

---

**XXII Seminarium  
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW  
Zakopane, 16-18 marca 2016**

---

**NOWOCZESNE SYSTEMY OPTYCZNE W BADANIACH  
MECHANICZNYCH – BUDOWA, DZIAŁANIE,  
ZASTOSOWANIA**

**Zbigniew L. Kowalewski, Lech Dietrich, Mateusz Kopeć, Tadeusz Szymczak\*,  
Paweł Grzywina**

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa

\*Instytut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa

*zkowalew@ippt.pan.pl*

### **1. Wprowadzenie**

Działania zmierzające do opracowania systemu oceny stopnia degradacji materiałów zachodzącej pod wpływem długotrwałych obciążeń eksploatacyjnych na podstawie zmian lokalizacji deformacji uwidocznionych na polowych rozkładach składowych przemieszczenia w wybranym obszarze elementu konstrukcyjnego stanowią stosunkowo nowy kierunek współczesnych badań wytrzymałościowych. Spodziewanym efektem prowadzonych prac jest zwykle opracowanie prototypu stanowiska badawczego wraz z szeregiem procedur diagnostycznych. Zastosowanie rozwiązania opartego na nieinwazyjnej metodzie pomiarowej umożliwi monitorowanie stanu instalacji technicznych bez konieczności wyłączenia ich z eksploatacji. Proces rozwoju uszkodzeń struktury materiału pod wpływem obciążeń cyklicznych prowadzący do zmęczenia materiału jest procesem lokalnym rozwijającym się w miejscach osłabionych defektami strukturalnymi, np. spiętrzenia dyslokacyjne, pustki czy wtrącenia i wydzielenia niemetaliczne, czy w miejscach największych wartości naprężenia będących sumą obciążeń zewnętrznych, naprężeń własnych ukształtowanych w procesie wytwórczym i składowych naprężenia powstałych jako efekt spiętrzenia karbów geometrycznych i strukturalnych. Rozwój uszkodzeń jest więc związany z lokalnymi zmianami składowych odkształcenia, a ich uwidocznienie stwarza możliwość monitorowania i wczesnego wykrycia degradacji zmęczeniowej materiałów i elementów konstrukcyjnych. Zalety wykorzystania metod optycznych dających polowy obraz rozkładu deformacji przy zastosowaniu Cyfrowej Korelacji Obrazu (Digital Image Correlation - DIC) lub Elektronicznej Interferometrii Plamkowej (Electronic Speckle Pattern Interferometry - ESPI) związane są z możliwością identyfikowania zmian w strukturze materiału na poziomie mikroskali, co z kolei pozwala na stosunkowo wczesne zidentyfikowanie procesu degradacji przed etapem jej dynamicznego rozwoju.

Metoda cyfrowej korelacji obrazu wykorzystuje zdjęcia zrobione w tym samym czasie przez dwie kamery cyfrowe i jest mniej wrażliwa na sztywne przesunięcia i drgania obiektu badań niż technika interferometrii plamkowej. Sposób ten jest obecnie w coraz szerszym stopniu wykorzystywany do pomiaru rozkładów składowych przemieszczenia w warunkach laboratoryjnych i podobnie jak metoda ESPI nie był dotychczas stosowany do wykrywania i lokalizacji uszkodzeń eksploatacyjnych, tworzących się w elementach konstrukcji i maszyn pod wpływem zmęczenia lub pełzania. Fizyczne zasady i warunki metody cyfrowej korelacji obrazów wskazują na jej łatwiejsze dostosowanie do monitorowania elementów konstrukcyjnych w ich naturalnym otoczeniu przemysłowym i stąd coraz częściej podejmowane są próby jej wykorzystania do oceny rozwoju uszkodzeń elementów maszyn i konstrukcji w ich rzeczywistych warunkach pracy.

Metoda ESPI stanowi synergiczny efekt kilku przełomowych osiągnięć technologicznych, a mianowicie z jednej strony wynalezienia: (a) lasera w latach sześćdziesiątych XX wieku, (b) przetworników i czujników sygnałów świetlnych (kamery CCD) pod koniec lat siedemdziesiątych, co wyeliminowało długotrwałą, pracochłonną i relatywnie drogi proces wykrywania i rejestracji takich sygnałów za pomocą kliszy światłoczułej (było to w pewnym okresie powodem silnego ograniczenia stosowania holograficznych metod pomiarowych), a z drugiej gwałtownego rozwoju komputerów osobistych zapoczątkowanego w latach osiemdziesiątych XX wieku umożliwiło szybkie, bieżące przetwarzanie znacznych ilości zbieranych danych. Przełomowy moment, decydujący o zaakceptowaniu i obecnym gwałtownym rozwoju metody ESPI i pokrewnych - bezkontaktowych, nieniszczących wysokoczułych, optycznych metod pomiarowych - jako pomiarowego narzędzia badawczego, nastąpił w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku, kiedy to zdołano połączyć i wykorzystać trzy wcześniej wspomniane przełomy technologiczne. W ten sposób zbudowano system pomiarowy wyposażony w niezbędne, ale dość złożone, specjalizowane oprogramowanie zawierające zaawansowane algorytmy przetwarzania obrazów cyfrowych, które umożliwiają uzyskiwanie ilościowych wyników pomiarowych.

Oprogramowanie komputerowe wymienionych wyżej zestawów umożliwia obliczenie rozkładów składowych odkształcenia i ewentualnie składowych naprężenia przy założeniu spełnienia warunków płaskiego stanu naprężenia lub odkształcenia na podstawie rozkładów przemieszczenia. Zestaw ESPI przeznaczony jest do pomiarów statycznych i wymaga zatrzymania obciążania próbki na czas wykonania niezbędnej serii zdjęć, co wymaga około 3 sekund, ale oferuje bardzo dobrą rozdzielczość określania odkształcenia rzędu  $10^{-6}$ . Zestaw DIC daje możliwości pomiarów w zakresie dynamicznym o szybkościach uzależnianych od zastosowanych dwóch kamer cyfrowych z nieco gorszą rozdzielczością wyznaczania składowych odkształcenia rzędu  $5 \times 10^{-4}$ .

W dalszej części niniejszego opracowania zostaną syntetycznie omówione obie współcześnie wykorzystywane metody optyczne. Zaprezentowane zostaną również wybrane przykłady własnych badań, w których techniki DIC i ESPI znalazły zastosowanie.

## **2. System cyfrowej korelacji obrazu (DIC- Digital Image Correlation)**

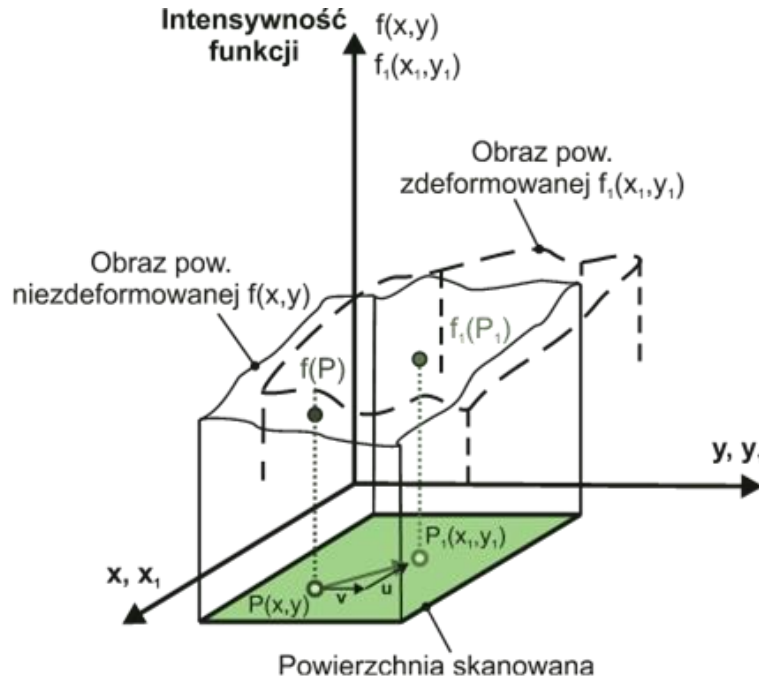
Urządzenia cyfrowej korelacji obrazu są przeznaczone do bezkontaktowych pomiarów zmian składowych stanu przemieszczenia zarówno w dwu-, jak i trójwymiarowych układach współrzędnych. W porównaniu do innych technik pomiarowych takich, jak na przykład tensometria oporowa, metoda DIC wymaga lepszego przygotowania merytorycznego personelu laboratoryjnego, szczególnie w początkowym etapie wdrażania tego systemu. Wynika to z konieczności odpowiedniego przygotowywania powierzchni pomiarowej próbki i przeprowadzenia kalibracji urządzenia według wymaganej procedury.

Wśród zestawów cyfrowej korelacji obrazu można wyróżnić zarówno systemy przeznaczone do analizy dużych deformacji (Aramis 4M), jak i małych deformacji (Micro-DIC). Niezależnie od przeznaczenia systemów DIC, zasady ich działania bazują na ścisłych zależnościach obowiązujących w mechanice ośrodków ciągłych.

Wybrane zagadnienia teoretyczne i szczegóły techniczne prowadzenia badań przy użyciu DIC oraz wyniki przykładowych testów z jego wykorzystaniem zostaną przedstawione w kolejnych podpunktach niniejszego opracowania.

### **2.1. Podstawy teoretyczne**

Działanie systemu cyfrowej korelacji obrazu [1] polega na odpowiednim oświetleniu obiektu, a następnie prowadzeniu analizy intensywności wiązki światła odbitego od powierzchni  $f(x, y)$  (niezdeformowanej) w stanie przed obciążeniem i dowolnej powierzchni  $f_1(x_1, y_1)$  w kolejnym etapie po przyłożeniu obciążenia, wskutek którego następuje deformacja, rys. 1. Takie postępowanie umożliwia pomiar przemieszczenia w obszarze stref o niewielkich powierzchniach, a następnie pozwala uzyskać taki rozkład na większej rzeczywistej powierzchni obiektu.



Rys. 1. Schemat rozpatrywanych obrazów powierzchni na tle powierzchni skanowanej [1]

Idea metody DIC oparta jest na zasadach mechaniki ośrodka ciągłego [2, 3]. Rozpatrywane są zmiany wymiarów i położenia krótkich odcinków wyznaczanych przez położenie dwóch punktów w stanie przed ( $P, Q$ ) i po deformacji ( $P_1, Q_1$ ), rys. 2, opisanych następującymi równaniami w trójwymiarowym, prostokątnym układzie współrzędnych (3D) kartezjańskich:

$$P_1 = (x_1, y_1, z_1) = [x + u(P), y + v(P), z + w(P)], \quad (1)$$

$$Q_1 = (x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, z_1 + dz_1) = \begin{bmatrix} x + u(P) + u(Q) - u(P) + dx, y + v(P) + v(Q) - \\ + v(P) + dy, z + w(P) + w(Q) - w(P) + dz \end{bmatrix}, \quad (2)$$

gdzie:  $u, v, w$  - stanowią odpowiednio składowe przemieszczenia w kierunku osi  $x, y, z$ .

Długości odcinków  $PQ$  i  $P_1Q_1$  wyrażane są następującymi zależnościami:

$$|PQ|^2 = (ds)^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2, \quad (3)$$

$$|P_1Q_1|^2 = (ds_1)^2 = dx_1^2 + dy_1^2 + dz_1^2. \quad (4)$$

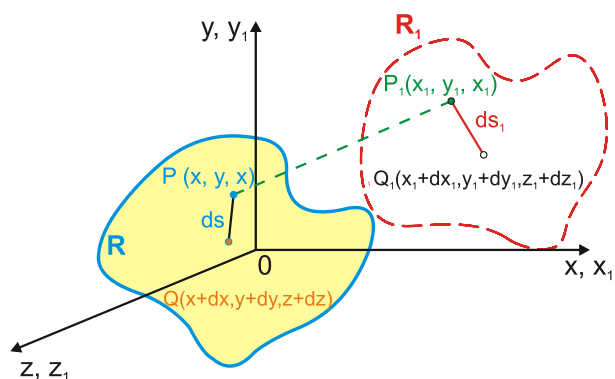
Wykorzystując wzory od (1) do (4) oraz dokonując prostych przekształceń otrzymujemy następujące związki określające składowe stanu odkształcenia w dwuwymiarowym układzie współrzędnych:

$$\varepsilon_{xx} \cong \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right], \quad (5)$$

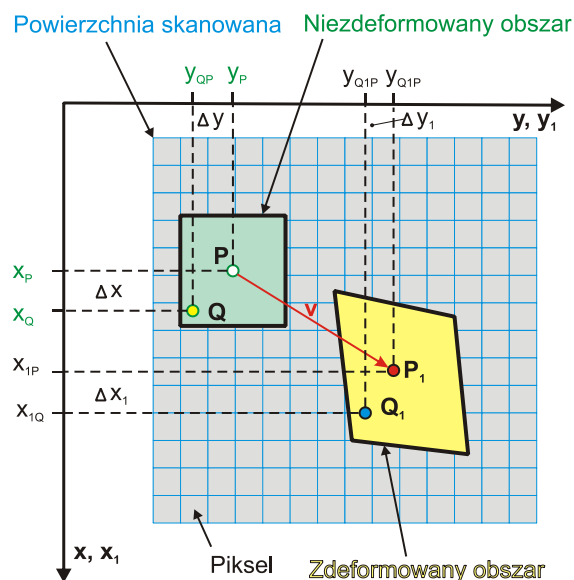
$$\varepsilon_{yy} \cong \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right], \quad (6)$$

$$\varepsilon_{xy} \cong \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right]. \quad (7)$$

W procedurze systemu DIC obszar niezdeformowany, rys. 1, poddawany jest analizie polegającej na przyporządkowaniu poszczególnym, niewielkim obszarom współrzędnych ich położenia. Następnie wydzielana jest niezdeformowana strefa referencyjna, a zmiany jej kształtu i położenia są analizowane w trakcie trwania obciążania i rejestrowane w układzie współrzędnych  $0xy$  i  $0x_1y_1$ , rys. 2.



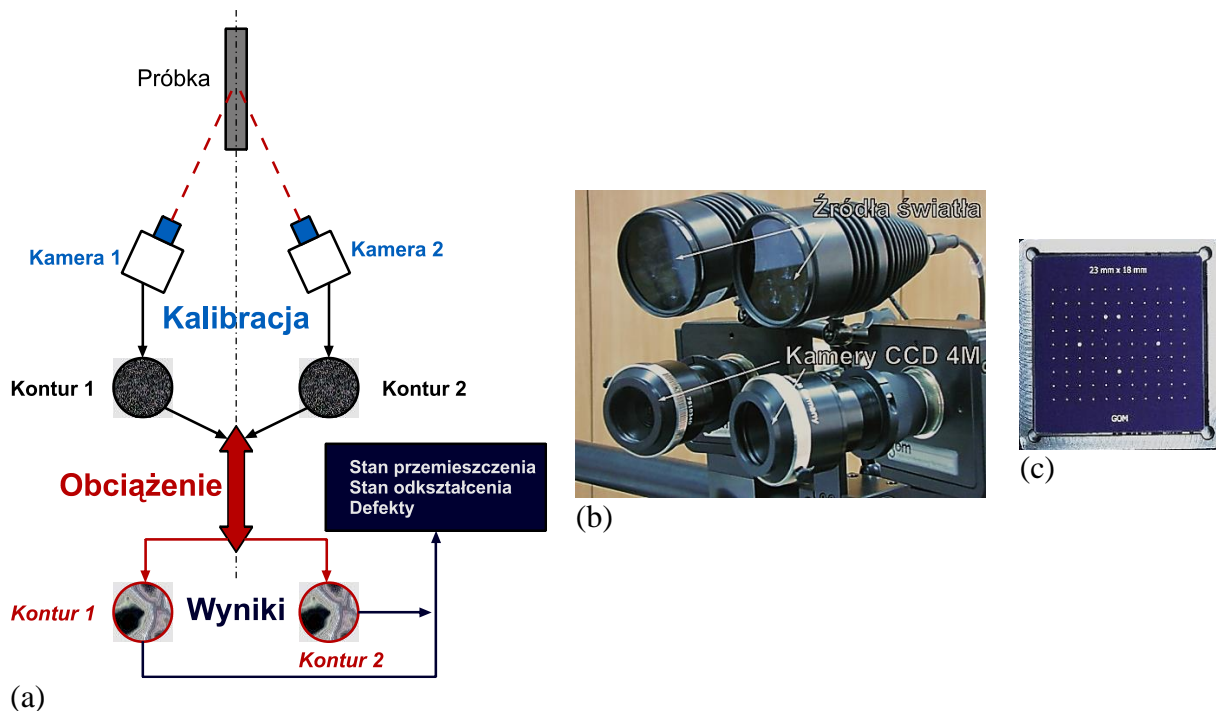
Rys. 2. Charakterystyczne wielkości powierzchni przed ( $R$ ) i po ( $R_1$ ) deformacji [1]



Rys. 3. Graficzna interpretacja deformacji wytypowanego obszaru powierzchni skanowanej w dwuwymiarowym układzie współrzędnych [1]

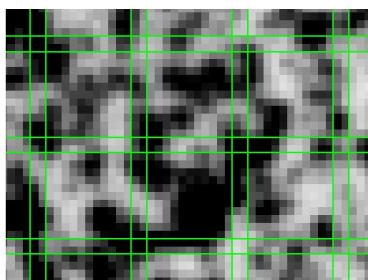
## 2.2. Urządzenia DIC – schemat działania, zastosowanie

W większości praktycznych przypadków system DIC jest wyposażony w układ dwóch kamer cyfrowych, rys. 4. Wykorzystanie tylko jednej kamery umożliwia otrzymywanie wyników dwuwymiarowych, przy czym dla tego rodzaju konfiguracji czas potrzebny do uzyskania rezultatu końcowego jest znacznie krótszy niż w przypadku układu z dwiema kamerami. Wymiary obszaru pomiarowego, który można analizować przy użyciu systemu Aramis 4M zawierają się w zakresie od  $10 \times 7$  [mm] do  $4000 \times 2900$  [mm].

