

ANALIZA ODKSZTAŁCEŃ LOKALNYCH W OBSZARACH NIECIĄGŁOŚCI GEOMETRYCZNYCH I NIEJEDNORODNOŚCI MATERIAŁOWYCH

Józef SZALA*, Dariusz BOROŃSKI*

* Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
al. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

jszpkm@utp.edu.pl, daborpkm@utp.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono syntetyczne omówienie metod stosowanych w analizie odkształceń lokalnych w obszarach nieciągłości geometrycznych i niejednorodności materiałowych. Uwagę skoncentrowano na metodach doświadczalnych i hybrydowych znajdujących zastosowanie w badaniach realizowanych w warunkach obciążeń zmiennych w czasie. Na wybranych przykładach przedstawiono możliwości ich stosowania w analizie zagadnień zmęczenia i mechaniki pęknięcia materiałów i konstrukcji.

1. WPROWADZENIE

Wiedza na temat lokalnego stanu odkształceń i naprężeń stanowi niezwykle istotny element wielu metod obliczeniowych stosowanych w procesie konstruowania maszyn i urządzeń. Zróżnicowanie geometryczne i materiałowe, stosowanie połączeń spajanych powodują, że praktycznie nie ma elementów konstrukcyjnych, w których nie występują efekty lokalnych spiętrzeń odkształceń i naprężeń. O ile w przypadku obciążeń statycznych ich znaczenie jest ograniczone głównie do zagadnień mechaniki pęknięcia, tak w przypadku obciążeń zmiennych w czasie, stanowią jeden z podstawowych czynników wpływających na wytrzymałość i trwałość konstrukcji.

W ocenie stanu odkształceń i naprężeń lokalnych w obszarach nieciągłości geometrycznych i niejednorodności materiałowych stosowanych jest wiele metod: analitycznych, numerycznych, doświadczalnych i hybrydowych. W pracy przedstawione zostaną wybrane metody analizy rozkładów odkształceń i naprężeń lokalnych, ze szczególnym zwróceniem uwagi na możliwości ich stosowania w zagadnieniach zmęczenia i mechaniki pęknięcia oraz przykłady zastosowania metod doświadczalnych i hybrydowych w analizie odkształceń w strefach zmęczeniowego pęknięcia elementów z nieciągłościami geometrycznymi i niejednorodnością materiałową.

Spiętrzania odkształceń i naprężeń rozpatrywane są w problematyce zmęczenia materiałów od wielu lat i doczekały się szeregu znaczących opracowań. Wykorzystywane są one pośrednio także w praktyce inżynierskiej. Przykładami mogą być powszechnie stosowane teoretyczne metody analizy odkształceń i naprężeń lokalnych oparte na tzw. regule Neubergera (1961) lub modelu Glinki-Molskiego (Glinka, 1985), a także nowe

metody np. Łagody-Machy (1998). Ich zaletą jest prostota oraz łatwość zastosowania w metodach obliczeń trwałości zmęczeniowej, jednak skuteczność często zależy od prawidłowości doboru odpowiedniej wartości współczynników kształtu K_t lub współczynników działania karbu K_f .

Analiza wpływu stanu odkształceń i naprężeń na przebieg zmęczenia wymaga jednak wiedzy nie tylko o ich maksymalnych wartościach, ale także o ich rozkładach, udziale składowych sprężystych i plastycznych, przebiegu zmian w trakcie cyklicznie zmiennego obciążenia oraz o cyklicznych właściwościach materiału. Z tego powodu bardzo duże znaczenie w analizie spiętrzeń odkształceń

i naprężeń posiadają metody numeryczne, głównie metoda elementów skończonych. Są one jednak obarczone ograniczeniami. Związane są one głównie ze złożonością i różnorodnością postaci geometrycznej obiektów oraz charakteru obciążeń, jak i trudnościami w modelowaniu właściwości materiałowych. Pełna analiza numeryczna wymaga, m.in. bardzo precyzyjnego odtwarzania stanu obciążenia w analizowanym obiekcie. Ponadto w wielu przypadkach proste ograniczenie modelowania tylko do strefy elementu objętej analizą zmęczeniową powoduje znaczne uproszczenia. Polegają one m.in. na nieuwzględnianiu oddziaływania odrzuconej części obiektu na jego rozważany obszar (efekt dekompozycji obiektu) oraz nieuwzględnianiu zmian własności materiałowych wywołanych cyklicznością obciążenia.

Możliwość mniej lub bardziej dokładnej teoretycznej analizy stanu odkształceń i naprężeń w elemencie konstrukcyjnym nie jest tym samym w wielu przypadkach wystarczająca. Wielokrotnie, obserwowany przebieg zmian odkształceń i naprężeń lokalnych jest daleki od wyznaczonego metodami teoretycznymi. W konsekwencji ciągle bardzo ważnym narzędziem

w badaniach zmęczeniowych pozostają metody analizy odkształceń i naprężeń oparte na technikach doświadczalnych.

2. PRZEGLĄD WYBRANYCH METOD ANALIZY ODKSZTAŁCEŃ I NAPRĘŻEŃ LOKALNYCH

Jak już wcześniej wspomniano, pomimo istnienia uznanych i zweryfikowanych analitycznych modeli opisujących rozkłady odkształceń i naprężeń w miejscach ich koncentracji, ich zastosowanie często jest zawężone do najprostszych geometrii i obciążeń elementów oraz prostych opisów własności materiałowych. Z tego względu możliwości ich praktycznego zastosowania w wielu przypadkach są mocno ograniczone.

Także w przypadku licznej grupy metod doświadczalnych, jak i coraz szerzej stosowanych metod numerycznych, nie da się wskazać narzędzi uniwersalnych, których zastosowanie nie budziłoby wątpliwości lub nie byłoby związane z koniecznością wprowadzania różnego typu ograniczeń.

W dalszej części pracy krótko scharakteryzowane zostaną wybrane metody numerycznej, doświadczalnej i hybrydowej analizy odkształceń.

2.1. Metody numeryczne

Postęp w zakresie technik komputerowych i technologii informatycznych powoduje, że w ostatnich latach obserwowany jest bardzo znaczny wzrost zastosowania metod numerycznych w zagadnieniach mechaniki. Dotyczy to zarówno konwencjonalnych metod takich jak metoda różnic skończonych, metoda elementów skończonych czy metoda elementów brzegowych, jak i rozwijających się gwałtownie sieci neuronowych, algorytmów genetycznych czy dynamiki molekularnej.

Te ostatnie pomimo wielu zalet dających możliwości rozwiązywania zagadnień niemożliwych do osiągnięcia metodami konwencjonalnymi, pozostają ciągle na etapie rozwoju i ich praktyczne zastosowanie np. w zagadnieniach zmęczenia i mechaniki pęknięcia jest niewielkie. Ponadto zależą one bardzo od możliwości technicznych komputerów, co także ogranicza często ich zastosowanie.

Analiza literatury wskazuje, że najczęściej stosowanymi metodami numerycznymi w analizie odkształceń i naprężeń w zagadnieniach zmęczenia i mechaniki pęknięcia pozostają nadal metoda elementów skończonych oraz metoda elementów brzegowych. Między innymi w pracy Mackerle'go (1995) przedstawiono wykaz 256 prac opublikowanych w latach 1992-1994 wykorzystujących metodę elementów skończonych oraz 97 prac zrealizowanych z zastosowaniem metody elementów brzegowych w analizie współczynników intensywności naprężeń oraz całki J .

2.1.1. Metoda elementów skończonych

Duża łatwość uzyskiwania pełnej informacji o stanie odkształceń i naprężeń w elementach o bardzo zróżnicowanej geometrii i właściwościach materiałowych powoduje, że metoda elementów skończonych stosowana

jest w coraz szerszym zakresie także w analizach z zakresu obciążeń zmęczeniowych.

W metodzie tej równania różniczkowe stosowane w mechanice ciał odkształcalnych przypisuje się skończonej liczbie podobszarów tworzących cały analizowany obszar. Prosta geometria tych podobszarów nazywanych elementami skończonymi, pozwala na łatwy dobór funkcji aproksymujących rozwiązania w ich wnętrzu. Kolejne iteracje obliczeń, zmierzające do uzyskania założonego poziomu zbieżności, przy zastosowaniu odpowiednio gęstego podziału na elementy skończone (siatkę podziału) mogą zapewnić prawidłowe rozwiązanie dla całego badanego obszaru. Jednak bezkrytyczne stosowanie metody elementów skończonych spowodowane m.in. brakiem pełnego zrozumienia zasad jej funkcjonowania w wielu przypadkach może prowadzić do znacznych błędów.

Skuteczność metody bardzo często zależy będzie od jakości modelu fizycznego reprezentującego rzeczywisty obiekt. Dotyczy to zarówno modelowania geometrycznego (sposób podziału badanego obszaru na elementy skończone, zastosowany rodzaj elementów), sposobu jego obciążania podczas analizy i co w przypadku obciążeń zmiennych w czasie jest szczególnie istotne, użytego modelu materiałowego.

Z tego względu główne zastosowanie metody elementów skończonych w przypadku analiz zmęczeniowych dotyczy:

- analizy pól odkształceń i naprężeń wyznaczanych dla sprężystych lub cyklicznych sprężysto-plastycznych własności materiału,
- wyznaczania parametrów mechaniki pęknięcia, w tym głównie współczynnika intensywności naprężeń K i całki J . Przykładowo obliczenia wartości współczynnika intensywności naprężeń K mogą być realizowane kilkoma metodami wykorzystującymi w różny sposób wyniki analizy pól przemieszczeń lub naprężeń w otoczeniu pęknięcia:
- metoda bezpośrednia - umożliwi wyznaczenie wartości K na podstawie zależności opisujących pole naprężeń lub przemieszczeń, np. w oparciu o model Irwina, metoda energetyczna γ - wykorzystuje do wyznaczenia wartości K wartość jednostkowej energii niezbędnej do rozwoju pęknięcia γ , metoda energetyczna J - pozwala na obliczenie wartości K na podstawie całki J obliczonej dla numerycznie wyznaczonych wartości liniowo-sprężystych składowych odkształceń i naprężeń dla zadanego konturu całkowania,
- metoda superpozycji (hybrydowa) - metoda wykorzystuje analityczny opis pól mechanicznych wokół pęknięcia jako funkcję naprężeń wyznaczonych numerycznie w oddaleniu od pęknięcia,
- metoda specjalnych elementów wierzchołkowych - w metodzie wykorzystuje się elementy skończone o zmienionych właściwościach, które wprowadza się w bezpośrednim sąsiedztwie wierzchołka pęknięcia; dla zapewnienia ciągłości przemieszczeń elementy te łączą się z elementami standardowymi poprzez elementy przejściowe.

2.1.2. Metoda elementów brzegowych

Istota metody elementów brzegowych polega na rozwiązywaniu rozbudowanych układów równań algebraicznych powstających w wyniku aproksymacji problemów opisywanych w postaci brzegowych równań całkowych. W odróżnieniu od metody elementów skończonych dyskretyzacji podlega jedynie brzeg (lub powierzchnia) rozpatrywanego elementu, co nie wymaga ingerencji w jego obszar wewnętrzny. Jednak otrzymywane w wyniku obliczeń rozwiązanie nie jest ograniczone tylko do brzegu, lecz daje także pełną informację o wnętrzu elementu, pomimo braku jego dyskretyzacji. Metoda elementów brzegowych umożliwia prowadzenie analiz zarówno dla liniowych, jak i nieliniowych, w tym plastycznych, modeli materiałowych. Nie pozwala jednak na wprowadzenie zróżnicowania właściwości materiałowych.

Metoda elementów brzegowych znajduje szczególne zastosowanie w analizie zagadnień związanych z modelowaniem wzrostu pęknięcia zmęczeniowego. Wynika to z jej dobrej skuteczności w zakresie analiz pól odkształceń i naprężeń w obszarach silnych spiętrzeń naprężeń, dla których opracowane zostały specjalne nieciągłe elementy brzegowe modelujące np. osobliwe pola naprężeń w strefie wierzchołka pęknięcia. Dzięki temu możliwe jest dokładne wyznaczenie wartości całki J i współczynników intensywności naprężeń.

2.2. Metody doświadczalne

Warunki badań stosowane w analizie zagadnień zmęczenia i mechaniki pęknięcia w wielu przypadkach ograniczają możliwość zastosowania licznych technik pomiarowych. Ograniczenia te związane są przede wszystkim z możliwościami realizacji pomiaru w warunkach obciążeń zmiennych w czasie, z występowaniem silnych gradientów odkształceń oraz czułością i zakresem pomiarowym metod pomiarowych.

W większości przypadków analiza rozkładów odkształceń wymaga zastosowania metod pełnego pola, przy czym można także wskazać uzasadnione przypadki zastosowania (np. w analizie gradientów odkształceń) technik pomiaru „punktowego”, głównie techniki tensometrycznej (np. Muller de Almeida i Hansen (1998)). Wymiary pojedynczych tensometrów znacznie jednak ograniczają dokładność pomiarów, ze względu na efekt uśredniania odkształceń w polu pomiarowym tensometru, co powoduje że takie rozwiązania stosowane mogą być głównie w dużych elementach. Ponadto jednoczesny pomiar odkształceń z dużej liczby tensometrów wymaga zastosowania wielokanałowych wzmacniaczy pomiarowych z równoległym trybem pomiaru.

Spośród metod pełnego pola najliczniejszą grupę stanowią metody wykorzystujące pole elektromagnetyczne, a w tym przede wszystkim metody optyczne. Analiza literatury pozwala wskazać kilka metod znajdujących najczęstsze zastosowanie w badaniach rozkładów odkształceń i przemieszczeń w analizie zagadnień zmęczeniowych. Są to głównie metody: elastoptyczna, cyfrowej korelacji obrazu, termowizyjna, wspomagana

komputerowo metoda mory, interferometrii holograficznej, elektronicznej (lub cyfrowej) interferometrii plamkowej ESPI (DSPI), laserowej interferometrii siatkowej IS.

W przypadku prowadzenia pomiarów przemieszczeń w warunkach obciążeń zmiennych w czasie, realizowanych na hydraulicznych maszynach zmęczeniowych, dodatkowym utrudnieniem w ich praktycznym zastosowaniu jest wrażliwość na drgania oraz trudności w automatyzowaniu procesu pomiarowego.

Poniżej krótko scharakteryzowano wybrane metody pomiaru odkształceń lokalnych.

2.2.1. Metoda elastoptyczna

Ta jedna z najstarszych i najczęściej stosowanych metod pomiaru rozkładów odkształceń (rys.1), po pewnym spadku popularności, przechodzi w ostatnich latach wzrost zainteresowania. Jest to związane w szczególności sposobem z rozwojem technik cyfrowej rejestracji i analizy obrazu. Istotne znaczenie w tym zakresie ma także rozwój stereolitografii, umożliwiający budowę trójwymiarowych modeli wykonywanych z materiałów optycznie czułych.

Spolaryzowana wiązka światła białego (o długości fali $\lambda=400\div750\text{nm}$) przechodząc przez optycznie czułą warstwę (charakteryzującą się dwójłomnością wymuszoną) ulega rozkładowi na dwie wiązki propagujące w płaszczyźnie odkształceń głównych z prędkościami v_1 (dla kierunku odkształceń ε_1) i v_2 (dla kierunku odkształceń ε_2). Różnica prędkości v_1 i v_2 powoduje względne opóźnienie pomiędzy wiązkami wynoszące

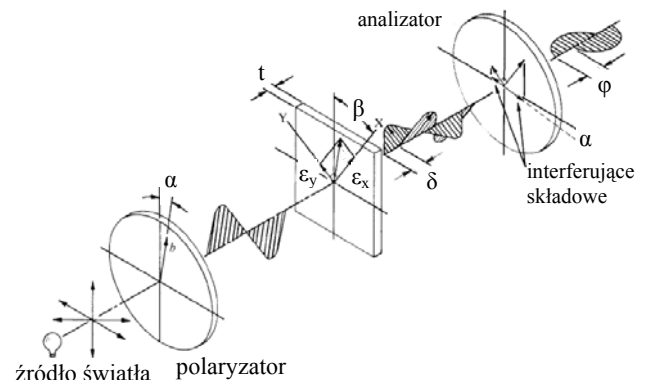
$$\delta = c (t/v_1 - t/v_2) = t (n_1 - n_2) \quad (1)$$

gdzie: n_1, n_2 - współczynniki załamania światła, t - czas

Zależność pomiędzy różnicą współczynników załamania światła, a różnicą odkształceń głównych opisuje prawo Brewstera

$$(n_1 - n_2) = K_e (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (2)$$

gdzie: K_e - stała elastoptyczna charakteryzująca fizyczne własności materiału



Rys. 1. Schemat metody elastoptycznej dla polaryzacji liniowej (Introduction to Stress Analysis)

Wiązki po przejściu przez obiekt interferują. W wyniku względnego opóźnienia δ niektóre barwy zostają wygaszone (gdy różnica faz interferujących wiązek jest krotnością długości fali λ), co w efekcie daje charakterystyczny obraz izochrom, opisywanych

numerami ich rzędów, reprezentujących strefy o takich samych różnicach odkształceń głównych. Zastosowanie polaryzacji liniowej umożliwia ponadto wyznaczenie kierunków odkształceń głównych reprezentowanych obrazem izoklin.

