są określane przez minimalizację różnic między obserwowanymi czarnymi punktami wzoru $G_2(x, y)$ analizowanego obrazu a punktami oryginalnego wzoru $G_1(x, y)$, przy uwzględnieniu współrzędnych transformacji (x_t, y_t) oraz wprowadzeniu korekty fotogrametrycznej:

$$\min_{a_0, \dots, a_7, g_0, g_1} \sum_{x, y} \|G_1(x, y) - G_T(x, y)\|$$

gdzie:

$$G_T(x, y) = g_0 + g_1 \cdot G_2(x_t(x, y), y_t(x, y))$$

oraz g_0 i g_1 to parametry oświetlenia.

Po wykonaniu kalibracji systemu można przystąpić do kolejnego etapu badania metodą DIC jakim jest rejestracja obrazów w czasie przemieszczania się próbki pod wpływem przyłożonego obciążenia. Obrazy rejestrowane podczas jednego pomiaru tworzą pojedynczą serię danych, tzw. Load Series. Obrazy można rejestrować w sposób manualny lub w sposób ciągły korzystając z bufora kamery. Przy rejestracji manualnej wykonywane są pojedyncze zdjęcia próbki w wybranych momentach badania. Następnie obrazy zapisywane są przez program jako jedna seria pomiarowa. Rejestracja ciągła pozwala natomiast na zapisywanie zdjęć próbki z wybraną stałą częstotliwością w sposób nieprzerwany do bufora kamer, a po zakończeniu pomiaru obrazy przegrywane są z bufora kamery na komputer i zapisywane jako jedna seria danych. Rejestracja obrazów w sposób ciągły pozwala na nagrywanie określonej liczby zdjęć z możliwością wyboru liczby obrazów, które mają być zarejestrowane przed (liczba klatek „pre-trigger”) i po momencie wyzwolenia pomiaru (liczba klatek „post-trigger”).

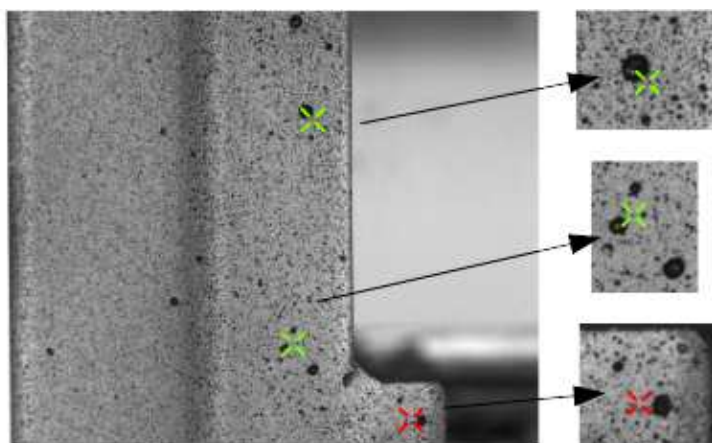
Ewaluacja danych jest kolejnym etapem badania przemieszczeń i odkształceń z wykorzystaniem systemu cyfrowej korelacji obrazu Q-450. Na tym etapie specjalistyczne oprogramowanie Istra 4D analizuje kolejno zapisane w czasie pomiarów właściwych próbki obrazy serii pomiarowej. Proces ewaluacji polega na wyznaczeniu przestrzennych współrzędnych badanego obiektu dla każdego pojedynczego kroku pomiarowego, a więc obrazu zarejestrowanego przez każdą z kamer, w oparciu o parametry kalibracji wyznaczone w procesie kalibracji oraz ustalone przez użytkownika parametry korelacji obrazu.

Jednym z najważniejszych parametrów korelacji obrazu jest rozmiar facetki. W czasie procesu ewaluacji dostępna jest opcja, która umożliwia wyświetlenie facetki na obrazie próbki wokół punktu zwanego Startpoint. Pozwala to na porównanie przyjętego rozmiaru facetki z rozmiarem wzoru czarnych kropek na powierzchni próbki. Jeżeli kropki są zbyt rzadko rozmieszczone na obszarze facetki albo są zbyt duże, można zwiększyć rozmiar facetki i odwrotnie, jeżeli wzór kropek jest gęsty a czarne kropki są bardzo małe, można zmniejszyć rozmiar facetki. W procesie ewaluacji można ograniczyć interesujący obszar badania poprzez nałożenie na obraz tzw. maski. Maską może przyjmować dowolny kształt oraz musi posiadać jeden wybrany przez użytkownika systemu charakterystyczny punkt położony na obszarze ograniczonym maską.

Proces ewaluacji wykonywany jest przez program Istra 4D dwuetapowo. Pierwszy etap to ewaluacja częściowa zwana Startpoint search, która polega na wskazaniu przez użytkownika systemu charakterystycznych punktów na powierzchni obrazu tzw. Startpoints oraz automatycznym odnajdywaniu przez program tych punktów na kolejnych obrazach serii pomiarowej. Proces korelacji ogranicza się więc na tym etapie tylko do konkretnych punktów badanego obszaru. Drugi etap ewaluacji to ewaluacja pełna, a więc obejmująca wszystkie punkty obrazu (jeżeli na obraz nałożona została maska, proces ewaluacji ograniczy się tylko do punktów znajdujących się w obrębie maski).

Na tym etapie badań trudność może stanowić przede wszystkim dobór odpowiednich punktów startowych Startpoints. Punkty należy wybierać w charakterystycznych miejscach losowego wzoru nieniesionego na próbkę np. obok czarnej kropki wzoru większej niż pozostałe (rys. 2.11).

Nieodnajdywanie przez program punktów startowych w czasie ewaluacji Startpoint search jest najczęściej spowodowane źle ustawioną ostrością obiektywu, niewłaściwie dobranymi parametrami oświetlenia (program nie odnajduje punktów na zbyt ciemnym albo prześwietlonym obrazie) lub umieszczeniem punktów startowych na fragmencie obrazu, w obrębie którego na dalszych zdjęciach serii pomiarowej utracony zostaje losowy wzór naniesiony na powierzchni próbki np. w skutek złuszczenia się farby lub zbyt dużych deformacji próbki. Należy pamiętać, że jeżeli podczas badania próbka zostanie rozerwana, to aby program przeanalizował w procesie ewaluacji obie części próbki, punkty startowe należy umieścić na obu fragmentach badanego obiektu.



Rys. 2.11. Rozmieszczenie punktów Startpoints w charakterystycznych miejscach próbki

Ostatnim etapem wyznaczania wartości przemieszczeń i odkształceń metodą cyfrowej korelacji obrazu 3D z zastosowaniem systemu Q-450 jest wizualizacja wyników badania, a więc przedstawienie pomierzonych wielkości w postaci kolorowych map przemieszczeń i odkształceń dla badanego obiektu. Wizualizacja wyników pomiarów w programie Istra 4D może odbywać się na płaszczyźnie oraz w przestrzeni trójwymiarowej. Program Istra 4D pozwala na wyznaczenie konturu przestrzennego badanego obiektu, oblicza dla każdego przeewaluowanego punktu próbki przemieszczenia w kierunku osi x, y, z, przemieszczenie całkowite, wartości odchyłeń standardowych dla poszczególnych przemieszczeń, odkształcenia styczne w kierunku osi x i y, odkształcenie ścinające, odkształcenia na kierunkach głównych oraz wartości odchyłeń standardowych dla poszczególnych odkształceń.

Istotną kwestią na etapie wizualizacji jest dobór układu współrzędnych, w odniesieniu do którego będą obliczane wartości przemieszczeń i odkształceń. Należy pamiętać, że za wstępny układ program przyjmuje układ zdefiniowany na podstawie pierwszego zdjęcia tablicy kalibracyjnej w procesie kalibracji. Domyślny układ współrzędnych można jednak zmieniać. Program Istra 4D daje możliwość definiowania własnego układu współrzędnych dwoma metodami: metodą dwóch punktów (jeden z zadanych punktów określa początek układu współrzędnych, drugi kierunek osi x) oraz poprzez transformację bieżącego układu współrzędnych. Oprócz określenia układu współrzędnych najistotniejszą rzeczą podczas wizualizacji danych jest wybór obrazu referencyjnego. Należy pamiętać, że wszystkie wartości przemieszczeń i odkształceń dla pozostałych obrazów w serii pomiarowej są obliczane w odniesieniu do wartości uzyskanych dla zdjęcia referencyjnego. Program daje również możliwość definiowania punktów, linii i obszarów o różnym kształcie na analizowanej powierzchni badanego obiektu, dla których można uzyskać

dodatkowe informacje np. dla punktu można wyznaczyć wykresy przedstawiające zależność wartości przemieszczeń czy odkształceń od czasu.

4. ZALETY, OGRANICZENIA I ZASTOSOWANIE SYSTEMU 3D-DIC

System cyfrowej korelacji obrazu 3D w stosunku do innych metod badawczych daje dodatkowe możliwości pomiarowe, ale także jak każda metoda pomiarowa posiada pewne ograniczenia. Najistotniejsze z nich wraz z zakresem ważniejszych zastosowań systemu przedstawiono w tabeli 3.1.

Tabela. 3.1. Ograniczenia systemu DIC

System cyfrowej korelacji obrazu 3D		
Zalety systemu	Ograniczenia systemu	Zastosowanie systemu
Pomiar bezkontaktowy	Konieczność przygotowania powierzchni próbki metodą natryskiwania	Określenie dokładnego kształtu badanego obiektu
Możliwość pomiaru w warunkach laboratoryjnych i polowych	Ustawienie odpowiedniego parametrów oświetlenia, szczególnie przy pomiarach z bardzo dużą częstotliwością rejestracji zdjęć	Badanie komponentów i materiałów w zakresie przemieszczeń i odkształceń
Pomiar przemieszczeń i odkształceń na płaszczyźnie lub w przestrzeni trójwymiarowej	Wysoka intensywność obliczeń, długi czas oczekiwania na końcowe wyniki badań	Wyznaczanie współczynnika Poissona i modułu Younga badanego materiału
Możliwość badania próbek o dowolnym kształcie i wykonanych z dowolnego materiału	Archiwizowanie zarejestrowanych obrazów i uzyskanych wyników badań wymaga dużych nośników pamięci	Wykrywanie pęknięć, rys
Badana powierzchnia próbki nie musi być płaska	Czasochłonne przegrywanie danych na nośniki pamięci	Pomiar drgań i analiza modalna
Pomiar przemieszczeń we wszystkich kierunkach (wzdłuż osi x y z w dowolnym układzie współrzędnych)	Konieczność posiadania tablic kalibracyjnych odpowiedniej do wielkości badanego obszaru próbki	Walidacja modeli numerycznych MES
Pomiar odkształceń we wszystkich kierunkach (wzdłuż osi x y z w dowolnym układzie współrzędnych)		
Uzyskanie powierzchniowych obrazów przemieszczeń i odkształceń		
Możliwość pomiaru próbek różnej wielkości od mikropróbek badanych z użyciem mikroskopu do obiektów wielkogabarytowych np. fragmentów mostu		
Zmiana temperatury powierzchni badanej próbki nie wpływa na sprzęt pomiarowy		

W tabeli 3.2 przeprowadzono analizę porównawczą metody cyfrowej korelacji obrazu 3D oraz tradycyjnej metody pomiarowej z wykorzystaniem tensometrów.

