



AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ROZPRAWY NR 115

Dariusz Boroński

DOŚWIADCZALNA ANALIZA ROZKŁADÓW ODKSZTAŁCEŃ W STREFACH ZMĘCZENIOWEGO PĘKANIA

BYDGOSZCZ – 2005

REDAKTOR NACZELNY
dr hab. Lucyna Drozdowska, prof. nadzw. ATR

OPINIODAWCY
prof. dr hab. Małgorzata Kujawińska
dr hab. Dorota Kocańda, prof. WAT

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Michał Górecki, mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej
Bydgoszcz 2005

ISSN 0209-0597

Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. (052) 3749482, 3749426
e-mail: wydawucz@atr.bydgoszcz.pl <http://www.atr.bydgoszcz.pl/~wyd>

Wyd. I. Nakład 120 egz. Ark. aut. 9,75. Ark. druk. 9,50. Zamówienie nr 7/2005
Oddano do druku i druk ukończono w kwietniu 2005 r.
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii ATR Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20

Spis treści

| | |
|---|----|
| Wykaz ważniejszych oznaczeń | 5 |
| 1. Wstęp..... | 7 |
| 1.1. Wprowadzenie i geneza pracy | 7 |
| 1.2. Cel i zakres pracy..... | 8 |
| 2. Rozkłady odkształceń w elementach konstrukcyjnych w warunkach obciążeń zmęczeniowych | 10 |
| 2.1. Analiza odkształceń i naprężeń lokalnych w metodach obliczeń trwałości zmęczeniowej..... | 10 |
| 2.1.1. Odkształcenia i naprężenia lokalne w karbach geometrycznych..... | 10 |
| 2.1.2. Odkształcenia i naprężenia lokalne w metodach obliczeń trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych..... | 17 |
| 2.2. Rozkłady przemieszczeń i odkształceń w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego..... | 21 |
| 2.2.1. Podejście mechaniki pękania..... | 22 |
| 2.2.2. Strefa odkształcenia plastycznego..... | 26 |
| 2.3. Lokalne własności materiałowe w elementach konstrukcyjnych..... | 29 |
| 2.4. Podsumowanie..... | 35 |
| 3. Doświadczalna analiza odkształceń w niejednorodnych strukturach poddanych obciążeniom zmęczeniowym | 36 |
| 3.1. Metody pomiaru odkształceń w warunkach obciążeń zmęczeniowych – wybór metody badań doświadczalnych | 36 |
| 3.2. Laserowy ekstensometr siatkowy LES | 40 |
| 4. Rozkład odkształceń lokalnych w karbie geometrycznym w warunkach obciążeń zmiennych..... | 46 |
| 4.1. Wprowadzenie | 46 |
| 4.2. Wyniki badań oraz ich analiza..... | 48 |
| 4.3. Podsumowanie..... | 66 |
| 5. Lokalne własności zmęczeniowe w laserowym złączu spawanym | 68 |
| 5.1. Sformułowanie problemu | 68 |
| 5.2. Wyniki badań oraz ich analiza..... | 70 |
| 5.3. Wykresy cyklicznego odkształcenia | 83 |
| 5.4. Energia pętli histerezy | 87 |
| 5.5. Podsumowanie..... | 88 |

| | |
|---|-----|
| 6. Rozkład odkształceń w obszarach nieciągłości geometrycznych i zróżnicowanych własności materiałowych | 90 |
| 6.1. Wprowadzenie | 90 |
| 6.2. Wyniki badań oraz ich analiza | 95 |
| 6.3. Podsumowanie | 110 |
| 7. Hybrydowa, doświadczalno-numeryczna metoda wyznaczania odkształceń i naprężeń w strefach zmęczeniowego pęknięcia | 112 |
| 7.1. Wprowadzenie | 112 |
| 7.2. Metodyka hybrydowej analizy odkształceń i naprężeń w warunkach obciążeń zmęczeniowych | 113 |
| 7.3. Hybrydowa analiza odkształceń i naprężeń w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego | 114 |
| 7.4. Podsumowanie | 126 |
| 8. Przykłady doświadczalnej analizy odkształceń w strefie pęknięcia zmęczeniowego | 128 |
| 8.1. Współczynnik intensywności naprężeń K_I | 128 |
| 8.2. Strefy odkształceń plastycznych w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego | 130 |
| 9. Podsumowanie i wnioski | 134 |
| Literatura | 137 |

Wykaz ważniejszych oznaczeń

| | | |
|------------------|---|---|
| $2N_f$ | - | liczby nawrotów obciążenia do pęknięcia zmęczeniowego |
| a^* | - | parametr materiałowy |
| b, c | - | wykładniki odkształceniowego wykresu zmęczeniowego |
| COD, δ | - | rozwarcie pęknięcia |
| e | - | odkształcenie nominalne |
| E | - | moduł sprężystości wzdłużnej |
| f_s | - | częstość siatki przedmiotowej |
| G | - | moduł sprężystości poprzecznej |
| J | - | całka J |
| K | - | współczynnik intensywności naprężeń |
| K' | - | cykliczny współczynnik wytrzymałości |
| K_t, a_k | - | teoretyczny współczynnik spiętrzenia naprężeń, współczynnik kształtu |
| K_f, β_k | - | współczynnik działania karbu |
| K_s | - | współczynnik spiętrzenia naprężeń strukturalnych |
| K_e | - | współczynnik spiętrzenia odkształceń lokalnych, odkształceniowy współczynnik kształtu |
| K_σ | - | współczynnik spiętrzenia naprężeń lokalnych, naprężeniowy współczynnik kształtu |
| N | - | liczba cykli |
| N_c | - | liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego |
| n' | - | cykliczny współczynnik umocnienia |
| P | - | siła |
| r_c | - | krytyczny rozmiar strefy karbu |
| r_p | - | rozmiar (promień) strefy plastycznej (monotonicznej) |
| r_{pc} | - | rozmiar cyklicznej strefy plastycznej |
| R | - | współczynnik asymetrii cyklu |
| R_e | - | granica plastyczności |
| R_m | - | wytrzymałość doraźna |
| S | - | naprężenie nominalne |
| S_a | - | amplituda naprężenia nominalnego |
| S_m | - | nominalne naprężenie średnie |
| W | - | gęstość energii odkształcenia |
| W_s | - | gęstość energii odkształcenia dla naprężenia nominalnego |
| W_σ | - | gęstość energii odkształcenia sprężysto-plastycznego |
| Z, Z_1, Z_2 | - | granica zmęczenia |
| γ | - | jednostkowa energia niezbędna do rozwoju pęknięcia |
| γ_{xy} | - | odkształcenie postaciowe |
| δ_u | - | przemieszczenie normalne w kierunku x |
| δ_v | - | przemieszczenie normalne w kierunku y |
| ε_e | - | odkształcenie ekwiwalentne |
| ε_x | - | odkształcenie normalne w kierunku x |
| ε_y | - | odkształcenie normalne w kierunku y |
| ε_w | - | geometryczna suma odkształceń normalnych |
| ε'_f | - | współczynnik zmęczeniowego odkształcenia plastycznego |
| λ | - | długość fali światła |

| | | |
|----------------------|---|---|
| ν | - | liczba Poissona |
| ν' | - | efektywna wartość liczby Poissona |
| σ_{max} | - | naprężenie maksymalne |
| σ_{min} | - | naprężenie minimalne |
| σ_x | - | naprężenia normalne w kierunku x |
| σ_y | - | naprężenia normalne w kierunku y |
| σ'_f | - | współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej |
| χ | - | gradient odkształcenia |
| ΔJ | - | zakres (przyrost) całki J |
| ΔK | - | zakres współczynnika intensywności naprężeń |
| ΔK_{eff} | - | zakres efektywnego współczynnika intensywności naprężeń |
| ΔK_{th} | - | zakres progowego współczynnika intensywności naprężeń |
| ΔW | - | energia odkształcenia |
| ΔW_c | - | energia odkształcenia całkowitego |
| ΔW_{pl} | - | energia odkształcenia plastycznego |
| $\Delta \varepsilon$ | - | zakres odkształcenia |
| $\Delta \sigma$ | - | zakres naprężenia |

Wykaz ważniejszych indeksów

| | | |
|-------|---|--------------------|
| a | - | amplituda |
| c | - | całkowity |
| m | - | wartość średnia |
| max | - | wartość maksymalna |
| min | - | wartość minimalna |
| p | - | plastyczny |
| s | - | sprężysty |

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie i geneza pracy

Jednym z podstawowych wymogów stawianych różnego rodzaju obiektom technicznym jest odpowiedni poziom ich niezawodności oraz bezpieczeństwa eksploatacji przy określonej trwałości. Ciągłe liczne przypadki awarii maszyn oraz innych obiektów technicznych spowodowanych zmęczeniowym pękaniem [170, 171, 193, 194] wskazują, że spełnienie tych wymagań w dużym stopniu zależy będzie od pełniejszego poznania zagadnień dotyczących zmęczenia materiałów i konstrukcji.

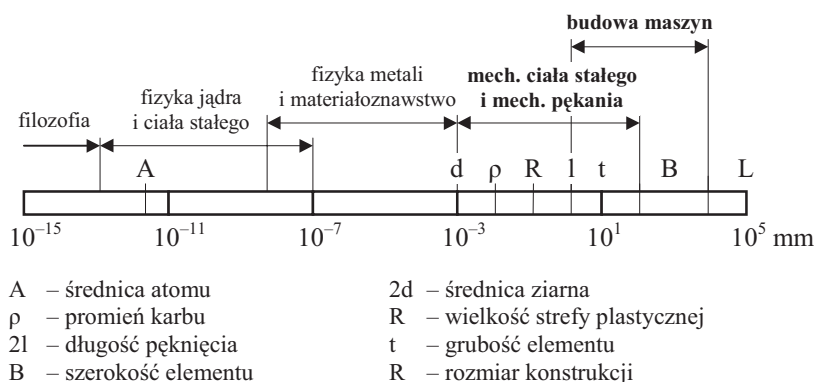
Zmęczeniowe pęknięcie materiałów i konstrukcji jest procesem bardzo złożonym i rozłożonym w czasie, a jego konsekwencje z reguły są bardzo poważne, począwszy od uszkodzeń elementów maszyn, poprzez awarie zespołów maszyn wywołane pęknięciami ich elementów składowych, aż po całkowite zniszczenie całych, często bardzo złożonych obiektów. Skutki procesów zmęczeniowych prowadzą nie tylko do zniszczeń materialnych, ale często także zagrażają zdrowiu i życiu ludzi. Takie globalne następstwa procesów zmęczeniowych są jednak efektem lokalnych zjawisk występujących w niewielkich obszarach elementów konstrukcyjnych.

Poszczególne fazy zmęczenia, opisywanym w literaturze [86, 172, 173, 193] towarzyszą różne zjawiska na poziomie mikro- i makrostruktury materiału. Badania i analizy procesów zmęczeniowych na poziomie struktury materiału opisane w licznych pracach, a zwłaszcza w pracy [86] umożliwiły lepsze poznanie przyczyn pęknięcia zmęczeniowego, a w tym wspomnianego wyżej lokalnego charakteru inicjowania pęknięcia zmęczeniowego. Pokazany na rysunku 1.1 schematyczny przebieg typowego ciągu zdarzeń prowadzącego do powstania pęknięcia zmęczeniowego [172] obejmuje trzy podstawowe fazy: pojawienie się miejscowych odkształceń plastycznych i związanego z nimi cyklicznego umocnienia lub osłabienia, nukleację i rozwój mikropęknięć oraz rozwój makropęknięć, aż do powstania złomu zmęczeniowego. Szczegółowy opis zmian zachodzących w strukturze materiału w zależności od własności materiału oraz poziomów obciążenia w poszczególnych fazach zmęczenia przedstawiono w pracy [86].



Rys. 1.1. Fazy trwałości zmęczeniowej [172]

W zależności od skali obserwacji można wskazać różne obszary zainteresowań nauk podstawowych i stosowanych związanych z badaniami przebiegu zjawisk zmęczeniowych (rys.1.2). Odnosząc się do wykresu pokazanego na rysunku 1.2, zakres badawczy niniejszej pracy dotyczy problematyki mechaniki ciała stałego oraz budowy maszyn.



Rys. 1.2. Skala wielkości związana z analizą zjawisk zmęczeniowych (za [86])

Jednym z czynników sprzyjających powstawaniu i rozwojowi pęknięć zmęczeniowych są wszelkiego rodzaju zjawiska powodujące spiętrzenia naprężeń, których konsekwencją jest powstawanie lokalnych stref odkształceń plastycznych. Zmiany stanu odkształceń i naprężeń są także obrazem w skali makroskopowej procesów zachodzących na poziomie struktury materiału w trakcie kolejnych etapów zmęczenia zarówno w fazie inicjacji, jak i rozwoju pęknięcia. Jest zatem oczywiste, że powiązanie stanu odkształceń i naprężeń z przebiegiem procesu zmęczenia jest jednym z podstawowych zadań w zmęczeniowej analizie konstrukcji.

Niezwykle ważnym staje się tym samym analiza rozkładów odkształceń w strefach zmęczeniowego pęknięcia, w szczególności ze względu na możliwości rozwoju metod zmęczeniowej analizy konstrukcji.

