
**XXIII Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 15-17 marca 2017**

**ZASTOSOWANIE ELEKTRONICZNEJ INTERFEROMETRII
PLAMKOWEJ DO LOKALIZACJI USZKODZEŃ ZMĘCZENIOWYCH**

Paweł GRZYWNA, Dominik KUKLA, Zbigniew L. KOWALEWSKI, Mateusz KOPEĆ,
Mirosław WYSZKOWSKI

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa
pgrzywna@ippt.pan.pl

1. WSTĘP

Proces zmęczenia rozwijający się w materiałach konstrukcyjnych pod wpływem długotrwałych obciążeń cyklicznych jest ciągle istotnym problemem współczesnej techniki.

Doświadczalne określenie rozwoju uszkodzeń wymaga ciągłego monitorowania odpowiedzi materiału na zadane obciążenia cykliczne. Trudność realizacji tego zadania jest jeszcze dodatkowo spotęgowana brakiem miary uszkodzeń zmęczeniowych dobrze opisującej efekty degradacji mechanicznej materiałów. Uszkodzenia zmęczeniowe zaczynają się od rozwoju mikro poślizgów i pojedynczych pasm poślizgów zlokalizowanych wokół defektów strukturalnych typu pustek i wtrąceń niemetalicznych. Następnie powstają mikropęknięcia, aż do utworzenia się jednego pęknięcia dominującego, którego rozwój prowadzi do nagłego zniszczenia próbki. Monitorowanie rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych wymaga obserwacji w różnych skalach, a lokalizacja inicjacji tego procesu wymaga obserwacji w całym polu pomiarowym próbki. Połączenie tych dwóch poziomów obserwacji jest trudne, a wykorzystanie standardowych badań metalograficznych jest niemożliwe ze względu na niszczący charakter przygotowania próbek.

W badaniach mechanicznych rozwój uszkodzeń zmęczeniowych ocenia się na podstawie zmian odpowiedzi materiału na zadane obciążenie cykliczne w całym okresie jego trwania [1]. W inżynierii materiałowej wykorzystuje się niszczące techniki mikroskopowe do identyfikacji mechanizmów uszkodzeń zmęczeniowych. W praktyce inżynierskiej wykorzystuje się różnorodne badania nieniszczące do oceny zmian mikrostruktury i identyfikacji mechanizmów generacji uszkodzeń, ale nadal brakuje usystematyzowanej wiedzy o wzajemnej korelacji i zakresie stosowalności różnych badań nieniszczących w odniesieniu do procesów rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych.

Obserwowany w ostatnim okresie rozwój metod doświadczalnych i technik pomiarowych stwarza obecnie szanse obserwacji zmian struktury materiału z rozdzielczością rzędu kilku nanometrów. Z drugiej strony optyczne techniki pomiarowe umożliwiają nie tylko punktowe, ale i polowe pomiary deformacji elementów konstrukcyjnych oraz ciągle monitorowanie zachowania się całych konstrukcji pod obciążeniem eksploatacyjnym. Wykorzystanie możliwości nowych metod doświadczalnych i technik pomiarowych stwarza szansę identyfikacji fizycznych zjawisk oraz opisu mechanizmów rozwoju degradacji i uszkodzeń zmęczeniowych materiałów konstrukcyjnych. W konsekwencji istnieje możliwość uwzględnienia tych zjawisk w opisie właściwości

mechanicznych materiałów oraz wykonania symulacji komputerowych zachowania się elementów konstrukcji pod obciążeniem eksploatacyjnym.

Adaptacja metod interferometrii plamkowej do wczesnego wykrywania i lokalizacji, a także do okresowego monitorowania rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych na podstawie polowych pomiarów rozkładów deformacji powierzchni badanego elementu jest przedmiotem opracowania [2]. Wyniki badań metalograficznych wskazują, że rozwój uszkodzeń zmęczeniowych jest inicjowany wokół powierzchniowych i podpowierzchniowych wad i defektów struktury. Nieciągłości prowadzą do zaburzenia jednorodności stanu odkształcenia i naprężenia, które można określić na podstawie polowych pomiarów składowych przemieszczenia poszczególnych punktów powierzchni badanego elementu. Możliwość obserwacji rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych na podstawie rozkładów składowych odkształcenia jest uzależniona od rozdzielczości pomiarowej i rodzaju oprogramowania komputerowego do przetwarzania danych doświadczalnych oraz zastosowanej kamery interferometrii optycznej. W pracy wykorzystana będzie cyfrowa kamera pracująca w systemie elektronicznej interferometrii plamkowej o granicznej rozdzielczości pomiaru odkształcenia rzędu 10^{-6} , co w połączeniu z możliwością wybrania obszaru obserwacji umożliwi osiągnięcie zamierzonego celu. Wyniki pomiarów przeprowadzonych na próbkach wykonanych z gruboziarnistego stopu niklu (stop odlewniczy) o oznaczeniu MAR247 uwidoczniły niejednorodności rozkładów składowych odkształcenia wokół początkowych defektów struktury materiału i potwierdziły przyjęte założenia pracy.

Wyznaczenie tych obszarów oraz późniejsze ich monitorowanie wymaga polowych pomiarów zmian deformacji badanego obiektu. Do tego typu badań wydają się odpowiednie optyczne metody pomiaru składowych przemieszczenia występujących na powierzchni elementów lub próbek. Obecnie najpowszechniej wykorzystywane w badaniach naukowych są metody DIC (Digital Image Correlation) oraz ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry). Obydwie pozwalają na pomiar polowych rozkładów trzech składowych przemieszczenia oraz wyznaczenia rozkładu składowych odkształcenia. Metoda ESPI jest metodą o wyższej rozdzielczości pomiarowej.

W pracy podjęto próbę zastosowania metody ESPI do oceny i monitoringu uszkodzeń zmęczeniowych na próbkach wykonanych z nadstopów niklu pokrytych warstwą aluminiową. Próbki płaskie o wydłużonej części pomiarowej były poddawane odzerowotętniającym cyklom obciążenia. Testy przerywane były w celu wykonania statycznych obciążeń, podczas których realizowane były optyczne pomiary deformacji badanej powierzchni. Późniejsza analiza polowych wyników pozwoliła na wskazanie miejsc największej koncentracji naprężenia oraz wykazanie rozwoju uszkodzeń wraz ze wzrostem liczby cykli aż do zniszczenia.

2. ELEKTRONICZNA INTERFEROMETRIA PLAMKOWA

2.1 Zastosowany system pomiarowy / Podstawy teoretyczne ESPI

Elektroniczna interferometria plamkowa (ESPI- Electronic Speckle Pattern Interferometry) jest optyczną metodą pomiaru deformacji powierzchni badanych elementów. ESPI jest odmianą interferometrii holograficznej opartej na analizie światła laserowego rozproszonego na optycznie chropowatej powierzchni. W procesie interferencji biorą udział dwie wiązki. Pierwsza oświetla badaną powierzchnię, a odbite od niej światło interferuje z drugą tzw. wiązką odniesienia (może to być wiązka równoległa bądź wiązka rozproszona na chropowatej powierzchni). Wynik interferencji rejestrowany jest w postaci obrazów plamkowych przy pomocy kamery. Poprzez proces odejmowania rozkładów intensywności (obrazów plamkowych) przed i po deformacji otrzymujemy prążki korelacyjne, z których generowaną są mapy fazowe. Mapy fazowe zawierają informacje o kierunku i wartościach

deformacji. Są podstawą do wyznaczenia polowych rozkładów przemieszczenia dla każdego kierunku z osobna.

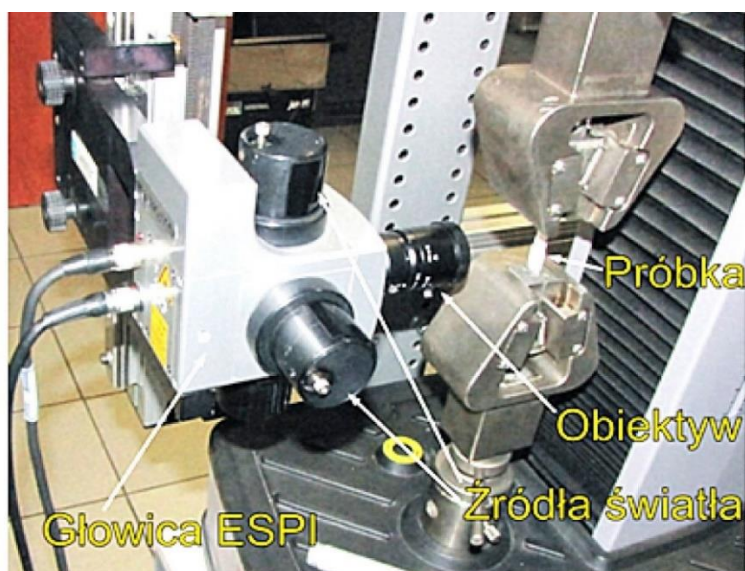
Wyznaczenie polowych rozkładów składowych odkształcenia oraz naprężenia wykonywane jest poprzez operacje matematyczne przy zadanych warunkach brzegowych (podane wymiary obszaru pomiarowego) oraz parametrach materiałowych (moduł sprężystości podłużnej oraz współczynnik Poissona).

Zastosowany w badaniach układ pomiarowy ESPI to system DANTEC DYNAMICS o oznaczeniu Q-300 oraz serwo-hydrauliczna maszyna wytrzymałościowa MTS o oznaczeniu MTS-858 oraz MTS-810. Podana przez producenta czułość pomiaru dla systemu Q-300 wynosi 0,03-1 mikrometra w zależności od kierunku pomiaru oraz odległości sensora od badanego obiektu (dokładność pomiarowa).