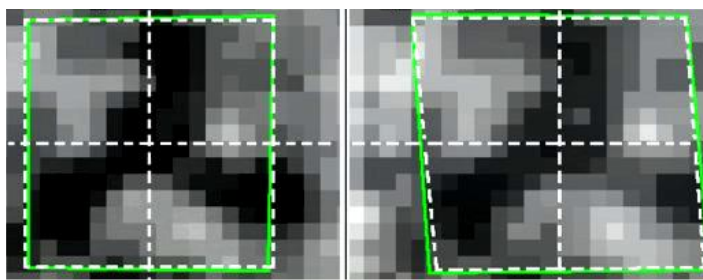


Rys. 4. System ARAMIS i jego zasadnicze elementy: (a) ogólny schemat działania [4], (b) główny moduł pomiarowy, (c) płyta kalibracyjna

Niezależnie od rodzaju systemu DIC, jedno- czy dwukamerowego, przeprowadzenie zaplanowanego testu musi być poprzedzone kalibracją urządzenia przy wykorzystaniu płyty kalibracyjnej, rys. 4c, z naniesionymi charakterystycznymi punktami referencyjnymi oraz obiektu w stanie nieobciążonym. W celu zapewnienia ważności kalibracji konieczne jest nadanie wartości współrzędnych punktom uwidocznionym w środkowym obszarze płyty kalibracyjnej, przy czym muszą być one większe od wartości współrzędnych punktów pozostałych. Cały proces opiera się na zasadzie korelacji oraz metodzie poszukiwania punktów o jednakowych wartościach współrzędnych. Polega to na zdefiniowaniu obszaru (konturu) do analizy oraz zarejestrowaniu jego kształtu, rys. 4a. W tym celu przyporządkowuje się charakterystycznym punktom analizowanej warstwy kwadratowe lub prostokątne obszary (stosunkowo małe np.  $15 \times 15$  pikseli) zwane „fasetkami”, rys. 5 i 6.



Rys. 5. Wycinek pola pomiarowego z układem fasetek określonych zielonymi liniami [5]



Rys. 6. Przykładowy powiększony wycinek analizowanego obszaru z konturem fasetki (linia zielona) oraz linią przerywaną reprezentującą zależność między fasetkami a odkształceniem [5]

Wycinek gradientowej strefy pomiarowej oprócz naniesionych cyfrowo prostokątnych obszarów pomiarowych o wymiarach  $15 \times 15$  pikseli, które mogą podlegać zmianom w oprogramowaniu DIC, charakteryzuje się występowaniem stref wspólnych, mających rozmiar

2×2 piksele, rys. 5. Do każdego z prostokątnych obszarów przypisane jest niepowtarzalne szare tło z czarnymi punktami o dowolnych kształtach. Należy podkreślić, że w badaniach przy użyciu techniki DIC wymagane jest wytypowanie stref wspólnych. Należy zaznaczyć, że rozmiary „fasetek” mają wpływ na dokładność i szybkość obliczeń. Zwiększenie ich wymiarów obniża dokładność pomiarów, ale z drugiej strony przyspiesza czas uzyskania wyniku końcowego. Obszary prostokątne są bezpośrednio wykorzystywane w analizie składowych przemieszczenia.

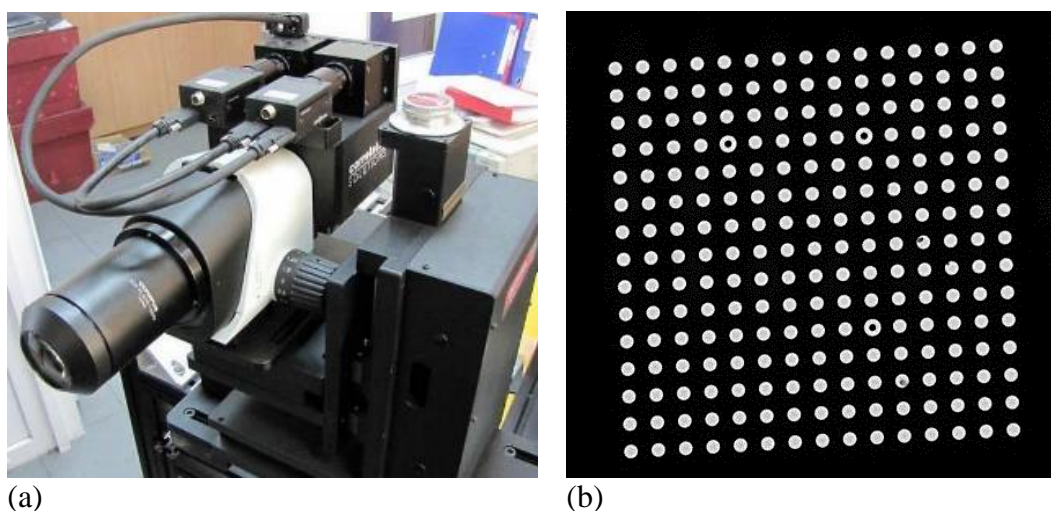
Kolejny etap to proces obciążania, podczas którego wyznaczone są składowe stanu przemieszczenia w obszarze dwu- lub trójwymiarowym. Określone wartości składowych przemieszczenia wykorzystywane są następnie do obliczania składowych stanu odkształcenia/naprężenia w postaci obrazu połowego.

System DIC określa współrzędne w dwuwymiarowym (2D) układzie współrzędnych na podstawie reorientacji środka prostokąta/rombu fasetki, rys. 6. Współrzędne wyznaczone przy użyciu obu kamer oraz kąt pomiędzy ich osiami umożliwiają określenie współrzędnych w trójwymiarowym (3D) układzie współrzędnych. W kolejnych etapach analizy specyficzny obszar warstwy z naniesionym szaro-czarnym tłem jest poddawany identyfikacji, tak aby następnie wykorzystać jego położenie do określenia przemieszczenia. Etapowi początkowemu (Stage 0) przyporządkowywany jest numer „0”, natomiast kolejnym etapom numery: „1”, „2”, „3”, itp.

W dalszej części opracowania zostanie omówione zestawienie poszczególnych etapów konfiguracji.

Trudności występujące podczas stosowania systemów DIC są w dużej mierze związane z przygotowywaniem szaro-czarnej warstwy zawierającej charakterystyczne punkty usytuowane w strefie pomiarowej próbki oraz sposobem pozycjonowania kamer, rys. 4b, przy użyciu płyty kalibracyjnej, rys. 4c.

System DIC przeznaczony do badań w zakresie dużych deformacji można z powodzeniem stosować do wyznaczania modułu Younga, współczynnika Poissona, identyfikowania procesu umacniania bądź osłabiania materiału w szerokim zakresie odkształcenia plastycznego. Znajduje on również zastosowanie w badaniach materiałów o dużej ciągliwości, przekraczającej 100%, oraz przy wyznaczaniu parametrów mechaniki pękania.



Rys. 7. System cyfrowej korelacji obrazu typu Micro-DIC do badań w mikroobszarach: (a) widok urządzenia; (b) płytka kalibracyjna

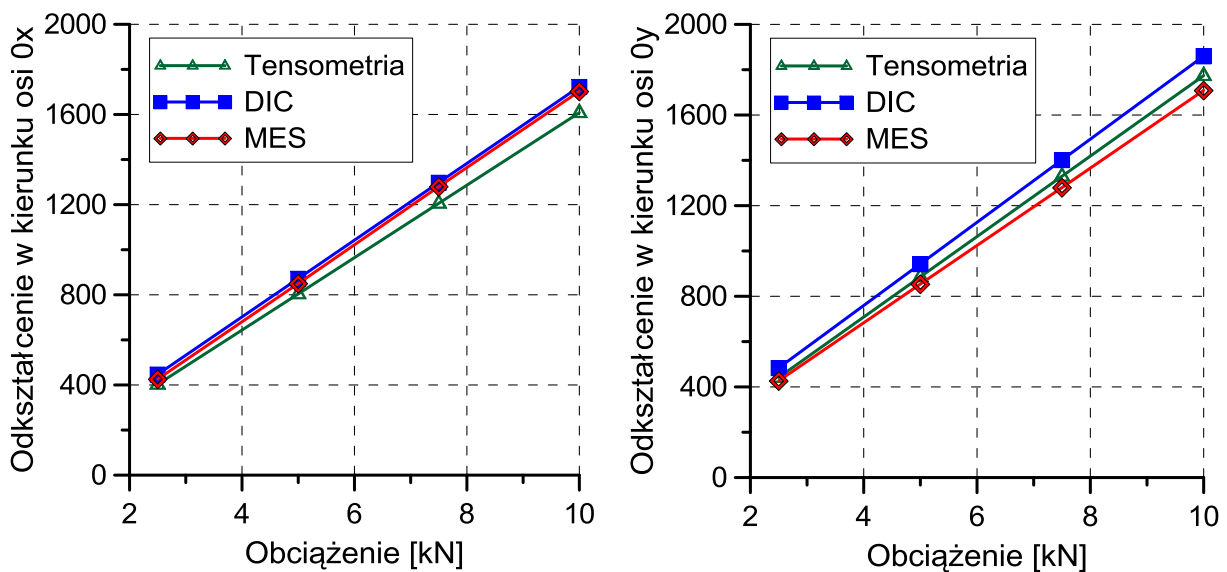
Widok systemu cyfrowej korelacji obrazu typu Micro-DIC Correlated Solution, który przeznaczony jest do badań w mikroobszarach, zamieszczono na rys. 7a. Urządzenie jest



wyposażone w dwie kamery o rozdzielczości 5MPx oraz mikroskopowy układ optyczny. Wymienione elementy tworzą zespolony układ pomiarowy, który nie wymaga specjalnego pozycjonowania przed kalibracją. W porównaniu do systemów DIC przeznaczonych do pomiarów dużych deformacji (np. Aramis 4M), w przypadku których wykorzystuje się liniały pomiarowe, system Micro-DIC jest wyposażony w ruchomy stolik do pozycjonowania układu optycznego z dokładnością 1 $\mu$ m. Dopuszczalny obszar pomiarowy zwiera się w kwadracie o bokach od 0.7 mm do 8 mm. Dokładność pomiarów jest stosunkowo wysoka i wynosi  $\pm 10$ nm. Odkształcenie może być określane przy zachowaniu rozdzielczości  $\pm 0.010\%$ . Należy jednak zaznaczyć, że określanie rozkładów składowych odkształcenia w mikro-obszarach przy użyciu systemu Micro-DIC z maksymalnie wysuniętym obiektywem wymaga odizolowania urządzenia od drgań. Podobnie, jak w przypadku systemu DIC do badań w zakresie dużych deformacji, system Micro-DIC wymaga kalibracji przed badaniem przy użyciu płytki kalibracyjnej, rys. 7b. W jej strefie pomiarowej można wyróżnić szachownicowy układ punktów pomiarowych z widocznymi trzema punktami odniesienia, których rozpoznanie przez system Micro-DIC jest konieczne do przeprowadzenia kalibracji.

### 2.3. Walidacja wyników metody DIC techniką tensometryczną oraz obliczeniami MES

Stosowanie nowych technik pomiarowych, niezależnie od ich rodzaju, wymaga przeprowadzenia walidacji w oparciu o powszechnie znane metody. W tym celu realizowane są badania porównawcze. Polegają one na wyznaczeniu w tym samym obszarze pomiarowym wartości składowych stanu odkształcenia przy użyciu DIC, techniki tensometrycznej i metody elementów skończonych, w zależności od poziomu obciążenia (tab. 1, rys. 8) [6]. Przykładowe wyniki badań walidacyjnych ilustruje rys. 8. Jak łatwo zauważyć, różnice w ocenie składowych odkształcenia są niewielkie, wykazując tym samym przydatność systemu cyfrowej korelacji obrazu i jednocześnie wskazując możliwość wymiennego stosowania rozpatrywanych metod analizy. Wyniki zamieszczone w tab. 1 pokazują również nieznacznie większe wartości odkształcenia z pomiarów przy użyciu DIC niż w przypadku stosowania techniki tensometrycznej.



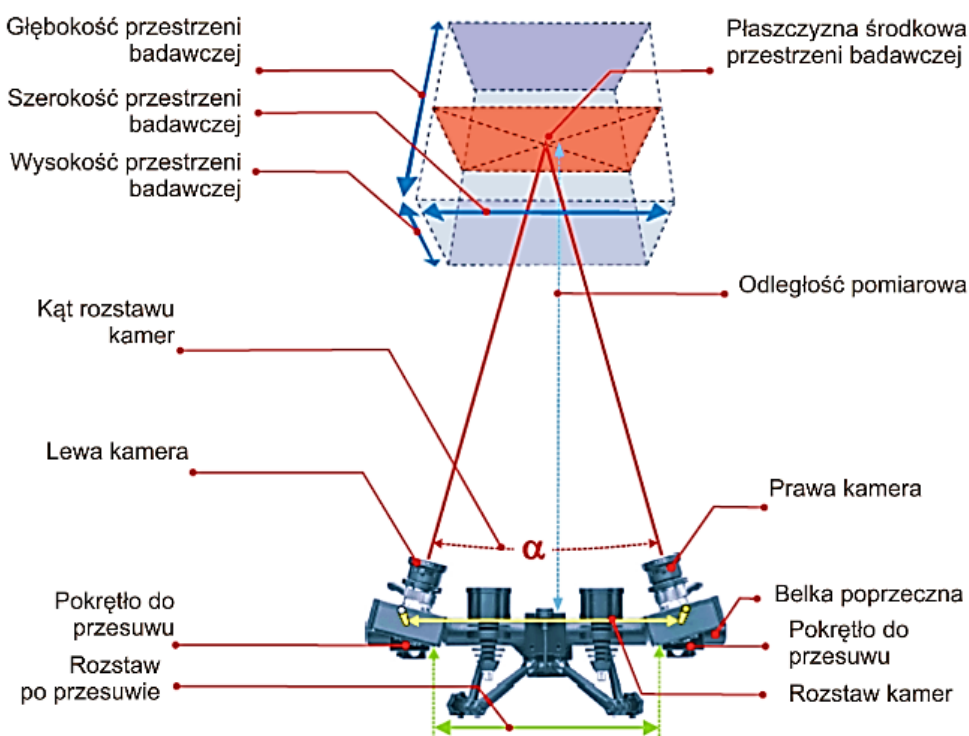
Rys. 8. Przebiegi składowych odkształcenia podczas rozciągania w funkcji obciążenia, uzyskane różnymi metodami pomiarowymi [6]

Tab. 1. Porównanie składowych stanu odkształcenia wyznaczonych przy użyciu różnych technik pomiarowych, gdzie:  $\varepsilon_{xx}$  – odkształcenie w kierunku osi  $0x$ ,  $\varepsilon_{yy}$  – odkształcenie w kierunku osi  $0y$ , [6]

Obciążenie [kN]	$\varepsilon_{xx} \times 10^{-6}$			$\varepsilon_{yy} \times 10^{-6}$		
	Technika tensometryczna	DIC	MES	Technika tensometryczna	DIC	MES
2.5	403	447	426	442	484	427
5.0	804	872	850	886	943	854
7.5	1206	1298	1280	1330	1402	1280
10.0	1608	1723	1703	1774	1860	1709

#### 2.4. Kalibracja systemu DIC na przykładzie ARAMIS 4M

Główne elementy pomiarowe systemu ARAMIS 4M stanowią dwie kamery, które są mocowane na poprzecznej belce z podziałką milimetrową, rys. 4 i 9. Dla wymiarów obszaru pomiarowego z zakresu od  $20 \times 15$  mm do  $300 \times 220$  mm kąt między kamerami jest stały i wynosi  $25^\circ$ . Rozstaw kamer można zmieniać przesuwając je symetrycznie na wymaganą odległość względem głównej osi urządzenia. Wymagana odległość między kamerami powinna odpowiadać wartości podanej w tabeli kalibracji. Zależy ona od rozmiarów przestrzeni badawczej. W pobliżu kamer znajdują się dwa źródła światła, które są mocowane przegubowo do ramion przytwierdzonych do belki poprzecznej statywu. Ich użycie w procesie kalibracji jest niezbędne. Prawidłowe ustawienie źródła światła stanowi istotny etap przygotowania systemu do badań. Bezpośrednio przed badaniami należy dopasować natężenie oświetlenia w obszarze pomiarowym próbki starając się ograniczyć źródła odblasków. Głównym celem tych działań jest uzyskanie dobrej jakości obrazu naniesionej szaro-czarnej warstwy w układach optycznych obu kamer.