1.2. Cel i zakres pracy

Z powodu złożoności procesu zmęczeniowego pęknięcia materiałów i konstrukcji, bardzo często do jego opisu stosuje się modele fenomenologiczne. Trudności w modelowaniu zmęczeniowego zachowania konstrukcji sprawiają, że nieodzownym narzędziem w skutecznej analizie zmęczeniowej różnorodnych obiektów technicznych są metody doświadczalne. Jest to szczególnie widoczne w przypadku rozpatrywania odkształceń w obszarach zagrożonych zmęczeniowym pękaniem. Lokalny charakter procesu inicjacji pęknięcia zmęczeniowego powoduje, że o przebiegu zmęczenia wielokrotnie decydują zjawiska występujące w miejscach spiętrzenia odkształceń, na które często nakładają się także niejednorodność i brak stabilizacji własności materiałowych. Wpływa to istotnie na możliwość stosowania w zmęczeniowej analizie konstrukcji teoretycznych opisów stanu odkształceń i naprężeń.

Tym samym jako podstawowy cel pracy przyjęto doświadczalną analizę wpływu nieciągłości geometrycznych i niejednorodności materiałowych na rozkłady odkształceń występujące w strefach zmęczeniowego pęknięcia materiałów i konstrukcji w warunkach obciążeń zmęczeniowych.

Na tak sformułowany ogólny cel pracy składa się szereg celów szczegółowych, dotyczących wyodrębnionych problemów związanych z możliwością prowadzenia

skutecznej oceny wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej konstrukcji. Ważniejsze z nich to:

- a) analiza wpływu nieciągłości geometrycznych (karbu) na:
 - maksymalne wartości odkształceń lokalnych oraz przebieg ich zmian w trakcie cyklicznie zmiennego obciążenia,
 - strefę plastyczną i przebieg jej zmian w trakcie cyklicznie zmiennego obciążenia,
- b) analiza wpływu niejednorodności materiałowych na zróżnicowanie lokalnych, zmęczeniowych własności materiałowych,
- c) analiza wpływu łącznego oddziaływania nieciągłości materiałowych i niejednorodności materiałowych na:
 - maksymalne wartości odkształceń lokalnych oraz przebieg ich zmian w trakcie cyklicznie zmiennego obciążenia,
 - gradient odkształcenia w trakcie cyklicznie zmiennego obciążenia,
- d) analiza związku maksymalnych odkształceń lokalnych oraz ich gradientów z miejscami inicjacji pęknięcia zmęczeniowego.

Doświadczalny charakter pracy sprawił, że jednym z jej celów był także rozwój metod doświadczalnej analizy rozkładów odkształceń z zastosowaniem laserowej interferometrii siatkowej w warunkach obciążeń zmęczeniowych, a także opracowanie nowych narzędzi dla ich analizy, wykorzystujących współczesne techniki komputerowe.

Realizacja przyjętych celów pracy wymagała przeprowadzenia szerokiego zakresu badań doświadczalnych wspartych teoretyczną analizą omawianych zagadnień. Wyniki przeprowadzonych badań i analiz omówione zostały w kolejnych rozdziałach pracy. W pierwszej części pracy przedstawiono analizę danych literaturowych wskazujących związki odkształceń lokalnych z metodami zmęczeniowej oceny konstrukcji. Wybrane na jej podstawie zagadnienia szczegółowo zilustrowano w następnych rozdziałach pracy na przykładach badań własnych obejmujących doświadczalną analizę rozkładów odkształceń w obszarach zmęczeniowego pęknięcia obiektów reprezentujących współczesne rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne. W pracy przedstawiono ponadto propozycje metod analizy odkształceń w warunkach obciążeń zmiennych w czasie, w tym adaptację doświadczalnej metody laserowej interferometrii siatkowej oraz hybrydową, doświadczalno-numeryczną metodykę analizy odkształceń i naprężeń w strefach zmęczeniowego pęknięcia. Pracę kończy podsumowanie i wnioski, w tym wskazania kierunków do dalszych badań.

2. Rozkłady odkształceń w elementach konstrukcyjnych w warunkach obciążeń zmęczeniowych

Skuteczność zmęczeniowej analizy konstrukcji w znacznej mierze zależy od możliwości wiarygodnego opisu stanu odkształceń i naprężeń w strefach zmęczeniowego pęknięcia. Waga problemu analizy odkształceń i naprężeń wynika między innymi z jej bezpośredniego powiązania z metodami obliczeń trwałości zmęczeniowej zarówno w okresach inicjacji, jak i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego. W pierwszym przypadku główne znaczenie mają odkształcenia i naprężenia lokalne, w drugim - stan odkształceń i naprężeń w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego. W obydwu przypadkach możliwości oceny stanu odkształceń i naprężeń komplikuje zmienność lokalnych właściwości materiałowych oraz ich niejednorodność w strefie zmęczeniowego pęknięcia. Z tego względu w dalszej części pracy szerszą uwagę poświęcono trzem problemom:

- odkształceń lokalnych w strefach spiętrzeń odkształceń i naprężeń,
- rozkładów odkształceń na czole pęknięcia zmęczeniowego,
- lokalnych właściwości materiałowych w elementach konstrukcyjnych.

Znaczenie i związki wymienionych zagadnień ze zmęczeniową analizą konstrukcji przedstawiono w kolejnych punktach rozdziału.

2.1. Analiza odkształceń i naprężeń lokalnych w metodach obliczeń trwałości zmęczeniowej

2.1.1. Odkształcenia i naprężenia lokalne w korbach geometrycznych

Konstruowanie obiektów technicznych ze względu na przeciwdziałanie zmęczeniowemu pękaniu wymaga w większości przypadków określenia lokalnych parametrów obciążenia oraz ich skutków w miejscach zagrożonych wystąpieniem lokalnych odkształceń plastycznych. Dzieje się tak niezależnie od przyjętego sposobu postępowania [9, 72, 87, 164, 165, 172] i zastosowanej metody przewidywania trwałości (m.in. w pracy Fatamiego i Yanga [56] przedstawione zostało około 50 modeli obliczeń uszkodzeń zmęczeniowych powstałych na przestrzeni ostatnich 70 lat).

Jednym z takich obszarów w szczególności sposobu narażonych na zainicjowanie procesów zmęczeniowych są karby geometryczne i strukturalne. Karby geometryczne definiowane są jako miejsca zmiany poprzecznych przekrojów elementów lub zmiany krzywizn ograniczających przedmiot [87]. Efekt spiętrzenia odkształceń i naprężeń w dnie karbu wywoływany jest zagęszczaniem linii sił w trakcie przenoszenia obciążenia w części przekroju osłabionego (zmienionego) poprzez karb.

Działanie karbu geometrycznego opisywane jest najczęściej poprzez teoretyczny współczynnik spiętrzenia naprężeń (współczynnik kształtu) K_t , zgodnie z definicją

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{S} \quad (2.1)$$

gdzie:

- σ_{max} – maksymalna wartość naprężenia na dnie karbu,
- S – naprężenie nominalne w przekroju karbu.

Analiza danych literaturowych przeprowadzona w pracy [17] wykazała, że istnieje szereg metod wyznaczania wartości współczynnika K_t (oznaczanego również jako α_k) zarówno na płaszczyźnie eksperymentalnej, jak i obliczeniowej, metodami analitycznymi [136, 145, 149, 155, 181] lub numerycznymi [134, 160]. W metodach analitycznych, obliczenia wartości współczynnika K_t w większości przypadków realizowane są - na bazie liniowo-sprężystego modelu materiału - dla określonej geometrii elementu. Powoduje to ograniczenie zastosowania tych metod do analiz w zakresie naprężeń sprężystych.

W pracy [5] Schijve sugeruje, że wystarczająco dokładnym rozwiązaniem, a przy tym mniej kosztownym w porównaniu z metodami eksperymentalnymi jest zastosowanie metody elementów skończonych z wykorzystaniem trójwymiarowych modeli geometrycznych i nieliniowych modeli materiałowych.

A. Metody obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej elementów z karbami

W obliczeniach wytrzymałości zmęczeniowej elementów z karbami, zazwyczaj wystarczająca jest znajomość wartości współczynnika K_t wyznaczonego na podstawie geometrii elementu (współczynnik kształtu). Obliczenia wytrzymałości oparte na granicy zmęczenia Z polegają w głównej mierze na modyfikacji wykresów zmęczeniowych [176] Haigha, Gerbera i Goodmana wyznaczonych dla próbek materiałowych w wyniku uwzględnienia efektu działania karbu opisanego współczynnikiem K_f zależnym od wartości współczynnika K_t i parametrów opisujących wrażliwość materiału na działanie karbu.

Wartość K_f zwanego współczynnikiem działania karbu wyznaczana jest różnymi metodami. Najczęściej spotykane metody to: Petersona [155], Neubergera [136], Kuhna-Hardrahta, Heywooda, Bucha, Branda i Stielera-Siebela [182]. Wszystkie oparte są na modelu naprężeń uśrednionych. Do wyznaczania współczynnika K_f stosowane są także modele oparte na mechanice pęknięcia oraz intensywności pola naprężeń [54, 105, 217, 235, 236].

W przypadku obciążeń wahadłowych, tj. gdy obciążenie średnie równe jest zeru, granica zmęczenia dla elementu z karbem Z_2 wyznaczana jest eksperymentalnie na podstawie zależności:

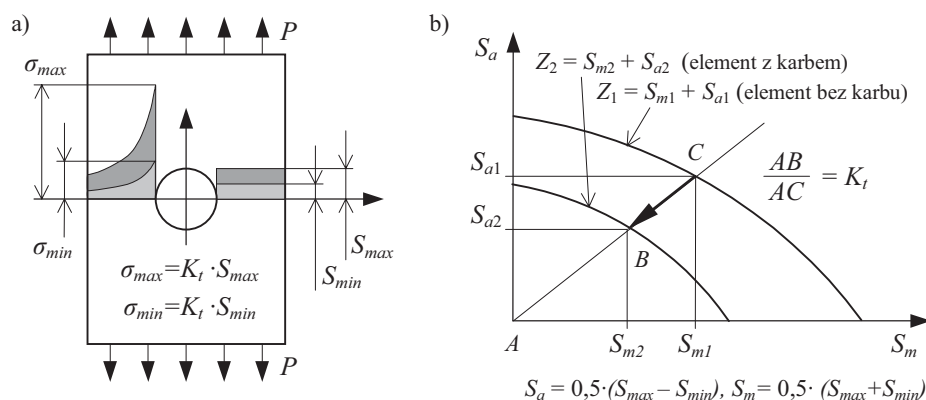
$$K_f = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (2.2)$$

gdzie:

- Z_1 – granica zmęczenia dla próbki bez karbu,
- Z_2 – granica zmęczenia dla elementu z karbem.

Jeśli jednak naprężenie średnie jest większe od zera, konieczne staje się niezależne określenie wpływu karbu dla minimalnej i maksymalnej wartości obciążenia, co pokazano na rysunku 2.1. Wartość granicy zmęczenia dla elementu z karbem Z_2 wyznaczana jest na podstawie znanych własności zmęczeniowych materiału i wartość współczynnika K_t .

Odmiennie metody obliczeń granicy zmęczenia dla elementów z karbem przedstawiono w pracach Tanaki [195] i Taylora [197, 198, 199]. Metody te, przeznaczone są głównie dla obiektów o skomplikowanej geometrii, dla których trudno jest określić współczynniki kształtu K_t . Bazują one na połączeniu koncepcji krytycznego rozmiaru strefy karbu (ang.: process zone approach) i metody Smitha-Millera [185] opisującej karb modelami liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia.



Rys. 2.1. Sposób wyznaczania granicy zmęczenia dla elementu z karbem [172]: a) spiętrzenie naprężeń w otoczeniu karbu, b) wykres zmęczeniowy w układzie $S_a = f(S_m)$. Oznaczenia: Z_1 – granica zmęczenia dla elementu bez karbu, Z_2 – granica zmęczenia dla elementu z karbem, S_a – amplituda naprężenia nominalnego, S_m – nominalne naprężenie średnie

Krytyczny rozmiar strefy karbu r_c wyznaczony na podstawie zależności (2.3)

$$r_c = (\Delta K_{th} / \Delta Z)^2 \cdot (1 / 2\pi) \quad (2.3)$$

w której ΔK_{th} jest zakresem progowego współczynnika intensywności naprężeń, Z – granicą zmęczenia dla próbki bez karbu dla określonej wartości współczynnika asymetrii cyklu R , pozwala na określenie granicy zmęczenia dla elementu konstrukcyjnego zgodnie z jednym z trzech warunków:

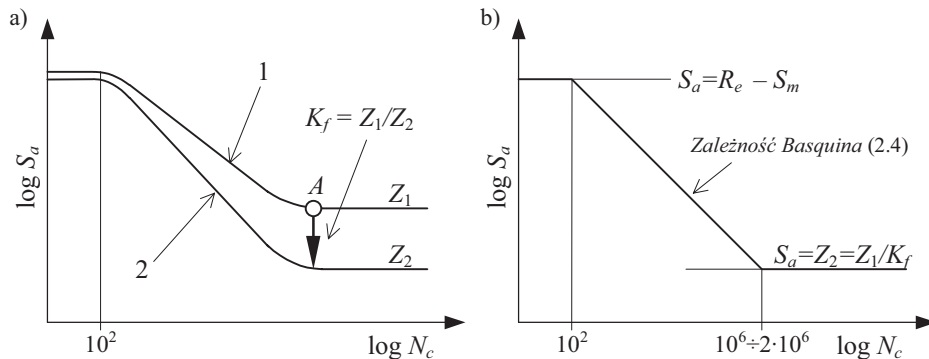
- naprężenie w punkcie odległym o r_c od dna karbu (miejsca o największych naprężeniach) musi odpowiadać granicy zmęczenia elementu bez karbu,
- średnia wartość naprężenia dla odcinka poprowadzonego od dna karbu do punktu odległego o r_c musi odpowiadać granicy zmęczenia elementu bez karbu,
- średnia wartość naprężenia w polu wyznaczonym przez fragment koła o środku umiejscowionym na dnie karbu i promieniu równym r_c musi odpowiadać granicy zmęczenia elementu bez karbu.