Dokładność pomiarowa	0,03 – 0,1 μm
Rozdzielczość CCD	1380 x 1035 pikseli
Zakres pomiarowy	10 – 100 μm dla jednego kroku
Odległość od badanego obiektu	0,2 – 1 m
Obszar pomiarowy	Do 200 x 300 mm^2 , większy z zewnętrznym oświetleniem
Kierunki pomiarowe	1D, 2D lub 3D
Czas pojedynczego pomiaru	3,5 s dla analizy 3D
Format danych	TIFF, ASCII
Waga głowicy	2,7 kg
Laser	Diody 2 x 70 mW, 785 nm

Tabela 1. Specyfikacja techniczna systemu pomiarowego Dantec Dynamics Q-300.

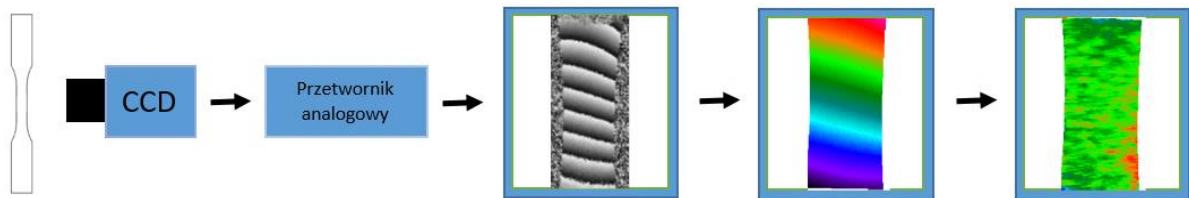
Stanowisko pomiarowe składa się z głowicy ESPI, komputera rejestrującego z dedykowanym oprogramowaniem oraz układu obciążającego badany element (próbkę).



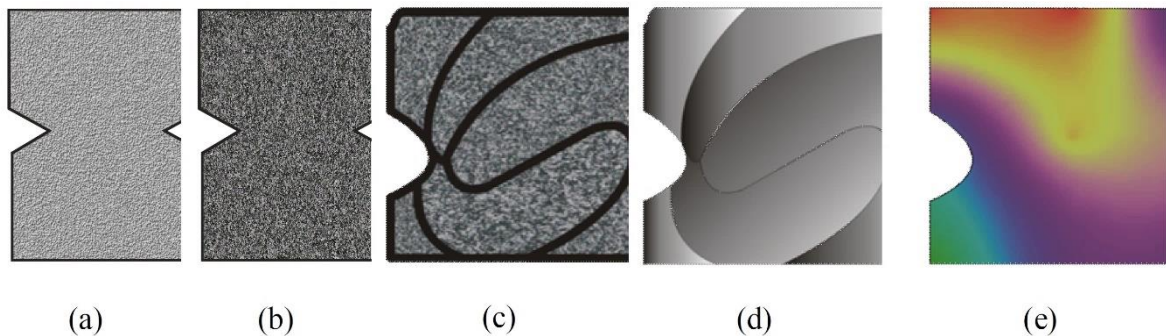
Rys.1. Układ pomiarowy systemu ESPI: próbka zamontowana w maszynie wytrzymałościowej, głowica pomiarowa ESPI [5].

Procedurę pomiarową przedstawia rysunek 2. Próbkę o przygotowanej powierzchni (chropowatej) deformujemy przez zadanie odpowiedniej siły na maszynie wytrzymałościowej.

Obrazy plamkowe uzyskane wskutek oświetlenia powierzchni wiązką spójnego oświetlenia laserowego rejestrujemy przed (obrazy referencyjne) oraz po deformacji badanego elementu. Porównanie obrazów plamkowych pozwala na uzyskanie prążków korelacyjnych i w efekcie otrzymanie wyniku w postaci map fazowych (przesunięcie w fazie wiązki oświetlającej wskutek deformacji). Kolejne wyniki (mapy odkształcenia i naprężenia) są efektem obliczeń numerycznych na podstawie zadanych warunków brzegowych.

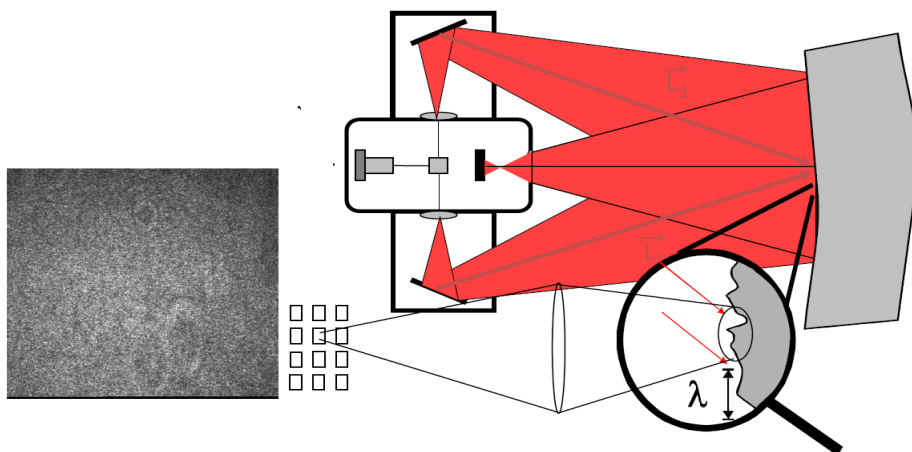


Rys. 2. Schemat procedury pomiarowej z wykorzystaniem systemu ESPI (Wyniki: Mapa fazowa → Mapa składowych przemieszczenia → Mapa składowych odkształcenia).



Ry. 3. Schemat powstawania mapy składowych przemieszczenia przy użyciu techniki ESPI, gdzie: (a) obraz referencyjny; (b) obraz materiału odkształconego; (c) prążki interferencyjne; (d) mapa przesunięć fazowych; (e) mapa składowych przemieszczenia [3].

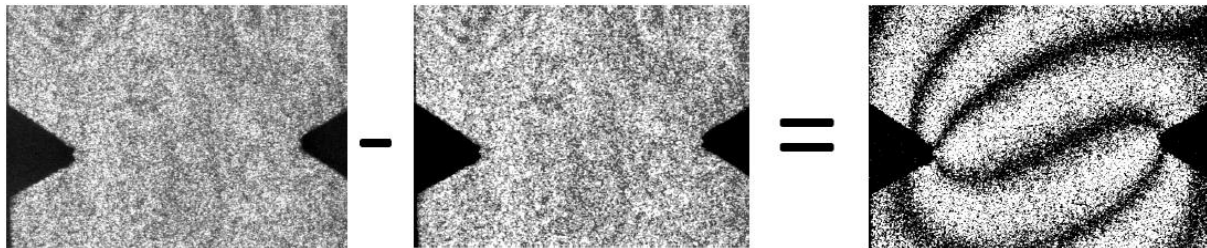
Zasada działania systemu ESPI jest oparta na zjawisku plamkowania. Efekt ten występuje podczas oświetlenia chropowatej powierzchni wiązką wysoce spójnego promieniowania. Chaotyczna interferencja fal wtórnych powstających w wyniku rozproszenia promieniowania na powierzchni daje charakterystyczne obrazy plamkowe.



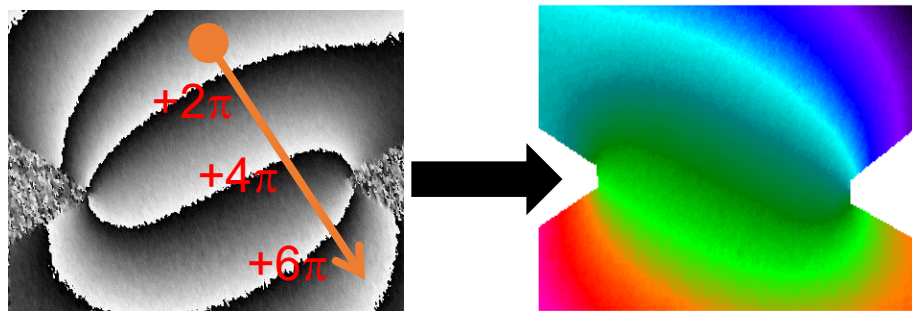
Rys. 4. Schemat powstawania obrazu plamkowego [3].

Lokalne rozkłady intensywności i fazy powiązane są z właściwościami badanej powierzchni i zmieniają się podczas deformacji badanej próbki [4].