Tabela 3.2. Porównanie DIC i tensometrii oporowej

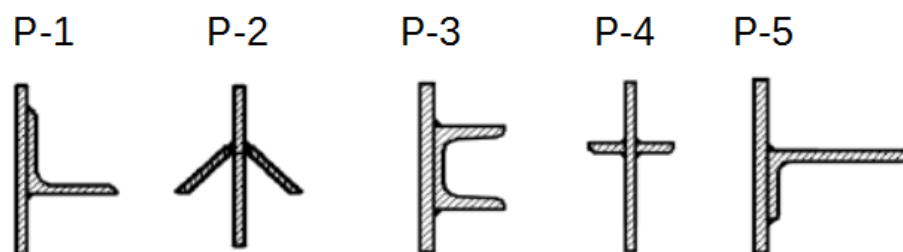
System cyfrowej korelacji obrazu 3D	Tensometry
Pomiar bezkontaktowy	Pomiar kontaktowy
Brak wpływu zmiany temperatury powierzchni badanej próbki na sprzęt pomiarowy	Wpływ temperatury powierzchni badanej próbki na sprzęt pomiarowy
Dokładne oczyszczenie badanej powierzchni próbki	Dokładne oczyszczenie badanej powierzchni próbki
Szybkie przygotowanie na powierzchni próbki losowego wzoru czarnych kropek na białym tle przez natryskiwanie farby	Czasochłonny proces umieszczania na powierzchni próbki tensometru (klejenie, lutowanie, łączenie)
Nieograniczona liczba pomiarów z wykorzystaniem systemu DIC	Tensometr może być użyty jednorazowo
Możliwość pomiaru przemieszczeń i odkształceń na płaszczyźnie lub w przestrzeni trójwymiarowej, we wszystkich kierunkach (wzdłuż osi x y z w dowolnym układzie współrzędnych)	Pomiar odkształceń tylko w wybranym kierunku
Chropowatość powierzchni nie ogranicza możliwości pomiarowych	Powierzchnia, na którą naklejany jest tensometr, musi być płaska
Uzyskanie powierzchniowych obrazów przemieszczeń i odkształceń	Uzyskanie wyników w wybranych punktach próbki tj. tylko w punktach, w których przymocowane zostały czujniki pomiarowe
Pomiar może być wykonywany zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych	Pomiar tylko w warunkach laboratoryjnych
Możliwość pomiaru rzeczywistych maksymalnych przemieszczeń i odkształceń	Pomiar ograniczony przez graniczne odkształcenie tensometru

5. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA METODY 3D-DIC DO REJESTRACJI I ANALIZY PÓŁ PRZEMIESZCZEŃ I ODKSZTAŁCEŃ POŁĄCZEŃ SPAWANYCH I PRĘTÓW ROZCIĄGANÝCH Z MIMOŚRODEM

5.1. Cel badania i opis próbek przygotowanych do badania

Badania zostały wykonane w Wydziałowym Laboratorium Badań Konstrukcji Politechniki Rzeszowskiej przez pracowników Zakładu Mechaniki Konstrukcji Politechniki Rzeszowskiej w ramach pracy dyplomowej realizowanej w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Rzeszowskiej. Celem badania był pomiar przemieszczeń i odkształceń połączeń spawanych i prętów rozciąganych z mimośrodem za pomocą systemu 3D-DIC. Wyniki badań zastosowano do analizy i oceny wpływu mimośrodowego na nośność połączeń spawanych i prętów poddanych obciążeniu rozciągającemu pod kątem bezpieczeństwa węzłów stalowych konstrukcji kratownicowych i do oszacowania, dla których typów przekrojów kształtowników należy w projektowaniu uwzględniać dodatkowy moment zginający. Obszar badania przemieszczeń i odkształceń systemem cyfrowej korelacji obrazu Q-450 firmy Dantec Dynamics został ograniczony do fragmentu połączenia blachy węzłowej z kształtownikiem.

Do badania przygotowano pięć różnych próbek. Każda z próbek składała się ze stalowego walcowanego kształownika o przekroju otwartym przyspawanego do dwóch blach stalowych, które odpowiadały blachom węzłowym (przygotowane próbki imitowały krzyżulce w układzie kratownicowym). Do przygotowania próbek wykorzystano kształtowniki o następujących przekrojach: kątownik równoramienny, ceownik, teownik oraz kątownik nierównoramienny. Próbka P1 składała się z pręta o przekroju kątownika równoramiennego L50x5 długości 1 m połączonego za pomocą spoin na jedno ramię z dwoma blachami grubości 6 mm. Całkowita długość próbki wynosiła 1270 mm. Próbka P2 składała się z pręta o przekroju kątownika równoramiennego L50x5 długości 1 m ustawionego w pozycji daszkowej i połączonego za pomocą spoin na tzw. „wielec” z dwoma blachami grubości 6 mm. Całkowita długość próbki wynosiła 1340 mm. Trzecią próbką dla której wykonane zostały badania była próbka P-3 składająca się z pręta o przekroju ceownika UPN 50 długości 1 m połączonego za pomocą spoin z dwoma blachami grubości 8 mm. Całkowita długość próbki wynosiła 1260 mm. Próbka P-4 składała się z pręta o przekroju teownika T50x6 długości 1 m połączonego za pomocą spoin z dwoma blachami grubości 6 mm. Całkowita długość próbki wynosiła 1410 mm. Ostatnią próbką dla której wykonane zostały badania była próbka P-5 składająca się z pręta o przekroju kątownika nierównoramiennego L80x40x6 długości 1 m połączonego za pomocą spoin na jedno ramię z dwoma blachami grubości 8 mm. Całkowita długość próbki wynosiła 1260 mm. Na rysunku 4.1 przedstawiono przekroje poprzeczne przygotowanych do badań próbek. Blachy miały stałe wymiary 250 mm x 100 mm. Połączenie kształtowników z blachami wykonane zostało jako spawane. Do wykonania spoiny użyte zostały elektrody BASOWELD 50-EVB50/E7018 grubości 2,5 mm. Próbki zostały wykonane w ramach pracy dyplomowej realizowanej w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Rzeszowskiej.



Rys. 4.1. Przekroje poprzeczne próbek

Wyniki przedstawione w niniejszym artykule zostaną zawężone do wyników uzyskanych z badań próbki oznaczonej symbolem P-5.

5.2. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe do badań laboratoryjnych składało się z maszyny wytrzymałościowej firmy INSTRON o numerze seryjnym 1200KN-J1D oraz z systemu cyfrowej korelacji obrazu 3D Q-450 firmy Dantec Dynamics. System ten obejmował następujące elementy: dwie kamery cyfrowe, stację wyzwalająco-sterującą Timing Hub, przenośny komputer z oprogramowaniem ISTR 4D i koncentrator sieciowy Gigabit Ethernet Hub. W badaniu wykorzystano dwie kamery cyfrowe Phantom v341 o numerach seryjnych 14883 oraz 14884, zamocowane na oddzielnych statywach oraz obiektywy z ogniskową 50 mm. Do kalibracji zastosowano tablicę kalibracyjną o wymiarach 21 cm x 30 cm z oznaczeniem AI_15_BMB_9x9. Podczas pomiarów nie zastosowano

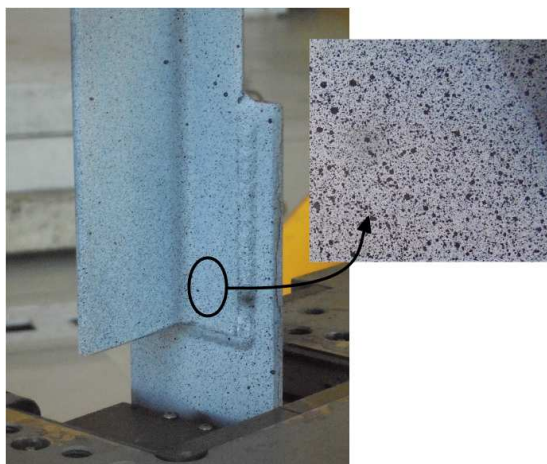
dodatkowego sztucznego oświetlenia, oświetlenie dzienne było stabilne (pochmurny dzień bez słońca) i wystarczające dla zapewnienia odpowiednich warunków oświetleniowych. Stanowisko laboratoryjne do badań z zastosowaniem systemu 3D-DIC przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Stanowisko pomiarowe przemieszczeń i odkształceń połączeń spawanych i prętów rozciąganych z mimośrodem za pomocą systemu Q-450 Dantec Dynamics

5.3. Przygotowanie próbek do badania systemem Q-450

Pierwszym etapem przygotowania próbek do badania było dokładne oczyszczenie ich powierzchni w obrębie badanego obszaru połączenia spawanego. Następnie za pomocą sprayu naniesiono na próbkę cienką warstwę białej farby, tworząc w ten sposób białe kontrastowe matowe tło dla czarnych punktów, które zostały naniesione na próbkę za pomocą sprayu w ostatnim etapie przygotowania próbki do badania. Na powierzchni próbki powstał w ten sposób losowy wzór czarnych kropek na białym tle. Wielkość i zagęszczenie kropek zostało dostosowane do wielkości tablicy kalibracyjnej zastosowanej w badaniu, co odpowiadało z kolei wielkości badanego obszaru. Przykładową próbkę do badania przedstawiono na rysunku 4.3.