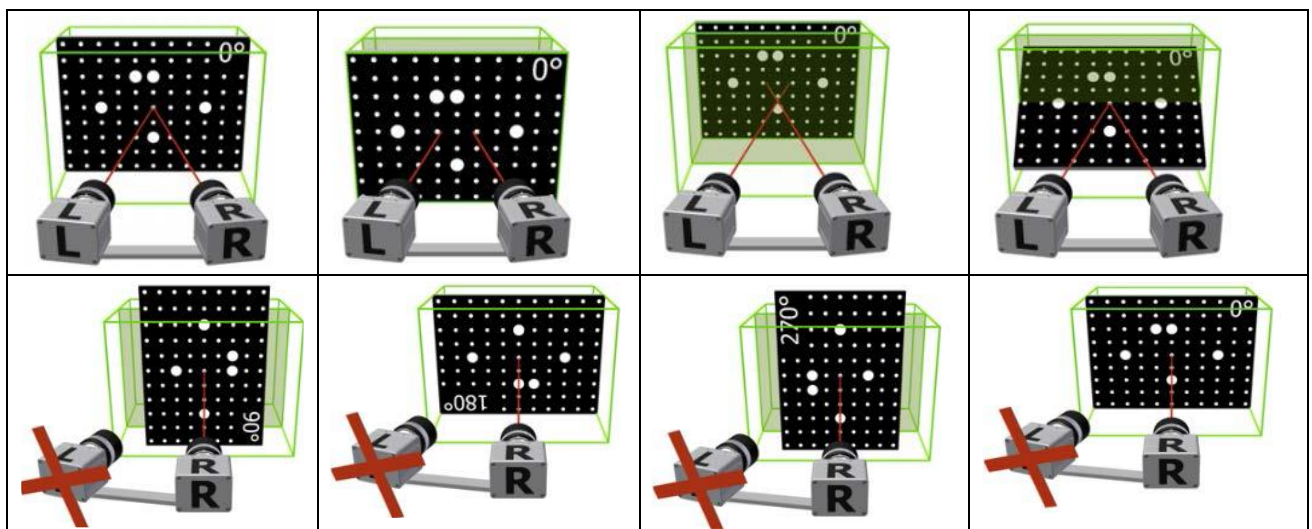
Rys. 9. Schemat systemu DIC Aramis 4M [5]



Kalibracja urządzenia DIC wymaga użycia odpowiedniej płytki kalibracyjnej, ponieważ w zakresie jej wymiarów musi się zawierać obszar przeznaczony do analizy, rys. 4c i 9. Wykorzystanie płyty kalibracyjnej polega na umieszczeniu jej w przestrzeni badawczej, najlepiej symetrycznie względem głównej osi obciążenia maszyny wytrzymałościowej, rys. 9. Kolejne kroki procedury zawarte w instrukcji kalibracji pojawiają się jako rozkazy lub instrukcje obrazkowe na ekranie monitora. Polegają one na wyborze odpowiednich kilku reorientacji płyty kalibracyjnej w stosunku do kamer systemu DIC. Przykładowe ustawienia wzorca zamieszczono na rys. 10. Pokazano między innymi pozycje, które umożliwiają identyfikację zbliżania, oddalania, pochylania lub ustawiania wzorca powierzchnią pomiarową skierowaną w stronę jednej z kamer. Właściwe rozpoznanie poszczególnych ustawień płyty kalibracyjnej względem układu kamer jest sygnalizowane odpowiednim komunikatem. Pełna kalibracja systemu Aramis 4M wymaga 13 ustawień wzorca. Po jej zakończeniu wyświetlany jest komunikat zawierający parametry kalibracji, które można wykorzystywać do oceny jakości wykonanej czynności. Ze względu na jednoczesne realizowanie obsługi oprogramowania Aramis-a 4M i pozycjonowania wzorca w przestrzeni badawczej kalibracja urządzenia DIC powinna być prowadzona przez dwie osoby.

Poniżej zamieszczono podstawowe warunki stosowania i dane techniczne związane z ustawianiem systemu Aramis 4M:

1. System Aramis należy montować na dowolnym, lecz stabilnym statywie przy zachowaniu dedykowanej belki poprzecznej z liniałem;
2. Przed pomiarem system Aramis 4M należy skalibrować w odniesieniu do wymiarów obszaru pomiarowego, który będzie analizowany. W tym celu wykorzystuje się płyty kalibracyjne różnych rozmiarów, a w przypadku obiektów wielkogabarytowych krzyż kalibracyjny;
3. Prowadzenie badań powinno być poprzedzone dostosowaniem źródła oświetlenia;
4. W przypadku występowania odbłasków na powierzchni pomiarowej można użyć filtrów polaryzacyjnych, przy czym należy pamiętać, że ich wykorzystanie po kalibracji systemu Aramis 4M zakłóca wcześniejsze ustawienie urządzenia;
5. Wykorzystanie filtrów polaryzacyjnych w trudnych warunkach oświetleniowych pogarsza pracę kamer, co może powodować konieczność zastosowania dodatkowego źródła światła, w takim przypadku należy liczyć się jednak z możliwością wystąpienia zakłóceń związanych ze wzrostem intensywności odbłasków, które mogą nawet uniemożliwić przeprowadzenie badań.



Rys. 10. Wybrane etapy kalibracji systemu cyfrowej korelacji obrazu Aramis 4M [5]

Główne etapy procedury kalibracyjnej systemu Aramis 4M oraz typowe czynności w trakcie realizacji badań zostaną poniżej przedstawione w formie planu kolejno wykonywanych czynności.

Etapy procedury kalibracyjnej systemu Aramis 4M:

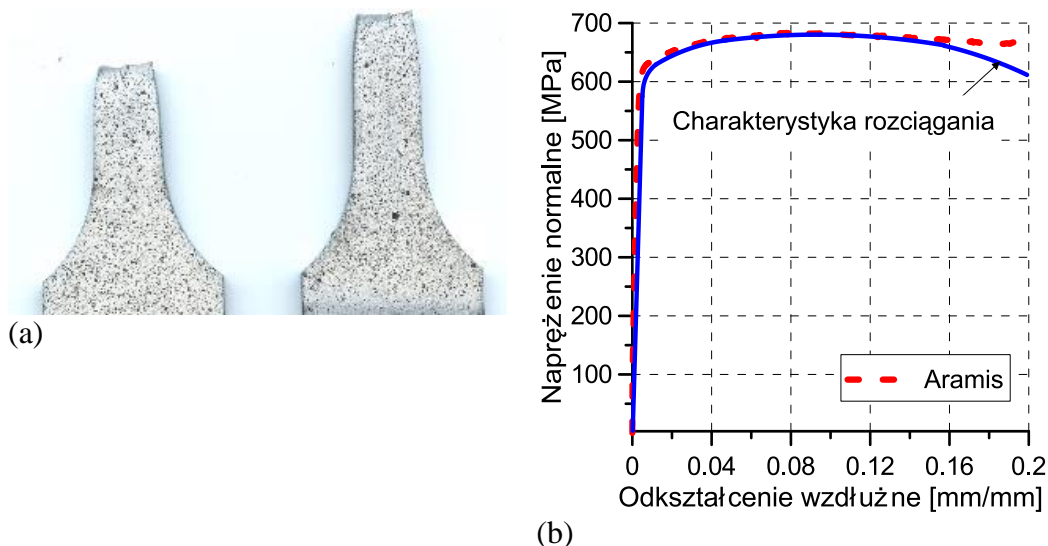
1. Określenie wymiarów obszaru badanego;
2. Przygotowanie próbki – naniesienie jednolitej warstwy szarej/białej a następnie czarnych punktów o losowym rozmieszczeniu (najlepiej użyć aerografu);
3. Wybór rodzaju obiektu pomiarowego 2D lub 3D (obiekt 3D wydłuża czas uzyskania wyniku końcowego). Wybór obiektu 2D jest możliwy przy jednokamerowym systemie DIC;
4. Dostosowanie intensywności oświetlenia, jego regulacja wymaga odpowiedniego ustawienia przysłony (ustawiana bezpośrednio w obiektywie kamery) oraz ustalenia czasu naświetlenia (ustawiany w oprogramowaniu urządzenia);
5. Kalibracja urządzenia dla zdefiniowanego pola pomiarowego (patrz - procedura zawarta w oprogramowaniu DIC oraz instrukcji obsługi urządzenia);
6. Ustawienie trybu zapisu zdjęć;
7. Określenie obszaru pomiarowego w strefie naniesionej warstwy na powierzchni pomiarowej próbki i wprowadzenie tych danych do oprogramowania urządzenia.
8. Sprawdzenie poprawności kalibracji i jakości naniesionej warstwy przez umieszczenie próbki w przestrzeni badawczej maszyny (bez obciążania), wykonanie zdjęcia referencyjnego, wskazanie co najmniej jednego punktu odniesienia oraz przeprowadzenie stosownych obliczeń. W efekcie powinien powstać cyfrowy widok powierzchni pomiarowej pozbawiony pustek i nieciągłości.

Kolejność czynności do uzyskania końcowych wyników testu realizowanego przy użyciu systemu Aramis 4M:

1. Wykonanie badania (maszyna wytrzymałościowa - system DIC);
2. Wyznaczenie składowych przemieszczenia i odkształcenia. Wymagane jest uprzednie wskazanie minimum jednego referencyjnego punktu pomiarowego/obliczeniowego na zdjęciu „0”. W przypadku, gdy następuje przełom próbki zaleca się wskazywać dwa punkty pomiarowe, które będą znajdowały się po obu stronach zerwanej próbki;
3. Wybór sposobu prezentacji wyników: główne składowe stanu odkształcenia, składowe efektywne odkształcenia obliczane z warunku plastyczności, np. Hubera-Misesa-Hencky’ego lub Tresci, itp.;
4. Usuwanie szumów (etap opcjonalny), wybór przekrojów do analizy, wybór baz pomiarowych (tzw. wirtualne tensometry), itp.;
5. Sporządzenie dokumentacji wyników badań w postaci raportu, wykresów, tabel, plików cyfrowych.

## **2.5. System DIC w badaniach mechanicznych**

Na rys. 11 zamieszczono przykładowe wyniki testu walidacyjnego metody cyfrowej korelacji obrazu, w którym oprócz wymienionego urządzenia użyto ekstensometru serii 2620 Instron. Badaniom monotonicznego rozciągania poddano stal 40H, z której wytworzono próbki płaskie. Przed testami rozciągania próbki pokryto warstwą specjalnej farby tworzącej szare tło z czarnymi punktami rozmieszczonymi losowo.



Rys. 11. Wyniki próby rozciągania stali 40H przeprowadzonej przy jednoczesnym użyciu systemu Aramis 4M i ekstensometru: (a) próbka płaska po badaniu z naniesioną warstwą; (b) porównanie charakterystyki rozciągania określonej z wykorzystaniem ekstensometru i systemu Aramis 4M

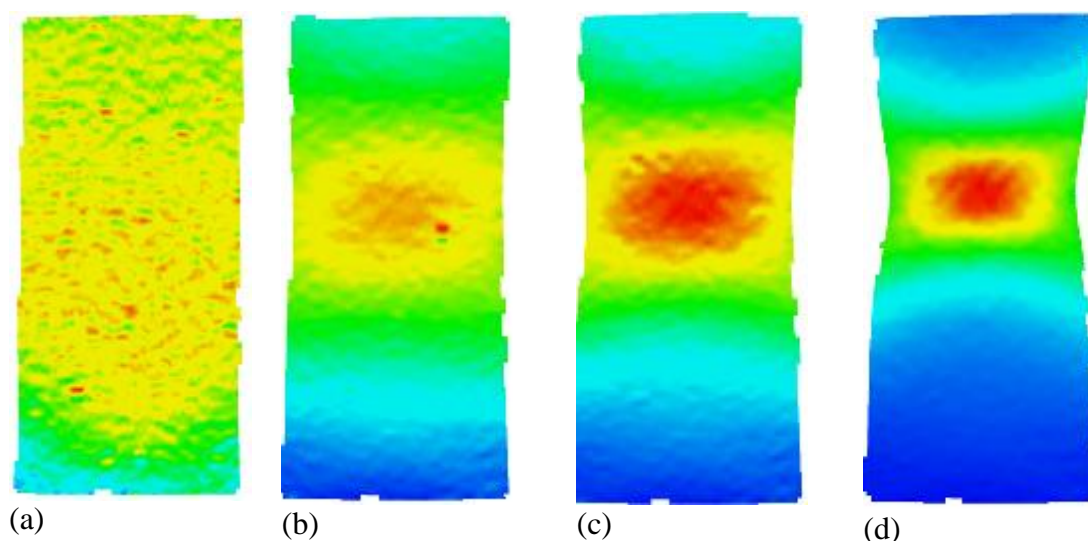
Wyniki próby rozciągania przedstawiono na rys. 11b. Rysunek ten ilustruje porównanie charakterystyk rozciągania określonych z pomiarów systemem Aramis 4M oraz ekstensometrem typu 2620 Instron. Jak łatwo zauważyć, obie charakterystyki mają podobny przebieg i praktycznie do momentu utworzenia na próbce szyjki brak jest istotnych różnic między nimi. Po osiągnięciu przez napężenie wartości granicy wytrzymałości doraźnej krzywa rozciągania otrzymana na podstawie wskazań ekstensometru ulega obniżeniu, czego nie uwzględnia charakterystyka wyznaczona techniką DIC. Należy jednak podkreślić, że różnice te nie mają wpływu na wartości istotnych z inżynierskiego punktu widzenia parametrów mechanicznych takich, jak: moduł Younga, granica plastyczności czy wytrzymałość na rozciąganie, tab. 2.

Tab. 2. Parametry mechaniczne stali 40H określone w próbie rozciągania na podstawie wskazań ekstensometru i systemu DIC Aramis 4M

Sposób pomiaru	E [MPa]	R <sub>0.2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]
Ekstensometr	209 874	619	678
System DIC Aramis 4M	212 544	624	683

Typowy przykład opracowanych wyników z systemu Aramis 4M został zaprezentowany na rys. 12. Zamieszczono na nim cztery wybrane połowe rozkłady odkształcenia efektywnego obliczone z kryterium plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego dla różnych etapów rozciągania próbki płaskiej. Rysunek 12a ilustruje rozkład odkształcenia efektywnego obliczonego na podstawie kryterium HMM dla materiału w stanie sprężystym, natomiast rys. 12b taki sam rozkład po przejściu w stan plastyczny. Z kolei rys. 12c pokazuje taki rozkład dla materiału zdeformowanego plastycznie do wartości odkształcenia odpowiadającej granicy wytrzymałości doraźnej. Ostatni z obliczonych rozkładów dotyczy niestatecznej części

charakterystyki rozciągania bezpośrednio przed pęknięciem, rys. 12d. Przedstawione rozkłady odkształcenia dobrze odzwierciedlają przebieg próby rozciągania i jednocześnie bardzo wyraźnie wskazują obszar kumulacji odkształcenia prowadzącego do ostatecznego pęknięcia próbki.



*Rys. 12. Powierzchniowe rozkłady odkształcenia efektywnego według kryterium HMH w próbce płaskiej dla różnych stopni zaawansowania testu rozciągania; materiał stal 40H*

Dzięki uzyskiwanym połowym rozkładom składowych odkształcenia system cyfrowej korelacji obrazu doskonale nadaje się do oceny wpływu różnych rodzajów karbów na zachowanie materiału oraz pozwala identyfikować ich wzajemne oddziaływanie. Badaniom mogą być poddawane próbki z naciętymi karbami o różnej geometrii, na przykład z karbami typu U (rys. 13) oraz V (rys. 14).