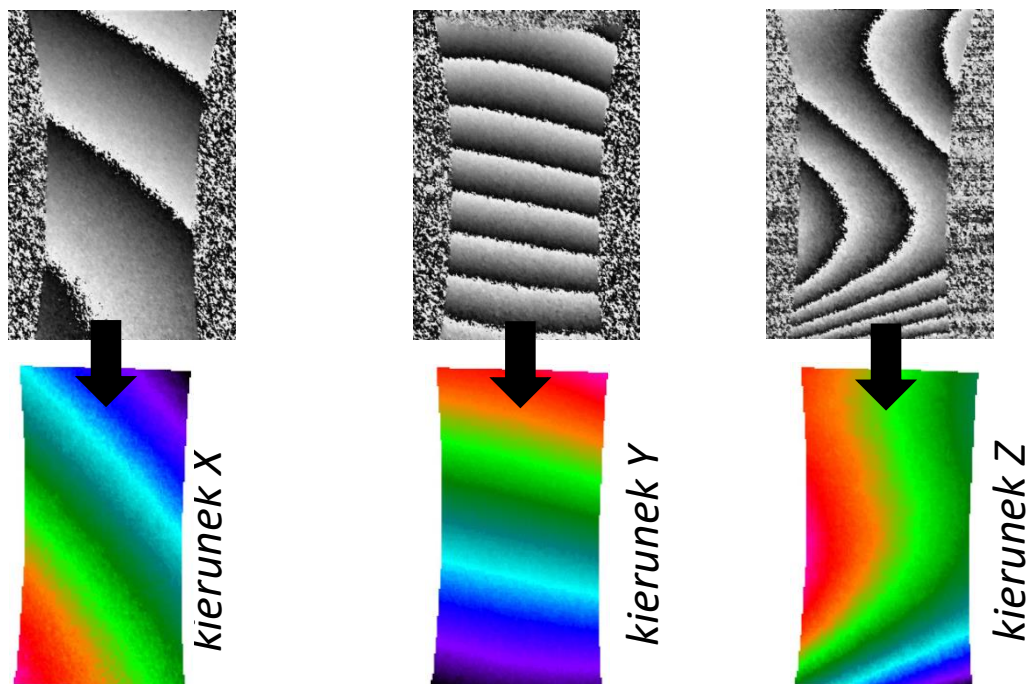
Prążki uzyskuje się poprzez porównanie struktur plamkowych materiału niezdeformowanego ze strukturą po deformacji. Obrazy referencyjne rejestrowane są w postaci cyfrowej w pamięci urządzenia. Kolejne obrazy odpowiadające stanom po deformacji są identyfikowane za pomocą matrycy CCD i porównywane na bieżąco z obrazem referencyjnym.



Rys. 5. Schemat uzyskiwania prążków korelacyjnych poprzez różnicowanie intensywności obrazów plamkowych przed i po deformacji [3].



Rys. 6. Schemat uzyskiwania mapy składowych przemieszczenia dla wybranego kierunku [3].



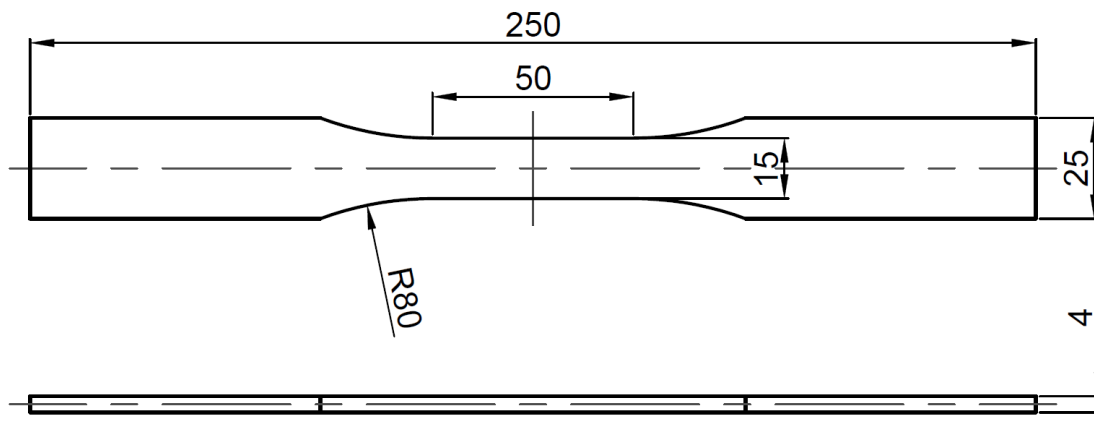
Rys. 7. Schemat uzyskiwania mapy składowych przemieszczenia dla poszczególnych kierunków (X, Y w płaszczyźnie i Z w kierunku prostopadłym do płaszczyzny).

W przypadku dużych deformacji obiektu jako obraz odniesienia stosuje się obraz plamkowy, odpowiadający poprzedniemu stanowi obciążenia, a nie odpowiadający stanowi wyjściowemu. Unika się w ten sposób dekorelacji obrazu i zwiększa zakres pomiarowy realizując zadany stan deformacji w wielu krokach [4]. Po zsumowaniu wyników otrzymujemy rozkłady odpowiadające deformacji od stanu wyjściowego do zadanego obciążenia końcowego.

2.2 Wyniki eksperymentalne

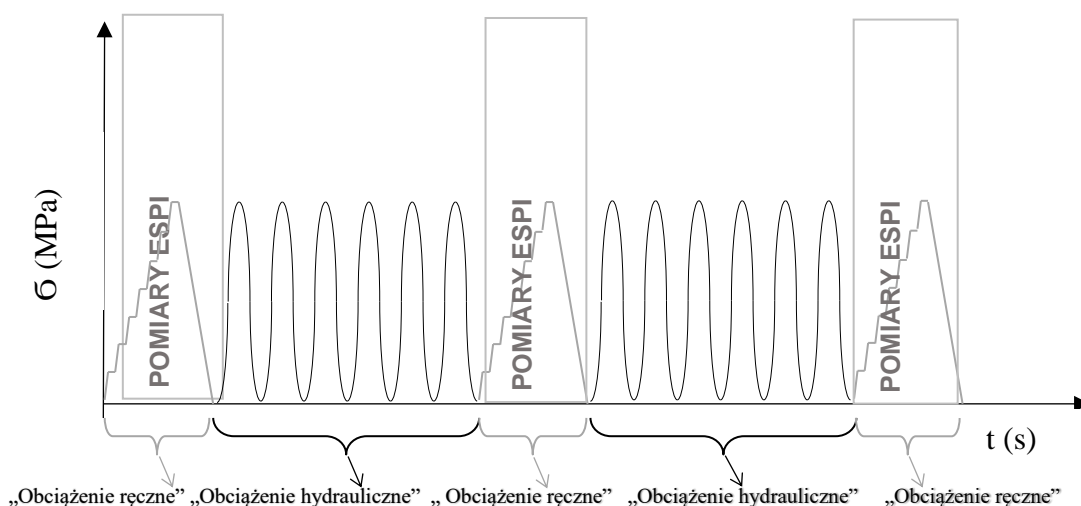
2.2.1 Materiał i metodyka badań

Przedmiotem badań były płaskie próbki zmęczeniowe (rysunek 8) wykonane z gruboziarnistego stopu niklu (stop odlewniczy) o oznaczeniu MAR 247. Próbki pokryte były 40 mikrometrową, żaroodporną warstwą aluminidkową nanoszoną metodą CVD z użyciem $AlCl_3$ w atmosferze wodoru.



Rys. 8. Geometria i wymiary próbki zmęczeniowej.

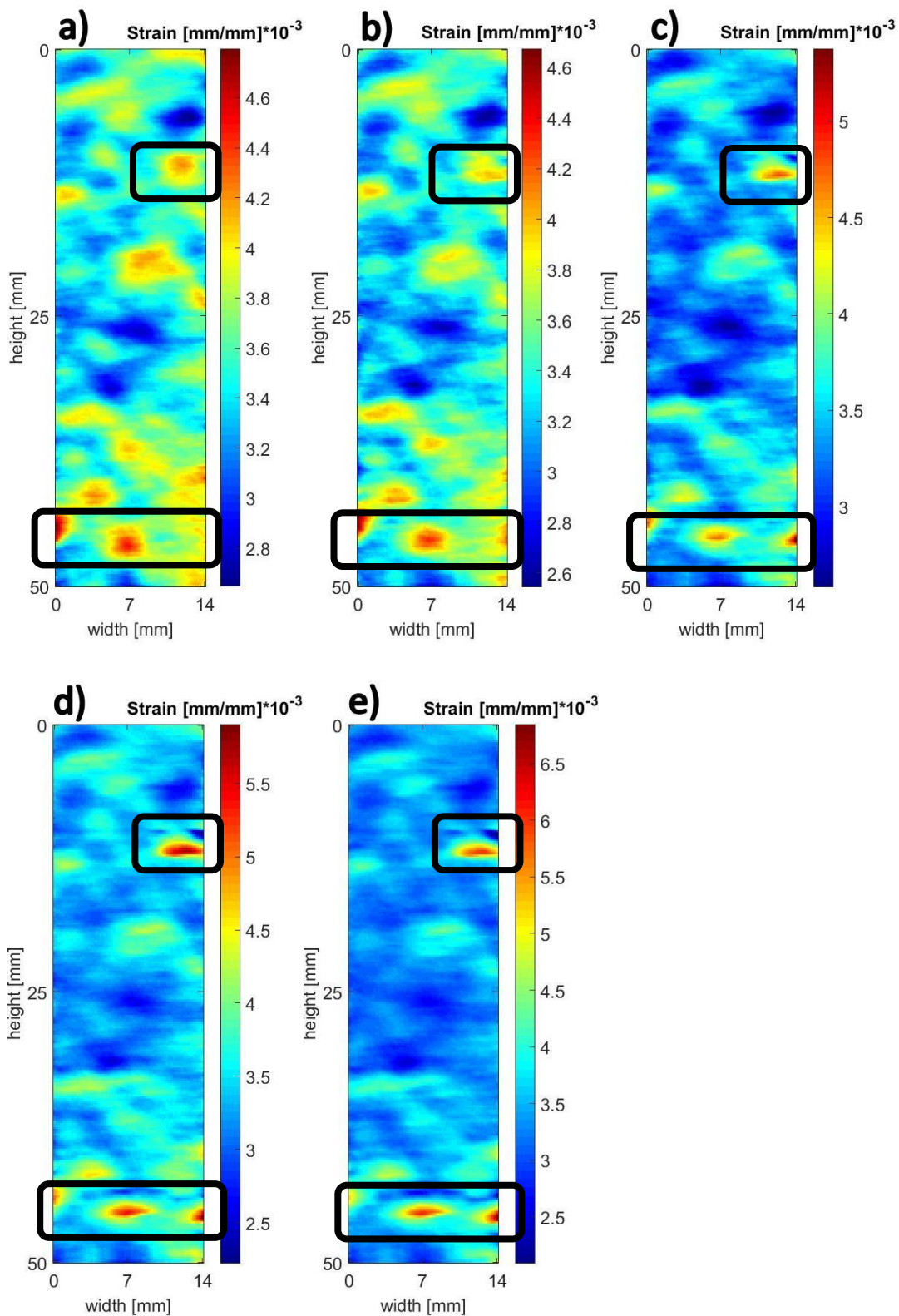
Testy zmęczeniowe prowadzone były na serwohydraulicznej maszynie wytrzymałościowej MTS-810. Amplituda obciążenia wynosiła dla pierwszej próbki 600 MPa oraz 650 MPa dla drugiej, przy umownej granicy plastyczności dla tego materiału $R_{0,2} = 800$ MPa. Cykliczne obciążenia miały odzerowotętniający charakter ($R=0$). Pomiar deformacji powierzchni wykonano przy użyciu systemu Q-300 Dantec Dynamics. W celu wyeliminowania drgań pochodzących od zasilania hydraulicznego maszyny wytrzymałościowej podczas optycznych pomiarów deformacji zastosowano ręczne obciążenie próbki (stanowisko zaprojektowane w IPPT PAN na potrzeby pomiarów ESPI). Schemat obciążenia przedstawiony został na rysunku 9. Pierwszy cykl obciążenia realizowany był przy statycznym obciążeniu z użyciem ręcznej pompy wywołującej obciążenie próbki. Kolejne cykle obciążenia przy częstotliwości 10 Hz były wykonywane przez maszynę wytrzymałościową z zatrzymaniami na pomiary statyczne ESPI. Pomiar deformacji wykonano w 1, 20001, 40001, 50001 cyklu, liczba cykli do zniszczenia wynosiła $N_f=54315$ cykli, a dla kolejnej próbki w 1, 20001, 30001, 35001, 37001 cyklu ($N_f=39086$).