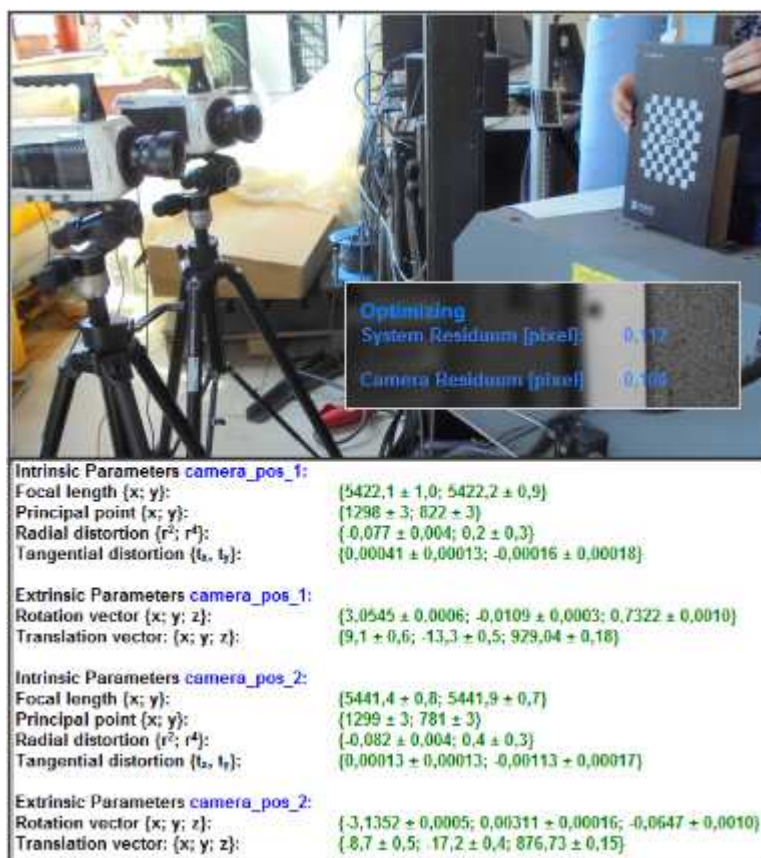
Rys. 4.3. Próbkę przygotowana do badania metodą cyfrowej korelacji obrazu Q-450

5.4. Przeprowadzenie pomiarów

Tu zmień styl
akapitu

Pomiar przemieszczeń i odkształceń połączeń spawanych i prętów rozciąganych za pomocą

systemu cyfrowej korelacji obrazu Q-450 przeprowadzono na pięciu próbkach podczas procesu rozciągania próbek ze stałą prędkością w maszynie wytrzymałościowej. Wartość zadanego podczas badania przemieszczenia ramy maszyny wytrzymałościowej w jednostce czasu wynosiła 2,0 mm/minutę. Rejestracja obrazów systemem cyfrowej korelacji obrazu przeprowadzona została w sposób ciągły z wykorzystaniem bufora kamer. Ze względu na długi proces badania i powolny proces rozciągania częstotliwość rejestracji obrazów dla pierwszej badanej próbki P-1 przyjęto równą 2 Hz (2 klatki/sekundę). Na podstawie pierwszego pomiaru ustalono optymalną częstotliwość rejestracji obrazów dla pozostałych próbek równą 1 Hz. Całkowita liczba zarejestrowanych podczas badania obrazów zależna była od rodzaju próbki i długości procesu rozciągania. Dla próbki P1 zarejestrowano 12 000 klatek z częstotliwością 2 Hz, a więc proces rejestracji przebiegał przez okres 2 godzin. Dla pozostałych próbek całkowita liczba zarejestrowanych zdjęć wahała się w granicach od 3600 do 6000 klatek, co przy częstotliwości 1 Hz odpowiadało długości pomiaru od 1 godziny do 2 godzin. Przed każdym pomiarem wykonana została kalibracja systemu. Podczas kalibracji rejestrowano 8 zdjęć tablicy kalibracyjnej AI_15_BMB_9x9, na podstawie których obliczone zostały wartości parametrów kalibracji (rys. 4.4). Zarejestrowane podczas badań obrazy przeanalizowane zostały w programie Istra 4D.



Rys. 4.4. Wartości residuum oraz parametrów kalibracji uzyskane w procesie kalibracji dla próbki P-5

5.5. Przykładowe wyniki badań połączeń spawanych i prętów rozciąganych z mimośrodem przeprowadzonych z zastosowaniem systemu Q-450

Poniżej przedstawiono wyniki badań uzyskane z analizy w programie Istra 4D obrazów serii pomiarowej zarejestrowanej systemem cyfrowej korelacji obrazów Q-450 firmy Dantec Dynamics

podczas rozciągania próbki P-5 w maszynie wytrzymałościowej (próbka z kształtownikiem o przekroju kątownika nierównoramiennego L80x40x6 połączonego mniejszym ramieniem z blachą). Rejestracja obrazów trwała 3600 s i wykonywana była z częstotliwością 1 Hz, w związku całkowita liczba zarejestrowanych obrazów w serii pomiarowej wyniosła 3600. W 2320 sekundzie pomiaru nastąpiło ostateczne zniszczenie próbki. Maksymalne wartości odkształceń próbka uzyskała w 2318 sekundzie badania.

Podczas badania próbka uległa wygięciu (rys. 4.5). Zginanie wystąpiło w okolicy połączenia kątownika z blachą, natomiast środkowa część próbki poddana została przemieszczeniu poziomemu. Wygięcie blachy oraz kątownika w okolicach połączenia z blachą można było zaobserwować w początkowej fazie rozciągania. Proces zginania elementów próbki trwał do momentu, w którym kątownik osiągnął takie położenie względem szczęk maszyny wytrzymałościowej, które pozwoliło na przekazywanie osiowej siły rozciągającej na kątownik (oś podłużna kątownika pokryła się z prostą działania siły rozciągającej). Takie zachowanie próbki wskazuje na występowanie mimośrodów w połączeniu, którego oddziaływanie zostało zniwelowane w czasie badania przez wygięcie próbki.



Rys. 4.5. Wygięcie próbki P-5 w czasie rozciągania w maszynie wytrzymałościowej

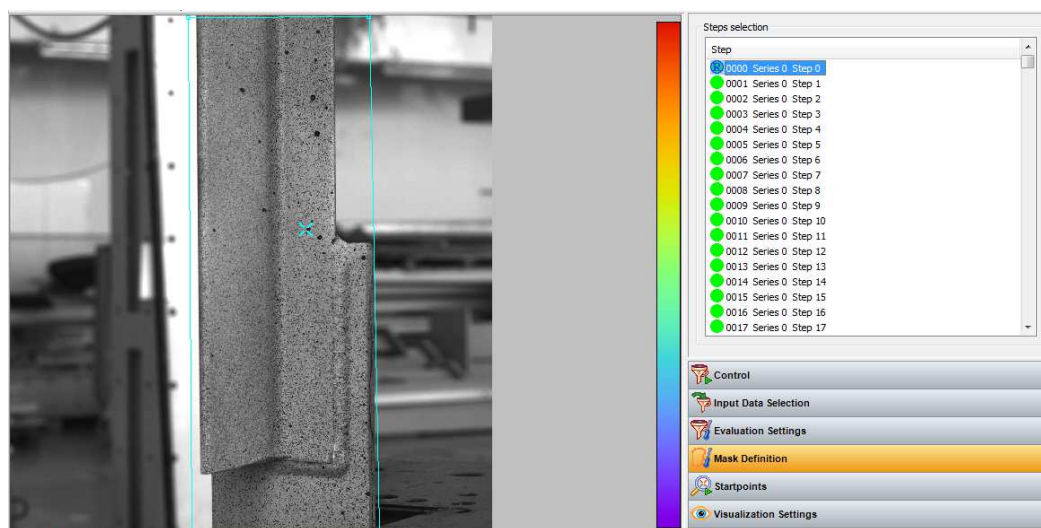
Zniszczenie próbki wystąpiło w przekroju kątownika w pobliżu połączenia kształtownika z blachą (rys. 4.6). Inicjacja zniszczenia zaobserwowana została w narożu kątownika. Taka forma zniszczenia była wynikiem oddziaływania momentu zginającego wynikającego z występowania mimośrodu w połączeniu. Wpływ na zniszczenie próbki w tym miejscu mógł mieć również proces spawania, który mógł wpłynąć na zmianę parametrów wytrzymałościowych materiału kątownika.



Rys. 4.6. Miejsce i forma zniszczenia próbki P-5

Wstępna analiza wynikająca z obserwacji próbki oraz analiza danych uzyskanych z pomiaru za pomocą ekstensometru i tensometrów, nie dają jednak szczegółowej informacji o deformacji powierzchni próbki. Taką analizę umożliwia natomiast badanie wykonane za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazu 3D Q-450. System ten daje możliwość dokładnej analizy pól przemieszczeń i odkształceń badanej próbki. Dla próbki P-5, przy częstotliwości rejestracji obrazów 1 Hz, uzyskano mapy przemieszczeń i odkształceń w każdej sekundzie badania. Dzięki temu można szczegółowo zaobserwować zmiany jakie następowały w próbce w czasie zwiększania obciążenia, jak również bardzo dokładnie prześledzić inicjację i moment zniszczenia próbki.