Rozróżnia się kilka odmian metody, w tym m.in.:

- a) dwuwymiarowa elastoptyka,
- b) trójwymiarowa elastoptyka,
- c) metoda pokryw elastoptycznych.

Dwuwymiarowa elastoptyka jest najbardziej tradycyjną odmianą metody, w której stosuje się geometrycznie skalowany model analizowanego obiektu wykonany z materiału elastoptycznego. Wynikiem pomiaru jest różnica naprężeń głównych (mapy izochrom) i kierunki naprężeń głównych (mapy izoklin).

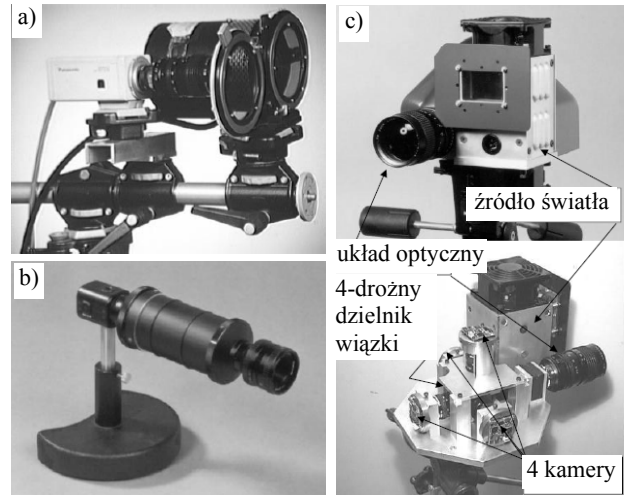
W trójwymiarowej elastoptyce (metoda zamrażania naprężeń) wykorzystuje się efekt zamrażania naprężeń w materiale o zdolności do nagłej zmiany własności przy przejściu przez charakterystyczną temperaturę.

Materiał, z którego wykonany jest model analizowanego obiektu, w podwyższonej temperaturze składa się z dwóch faz: sprężystej i wypełniającej ją fazy plastycznej lub lepkiej. Obciążenie próbki wywołuje odkształcenie fazy sprężystej. Po schłodzeniu próbki następuje nagle zmiana właściwości fazy plastycznej, przez co zostaje utrwalony stan odkształcenia fazy sprężystej, a tym samym po odciążeniu w próbce pozostaje taki sam stan naprężeń, jak przy obciążeniu. Podział próbki na „plastry” pozwala w dalszej kolejności na analizę naprężeń w układzie przestrzennym.

W metodzie pokryw elastoptycznych cienką warstwę materiału elastoptycznego przykleja się do powierzchni badanego obiektu. Światło po przejściu przez nią odbija się od powierzchni próbki i wraca na powierzchnię, gdzie rejestrowany jest obraz izochrom (i izoklin). W metodzie zakłada się, że odkształcenie elementu wywoła takie same odkształcenie warstwy, stąd jako wynik otrzymujemy mapy różnic odkształceń głównych.

W metodzie tej istnieje możliwość rozdzielenia różnic odkształceń głównych, np. poprzez dwukrotny pomiar izochrom przy normalnym i skośnym przechodzeniu promieni przez warstwę lub na podstawie izochrom i izoklin (Stupnicki, 1984).

Na rysunku 2 pokazano przykładowe polaryskopy do badań odkształceń metodą pokryw elastoptycznych (metodą warstwy optycznie czulej) – w konfiguracji standardowej (rys.2a) i przeznaczonej dla elastoptyki cyfrowej (rys.2b i 2c).

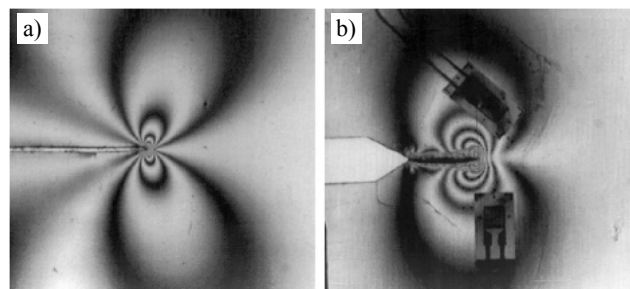


Rys. 2. Przykładowe polaryskopy stosowane w badaniach metodą pokryw elastoptycznych: a) model 031 MG – polaryskop z manualną optyką, b) poleidoscop – umożliwia jednoczesną rejestrację wielu obrazów, c) PSIOS system – umożliwia rejestrację 4 obrazów z przesunięciem fazowym (Patterson, 2002)

Przykłady zastosowania metody elastoptycznej w analizie zagadnień z zakresu zmęczenia i mechaniki pęknięcia omówiono m.in. w pracy Jamesa i innych (2003).

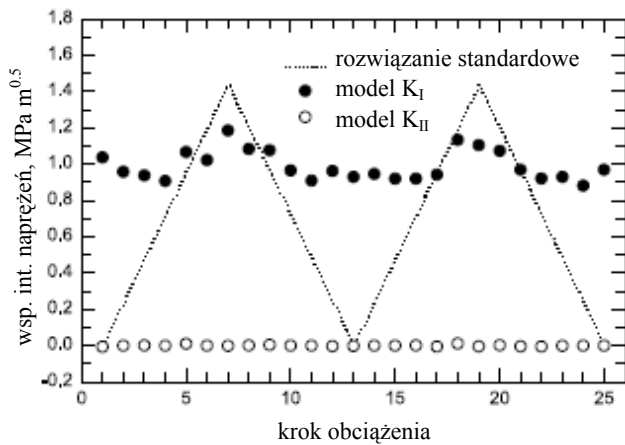
W pracy przedstawiono wyniki badań efektu zamykania pęknięcia zmęczeniowego techniką cyfrowej elastoptyki połączonej z analizą matematyczną z zastosowaniem modelu Muskhelishvili'ego.

Badania przeprowadzono na próbkach typu CT o grubości 2 mm wykonanych z poliwęglanu. Na rysunku 3 pokazano przykładowe mapy prążków uzyskane podczas badań.



Rys. 3. Mapy prążków w otoczeniu karbu (a) i w otoczeniu pęknięcia (b) (James i inni, 2003)

Wyniki analizy współczynników intensywności naprężeń K_I i K_{II} zaproponowaną w pracy metodą w porównaniu z wynikami analizy teoretycznej pokazano na rysunku 4.

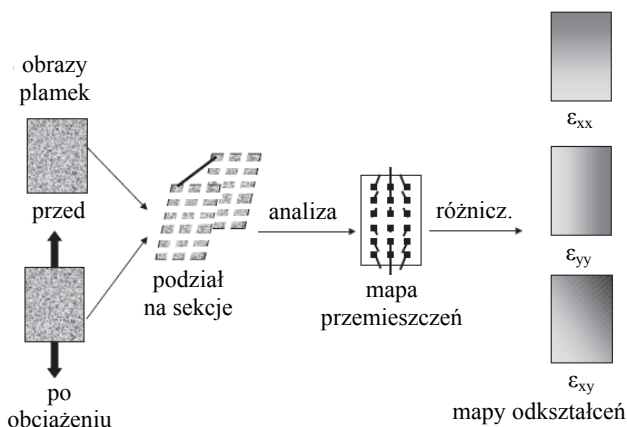


Rys. 4. Współczynniki intensywności naprężeń wyznaczone na podstawie pomiarów i zastosowanego modelu matematycznego (James i inni, 2003)

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, m.in. że strefa odkształceń plastycznych otaczających wierzchołek pęknięcia „chroni” pęknięcie od pełnego wpływu otaczającego je pola naprężeń. W pracy analizowano ponadto nacisk w strefie kontaktu, siły otwarcia pęknięcia, porównywano rozwiązania numeryczne z wynikami pomiarów.

2.2.2. Metoda cyfrowej korelacji obrazu

Rozwinięte w latach 80. metody korelacji obrazu (rys.5) polegają na porównaniu obrazu próbki przed i po odkształceniu uzyskanego w wyniku oświetlenia obiektu światłem białym lub światłem lasera (metody plamkowe). Przemieszczenia charakterystycznych punktów powierzchni próbki pozwalają wyznaczyć wartość odkształceń w analizowanym obszarze. Czulość metody zależy od parametrów metod obserwacji obrazu (wymiary pola obserwacji, rozdzielczość geometryczna obrazu).



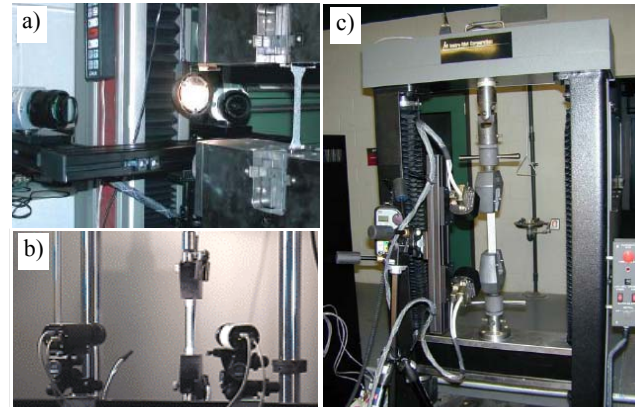
Rys. 5. Schematyczne ujęcie metody cyfrowej korelacji obrazu (Lagattu i inni, 2004)

Jednym ze sposobów uzyskania losowych punktów na powierzchni próbki jest ich namalowanie. Zarejestrowanie obrazu punktów przed i po deformacji obiektu w pamięci komputera pozwala w dalszej kolejności na skorelowanie tych obrazów na podstawie intensywności zapisanej dla każdego piksela obrazu przez matrycę CCD.

Zastosowanie funkcji interpolacyjnych pozwala na zwiększenie dokładności w stosunku do analizy ściśle cyfrowej przeprowadzonej dla siatki pikseli. Do analizy obrazu plamek stosowane są także metody sztucznej inteligencji,

w tym m.in. algorytmy genetyczne (Pilch i inni, 2004).

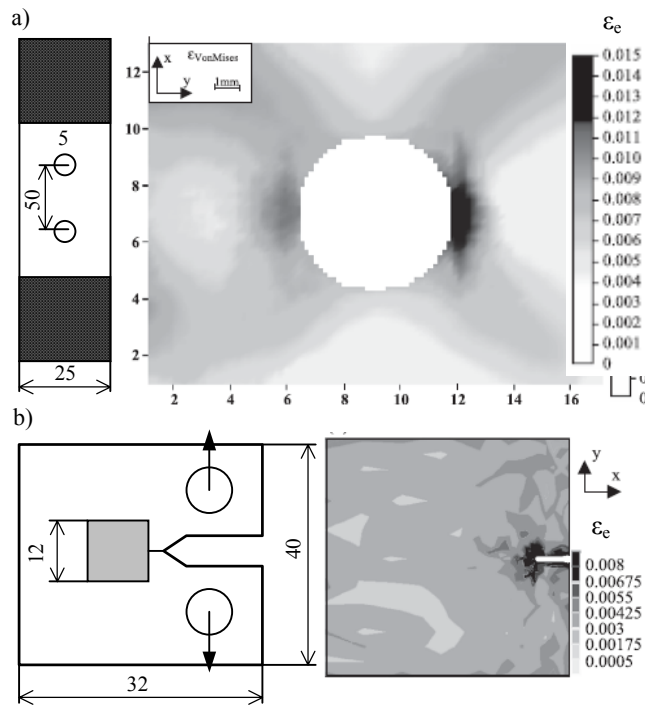
Na rysunku 6 pokazano przykładowe układy pomiarowe stosowane w analizie odkształceń metodą cyfrowej korelacji obrazu.



Rys. 6. Przykłady instrumentarium pomiarowych stosowanych w metodzie cyfrowej korelacji obrazu: a) system ARAMIS GOM mbH (www.gom.com), b) Correlated Solution (www.correlatedsolutions.com), c) Trilion Quality Systems (Schmidt i Tyson, 2003)

Rozwój technik cyfrowej korelacji obrazu związany jest z rozwojem optoelektroniki. Coraz większe rozdzielczości kamer umożliwiają bowiem uzyskiwanie coraz większych czułości pomiarowych. Jednak należy pamiętać, że w przypadku cyklicznie zmiennych obciążeń, uniknięcie efektu dekorelacji obrazu wymaga częstej rejestracji obrazu. Przy wzrastającej rozdzielczości kamer i zastosowaniu cyfrowych układów transmisji obrazu, oznacza to konieczność przesyłania bardzo dużych ilości danych w krótkim czasie. Stanowi to silne, techniczne ograniczenie możliwości zastosowania metod DIC w przypadku obciążeń zmiennych w czasie. Aktualnie spotyka się przykłady zastosowania metod DIC, jednak głównie w analizie obiektów wykonanych z materiałów o małej sztywności, których obciążenie generuje zazwyczaj duże odkształcenia, co pozwala na stosowanie kamer o mniejszych rozdzielczościach.

Przykładowo, w pracy Lagattu i innych (2004) przedstawiono wyniki badań realizowanych w warunkach silnych gradientów odkształceń: w otoczeniu otworu w płaskiej próbce wykonanej z laminatu, na wierzchołku pęknięcia w stopie TiAl i w otoczeniu szyjki powstającej w rozciąganej próbce polimerowej. Przykładowe rozkłady odkształceń wyznaczone w badaniach pokazano na rysunku 7.



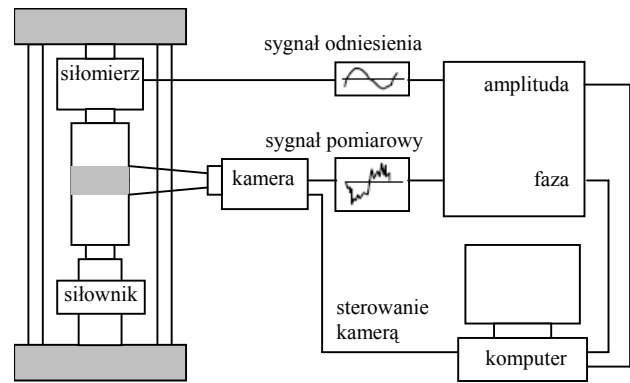
Rys. 7. Rozkłady odkształceń ekwiwalentnych ϵ_e (von Mises) wyznaczone metodą cyfrowej korelacji obrazu: a) w otoczeniu otworu w próbce wykonanej z termoplastycznego laminatu węglowego, b) rozkłady odkształceń własnych powstałych w wyniku obciążenia zmęczeniowego próbki typu CT wykonanej ze stopu TiAl (Lagattu i inni, 2004)

2.2.3. Termowizja

Termowizja polega na wykorzystaniu promieniowania podczerwonego do analizy rozkładu temperatury obiektu. Przyjmuje się istnienie co najmniej czterech przyczyn zmian temperatury obiektu: zewnętrzne źródła ciepła, przewodność cieplną, efekt termosprężysty oraz wewnętrzną dyssypację energii.

W analizie rozkładów odkształceń w warunkach obciążeń sprężystych zastosowanie znajduje sprzężony efekt termosprężysty. Efekt ten wykorzystuje zjawisko odwrotnej konwersji pomiędzy energią mechaniczną i cieplną towarzyszące sprężystym obciążeniom rozciągającym lub ściskającym materiału powodującym zmianę temperatury obiektu. W warunkach adiabatycznych zależność pomiędzy sumą naprężeń głównych a temperaturą jest liniowa i nie zależy od częstotliwości obciążenia.

Technika analizy naprężeń za pomocą emisji cieplnej w zakresie obciążeń sprężystych znana jest jako SPAT (stress pattern analysis by thermal emissions) i polega na analizie rozkładu temperatur w trakcie cyklicznego obciążenia obiektu (rys.8).



Rys. 8. Schemat systemu pomiarowego do analizy naprężeń metodą TSA (Lesniak i Boyce, 1995)

Występowanie odkształceń plastycznych w trakcie cyklicznego zmiennego obciążenia związane jest z dyssypacją energii (praca odkształcenia plastycznego), która jest główną przyczyną wewnętrznych efektów cieplnych występujących w większości materiałów. Wyznaczenie ilościowych związków odkształceń plastycznych

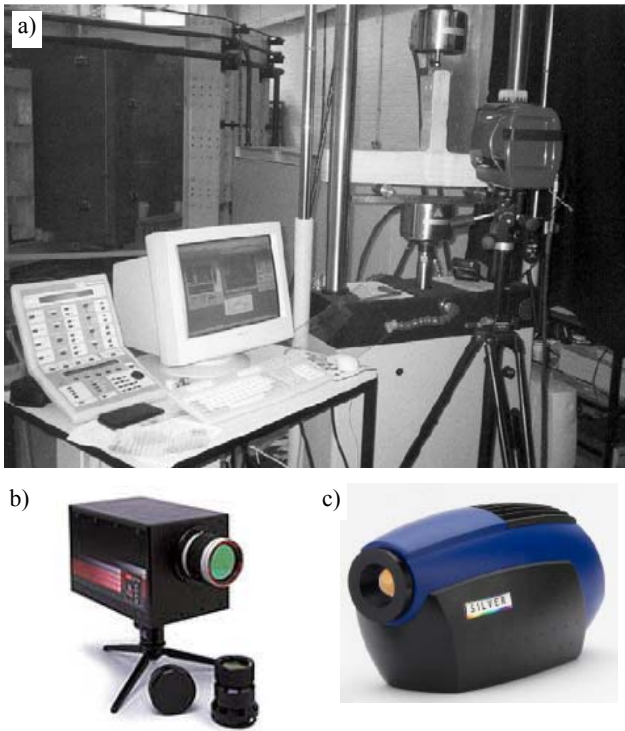
i temperatury mierzonej za pomocą promieniowania podczerwonego jest bardzo trudnym zadaniem, stąd zastosowanie termowizji w tym zakresie obciążeń ogranicza się głównie do analizy jakościowej, w tym analizy gradientów temperatur, detekcji uszkodzeń, itp.