B. Obliczenia trwałości zmęczeniowej na podstawie wykresów zmęczeniowych dla elementów z karbem

Znajomość wartości współczynników K_f dla elementów z karbami pozwala na modyfikację wykresów zmęczeniowych Wöhlera, co umożliwia prowadzenie obliczeń trwałości zmęczeniowej podobnie jak dla elementów bez karbu. Na rysunku 2.2a pokazano schematycznie sposób przekształcenia wykresu trwałości zmęczeniowej dla elementu bez karbu (1) w wykres dla elementu z karbem (2). Położenie punktu przegięcia A zależy głównie od typu materiału, rodzaju karbu i chropowatości powierzchni.

Współczynnik K_f wyznaczony na podstawie współczynnika K_t umożliwia także wyznaczenie wykresu trwałości zmęczeniowej dla elementu z karbem korzystając z zależności Basquina (rys.2.2b)

$$S_a^k = N_c \cdot \quad (2.4)$$



Rys. 2.2. Wykresy trwałości zmęczeniowej dla elementu z karbem [172]: a) schemat wyznaczania współczynnika działania karbu, b) schematyczny opis wykresu zmęczeniowego. Oznaczenia: Z_1 – granica zmęczenia dla elementu bez karbu, Z_2 – granica zmęczenia dla elementu z karbem, S_a – amplituda naprężenia nominalnego, S_m – nominalne naprężenie średnie

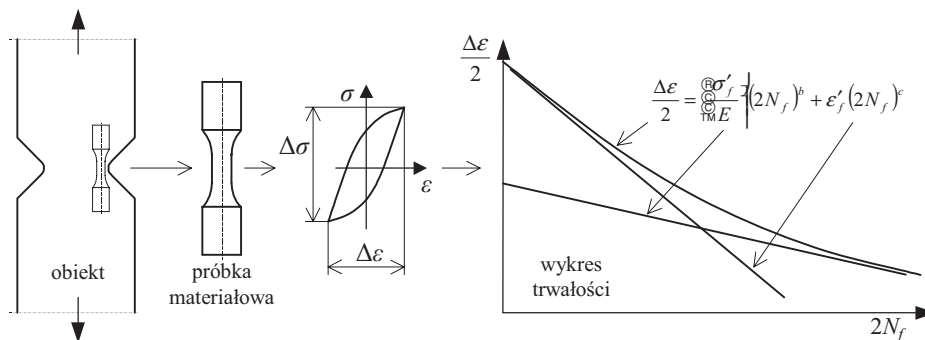
C. Podejście lokalne w metodach obliczeń trwałości zmęczeniowej

W metodach obliczeń trwałości zmęczeniowej wykorzystujących wykresy w ujęciu naprężeniowym nie prowadzi się szczegółowej analizy odkształceń i naprężeń w karbie. Jednak w wielu sytuacjach, a głównie w przypadku obciążeń, których skutkiem jest przekroczenie granicy plastyczności na dnie karbu, niezbędna staje się konieczność analizy lokalnych wartości odkształceń i naprężeń.

Analiza danych literaturowych wskazuje, że rozwój metod wyznaczania odkształceń w otoczeniu karbu przyczynił się do szerszego zastosowania lokalnego podejścia w procedurach wyznaczania trwałości zmęczeniowej. Główną trudność w obliczeniach zmęczeniowych stanowi w takich przypadkach sprężysto-plastyczny charakter odkształceń (i naprężeń) w strefie karbu. Lokalne podejście zastosowano w głównej mierze w odkształceniowych i energetycznych metodach obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych.

Ujęcie odkształceniowe

W metodach odkształceniowych [93, 131] zakłada się, że trwałość elementu z karbem równa jest trwałości próbki gładkiej, w której przebieg odkształcenia jest taki sam jak na dnie karbu (rys.2.3).



Rys. 2.3. Schemat obliczeń trwałości metodą odkształceniową

W obliczeniach trwałości wykorzystuje się odkształceniowe wykresy trwałości zmęczeniowej opisane zależnością Mansona-Coffina [42, 116]:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} \left[(2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \right] \quad (2.5)$$

gdzie:

- σ'_f , ε'_f , b , c , E – własności materiałowe,
- $2N_f$ – liczba nawrotów obciążenia,
- $\Delta \varepsilon$ – zakres odkształcenia całkowitego.

Uwzględnienie w obliczeniach wpływu naprężenia średniego σ_m wymaga modyfikacji zależności (2.5) do postaci (2.6) lub (2.7):

- modyfikacja Morrowa [131]

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} \left[(2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \right] \quad (2.6)$$

- modyfikacja Mansona-Halforda [115]

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} \left[(2N_f)^b + \varepsilon'_f \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{\sigma'_f} \right]^{\frac{c}{b}} (2N_f)^c \quad (2.7)$$

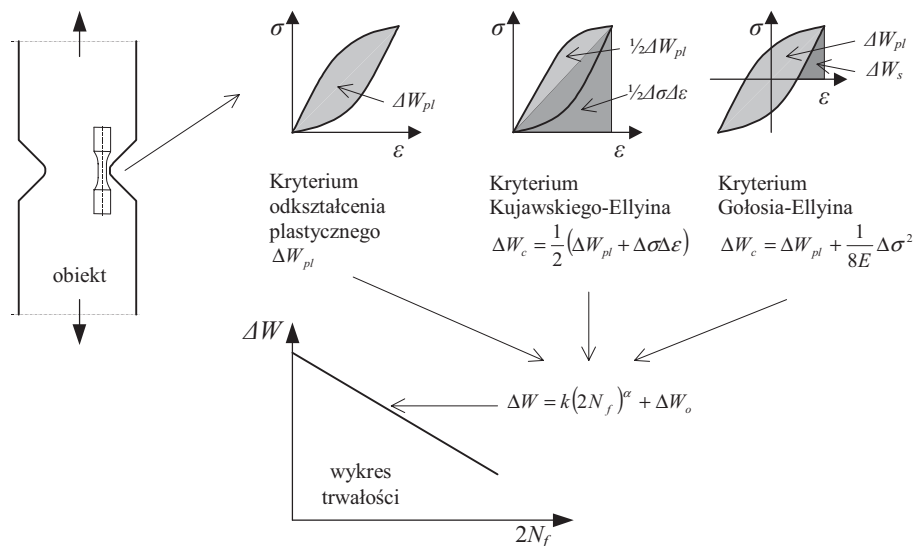
W literaturze spotykane są różne modyfikacje metody odkształceniowej. Przykładowo w pracy [121] wprowadzono wartość odkształcenia odpowiadającą granicy zmęczenia w ujęciu naprężeniowym.

Ujęcie energetyczne

Energetyczne metody oceny trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych bazują na jednym z wybranych energetycznych kryteriów zniszczenia. Najczęściej spotykane z nich to:

- kryterium energii odkształcenia plastycznego [193],
- kryterium energii odkształcenia plastycznego Kujawskiego-Ellyina [93],
- kryterium energii odkształcenia całkowitego Gołosia-Ellyina [69],
- kryterium stałej energii odkształcenia plastycznego niezbędnej do powstania pęknięcia Bui-Quoca [38].

Na rysunku 2.4 pokazano schemat postępowania przy obliczeniach trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem kryteriów odkształcenia plastycznego oraz kryteriów Kujawskiego-Ellyina i Gołosia-Ellyina.



Rys. 2.4. Schemat obliczeń trwałości metodą energetyczną

We wszystkich tych przypadkach do wyznaczenia wartości przyjętych wielkości kryterialnych niezbędna jest analiza pola pętli histerezy, przy czym do jej opisu stosowane różne modele materiałowe.

Odrębną grupę metod obliczeń trwałości zmęczeniowej stanowią metody oparte na modelach mechaniki pęknięcia i równaniach wzrostu pęknięcia zmęczeniowego [86], zakładające istnienie w karbie początkowego pęknięcia. Przykładowo w pracach [4, 5] przedstawiono metodę sumującą okresy wzrostu krótkich i długich pęknięć, a w pracach [40, 138] do obliczeń trwałości zastosowano model zamykania pęknięcia w karbie NCCM (ang.: notch crack closure method) oparty na efekcie indukowanej plastyczności i wzroście krótkich pęknięć w okolicy karbu.

Ciekawą propozycję obliczania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, na podstawie analizy stanu odkształceń i naprężeń lokalnych, stanowią metody wykorzystujące intensywność pola naprężeń σ_{FI} . Metody te, wymagają analizy lokalnych wartości odkształceń i naprężeń do opisu rozkładów i gradientów naprężeń ekwiwalentnych. Podstawowa wersja metody intensywności pola naprężeń przedstawiona w pracy [224] zakłada, że trwałość zmęczeniowa elementów z różnymi karbami jest taka sama, jeśli taka sama jest intensywność pola naprężeń σ_{FI} . W zależności od wersji metody, intensywność pola naprężeń σ_{FI} zależna jest od wymiarów strefy uszkodzeń zmęczeniowych, stanu naprężeń i odkształceń oraz odpowiednich funkcji wagowych. Podobne kryteria zniszczenia zastosowano także w innych metodach opartych na koncepcji intensywności pola naprężeń spotykanych w literaturze [2, 162, 179, 223].

D. Odkształcenia i naprężenia lokalne

Znajomość wartości teoretycznego współczynnika spiętrzenia naprężeń K , pozwala na zastosowanie szeregu metod analitycznych do wyznaczenia lokalnych wartości odkształceń i naprężeń w strefie karbu [40, 44, 67, 68, 79, 94, 124, 137, 211, 216, 219, 231], przy czym w większości są one oparte na liniowo-sprężystych modelach materia-

łowych. Analiza literatury wykazuje, że szersze zastosowanie znalazły metody oparte na pracach Neubera [137] oraz Glinki-Molskiego [68], w których zastosowano nieliniowe opisy własności materiału.

Model Neubera

Reguła Neubera wiąże naprężenia lokalne i nominalne w karbie za pomocą współczynników spiętrzenia naprężeń K_σ i K_ε opisanych zależnościami:

$$K_\sigma = \sigma / S \quad (2.8)$$

$$K_\varepsilon = \varepsilon / e \quad (2.9)$$

gdzie:

σ, ε – naprężenie i odkształcenie lokalne,
 S, e – naprężenie i odkształcenie nominalne.

Zgodnie z modelem Neubera iloczyn współczynników K_σ i K_ε równy jest kwadratowi współczynnika kształtu K_t

$$K_\sigma \cdot K_\varepsilon = K_t^2 \quad (2.10)$$

Zastosowanie sprężysto-plastycznego modelu materiału umożliwia tym samym wyznaczenie lokalnych wartości odkształceń i naprężeń w karbie dla określonych wartości naprężenia nominalnego S .

Model Glinki-Molskiego

Model Glinki-Molskiego (ang.: ESED – equivalent strain energy density) zakłada, że stosunek gęstości energii odkształcenia na dnie karbu do gęstości energii odkształcenia dla naprężenia nominalnego jest równy kwadratowi współczynnika kształtu, zgodnie z zależnością:

$$K_t^2 \cdot W_s = W_\sigma \quad (2.11)$$

gdzie:

W_s – gęstość energii odkształcenia dla naprężenia nominalnego,
 W_σ – gęstość energii odkształcenia sprężysto-plastycznego.

Energia odkształcenia obliczana jest na podstawie przyjętego modelu materiałowego $\sigma = f(\varepsilon)$:

$$\Delta W = \int \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2.12)$$

Porównania wyników obliczeń odkształceń lokalnych metodami Neubera i Glinki-Molskiego z wynikami analiz numerycznych [84, 208] wskazują zazwyczaj na lepszą zgodność wyników otrzymanych metodą ESED. Jest to najbardziej widoczne w przypadkach, gdy naprężenie nominalne jest większe od granicy plastyczności [11]. Według autorów pracy [84] wyniki badań wskazują także na lepszą skuteczność metody ESED dla płaskiego stanu odkształcenia, a metody Neubera dla płaskiego stanu naprężenia.

Z kolei w pracy [211] stwierdza się, że metoda ESED w większości przypadków powoduje niedoszacowanie wartości odkształceń i naprężeń, a metoda Neubera ich

zawyżanie. Ze względu na stwierdzone zawyżanie wartości odkształceń lokalnych przy ich obliczeniach metodą Neubera, można spotkać wiele propozycji jej modyfikacji. Najczęściej występujące w literaturze propozycje modyfikacji metody Neubera przedstawiono w pracach Toppera i Conle'a [43, 200], Fuchsa i Sharpa [65, 180] oraz Nie [141].

Metodę ESED weryfikowano w różnych warunkach obciążeń dla różnych obiektów badań, m.in. w pracy [3] zastosowano ją z dobrym skutkiem dla obciążeń skręcających. W pracach [184, 122] przedstawiono propozycję modyfikacji metody Neubera i ESED do obliczeń trwałości w zakresie proporcjonalnych i nieproporcjonalnych obciążeń wieloosiowych.

2.1.2. Odształcenia i naprężenia lokalne w metodach obliczeń trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych

Budowa i własności połączeń spawanych wprowadzają kilka problemów nieuwzględnianych zazwyczaj w metodach obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów jednolitych. Dotyczy to w szczególności pospawalniczych naprężeń własnych, niejednorodności materiału w strefie spoiny oraz postaci geometrycznej spoiny [165].

Nierównomierność rozkładu własności materiałowych jest skutkiem procesów zachodzących w trakcie wykonywania złącza spawanego i może wystąpić w szczególności w obszarach brzegu i grani spoiny oraz w strefie wpływu ciepła.