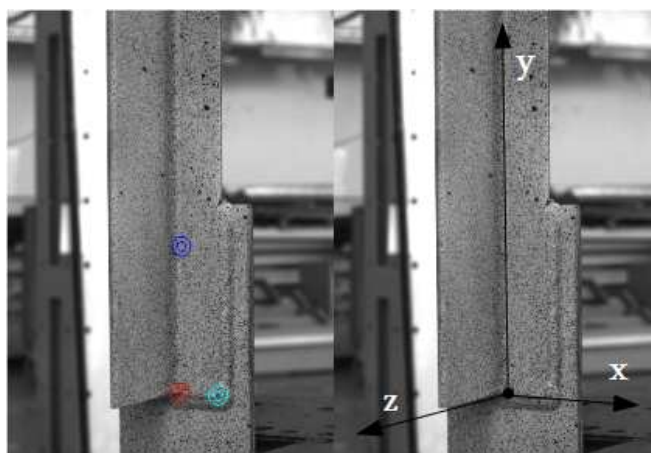
Należy wspomnieć, że na etapie ewaluacji danych w programie Istra 4D nałożono na badany obszar maskę, ograniczając w ten sposób interesujący nas obszar analizy, a więc obserwowane



Rys. 4.7. Maska nałożona w programie Istra 4D na badany fragment próbki P-5

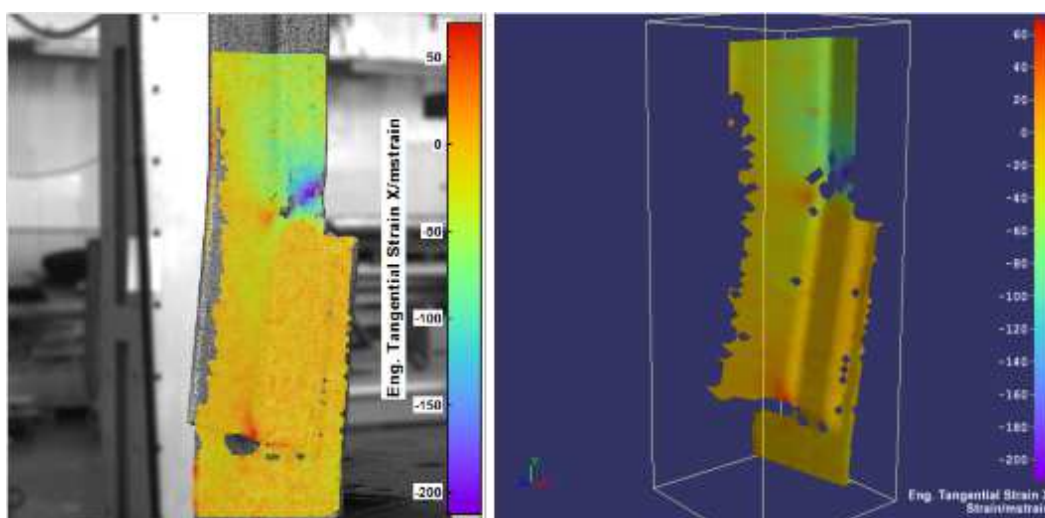
w czasie badania połączenie blachy stalowej z kształtownikiem (rys. 4.7). Dla wybranego obszaru próbki w programie Istra 4D uzyskano mapy przemieszczeń i odkształceń, wybrane z nich zaprezentowano w artykule.

Na rysunku 4.8 przedstawiono przyjęty w programie Istra 4D układ współrzędnych, w którym odczytano wyniki badań. Układ ten został zdefiniowany przy użyciu metody dwóch punktów. Pierwszy zadany punkt (czerwony) określa początek układu współrzędnych, drugi zdefiniowany punkt (jasnoniebieski) określa kierunek osi x. W celu określenia kierunku osi z wskazano w programie trzeci dodatkowy punkt (ciemnoniebieski), który wraz z dwoma pozostałymi punktami określa płaszczyznę xy. W ten sposób wyznaczone zostało położenie osi z w kierunku prostopadłym do powierzchni xy.

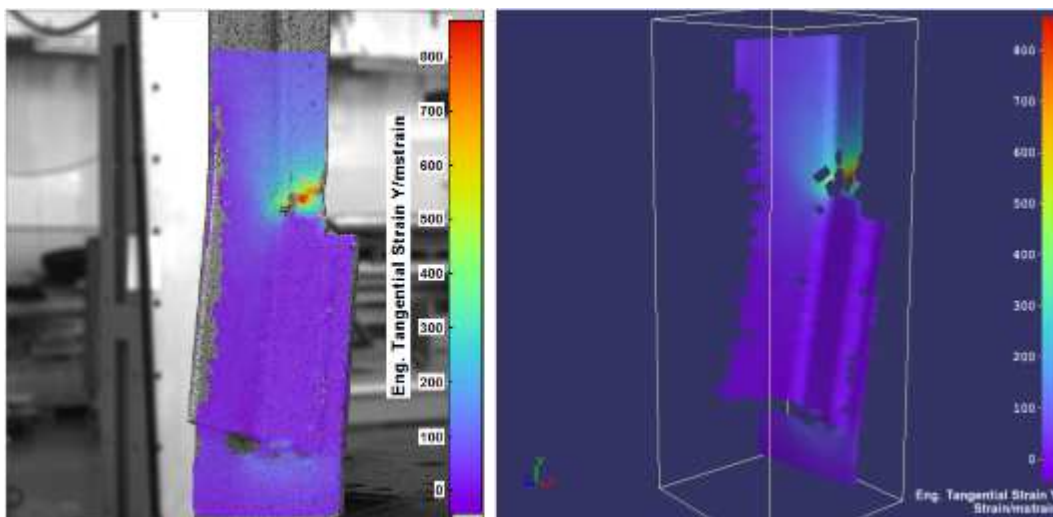


Rys. 4.8. Układ współrzędnych przyjęty dla próbki P-5 do analizy wyników w programie Istra 4D

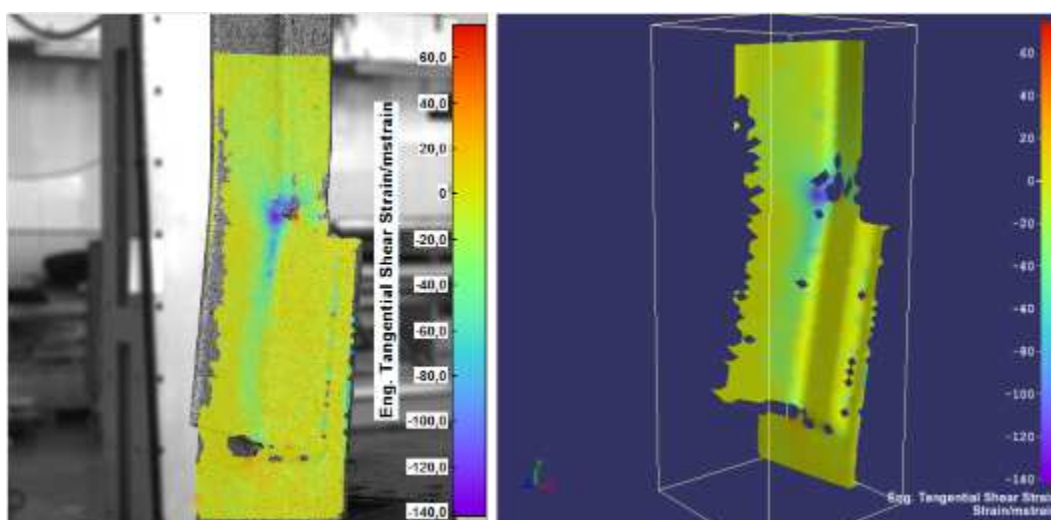
Na rysunkach 4.9 – 4.11 przedstawiono mapy odkształceń dla próbki P-5 w chwili $t = 2318$ s, a więc w chwili uzyskania przez próbkę maksymalnych wartości odkształceń. Mapy zostały zaprezentowane w układzie płaskim oraz w przestrzeni trójwymiarowej. Na rysunku 4.9 pokazano mapy odkształcenia stycznego x, rysunek 4.10 przedstawia mapy odkształcenia stycznego y, natomiast na rysunku 4.11 zaprezentowano mapy odkształcenia ścinającego.