Metody analizy naprężeń na podstawie pomiaru temperatur (TSA) wymagają bardzo wysokich czułości kamer termowizyjnych na poziomie 1-20 mK (czułość zwykłych kamer to około 80 mK). Na rysunku 9 pokazano przykładowe kamery termowizyjne stosowane w badaniach rozkładów naprężeń.

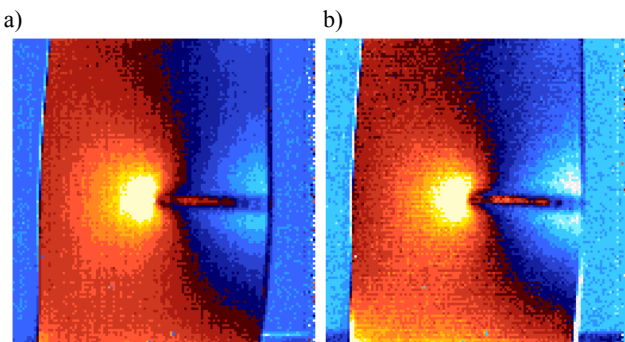
Możliwość zastosowania metody TSA w warunkach obciążeń sinusoidalnie i losowo zmiennych przedstawiono w pracy Lesniaka i innych (1998). Badania prowadzono na próbkach akrylowych z karbem (rys.10). Z kolei w pracy Ody i innych (2004) metoda termograficzna bazująca na teorii termosprężystości i termoplastyczności została zastosowana do analizy rozkładów naprężeń i odkształceń w niejednorodnych złączach (stal HT 780 i SS 400) spawanych elektronowo. W badaniach stosowano próbki złączy o zróżnicowanym położeniu karbu względem linii spoiny. Na rysunku 11 pokazano przykładowe wyniki analizy naprężeń w jednym z typów złączy, a na rysunku 12 rozkłady odkształceń plastycznych .

Otrzymane wyniki badań były w dużej zgodności z aktualnym stanem wiedzy na temat odkształceń tego typu struktur i w dobrej korelacji z wynikami analizy numerycznej metodą elementów skończonych.

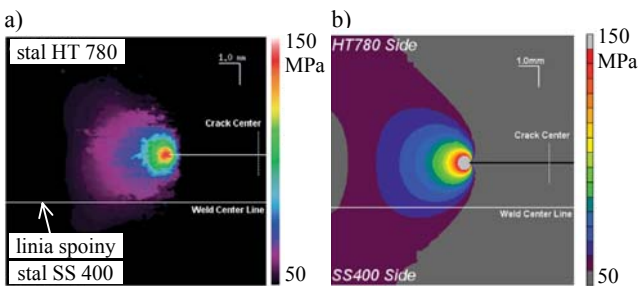
Ponadto analiza termoplastyczna wykazała swoją użyteczność w wyznaczaniu jakościowych map rozkładów odkształceń plastycznych.



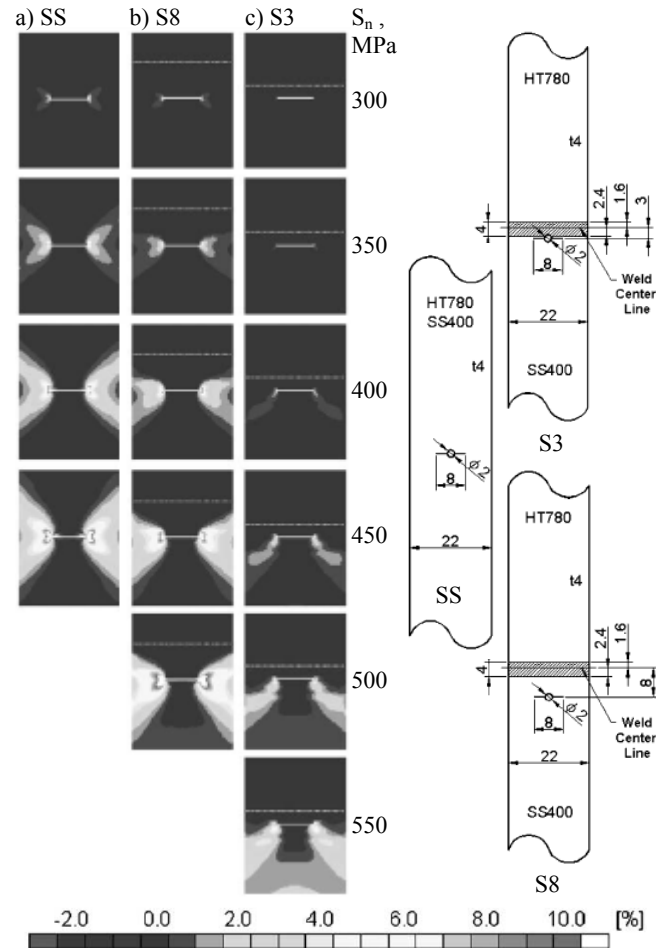
Rys. 9. Kamery termowizyjne: a) b) DeltaTherm (Earl i inni, 2003), c) Cedip (www.cedip-infrared.com)



Rys. 10. Obrazy analizy termosprężystej dla akrylowej próbki z krabem poddanej obciążeniu sinusoidalnie (a) i losowo zmiennym (b) (Lesniak i inni, 1998)



Rys. 11. Porównanie sum naprężeń głównych w otoczeniu końca pęknięcia wyznaczonych metodą termograficzną (a) i metodą elementów skończonych (b) (Oda i inni, 2004)



Rys. 12. Przykładowe rozkłady ekwiwalentnych odkształceń plastycznych dla trzech typów próbek dla różnych wartości naprężeń nominalnych (Oda i inni, 2004)

2.2.4. Interferometria holograficzna

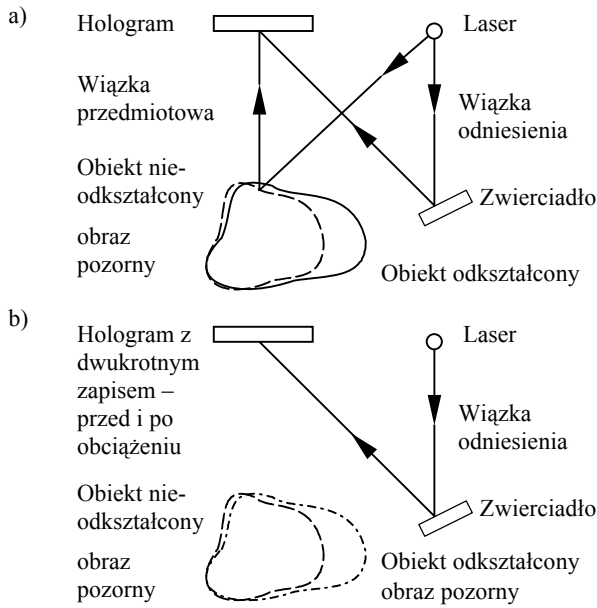
W interferometrii holograficznej wykorzystuje się do pomiaru odkształceń podstawową cechę hologramu, tj. zdolność do pełnego odtworzenia frontu falowego biegnącej od przedmiotu przy rejestracji hologramu. Zestawienie bieżącej fali przedmiotowej z falą odtworzoną z hologramu umożliwia zatem porównanie dwóch stanów obiektu.

Rozróżniane są dwa podstawowe sposoby porównywania frontów falowych, metodą podwójnej ekspozycji i metodą czasu rzeczywistego (rys.13).

W przypadku metody interferometrii holograficznej czasu rzeczywistego, bieżący obraz obiektu porównywany jest z obrazem odtworzonym z wcześniej zarejestrowanego hologramu. Wymaga to, aby hologram z zapisem pierwotnego stanu obiektu zachowywał dokładnie takie samo położenie w trakcie całego badania. W wyniku oświetlenia hologramu wiązką rekonstruującą – wiązką odniesienia, uzyskujemy pozorny obraz obiektu na tle obiektu rzeczywistego. Ponieważ obydwie fale pochodzą z tego samego źródła, mogą ze sobą interferować, a powstające prążki interferencyjne dają informację o różnicy faz pomiędzy frontami fal.

W metodzie podwójnej ekspozycji klisza holograficzna podlega podwójnemu naświetleniu: na początku i na koniec obciążania. W wyniku odtworzenia

hologramu poprzez falę rekonstruującą powstają dwie fale pochodzące od dwóch pozornych obrazów obiektów.



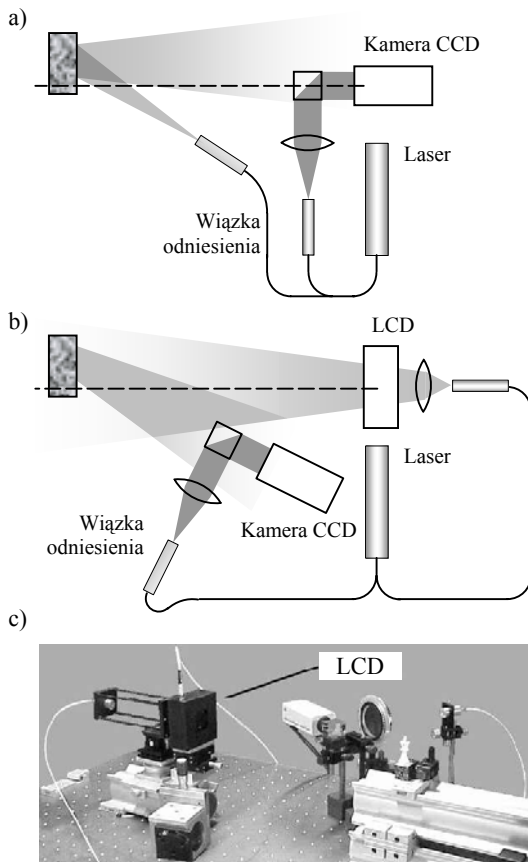
Rys. 13. Schemat odzworowywania odkształceń w metodzie interferometrii holograficznej: a) metoda czasu rzeczywistego, b) metoda podwójnej ekspozycji

Ponieważ obydwa fronty falowe powstające w wyniku użycia tej samej wiązki rekonstruującej są spójne, interferują ze sobą, a powstające prążki niosą informację o różnicy faz pomiędzy obydwojma powstałymi falami świetlnymi, czyli o różnicy stanu deformacji dwukrotnie zarejestrowanego obrazu obiektu.

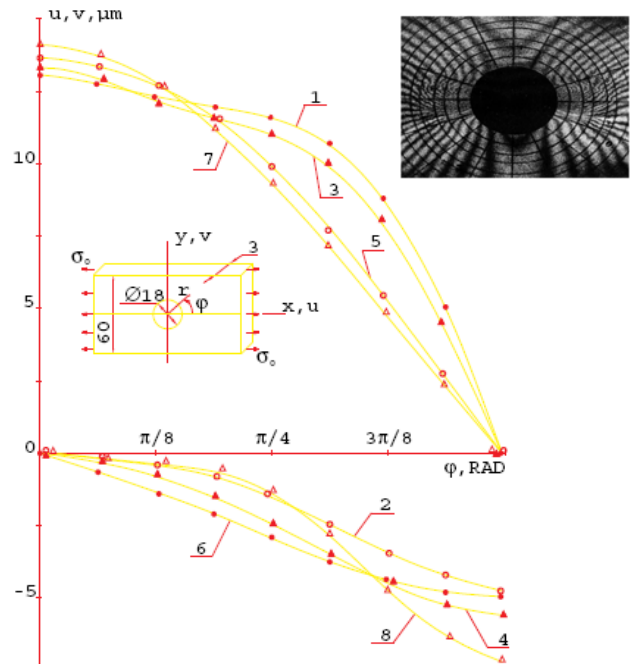
Rozwój metod cyfrowej rejestracji i projekcji obrazu pozwala na wprowadzanie nowych rozwiązań także w metodach holograficznych. Między innymi w metodzie dwukrotnej ekspozycji w miejsce hologramu wykonywanego na kliszy fotograficznej stosowana jest cyfrowa rejestracja obrazu za pomocą matryc CCD, a w metodzie czasu rzeczywistego prowadzone są próby z zastosowaniem matryc LCD.

Przykład zastosowania modulatora LCD w metodzie cyfrowej holografii porównawczej (digital comparative holography) przedstawiono w pracy Ostena i innych (2001) (rys.14).

Porównanie wyników badań metodą interferometrii holograficznej i metodą elementów skończonych (MSC/Nastran) z punktu widzenia możliwości przewidywania niskocyklowej trwałości zmęczeniowej przedstawiono w pracy Dzuby i innych. W badaniach stosowano m.in. płaskie próbki z otworem poddane obciążeniom rozciągającym w zakresie odkształceń sprężysto-plastycznych.



Rys. 14. Zdalna cyfrowa holografia porównawcza: a) zapis hologramu obiektu bazowego, b) odtworzenie sprzężonego czoła falowego obiektu bazowego poprzez zastosowanie LCD, c) stanowisko eksperymentalne (Osten i inni, 2001)



Rys. 15. Rozkłady przemieszczeń u i v w otoczeniu otworu: 1, 3, 5, 7 - przemieszczenia w kierunku u, 2, 4, 6, 8 - przemieszczenia w kierunku v, dla r = 9, 11, 21, 30 mm (Dzuba i inni)

Analiza wyników badań porównawczych wykazała niezgodności w zakresie wyższych wartości odkształceń plastycznych sięgające 20%. Zdaniem autorów pracy, tak duże różnice powodują konieczność wprowadzania modyfikacji w obliczeniach numerycznych w szczególności w przypadku analizy rozwoju lokalnych odkształceń plastycznych w warunkach cyklicznie zmiennych obciążeń. Znacznie lepszą zgodność wyników

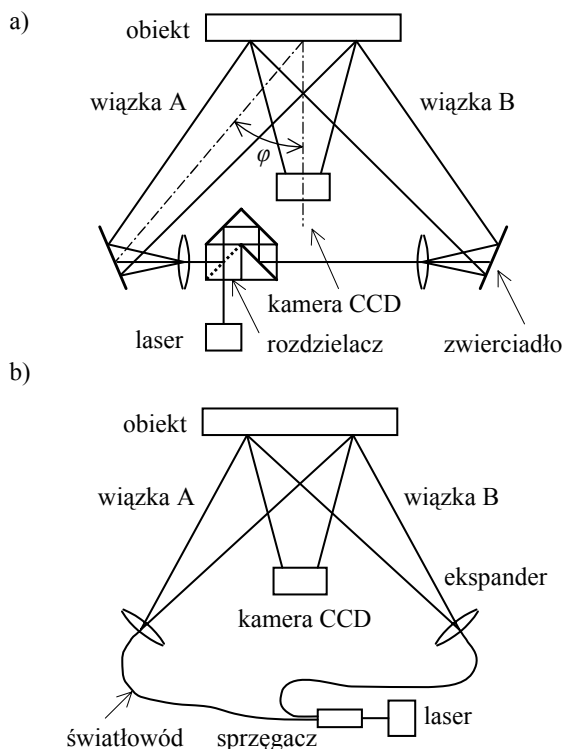
badan uzyskano w zakresie odkształceń sprężystych, zarówno w przypadku płaskiej, jak i cienkościennej próbki cylindrycznej z bocznym otworem.

2.2.5. Metoda ESPI /DSPI

Metoda ESPI nazywana także holografia telewizyjną ESPI lub holografia cyfrową DSPI, jest optyczną techniką pomiaru przemieszczeń wykorzystującą zjawisko interferencji światła. Zasadę pomiaru oraz schemat konfiguracji typowych układów pomiarowych pokazano na rysunku 16. W metodzie ESPI wiązka lasera zostaje rozdzielona na dwie koherentne wiązki przedmiotowe A i B, które po rozszerzeniu w układzie kolimatora oświetlają symetrycznie powierzchnię badanego obiektu. W wyniku rozproszenia na obiekcie obu wiązek i ich późniejszej interferencji powstaje rozkład plamek niosący informację o intensywności i fazie światła, który trafia do kamery CCD. Rejestrowane przez kamerę zmiany wzorów prążków korelacyjnych wywołane są przemieszczeniami i deformacjami powierzchni obiektu powstałymi pomiędzy kolejnymi zapisami obrazu plamek. Czułość bazowa metody ESPI wiążąca obserwowane prążki z przemieszczeniem zależy od długości fali λ oraz kąta φ (rys. 16)

$$s = \lambda / 2 \sin \varphi. \quad (3)$$

Czułość s oznacza wartość przemieszczenia odpowiadającą pojedynczemu prążkowi interferencyjnemu.