Naprężenia pospawalnicze wywołane odkształceniami cieplnymi i naprężeniami od przemian fazowych w strukturze materiału spoiny mogą dochodzić do wartości granicy plastyczności, szczególnie w przypadkach ich koncentracji w strefach karbów. Działanie naprężeń pospawalniczych może zmieniać wartość granicy zmęczenia zarówno obniżając ją (w wyniku działania naprężeń rozciągających), jak i zwiększając w wyniku przeprowadzonych obróbek pospawalniczych wprowadzających korzystne naprężenia ściskające.

Z kolei na geometrię złącza spawanego może wpływać wiele czynników powodujących znaczne rozrzuty jego wymiarów, głównie kąta nadlewu oraz promieni krzywizny w okolicy grani i brzegów spoiny. Wymiary karbu zależą będą między innymi od typu i parametrów procesu spawania, rodzaju spawanych materiałów, grubości łączonych elementów, a także sposobu pozycjonowania elementów złącza przed spawaniem.

Analiza literatury [142, 165, 189] wskazuje na praktyczne stosowanie kilku metod obliczeń zmęczeniowych połączeń spawanych. Jednak w przypadku nowych technologii spawania, takich jak spawanie tarciove (ang.: friction stir welding) lub laserowe, brak pełnego rozpoznania zmęczeniowego zachowania tego typu złączy powoduje, że powszechne są prace dotyczące zarówno analizy ich własności zmęczeniowych, oceny możliwości stosowania w ich przypadku konwencjonalnych metod obliczeniowych, jak i propozycji nowych metod oceny ich wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej [113].

A. Metoda „naprężeń nominalnych”

Metoda oparta na analizie naprężeń nominalnych polega na doborze wykresu zmęczeniowego S-N (tzw. „wykresy projektowe” w układzie: naprężenie nominalne - trwałość) dla złącza elementarnego odpowiadającego analizowanemu przypadkowi połączenia spawanego [57, 111, 164, 170]. Na rysunku 2.5 pokazano przykładowe wykresy projektowe dla wybranych złączy elementarnych. Wyznaczenie wartości naprężeń nominalnych umożliwia w dalszej kolejności określenie trwałości złącza na podstawie

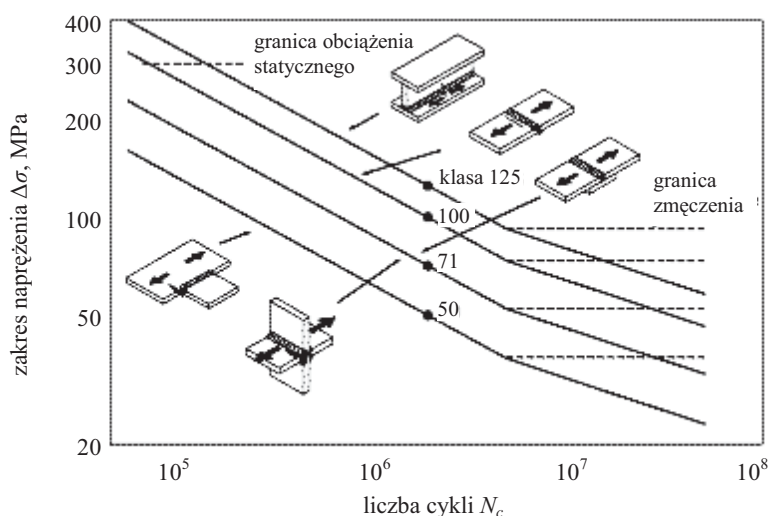
dobranego wykresu. Zastosowanie metody „naprężeń nominalnych” wymaga dobrego „dopasowania” analizowanego połączenia do istniejących węzłów elementarnych, a także skutecznej analizy naprężeń nominalnych. Metoda ta nie wymaga lokalnej analizy odkształceń i naprężeń.

B. Metody naprężeń i odkształceń konstrukcyjnych „hot-spot”

Wyznaczenie trwałości zmęczeniowej złącza spawanego metodą „hot-spot” wymaga znajomości naprężeń konstrukcyjnych (rys.2.6) odniesionych do wykresu trwałości zmęczeniowej S-N tj. tzw. „wykresów projektowych hot-spot” [82, 112] określających związek wartości naprężeń konstrukcyjnych i trwałości.

Istnieją co najmniej trzy definicje naprężeń/odkształceń konstrukcyjnych:

- naprężenia/odkształcenia wyznaczone w wyniku liniowej ekstrapolacji naprężeń/odkształceń wyznaczonych w odległości 0,4 t i 1,0 t od brzegu spoiny, gdzie t oznacza grubość elementu – metoda rekomendowana przez International Institute of Welding (IIW),
- naprężenia/odkształcenia wyznaczone w wyniku liniowej ekstrapolacji naprężeń/odkształceń wyznaczonych w odległości 0,5 t i 1,5 t od brzegu spoiny – metoda zalecana przez okrętowe towarzystwa klasyfikacyjne,
- naprężenia wyznaczone w odległości 0,5 t od brzegu spoiny.



Rys. 2.5. Przykładowe wykresy projektowe dla złączy elementarnych [111]

Wykresy projektowe [57, 170] opracowywane są przez różne instytucje np. American Petroleum Institute (API) [8], American Welding Society (AWS) [191], UK Department of Energy (DOE) [150], British Standard Code of Practice BS 7608 [41], Det Norske Veritas [45] i inne [64, 112, 167].

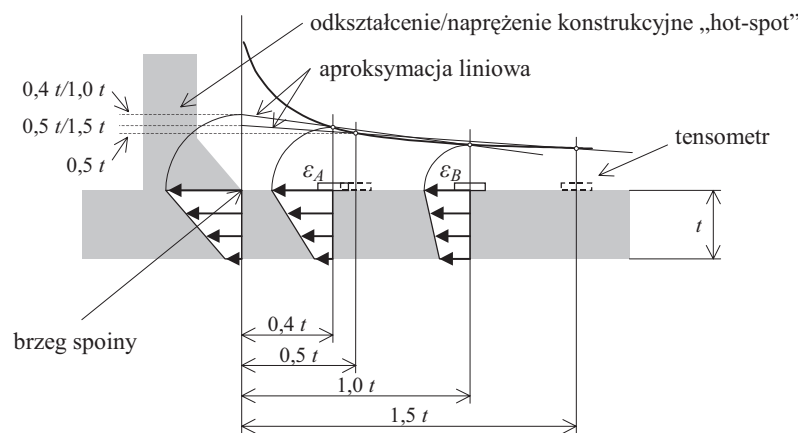
Wyznaczanie wartości odkształceń lub naprężeń konstrukcyjnych „hot-spot” odbywa się najczęściej jedną z trzech podstawowych metod:

- doświadczalnie poprzez pomiar na modelu lub prototypie [142, 230] (rys.2.6),
- metodą elementów skończonych [49, 51, 64],

- poprzez zastosowanie współczynnika spiętrzenia naprężeń strukturalnych K_s [64, 170].

Metoda „hot-spot” przeznaczona jest głównie dla przypadków, w których nie ma możliwości wyznaczenia naprężeń nominalnych dla spoiny. Istnieje szereg szczegółowych propozycji metod mieszczących się w zakresie ogólnej koncepcji opartej na analizie odkształceń i naprężeń typu „hot-spot”, a w tym między innymi:

- metoda odkształceń konstrukcyjnych (ang.: structural ‘hot-spot’ strain approach – Haibach) [73],
- metoda naprężeń strukturalnych (ang.: structural ‘hot-spot’ stress approach – Dijkstra and Gurney) [48, 71].

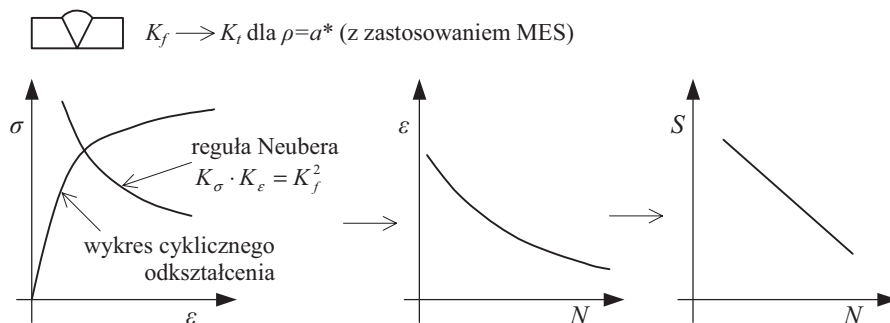


Rys. 2.6. Metoda wyznaczania odkształceń lub naprężeń konstrukcyjnych „hot-spot”

C. Metody odkształceń i naprężeń lokalnych

Podjęcie odkształceniowe

Jedne z pierwszych obliczeń trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych z zastosowaniem podejścia lokalnego opisano w pracach Lawrence (et al.) [100, 119]. Opisana metoda odkształceń lokalnych (ang.: notch strain approach) dla połączeń spawanych zbliżona jest do analogicznej metody stosowanej w przypadku elementów jednorodnych. Konieczność określenia wartości odkształceń lokalnych wymaga zastosowania rozwiązań uwzględniających złożoną postać geometryczną spoiny. Brak ścisłej informacji o kącie nadlewu oraz promieniu na brzegu, grani lub licu spoiny wymaga przyjęcia założonego wymiaru charakterystycznego, który umożliwi np. modelowanie złącza metodą elementów skończonych. W pracach Lawrence, jako wymiar promienia „karbu” ρ opisujący brzeg spoiny przyjęto zaproponowany przez Petersona parametr materiałowy a^* ($\rho \approx a^*$, dla stali $a^* = 0,5 \text{ mm}$). Wyznaczony metodą elementów skończonych teoretyczny współczynnik spiętrzenia naprężeń K_t oraz wyznaczany na jego podstawie współczynnik działania karbu K_f są następnie stosowane do wyznaczenia wykresu trwałości zmęczeniowej w układzie S-N (naprężenie nominalne-liczba cykli) z wykorzystaniem wykresów cyklicznego odkształcenia i reguły Neubera oraz odkształceniowego wykresu trwałości zmęczeniowej wyznaczonych dla materiału rodzimego (rys. 2.7).



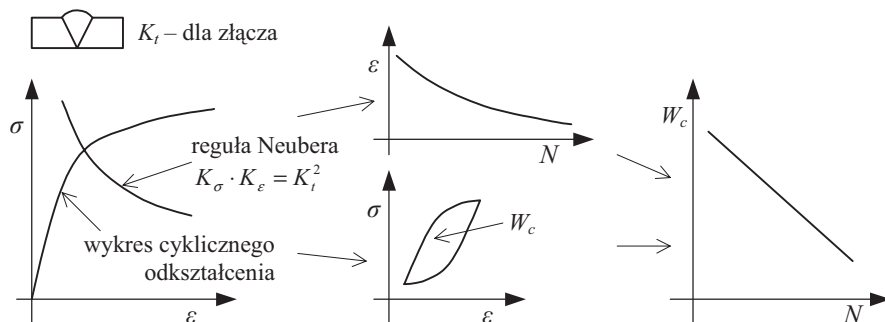
Rys. 2.7. Odształceniowa metoda wyznaczania trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych

W pracy Tricoteaux [202] przedstawiono podejście zbliżone do proponowanego powyżej, przy czym do analizy lokalnych odkształceń i naprężeń zastosowano model Glinki-Molskiego oraz własności materiałowe wyznaczone dla strefy wpływu ciepła. Wartość współczynnika K_t wyznaczono na podstawie empirycznej zależności zaczerpniętej z pracy [148].

Z kolei w pracy [201] przedstawiono związek pomiędzy lokalnymi a strukturalnymi naprężeniami obliczanymi dla brzegu spoiny, zaś w pracy [163] przykład zastosowania metody odkształceń lokalnych w obliczeniach wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej połączenia rurowego.

Podejście odkształceniowo-naprężeniowe

Inne rozwiązanie oparte na jednoczesnej analizie odkształceń i naprężeń lokalnych w karbie przedstawiono w pracy Heulera i Seegera [165]. Jako wielkość kryterialną w obliczeniach trwałości zmęczeniowej przyjęto wartość energii odkształcenia całkowitego W_c wyznaczaną z zastosowaniem zależności Neubera na podstawie wykresu cyklicznego odkształcenia dla materiału rodzimego oraz współczynnika K_t . Wyznaczona wartość W_c odnoszona jest do wykresu trwałości zmęczeniowej w ujęciu odkształceniowym. Przebieg postępowania pokazano na rysunku 2.8.



Rys. 2.8. Odształceniowo-naprężeniowa metoda wyznaczania trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych

D. Metody mechaniki pęknięcia

Bardzo liczną grupę metod obliczeń trwałości zmęczeniowej stanowią metody oparte na mechanice pęknięcia. Zakładają one, że ze względu na występowanie w spoinach wad technologicznych można prawie całkowicie pominąć okres inicjacji pęknięcia i tym samym przyjąć, że cała trwałość odpowiada okresowi rozwoju pęknięcia.

W propozycji Madoxa [110] i Hobbachera [77] trwałość obliczana jest na podstawie zależności:

$$N = \frac{C}{(K\Delta S)^m} \quad (2.13)$$

w której C oznacza stałą zależną od materiału i geometrii propagującego pęknięcia, m jest współczynnikiem kierunkowym liniowego odcinka krzywej prędkości pęknięcia (dla stali $m \approx 3$), a K współczynnikiem spiętrzenia naprężeń. Wartość K może odpowiadać wartości współczynnika K_t lub K_s , chociaż ten drugi przypadek nie znajduje fizycznego uzasadnienia.

Inne propozycje obliczeń trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych opartych na parametrach mechaniki pęknięcia przedstawiono w pracach Radaja [165] i Yuuki [228]. Zastosowano w nich, jako parametr kryterialny decydujący o wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej, zakres efektywnego współczynnika intensywności naprężeń ΔK_{eff} .