Rys. 4.9. Mapy odkształcenia stycznego x dla próbki P-5 w chwili $t = 2318$ s

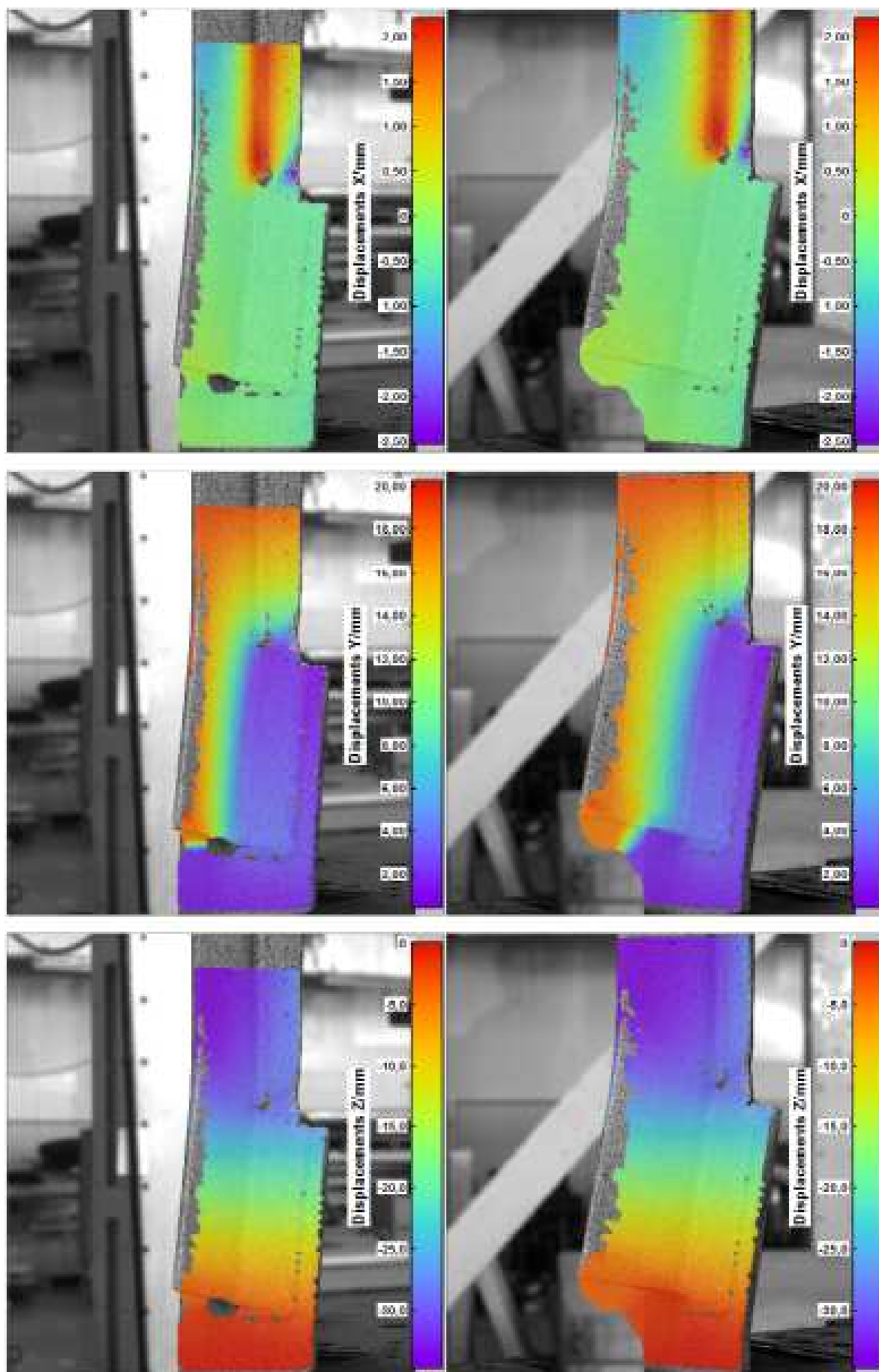


Rys. 4.10. Mapy odkształcenia stycznego y dla próbki P-5 w chwili $t = 2318$ s



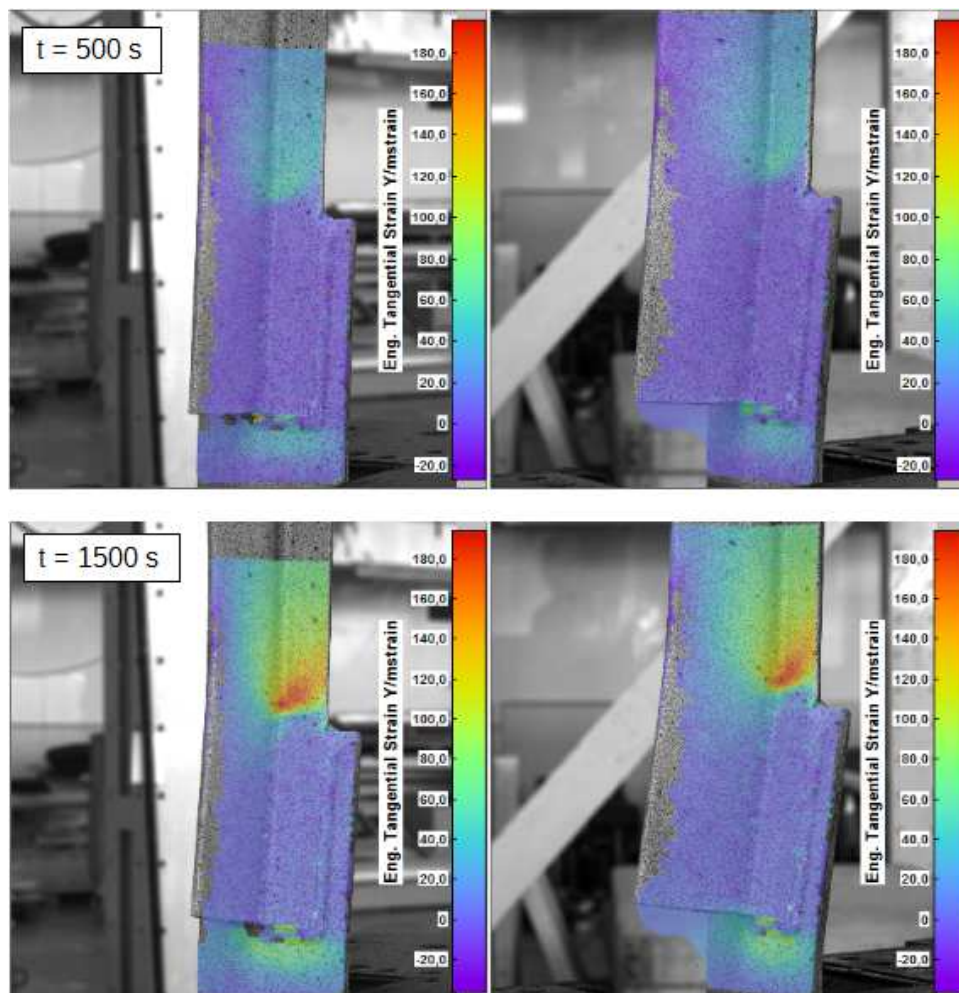
Rys. 4.11. Mapy odkształcenia ścinającego dla próbki P-5 w chwili $t = 2318$ s

Kolejne uzyskane z badań wyniki przedstawiono na rysunku 4.12. Są to mapy przemieszczeń na kierunkach x, y, z w chwili $t = 2318$ s. Na podstawie tych map można określić dokładne przemieszczenia x, y, z każdego punktu analizowanej powierzchni próbki.



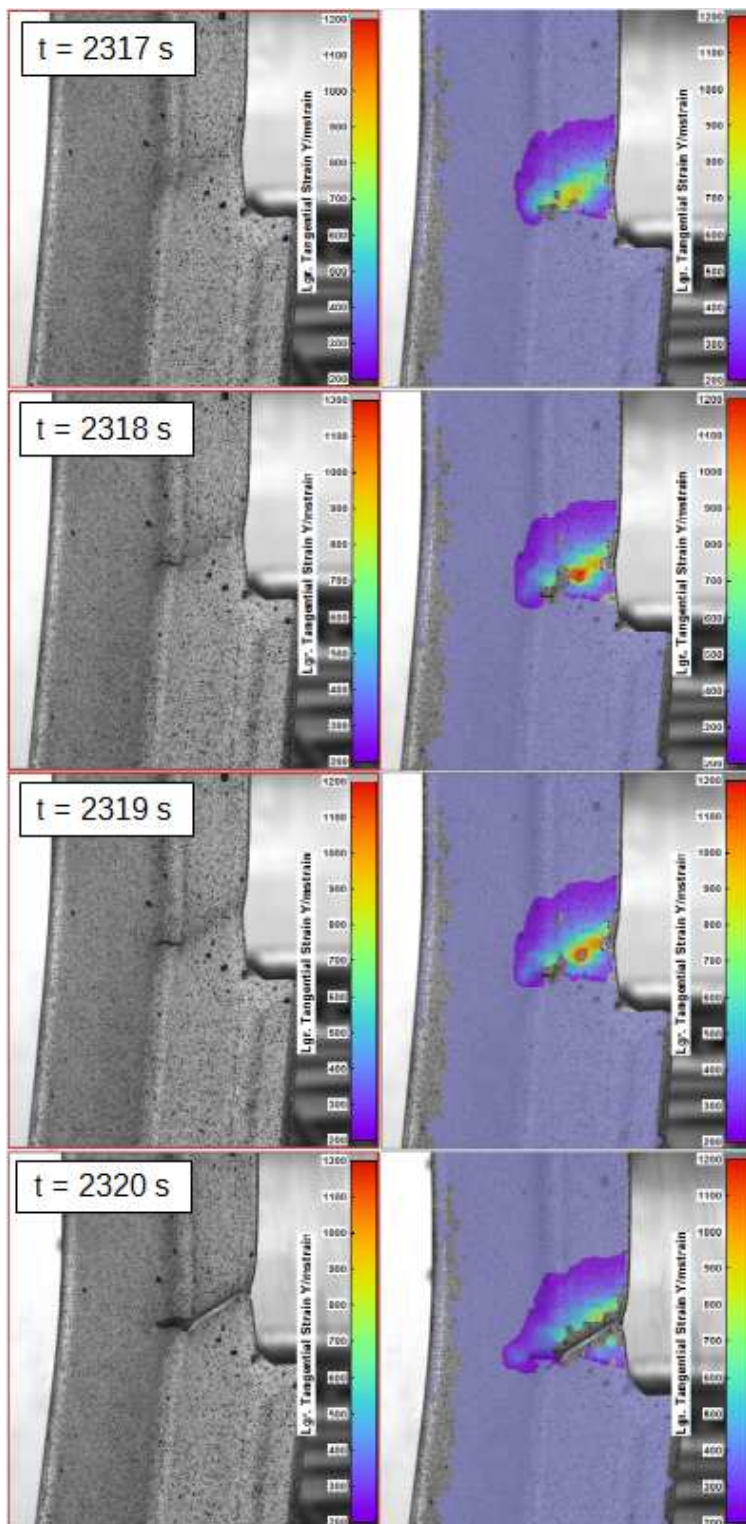
Rys. 4.12. Mapy przemieszczeń x, y, z dla próbki P-5 w chwili $t = 2318$ s

Analizując pola przemieszczeń i odkształceń próbki można zaobserwować inicjację zniszczenia próbki. Obserwując zmieniające się w czasie pola odkształceń stycznych y próbki można zauważyć miejsca koncentracji odkształceń. Miejscami tymi są obszary w okolicy spoiny poprzecznej oraz krótsze ramie kątownika powyżej połączenia z blachą w narożu kątownika, co widać na mapach odkształceń na rysunku 4.13.



Rys. 4.13. Inicjacja zniszczenia próbki P-5

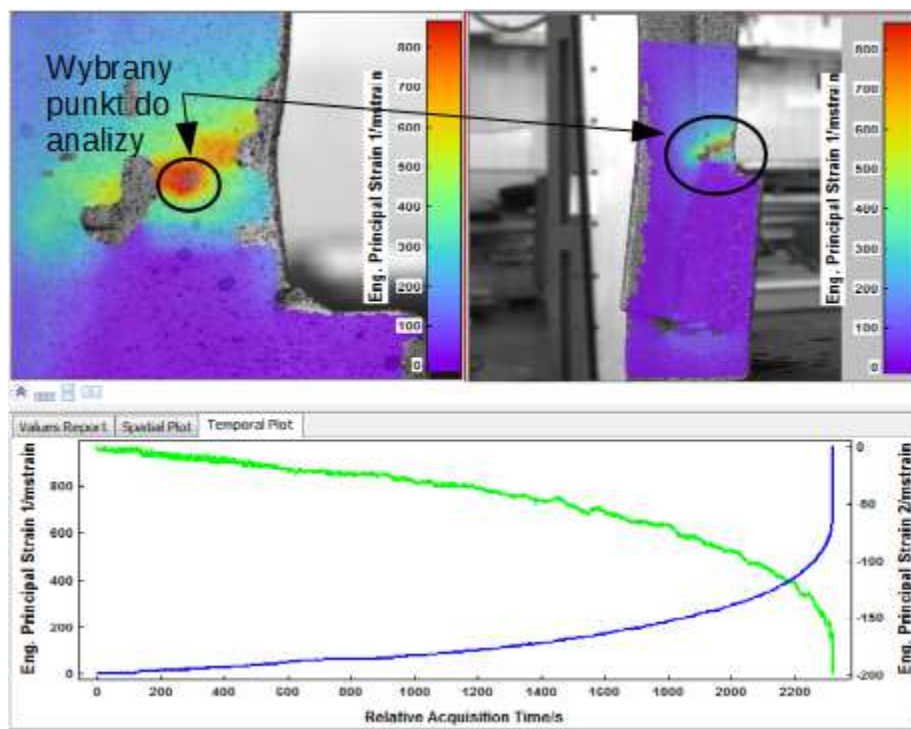
Badanie wykonane systemem cyfrowej korelacji obrazu umożliwia szczegółową obserwację rozwijającego się uszkodzenia oraz zmianę pola odkształceń w obrębie uszkodzenia. Na rysunku 4.14 przedstawiono zarejestrowane obrazy próbki oraz zmieniające się wraz z czasem mapy odkształceń stycznych y przed pojawieniem się pęknięcia (w chwili badania $t = 2317$ s), w momencie pojawienia się pęknięcia (w chwili badania $t = 2318$ s) i jego rozwoju (w chwili badania $t = 2319$ s) oraz w momencie zniszczenia (w chwili badania $t = 2320$ s). Na podstawie zarejestrowanych obrazów można określić dokładne miejsce inicjacji pęknięcia oraz dokładne wartości odkształceń w tym miejscu. Pęknięcie pojawiło się w narożniku kątownika i rozwijało się w kierunku mniejszego ramienia kątownika nierównoramiennego przyspawanego do blachy. Taka forma zniszczenia była skutkiem oddziaływania momentu zginającego wynikającego z występowania mimośrodów w połączeniu.