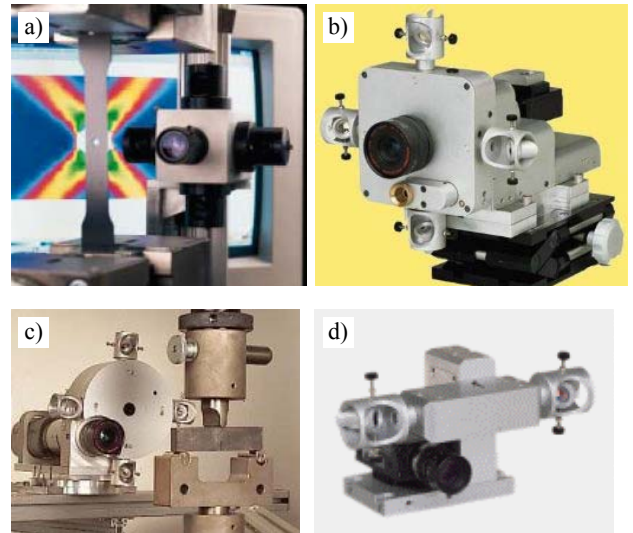


Rys. 16. Zasada pomiaru odkształceń metodą ESPI w dwóch konfiguracjach optycznych: a) konwencjonalny układ optyczny, b) układ światłowodowy

Zastosowanie dwóch wiązek przedmiotowych umożliwia późniejsze łatwe rozdzielenie składowych odkształceń. W literaturze spotyka się jednak także opisy

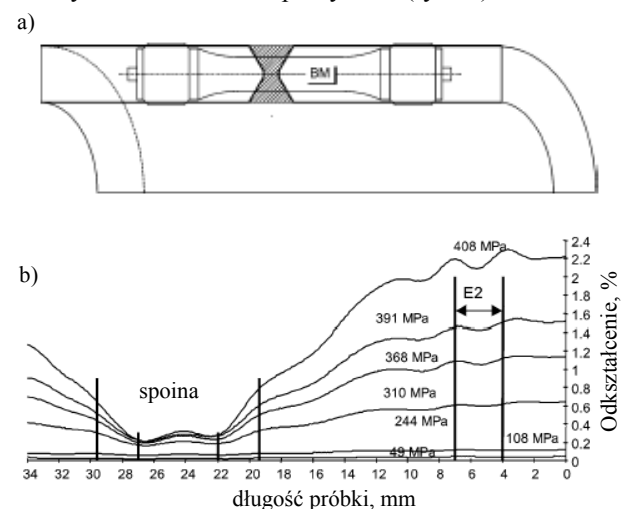
rozwiązań, w których jedna z wiązek przedmiotowych oświetla obiekt, a druga wiązka, nazywana wiązką odniesienia, kierowana jest bezpośrednio z lasera do kamery. Rozwiązanie takie stanowi typową konfigurację systemów ESPI w analizie odkształceń odplaszczynowych (out-of-plane). Spotykane są także rozwiązania z trzema wiązkami – dwiema przedmiotowymi i jedną odniesienia do pomiaru odkształceń w trzech kierunkach.

Na rysunku 17 pokazano przykłady instrumentarium stosowanych w analizie odkształceń metodą ESPI/DSPI.



Rys. 17. Przykładowe instrumentaria do badań z zastosowaniem metody ESPI/DSPI: Dantec Ettmeyer (<http://www.ettmeyer.de>) (a), GOM mbh, (b, c, d) (www.gom.com)

Analiza danych literaturowych wskazuje na liczne przykłady stosowania metody ESPI w badaniach rozkładów odkształceń. Między innymi w pracy (Mongabure, 2003) przedstawiono wyniki badań własności złącza spawanego z zastosowaniem metody ESPI do wyznaczania gradientów odkształceń w strefie przejścia pomiędzy metalem bazowym BM i metalem spoiny WM (rys.18).



Rys. 18. Rozkład odkształceń (b) w kierunku obciążenia wyznaczony wzdłuż próbki spawanej (a) (Mongabure, 2003)

Badania spawanych ręcznie metodą łukową próbek wykonanych z nierdzewnej stali austenitycznej Z2 CND 17-12 (316L) prowadzono w warunkach obciążeń

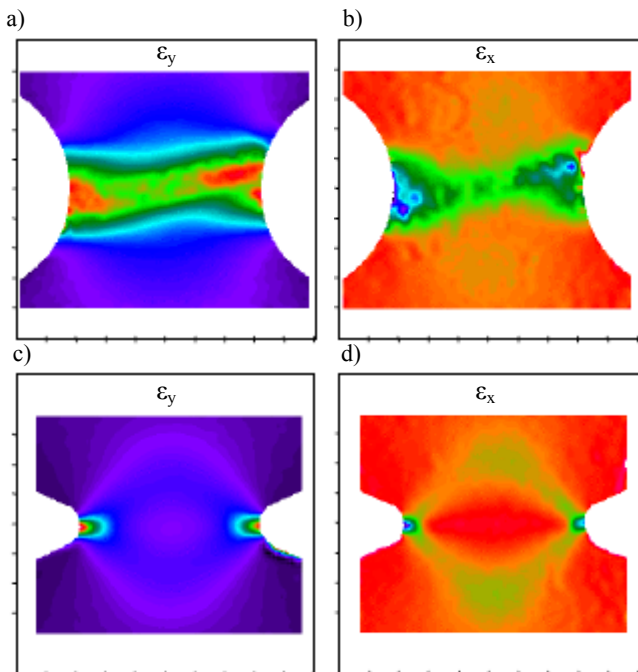
zmęczeniowych w podwyższonej temperaturze (600°C), przy czym pomiar odkształceń realizowano w warunkach obciążeń statycznych (w temperaturze pokojowej) przekładając próbki w trakcie testu zmęczeniowego z maszyny hydraulicznej na maszynę elektromechaniczną. Na rysunku 18 pokazano wyniki pomiaru odkształceń w połączeniu spawanym dla różnych wartości naprężenia nominalnego.

Metodę ESPI zastosowano także w badaniach zmęczeniowych stali SUS304 pokrywanej napyłanym termicznie związkami Al₂O₃/NiCr opisanych w pracy Wanga i Kido (2003). Badania prowadzono w podwyższonej temperaturze, a metodę ESPI zastosowano do pomiaru rozkładów odkształceń w celu wyznaczenia stref spiętrzenia naprężeń i zgodności ich występowania z miejscami inicjacji pęknięć i rozwarstwień pokrycia.

Zmodyfikowaną wersję metody ESPI z możliwością jednoczesnej analizy odkształceń w dwóch prostokątnych kierunkach u i v przedstawiono w pracy Leśniaka, Boyce'a (1995) na przykładzie analizy stanu odkształceń w próbce CT (compact tension) wykonanej z stopu aluminium HS30TF. Porównanie wyników pomiarów z wynikami analizy teoretycznej wykazało ich dobrą zgodność.

W pracy Moore'a i Tyrera (1996) metodę ESPI zastosowano do analizy współczynnika intensywności naprężeń w płycie z częściowym pęknięciem poddanej obciążeniu rozciągającemu. Analizę rozkładów odkształceń metodą ESPI na czole pęknięcia powstałego w wyniku obciążenia zmęczeniowego w próbce wykonanej ze stali nierdzewnej 304 poddanej trójpunktowemu zginaniu opisano w pracy (Diaza i innych, 2002).

Na rysunku 19 pokazano przykładowe mapy odkształceń wyznaczone dla tytanowych próbek z karbem w trakcie próby rozciągania (Schubach i inni, 2000).



Rys. 19. Rozkłady odkształceń w kierunku obciążenia (a) (c) i poprzecznym do kierunku obciążenia (b)(d) w próbkach tytanowych w próbce rozciągania (Schubach i inni, 2000)

2.2.6. Metoda laserowej interferometrii siatkowej

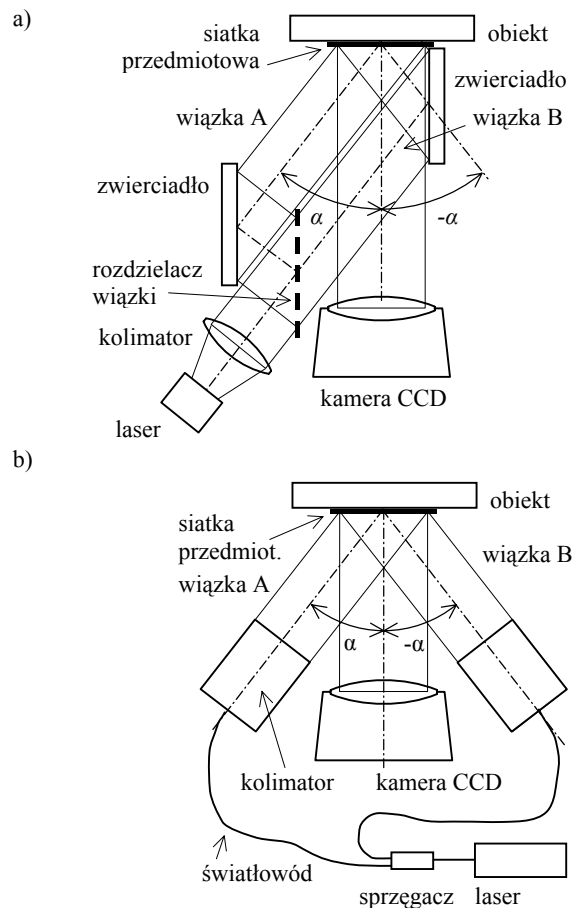
Światło lasera wykorzystywane jest także w metodzie interferometrii siatkowej IS (rys.20). Siatkę przedmiotową, którą stanowi siatka dyfrakcyjna o częstotliwości f_s (liczba linii przypadająca na mm długości), naniesioną na badany obiekt oświetlają dwie wzajemnie spójne wiązki lasera A i B o płaskich czołach falowych. Kąty padania wiązek są równe kątom ugięcia siatki przedmiotowej (1 i -1 rzędu), co powoduje że ugięte na siatce wiązki propagują wzdłuż normalnej do powierzchni. Wartość kąta ugięcia pierwszego rzędu określa się na podstawie zależności:

$$\sin \alpha = \lambda f_s, \quad (4)$$

w której: λ - długość fali, f_s - częstotliwość siatki.

W wyniku deformacji siatki, spowodowanej odkształceniem obiektu, czoła falowe wiązek A i B ulegają deformacji. Interferujące w przestrzeni wiązki niosą informację o przemieszczeniach powierzchni obiektu w postaci obrazu prążków interferencyjnych. Związek prążków z przemieszczeniem opisany jest czułością bazową metody s zależną od częstotliwości siatki i wynoszącą:

$$s = 1/(2f_s) \quad (5)$$



Rys. 20. Zasada działania dwuwiazkowej interferometrii siatkowej: a) konwencjonalna konfiguracja optyczna, b) układ światłowodowy

Czułość s oznacza wartość przemieszczenia odpowiadającą odległości pomiędzy kolejnymi prążkami

w polu widzenia. Czulość metody rośnie wraz ze wzrostem częstości siatki, jednak ze względu na maksymalną wartość kąta padania wynoszącą 90° częstość siatki nie może być większa niż $f_s=1/\lambda$, co oznacza, że maksymalna czulość nie może przekroczyć $s=\lambda/2$ (bez cieczy immersyjnej). W badaniach rozkładów odkształceń stosuje się różne układy optyczne interferometrów w zależności od wymaganego pola pomiarowego, warunków obciążenia, typu obiektu. Najczęściej stosowane systemy opisano m.in. w pracach Patorskiego (200) i Mollenhauera i innych (1995).

Podobnie jak w przypadku metody ESPI, analiza literatury wskazuje na liczne przykłady zastosowania metody laserowej interferometrii siatkowej w analizie rozkładów odkształceń. Przykładowo, w pracy Nishioki i innych (1995) przedstawiono badania odkształceń na czole pęknięcia w jednorodnych próbkach typu CT wykonanych ze stali A533B i HT80 oraz niejednorodnych próbkach spawanych elektronowo wykonanych jako połączenie tych dwóch stali (rys.21). Do pomiarów odkształceń zastosowano czterowiązkowy (dwa kierunki analizy) interferometr o układzie optycznym opartym na technice światłowodowej. W badaniach zastosowano siatki dyfrakcyjne o częstości $f_s=300$ linii/mm, co umożliwiło uzyskanie dużego zakresu pomiarowego, przy zmniejszonej czulości bazowej. W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono rozkłady odkształceń w otoczeniu pęknięcia, a ich analiza pozwoliła zaobserwować szereg efektów wynikających ze zróżnicowania własności plastycznych zastosowanych materiałów oraz oddziaływania spoin.

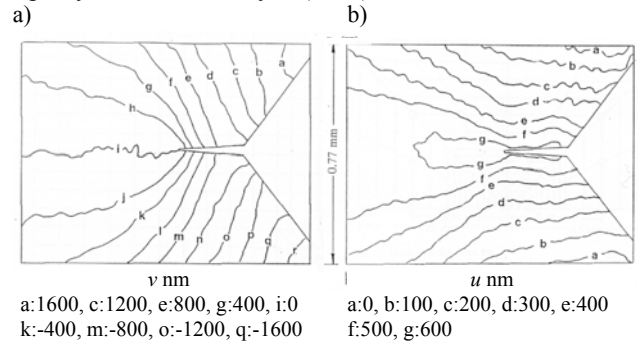
W pracy Poona, i Ruiza (1994) metodę laserowej interferometrii siatkowej zastosowano w doświadczalno-numerycznej analizie współczynnika wyzwolania energii potencjalnej G (prędkości intensywności wyzwolania energii – strain energy release rate) opisującej spadek energii potencjalnej odkształcenia podczas powiększania się pęknięcia. Ponadto w badaniach wyznaczano wartość współczynnika intensywności naprężeń K z zastosowaniem metody rozwarcia wierzchołkowego pęknięcia CTOD (crack tip opening displacement). W badaniach zastosowano wykonane ze stopu tytanu Ti-6-4, IMI 318 płaskie próbki z jednostronnym pęknięciem poddane czteropunktowemu zginaniu. Na rysunku 21 pokazano przykładowe rozkłady przemieszczeń dla czola pęknięcia zastosowane w obliczeniach wartości K i G .

W pracy Matthew i innych (2003) wyznaczano parametry mechaniki pęknięcia dla szybko rozwijającego się pęknięcia w próbce typu SEN wykonanej ze stopu aluminium 7075-T6 (rys.22).

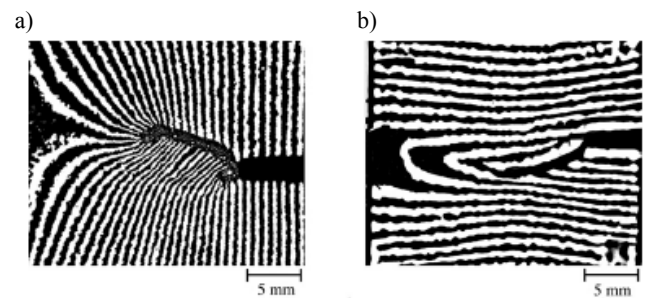
Z kolei próbka z nierdzewnej stali austenitycznej 304L w kształcie pierścienia z jednostronnym karbem wykonanym od jej wewnętrznej części była przedmiotem badań przedstawionych w pracy Niu i innych (2001). W trakcie badań próbkę poddawano dwustronnemu ścisaniu (rys.23) pod różnymi kątami. Wyniki badań porównywano z wynikami analizy numerycznej uzyskując zgodność na poziomie 90% .

Badania porównawcze teoretycznych rozkładów przemieszczeń na czole pęknięcia wyznaczonych na bazie współczynnika intensywności naprężeń przy zastosowaniu rozwiązań z zakresu sprężystej mechaniki pęknięcia oraz ich

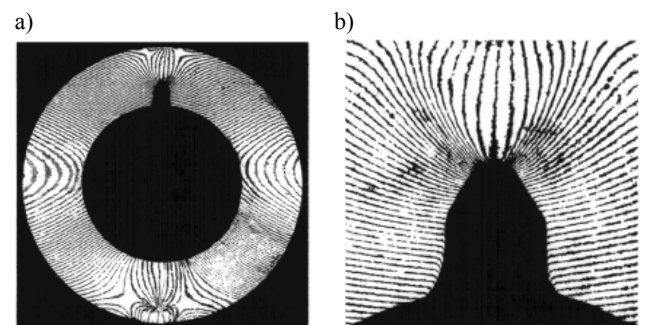
rozkładów wyznaczonych doświadczalnie przedstawiono w pracy McKellara i innych (2000).



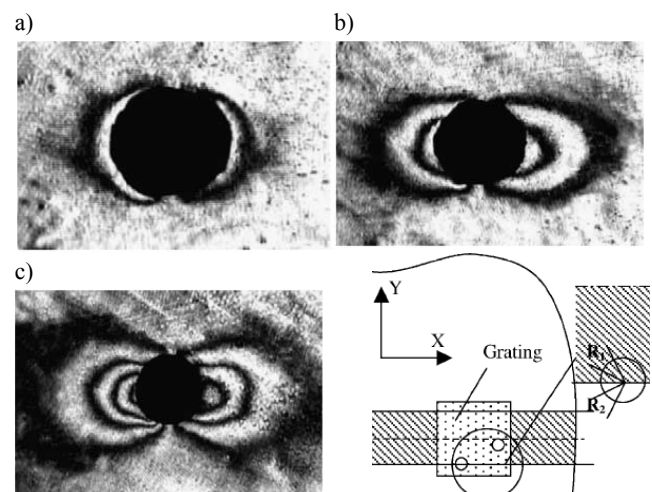
Rys. 21. Wyniki pomiarów przemieszczeń w otoczeniu czola pęknięcia zastosowane w obliczeniach wartości K i G : a) kierunek v , b) kierunek u (Poona i Ruiz, 1994)



Rys. 22. Obraz prążków interferencyjnych w otoczeniu pęknięcia: a) w kierunku obciążenia, b) w kierunku prostopadłym do kierunku obciążenia (Matthew i inni, 2003)



Rys. 23. Mapy prążków interferencyjnych zarejestrowanych w karbie (b) wykonanym w próbce pierścieniowej (a) poddanej ścisaniu (Niu i inni, 2001)



Rys. 24. Mapy prążków interferencyjnych dla kierunku u dla otworu o głębokości: a) 0.2 mm, b) 0.4 mm, c) 0.6 mm (głębokość złącza – 8 mm) (Ya i inni, 2004)

W pracy Ya i innych (2004) metodę laserowej interferometrii siatkowej zastosowano do analizy naprężeń własnych w aluminiowych złączach spawanych laserowo. Na rysunku 24 pokazano przykładowe mapy prążków interferencyjnych zarejestrowane w otoczeniu otworu o różnej głębokości wykonanego na granicy strefy wpływu ciepła i materiału rodzimego analizowanego złącza.