Pominięcie fazy inicjacji pęknięcia w metodach obliczeń połączeń spawanych budzi szereg zastrzeżeń. W pracy [165] Radaj zauważa, m.in. że nie można udowodnić, że w połączeniach o odpowiednio dobrej jakości występują wady technologiczne lub geometryczne oraz że dodatkowo rozwój pęknięcia następuje od pierwszego cyklu obciążenia. Ponadto niejednoznaczne jest określenie początkowego wymiaru mniej lub bardziej „fikcyjnego” pęknięcia stosowanego w obliczeniach, a w rzadkich przypadkach, w których można wykazać istnienie pęknięcia, zastosowanie do opisu jego wzrostu zakresu współczynnika intensywności naprężeń (ΔK) uznawane jest za niewłaściwe, ze wskazaniem na konieczność uwzględnienia metod obliczeń rozwoju krótkich pęknięć w obszarze plastycznie odkształconego karbu na bazie przyrostu całki J (ΔJ). Podobne uwagi zgłasza Schijve w pracy [172].

Analizę zakresu zastosowania linowej mechaniki pęknięcia LEFM (ΔK) w analizie połączeń spawanych z uwzględnieniem zjawiska krótkich pęknięć przedstawiono w pracy [207]. Stwierdza się w niej, m.in. zawyżanie trwałości przy zastosowaniu LEFM oraz wskazuje na potrzebę analizy zachowania połączenia spawanego w zakresie rozwoju krótkich pęknięć.

2.2. Rozkłady przemieszczeń i odkształceń w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego

Możliwość wyznaczania rozkładów przemieszczeń i odkształceń wokół pęknięcia zmęczeniowego stanowi niezbędne narzędzie w analizie szeregu zagadnień dotyczących jego propagacji. Pęknięcie występujące w elemencie konstrukcyjnym generuje silne zaburzenia w rozkładzie odkształceń, które mogą być charakteryzowane, m.in. za pomocą liniowo lub nieliniowo-sprężystych oraz sprężysto-plastycznych modeli stosowanych w mechanice pęknięcia do opisu pól mechanicznych wokół szczelin.

2.2.1. Podejście mechaniki pęknięcia

Do opisu skutków jakie niesie pęknięcie stosowane są różne wielkości w zależności od rodzaju materiału czy warunków obciążenia. W zakresie ważności założeń liniowej mechaniki pęknięcia ($S < 0,7 R_e$) zastosowanie znajdują równoważne sobie wielkości K (współczynnik intensywności naprężeń), COD δ (rozwarcie pęknięcia) i J (całka J). W przypadku naprężeń odpowiadających granicy plastyczności są to COD (δ) i J , a po jej przekroczeniu J . Krótkie omówienie wymienionych wielkości przedstawione zostanie w następnych punktach pracy. Opisywane w literaturze badania weryfikacyjne, często wskazują jednak na brak zgodności znanych modeli i teoretycznych opisów pola odkształceń i naprężeń na czole pęknięcia z wynikami badań eksperymentalnych, co tłumaczy się między innymi bardzo dużym wpływem naprężeń własnych wywołanych zmęczeniowym obciążeniem próbki [175].

Współczesne metody analizy rozwoju pęknięcia zmęczeniowego dotyczą przede wszystkim podstawowego zagadnienia, jakim jest ocena prędkości rozwoju pęknięcia zmęczeniowego w różnorodnych obiektach w zadanych warunkach obciążenia. Prędkość rozwoju pęknięcia opisywana jest najczęściej zależnością o ogólnej postaci:

$$\frac{da}{dN} = C(X) \quad (2.14)$$

gdzie:

- da – przyrost długości pęknięcia,
- dN – przyrost liczby cykli,
- C – stała materiałowa,
- X – jedna z podanych niżej wielkości:
 - zakres współczynnika intensywności naprężeń – $\Delta K = K_{max} - K_{min}$,
 - amplitudowy współczynnik intensywności naprężeń – K_a ,
 - funkcja średniego, największego i najmniejszego współczynnika intensywności naprężeń – $f(K_m, K_{max}, K_{min})$,
 - zakres całki J – ΔJ ,
 - zakres rozwarcia pęknięcia - COD $\Delta\delta$.

Dominujące znaczenie można przypisać jednak zależności Parisa [153]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.15)$$

gdzie:

- C, m – współczynniki materiałowe wyznaczone doświadczalnie, z jej licznymi modyfikacjami.

Najczęściej stosowane przypadki zależności opisujących prędkość wzrostu pęknięcia opartych na przedstawionej wyżej ogólnej postaci (2.14) podano, m.in. w pracach [86, 87, 135, 140, 172]. Obejmują one obok wzoru Parisa także m.in. zależności Parisa-Erdogana, Formana, Tomkinsa, Elbera, Walkera, Dowlinga-Begleya, Ogura, Millera-Galaghera i inne. Krytyczną analizę modeli stosowanych w ocenie trwałości zmęczeniowej w okresie rozwoju pęknięcia (i nie tylko) przeprowadzono w pracy [206], zwracając m.in. uwagę na konieczność uwzględnienia w obliczeniach efektu „gradientu naprężeń wewnętrznych” powodujących zakłócenia typowego, stabilnego przebiegu krzywych wzrostu pęknięcia. Jako przyczyny występowania tych zakłóceń wskazano,

m.in. krótkie pęknięcia, efekty spowolnienia pęknięcia wywołane przeciążeniem i odwrotnie – przyspieszenia spowodowane niedociążeniami. Przyczyną zmian wartości K_{max} może być także występowanie spiętrzeń naprężeń wywołanych np. karbami lub różnymi typami obciążeń. W pracy [206] proponuje się ich uwzględnienie poprzez wprowadzenie współczynnika K_{max}^{int} , który obejmowałby „udział” naprężeń wewnętrznych w wartości K_{max} . Do opisu rozwoju pęknięcia proponuje się natomiast ogólną zależność:

$$\frac{da}{dN} = f\{K_{max}, \Delta K, K_{max}^{int}\} \quad (2.16)$$

A. Współczynnik intensywności naprężeń K

Klasyczny współczynnik intensywności naprężeń K jest wielkością, którą można przedstawić jako funkcję obciążenia zewnętrznego Q , długości pęknięcia a i wymiarów elementu z pęknięciem

$$K = f(Q, a, \text{wymiar}). \quad (2.17)$$

Znajomość wartości współczynnika K niesie informację o rozkładzie naprężeń lub odkształceń w otoczeniu pęknięcia w zadanych warunkach obciążenia. Wartość K może być wyznaczona wieloma metodami [125, 135, 177], przy czym najczęściej stosowane są w tym celu rozwiązania zagadnień brzegowych metodami analitycznymi i numerycznymi dla pól naprężeń, odkształceń i przemieszczeń przed wierzchołkiem szczeliny (pęknięcia). W praktycznych zastosowaniach często korzysta się z wyznaczonych na ich podstawie uproszczonych zależności dla typowych postaci i geometrii pęknięcia [159, 226]. Rozwiązania analityczne (uzyskane np. metodą Muskheliszwili-Westergaarda z zastosowaniem funkcji naprężeń Airy’ego) ze względu na liczne ograniczenia i założenia dają ściśle wyniki tylko dla wybranych często bardzo prostych geometrii elementów znajdujących się w ustalonych warunkach obciążenia. W przypadku metod numerycznych, np. dzięki zastosowaniu specjalnych typów elementów skończonych, możliwa jest analiza tych zagadnień w otoczeniu pęknięć (szczelin) występujących w dowolnych konfiguracjach geometrycznych elementów. W literaturze można spotkać szereg szczegółowych rozwiązań dla różnych geometrii próbek, uzyskanych różnymi metodami (np. analityczną metodą odwzorowań konforemnych [227], numeryczną metodą sił masowych [156], metodą elementów skończonych [63, 70, 104, 109, 146, 169, 178, 218, 221, 222], metodą elementów brzegowych [37, 102, 109], metodą funkcji wagowych [59, 62, 76, 101, 125, 210, 213, 214, 232, 233, 234], metodami mieszanymi [9, 12, 58, 60, 61, 108]). Należy zauważyć, że coraz szersze zastosowanie w analizie rozkładów odkształceń w otoczeniu pęknięcia znajdują metody hybrydowe. Obszerny przegląd metod hybrydowych z uwzględnieniem możliwości ich zastosowania w analizie zagadnień związanych z mechaniką pęknięcia przedstawiono w pracy [144].

Opierając się na wynikach analizy Irwina dla nieskończonej płyty ze środkową szczeliną, można opisać rozkład naprężeń i przemieszczeń w otoczeniu szczeliny za pomocą układu równań przedstawionych w biegunowym układzie współrzędnych (r, φ) [87]. Uwzględniając znaną z klasycznej hipotezy szczelin Griffitha zależność:

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} \quad (2.18)$$

można wyznaczyć związek K z rozkładem przemieszczeń w otoczeniu pęknięcia (szczeliny):

$$u = \frac{K_I}{2G_{sp}} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\varphi}{2} \left[\kappa - 1 + \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right] \quad (2.19)$$

$$v = \frac{K_I}{2G_{sp}} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\varphi}{2} \left[\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\varphi}{2} \right] \quad (2.20)$$

$$w = 0 \quad (2.21)$$

$$\text{dla } p-s-n \quad \kappa = \frac{3-\nu}{1+\nu} \quad (2.22)$$

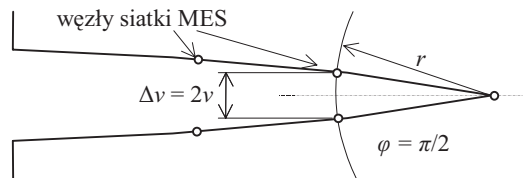
$$\text{dla } p-s-o \quad \kappa = 3-4\nu \quad (2.23)$$

Przedstawione zależności opisujące modelowe rozkłady przemieszczeń w otoczeniu pęknięcia znajdują zastosowanie, m.in. w komercyjnym oprogramowaniu opartym na metodzie elementów skończonych do prostych obliczeń wartości współczynnika intensywności naprężeń. Obliczenia realizowane są na podstawie wyznaczonych przemieszczeń krawędzi pęknięcia (rozwarcia pęknięcia) zgodnie z zależnością (2.24):

$$K = \sqrt{2\pi} \frac{G}{1+\kappa} \cdot \frac{|\Delta v|}{\sqrt{r}}, \text{ dla } \varphi = \pi/2 \quad (2.24)$$

będącą efektem przekształcenia zależności (2.20).

Jak już wcześniej wspomniano, przedstawiony sposób wyznaczania wartości K może być zastosowany w przypadku niewielkiego rozmiaru strefy odkształconej plastycznie przed czołem pęknięcia (zgodnie z [87] wartość naprężenia nominalnego nie powinna przekraczać 70% wartości granicy plastyczności $S < 0,7 R_e$, a nawet $S < 0,33 R_e$ [154]). W pozostałych przypadkach konieczne staje się zastosowanie do opisu pól naprężeń i odkształceń nieliniowej mechaniki pęknięcia.



Rys. 2.9. Schemat wyznaczenia wartości współczynnika intensywności naprężeń metodą elementów skończonych

Analiza literatury wskazuje na istnienie opracowań, w których uwzględniano wpływ strefy odkształceń plastycznych w obliczeniach współczynnika intensywności

naprężeń. W pracy [140] przedstawiono, m.in. propozycję Irwina polegającą na uwzględnieniu strefy plastycznej poprzez dodanie jej długości do długości pęknięcia i wyznaczenie współczynnika intensywności naprężeń dla tak skorygowanego wymiaru pęknięcia. Autor pracy [140] omówił także propozycję ekwiwalentnego plastycznego współczynnika intensywności naprężeń K_J obliczanego na podstawie całki J oraz propozycję skorygowanego plastycznego współczynnika intensywności naprężeń K_p wyznaczanego na podstawie współczynników korekcyjnych obliczanych dla efektywnej długości pęknięcia. Inne propozycje uwzględnienia strefy plastycznej polegają m.in. na próbach powiązania wartości klasycznego współczynnika intensywności naprężeń K z plastycznym współczynnikiem intensywności naprężeń K_{opl} i odkształceń K_{opl} [87] za pomocą sprężysto-plastycznych modeli materiałowych. Z kolei w pracy [205] zależność pomiędzy wartością plastycznego K_{pl} a sprężystego (klasycznego) współczynnika intensywności naprężeń K wyznaczono na podstawie badań numerycznych.

B. Całka J

Do opisu intensywności pól mechanicznych w otoczeniu pęknięcia (szczeliny) w przypadku materiałów nieliniowo sprężystych i plastycznych stosowana jest całka J . Dotyczy to szczególnie przypadków, w których naprężenia nominalne przekraczają granicę plastyczności. Podobnie jak w przypadku współczynnika intensywności naprężeń K , wyznaczenie wartości całki J wymaga znajomości rozkładu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w otoczeniu pęknięcia. Całka J opisana jest ogólną zależnością:

$$J = \int_C \left(W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \quad (2.25)$$

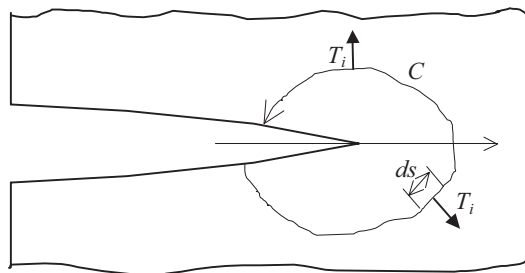
w której gęstość energii odkształcenia W :

$$W = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (2.26)$$

oraz T – wektor sił powierzchniowych na konturze całkowania C ,

u – wektor przemieszczenia,

ds – odcinek łuku konturu.