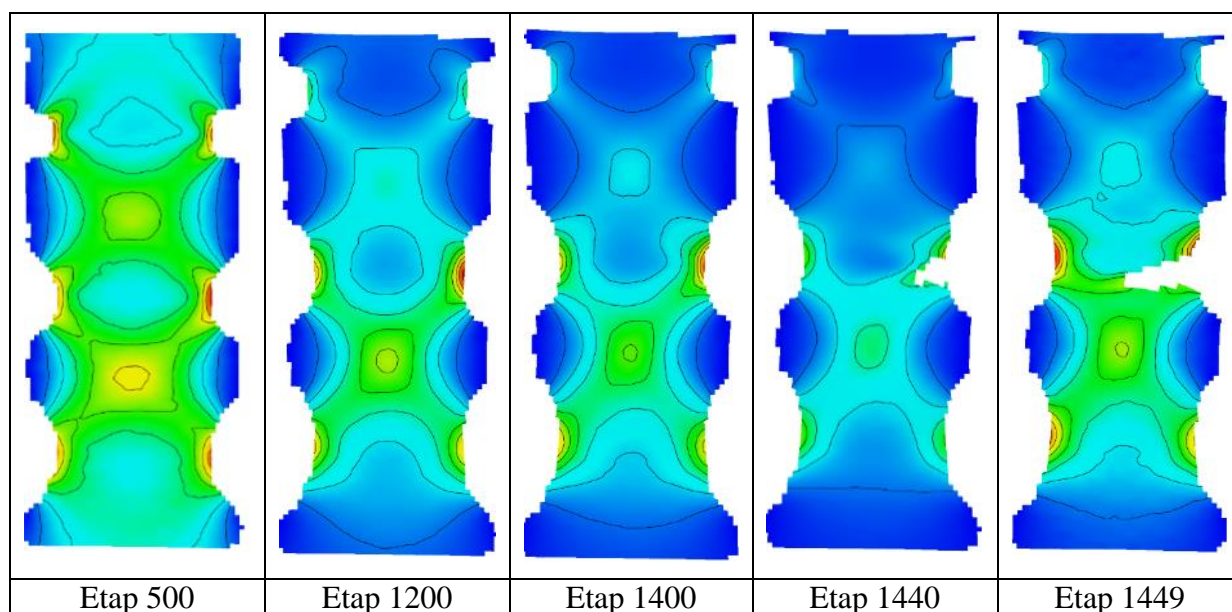
W Instytucie Transportu Samochodowego zrealizowano program badań, w którym oceniano wpływ geometrii karbów typu U oraz V naciętych na próbkach płaskich przeznaczonych do testów rozciągania. W badaniach próbek z karbami typu U uwzględniono trzy wartości promienia dna karbu: 0.75, 1.5 oraz 2.5 mm, przy czym ich głębokość była jednakowa i wynosiła 1.5 mm. Badania pokazały wzajemne oddziaływanie karbów wyraźnie odwzorowane na mapach rozkładu odkształcenia efektywnego liczonego w oparciu o hipotezę HMH na podstawie danych otrzymanych z pomiarów systemem DIC, rys. 13. Przedstawione na tym rysunku rozkłady odkształcenia efektywnego dla różnych etapów zaawansowania testu rozciągania pozwalają dokonać oceny rozwoju degradacji materiału. O ile w początkowym stadium procesu trudno jest wskazać karb, który będzie miejscem rozwoju pęknięcia dominującego (Etap 500), to już w następnych rozpatrywanych etapach wyraźnie widać lokalizację odkształcenia w karbie środkowym o promieniu dna 1.5 mm, która w rezultacie prowadzi do pęknięcia i całkowitego rozerwania rozciąganej próbki. Warto podkreślić fakt, że w chwili inicjacji pęknięcia wzajemna interakcja karbów uległa osłabieniu, rys. 13, etap 1440. Jednak w chwili szybkiej propagacji pęknięcia dominującego, rys. 13, etap 1449, taka interakcja ponownie narastała. Widać zatem, że analiza deformacji próbki przy pomocy systemu DIC Aramis 4M daje zupełnie nowe możliwości oceny poszczególnych faz rozwoju uszkodzenia, ujawniając tendencje, których nie daje się obserwować starszymi technikami, np. metodą tensometryczną.

Program badań obejmował również podobną analizę dla próbek z karbami typu V. W tym przypadku rozpatrywano wpływ rozwarcia karbu na przebieg deformacji przy obciążeniu

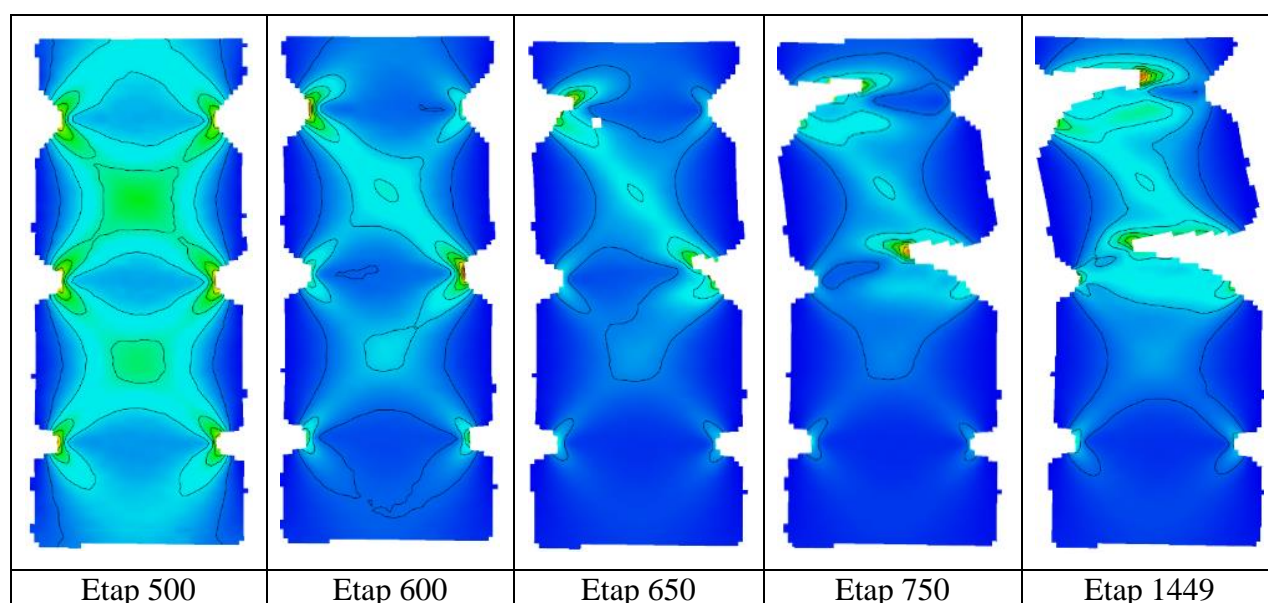


rozciągającym. Na próbkach nacięto karby o kącie rozwarcia 30, 60, 90 stopni, przy czym, tak jak w przypadku karbów typu U, przyjęto jednakową ich głębokość równą 1.5 mm.

Z przedstawionych na rys. 14 rozkładów odkształcenia efektywnego można zaobserwować wiele interesujących faktów, które pozwalają w pełniejszy sposób analizować przebieg deformacji próbki i rozwój jej uszkodzenia. Podobnie, jak w przypadku próbek z karbami typu U, również i tu w początkowej fazie rozciągania trudno jest wskazać miejsce inicjacji uszkodzenia (Etap 500). Już jednak w następnym analizowanym stadium (Etap 600) można zauważyć znaczny wzrost odkształcenia w obszarach bezpośrednio sąsiadujących z dwoma karbami o największych wartościach kąta rozwarcia. W kolejnych rozpatrywanych etapach (Etap 750 i 1449) wspomniany wzrost doprowadza do utworzenia dwóch pęknięć dominujących, które propagując doprowadziły do utraty spójności próbki w dwóch miejscach.



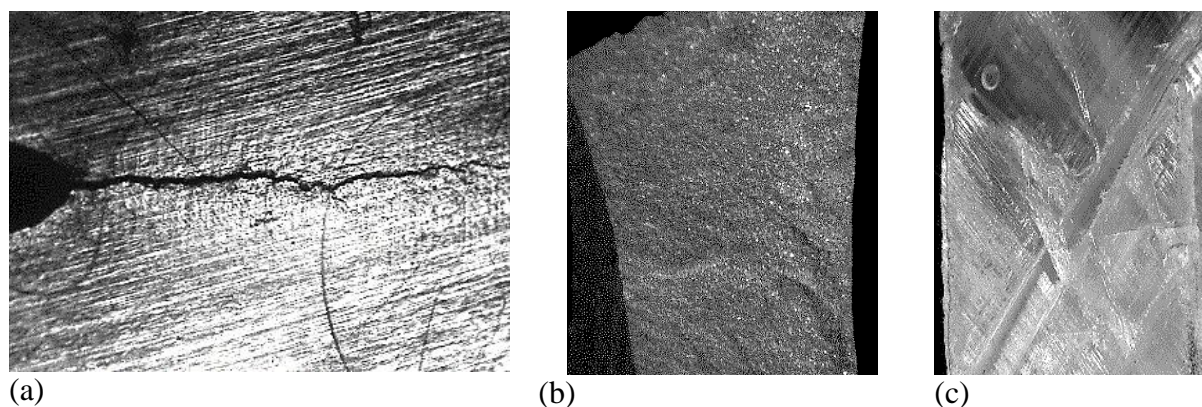
Rys. 13. Powierzchniowe rozkłady odkształcenia efektywnego HMM w różnych etapach rozciągania próbki płaskiej z karbami typu U; materiał stal 40H



Rys. 14. Powierzchniowe rozkłady odkształcenia efektywnego HMM w różnych etapach rozciągania próbki płaskiej z karbami typu V; materiał stal 40H

## 2.6. Micro-DIC w ocenie stref zniszczenia

Niektóre systemy cyfrowej korelacji obrazu poza polowymi rozkładami składowych przemieszczenia lub odkształcenia umożliwiają również obserwacje mikroskopowe. Tak jest na przykład w urządzeniu Micro-DIC Correlated Solution, które wyposażone jest w przystawkę mikroskopową i dzięki temu zapewnia bardziej kompleksową analizę stref zniszczenia badanych próbek. Na rys. 15 zamieszczono przykładowe wyniki obserwacji powierzchni zniszczenia materiałów przy użyciu Micro-DIC. Zdjęcie 15a przedstawia propagację pęknięcia, natomiast zdjęcie 15b identyfikuje cechy przełomu w próbkach kompaktowych stosowanych do oznaczania parametrów mechaniki pęknięcia. Z kolei zdjęcie 15c ilustruje charakterystyczne cechy stref zniszczenia kompozytu epoksydowego zbrojonego włóknem szklanym poddanego jednoosiowemu rozciąganiu.



Rys. 15. Dokumentacja z badań przy użyciu systemu Micro-DIC: (a) rozwój pęknięcia w próbce kompaktowej stosowanej w celu określenia krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia stali 40H; (b) widok stref zniszczenia w przekroju poprzecznym próbki kompaktowej przy wyznaczaniu parametrów mechaniki pęknięcia stali 40H; (c) widok próbki kompozytu epoksydowego zbrojonego włóknem szklanym w trakcie rozciągania zrealizowanego na próbce płaskiej

## 2.7. Uwagi podsumowujące w zakresie możliwości i ograniczeń techniki DIC

Formalną ocenę systemu DIC dokonano w tab. 3, w której podano podstawowe jego zalety i wady oraz typowe zastosowania.

Tab. 3. Ogólna charakterystyka systemu DIC na podstawie własnych badań oraz danych z publikacji [7]

Zalety	Wady	Typowe zastosowania
Bezkontaktowy pomiar	Niska rozdzielczość pomiarowa w porównaniu z techniką interferometryczną (ESPI)	Różne rodzaje materiałów: stale, stopy, kompozyty
Powierzchniowe obrazy przemieszczenia i odkształcenia w testach statycznych i zmęczeniowych	Przygotowanie powierzchni próbki techniką natryskiwania (korzystnie aerografem)	Polowa analiza rozkładów składowych przemieszczenia i odkształcenia
Zakres zastosowania rozpoczynający się od skali nano do większych	Wysoka intensywność i czasochłonność obliczeń w trybie precyzyjnym	Wykrywanie pęknięć i stref akumulacji uszkodzenia

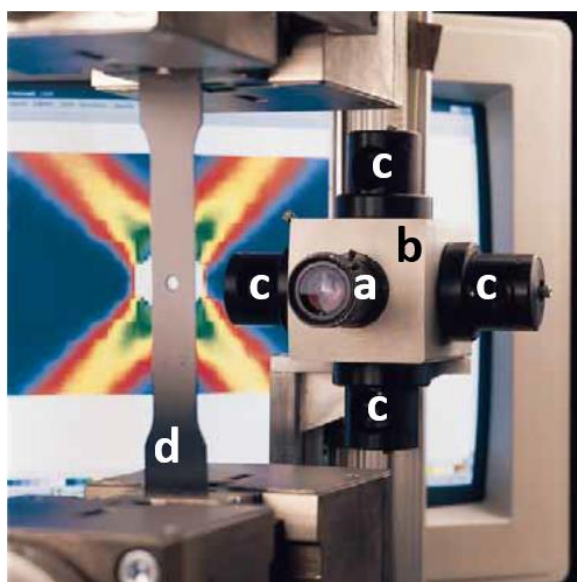


Wyznaczanie charakterystyki materiału i parametrów mechanicznych: $E$ , $R_{e/0.2}$ , $R_m$	W przypadku małych próbek wymaga się wykorzystania dodatkowego oświetlenia	Doświadczalna weryfikacja rezultatów MES
Wyznaczanie przemieszczenia i odkształcenia w dowolnym obszarze strefy pomiarowej	Niewielka powierzchnia pomiarowa w próbce walcowej poddawanej ścisnaniu	Wibracje/analiza modalna
Możliwość wykorzystania tensometrów wirtualnych w postaci dwóch punktów dowolnie rozmieszczonych	Konieczność pozycjonowania elementów systemu zgodnie z tabelą techniczną ustawień urządzenia	Pomiary kształtu
		Walidacja modeli metody elementów skończonych

### 3. System elektronicznej interferometrii plamkowej ESPI

#### 3.1. Uwagi wstępne

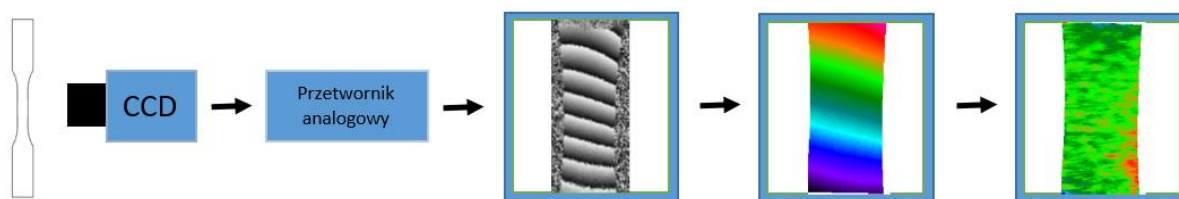
Elektroniczna interferometria plamkowa ESPI (ang. Electronic Speckle Pattern Interferometry) jest nieniszczącą metodą pozwalającą określać rozkłady składowych przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia na powierzchni próbki. Stosowanie jej w trakcie badań zmęczeniowych umożliwia lokalizację miejsca największej koncentracji naprężenia wywołanej defektami próbek oraz pozwala z dużą dokładnością przewidzieć miejsce inicjacji uszkodzenia. Metoda ESPI umożliwia monitorowanie rozwoju deformacji aż do momentu zniszczenia próbki [8]. Typowy układ pomiarowy składa się z kamery CCD umiejscowionej w głowicy systemu, czterech źródeł światła oraz badanej próbki, rys. 16 [9].



Rys 16. Układ pomiarowy systemu ESPI: kamera CCD (a), głowica (b), źródła światła (c), próbka (d) [9]

Uproszczony schemat standardowej procedury pomiarowej przedstawiono na rys. 17. Próbkę o specjalnie przygotowanej, chropowatej powierzchni poddaje się obserwacji za pomocą

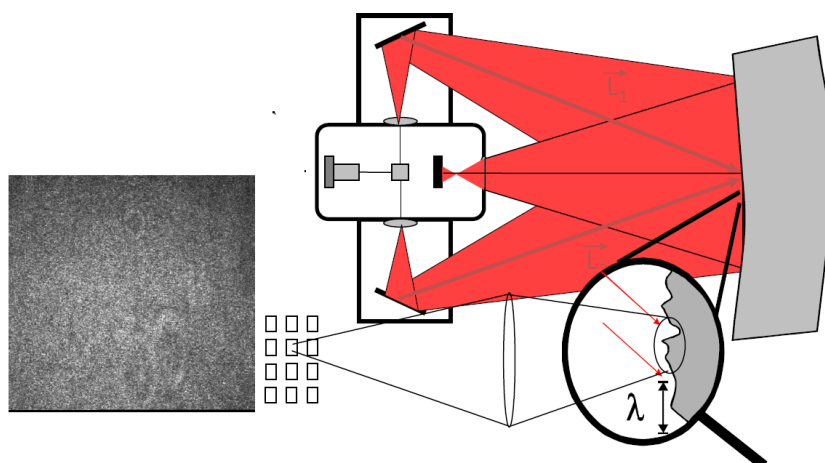
kamery CCD. Wykorzystując przetwornik analogowy uzyskuje się obraz przedstawiający prążki, na podstawie których generuje się mapę fazową badanego materiału. W kolejnych krokach, po przeprowadzeniu obliczeń numerycznych przez oprogramowanie obsługujące system ESPI, uzyskiwane są mapy składowych przemieszczenia i odkształcenia.