Rys. 4.14. Rozwijające się uszkodzenie próbki P-5

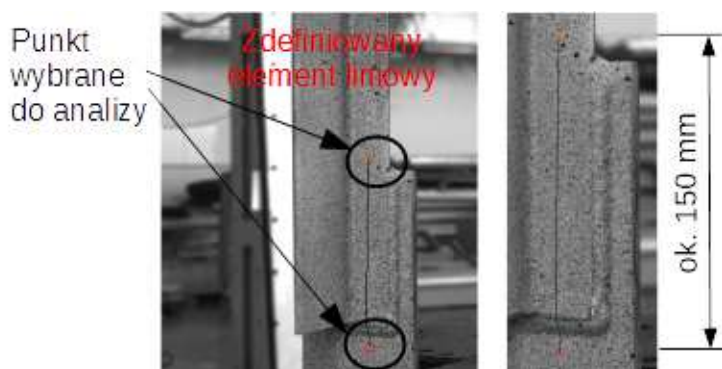
Program Istra 4D daje możliwość odczytania wyników dla wybranych punktów próbki, zdefiniowanych prostych czy też wybranych obszarów o dowolnej wielkości i dowolnym kształcie w obrębie badanego metodą cyfrowej korelacji obszaru próbki. Narzędziami tymi posłużono się do wyznaczenia wykresów odkształcenia i przemieszczenia w punkcie, w pobliżu którego nastąpiło zniszczenie próbki, do określenia zmiany odległości między dwoma punktami próbki, z których jeden znajdował się na blasze, a drugi na kształtowniku oraz do znalezienia maksymalnej wartości odkształcenia na obszarze otaczającym miejsce zniszczenia próbki.

Jako pierwszy analizie poddany został punkt zlokalizowany na powierzchni próbki P-5 w pobliżu miejsca zniszczenia. Na rysunku 4.15 pokazano wybrany punkt do analizy oraz uzyskany w programie Istra 4D wykres odkształceń na kierunkach głównych dla tego punktu w czasie.

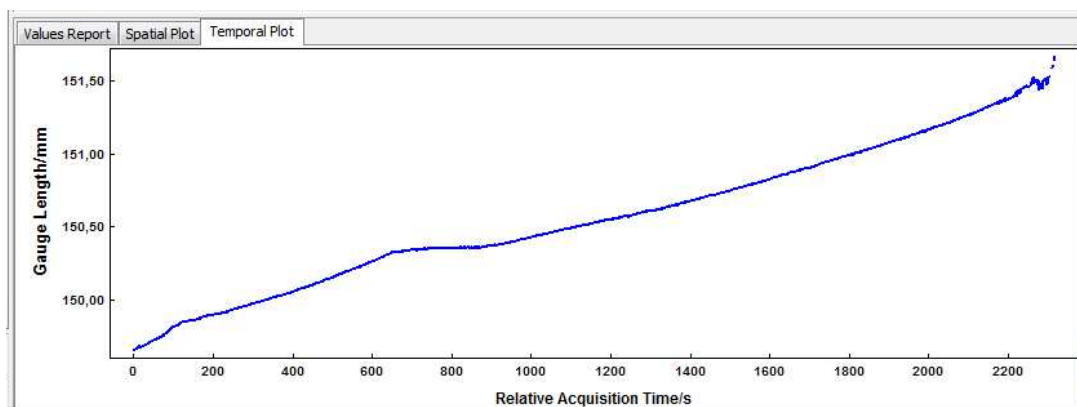


Rys. 4.15. Wykres odkształceń na kierunkach głównych dla wybranego punktu próbki P-5

Następnie przeanalizowano zależności pomiędzy dwoma wybranymi punktami próbki, definiując w programie Istra 4D element liniowy łączący te punkty (o długości około 150 mm) (rys. 4.16). Jeden punkt umiejscowiono na blasze w pobliżu spoiny poprzecznej zlokalizowanej od strony szczęk maszyny wytrzymałościowej łączącej blachę z kątownikiem, drugi punkt wskazano na krótszym ramieniu kształtownika powyżej połączenia blachy z kątownikiem w okolicy drugiej spoiny poprzecznej. Położenie punktów przedstawiono na rysunku. Rysunek 4.17 przedstawia wykres zmiany odległości między dwoma wybranymi punktami próbki P-5 w czasie.

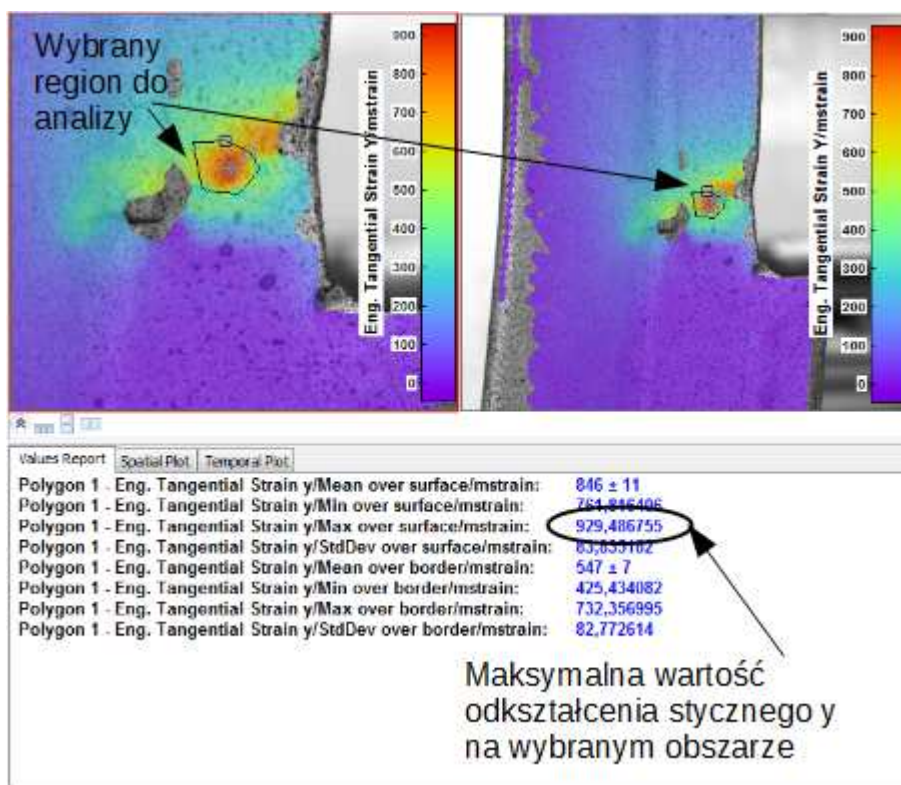


Rys. 4.16. Element liniowy zdefiniowany w programie Istra 4D



Rys. 4.17. Wykres zmiany odległości między dwoma punktami próbki P-5 w czasie badania

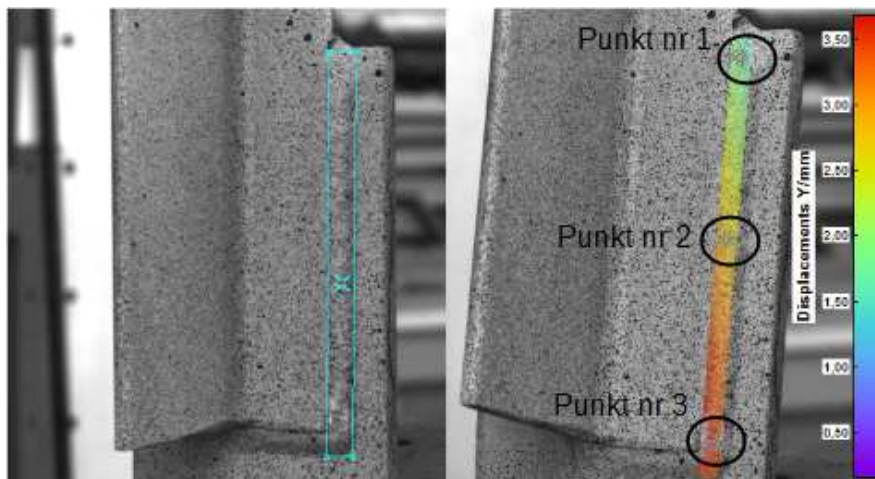
Kolejno w celu wyznaczenia maksymalnej wartości odkształcenia w okolicy zniszczenia próbki zdefiniowano w programie Istra 4D region. Wartości odkształcenia stycznego γ odczytane z programu dla wyznaczonego regionu oraz zakres zdefiniowanego obszaru przedstawiono na rysunku 4.18.