Rys. 2.10. Schemat wyznaczenia całki J

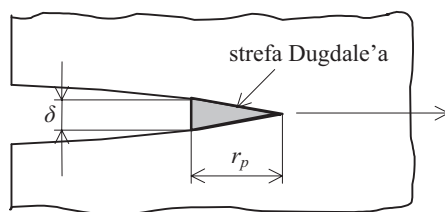
Brak obszernej informacji o wartościach całki J dla poszczególnych przypadków obciążeń i geometrii próbek oraz znaczne trudności związane z jej analitycznym wyznaczeniem powodują, że całka J najczęściej analizowana jest metodami numerycznymi [109, 135, 151, 212].

Do wyznaczenia całki J stosowane są także metody hybrydowe, czego przykładem może być praca [85]. Przedstawiono w niej doświadczalno-numeryczną metodę analizy naprężeń, którą wykorzystano do wyznaczenia wartości całki J dla różnych położeń konturów całkowania.

Analiza literatury wykazuje jednak znacznie mniejsze zastosowanie całki J w analizie rozwoju pęknięcia zmęczeniowego, co częściowo wynika także z założeń stosowanych przy jej wyznaczeniu.

C. Wierzchołkowe rozwarście pęknięcia δ

Szerokie zastosowanie w analizie pęknięcia zmęczeniowego i strefy plastycznej na jego czole znajduje wielkość nazywana rozwarciem pęknięcia δ (COD). Do opisu strefy plastycznej wykorzystuje się model Dugdale'a [52] z jego licznymi modyfikacjami [135] (rys.2.11).



Rys. 2.11. Schemat wyznaczenia rozwarcia wierzchołkowego δ

Do wyznaczenia wartości rozwarcia wierzchołkowego δ niezbędna jest znajomość rozmiaru strefy plastycznej r_p na czole pęknięcia oraz przemieszczeń krawędzi pęknięcia w jej granicach. W tym celu wykorzystuje się jeden z szeregu modeli opisujących kształt i wymiary strefy plastycznej, który w powiązaniu z analitycznym opisem stanu przemieszczeń w otoczeniu pęknięcia, pozwala na wyznaczenie wartości rozwarcia wierzchołkowego δ [135]. Wartość δ wyznaczona może być również metodami numerycznymi z wykorzystaniem nieliniowych modeli materiałowych.

2.2.2. Strefa odkształcenia plastycznego

Kształt, a głównie rozmiar strefy odkształcenia plastycznego stanowią jedną z podstawowych informacji niezbędnych do prawidłowej analizy zagadnień pęknięcia materiałów i konstrukcji z wykorzystaniem rozwiązań mechaniki pęknięcia. Istnieje szereg teoretycznych modeli opisujących postać strefy odkształceń plastycznych na czole pęknięcia znanych z opisów stosowanych w zagadnieniach mechaniki pęknięcia dla wierzchołka szczeliny [135]. Modele Irwina [78], Dugdale'a [52] dla pęknięcia kruchego pozwalają określić kształt i wymiary strefy plastycznej na podstawie liniowej lub nieliniowej teorii sprężystości opierając się na hipotezach wyężeniowych Tresci lub Hubera-Misesa-Hencky'ego (rys.2.12) i znanych własnościach plastycznych materiału R_e . Analizie teoretycznych prac opisujących strefę plastyczną wokół pęknięcia poświęcono m.in. pracę [209].

Dostępne w literaturze analityczne zależności na rozmiar strefy odkształceń plastycznych, opisywane najczęściej jako promień strefy plastycznej r_p , oparte są głównie na wartości współczynnika intensywności naprężeń K . Dotyczy to zarówno modelu Irwina:

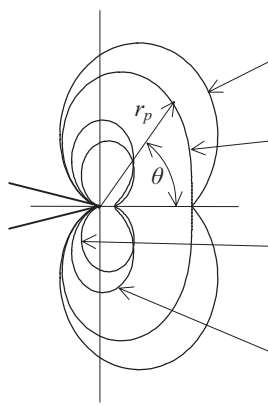
$$r_p = \frac{K^2}{2\pi R_e^2}, \text{ dla płaskiego stanu naprężenia} \quad (2.27)$$

$$r_p = \frac{K^2}{2\pi R_e^2} (1 - 2\nu)^2, \text{ dla płaskiego stanu odkształcenia} \quad (2.28)$$

jak i Dugdale'a:

$$r_p = \frac{\pi K^2}{8R_e^2}. \quad (2.29)$$

Stosowane są także inne propozycje opisu rozmiaru strefy odkształcenia plastycznego i inne sposoby jej wyznaczania. Przykładowo w pracy [227] wyznaczano jej rozmiar analityczną metodą odwzorowań konforemnych. Z kolei w opracowaniu [220] przedstawiono empiryczne zależności wyznaczone na bazie analizy naprężeń sprężystych, a w pracach [74, 81, 88, 220, 229] zastosowano do jej opisu metodę elementów skończonych. Metoda elementów skończonych stosowana jest do wyznaczania rozmiaru i kształtu strefy plastycznej zarówno w warunkach obciążeń monotonicznych, jak i zmiennych [139], przy czym w drugim przypadku zastosowane procedury muszą uwzględniać efekt odciążenia w strefie pęknięcia.



hipoteza Tresci – płaski stan naprężenia

$$r_p(\theta) = \frac{K_I^2}{2\pi R_e^2} \left(\cos \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\theta}{2} \right)^2 \quad (2.30)$$

hipoteza Hubera-Misesa-Hencky'ego – płaski stan naprężenia

$$r_p(\theta) = \frac{K_I^2}{4\pi R_e^2} \left(\frac{3}{2} \sin^2 \theta + (1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \theta) \right) \quad (2.31)$$

hipoteza Tresci – płaski stan odkształcenia

$$r_p(\theta) = \frac{K_I^2}{2\pi R_e^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu + \sin \frac{\theta}{2} \right)^2 \quad (2.32)$$

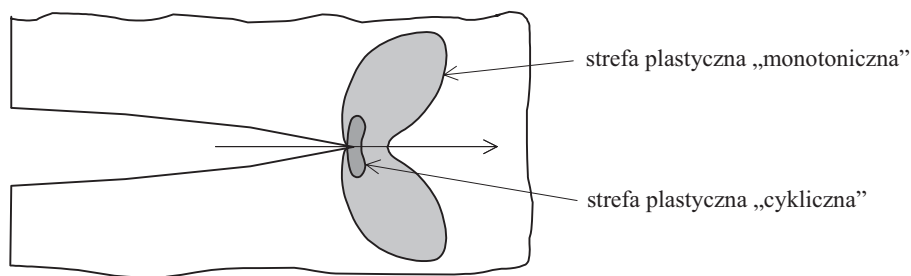
hipoteza Hubera-Misesa-Hencky'ego – płaski stan odkształcenia

$$r_p(\theta) = \frac{K_I^2}{4\pi R_e^2} \left(1 + \frac{3}{2} \sin^2 \theta + \cos \theta \right) \quad (2.33)$$

Rys. 2.12. Strefy odkształceń plastycznych według modelu Irwina i hipotez Tresci i Hubera-Misesa-Hencky'ego dla pierwszego przypadku obciążenia pęknięcia. Oznaczenia: r_p – promień strefy plastycznej, θ – kąt, K_I – współczynnik intensywności naprężeń dla pierwszego sposobu obciążenia (normalne rozwarcie pęknięcia), R_e – granica plastyczności, ν – liczba Poissona.

Towarzyszące obciążeniom zmęczeniowym odciążanie elementu z pęknięciem powoduje, że powstała na czole pęknięcia monotoniczna strefa plastyczna podlega ścisłaniu na skutek „cofania się” odkształceń sprężystych w otaczającym ją obszarze. W wyniku tego, część strefy na czole pęknięcia podlega odkształceniom plastycznym

odwracalnym. Zgodnie z opisem Rice'a rozmiar tej strefy (r_{pc}), nazywanej cykliczną strefą plastyczną (ang.: cyclic plastic zone), jest około 4-krotnie mniejszy od strefy monotonicznej r_p (rys.2.13). W literaturze spotyka się również wartości stosunku r_{pc}/r_p w zakresie 0,13-0,25 [229]. Istnieją także prace [135], w których wskazuje się na trudności w jednoznacznym zdefiniowaniu pojęcia cyklicznej strefy plastycznej i co za tym idzie, w określeniu właściwej metody prowadzenia jej pomiarów.



Rys. 2.13. Poglądowe przedstawienie cyklicznej i monotonicznej strefy plastycznej

Do opisu cyklicznej strefy plastycznej stosowane są różne zależności analityczne, z których kilka przedstawiono w tabelicy 1 oraz metoda elementów skończonych (podobnie jak w przypadku strefy monotonicznej).

Tablica 1. Opis rozmiaru cyklicznej strefy plastycznej

| Lp. | Model | Rozmiar cyklicznej strefy plastycznej |
|-----|-------------------------|---|
| 1 | Rice [168] | $r_{pc} = C \left(\frac{\sigma_{AK}}{2 R_e} \right)^2$, C – współczynnik (2.34) |
| 2 | Brown-Rios-Miller [154] | $r_{pc} = a \left(\sec \left(\frac{\sigma_{AK}}{2 R_e} \right) - 1 \right)$, dla p-s-o (2.35) |
| 3 | Nichols-Martin [154] | $r_{pc} = a \left(\frac{S^2}{R_e^2 - S^2} \right)$, dla p-s-n (2.36) |
| 4 | Lu-Chow [154] | $r_{pc} = \frac{\pi}{18} \left(\frac{\sigma_{AK}}{2 R_e} \right)^2 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{S}{R_e} \right)$, dla p-s-o (2.37) |
| | | $r_{pc} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{\sigma_{AK}}{2 R_e} \right)^2 \left(\frac{1}{2} \frac{S}{R_e} + \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{\sigma_{AK}}{2 R_e} \right)^2} \right)$, dla p-s-n (2.38) |

Analizie porównawczej różnych modeli opisujących rozmiar monotonicznej i cyklicznej strefy plastycznej poświęcono, m.in. pracę [98]. Porównano w niej modele strefy plastycznej zaproponowane przez Rice, Hutchinsona, Liu, Parisa i Tomkina. Z kolei w pracy [75] badano wpływ stosowanych w metodach obliczeniowych kryte-

riów plastyczności, współczynnika Poissona oraz wyznaczonych wartości współczynników proporcji obciążenia (stosunek naprężenia i granicy plastyczności) i proporcji kształtu (stosunek „wysokości” do „szerokości” strefy plastycznej) na postać strefy plastycznej, a w opracowaniu [152] przedstawiono propozycję modelowania niejednorodności rozkładu odkształceń w jej wnętrzu w warunkach płaskiego stanu naprężeń i odkształceń.

Efektom odciążenia obszaru wokół pęknięcia oraz występowania monotonicznej strefy plastycznej z naprężeniami ściskającymi jest, zgodnie z modelem Elbera [55], zamykanie się pęknięcia (ang.: plasticity induced crack closure) przed całkowitym odciążeniem elementu. W pracy [140] zebrano około 20 propozycji opisu procesu zamykania pęknięcia bazujących na zmodyfikowanym modelu Dugdale’a lub modelu pasmowego płynięcia. W analizie stref plastycznych wywołujących zamykanie pęknięcia najczęstsze zastosowanie znajduje metoda elementów skończonych. Przykładowo w pracy [188] dokonano analizy aktualnych i przewidywanych możliwości zastosowania metody elementów skończonych w badaniach zamykania pęknięcia wywołanego plastycznością na podstawie analizy wyników badań około 90 prac z tego zakresu.

Odrębną grupę metod analizy strefy plastycznej stanowią metody doświadczalne. Doświadczalna analiza rozmiaru strefy plastycznej z wykorzystaniem bardzo zróżnicowanych technik pomiarowych omawiana była w wielu pracach. Obszerny przegląd metod pomiaru rozmiaru strefy plastycznej przeprowadzono m.in. w opracowaniach [75, 204]. Tylko niektóre z metod stosowanych do wyznaczania strefy plastycznej polegają na pomiarze przemieszczeń i odkształceń lokalnych w otoczeniu pęknięcia. W wielu innych przypadkach pomiar strefy plastycznej oparty jest na wykrywaniu obszarów odkształconych plastycznie w wyniku analizy zmian własności i budowy (struktury) materiału wywołanych jego plastyczną deformacją. Do najczęściej stosowanych metod należą: pomiar mikrotwardości, metoda trawienia, metoda interferencji optycznej, metoda rekrytalizacyjna, metoda mikrowiązek promieniowania rentgenowskiego, metoda SACP (ang.: selected area channeling pattern), metoda linii poślizgów, metody odbiciowe (metody cienia, metoda caustic), metoda replik, mikroskopia fotoelektronowa, metoda obserwacji deformacji ziaren, mikroskopia elektronowa.

Podobnie jak w przypadku pozostałych omawianych wielkości, w analizie strefy plastycznej zastosowanie znalazły metody hybrydowe, głównie metody doświadczalno-numeryczne. Przykładem może być praca [144], w której omówiono między innymi wyniki badań stanu odkształceń i naprężeń na czole pęknięcia w próbkach CT wykonanych ze stali A533B stosowanej do budowy nuklearnych zbiorników ciśnieniowych.