2.2.7. Porównanie metod doświadczalnych

W tabelicy 1 przedstawiono kryteria, na podstawie których dokonano szczegółowego porównania omawianych w pracy metod doświadczalnej analizy odkształceń lokalnych. W świetle przedstawionego porównania można przyjąć, że nie istnieje metoda „najlepsza”, a jedynie najlepiej spełniająca konkretne warunki badań.

Tab.1. Porównanie wybranych metod doświadczalnych

Kryterium oceny	EO	TS	IC	IH	ES	IS
wielkości mierzone			X	X	X	X
czułość						X
rozdzielczość						X
dokładność						X
wymiary pola pomiarowego	X	X	X	X	X	
przygotowanie powierzchni obiektu		X	X	X	X	
możliwość pomiaru na maszynie wytrzymałościowej	X	X	X		X	X
możliwość automatyzacji pomiaru	X	X	X			X
zakres pomiarowy w jednym kroku analizy		X				X
„pamięć” deformacji obiektu	X					X

EO – elastooptyka, TS – termowizja, IC – cyfrowa korelacja obrazu, IH – interferometria holograficzna, ES – ESPI, IS – interferometria siatkowa

Przegląd danych literaturowych z zakresu zmęczenia i mechaniki pękania oraz przedstawione w pracy Moore’a i Tyrera (1996) wyniki badań ankietowych przeprowadzonych w Japonii pozwalają zauważyć, że jednymi z najczęściej stosowanych współczesnych metod doświadczalnej analizy rozkładów odkształceń są: metoda laserowej interferometrii siatkowej IS oraz metoda elektronicznej interferometrii plamkowej ESPI.

Pomimo stosowania obydwu metod w podobnych zagadnieniach z zakresu zmęczenia i mechaniki pękania, porównanie metody laserowej interferometrii siatkowej IS z metodą ESPI wskazuje na występowanie, obok cech wspólnych, także cech istotnie je różniących. Między innymi, przy zbliżonych czułościach bazowych (Monteiro i inni, 2001), metody różnią się istotnie bezwzględny zakres pomiarowy, na korzyść metody laserowej interferometrii siatkowej IS. Wynika to z faktu, że realizacja pomiaru z zastosowaniem metody ESPI wymaga co najmniej dwukrotnego zapisu obrazu plamek – w stanie przed i po obciążeniu. Tym samym, przy zakresie pomiarowym wynoszącym maksymalnie około kilkunastu mikrometrów, pomiar większych przemieszczeń

wymaga sumowania wyników ich wielostopniowego pomiaru przy narastającym obciążeniu. Konieczność zapamiętywania „poprzedniego” obrazu plamek w metodzie ESPI powoduje także duże utrudnienie w przypadku pomiarów realizowanych w warunkach obciążeń zmiennych w czasie.

Jest to szczególnie odczuwalne w przypadku badań, w których analizowana jest historia zmian odkształceń, a nie tylko ich bieżąca wartość. W przypadku metody interferometrii siatkowej IS rolę „pamięci” odkształcenia spełnia siatka przedmiotowa. W wyniku zastosowania kompaktowych interferometrów siatkowych, nawet w przypadku wielokrotnego przerywania badania, nie zostaje utracona ciągłość analizy odkształceń. Jednak podobnie jak w przypadku metody ESPI, przekroczenie zakresu pomiarowego wymaga sumowania odkształceń zmierzonych w ramach pojedynczych pomiarów. Siatka przedmiotowa stosowana w metodzie interferometrii siatkowej, ze względu na jej parametry (dużą częstotliwość, duży współczynnik odbicia światła) jest najczęściej wykonywana jako dodatkowy, pośredni element przyklejany do badanego obiektu (możliwe jest także wykonywanie siatki z zastosowaniem nowoczesnych technik inżynierii powierzchni). Stanowi to wadę metody, której teoretycznie nie posiada metoda ESPI. Jednak w wielu przypadkach, dla uzyskania obrazu plamek w metodzie ESPI, powierzchnia badanych obiektów także musi być dodatkowo przygotowywana poprzez pokrywanie warstwą rozpraszającą.

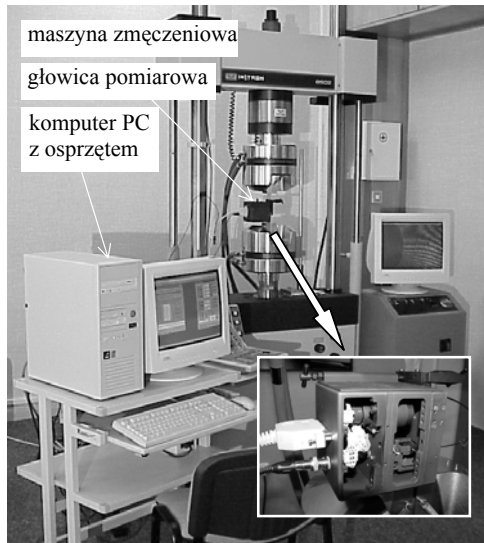
Podsumowując można zauważyć, że metoda IS wykazuje pewną przewagę w przypadku obciążeń zmiennych w czasie, na co wpływa głównie jej wysoka czułość i zakres pomiarowy, a także możliwość „zapamiętywania” historii obciążenia oraz większa podatność na automatyzację procesu pomiarowego.

Coraz większego znaczenia nabierają także metody podatne na stosowanie elementów optoelektroniki oraz numerycznych algorytmów zapisu i analizy danych pomiarowych. Tym samym coraz częściej można spotkać prace, w których stosowane są „cyfrowe” wersje klasycznych metod doświadczalnej analizy odkształceń i naprężeń, np. cyfrowa elastooptyka lub cyfrowa holografia (Yamaguchi, 2003; Hipp i inni, 2004).

3. BADANIA ODKSZTAŁCEŃ LOKALNYCH METODĄ LASEROWEJ INTERFEROMETRII SIATKOWEJ

Przykładem systemu badawczego umożliwiającego zautomatyzowaną analizę odkształceń lokalnych w strefach nieciągłości geometrycznych i niejednorodności materiałowych jest system laserowego ekstensometru siatkowego LES (rys.25) opracowany we współpracy Katedry PKM UTP, Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu oraz Politechniki Warszawskiej – Instytutu Mikromechaniki i Fotoniki. System LES umożliwia pomiar odkształcenia lokalnego na wskazanym odcinku pomiarowym w trybie czasu rzeczywistego (on the fly) oraz wyznaczenie rozkładów odkształceń w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach na podstawie zarejestrowanych danych pomiarowych (w trybie off-line),

w warunkach statycznych oraz monotonicznie, cyklicznie i nieregularnie zmiennych obciążeniach. Szczegółowe omówienie systemu, w tym jego budowy i parametrów technicznych przedstawiono, m.in. w pracach Borońskiego i innych (2001), Borońskiego i Szali (2002a, 2002b) i Gieski i Borońskiego (2003).

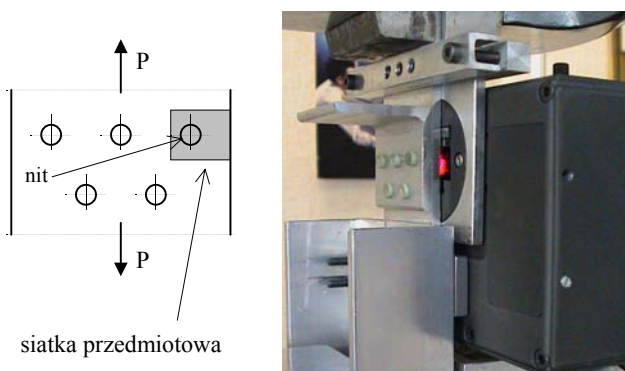


Rys. 25. System LES: widok ogólny oraz widok głowicy po zdemontowaniu bocznej osłony

3.1. Analiza odkształceń lokalnych w połączeniach nitowanych

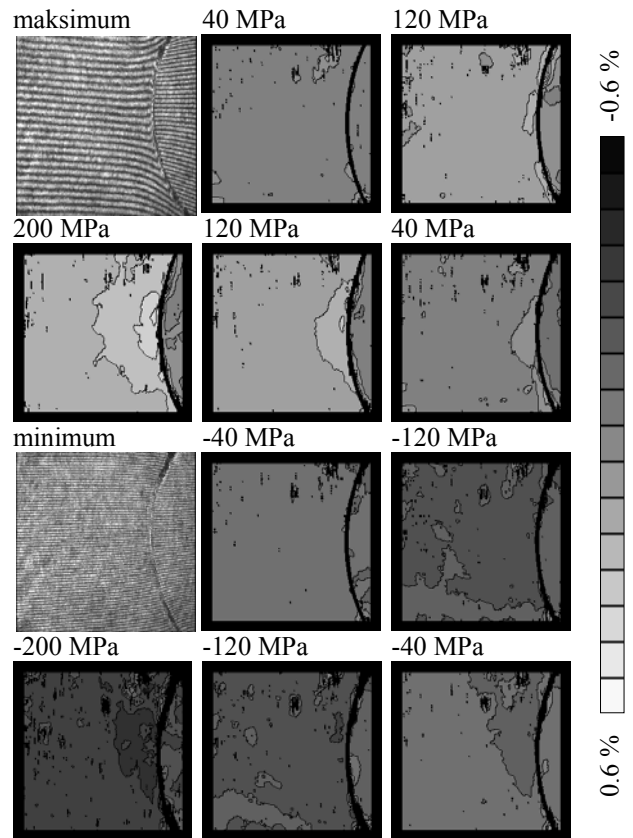
Badania rozkładów odkształceń w złączach nitowanych przeprowadzono na próbkach wykonanych z lotniczego stopu aluminium (rys.26). Ich budowa oraz własności materiałowe odpowiadały typowej nitowanej strukturze lotniczej składającej się z płaskownika (płaskownika) wzmocnionej usztywnieniem (kątownikiem).

Podstawowym celem badań była analiza zmian odkształceń lokalnych w strefie zmęczeniowego pęknięcia w trakcie cyklicznie zmiennego obciążenia o stałej wartości amplitudy naprężenia nominalnego.



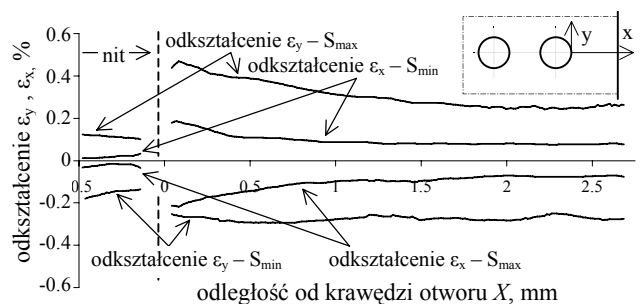
Rys. 26. Widok próbki z zamocowaną głowicą LES podczas badań zmęczeniowych

Pomiary odkształceń prowadzono dla wybranych cykli obciążenia i dla poszczególnych faz cyklu. Przykładowe wyniki pomiarów dla pojedynczego cyklu o naprężeniu nominalnym $S=200\text{MPa}$ pokazano na rys. 27.



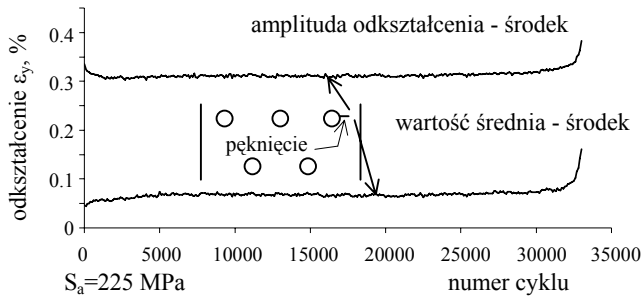
Rys. 27. Przykładowe rozkłady odkształceń ϵ_y (w kierunku obciążenia) w złączach nitowanych

Wyniki badań umożliwiły analizę złącza nitowanego ze względu na wiele zagadnień posiadających istotne znaczenie w zmęczeniowej analizie konstrukcji. Podczas badań analizowano, m.in. wpływ nitów na rozkład odkształceń w płaskowniku w strefie otworu (rys.28), rozkład odkształceń w strefie kontaktu płaskownika i nitów, przebieg zmian odkształceń lokalnych w strefie inicjacji pęknięć zmęczeniowych (rys.29), przebieg zmian stref odkształceń plastycznych (rys.30).

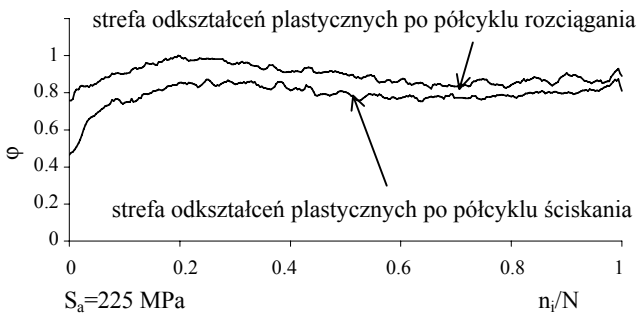


Rys. 28. Rozkłady odkształceń ϵ_y i ϵ_x w minimalnym przekroju próbki nitowanej

Przeprowadzone badania oraz analiza wyników badań umożliwiły m.in. obserwację efektu pęknięcia wielogniskowego spowodowanego wzajemnym oddziaływaniem płaskownika, nitów i kątownika (rys.31). Jednoczesne pęknięcie próbek w kilku miejscach istotnie wpływa na możliwość jednoznacznego przewidywania miejsc inicjacji pęknięć zmęczeniowych.

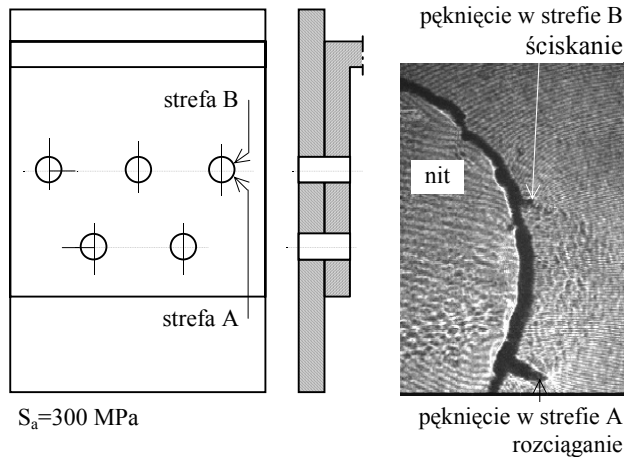


Rys. 29. Przebieg zmian odkształceń lokalnych w kolejnych cyklach obciążenia w próbce badanej przy $S_a=225$ MPa



Rys. 30. Przebieg zmian wielkości obszaru odkształconego plastycznie w płaskowniku w otoczeniu otworu $S_a=225$ MPa

Ponadto, pomiar odkształceń z zastosowaniem systemu LES umożliwił analizę stref odkształceń plastycznych w otoczeniu otworów. Zmiany rozmiaru stref odkształconych plastycznie podczas symetrycznie zmiennego obciążenia wskazywały na brak stabilizacji właściwości materiałowych w strefach zmęczeniowego pęknięcia.



Rys. 31. Pęknięcia zmęczeniowe w próbkach nitowanych

3.2. Badania odkształceń lokalnych w stalowych strukturach panelowych typu sandwich

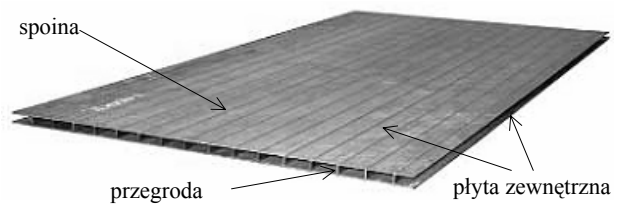
Pęknięcia zmęczeniowe powstające w miejscach spiętrzeń naprężeń i odkształceń to najczęstszy przypadek zakładany w analizie zmęczeniowej obiektów technicznych. W większości przypadków podstawowe

znaczenie nadaje się w tym zakresie karbom geometrycznym. Jednak gradient odkształceń może być także spowodowany zróżnicowaniem właściwości materiałowych.