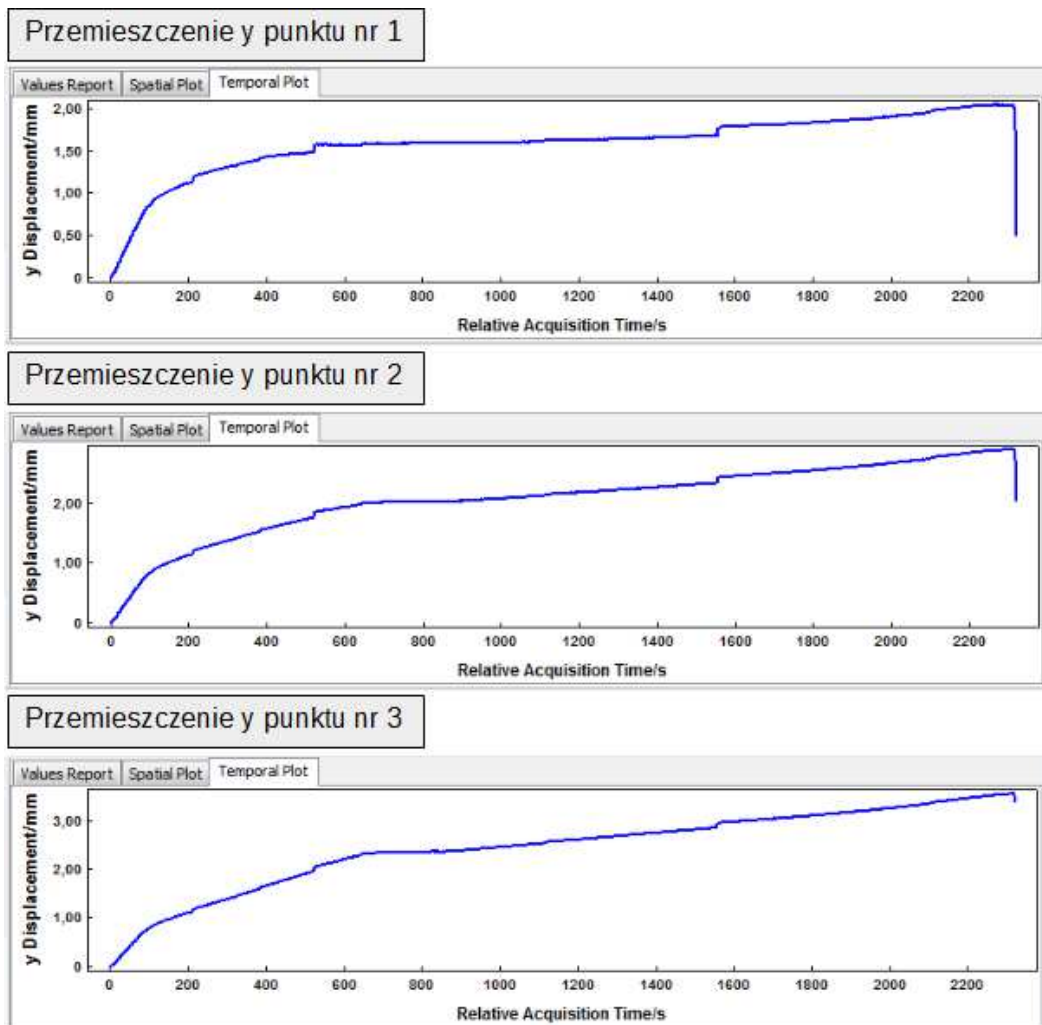
Rys. 4.18. Wartości odkształcenia stycznego γ dla wybranego regionu

Analizę pól przemieszczeń i odkształceń można zawęzić do interesującego nas obszaru próbki poprzez zmianę aktualnej maski lub nałożenie nowej maski na obraz próbki na etapie ewaluacji serii pomiarowej w programie Istra 4D. Przykładowo można w ten sposób analizować obszar samej spoiny. Na rysunku 4.19 przedstawiono maskę nałożoną na obraz próbki P-5 oraz mapę przemieszczeń w kierunku osi y dla spoiny podłużnej próbki P-5. Na kolejnym rysunku 4.20 pokazano wykresy przemieszczeń w kierunku osi y dla trzech wybranych punktów spoiny: punktu nr 1 znajdującego się w pobliżu końca blachy od strony kątownika, punktu nr 2 – punktu środkowego spoiny oraz punktu nr 3 znajdującego się w pobliżu końca kątownika od strony szczęk

maszyny wytrzymałościowej.

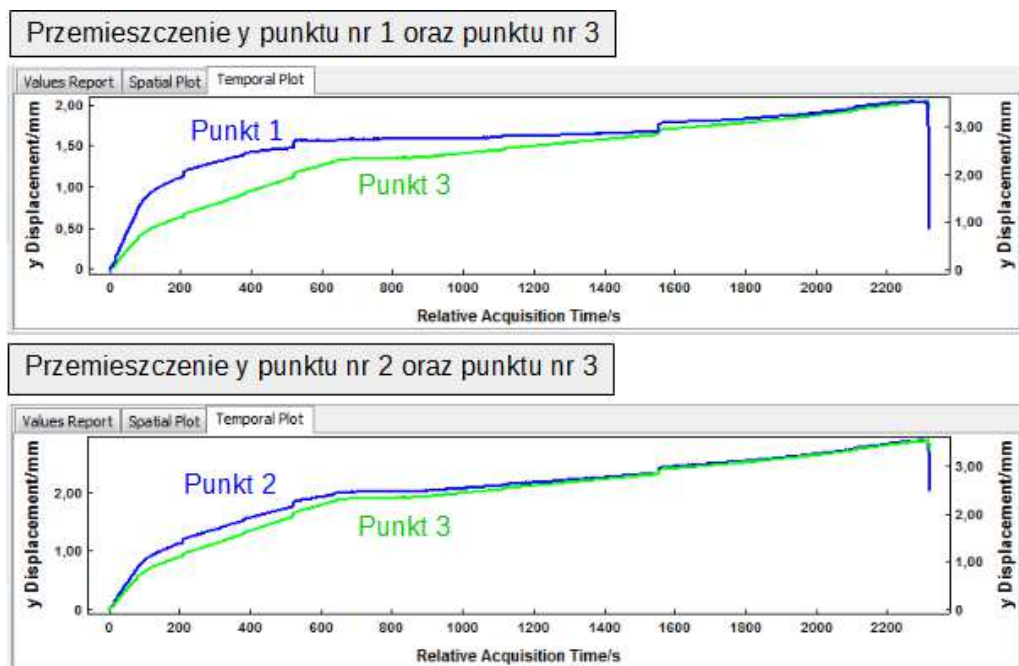


Rys. 4.19. Maska nałożona na obraz próbki P-5 oraz pole przemieszczeń y dla ograniczonego maską obszaru próbki tj. spoiny podłużnej



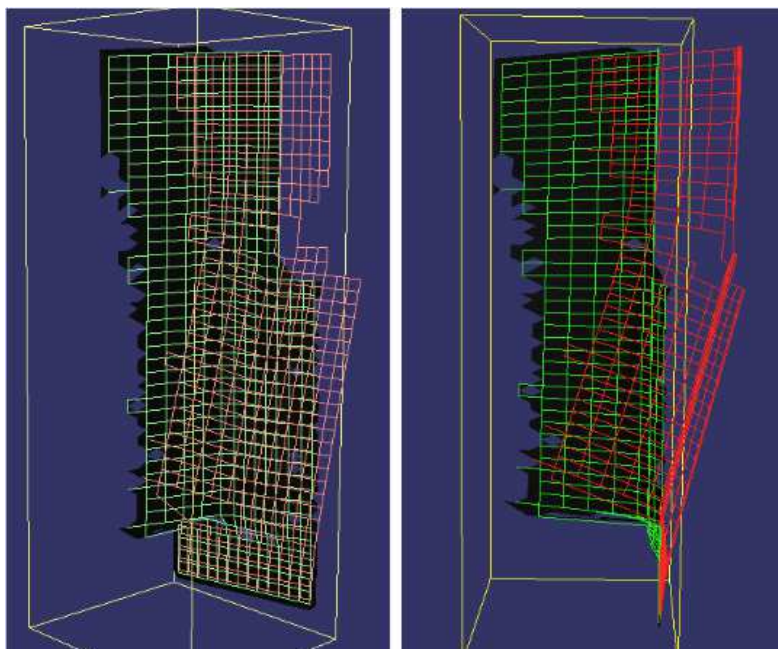
Rys. 4.20. Wykresy przemieszczeń y dla trzech wybranych punktów spoiny podłużnej próbki P-5

W programie Istra 4D porównano także wykresy przemieszczeń wybranych punktów spoiny (rys. 4.21).



Rys. 4.21. Porównanie wykresów przemieszczeń w kierunku osi y wybranych punktów spoiny

Oprogramowanie systemu cyfrowej korelacji obrazu Q-450 daje również możliwość przedstawienia deformacji badanego obiektu w przestrzeni trójwymiarowej. Na rysunku 4.22 pokazano zdeformowany obszar próbki P-5 (w zakresie ograniczonym przez nałożoną na obraz próbki maskę podczas ewaluacji danych w programie Istra 4D). Zielona siatka nałożona na obiekt obrazuje stan próbki przed deformacją, czerwona siatka pokazuje postać zdeformowaną próbki.



Rys. 4.22. Deformacja próbki P-5 w 3D

6. PODSUMOWANIE

Systemy wizyjne są coraz chętniej stosowane do badań przemieszczeń i odkształceń próbek. System cyfrowej korelacji obrazu daje nowe możliwości badawcze w zakresie pomiaru

przemieszczeń i odkształceń w stosunku do tradycyjnych metod badawczych. Metoda DIC pozwala na szczegółową analizę mierzonych wielkości na całym obszarze badanej próbki. Szeroka analiza pól przemieszczeń i odkształceń za pomocą różnych narzędzi dostępnych w programie Istra 4D będącym częścią systemu cyfrowej korelacji obrazu 3D Q-450 pozwala na bardzo szczegółowe określenie deformacji próbki i zjawisk zachodzących w czasie obciążania próbki oraz stwarza możliwości różnorodnej wizualizacji wyników badań.