2.3. Lokalne własności materiałowe w elementach konstrukcyjnych

Niejednorodności materiałowe występujące w elementach konstrukcyjnych mogą być w wielu przypadkach główną przyczyną zróżnicowania ich lokalnych własności zmęczeniowych. Dotyczy to przede wszystkim jednolitych materiałów o silnej anizotropii własności mechanicznych, ale także materiałów niejednorodnych np. kompozytów powstałych z połączenia metali, materiałów ceramicznych i tworzyw sztucznych. Odrębną grupę stanowią elementy konstrukcyjne, w których niejednorodność własności mechanicznych wynika z zastosowanych technik wytwarzania oraz dodatkowych obróbek plastycznych, cieplnych, ciepło-chemicznych lub chemicznych. Znane i opisane w literaturze zabiegi wpływające na własności zmęczeniowe elementów konstrukcyj-

nych obejmują, m.in. umacnianie laserowe, krążkowanie, kulkowanie, nawęglanie z hartowaniem, azotowanie, cyjanowanie, anodowanie, niklowanie, chromowanie i inne.

Bardzo rozległy obszar zagadnienia nie pozwala na szczegółową prezentację wszystkich aspektów analizy rozkładów odkształceń i naprężeń w badaniach lokalnych własności materiałowych w elementach konstrukcyjnych. Z tego względu analiza ograniczona zostanie do jednego problemu związanego z niejednorodnością własności zmęczeniowych w złączach spawanych.

Istotny rozwój nowoczesnych technik spawania sprawia, że szczególnie ważne stają się zagadnienia związane z rozkładem lokalnych własności zmęczeniowych w laserowych połączeniach spawanych. Jest to tym bardziej interesujące, że złącza spawane laserowo nie poddają się bezpośrednio opisom stosowanym dla tradycyjnych złączy łukowych (spawanych łukiem elektrycznym). Coraz szersze zastosowanie technik laserowych w łączeniu stali konstrukcyjnej [39, 112, 166] powoduje, że niezwykle ważnym staje się poznanie zmęczeniowych własności laserowych złączy spawanych.

Własności zmęczeniowe spoin laserowych mogą znacznie odbiegać od własności spoin wykonywanych konwencjonalnymi technikami w tym spawaniem łukowym. Aktualnie brak jest jednoznacznych opinii o możliwości wykorzystania istniejących metod obliczeń wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych w przypadku połączeń wykonanych techniką laserową.

Wyznaczenie własności materiału w strefie złącza jest bardzo utrudnione ze względu na mały wymiar strefy przetopu [39]. W pracy [39] wyznaczono własności statyczne materiału w strefie spoiny dla trzech typów złączy: stal 37-stal 37 (stal ferrytyczna), stal austenityczna-stal austenityczna, stal ferrytyczna-stal austenityczna. Badania przeprowadzono na mikropróbkach pobieranych z poszczególnych stref spoiny (rys.2.14) z zastosowaniem metody elektroerozyjnej.

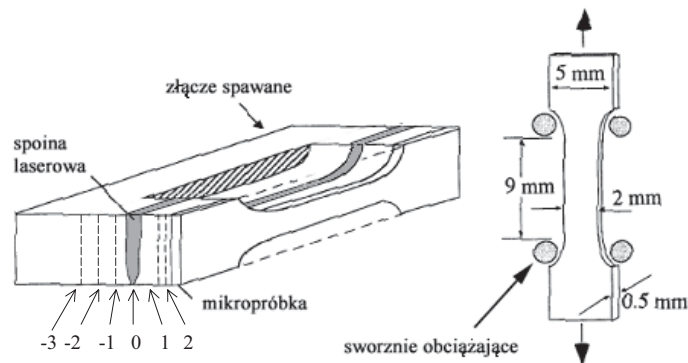
Na rysunku 2.15 pokazano rozkłady wydłużenia, granicy plastyczności i wytrzymałości doraźnej wyznaczone dla poszczególnych stref złącza. W przypadku stali ferrytycznej przeprowadzone badania wykazały trzykrotnie większą wytrzymałość materiału spoiny od materiału rodzimego i zauważalnie mniejsze wydłużenie. Natomiast dla stali austenitycznej różnice własności są nieznaczne. Takie zróżnicowanie własności zgodne jest z wynikami pomiaru mikrotwardości pokazanymi na rysunku 2.16.

Odmienne podejście do wyznaczania własności materiałowych spoiny laserowej przedstawiono w pracy [1]. W badaniach zastosowano próbki ze spoiną wykonaną równolegle do osi obciążenia (rys.2.17) a do wyodrębnienia własności spoiny wykorzystano „zasadę mieszaniny”. Polega ona na założeniu - w trakcie próby rozciągania - jednakowej wartości odkształcenia w materiale rodzimym i spoinie. Zakładając, że poszczególne fragmenty próbki przenoszą proporcjonalną część całkowitej siły P przyłożonej do próbki można zapisać, że:

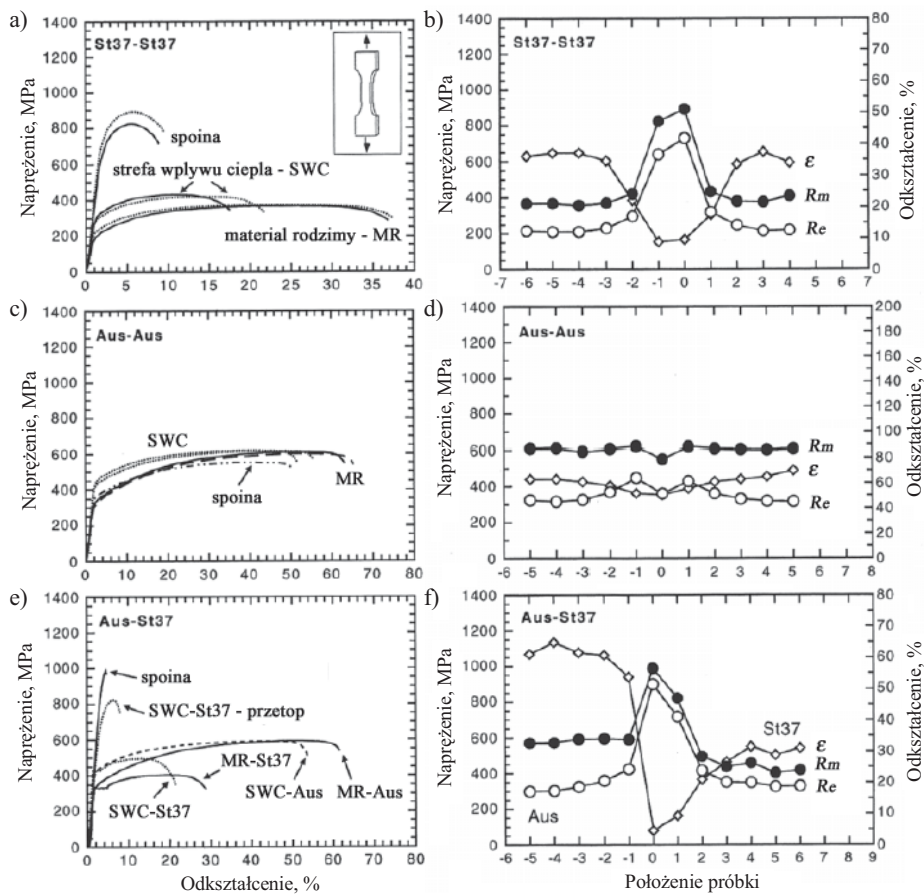
$$P = \sigma_1 A_1 + \sigma_2 A_2 + \sigma_w A_w \quad (2.39)$$

gdzie:

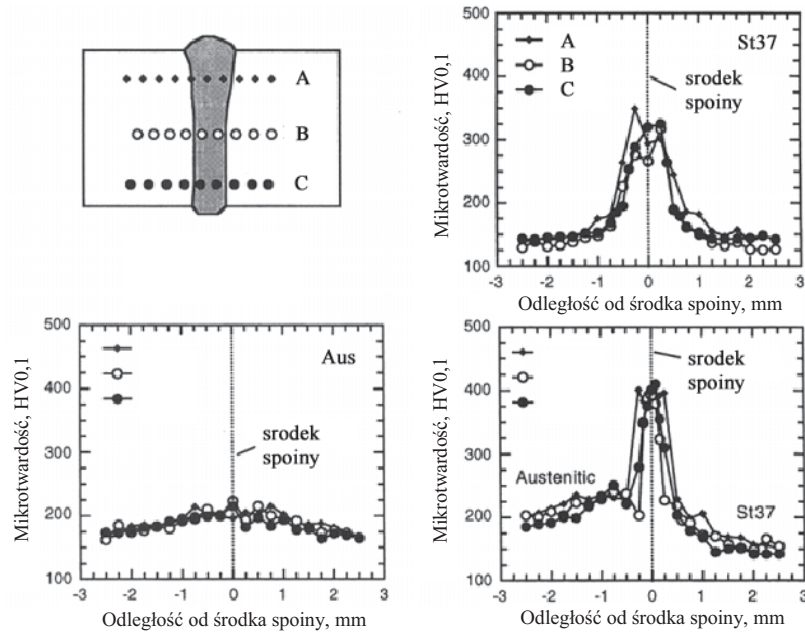
- A_1, A_2 – pole przekroju części próbki wykonanej z materiału rodzimego,
- A_w – pole przekroju spoiny,
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_w$ – odpowiednio naprężenia w materiale rodzimym i spoinie.



Rys. 2.14. Mikropróbki do badania własności mechanicznych spoiny laserowej (za zgodą C. Erima [39])



Rys. 2.15. Wykresy rozciągania (a,c,e) oraz rozkłady odkształcenia ϵ , granicy plastyczności R_e i wytrzymałości doraźnej R_m wyznaczone dla poszczególnych stref laserowych złączy spawanych: SWC – strefa wpływu ciepła, MR – materiał rodzimy (za zgodą C. Erima [39])



Rys. 2.16. Rozkład mikrotwardości w złączu spawanym (za zgodą C. Erima [39])



Rys. 2.17. Próbką do badań własności materiałowych spoiny laserowej [1]

Przyjmując opis materiału rodzimego (po obydwu stronach spoiny):

$$\sigma_1 = K_1 \varepsilon_1^{n_1} \quad (2.40)$$

$$\sigma_2 = K_2 \varepsilon_2^{n_2} \quad (2.41)$$

gdzie: K_1, K_2 – współczynniki wytrzymałości,
 n_1, n_2 – wsp. umocnienia,

oraz warunek jednakowej wartości odkształceń w próbce:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_w \quad (2.42)$$

otrzymano zależność naprężenia od odkształcenia dla materiału spoiny:

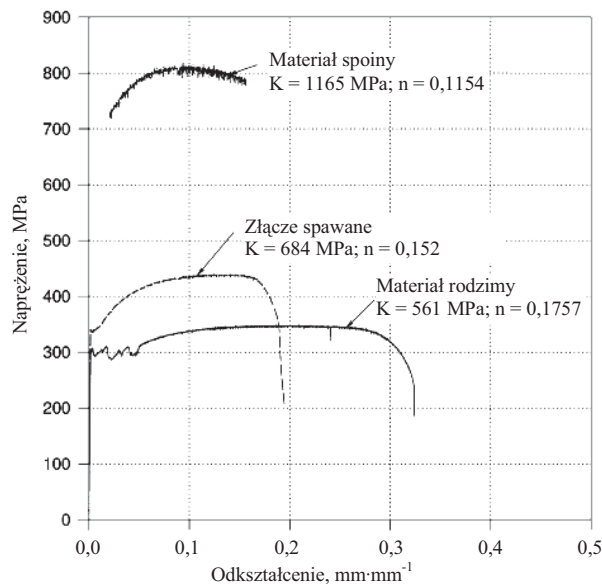
$$\sigma_w = \frac{P - (K_1 \varepsilon_w^{n_1}) A_1 - (K_2 \varepsilon_w^{n_2}) A_2}{A_w} \quad (2.43)$$

Zakładając jednakowe własności materiału rodzimego po obydwu stronach spoiny można zapisać, że:

$$\sigma_w = \frac{P - (K\varepsilon_w^n)(A_s - A_w)}{A_w} \quad (2.44)$$

gdzie: A_s – oznacza pole przekroju całej próbki.

Łatwo zatem zauważyć że, wyznaczona zależność bardzo silnie zależy od przyjętego pola przekroju poszczególnych stref próbki. Na rysunku 2.18 pokazano własności materiału w strefie spoiny wyznaczone z zastosowaniem powyższej metody badań dla próbki wykonanej z AISI 1005 o minimalnej wartości granicy plastyczności $R_e = 180$ MPa [1].



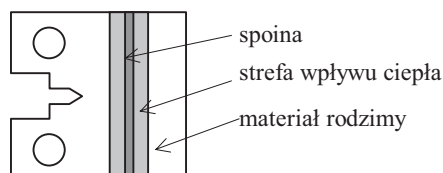
Rys. 2.18. Własności materiału spoiny wyznaczone metodą „mieszanki” [1]

Porównanie przebiegów wykresów rozciągania dla materiału rodzimego i materiału spoiny wykazuje bardzo istotne różnice własności zarówno jakościowe, jak i ilościowe. W przypadku materiału spoiny brak jest wyraźnej granicy plastyczności, a jego wytrzymałość na rozciąganie jest ponad dwa razy większa od wytrzymałości materiału rodzimego.

Badania statycznych własności materiału w poszczególnych strefach złącza spawanego oraz badania zmęczeniowe całych złączy przedstawiono także, m.in. w pracach [186, 187]. Podobnie jak w przypadku innych badań prowadzonych dla stali ferrytycznych, otrzymane wyniki pozwoliły stwierdzić wyższą wytrzymałość statyczną materiału spoiny i strefy wpływu ciepła, niż materiału rodzimego. Również wyniki badań zmęczeniowych złącza dały satysfakcjonujące rezultaty w odniesieniu do przepisów towarzystw klasyfikacyjnych [133, 161].