Rys. 17. Schemat procedury pomiarowej z wykorzystaniem systemu ESPI

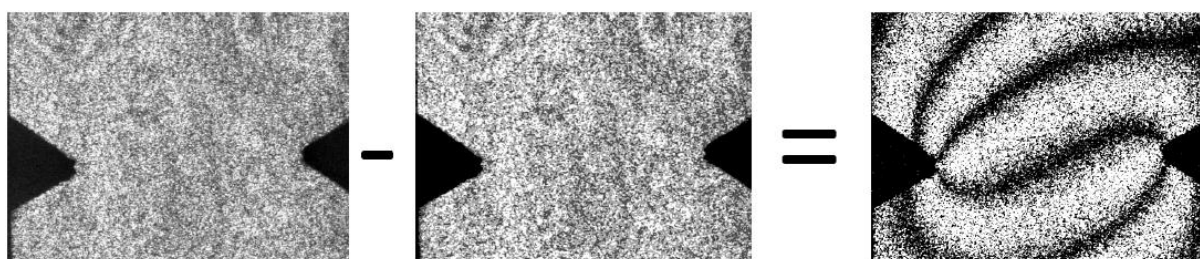
### 3.2. Teoretyczny opis zjawisk

Zasada działania systemu ESPI oparta jest na zjawisku plamkowania. Efekt ten występuje podczas oświetlenia chropowatej powierzchni spójną wiązką promieniowania. W wyniku rozproszenia promieniowania na powierzchni próbki dochodzi do interferencji fal wtórnych, co prowadzi do powstawania charakterystycznych obrazów plamkowych, rys. 18. Ich położenie oraz intensywność ulega zmianie podczas przemieszczeń liniowych i kątowych obiektu [10].



Rys. 18. Schemat powstawania obrazu plamkowego [9]

Prążki uzyskuje się przez porównanie struktur plamkowych materiału niezdeformowanego ze strukturą po deformacji. Rejestrując zmiany przemieszczenia plamek na powierzchni próbki, zapisana ramka referencyjna będąca strukturą odniesienia jest w sposób ciągły odejmowana lub dodawana od obrazu uzyskanego w bieżącym momencie. Powstające prążki identyfikują korelację między przemieszczonymi obszarami na powierzchni badanej próbki, rys. 19.



Rys. 19. Schemat uzyskiwania prążków korelacyjnych [9]

Rozkłady intensywności  $I_0$  i  $I_1$  w obrazach plamkowych przed i po obciążeniu można wyrazić w postaci następujących zależności:

$$I_0 = I_p + I_o + 2\sqrt{I_p I_o} \cos \Psi_s, \quad (8)$$

$$I_1 = I_p + I_o + 2\sqrt{I_p I_o} \cos(\Psi_s + \Delta\phi), \quad (9)$$

gdzie

$I_p$  i  $I_o$  - intensywność wiązki przedmiotowej i odniesienia,

$\Psi_s$  - losowy rozkład różnicy faz między wiązkami,

$\Delta\phi$  - rozkład fazy wprowadzany przez zmianę mierzonej wielkości.

W przypadku uzyskiwania prążków korelacyjnych przez odejmowanie rozkładów intensywności obrazów plamkowych otrzymujemy zależność:

$$I_1 - I_0 = 4\sqrt{I_p I_o} \sin\left(\Psi_s + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \left| \sin \frac{1}{2}\Delta\phi \right|. \quad (10)$$

Różnica ta może przyjmować wartości mniejsze bądź większe od zera, dlatego aby uniknąć ujemnych wartości wyświetlanych jako czarne obszary przeprowadza się rektyfikację sygnału w postaci wyznaczenia absolutnej różnicy intensywności:

$$B = 4K\sqrt{I_p I_o} \left| \sin\left(\Psi_s + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \right| \left| \sin \frac{1}{2}\Delta\phi \right|, \quad (11)$$

gdzie

$K$  jest stałą proporcjonalności,

$B$  oznacza jasność ekranu monitora.

Wynikiem rektyfikacji sygnału jest tło plamkowe modulowane przez ciemne prążki korelacyjne. Zerowe wartości intensywności występują w miejscach, w których człon fazowy  $\Delta\phi$  jest równy  $2\pi$ . Jasne prążki o maksymalnej wartości intensywności  $4K\sqrt{I_p I_o}$  są miejscami geometrycznej zmiany fazy  $\Delta\phi$  równej nieparzystej wielokrotności  $\pi$ .

W przypadku uzyskiwania prążków korelacyjnych przez dodawanie rozkładów intensywności obrazów plamkowych otrzymujemy związek:

$$I_0 + I_1 = 2I_p + 2I_o + 4\sqrt{I_p I_o} \cos\left(\Psi_s + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \cos \frac{1}{2}\Delta\phi. \quad (12)$$

Stopień, w jakim skorelowane są obrazy odpowiada modulacji widzialności plamek określanych jako odchylenie standardowe sygnału. Obszary o maksymalnym i minimalnym kontraście powiązane są następującymi zależnościami:

$$\sigma_{Rmax} = 2\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_o^2 + 2I_p I_o} \quad \text{dla } \Delta\phi = 2n\pi, n=0,1,2; \quad (13)$$

$$\sigma_{Rmin} = 2\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_o^2} \quad \text{dla } \Delta\phi = (2n+1)\pi, n=0,1,2; \quad (14)$$

gdzie

$\sigma_p$  i  $\sigma_o$  - odchylenia standardowe intensywności w obrazach  $I_p$  i  $I_o$ ,

$\sigma_{Rmax}$ ,  $\sigma_{Rmin}$  - maksymalne i minimalne odchylenia standardowe intensywności.

W efekcie końcowym po procesie filtracji w obrazie korelacyjnym wyznaczona jest absolutna wartość intensywności:

$$B = K \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_o^2 + 2I_p I_o \cos^2 \frac{1}{2} \Delta\phi}. \quad (15)$$

Podsumowując można stwierdzić, że metoda odejmowania obrazów plamkowych pozwala uzyskiwać prążki korelacyjne o większym kontraście. Jednak metoda dodawania nie wymaga oddzielnego zapisu obrazu odniesienia, co pozwala na wykorzystanie jej w badaniach drgań lub szybkozmiennych procesów dynamicznych [10].

Po uzyskaniu prążków fazowych możliwa jest generacja map fazowych polegająca na porównywaniu intensywności obrazu referencyjnego z obrazem odpowiadającym kolejnemu etapowi odkształcenia. Intensywność ta wyrażana jest zależnością:

$$I_i(x, y) = I_{0,1}(x, y) + I_{mod,i}(x, y) * \cos(\phi(x, y) + \varphi_i). \quad (16)$$

Uzyskany obraz referencyjny cechuje się rozkładem fazy wprowadzanym przez zmianę mierzonej wielkości pomiędzy kolejnymi obrazami zapisywanym jako:

$$\phi_{ref}(x, y) = \arctan \frac{I_{1,ref}(x,y) - I_{3,ref}(x,y)}{I_{4,ref}(x,y) - I_{2,ref}(x,y)}. \quad (17)$$

Obraz plamkowy uzyskany po obciążeniu materiału uzyskuje się przed dodanie do obrazu referencyjnego zmian intensywności, jakie wystąpiły po jego deformacji:

$$[\phi(x, y) + \Delta(x, y)]_{load} = \arctan \frac{I_{1,load}(x,y) - I_{3,load}(x,y)}{I_{4,load}(x,y) - I_{2,load}(x,y)}. \quad (18)$$

Ostatecznie otrzymuje się mapę fazową, będącą różnicą obrazu po deformacji a obrazu referencyjnego:

$$\Delta(x, y) = [\phi(x, y) + \Delta(x, y)]_{load} - \phi_{ref}(x, y). \quad (19)$$

Aby uzyskać mapy składowych przemieszczenia i naprężenia wykorzystuje się odpowiednie wzory w zależności, czy w materiale występuje płaski stan odkształcenia (wzory 20-23), czy płaski stan naprężenia (wzory 24-27) [11]:

$$\varepsilon_n = 0, \quad (20)$$

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\frac{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2}{2} + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}, \quad (21)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} * \left( \varepsilon_{xx} + \frac{\nu}{(1-\nu)} \varepsilon_{yy} \right), \quad (22)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} * \left( \varepsilon_{yy} + \frac{\nu}{(1-\nu)} \varepsilon_{xx} \right), \quad (23)$$

$$\sigma_n = 0, \quad (24)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(1-\nu^2)} * (\varepsilon_{xx} + \nu * \varepsilon_{yy}), \quad (25)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{(1-\nu^2)} * (\varepsilon_{yy} + \nu * \varepsilon_{xx}), \quad (26)$$



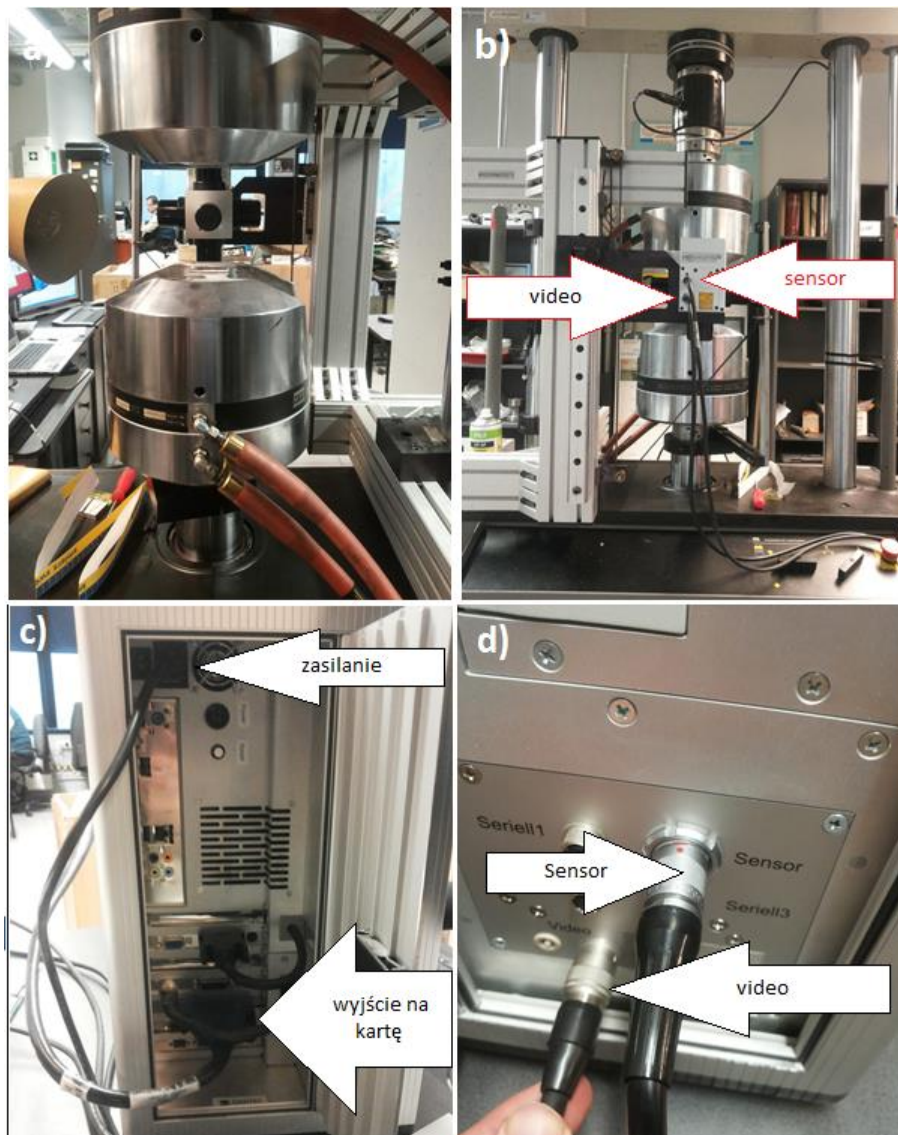
$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + (\tau)^2}. \quad (27)$$

### 3.3. Procedura badawcza dla systemu ESPI

Aby przystąpić do badań z wykorzystaniem metody ESPI należy przygotować próbkę, stanowisko (serwo-hydrauliczna lub elektro-mechaniczna maszyna wytrzymałościowa) oraz aparaturę pomiarową zgodnie z poniżej opisanymi zasadami.

#### 3.3.1. Przygotowanie aparatury badawczej

Kamerę wraz ze stelażem należy zamocować na wsporniku oraz dolnym tłoku ustawiając obiektyw w osi próbki, rys. 20 a i b. Z kamery wyprowadzone są dwa przewody (video i sensor) (rys. 20b), które podłączane są do stacji kontrolera (rys. 20d). Z komputera wyprowadzone jest wyjście na kartę, do którego można podłączyć za pomocą wejścia „Channel 1”, kartę sterującą sygnałami maszyny wytrzymałościowej (rys.20c). Pozostałe połączenia należy wykonać w sposób pokazany na rys. 20.



Rys. 20. Ustawienie aparatury badawczej (a,b), tylni panel stacji kontrolera (c), panel przedni stacji kontrolera (d)

### 3.3.2. Przygotowanie maszyny wytrzymałościowej oraz próbki

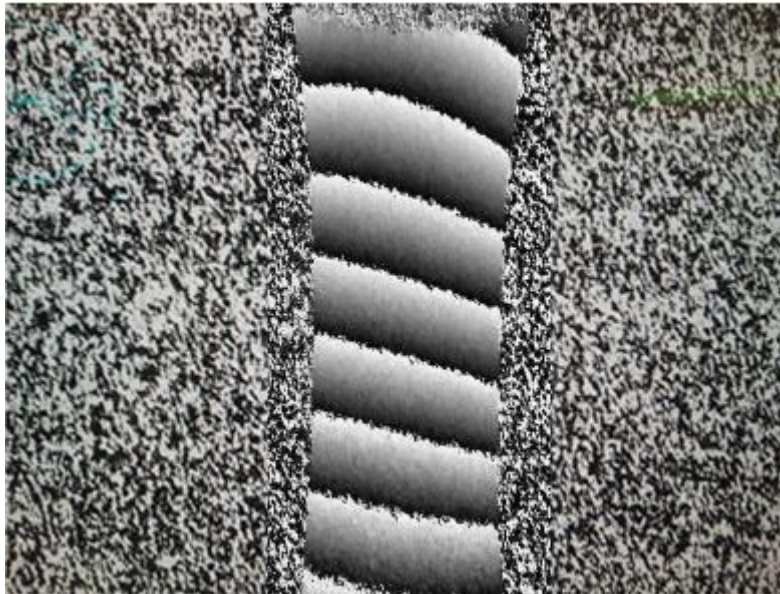
Po włączeniu kontrolera maszyny wytrzymałościowej oraz komputera sterującego maszyną należy uruchomić program „Station manager”. Mając możliwość sterowania tłoczyskiem siłownika należy osiowo umieścić wcześniej zmierzoną próbkę (wymiary potrzebne do obliczenia pola przekroju) w uchwytach maszyny wykorzystując poziomiec. Osiowe ustawienie próbki może być sprawdzone również przy pomocy kamery oraz programu do obsługi ESPI, tj. tworząc za pomocą programu ISTRĄ ramkę prostokątną, której boki będą pokrywały się z krawędziami próbki. Próbka mocowana jest przez zaciskanie wkładek – najpierw dolnej za pomocą ręcznego przełączenia kontrolera stojącego przy maszynie, a następnie górnej za pomocą przejścia w oknie Manual Command w Control Mode ustawionym na Force i natychmiastowym przełączeniu kontrolera obok maszyny na zacisk. Zaciskanie próbki odbywa się w trybie sterowania przemieszczeniem (Displacement), po czym należy przełączyć w tryb sterowania siłą (Force) prowadząc jednocześnie obserwację zmian wartości siły. Następnym etapem jest odciążenie próbki. Próbka powinna być zaciśnięta we wkładkach uchwytów maszyny, korzystnie przy ciśnieniu o wartości 4000 bar. Po osiowym ustawieniu próbki należy nałożyć na jej warstwę pomiarową cienką warstwę wywoływacza na bazie rozpuszczalnika w taki sposób, by utworzyć na niej chropowatą powierzchnię umożliwiającą rejestrację składowych przemieszczenia w trakcie kolejnych cykli zmęczenia.