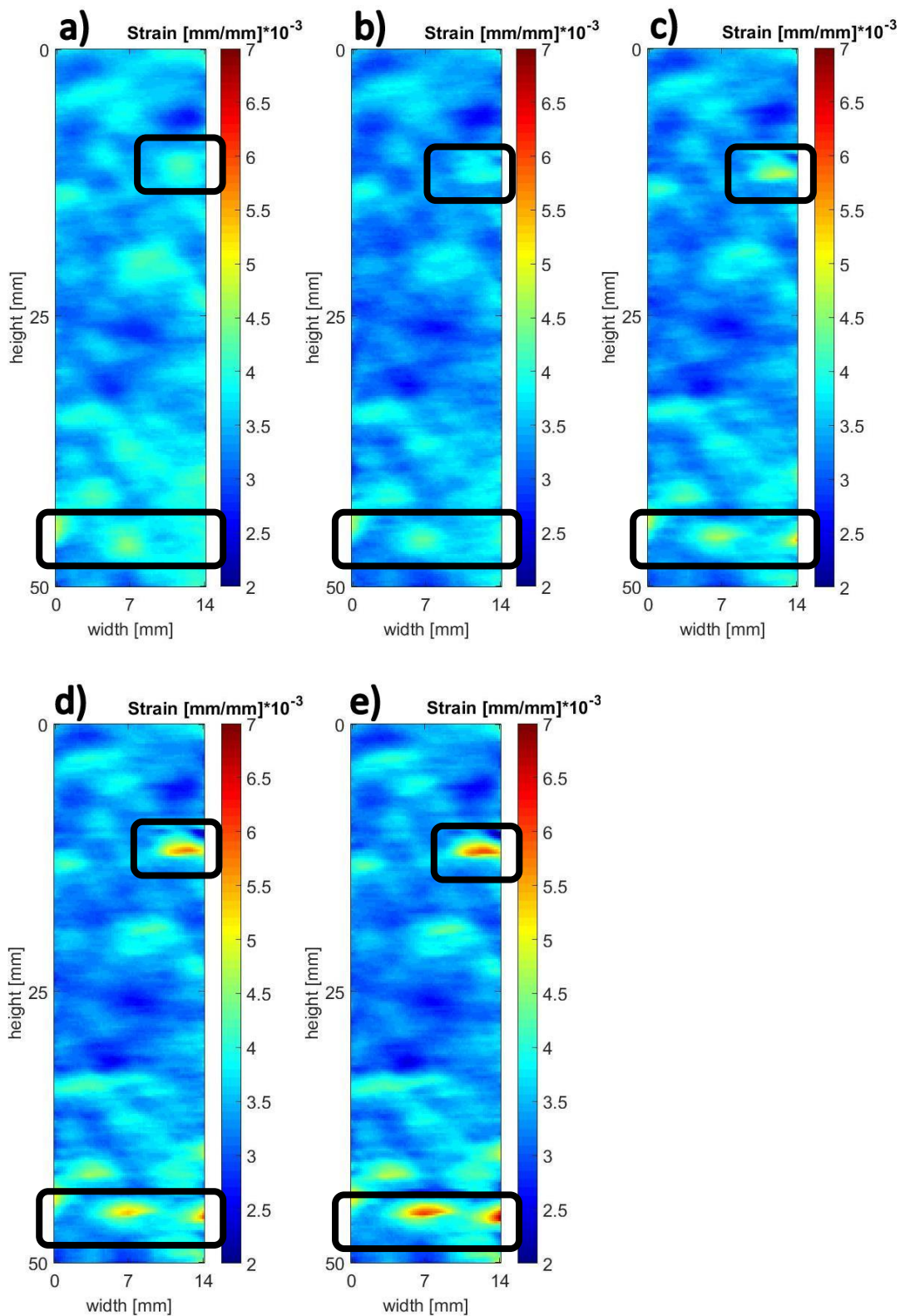
Rys. 9. Schemat procesu obciążania podczas przerywanego testu zmęczeniowego.

2.2.2 Wyniki dla stopu MAR 247

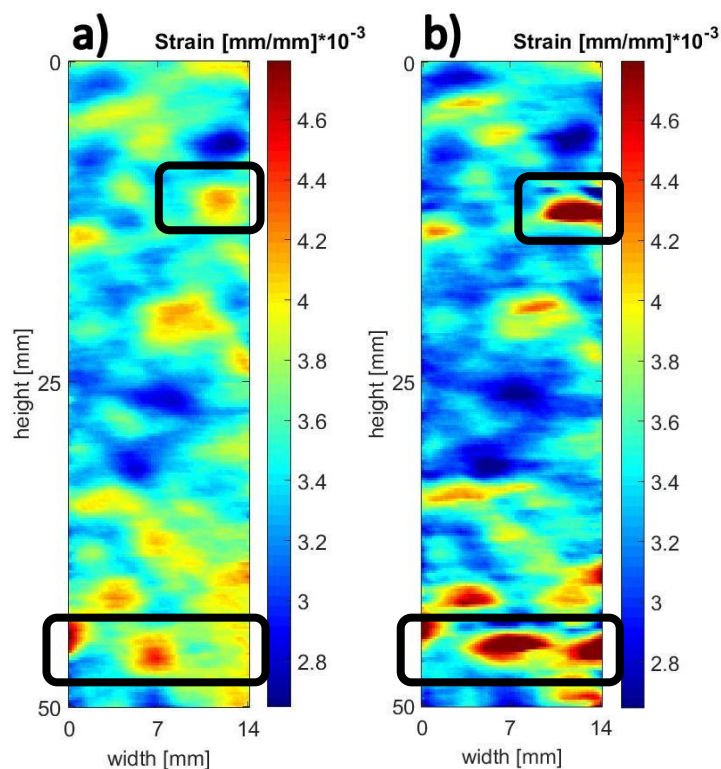
Poniżej zaprezentowane zostały wyniki pomiarów składowej pionowej (wzdłuż osi działania siły) odkształcenia badanych próbek zmęczeniowych. Testom poddane były dwie próbki wykonane z gruboziarnistego stopu MAR 247. Pierwsza próbka o oznaczeniu GZ_07 obciążana była w cyklach odzerowotętniających o amplitudzie obciążenia 650 MPa, kolejna próbka GZ_06 obciążana amplitudą 600MPa. Pomiary realizowane w różnym stadium degradacji zmęczeniowej [GZ_07 (650MPa): 1, 20001, 30001, 35001, 37001 cyklu oraz GZ_06 (600MPa): 1, 20001, 40001, 50001] uwidaczniają stan oraz dynamikę rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych. Zastosowanie polowych metod pomiaru umożliwia wyznaczenie stref narażonych i w późniejszych fazach procesu pozwala na szacowanie miejsca zniszczenia, co zostało potwierdzone na podanych przykładach. Poniższe wyniki zostały zaprezentowane w różnych skalach, co pozwala na pełniejsze udokumentowanie rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych. Na rysunkach zostały również przedstawione miejsca dekohezji w strefach pomiarowych badanych próbek, które są zgodne z miejscami największych koncentracji pokazanych na mapach wartości odkształcenia.



Rys. 10. Mapy odkształcenia w kierunku Y (wzdłuż osi działania siły) dla GZ_07, pomiary wykonano w cyklu o numerze: a) 1; b) 20001; c) 30001; d) 35001; e) 37001. Skala została dobrana automatycznie do ekstremalnych wartości odkształcenia w każdym pomiarze.