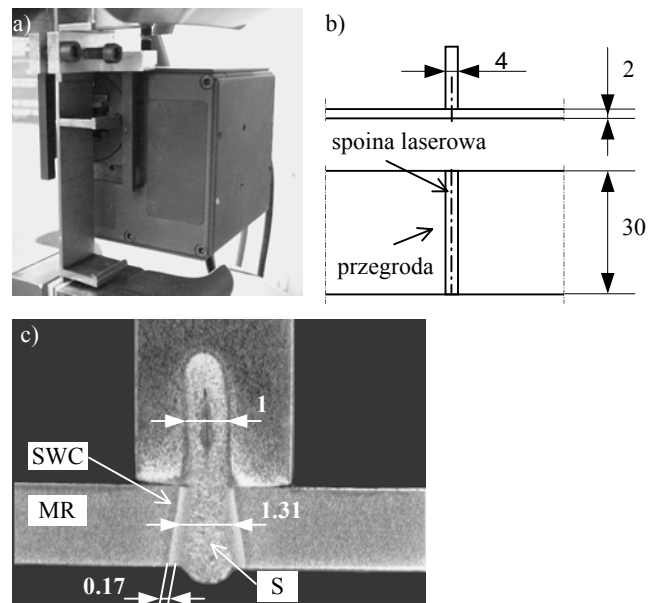
Omawiane zagadnienia znajdują silne odbicie m.in. w przypadku połączeń spawanych. W omawianym przykładzie, badania rozkładów odkształceń w połączeniu spawanym przeprowadzono na złączu laserowym modelu stalowej struktury panelowej typu „sandwich” (rys.32), w której dwie równoległe płyty zewnętrzne połączone są poprzez prostopadłe do ich powierzchni przegrody (wzmocnienia). Przegrody te mocowane są do płyt spoinami laserowymi wykonywanymi od zewnętrznej strony panelu. W prezentowanym przykładzie badań uwagę skoncentrowano głównie na analizie odkształceń w pojedynczym złączu w próbkach o budowie pokazanej na rysunku 33. Pobierane do badań fragmenty panelu obejmowały płytę z jednostronnie przyspawanymi przegrodami.

3.2.1. Rozkłady odkształceń w okresie do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego

W trakcie badań w okresie do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego analizowano wpływ spoiny na rozkład odkształceń w złączu w pojedynczym cyklu obciążenia oraz w kolejnych cyklach obciążenia zmęczeniowego (rys.34) w warunkach obciążenia odzerowo-tętniącego ($R=0$).



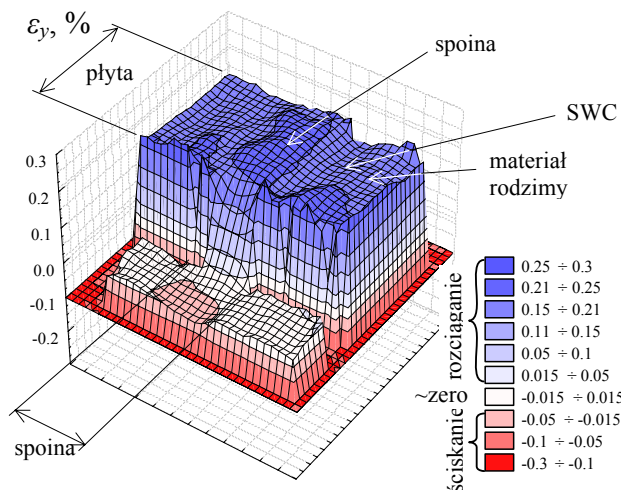
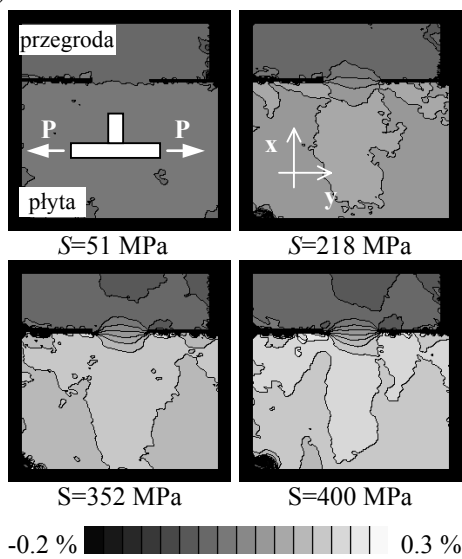
Rys. 32. Stalowa struktura panelowa typu „sandwich” firmy (MW Niemcy) (Dolby, 2003)



Rys. 33. Próbką do badań: a) próbka podczas badań, b) wymiary próbki, c) wymiary spoiny

Podczas badań wyznaczono, m.in. strefy złącza, w których występują maksymalne odkształcenia lokalne oraz maksymalne zakresy odkształceń w cyklu. Poprzez ich porównanie wykazano m.in., że strefy maksymalnych odkształceń lokalnych z pierwszego, „statycznego” nawrotu obciążenia nie „przechodziły” w strefy maksymalnych zakresów odkształceń w trakcie obciążenia cyklicznie zmiennego. Maksymalne odkształcenia lokalne zajmowały obszar na granicy materiału rodzimego i strefy wpływu ciepła, zaś maksymalny zakres odkształceń w cyklu przemieszczał się w kierunku przejścia pomiędzy płytą a przegrodą, które jednocześnie stanowi granicę pomiędzy materiałem spoiny a strefą wpływu ciepła.

Również analiza przebiegu zmian odkształceń w tych strefach w trakcie cyklicznie zmiennego obciążenia (rys.35) pokazała inny charakter zmian maksymalnych wartości odkształceń lokalnych i ich zakresów w cyklu obciążenia (rys.36).

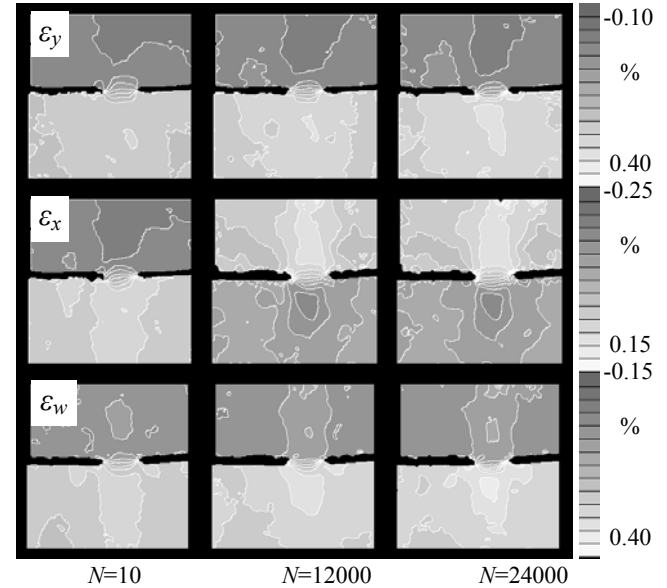


Rys. 34. Przykładowe mapy rozkładu odkształceń w złączu w kierunku y

W pierwszym przypadku analiza wyników pomiarów pozwoliła zaobserwować efekt cyklicznego pełzania (podnoszący wartość odkształceń maksymalnych), a w drugim - umacniania się materiału (powodujące spadek zakresu odkształceń w cyklu).

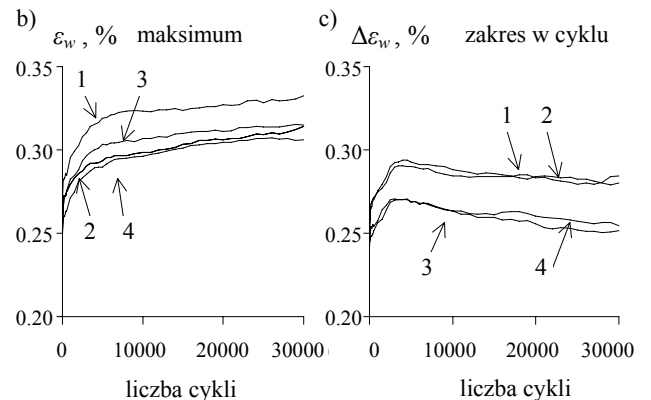
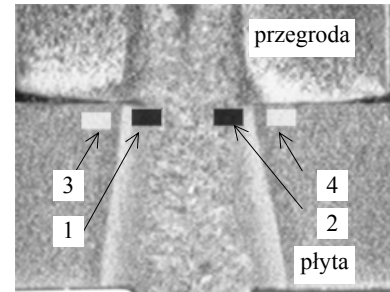
3.2.2. Badania rozkładów odkształceń w okresie rozwoju pęknięcia zmęczeniowego

Wyniki pomiarów odkształceń, w okresie rozwoju pęknięcia, przedstawiono na rysunkach 37 i 38 na przykładzie odkształceń ϵ_y dla maksymalnej wartości naprężenia nominalnego w cyklu.



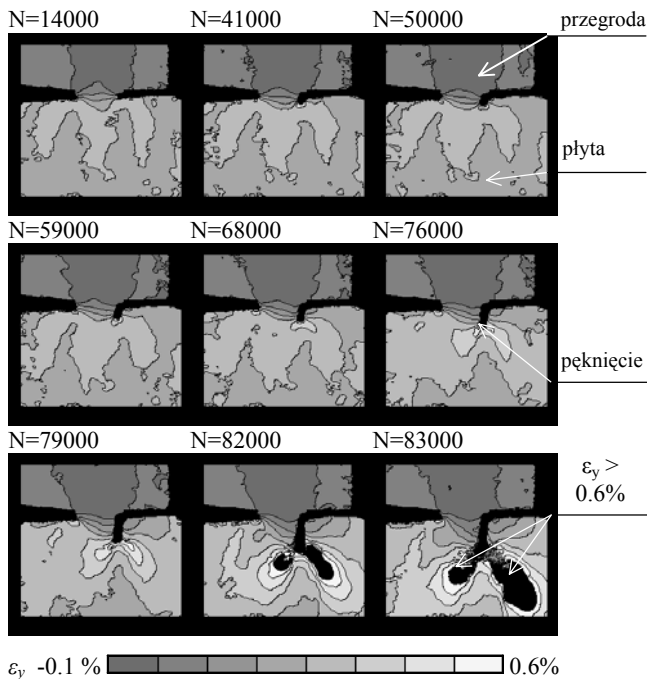
Rys. 35. Rozkłady odkształceń ϵ_y , ϵ_x i ϵ_w dla $S_{max}=400$ MPa w różnych okresach trwałości

a)

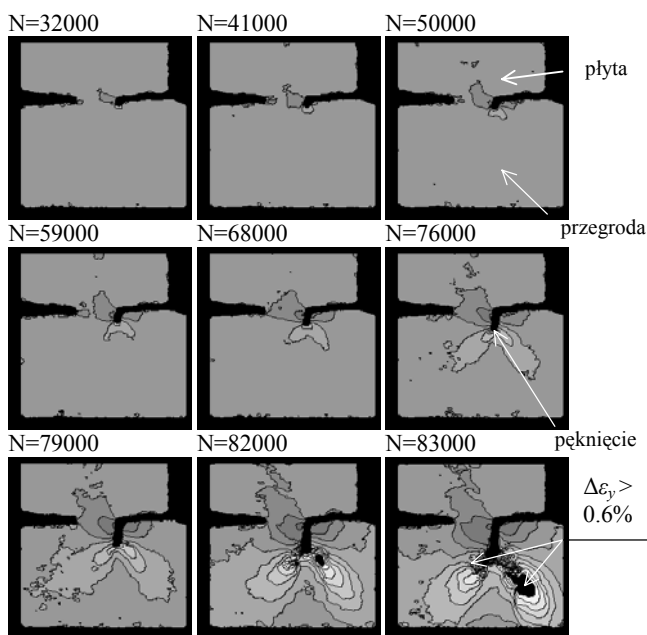


Rys. 36. Strefy analizy zmian odkształceń w złączu spawanym (a). Porównanie przebiegu zmian odkształceń ϵ_w (b) i ich zakresu $\Delta\epsilon_w$ (c) w trakcie cyklicznie zmiennego obciążenia w strefach 1-4

Na rysunku 37 zestawiono zmiany rozkładów odkształceń w złączu towarzyszące rozwojowi pęknięcia w kolejnych cyklach obciążenia, zaś na rysunku 38 przebieg zmian odkształceń od stanu zainicjowania pęknięcia. Przeprowadzone pomiary pozwoliły zaobserwować charakterystyczne dla elementów z pęknięciem rozkłady odkształceń ϵ_y , które wraz ze wzrostem długości pęknięcia i jednoczesnym wzrostem naprężenia związanym ze zmniejszaniem się przekroju próbki, obejmują coraz większy obszar próbki



Rys. 37. Przebieg zmian rozkładu odkształceń ϵ_y w złączu w fazie rozwoju pęknięcia



Rys. 38. Przebieg zmian odkształceń $\Delta\epsilon_y$ od stanu zainicjowania pęknięcia

Analiza rozkładów odkształceń pokazanych na rysunku 38 pozwala ponadto zaobserwować efekt odciążania próbki w strefach znajdujących się za frontem pęknięcia. Pozwala to na pośrednie wyznaczenie wartości odkształceń wywołanych procesem spawania oraz cyklicznym obciążeniem próbki. Przykładowo w przypadku analizowanej próbki, odkształcenia w kierunku działania siły obciążającej ϵ_y w odciążonych strefach wyniosły około -0.2%.

3.3. Metody hybrydowe

Stosowanie metod numerycznych w zmęczeniowej analizie odkształceń i naprężeń w wielu przypadkach niesie za sobą konieczność wprowadzania wielu uproszczeń, założeń i ograniczeń. Związane jest to głównie ze złożonością i różnorodnością postaci geometrycznej obiektów oraz charakteru obciążeń, jak i trudnościami w modelowaniu właściwości materiałowych. Pełna analiza numeryczna wymaga także bardzo precyzyjnego odtwarzania stanu obciążenia w analizowanym obiekcie. Ponadto w wielu przypadkach proste ograniczenie modelowania tylko do strefy elementu objętej analizą zmęczeniową powoduje znaczne uproszczenia. Polegają one m.in. na nieuwzględnianiu oddziaływania odrzuconej części obiektu na jego rozważany obszar (efekt dekompozycji obiektu) oraz nieuwzględnianiu zmian właściwości materiałowych wywołanych cyklicznością obciążenia.

Wiele niedogodności występuje także w przypadku metod doświadczalnych, w których wyniki pomiarów najczęściej ograniczają się do wybranych składowych przemieszczeń i odkształceń lub ich związków, nie pozwalają natomiast na obliczenie wartości naprężeń, szczególnie w sytuacji występowania odkształceń plastycznych. Ponadto w przypadku analiz zmęczeniowych podstawowe zainteresowanie budzą miejsca o największych wartościach lokalnych i największych gradientach odkształceń i naprężeń lokalnych, a te usytuowane są najczęściej w miejscach bardzo trudno dostępnych dla większości metod pomiarowych.

Nowe możliwości wyznaczania stanu odkształceń i naprężeń, wynikające ze skojarzenia analiz numerycznych z doświadczalnymi technikami pomiaru, przedstawione zostały, m.in. w pracach Jayaramy i innych (1996), Kapkowskiego i Kujawińskiej (1994), Kobayashi'ego (1999), Laermanna (1999, 1995, 2000), Nishioki (1999). Przykładowo, w pracy Laermanna, twórcy pojęcia „metody hybrydowe” (1995) przedstawiono ogólne sformułowanie zasad hybrydowej, numeryczno-doświadczalnej metodyki badań, natomiast w pracy Kapkowskiego i Kujawińskiej (1994) dokonano szczegółowej klasyfikacji metod hybrydowych ze względu na sposób i zakres „przekazywania” danych pomiędzy metodą numeryczną a doświadczalną.

W literaturze spotyka się również inne konfiguracje metod stosowanych w analizie odkształceń i naprężeń dające się zakwalifikować pod pojęciem metod hybrydowych. Między innymi w pracy Nishioki (1999) dokonano ich podziału z punktu widzenia zastosowania metod numerycznych, wyróżniając metody numeryczno-

analityczne, numeryczno-numeryczne i numeryczno-doświadczalne. Spośród nich jako jedne z najczęściej spotykanych metod można wskazać metody numeryczno-doświadczalne (doświadczalnie-numeryczne).

Metodyka hybrydowej analizy rozkładów odkształceń i naprężeń wiąże się zazwyczaj z wykorzystaniem częściowych wyników pomiarów odkształceń lub przemieszczeń jako warunków brzegowych w analizie numerycznej. Dzięki temu można wyznaczyć np. „brakujące” składowe odkształceń oraz składowe naprężeń, np. z zastosowaniem nieliniowych modeli materiałowych. Taki sposób postępowania zastosowano m.in. w pracach Borońskiego i Lipskiego (2002) i Borońskiego i Szala (2002c).

W pracy Kobayashi’ego (1999) stwierdza się, że dzięki wprowadzeniu nowych możliwości badawczych, doświadczalnie-numeryczna metodyka analizy odkształceń stała się nieodzownym narzędziem w nowoczesnej mechanice eksperymentalnej o czym mogą świadczyć m.in. liczne prace publikowane na ten temat.