W artykule przedstawiono system cyfrowej korelacji obrazu 3D Q-450 oraz przykładowe zastosowanie tego systemu do rejestracji pól przemieszczeń i odkształceń połączeń spawanych i prętów rozciąganych z mimośrodem. Przedstawione zostały wszystkie etapy pomiaru z wykorzystaniem metody DIC ze szczegółowym opisem kalibracji systemu. W artykule zawarto również uwagi dotyczące trudności, z jakimi może spotkać się użytkownik systemu Q-450 podczas rejestracji i analizy pól przemieszczeń i odkształceń badanego obiektu. Zawarto także wskazówki dotyczące wykonywania pomiarów za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazu, które mogą być przydatne dla kolejnych użytkowników systemu i przyczynią się do szerszego stosowania metod bezkontaktowych w pomiarach przemieszczeń i odkształceń.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Frankovský P., Virgala I., Hudák P., Kostka J., „The use of the digital image correlation in a strain analysis”, Int. J. of Applied Mechanics and Engineering, 2013, Vol.18, No.4, 1283-1292.
2. Górszczyk J., Malicki K., „Przenośny system cyfrowej korelacji obrazu 2D do wyznaczania przemieszczeń i odkształceń próbek materiałów drogowych”, Logistyka 6/2014, 4093-4101
3. Hagara M., Huňady R., Lengvarský P., Bocko J., „Numerical Verification of a Full-field Deformation Analysis of a Specimen Loaded by Combined Loading”, American Journal of Mechanical Engineering, 2014, Vol. 2, No. 7, 307-311
4. Huňady R., Hagara M., Schrotter M., „The determination of the kinematic quantities by using the high-speed dic method”, 18th International Conference ENGINEERING MECHANICS 2012 pp. 469–475, Svratka, Czech Republic, May 14 – 17, 2012
5. Instrukcja obsługi systemu Q-450: Q-450 SYSTEM Operation Manual, Dantec Dynamics
6. Trebuňa F., Huňady R., Bobovský Z., Hagara M., „Results and Experiences from the Application of Digital Image Correlation in Operational Modal Analysis”, Acta Polytechnica Hungarica 2013, Vol. 10, No. 5, 159-174.
7. www.dantecdynamics.com
8. www.elhys.com.pl
9. www.ita-polska.com.pl
10. www.sjp.pwn.pl

8. ZADANIA DO WYKONANIA

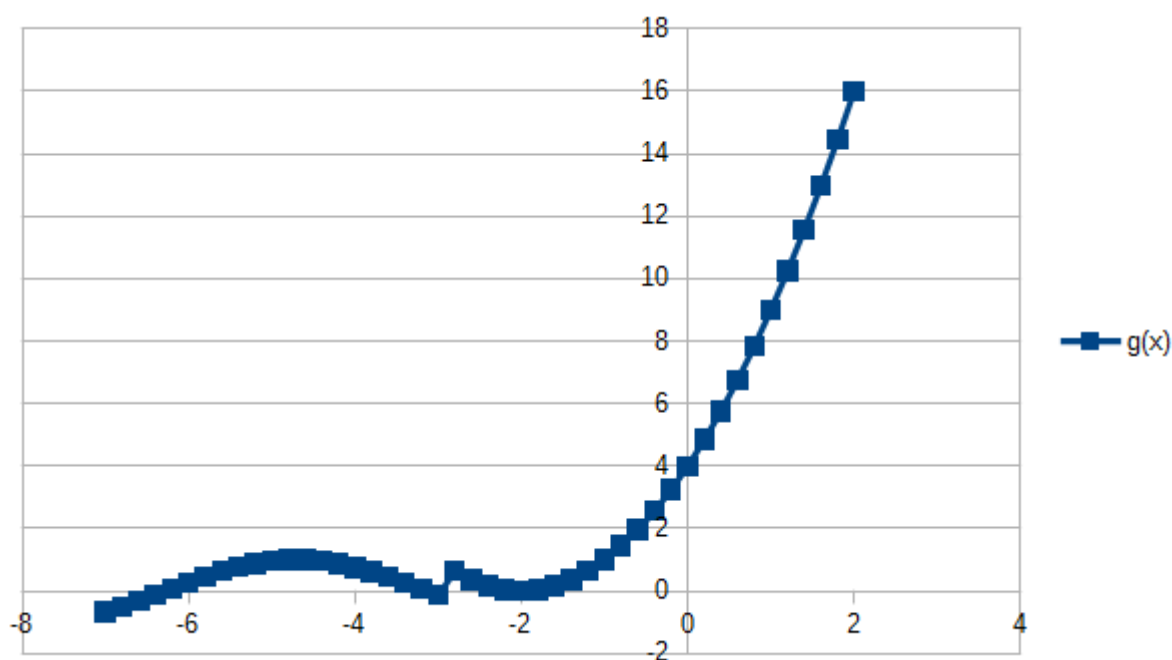
8.1. Na zaliczenie (ocena 3,0)

Aby otrzymać ocenę 3,0 należy bezbłędnie wykonać zadania 1-7 (wszystkie 7 zadań):

1. Wykonać formatowanie stylu „Treść tekstu”:
Czcionka Times New Roman, 12 pkt.,
Odstęp poniżej akapitu: 0,3 cm
Wcięcie pierwszego wiersza: 0.75 cm.
Wyrównanie do prawej i lewej
2. W tekście odnaleźć fragmenty tekstu: „Przeprowadzenie pomiarów” i „Wprowadzenie”
(zaznaczone w pliku kolokwium1_wzorzec.pdf) i przypisać im właściwy styl tekstu.
3. Zmodyfikować styl tekstu „Nagłówek 1”
Czcionka Arial, 14 pkt., pogrubiona, zastosować kapitaliki
Odstęp poniżej akapitu: 0,5 cm
Odstęp powyżej akapitu: 0,5 cm
4. Zmodyfikować styl tekstu „Nagłówek 2”
Czcionka Arial, 12 pkt., pogrubiona
Odstęp poniżej akapitu: 0,5 cm
Odstęp powyżej akapitu: 0,3 cm
5. Wykonać numerację konspektu, na jej podstawie wygenerować spis treści i umieścić go na ostatniej stronie.
6. W arkuszu kalkulacyjnym wykonać obliczenia i narysować wykres funkcji:

$$g(x) = \begin{cases} \sin(x) & \text{dla } x \in (-7, -3), \\ (x+2)^2 & \text{dla } x \in (-3, 2) \end{cases}$$

7. Wykres w postaci pliku graficznego umieścić w tym miejscu:



8.2. Na ocenę 4,0

Zadania 8 i 9 będą oceniane wyłącznie po prawidłowym wykonaniu zadań 1-7. Aby otrzymać ocenę 3,5 wystarczy prawidłowo wykonać jedno z dwóch poniższych zadań:

8. Wykonać pierwszą stronę według wzoru umieszczonego w pliku kolokwium1_wzorzec.pdf
9. Dokonać formatowania spisu treści zgodnie ze wzorcem

8.3. Na ocenę 5,0

Zadania 10 - 11 będą oceniane wyłącznie po prawidłowym wykonaniu zadań 1-9. Aby otrzymać ocenę 4,5 wystarczy prawidłowo wykonać jedno z dwóch poniższych zadań:

10. Dokonać formatowania wykresu sporządzonego w punkcie 8.1:

Umieścić tytuł wykresu: „Funkcja g(x)”

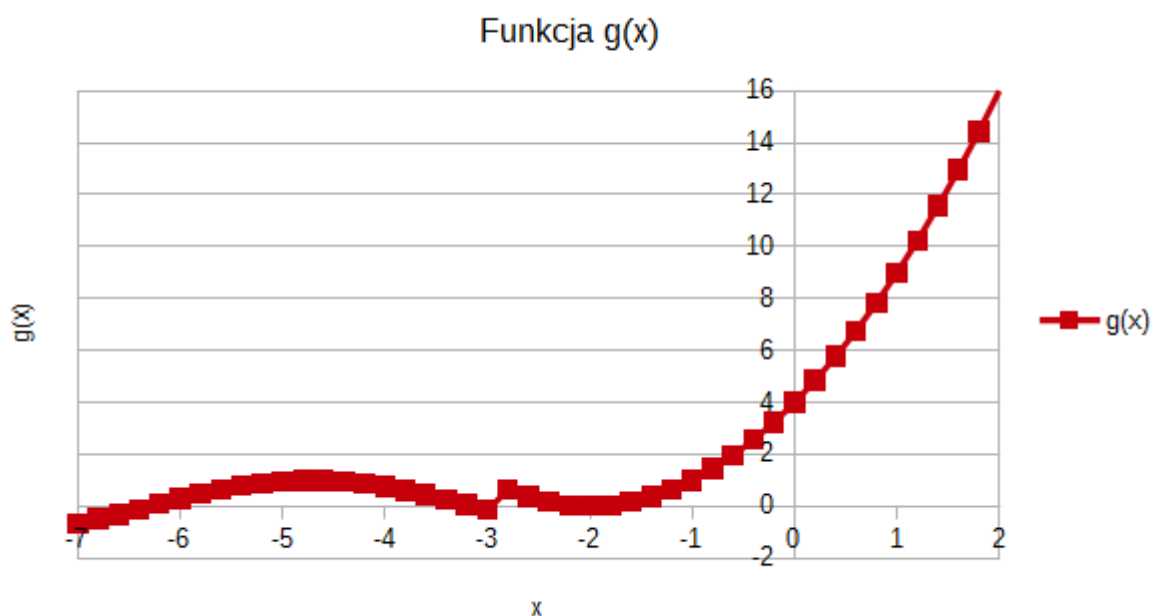
Tytuł osi x: „x”

Tytuł osi y: „g(x)”

ograniczyć zakres osi x do przedziału $\langle -7, 2 \rangle$, przedział główny co 1,

kolor serii danych: czerwony

Nowy rysunek umieścić w tym miejscu:



11. Korzystając z edytora formuł wstaw poniżej formułę z obrazka:

$$h(x) = \frac{\cos(x^2)}{3}$$

$$h(x) = \frac{\cos x^2}{3}$$

Times New Roman, pogrubiona, 16 pkt.

Times New Roman, pogrubiona, 14 pkt.,
odstęp przed tekstem 1 cm, pierwszy
wiersz, -1 cm

Odstęp 1 cm

Spis treści

1.	Wprowadzenie.....	2
2.	System cyfrowej korelacji obrazu 2D i 3D do rejestracji i analizy pól przemieszczeń i odkształceń.....	2
3.	Przebieg rejestracji i analiza pól przemieszczeń i odkształceń z zastosowaniem systemu cyfrowej korelacji obrazu 3D na przykładzie systemu Q-450 firmy Dantec Dynamics.....	4
4.	Zalety, ograniczenia i zastosowanie systemu 3D-DIC.....	16
5.	Przykład zastosowania metody 3D-DIC do rejestracji i analizy pól przemieszczeń i odkształceń połączeń spawanych i prętów rozciąganych z mimośrodem.....	18
5.1.	Cel badania i opis próbek przygotowanych do badania.....	18
5.2.	Stanowisko pomiarowe.....	19
5.3.	Przygotowanie próbek do badania systemem Q-450.....	20
5.4.	Przeprowadzenie pomiarów.....	20
5.5.	Przykładowe wyniki badań połączeń spawanych i prętów rozciąganych z mimośrodem przeprowadzonych z zastosowaniem systemu Q-450.....	21
6.	Podsumowanie.....	32
7.	Bibliografia.....	33
8.	Zadania do wykonania.....	33
8.1.	Na zaliczenie (ocena 3,0).....	33
8.2.	Na ocenę 4,0.....	34
8.3.	Na ocenę 5,0.....	35

Pozycja tabulatora
2 cm

Liberation Serif, regularna, 12 pkt.,
odstęp przed tekstem 1 cm