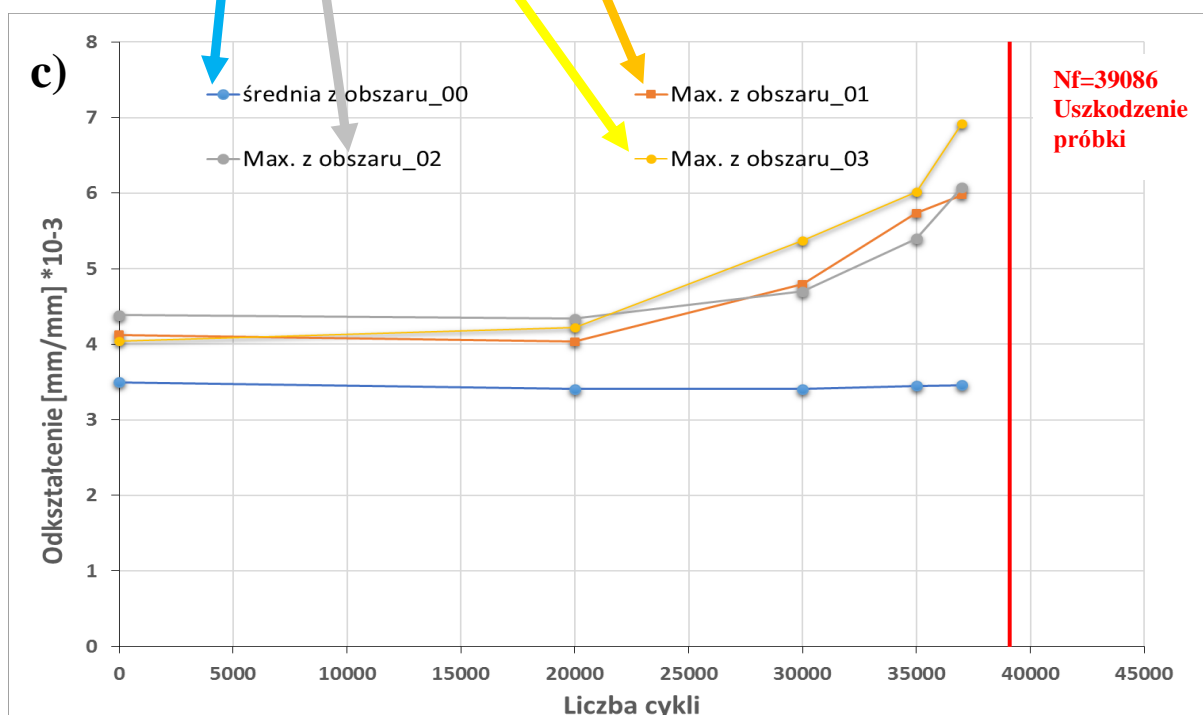
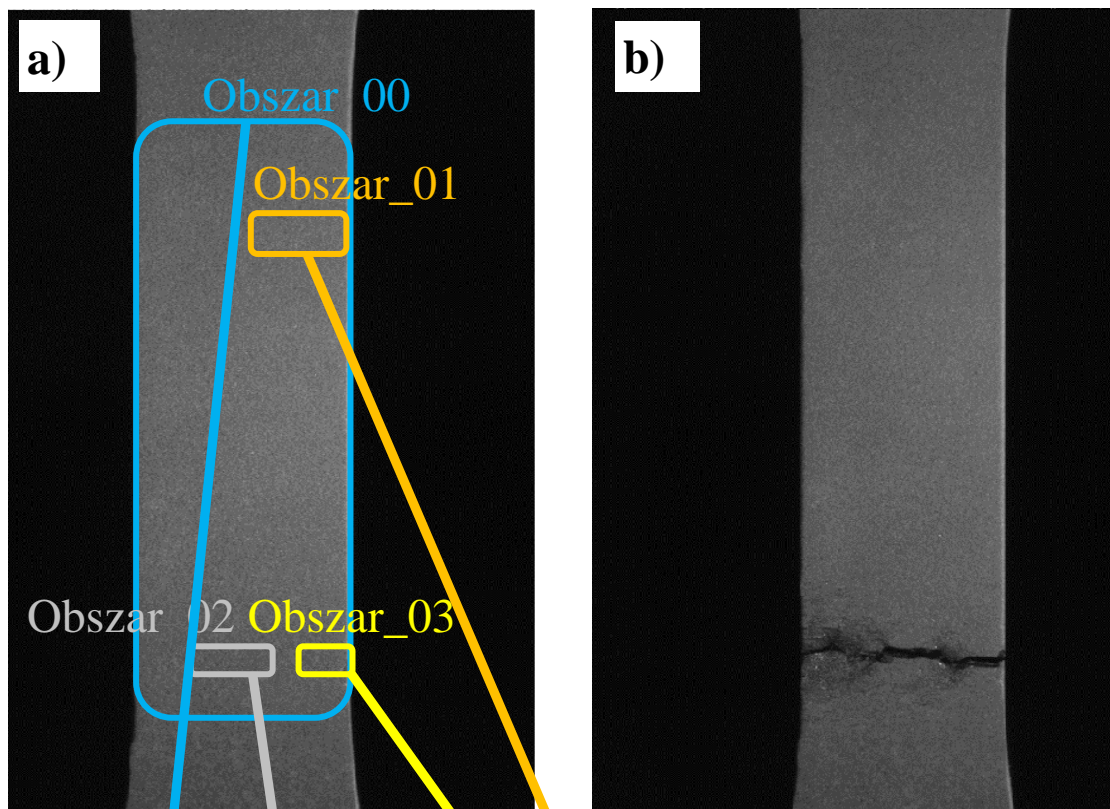


Rys. 11. Mapy odkształcenia w kierunku Y (wzdłuż osi działania siły) dla GZ_07, pomiary wykonano w cyklu o numerze: a) 1; b) 20001; c) 30001; d) 35001; e) 37001. Skala została dobrana do ekstremalnych wartości odkształcenia we wszystkich pomiarach: $\varepsilon_{MIN}=2 \cdot 10^{-3}$, $\varepsilon_{MAX}=7 \cdot 10^{-3}$.



Rys. 12. Mapy odkształcenia w kierunku Y (wzdłuż osi działania siły) dla GZ_07:
 a) pomiar wykonany w pierwszym cyklu obciążenia; b) pomiar wykonany w 50001 cyklu.
 Skala została dopasowana do ekstremalnych wartości odkształcenia w pierwszym pomiarze.

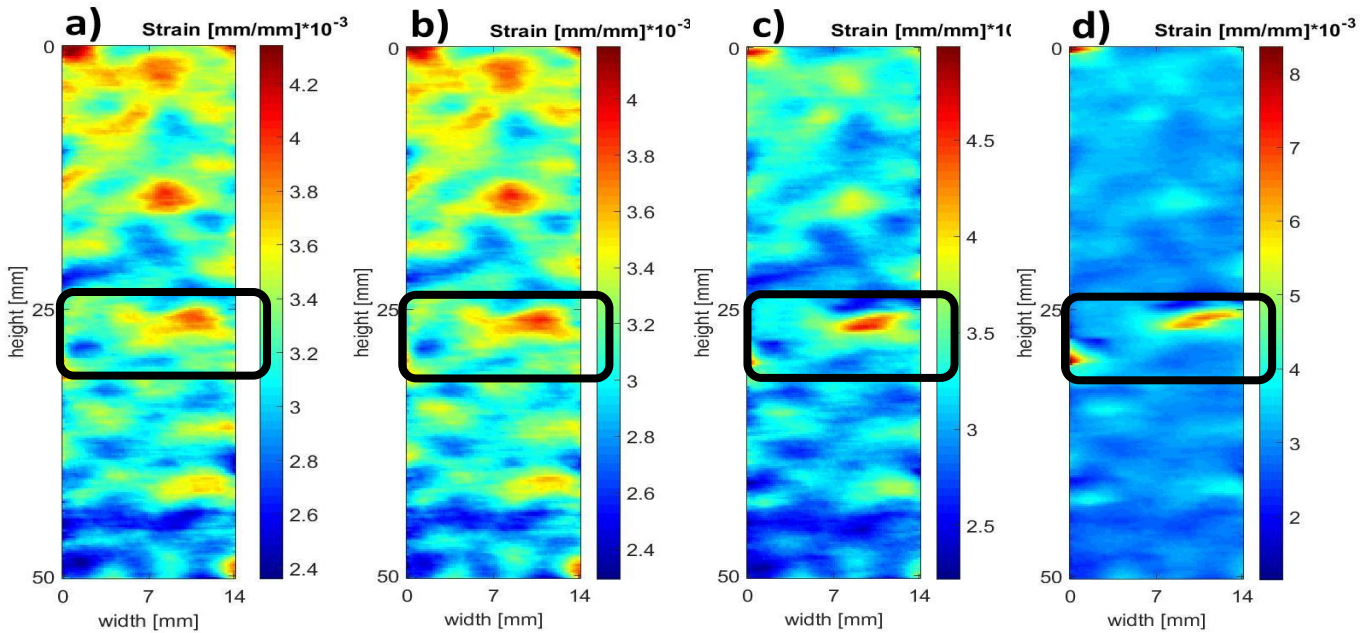
Na powyższych rysunkach (10-12) można zaobserwować rozwój lokalnych koncentracji wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. Degradacja zmęczeniowa zobrażowana jako lokalny wzrost wartości naprężenia wokół defektów struktury materiału pozwala na szacowanie miejsca powstawania uszkodzeń prowadzących do zniszczenia próbki zmęczeniowej. Potwierdzeniem tego jest ilustracja, rysunek 13, miejsca dekohezji materiału zgodne z lokalizacją koncentracji naprężenia / odkształcenia w dolnej części pomiarowej próbki. Wykres z rysunku 13 pokazuje dynamikę rozwoju lokalnych ekstremów (max.) w funkcji liczby cykli obciążenia w zestawieniu ze średnią wartością odkształcenia. Średnia wartość wyliczona została z całego obszaru pomiarowego i odpowiada wartościom odczytywanym z ekstensometru o bazie 25 mm mocowanego podczas testów zmęczeniowych. Zauważyć należy znikomy wpływ wzrostu lokalnych ekstremów na wartość średnią z całego obszaru pomiarowego.