Jedną z grup metod hybrydowych stanowią, zgodnie z podziałem przedstawionym w pracy Kapkowskiego i Kujawińskiej (1994), tzw. „zlokalizowane techniki hybrydowe”, w których wyniki badań doświadczalnych wykorzystywane są jako warunki brzegowe w analizie numerycznej. Możliwość wyznaczania pełnego stanu odkształceń i naprężeń na podstawie wyników pomiaru przemieszczeń w określonym obszarze lub na jego brzegu jest bardzo korzystna w analizie zagadnień związanych ze zmęczeniem materiałów i konstrukcji, w których lokalne zjawiska występujące w niewielkich obszarach spiętrzeń odkształceń wielokrotnie decydują o przebiegu procesu zmęczenia całych obiektów. Między innymi z powodu nieuwzględniania złożoności procesów zachodzących w materiale w czasie długotrwałego procesu zmęczeniowego niszczenia konstrukcji, często z silną krytyką spotyka się bezkrytyczne stosowanie w analizie zmęczeniowej metod numerycznych.

Na korzyści wynikające z zastosowania doświadczalnie-numerycznej analizy odkształceń i naprężeń w badaniach zmęczeniowych wskazują również doświadczenia zdobyte podczas badań prowadzonych w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Akademii Techniczno-Rolniczej (Boroński i Lipski, 2002; Boroński i Szala, 2002c; Boroński, 1999; Boroński i Szala, 2000). Ich wynikiem jest propozycja hybrydowej, numeryczno-doświadczalnej metody badań stanu odkształceń i naprężeń w strefach zmęczeniowego pęknięcia w warunkach cyklicznie zmiennego obciążenia.

3.3.1. Przykładowe wyniki hybrydowej analizy rozkładów odkształceń i naprężeń

Analiza literatury pozwala zauważyć szerokie zastosowanie w metodach hybrydowych metody laserowej interferometrii siatkowej. Przykładowo w pracy Poon i Ruiza (1994) wyniki pomiarów przemieszczeń w otoczeniu pęknięcia posłużyły do numerycznej analizy wartości jednostkowej energii niezbędnej do rozwoju pęknięcia G_I (w pracy oznaczane również jako γ_I) w próbkach wykonanych ze stopu tytanu, poddanych

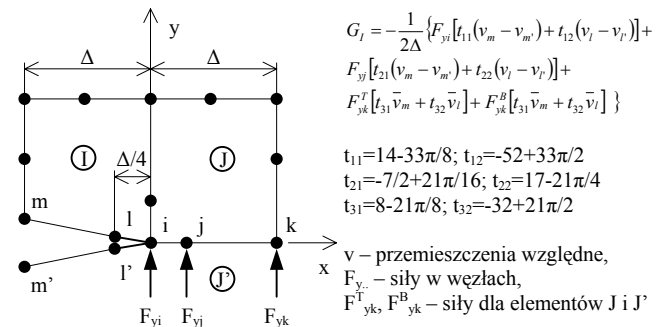
czteropunktowemu zginaniu.

W zaproponowanej metodzie do obliczeń G_I zastosowano model zamykania się pęknięcia Irwina, według którego energia zaabsorbowana podczas przyrostu pęknięcia o Δ jest równa pracy potrzebnej do zamknięcia pęknięcia do jego początkowej długości, co opisane jest zależnością:

$$G = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta} \int_0^{\Delta} \sigma_y(\Delta - r, 0) v(r, \pi) dr + \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta} \int_0^{\Delta} \tau_{xy}(\Delta - r, 0) u(r, \pi) dr = G_I + G_{II} \quad (6)$$

Do obliczenia całki zastosowano uproszczone rozwiązanie zakładające, że praca opisana zależnością (6) jest równoważona pracą sił w węzłach położonych przed wierzchołkiem pęknięcia na przemieszczeniach odpowiadających im węzłów za wierzchołkiem pęknięcia.

Przykład realizacji powyższego założenia w analizie numerycznej pokazano na rysunku 39 na przykładzie 8-węzłowych elementów typu QP (ABAQUS).



Rys. 39. Schemat hybrydowej analizy wartości G_I (Poon i Ruiz, 1994)

Wartości sił w węzłach obliczano na podstawie zmierzonych przemieszczeń na podstawie wyrażenia

$$[F] = [k][\delta] \quad (7)$$

w którym: $[k]$ – macierz sztywności (zależna od właściwości materiału i wymiarów elementu), $[\delta]$ – macierz przemieszczeń, $[F]$ – macierz sił w węzłach.

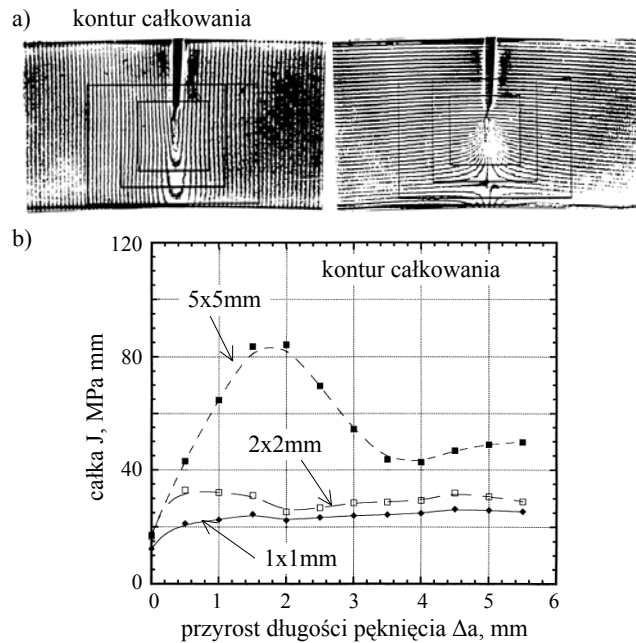
Przedstawione w pracy Poon i Ruiza (1994) wyniki badań wskazują na zależność dokładności analizy od rozmiaru elementu. Większe różnice, w odniesieniu do danych porównawczych otrzymanych metodami liniowej mechaniki pęknięcia (LEFM), uzyskiwano w przypadku mniejszych elementów, w których węzły „l” leżały bardzo blisko wierzchołka pęknięcia, gdzie strefa plastyczna zakłócała wyniki pomiaru rozwarcia pęknięcia.

Poon i Ruiz (1994) wskazują na dwie podstawowe zalety zaprezentowanej metody analizy wartości jednostkowej energii niezbędnej do rozwoju pęknięcia G_I . Po pierwsze umożliwia ona zarówno analizę wartości G_I , jak i G_{II} , dla pierwszego i drugiego typu pęknięcia, oraz po drugie wymaga ona tylko niewielkiej liczby punktów w których realizowane są pomiary przemieszczeń, co umożliwia zastosowanie różnych technik pomiarowych.

W pracy Kobayashi'ego (1999) metodę hybrydową wykorzystano także do analiz w zakresie sprężysto-plastycznej mechaniki pęknięcia do wyznaczania całki J dla różnych położenia konturów całkowania.

Do pomiarów odkształceń zastosowano metodę laserowej interferometrii siatkowej, przy czym ze względu na ich bardzo duże wartości na wierzchołku pęknięcia, w badaniach stosowano dwie próbki o dużej (1200 linii/mm) i małej gęstości (40 linii/mm). Pierwsze pozwalały na pomiar mniejszych, drugie większych odkształceń.

Wyniki pomiarów przemieszczeń po obydwu stronach pęknięcia w fazie jego stabilnego rozwoju wprowadzono jako warunki brzegowe w analizie numerycznej, uzyskując jako rozwiązanie sprężysto-plastyczny stan naprężeń w otoczeniu pęknięcia. W dalszej kolejności obliczono wartości całki J dla konturów całkowania pokrywających się z przekrojami, w których realizowano pomiar przemieszczeń (rys.40).

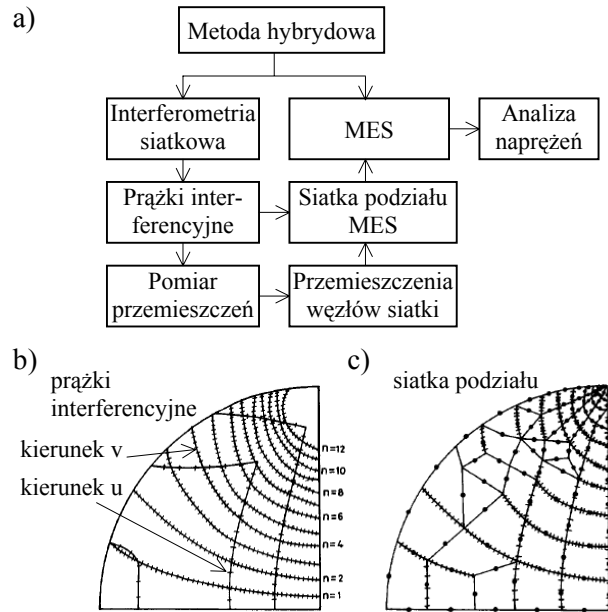


Rys. 40. Wyniki numeryczno-doświadczalnej analizy całki J : a) prążki interferencyjne dla kierunków u i v , b) wyniki analizy całki J Kobayashi (1999)

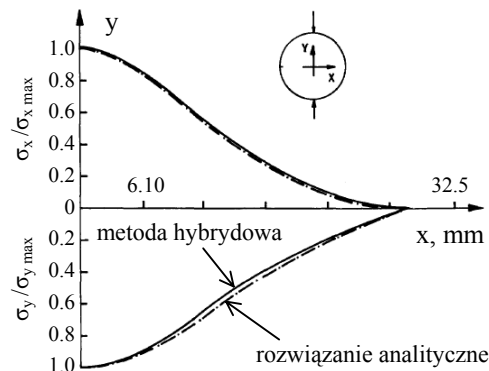
Badaniom możliwości zastosowania hybrydowej, doświadczalno-numerycznej metodyki w analizie naprężeń sprężystych poświęcono także pracę Jayaramy i innych (1996). Analizę naprężeń przeprowadzono dla tarczy poddanej obciążeniom ściskającym i porównano z wynikami obliczeń teoretycznych. W zaproponowanej w pracy metodyce hybrydowej analizy naprężeń (rys.41) do pomiaru przemieszczeń zastosowano metodę laserowej interferometrii siatkowej, natomiast analizę numeryczną prowadzono z zastosowaniem metody elementów skończonych.

Zgodnie z przedstawionym na rysunku 41 schematem postępowania, na podstawie obrazu prążków interferencyjnych rejestrowanych w trakcie badania, opracowywano siatkę podziału w modelu geometrycznym,

w którego węzłach w dalszej kolejności wprowadzono obliczone na podstawie ich analizy przemieszczenia u i v . Pozwoliło to na wyznaczenie wartości naprężeń, których porównanie z naprężeniami wyznaczonymi analitycznie pokazano na rysunku 42. Jayarama i inni (1996) wskazali na bardzo dobrą zgodność wyników analizy teoretycznej i hybrydowej, przy czym istotne znaczenie ich zdaniem ma postać siatki podziału w modelu geometrycznym i rodzaj elementów użytych do jej opracowania.



Rys. 41. Metodyka numeryczno-doświadczalnej analizy naprężeń: a) schemat postępowania, b) prążki interferencyjne, c) siatka podziału MES (Jayarama i inni, 1996)



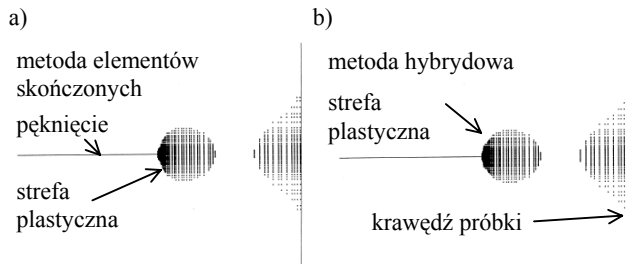
Rys. 42. Porównanie wyników numeryczno-doświadczalnej i teoretycznej analizy naprężeń w tarczy (Jayarama i inni, 1996)

Obszerny przegląd metod hybrydowych stosowanych w analizie zagadnień związanych z mechaniką pęknięcia przedstawiono w pracy Nishioki (1999). Obok innych przykładów, szczególną uwagę poświęcono możliwościom połączenia metod laserowej interferometrii siatkowej i metody elementów skończonych w analizie zagadnień, w których występują duże odkształcenia plastyczne.

W pracy omówiono między innymi wyniki badań stanu odkształceń i naprężeń na czole pęknięcia w próbkach CT wykonanych ze stali A533B stosowanych

do budowy nuklearnych zbiorników ciśnieniowych.

Na rysunku 43 zamieszczono porównanie wyników analizy strefy plastycznej metodą elementów skończonych oraz metodą hybrydową, w której wyniki pomiarów przemieszczeń wprowadzono do wybranych węzłów siatki podziału w analizie numerycznej.



Rys. 43. Porównanie wyników numerycznej (a) i hybrydowej (b) analizy odkształceń i naprężeń w próbce z pęknięciem – strefy plastyczne (Nishioka, 1999)

Otrzymane wyniki pomiarów wykazały bardzo zbliżony kształt i rozmiar strefy plastycznej na czole pęknięcia.

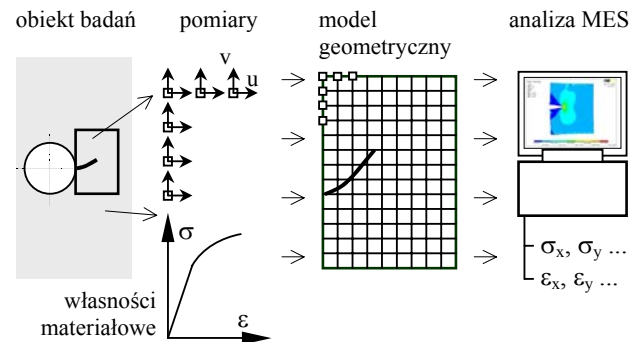
Analiza literatury wskazuje także, że obok istniejących rozwiązań hybrydowej analizy odkształceń i naprężeń, duże nadzieje na dalszy ich rozwój wiąże się z nowymi metodami numerycznymi, takimi jak algorytmy genetyczne, czy sieci neuronowe oraz innymi metodami sztucznej inteligencji, które powinny umożliwić m.in. pełniejsze wykorzystanie wyników badań eksperymentalnych, np. pomiarów przemieszczeń realizowanych metodą laserowej interferometrii siatkowej.

3.3.2. Zlokalizowana metoda hybrydowej analizy odkształceń i naprężeń

Zlokalizowana metoda analizy odkształceń i naprężeń w elementach konstrukcyjnych oparta jest na założeniu możliwości ograniczenia analizy numerycznej badanego obiektu do jego części poddanej analizie doświadczalnej (Boroński, 2005). Do analizy stanu odkształceń i naprężeń stosuje się doświadczalną metodę pomiaru rozkładów odkształceń w warunkach obciążeń zmęczeniowych oraz numeryczną metodę elementów skończonych z nieliniowymi modelami cyklicznych właściwości materiałowych.

Zgodnie ze sposobem postępowania stosowanym w metodzie (rys. 44) w wybranym lokalnym obszarze rzeczywistego obiektu realizowany jest pomiar przemieszczeń na jego powierzchni. Badany obiekt może znajdować się w dowolnym, znanym lub nieznanym stanie obciążenia, po zrealizowaniu dowolnej liczby cykli obciążenia. Wybrany do analizy obszar obiektu zostaje następnie „zamodelowany” geometrycznie za pomocą siatki elementów skończonych. W dalszej kolejności, w węzłach siatki znajdujących się na granicy modelu, wprowadza się wymuszenie kinematyczne odpowiadające zmierzonym przemieszczeniom w kierunkach x i y . Dalsza analiza numeryczna prowadzona z zastosowaniem nieliniowego modelu (lub modeli) materiału pozwala wyznaczyć składowe odkształceń i naprężeń w rozpatrywanym obszarze obiektu.

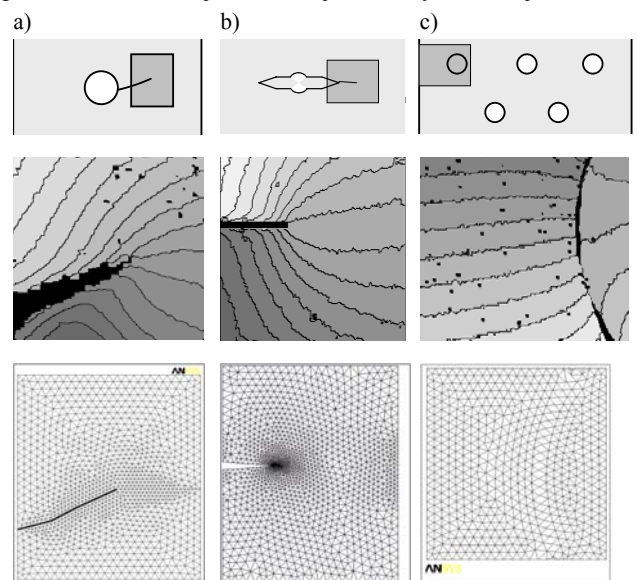
Wprowadzenie w modelu numerycznym, jako warunków brzegowych, stanu przemieszczeń wyznaczanego w badaniach doświadczalnych uwalnia od konieczności odtwarzania w analizie MES pełnej geometrii obiektu oraz warunków obciążenia w jakich znajdował się obiekt w trakcie pomiaru odkształceń.