### 3.3.3. Wykonanie pomiaru za pomocą programu ISTRĄ

Po zdjęciu przesłan z obiektywu oraz 4 pozostałych kamer należy uruchomić program ISTRĄ. Pomiar przeprowadzamy według następujących kroków:

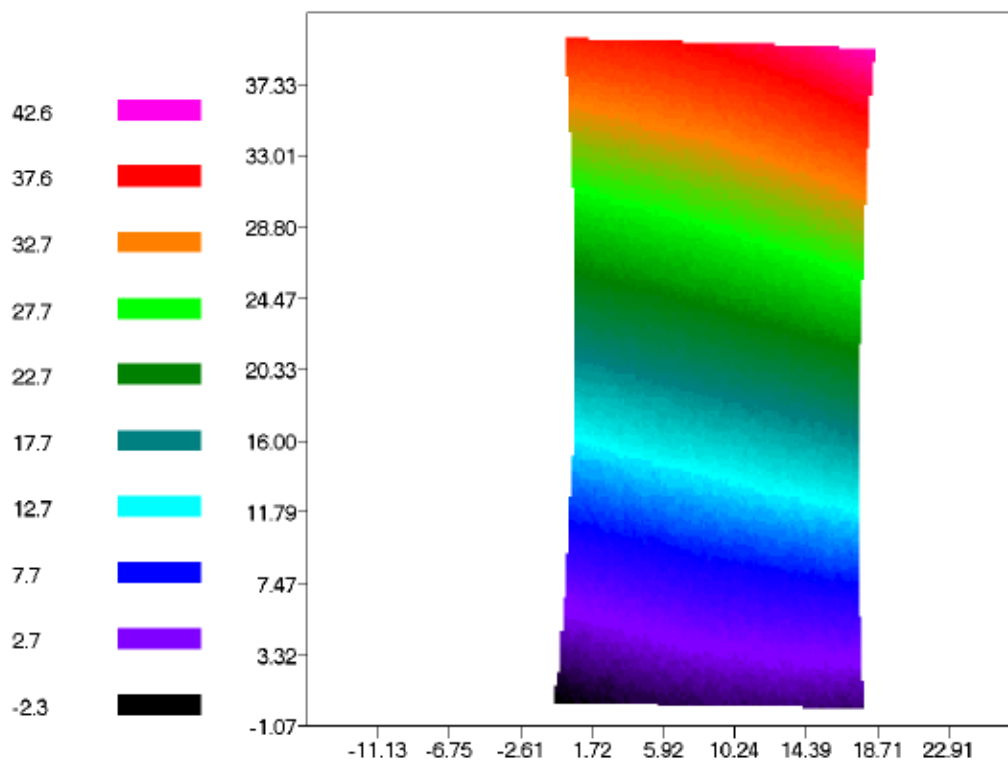
1. *Measurement* -> *Live image* – aby uzyskać podgląd próbki w czasie rzeczywistym;
2. *Measurement* -> *Capture image* – aby przechwycić zdjęcie próbki do okna „Border editor”;
3. Za pomocą okna „Border editor” otworzyć już istniejącą ramkę poleceniem *Load frame*, bądź stworzyć nową przy użyciu znaków graficznych (rectangle, line, bądź inne). Ważne jest ustawienie *Set upper left corner* i *Set lower right corner* tak, aby znaczniki znajdowały się w narożnikach utworzonej ramki. Parametry ramki należy zapisać, aby móc z niej korzystać w późniejszych krokach. Ramka powinna obejmować, jak największy obszar strefy pomiarowej próbki;
4. W ustawieniach *Settings* -> *Storage Directory* należy wybrać docelowy folder zapisywania plików wynikowych. Najlepiej dla każdego cyklu stworzyć folder przed rozpoczęciem badania, przykładowo: 1 cykl, 2 cykl, 10001 cykl, 100002cykl;
5. Wykonać pomiar przy pomocy komend *Measurement* -> *Record series*, a następnie akceptując każdy kolejny krok aż do zakresu wytrzymałości próbki;
6. Za pomocą okna Manual Command i zaznaczeniu okna *Enable Manual Command* oraz *control mode Force\_810* należy dokonywać zmian siły w określonym zakresie i kroku oraz prowadzić ich rejestrację przy pomocy programu ISTRĄ;
7. Po przeprowadzeniu odpowiedniej liczby etapów w należy zakończyć rejestrowanie pomiaru komendą *Abort*, w oknie Manual Command (sterowanie maszyną wytrzymałościową) ustawić wartość siły Force na zero oraz sprawdzić prawidłowość pomiaru, tzn. czy przy każdej zmianie siły zarejestrowano poziome prążki świadczące o przemieszczeniu w trakcie zadawania siły przy użyciu komend *Measurement* -> *Evaluate series* -> *OK*. Prawidłowo wykonany krok ilustruje rys. 21;





Rys. 21. Prążki interferencyjne rejestrowane podczas zadawania siły obciążającej w kolejnym kroku zmęczenia

8. Uzyskane pomiary należy wywołać za pomocą komend *Stress -> Stress/strain calculation -> Plane stress -> OK* (wpisując wcześniej odpowiedni dla badanego materiału moduł Younga  $E$  oraz współczynnik Poissona  $\nu$  oraz zaznaczając opcję *Maximum Shear Strain Energy (Mises) Criterion*) a następnie *Stress -> Stress/strain visualisation -> Tangential Strain along Direction 1 oraz 2*. W efekcie uzyskuje się rozkład przemieszczenia na powierzchni próbki (rys. 22)



Rys. 22. Polowy rozkład przemieszczenia na powierzchni pomiarowej próbki płaskiej

9. Uzyskane wyniki dla kierunku osi Y można eksportować przy użyciu następujących opcji: *Edit* -> *Save* - zapis w formie obrazka; *Print* -> *PDF Creator* - zapis zdjęć w formie pliku pdf; *Data* -> *Other*-> *ASCII Export* -> *All* - zapis danych w kodzie Ascii w celu dalszego przetwarzania otrzymanych danych w programie MATLAB;
10. Na tym etapie należy przeprowadzić kolejny pomiar przemieszczenia w całym zakresie obciążenia w celu sprawdzenia poprawności wyniku z poprzedniego kroku i możliwości porównania go z rezultatem pomiaru właśnie dokonanego;
11. Przejście do programu „Station manager”. W programie tym należy trzymać się następujących reguł:
  - W oknie *Detectors* dobrać i uaktywnić odpowiednie limity sygnałów sterujących, tzw. *Interlocki*, które zabezpieczają próbkę i maszynę przed zniszczeniem.
  - Zaznaczyć opcję “Enable Manual Command” w oknie Manual Command, a w programie “Station manager” za pomocą komendy Applications-> *MultiPurpose TestWare* otworzyć okno MPT.
  - Wybrać zaprojektowany program do pomiarów zmęczeniowych “zmczenie.000” a następnie klikając ikonę *Procedure editor* dobrać odpowiednie parametry (tj. siłę maksymalną, jej amplitudę oraz zaznaczyć kompensatory dla prawidłowej rejestracji przebiegu zmęczenia).
  - W oknie „Specimen” wpisać nazwę próbki wraz z jej numerem, siłą maksymalną, liczbą cykli i wymiarem, przykładowo:  
KZ40\_007\_650MPa\_100001-200001\_14.01x4.06
  - Rozpocząć proces przy pomocy komendy „Program run”.
  - Po zakończeniu określonej liczby cykli przeprowadzić ponownie pomiar składowych przemieszczenia na powierzchni próbki rejestrując każdorazowo rozmieszczenie prążków interferencyjnych na powierzchni próbki w trakcie zadawania obciążenia.

### 3.3.4. Opracowywanie danych w programie MATLAB

Po uruchomieniu aplikacji MATLAB należy wczytać plik danych z wykonanego testu w celu ustalenia faktycznego rozmiaru macierzy z danymi eksportowanymi z programu ISTR. Należy dokonać tego komendą:

```
>>load p-liczba_cykli-OdkY.txt
```

Po ustaleniu współrzędnych komórek zawierających dane należy utworzyć macierz składającą się jedynie z takiej ich postaci, która potrzebna jest do prezentacji wyników (czyli pozbycie się zer oraz po 5 wierszy z dołu i z góry macierzy w celu wyeliminowania błędów wynikających z akwizycji danych w programie ISTR). Kolejnymi krokami są komendy:

```
>>load p-liczba_cykli-OdkY.txt – wczytanie pliku,
```

```
>>p1= p-liczba_cykli-OdkY (X:Y; X:Y) – przypisanie zmiennej p1 pliku .txt, gdzie X, Y są współrzędnymi obrazującymi punkty ekstremalne macierzy, typowo (6:250;101:155) powodując wywołanie pożądaných wartości macierzy,
```

```
>>surf(p1)
```

>>image (p1), axis equal – wywołanie wykresów graficznych.

Po otrzymaniu wykresu graficznego należy go edytować poprzez dwukrotne kliknięcie w strefę próbki po zaznaczeniu opcji „Cursor”, a następnie w dolnym oknie zaznaczyć opcję „Axis image”. Następnie należy wywołać skalę klikając ikonę „Scale” na pasku zadań.

Aby uzyskać obraz graficzny jak najlepiej odzwierciedlający przemieszczenia należy zmienić ustawienia kolorów poprzez opcję: *Edit* -> *Colormap* -> *Jet*. Z tego samego okna należy odczytać wartości maximum i minimum skali w celu późniejszej walidacji po zakończeniu obróbki danych ze wszystkich cykli zmęczeniowych, tak aby dobrać jednakową skalę dla wszystkich zbadanych przebiegów.

Wykres graficzny należy zapisać w pliku .jpg oraz .fig w celu możliwości ewentualnej edycji.

W końcowej fazie opracowywania wyników następuje wybór wartości minimalnej i maksymalnej ze wszystkich analizowanych cykli zmęczeniowych w celu doboru jednakowej skali dla każdego, pojedynczego wyniku. Dzięki edycji pliku .fig oraz opcji *Edit* -> *Colormap* -> *Jet* należy wprowadzić nowe wartości min i max dla każdego cyklu.

### 3.4. Przykłady wyników otrzymanych z prób przy użyciu systemu ESPI

Częstym celem współczesnych badań mechanicznych jest sprawdzenie możliwości wykorzystania optycznych metod wyznaczania rozkładów pól przemieszczenia i odkształcenia do wyznaczenia wybranych parametrów mechanicznych, względnie do oceny rozwoju uszkodzeń struktury, generowanych na przykład obciążeniami cyklicznymi prowadzącymi do zmęczenia próbki, w całym uprzednio zdefiniowanym obszarze pomiarowym. Pomiar rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych metodą interferometrii plamkowej przy pomocy laserowej kamery ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) firmy Dantec zapewniają sekwencyjny pomiar trzech składowych przemieszczenia próbki: składowej wzdłuż długości próbki  $u_y$ , składowej wzdłuż jej szerokości  $u_x$  oraz składowej prostopadłej do płaszczyzny próbki  $u_z$ . Pomiaru ostatniej w wymienionych składowych w próbkach płaskich dokonuje się opcjonalnie.

Jak już wspomniano, system pomiarowy ESPI może być wykorzystywany do określania różnych parametrów mechanicznych materiałów, np. modułu Younga. Badania takie przeprowadził zespół Vial-Edwards'a [12] testując miedziane blachy. W przypadku wyznaczania współczynnika sprężystości porównywano wyniki uzyskane za pomocą systemu ESPI z wynikami pomiarów otrzymanych z użyciem standardowego ekstensometru mechanicznego. Różnice nie przekraczały 10% (tab. 4) [12].

Tabela 4. Wartości modułu Younga w zależności od kierunku pobierania próbek i rodzaju metody wykorzystanej do jego określenia [12]

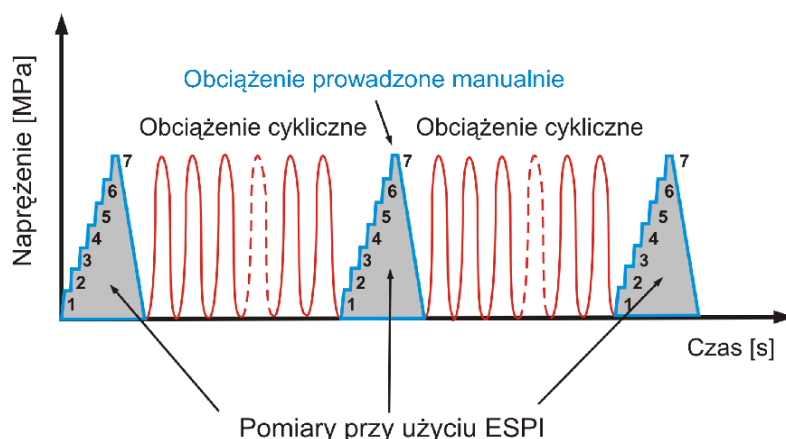
Kierunek pobierania próbki [°]	Moduł Younga określony przy wykorzystaniu	
	Ekstensometru [MPa]	ESPI [MPa]
0	98,4	102,5
45	113,2	132,5
90	112,0	112,2

Innym przykładem zastosowania systemu ESPI stanowi określenie lokalizacji uszkodzeń powstających w trakcie próby zmęczeniowej [8]. Próbki poddawano cyklicznemu rozciąganiu o wartości amplitudy naprężenia 100 MPa (64% granicy plastyczności badanego materiału – porowaty silumin) przy użyciu serwohydraulicznej maszyny wytrzymałościowej. Po osiągnięciu przez materiał określonej liczby cykli (tj.: 1, 2, 3, 5, 1000, 25 000, 100 000,

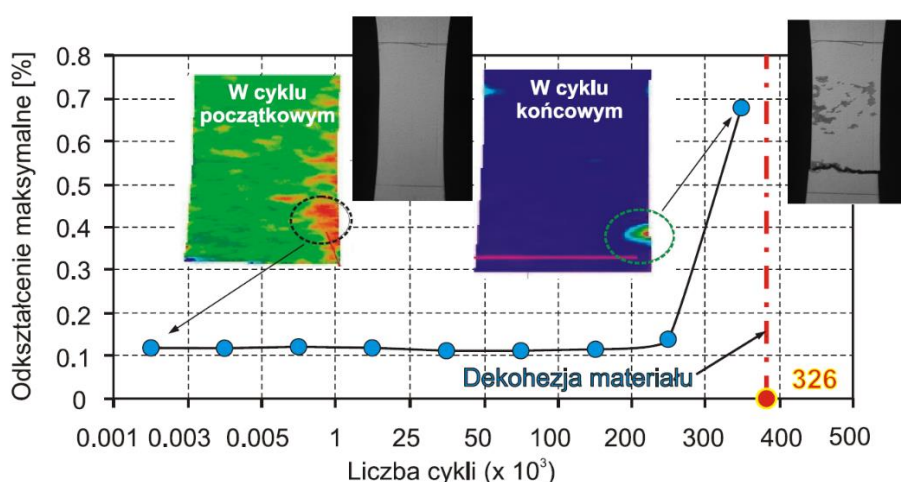
200 000 oraz 300 000) materiał odciążano, a następnie stopniowo obciążano do siedmiu poziomów siły (od 1,2kN do 7,2kN ze skokiem 1kN, co dla największej wartości siły odpowiadało naprężeniu o wartości 100 MPa) (rys. 23).

Z uwagi na występujące drgania układu znacznie przewyższające dokładność pomiarową systemu ESPI (wynikające z hydraulicznego zasilania maszyny wytrzymałościowej), w trakcie badań użyto zaprojektowanego w IPPT PAN hydraulicznego układu do statycznego obciążania próbki, eliminującego problem drgań zakłócających pracę systemu ESPI.

W trakcie prowadzenia badań na powierzchni próbki (rys. 24) obserwowano zmiany składowych przemieszczenia występujące od pierwszego aż do ostatniego 325 642 cyklu, w którym nastąpiło pęknięcie próbki, widoczne na mapach odkształcenia sporządzonych dla kierunku zgodnego z kierunkiem działania siły osiowej (kierunek „y”). Mapy zmian składowej odkształcenia w kierunku osi y (rys. 25) przedstawiają proces rozwijania się deformacji wokół ogniska zmęczeniowego. W celu określenia ilościowego przyrostu odkształcenia w kolejnych etapach obciążania rozciągającego dla wszystkich przeprowadzonych pomiarów wyznaczono rozkład składowej odkształcenia w kierunku osi y.