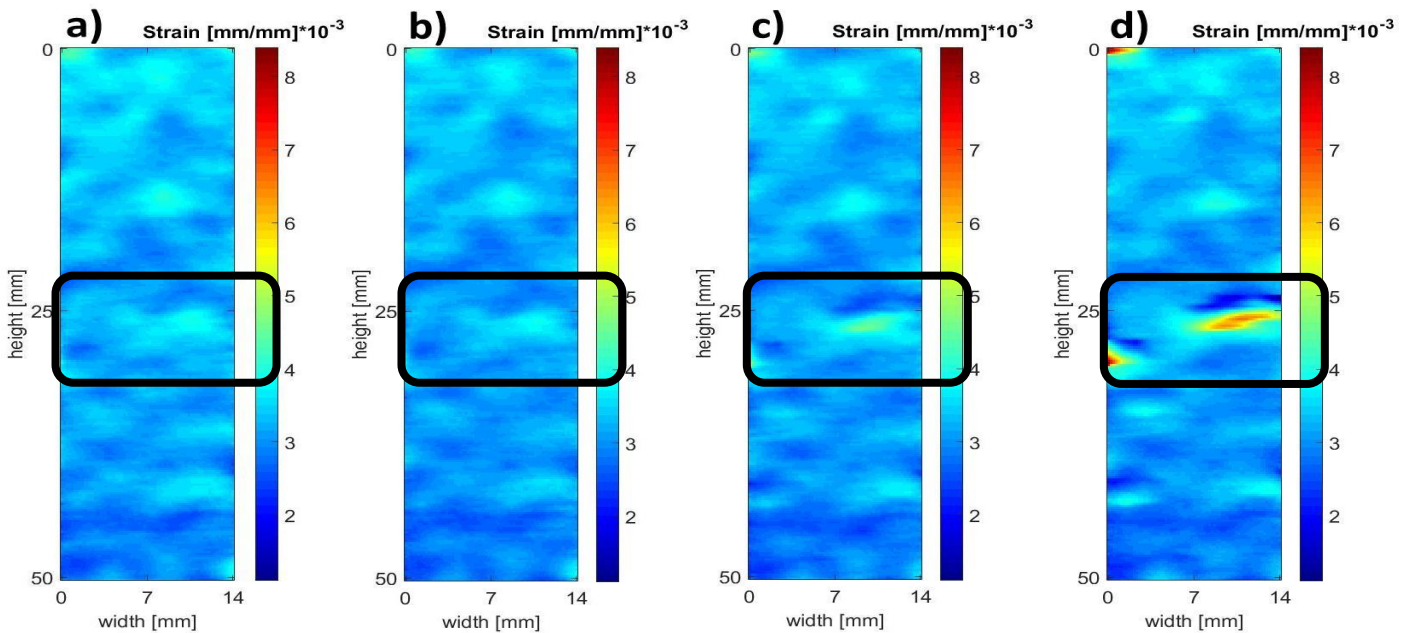
Rys. 13. Ilustracja miejsca dekohezji próbki GZ_07 i wykres rozwoju lokalnych ekstremów w funkcji liczby cykli.

Kolejne wyniki zarejestrowane zostały dla analogicznej próbki wykonanej z gruboziarnistego stopu MAR 247 (GZ_06). Obciążenie realizowane było również w cyklach odzerowotęgniących, a amplituda obciążenia wynosiła 600 MPa. Testy zmęczeniowe

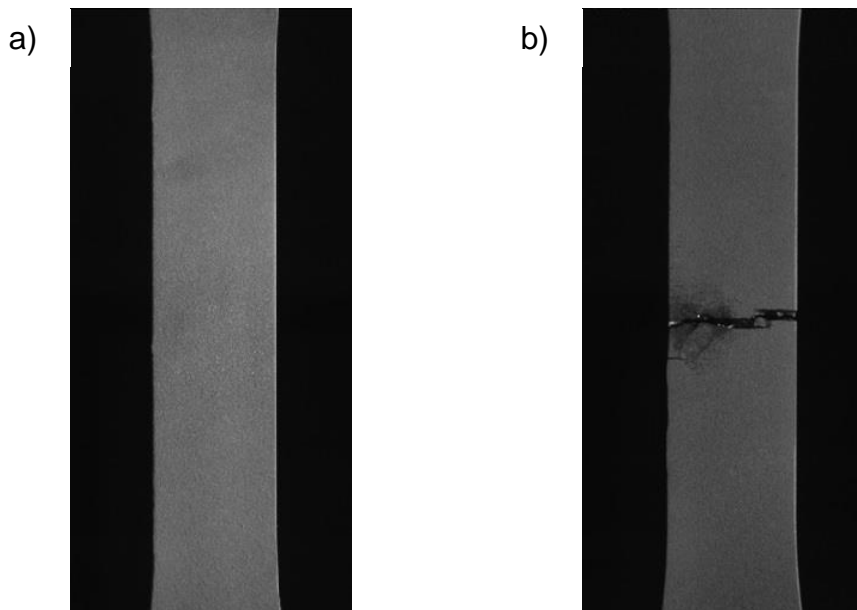
przerywane były w celu wykonania statycznego obciążenia niezbędnego do rejestracji mapy składowych odkształcenia z użyciem elektronicznej interferometrii plamkowej.



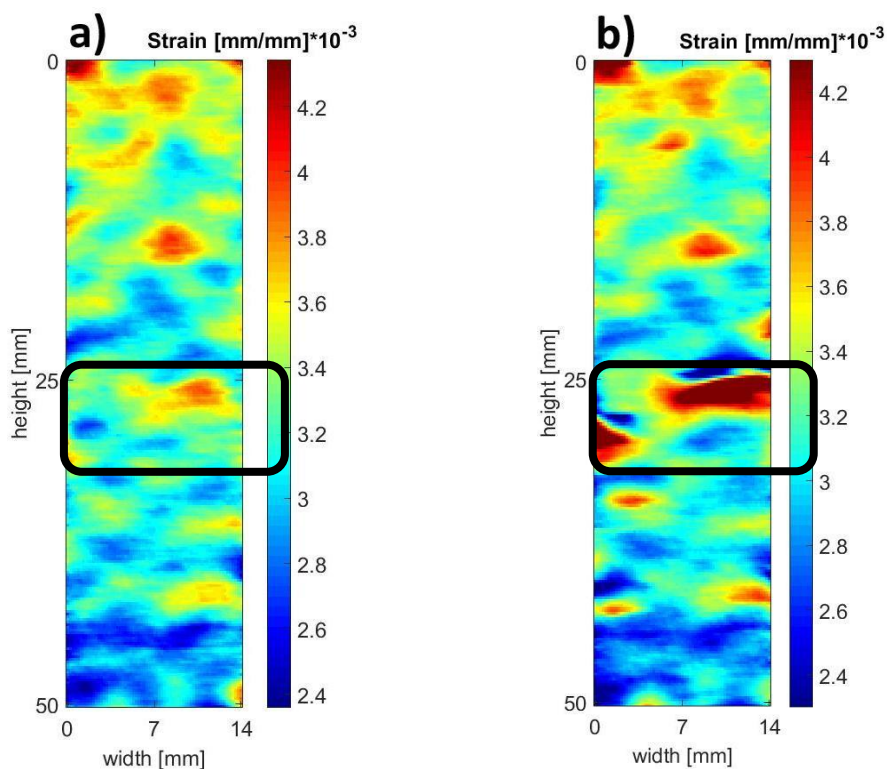
Rys. 14. Mapy odkształcenia w kierunku Y (wzdłuż osi działania siły), pomiar przeprowadzono w cyklu o numerze: a) 1; b) 20001; c) 40001; d) 50001. Skala została dobrana automatycznie do ekstremalnych wartości odkształcenia w każdym pomiarze.



Rys. 15. Mapy odkształcenia w kierunku Y (wzdłuż osi działania siły), pomiar przeprowadzono w cyklu o numerze: a) 1; b) 20001; c) 40001; d) 50001. Skala została dobrana do ekstremalnych wartości odkształcenia we wszystkich pomiarach: $\epsilon_{MIN}=1,1*10^{-3}$, $\epsilon_{MAX}=8,4*10^{-3}$.