Rys. 44. Schemat postępowania w zlokalizowanej hybrydowej metodzie analizy odkształceń i naprężeń lokalnych

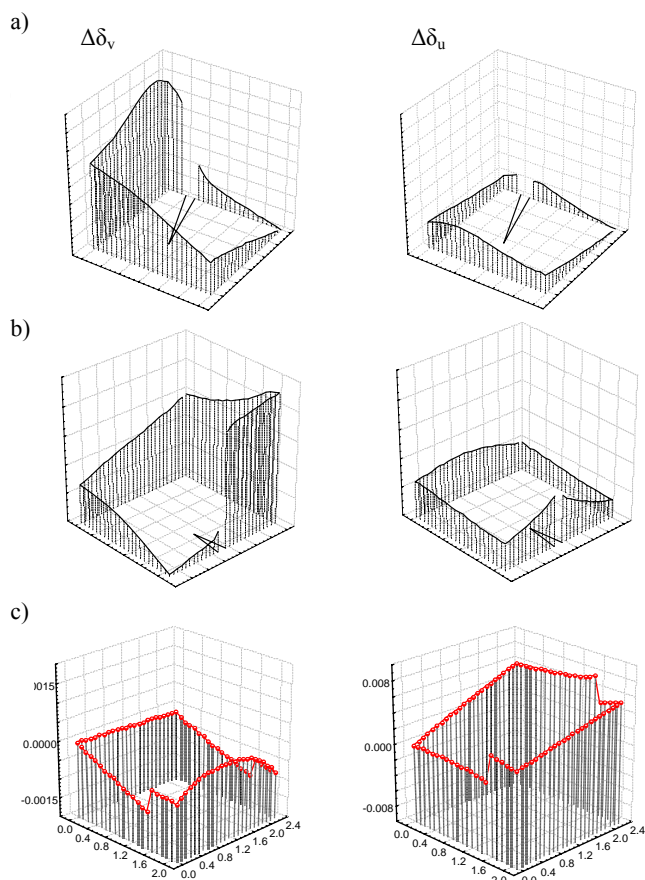
Przedstawione wyżej założenia zastosowano w hybrydowej metodzie analizy odkształceń i naprężeń zaproponowanej w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. W metodzie do pomiaru przemieszczeń zastosowano laserowy ekstensometr siatkowy, a do analizy numerycznej środowisko programu ANSYS.

Opracowaną metodę stosowano w badaniach stanu odkształceń i naprężeń w różnych obiektach znajdujących się w różnych fazach zmęczenia i wykonanych z różnych materiałów. Na rysunku 45 pokazano przykłady analizowanych obiektów: aluminiowej próbki z pęknięciem propagującym od centralnie zlokalizowanego otworu, stalowej próbki typu CCT z centralnym pęknięciem oraz próbki aluminiowej, nitowanej struktury lotniczej.



Rys. 45. Przykładowe obiekty badań: aluminiowa próbka z pęknięciem propagującym od otworu (a), stalowa próbka z centralnym pęknięciem typu CCT (b) oraz próbka aluminiowej, nitowanej struktury lotniczej (c). Przykładowe rozkłady naprężeń (w środku). Modele geometryczne stosowane w analizie numerycznej (na dole)

We wszystkich przypadkach wyznaczano rozkłady składowych odkształceń i naprężeń w zadanych cyklach obciążenia, w kilkudziesięciu fazach cyklu obciążenia. W tym celu rejestrowano rozkłady przemieszczeń δv i δu w otoczeniu rozpatrywanej strefy, a następnie wyznaczone wartości przemieszczeń wprowadzano jako wartości brzegowe w analizie numerycznej. Na rysunku 45 (na dole rysunku) pokazano siatki podziału stosowane w analizie numerycznej. Ograniczały się one do strefy pomiaru przemieszczeń w analizowanych obiektach. Przykładowe przebiegi (rozkłady) przemieszczeń δv i δu wprowadzane w węzłach znajdujących się na granicy modelu numerycznego (siatki podziału) pokazano na rysunku 46. Do modelowania nieliniowych własności materiałowych stosowano wykresy cyklicznego odkształcenia opisane zależnością Ramberga-Osgooda.

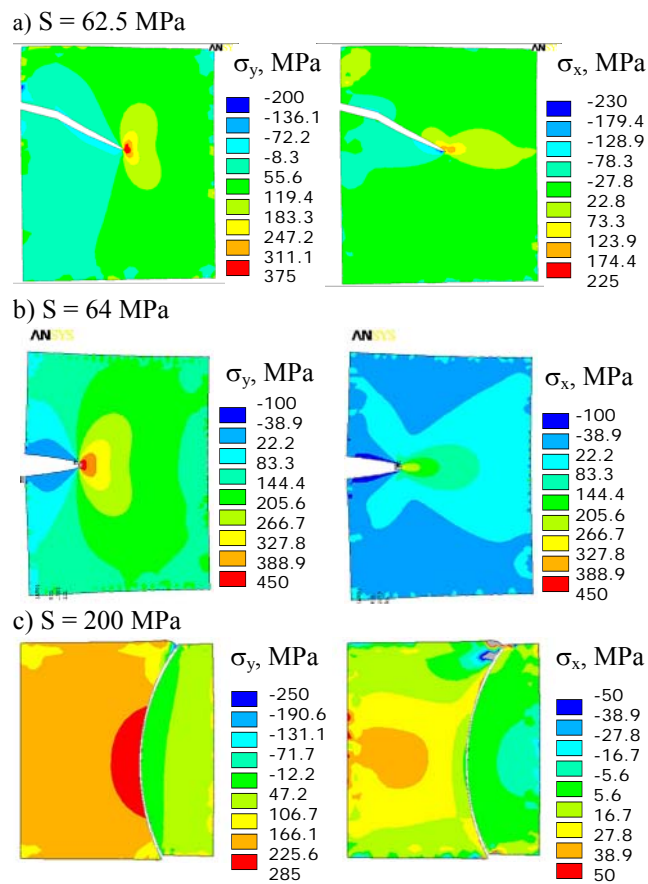


Rys. 46. Przykładowe rozkłady przemieszczeń w kierunku v i u – warunki brzegowe w analizie numerycznej: aluminiowa próbka z otworem (a), stalowa próbka CCT (b), próbka nitowana (c)

W wyniku przeprowadzonej analizy numerycznej wyznaczano rozkłady składowych odkształceń i naprężeń dla poszczególnych faz cyklu obciążenia. Na rysunku 47 pokazane zostały przykładowe rozkłady naprężeń σ_y i σ_x dla maksymalnych wartości obciążenia omawianych obiektów, tj. dla naprężenia nominalnego $S = 62.5$ MPa (próbka z otworem), $S = 64$ MPa (próbka CCT) i $S = 200$ MPa (próbka nitowana).

4. PODSUMOWANIE

Możliwość analizy odkształceń i naprężeń lokalnych w strefach nieciągłości geometrycznych i niejednorodności materiałowych stanowi jeden z niezbędnych warunków skuteczności metod konstruowania maszyn i urządzeń. Jest to szczególnie istotne w problematyce zmęczenia i mechaniki pękania materiałów i konstrukcji, gdzie zagadnienia lokalnych spiętrzeń odkształceń i naprężeń w dużej mierze decydują o trwałości i bezpieczeństwie eksploatacji złożonych struktur. Przedstawione w pracy przykłady analizy odkształceń w strefach nieciągłości geometrycznych i niejednorodności materiałowych pozwoliły na zilustrowanie możliwości stosowania w tym zakresie metod doświadczalnych oraz metod hybrydowych, doświadczalno-numerycznych.



Rys. 47. Wybrane wyniki analizy hybrydowej

LITERATURA

1. **Boroński D.** (1999), *Badania rozkładu odkształceń i naprężeń lokalnych w próbkach z karem w warunkach cyklicznego obciążenia*, Praca doktorska, ATR Bydgoszcz.
2. **Boroński D.** (2005), *Doświadczalna analiza rozkładów odkształceń w strefach zmęczeniowego pękania*, Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz, 2005.
3. **Boroński D., Giesko T., Salbut L.** (2001), Projekt i wykonanie laserowego ekstensometru siatkowego do polowej analizy rozkładów odkształceń w elementach konstrukcyjnych, *Zesz. Nauk. Politechniki Opolskiej, Mechanika* 68, 103-110.

4. **Boroński D., Lipski A.** (2002), Hybrydowa analiza odkształceń i naprężeń na czole pęknięcia zmęczeniowego, *XIX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz-Pieczyska 2002*, 59-66.
5. **Boroński D., Szala J.** (2000), The Quasihybrid Method of Strain Analysis in the Fatigue Life Calculation Methods, *Structural Integrity in the 21st Century*, EMAS, 133-140.
6. **Boroński D., Szala J.** (2002a), Badania stref inicjacji i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego za pomocą laserowego ekstensometru siatkowego LES, *Przegląd Mechaniczny* 7-8, 25-32.
7. **Boroński D., Szala J.** (2002b), Laser grating extensometer LES for fatigue full-field strain analysis, *ECF 14 Fracture Mechanics Beyond 2000*, EMAS, 297-304.
8. **Boroński D., Szala J.** (2002c), The hybrid strain analysis in fatigue loading conditions, *Proceedings of the 8th International Fatigue Congress, Stockholm*, EMAS, 2775-2782.
9. **Diaz F.V., Kaufmann G.H., Armas A.F., Möller, O.** (2002), Measurement of the near-tip displacement field in a fatigue damaged steel plate by digital speckle pattern interferometry, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.37, 621-629.
10. **Dolby R. E.** (2003), Trends in welding processes in engineering construction for infrastructure projects, *56th IIW Annual Assembly*, Bucharest, Romania.
11. **Dzuba A.S., Grigoriev V.D., Pisarev V.S.**, Comparison of the MSC/Nastran and holographic interferometry data on a local strain/stress evaluation in the elasto-plastic range.
12. **Earl J.S., Dulieu-Barton J.M., Shenoi R.A.** (2003), Determination of hygrothermal ageing effects in sandwich construction joints using thermoelastic stress analysis, *Composites Science and Technology*, 63, 211-223.
13. **Giesko T., Boroński D.** (2003), Zautomatyzowane systemy maszynowego widzenia w badaniach zmęczeniowych, *Problemy Eksploatacji*, 3, 177-188.
14. **Glinka G.** (1985), Energy density approach to calculation of inelastic strain-stress near notched and cracks, *Engineering Fracture Mechanics*, 22, 485-508.
15. **Hipp M., Woisetschlager J., Reiterer P., Neger T.** (2004), Digital evaluation of interferograms, *Measurement* 36, 53-66
16. *Introduction to Stress Analysis by the PhotoStress® Method*, Tech Note TN-702-2.
17. **James M.N., Pacey M.N., Wei L.-W., Patterson E.A.** (2003), Characterisation of plasticity-induced closure—crack flank contact force versus plastic enclave, *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 2473-2487.
18. **Jayarama Rao G., Rathinam P., Narayanan R.** (1996), Development of Hybrid Method Coupling Moiré Interferometry and Finite Element Analysis, *Computers and Structures*, 60, 433-440.
19. **Kapkowski J., Kujawińska M.** (1994), Współczesne zastosowania technik hybrydowych w mechanice ciała stałego, *Mat. konf. XVI Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka*, 132-151.
20. **Kobayashi A.S.** (1999), Hybrid method in elastic and elastoplastic fracture mechanics, *Optics and Lasers in Engineering*, 32, 299-323.
21. **Laermann K.-H.** (1995), New achievements and perspectives of optical methods in experimental solid mechanics, *Optics and Lasers in Engineering*, 22, 249-270.
22. **Laermann K.-H.** (1999), Hybrid analysis of two- and three-dimensional solids composed of different materials, *Optics and Lasers in Engineering*, 32, 183-203.
23. **Laermann K.-H.** (2000), Hybrid techniques in experimental solid mechanics, *Optical Methods in Experimental Solid Mechanics*, K-H Laermann eds. Springer-Verlag.
24. **Lagattu F., Brillaud J., Lafarie-Frenot M.-C.** (2004), High strain gradient measurements by using digital image correlation technique, *Materials Characterization*, 53, 17-28.
25. **Lesniak J.R., Boyce B.R.** (1995), A high-speed differential thermographic camera, *SEM* 6/95.
26. **Lesniak J.R., Boyce B.R., Howenwater G.** (1998), Thermoelastic measurement under random loading, *SEM* 6/98
27. **Lagoda T., Macha E.** (1998), *Wieloosiowe zmęczenie losowe elementów maszyn i konstrukcji – cz. III*, Studia i Monografie, Z. 104, Politechnika Opolska.
28. **Mackerle J.** (1995), Fracture mechanics parameters and finite element and boundary element methods - a bibliography (1992-1994), *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.19, 209-223.
29. **Matthew T., Kokaly, M.T., Lee, J., Kobayashi, A.S.** (2003), Moiré interferometry for dynamic fracture study, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.40, 231-247.
30. **McKellar, D.K., Hills, D.A., Nowell, D.** (2000) A comparison between actual and stress intensity near-crack-tip elastic fields, *International Journal of Fatigue*, Vol.22, 551-558.
31. **Mollenhauer D.H., Ifju P.G., Han B.** (1995). A compact, robust and versatile moiré interferometer, *Optics and Lasers in Engineering*, 23, 29-40.
32. **Mongabure, P., Matheron, P., Madi, Y.** (2003) Mechanical cyclic behaviour of 316L welded joint, Comportement cyclique de joints soudés en 316L, *Mécanique & Industries*, Vol.4, 619-626.
33. **Monteiro, J.M., Vaz, M.A.P., Melo, F.Q., Silva Gomes, J.F.** (2001), Use of interferometric techniques for measuring the displacement field in the plane of part-through crack existing in a plate, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.78, 253-259.
34. **Moore, A.J., Tyrer, J.R.** (1996) Two-dimensional strain measurement with ESPI, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.24, 381-402.
35. **Muller de Almeida S.F., Hansen J.S.** (1998), Enhanced measurement of strain distributions, *Experimental Mechanics* Vol. 38, 48-54.
36. **Neuber H.** (1961), Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 28, 544-550.
37. **Nishioka T.** (1999), Hybrid numerical methods in static and dynamic fracture mechanics, *Optics and Lasers in Engineering*, 32, 205-255.
38. **Nishioka, T., Nishi, M., Fujimoto, T., Sakakura, K., Epstein, J.** (1995), Moiré intrferometry measurements of near tip deformation in inhomogeneous elastic-plastic fracture specimens, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.63, 261-275.
39. **Niu, L.-S., Shi, H.-J., Robin, C., Pluvinage, G.** (2001), Elastic and elastic-plastic fields on circular rings containing a V-notch under inclined loads, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.68, 949-962.
40. **Oda I., Willett A., Yamamoto M., Matsumoto T., Sosogi Y.** (2004), Non-contact evaluation of stresses and deformation behaviour in pre-cracked dissimilar welded plates, *Engineering Fracture Mechanics*, 71, 1453-1475.
41. **Osten W., Baumbach T., Seebacher S., Jüptner W.** (2001), Remote Shape Control by Comparative Digital Holography Fringe 2001 *The 4th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns*, Bremen, Germany, 17-19 September 2001.
42. **Patorski K.** (red.) (2005), *Interferometria laserowa z automatyczną analizą obrazu*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej.
43. **Patterson E.A.** (2002) Digital Photoelasticity: principles, practice and potential measurements lecture, *Strain*, 38, 27-39.

44. **Pilch A., Mahajan A., Chu T.** (2004), Measurement of whole-field surface displacements and strain using a genetic algorithm based intelligent image correlation method, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 126, 3, 479-488.
45. **Poon, C.Y., Ruiz, C.** (1994), Hybrid experimental-numerical approach for determining strain energy release rates, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 20, 1994, 123-131.
46. **Schmidt T., Tyson J.** (2003), Dynamic Strain Measurement Using Advanced 3D Photogrammetry, *Proceedings of IMAC XXI*, Kissimmee.
47. **Schubach H.R., Wegner R., Ettemeyer A.** (2000), 3D-ESPI for the Characterization of Metallic Alloys during Tensile Tests, *IX International Congress on Experimental Mechanics, June, 5-8, 2000*, Orlando, Florida.
48. **Stupnicki J.** (1984), Optyczne metody badań w mechanice. *Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego. Mechanika techniczna tX*, praca zbiorowa pod redakcją W. Szczepińskiego, PWN, Warszawa.
49. **Wang,R., Kido, M.** (2003), High temperature fatigue deformation behaviors of thermally sprayed steel measured with electronic speckle pattern interferometry method, *Materials Research Bulletin*, Vol.38, 1401-1411.
50. www.cedip-infrared.com .
51. www.correlatedsolutions.com .
52. www.ettemeyer.de .
53. www.gom.com .
54. **Ya M., Marquette P., Belahcene F., Lu J.** (2004), Residual stresses in laser welded aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods, *Materials Science and Engineering, A* 382, 257-264.
55. **Yamaguchi I.** (2003), Holography, speckle, and computers, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 39, 411-429.

LOCAL STRAIN ANALYSIS IN THE ZONES OF GEOMETRICAL DISCONTINUITIES AND MATERIAL INHOMOGENEITIES

Abstract: Synthetic description of the methods applied in local strain analysis in the zones of geometrical discontinuities and material inhomogeneities were presented in the paper. Attention was concentrated on the experimental and hybrid methods used for investigations realised in cyclic loading conditions. Selected examples of local strain and stress analysis in fatigue and fracture problems were presented.