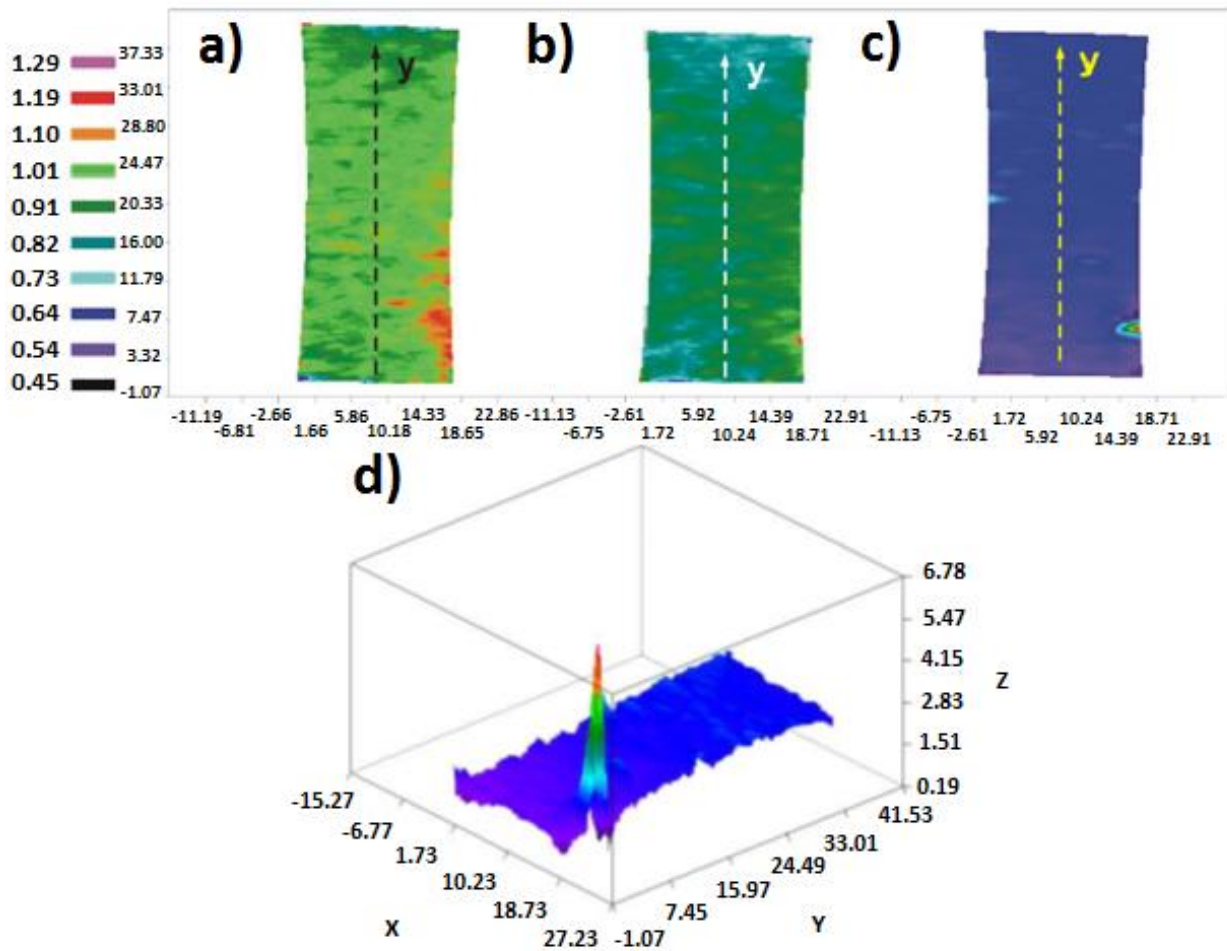
Rys. 23. Schemat przyjętej procedury obciążania w testach z użyciem systemu ESPI w trakcie badań zmęczeniowych [8]



Rys. 24. Rozwój pęknięcia w materiale wraz z uwidocznionym miejscem dekohezji [8]

Z rys. 24 przedstawiającego zmianę wartości maksymalnego odkształcenia w funkcji liczby cykli wynika, że lokalne wartości odkształcenia w zakresie liczby cykli w przybliżeniu

równej 200 000 pozostawały praktycznie niezmiennie. Dopiero po przekroczeniu tej liczby cykli następował gwałtowny wzrost odkształcenia generowany zainicjowanym pęknięciem, które powodowało zniszczenie materiału w cyklu o numerze 325 642.

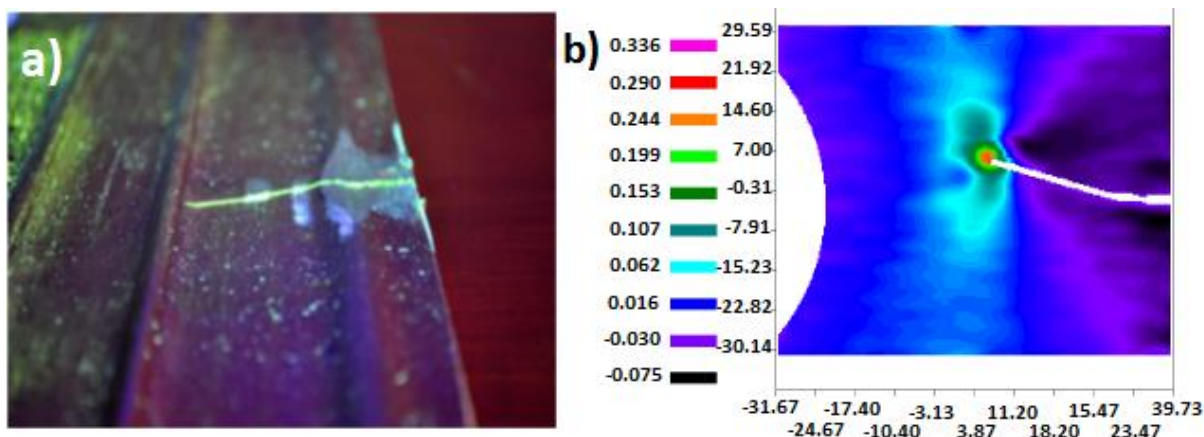


Rys. 25. Mapy rozkładu składowej odkształcenia dla kierunku osi y: po 1 cyklu (a), po 200 000 cykli (b), po 300 000 cykli (c,d) [8]

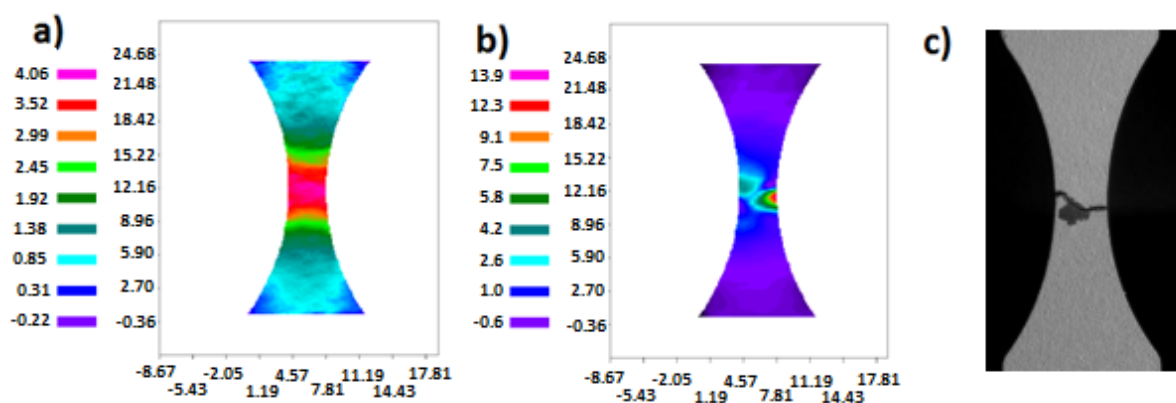
Badania systemem ESPI przeprowadza się aktualnie dla różnych materiałów i wielu elementów konstrukcyjnych stosowanych między innymi w lotnictwie lub kolejnictwie. Przykładem może być fragment testowanej łopaty śmigłowca (rys. 26a) zawierający pęknięcie w kierunku prostopadłym do jego osi wzdłużnej. Przeprowadzona analiza pozwoliła określić miejsca występowania największych wartości naprężenia (rys. 26b).

Badaniom poddano również stal P54T stosowaną w kolejnictwie. W tym celu wytworzono próbki klepsydryczne i poddano je procesowi zmęczenia. Tego rodzaju próbki stosowane są często w celu wymuszenia lokalizacji uszkodzenia w najsłabszym jej punkcie. Początkowy pomiar wykazał zgodnie z oczekiwaniami koncentrację naprężenia i jednocześnie lokalizację odkształcenia w części roboczej próbki, rys. 27a. Pomiar ESPI przeprowadzone po wykonaniu 37 500 cykli uwiaryściły miejsca o największej kumulacji odkształcenia i wskazały miejsce rozwoju potencjalnego pęknięcia dominującego, rys. 27b. Materiał poddany dalszemu obciążeniu zmęczeniowemu uległ zniszczeniu po 42 221 cyklach, pękając dokładnie w miejscu wynikającym z danych zebranych przez system ESPI, rys. 27c.





Rys. 26. Fragment łopaty śmigłowca z widocznym pęknięciem poprzecznym (a), pole ilustrujące rozkład odkształcenia w wierzchołu pęknięcia i jego bezpośrednim otoczeniu (b)



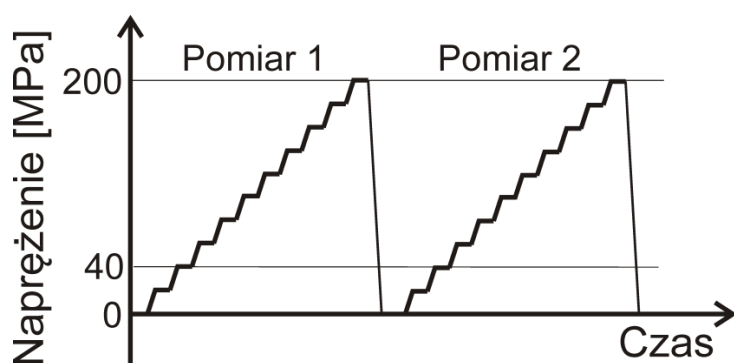
Rys. 27. Rozkłady odkształcenia w próbce klepsydrycznej wykonanej ze stali P54T poddanej procesowi zmęczenia po 1 cyklu (a), po 37 500 cyklach (b), oraz widok pękniętej próbki po 42 221 cyklach (c)

Bardzo obszerny program badań z wykorzystaniem systemu ESPI został ostatnio zrealizowany w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w celu dokonania analizy uszkodzenia pod wpływem obciążeń zmęczeniowych nowoczesnych kompozytów o matrycy metalowej [13]. W programie tym pomiary rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych realizowano metodą interferometrii plamkowej przy pomocy laserowej kamery ESPI firmy Dantec. Należy podkreślić, że pomiary składowej prostopadłej do płaszczyzny próbki  $u_z$  są w metodzie ESPI realizowane w innym układzie optycznym w porównaniu do pomiarów składowych przemieszczenia w płaszczyźnie próbki i są w większym stopniu narażone na wpływ drgań całego układu pomiarowego. Uwzględniając ten fakt ograniczono pomiary do dwóch składowych przemieszczenia w płaszczyźnie próbki, wyłączając z sekwencji pomiarowej składową prostopadłą do płaszczyzny próbki  $u_z$ .

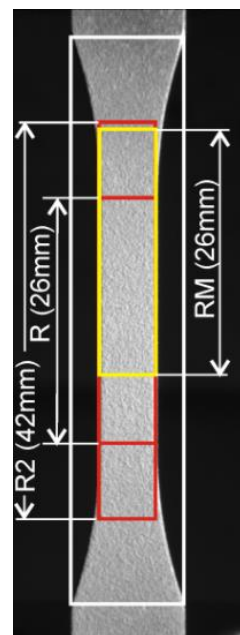
Badany materiał kompozytowy wzmocniony cząstkami węgla krzemowego (wielkość cząstek  $3\mu\text{m}$ , względnie  $0,6\mu\text{m}$ ) o różnej zawartości procentowej na osnowie stopu aluminium o symbolu AA2124 jest ze swej natury niejednorodny i stąd również proces rozwoju uszkodzeń pod wpływem obciążeń zmiennych w zakresie zmęczenia był niejednorodny. Wykorzystanie polowej metody pomiarów rozkładów składowych przemieszczenia stwarza szansę określenia parametru wskazującego na rozwój uszkodzeń



zmęczeniowych (fatigue damage indicator parameter). Z wielu różnych metod optycznych rozwijanych w ostatnim czasie w wielu laboratoriach badawczych metoda interferometrii plamkowej (ESPI) oferuje najlepszą czułość pomiarową. Rozdzielczość w odniesieniu do odkształcenia jest zależna od zastosowanego układu optycznego kamery i jej pola obserwacji, ale przyjmuje się, że może być lepsza niż  $10^{-5}$ . Wykorzystanie takich możliwości pomiarowych obwarowane jest wysokimi wymaganiami dotyczącymi sposobu prowadzenia badań, zwłaszcza w zakresie eliminacji możliwych zakłóceń, takich jak drgania układu obciążającego próbkę, czy zaburzeń warunków brzegowych powodujących brak osiowości przykładowych obciążeń zewnętrznych. Analiza wyników pomiarów powinna więc również umożliwiać ocenę poprawności warunków brzegowych zamocowania i obciążania próbki.



Rys. 28 Schemat obciążania próbki w dwóch kolejnych pomiarach rozkładów przemieszczenia na powierzchni próbki z wykorzystaniem techniki ESPI



Rys.29. Próbką stosowana w pomiarach ESPI z zaznaczonymi ramkami pomiarowymi i obliczeniowymi

Przyjęta procedura wyznaczania rozkładów przemieszczenia i odkształcenia na powierzchni próbki poddanej uprzednio obciążeniom cyklicznie zmiennym polegała na statycznym obciążaniu próbki w zakresie sprężystym do wartości siły 7 kN, co odpowiadało dla nominalnego przekroju próbki  $6 \times 6 = 36 \text{ mm}^2$  naprężeniu 194.4 MPa. Obciążenie przykładano schodkowo w 14 etapach, co 500 N i w każdym etapie kamera wykonywała automatycznie sekwencję zdjęć kolejno przy oświetleniu laserowym wzdłuż długości próbki i wzdłuż jej szerokości.

Zarejestrowane mapy fazowe w kolejnych 14 etapach stanowiły punkt wyjścia do obliczeń rozkładów składowych przemieszczenia  $u_y$  i  $u_x$  wywołanych obciążeniem 7 kN w całym polu obserwacji kamery, określonym prostokątną ramką o wymiarach około 5 mm na około 30 mm. Szerokość ramki była mniejsza od szerokości próbki (6 mm), aby ograniczyć brzegowe zaburzeń wynikające z nierówności powierzchni bocznych próbki, jak i z numerycznych procedur różniczkowania dla punktów brzegowych. Pomiarów pól przemieszczenia powtarzano co najmniej dwukrotnie dla każdego stanu próbki określonego liczbą cykli obciążeń zmęczeniowych. Schemat obciążania próbki przy wyznaczaniu rozkładów składowych przemieszczenia w płaszczyźnie próbki przed rozpoczęciem obciążeń zmęczeniowych, jak i po określonej liczbie cykli przedstawiono na rys. 28.

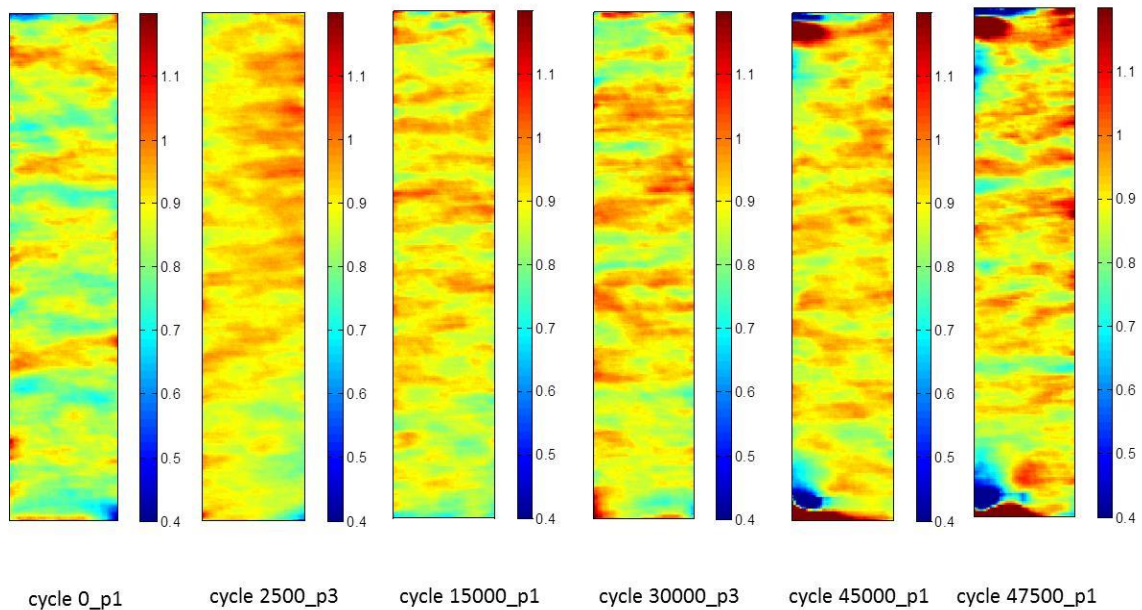
Bezpośrednim wynikiem pomiarów ESPI są fotografie interferencyjnych obrazów fazowych. Uzyskuje się je przez nałożenie kolejnych obrazów przy zadanym obciążeniu w odniesieniu do obrazu referencyjnego uzyskanego przy zerowym obciążeniu w przyjętej procedurze pomiarowej (rys. 28). Fotografie interferencyjnych obrazów fazowych ograniczone są polem widzenia kamery ESPI i zwykle obejmują większy obszar od pola ramki pomiarowej zdefiniowanej przed pomiarami i oznaczonej na rys. 29 literą R. Zdefiniowana ramka miała długość 26 mm i obejmowała cały zakres pomiarowy próbki od początku dolnego promieniowego łuku łagodnego przejścia w kierunku dolnej części chwytowej próbki do początku górnego promieniowego łuku łagodnego przejścia w kierunku górnej części chwytowej próbki. Rozkład składowej przemieszczenia  $u_y$  i rozkład składowej przemieszczenia  $u_x$  był obliczany bezpośrednio z fotografii interferencyjnych obrazów fazowych dla przyjętej ramki obliczeniowej, która mogła pokrywać się ze zdefiniowaną przed pomiarem ramką pomiarową R (rys. 29) lub mogła być obliczona dla innej ramki obliczeniowej zdefiniowanej przed rozpoczęciem analizy. Wprowadzono warunek, aby ramka obliczeniowa nie wychodziła poza obszar zdjęć interferencyjnych. Analizę zmiany rozkładów składowych przemieszczenia i odkształcenia pod wpływem obciążeń cyklicznych przeprowadzono dla takich samych ramek obliczeniowych, jak ramki pomiarowe, ale w kilku przypadkach przyjęto ramki obliczeniowe R2 (rys. 29), które były większe od ramek pomiarowych, lub ramki obliczeniowe RM (rys. 29) o jednakowej długości, jak ramki pomiarowe, ale przesunięte wzdłuż długości próbki.