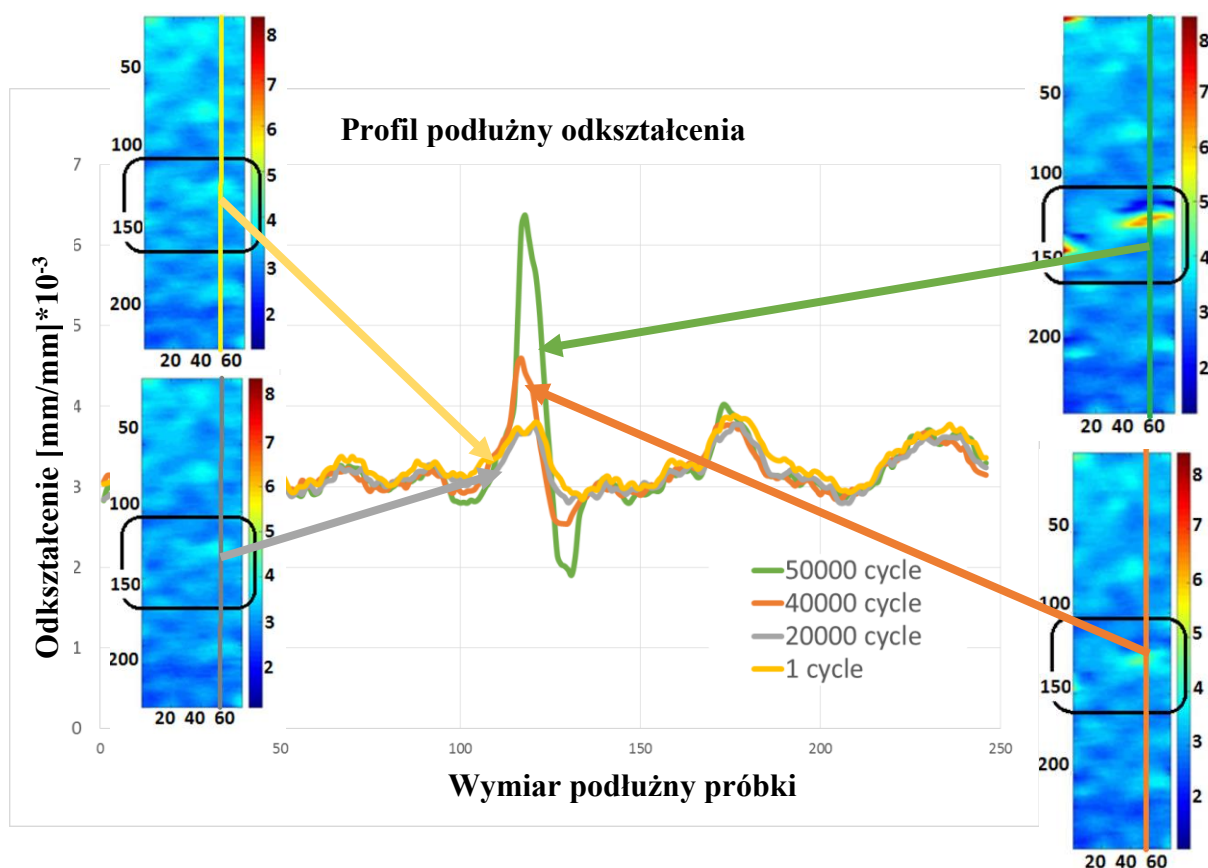
Rys. 16. Obraz próbki zmęczeniowej: a) próbka przed obciążeniami cyklicznymi; b) próbka po testach zmęczeniowych ($N_f = 54315$ cykli).



Rys. 17. Obraz próbki zmęczeniowej: a) próbka przed obciążeniami cyklicznymi; b) próbka po testach zmęczeniowych ($N_f = 54315$ cykli).

W przypadku próbki GZ_06 również można zaobserwować wyraźną lokalizację obszarów, które charakteryzują się największą dynamiką rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych, doprowadzającą do zniszczenia próbki w 54315 cyklu. Wyraźnie widoczne jest to na zdjęciach pokazujących miejsce dekohezji próbki zmęczeniowej (rysunek 16). Na rysunku 18 pokazana

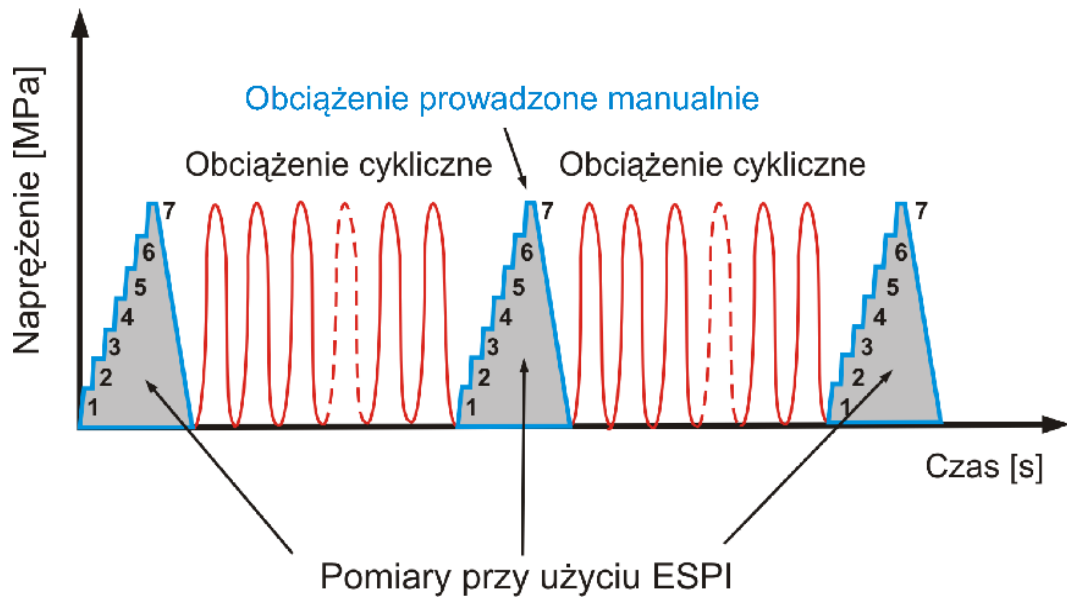
została składowa odkształcenia w funkcji wymiaru pionowego próbki. Profil przechodzi przez miejsce maksymalnej koncentracji wokół nieciągłości materiału i obrazuje rozwój składowych odkształcenia wraz ze wzrostem degradacji zmęczeniowej materiału (liczbą cykli).



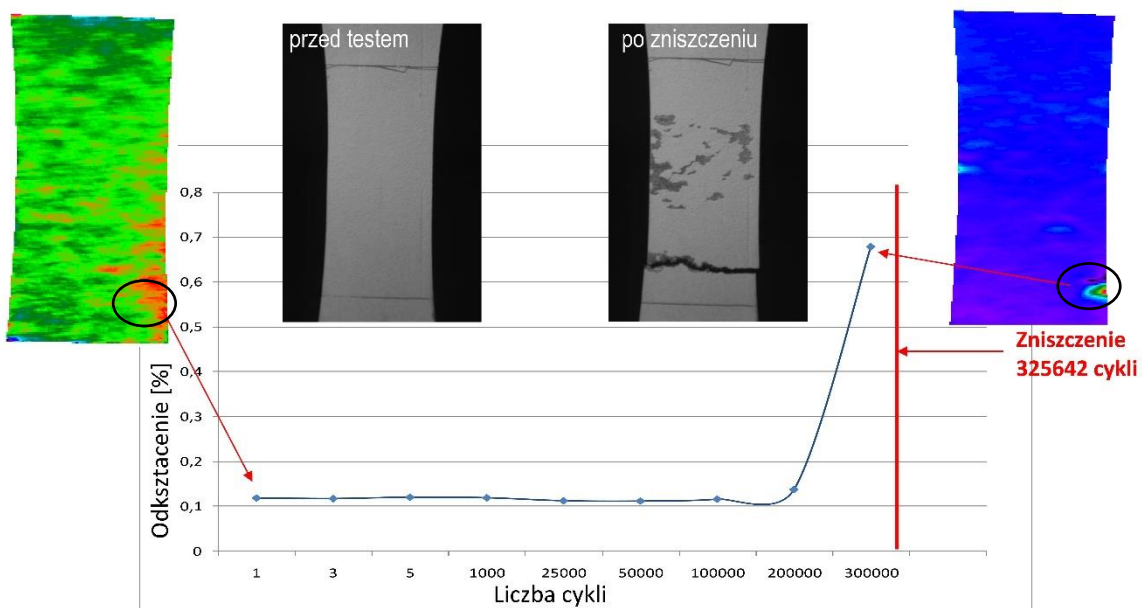
Rys. 18. Pionowe profile odkształcenia przechodzące przez miejsce maksymalnych wartości pionowej składowej odkształcenia.

2.2.3 Inne wyniki z zastosowaniem ESPI

Kolejnym przykładem zastosowania systemu ESPI do określania lokalizacji uszkodzeń powstających w trakcie prób zmęczeniowych są testy próbek wykonanych ze stopu aluminium o wysokim stopniu porowatości [2]. Próbki poddane zostały cyklicznemu rozciąganiu o wartości 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) testy zmęczeniowe były przerywane. Następnie próbka obciążana była krokowo (7 kroków do 100MPa) w celu wykonania pomiarów połowych deformacji powierzchni (rysunek 19).

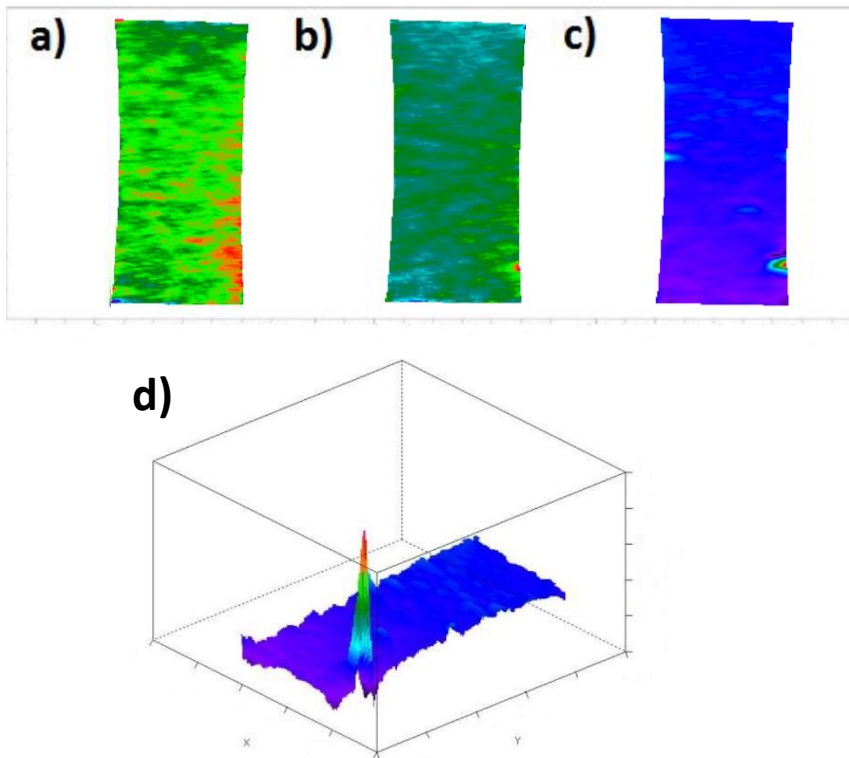


Rys. 19. Schemat zastosowania systemu ESPI w trakcie badań zmęczeniowych.



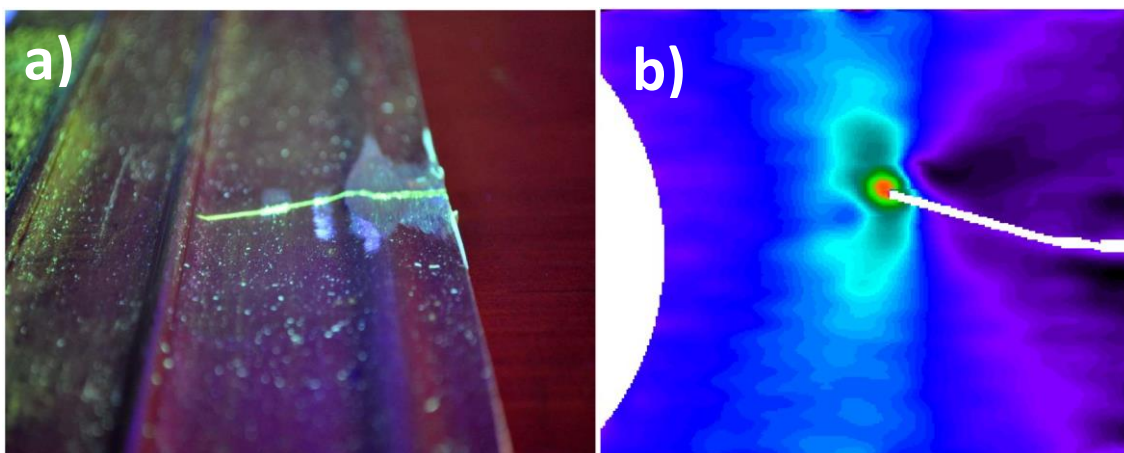
Rys. 20. Rozwój uszkodzenia w materiale wraz z uwidocznionym miejscem dekohezji.

W trakcie prowadzenia badań na powierzchni próbki (rysunek 20) obserwowano koncentrację odkształcenia występującą od pierwszych cykli, aż do 325 642 cyklu, w którym nastąpiło pęknięcie próbki. Mapy składowej odkształcenia zarejestrowane zostały w kierunku działania osiowej siły. Mapy składowych odkształcenia (rysunek 21) przedstawiają proces rozwoju deformacji wokół ogniska zmęczeniowego. Z wykresu (rysunek 20) przedstawiającego zmianę wartości maksymalnego odkształcenia w funkcji liczby cykli wynika, iż lokalna składowa wartości naprężenia do 200 000 cyklu pozostawała niezmienna, a po przekroczeniu tej liczby następował gwałtowny przyrost naprężenia generowanego w miejscu lokalizacji uszkodzenia, powodując zniszczenie próbki w 325 642 cyklu.

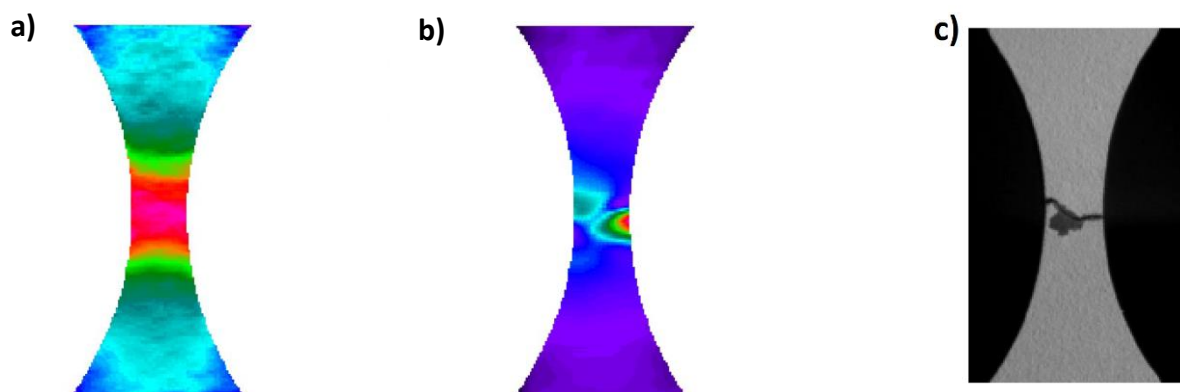


Rys. 21. Mapy składowych odkształcenia wykonane w kierunku osi Y (wzdłuż osi działania siły): a) po 1 cyklu; b) po 200 000 cyklach; c), d) po 300 000 cyklach [1].

Badania z wykorzystaniem systemu ESPI przeprowadza się na szerokiej gamie materiałów konstrukcyjnych stosowanych między innymi w lotnictwie, czy kolejnictwie. Przedstawiony fragment łopaty śmigłowca (rysunek 22a) został poddany analizie pozwalającej na określenie miejsca występowania największych wartości naprężenia (rysunek 22b). Badaniom poddano również stal kolejową P54T (rysunek 23) wycinając z niej próbki klepsydryczne i poddając procesowi zmęczenia.



Rys. 22. a) Fragment poszycia łopaty śmigłowca z widocznym pęknięciem poprzecznym; b) połowe rozkłady składowej odkształcenia na łopacie wokół pęknięcia.



Rys. 23. Polowe rozkłady składowej odkształcenia próbek klepsydrycznych wykonanych ze stali P54T poddanych procesowi zmęczenia: a) po 1 cyklu; b) po 37 500 cyklach; c) po 42 221 cyklach.

3. Wnioski

Jak wykazały powyższe wyniki, istnieje możliwość lokalizacji i monitorowania lokalnych uszkodzeń zmęczeniowych w badanym odlewie MAR 247 pokrytym warstwą aluminidkową. Znane są również inne metody oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego bazujące na globalnych wartościach składowych odkształcenia [1], nie umożliwiają one jednak lokalizacji uszkodzeń zmęczeniowych. Lokalizacja uszkodzeń jest możliwa za pomocą polowych metod badań deformacji powierzchni lub metod defektoskopowych [2, 6]. Proces zmęczenia w materiale niejednorodnym, takim jak badany gruboziarnisty stop odlewniczy MAR247, wykazuje efekt lokalizacji odkształcenia już w pierwszych cyklach obciążenia. Spowodowane jest to licznymi koncentratorami naprężenia w strukturze materiału. Efekt lokalizacji przy użyciu optycznych, polowych metod jak ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) [7, 8, 9] lub DIC (Digital Image Correlation) [5, 6] jest możliwy dla powierzchniowych i podpowierzchniowych defektów. Z tego względu wspomniane metody powinny znaleźć zastosowanie przede wszystkim w badaniach cienkościennych elementów konstrukcji.

Literatura

- [1] Moćko W., Grzywna P., Kowalewski Z.L., Radziejewska J.: An influence of cyclic loading on the form of constitutive relationship for DP500 steel, *MATERIALS AND DESIGN*, 103, 2016, 183-193.
- [2] Dietrich L., Grzywna P., Kukła D.: Wykorzystanie metod optycznych do lokalizacji uszkodzeń zmęczeniowych, *Przegląd Spawalnictwa* 13, 2012, 15-18.
- [3] Materiały firmy DANTEC Dynamic, www.dantecdynamics.com.
- [4] Patorski K., *Interferometria laserowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005, 214-261.
- [5] Szymczak T., Grzywna P., Kowalewski Z.L.: Nowoczesne metody określania wytrzymałościowych właściwości materiałów konstrukcyjnych, *Transport Samochodowy* 1, 2013, 79-104.
- [6] Kowalewski Z. L., Dietrich L., Kopeć M., Szymczak T., Grzywna P.: Nowoczesne systemy optyczne w badaniach mechanicznych – budowa, działanie, zastosowania, XXII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 2016.
- [7] 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.
- [8] 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. Dulieu-Barton, R.L. Burguete, 2009, 8-9.
- [9] 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. Dulieu-Barton, R.L. Burguete, 2009, 14-15.

Podziękowania

Praca została częściowo wykonana w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki nr 2014/15/B/ST8/04368.