Rozkład składowych odkształcenia w polu pomiarowym próbki był obliczany poprzez numeryczne różniczkowanie odpowiednich składowych przemieszczenia. Procedura ta jest zdefiniowana w programie ISTRa, a jej wynik jest zależny od przyjętego, sztywnego podziału długości ramki obliczeniowej na 256 elementów obliczeniowych. Wartości odkształcenia są więc zależne od przyjętej ramki obliczeniowej, ale miejsca występowania wartości ekstremalnych, maksymalnych lub minimalnych powinny się pokrywać dla różnych ramek obliczeniowych.

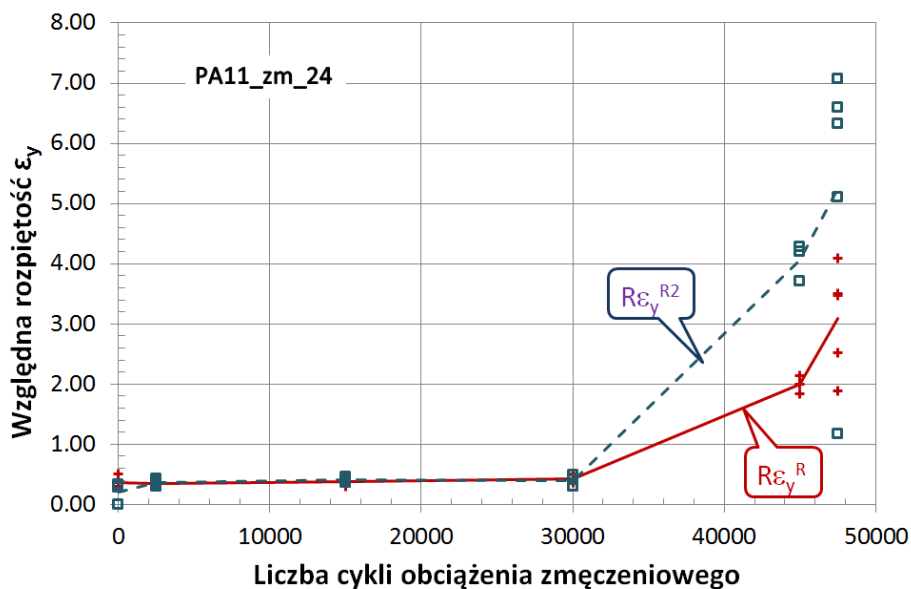
Reprezentatywny wynik przedstawiający możliwości systemu ESPI w zakresie śledzenia uszkodzeń podczas procesu zmęczenia ilustruje rys. 30. W początkowej fazie procesu rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych obserwuje się umacnianie materiału w obszarach słabszych i powiększanie się obszarów o większych wartościach odkształcenia (porównaj obraz początkowy dla cyklu 0 i po 2500 cykli). Dalej widać ciągłe zmiany obszarów słabszych o większych wartościach czynnej składowej odkształcenia i obszarów mocniejszych o mniejszych wartościach czynnej składowej odkształcenia, aż do utworzenia się dominujących, silnych lokalizacji odkształcenia reprezentowanych przez bordowe obszary od lewej strony w dolnej i górnej części pola pomiarowego, oznaczające mikro-pęknięcia utworzone pod ostrymi zakończeniami nóżek ekstensometru po osiągnięciu 45000 cykli obciążenia. Wskazane miejsca lokalizacji rozwijały się momentu powstania pęknięć dominujących, które prowadziły do zmęczeniowego rozerwania próbki po wykonaniu 48850 cykli obciążenia.

Przestrzenne rozkłady czynnej składowej odkształcenia  $\epsilon_y$  po obciążeniu w sekwencji pomiarowej ESPI wywołującym naprężenie  $\sigma_y=200$  MPa i po wykonaniu kolejnych cykli zmęczeniowych z zadaną amplitudą naprężenia wskazują na lokalny charakter uszkodzeń wywołanych obciążeniami cyklicznymi. Miejsca słabsze o zdegradowanej strukturze wskutek uszkodzeń zmęczeniowych i miejsca mocniejsze o strukturze umocnionej wskutek lokalnych odkształceń plastycznych, uwidocznione odpowiednio przez największe i najmniejsze odkształcenia wywołane statycznym naprężeniem  $\sigma_y=200$  MPa, w każdym etapie pomiarowym zmieniają swoją lokalizację. Ten mechanizm lokalnego rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych w różnych miejscach próbki utrudnia obserwacje zmian struktury

zachodzących pod wpływem obciążeń zmęczeniowych, zwłaszcza w przypadkach zastosowania metod pomiarowych uśredniających wyniki dla większych objętości materiału.



Rys. 30. Rozkłady czynnej składowej odkształcenia  $\varepsilon_y$  dla próbki PA11 przed obciążeniem zmęczeniowym i po 2500, 15000, 30000, 45000 i 47500 cyklach obciążenia o amplitudzie  $\sigma_a=150\text{MPa}$  uzyskane przy pomocy kamery ESPI

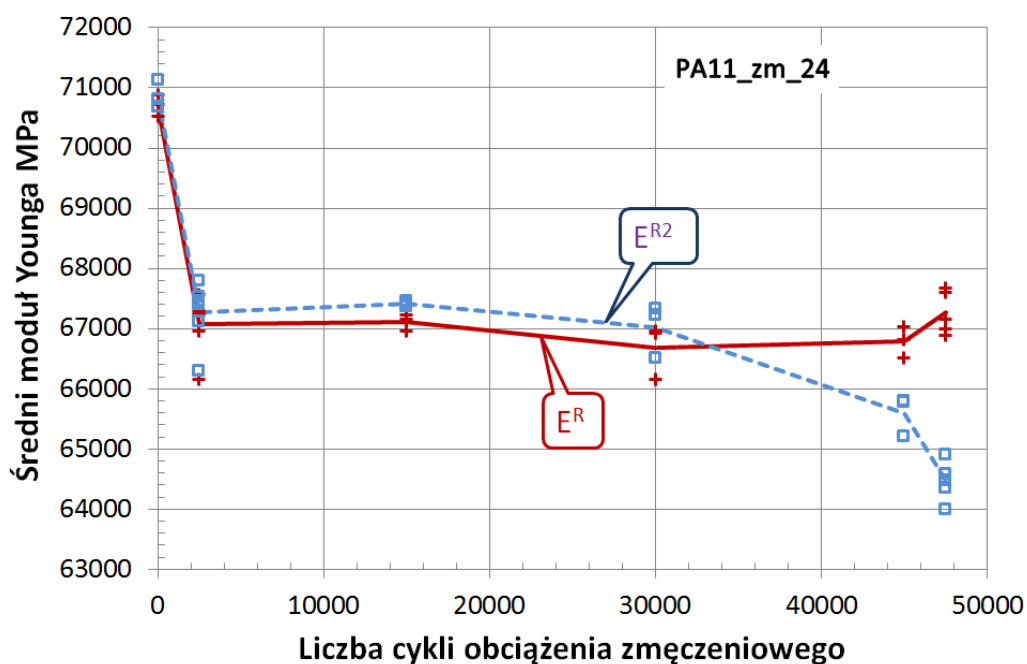


Rys. 31 Zmiana względnej rozpiętości składowej odkształcenia  $\varepsilon_y$  dla dwóch obszarów obliczeniowych, R i R2 jako funkcja liczby cykli obciążeń zmęczeniowych dla próbki PA11

Uwaga ta ma szczególne znaczenie dla pomiarów zmian składowych odkształcenia przy pomocy ekstensometru na bazie kilkudziesięciu milimetrów, względnie pomiarów ultradźwiękowych lub z użyciem metody prądów wirowych uśredniających wyniki na całej drodze przebiegu fal. Lokalne pomiary rozkładów odkształcenia metodami optycznymi umożliwiają wprawdzie zobrazowanie miejsc o różnych właściwościach

wytrzymałościowych, ale też nie wykrywają mikroskopowych pęknięć w całej objętości badanej próbki powstałych w wyniku rozwoju procesu uszkodzeń zmęczeniowych.

Wprowadzone przy realizacji opisywanego programu badawczego liczbowe parametry wskazujące na zmiany wywołane obciążeniami cyklicznymi, a mianowicie: średnie wartości składowych odkształcenia  $\varepsilon_y$  i  $\varepsilon_x$  w polu pomiarowym, ich maksymalne i minimalne wartości w polu pomiarowym, względna rozpiętość składowej odkształcenia  $\varepsilon_y$  w całym obszarze pomiarowym zdefiniowana jako  $R_{\varepsilon_y} = \frac{\varepsilon_y^{max} - \varepsilon_y^{min}}{\varepsilon_y^s}$ , oraz względna rozpiętość składowej odkształcenia  $\varepsilon_x$  zdefiniowana analogicznie, były wyznaczane na podstawie pomiarów ESPI dla każdego etapu pomiarowego. Zmiany tych parametrów dają podstawę do liczbowej oceny rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych. Poniżej przedstawiono przykładowo zmiany względnej rozpiętości czynnej składowej odkształcenia  $\varepsilon_y$ , rys. 31, i zmiany stałych sprężystości, rys. 32 dla próbki ze stopu aluminium PA11 [13].



Rys. 32. Zmiana średnich wartości modułu Younga dla dwóch ramek obszaru obliczeniowego, R i R2 pod wpływem cyklicznych obciążeń zmęczeniowych dla próbki PA11 przed i po określonej liczbie cykli obciążenia o amplitudzie 150 MPa z częstotliwością 10 Hz

Jak widać, w początkowej fazie procesu rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych obserwuje się cykliczne osłabienie materiału i zmniejszenie wartości modułu sprężystości, który w dalszej fazie rozwoju procesu zmęczenia zmienia się już nieznacznie, rys. 32.

### 3.5. Uwagi podsumowujące dotyczące systemu ESPI

System ESPI zapewnia bezkontaktowy pomiar rozkładów składowych przemieszczenia i odkształcenia w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. Dzięki dużej rozdzielczości i czułości umożliwia uzyskiwanie wyników o wysokiej dokładności.

Pomiary składowych przemieszczenia i odkształcenia na powierzchni próbki przy wykorzystaniu techniki ESPI i stanowiącego jej integralną część oprogramowania komputerowego ISTRa dają łącznie narzędzie do tworzenia map i przestrzennych obrazów rozkładów przemieszczenia i odkształcenia w całym polu pomiarowym próbki, określania

profilów składowych przemieszczenia i odkształcenia wzdłuż dowolnych przekrojów oraz wyznaczania wartości średnich, minimalnych i maksymalnych dla dowolnego punktu, przekroju lub obszaru w obrębie ramki obliczeniowej. Możliwe jest wyznaczenie modułu sprężystości z zadanej wartości naprężenia osiowego i średniej wartości odkształcenia wzdłużnego  $\varepsilon_y$  oraz wyznaczenie współczynnika Poissona z obliczonych średnich wartości odkształcenia wzdłużnego  $\varepsilon_y$  i odkształcenia poprzecznego  $\varepsilon_x$  dla zdefiniowanego punktu, przekroju lub obszaru na powierzchni próbki.

Duży potencjał badawczy techniki ESPI w zakresie pomiaru rozkładów przemieszczenia i odkształcenia umożliwia wyznaczenie rozkładów niejednorodności tych wielkości w całym obszarze pomiarowym próbki oraz precyzyjną ocenę warunków brzegowych obciążenia próbki, a także identyfikację właściwości sprężystych w całym polu pomiarowym próbki i ich zależność od kierunku przyłożonego obciążenia. Ponadto, system umożliwia obserwację powstania i rozwoju lokalizacji odkształcenia oraz śledzenie zmian struktury materiału pod wpływem obciążeń cyklicznych wywołujących zmęczenie materiału.

Niestety, jest to sprzęt wrażliwy na warunki, w których przeprowadzane są badania. Nawet niewielkie przemieszczenia uchwytu, czy zewnętrzne zakłócenia są w stanie zaburzyć pomiar. Stąd też prowadzenie badań przy użyciu systemu ESPI wymaga dużego doświadczenia i odpowiednich umiejętności ze strony użytkownika. Nie mniej jednak, dzięki systemowi ESPI możliwe jest badanie wszystkich rodzajów materiałów oraz dokonywanie szerokiej analizy mechanizmów odkształcania i pękania [14, 15].

#### **4. Wnioski końcowe**

Proces rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych jest procesem lokalnym, a jego monitorowanie wymaga stosowania metod umożliwiających obserwowanie i lokalizowanie zmian w całym polu pomiarowym próbki. Zastosowanie nowoczesnych technik optycznych DIC oraz ESPI do wyznaczania rozkładów składowych odkształcenia umożliwia obserwację zmian lokalnych i definiowanie globalnych parametrów wskazujących na rozwój zmęczenia na podstawie wartości średnich charakterystycznych dla całego pola pomiarowego próbki.

Obserwacje prowadzone przy użyciu DIC lub ESPI potwierdziły fakt, iż proces zmęczenia powoduje lokalne zmiany odkształcenia w badanych materiałach, które nie są rejestrowalne przy użyciu tensometrii elektrooporowej oraz zastosowaniu wszelkiego rodzaju ekstensometrów mechanicznych, gdyż te ostatnie dają informację o odkształceniu globalnym uśrednionym na całej długości bazy pomiarowej.

Mimo że metoda ESPI jest trudna, pracochłonna oraz wymaga wprawy i doświadczenia w praktycznych zastosowaniach pomiarowych, to jednak jako jedyna ze stosowanych współcześnie technik pomiarowych umożliwia wyznaczenie rozkładów odkształcenia z rozdzielczością niezbędną do monitorowania rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych.

#### **LITERATURA**

- [1] Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A., Peters W.H., Application of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics, *Experimental Mechanics*, 25(3), 1985, 232-244.
- [2] Fung Y.C., *Foundations of solid mechanics*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ 1965.
- [3] Novozhilov V.V., *Theory of elasticity*, U.S. Department of commerce translation, 1861.
- [4] [www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com).
- [5] Instrukcja obsługi system ARAMIS 4M firmy GOM.

- [6] Gower M.R., Shaw R.M., Towards a planar cruciform specimen for biaxial characterization of polymer matrix composites, *Applied Mechanics and Materials*, 24-25, 2010, 115-120.
- [7] Lord J.D., Digital Image Correlation (DIC), Modern stress and strain analysis. A state of the art guide to measurement techniques, BSSM Technical Editors: J. Eaton Evans, J.M. Dulie-Barton, R.L. Burguete, 2009, 14-15.
- [8] Dietrich L., Grzywna P., Kukla D.: Wykorzystanie metod optycznych do lokalizacji uszkodzeń zmęczeniowych, *Przegląd Spawalnictwa* 13/2012, s.15-18.
- [9] Materiały firmy DANTEC Dynamic.
- [10] Patorski K., Interferometria laserowa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005, s.214-261.
- [11] Szymczak T., Grzywna P., Kowalewski Z.L.,: Nowoczesne metody określania wytrzymałościowych właściwości materiałów konstrukcyjnych, *Transport Samochodowy* 1-2013, s.79-104.
- [12] Vial-Edwards C., Lira I., Martinez A., Monzenmayer M., Electronic speckle pattern interferometry analysis of tensile tests of semihard copper sheets, *Experimental Mechanics*, 41(1), 2001, 58-61.
- [13] Rutecka A., Raport końcowy z realizacji projektu badawczego KosDeKom Nr N N501 157640, Nr umowy: 1576/B/T02/2011/40 „Kryteria oceny stopnia degradacji nowoczesnych kompozytów o osnowie metalowej poddanych obciążeniom eksploatacyjnym w oparciu o zależności między parametrami wyznaczanymi metodami niszczącymi i nieniszczącymi”.
- [14] Gungor S., Moire Interferometry, Modern stress and strain analysis. A state of the art guide to measurement techniques, BSSM Technical Editors: J. Eaton Evans, J.M. Dulie-Barton, R.L. Burguete, 2009, 8-9.
- [15] Pierron S., Digital Speckle Pattern Interferometry, Modern stress and strain analysis. A state of the art guide to measurement techniques, BSSM Technical Editors: J. Eaton Evans, J.M. Dulie-Barton, R.L. Burguete, 2009, 14-15.