Przeprowadzone prace objęły także badania złączy pod kątem wielkości mechaniki pękania. Próby udarności metodą Charpy’ego oraz pomiar krytycznej wartości rozwar-

cia pęknięcia CTOD na próbce typu CT dały zadawalające wyniki, podobnie jak i badania prędkości wzrostu pęknięcia FCG wykonane na próbce ze spoiną poprzeczną (rys.2.19). Wykazały one spadek prędkości pęknięcia w trakcie „przechodzenia” pęknięcia przez materiał spoiny.

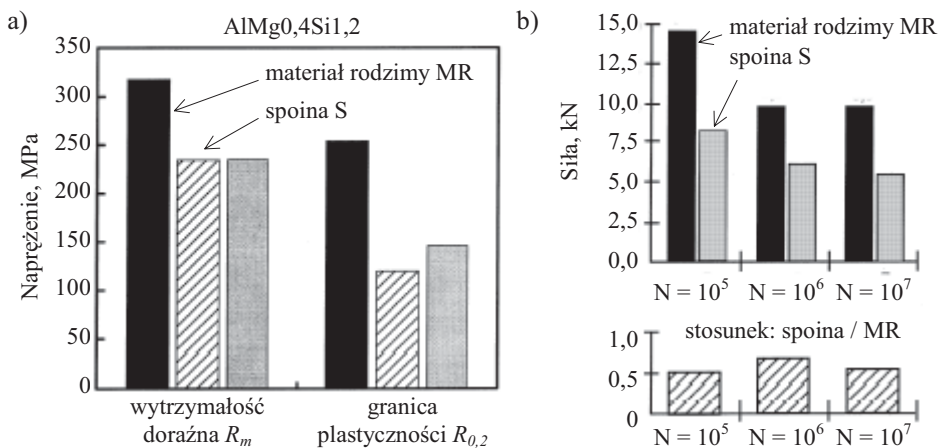


Rys. 2.19. Próбка ze spoiną laserową do badań prędkości rozwoju pęknięcia zmęczeniowego FCG

Z kolei autorzy pracy [10] przedstawili wyniki badań własności mechanicznych materiału rodzimego i spoiny złączy laserowych zastosowanych do łączenia różnych stopów aluminium. Wykazały one wyraźnie niższą wytrzymałość i trwałość materiału spoiny od materiału rodzimego. W przypadku wytrzymałości doraźnej różnice wyniosły około 30% (rys.2.20a), zaś przy takiej samej trwałości materiał spoiny mógł być obciążony zaledwie do wartości amplitudy obciążenia stosowanego dla materiału rodzimego (rys.2.20b).

Aktualność tematyki dotyczącej badań własności połączeń spawanych wykonywanych z zastosowaniem techniki laserowej potwierdzają liczne europejskie programy finansowane w ramach UE. Szeroki zakres badań złączy spawanych laserowo realizowano, m.in. w programie „SANDWICH” (5 program ramowy UE), „Advanced Welding for Closed Structures” i aktualnie w programie „ASPIS” (EUREKA) pt. „Zastosowanie wielowarstwowych paneli stalowych w konstrukcji statków”.

Badania złączy spawanych laserowo w warunkach obciążeń statycznych i zmęczeniowych są także przedmiotem szeregu prac realizowanych w Centrum Doskonałości LAPROMAT działającym w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki.



Rys. 2.20. Porównanie własności statycznych (a) i wytrzymałości zmęczeniowej (b) aluminiowych złączy spawanych laserowo (wg [10])

2.4. Podsumowanie

Analiza danych literaturowych wykazała, że wiele współczesnych metod zmęczeniowej analizy konstrukcji wiąże przebieg procesu zmęczenia z lokalnym stanem odkształceń i naprężeń w miejscach zagrożonych powstaniem pęknięć zmęczeniowych. Wiedza na temat zmęczenia wskazuje, że tymi miejscami są zazwyczaj strefy, w których występują spiętrzenia odkształceń, które z kolei mogą być spowodowane zarówno nieciągłością geometryczną, jak i niejednorodnością materiału.

W celu wyznaczenia wartości odkształceń i naprężeń w elementach konstrukcyjnych stosowane są liczne modele analityczne oraz numeryczne, które wykorzystują różne opisy własności materiałowych. Często jednak wykorzystywane w obliczeniach modele zakładają pełną zgodność własności materiału w strefie zmęczeniowego pęknięcia i poza nią. Wynika z tego brak wrażliwości metod obliczeń trwałości zmęczeniowej na skutki cyklicznego oddziaływania stref plastycznych powstających w obszarach zagrożonych zmęczeniowym pękaniem na lokalny stan odkształceń, co wpływa na zmniejszenie ich skuteczności. Poprawa jakości zmęczeniowej analizy konstrukcji wymaga zatem poszerzenia wiedzy na temat wpływu nieciągłości geometrycznych i niejednorodności własności materiałowych na stan odkształceń lokalnych oraz postać stref plastycznych w warunkach cyklicznie zmiennego obciążenia. Ze względu na złożoność problemu, w większości przypadków wymusza to konieczność stosowania doświadczalnych metod analizy odkształceń. Tym samym niezbędne jest także dostarczenie metod oraz narzędzi doświadczalnej analizy odkształceń w warunkach obciążeń zmiennych w czasie.

Jako jeden z czynników powodujących spiętrzenia odkształceń w strefach zmęczeniowego pęknięcia, wskazana została niejednorodność materiału. Powoduje ona jednak także zróżnicowanie zmęczeniowych własności materiału, co dodatkowo utrudnia prawidłową analizę stanu odkształceń w obszarach zagrożonych zmęczeniowym pękaniem. Istotne jest zatem stworzenie możliwości wyznaczania lokalnych własności zmęczeniowych materiału w strefach niejednorodności materiałowych. Zastosowanie lokalnych własności materiałowych w numerycznym modelowaniu konstrukcji w istotny sposób wpłynie na zwiększenie dokładności analizy stanu odkształceń i naprężeń.

Duży wpływ na jakość analizy stanu odkształceń i naprężeń w strefach zmęczeniowego pęknięcia ma także możliwość połączenia wyników analiz numerycznych z wynikami badań doświadczalnych. Zastosowanie metodyki hybrydowej analizy odkształceń i naprężeń w lokalnych obszarach elementów konstrukcyjnych umożliwi bowiem uniknięcia konieczności „pełnego” modelowania analizowanego obiektu w zakresie jego geometrii oraz stanu i historii obciążenia.

W dalszej części pracy (rozdziały 4-8) przedstawiono wyniki badań własnych, w których wymienione zagadnienia zostały zilustrowane na wybranych przykładach rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych. W omówionych badaniach przeprowadzono analizę zmian stanu odkształcenia w strefach zmęczeniowego pęknięcia oraz parametrów ten stan opisujących. Ponadto, przedstawiono propozycje hybrydowej metody analizy odkształceń i naprężeń lokalnych w strefach zmęczeniowego pęknięcia.

Prezentację szczegółowych wyników badań poprzedzono w rozdziale 3. uzasadnieniem wyboru metody laserowej interferometrii siatkowej do doświadczalnej analizy odkształceń, a także omówieniem jej adaptacji do warunków badań zmęczeniowych oraz prezentacją stosowanego instrumentarium badawczego.

3. Doświadczalna analiza odkształceń w niejednorodnych strukturach poddanych obciążeniom zmęczeniowym

3.1. Metody pomiaru przemieszczeń w warunkach obciążeń zmęczeniowych – wybór metody badań doświadczalnych

Doświadczalna analiza rozkładów odkształceń lokalnych w warunkach obciążeń zmęczeniowych narzuca ograniczenia, które spełniają tylko nieliczne techniki pomiarowe z licznej grupy metod pomiaru odkształceń. Ograniczenia te związane są przede wszystkim z możliwościami realizacji pomiaru w warunkach obciążeń zmiennych w czasie, występowaniem silnych gradientów odkształceń oraz wymaganiami dużej czułości i zakresu pomiarowego umożliwiającą analizę w zakresie sprężysto-plastycznym.

W większości przypadków analiza rozkładów odkształceń wymaga zastosowania metod pełnego pola, przy czym można także wskazać uzasadnione przypadki wykorzystania (np. w analizie gradientów odkształceń) technik pomiaru „punktowego”, głównie tensometrii elektrooporowej (np. [133]). 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.

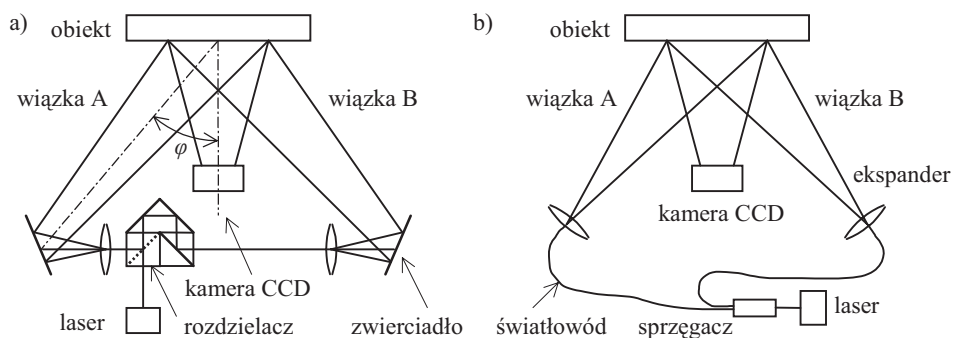
Spośród metod pełnego pola najliczniejszą grupę stanowią metody wykorzystujące pole elektromagnetyczne, a w tym przede wszystkim metody optyczne. Analiza literatury pozwala wskazać kilka metod znajdujących najczęstsze zastosowanie w badaniach rozkładów odkształceń i przemieszczeń w analizie zagadnień zmęczeniowych. Są to głównie metody: elastooptyczna [161, 192], cyfrowej korelacji obrazu [46, 196], termowizyjna [53, 106, 107], wspomagana komputerowo metoda mory [175], interferometrii holograficznej [129, 192, 203], elektronicznej interferometrii plamkowej ESPI [161, 174, 183] oraz laserowej interferometrii siatkowej IS [92, 158]. 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.

Analiza danych literaturowych z zakresu zmęczenia i mechaniki pękania oraz przedstawione w pracy [225] wyniki badań ankietowych przeprowadzonych w Japonii pozwalają zauważyć, że jednymi z najczęściej stosowanych współczesnych metod doświadczalnej analizy rozkładów odkształceń są: metoda laserowej interferometrii siatkowej oraz metoda elektronicznej interferometrii plamkowej ESPI. Z tego względu, w dalszej części pracy uwagę skupiono na tych metodach pomiarowych. Metoda ESPI jest optyczną techniką pomiaru przemieszczeń wykorzystującą zjawisko interferencji światła. Zasadę pomiaru oraz schemat konfiguracji typowych układów pomiarowych pokazano na rysunku 3.1. 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.3.1)

$$s = \frac{\lambda}{2 \sin \varphi} \quad (3.1)$$

Czułość s oznacza wartość przemieszczenia odpowiadającą pojedynczemu prążkowi interferencyjnemu.



Rys. 3.1. Zasada pomiaru odkształceń metodą ESPI w dwóch konfiguracjach optycznych: a) konwencjonalny układ optyczny, b) układ światłowodowy

Światło lasera wykorzystywane jest także w metodzie interferometrii siatkowej IS (rys.3.2). 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:

$$\sin \alpha = \lambda f_s \quad (3.2)$$

w której:

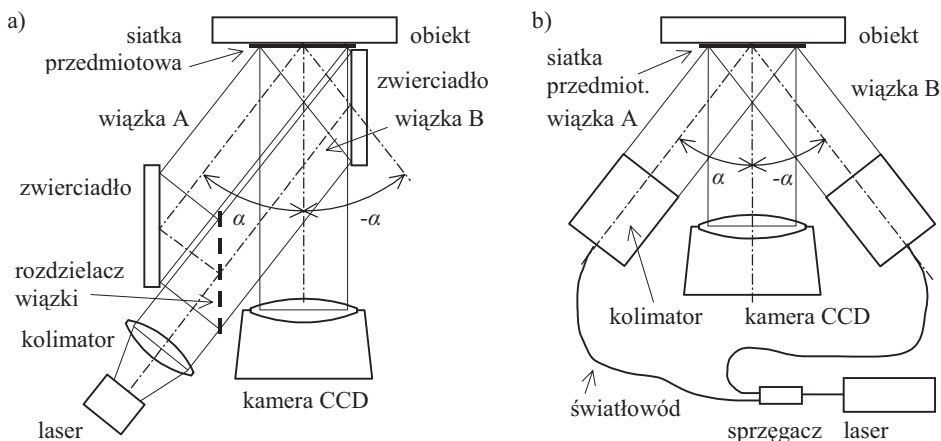
λ – długość fali,
 f_s – częstota siatki.

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 opisywany jest czułością bazową metody s zależną od częstotliwości siatki i wynoszącą:

$$s = 1/(2f_s) \quad (3.3)$$

Czułość s oznacza wartość przemieszczenia odpowiadającą odległości pomiędzy kolejnymi prążkami w polu widzenia. Czułość metody rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości siatki, jednak ze względu na maksymalną wartość kąta padania wynoszącą 90° częstota siatki nie może być większa niż $f_s = 1/\lambda$, co oznacza, że maksymalna czułość 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 [91, 123].



Rys. 3.2. Zasada działania dwuwieżkowej interferometrii siatkowej: a) konwencjonalna konfiguracja optyczna, b) układ światłowodowy

Analiza literatury z ostatnich lat pozwala wskazać przykłady badań z zakresu zmęczenia i mechaniki pęknięcia z zastosowaniem zarówno metody ESPI, jak i metody IS. Przykładowo, w pracy [126] przedstawiono wyniki badań własności złącza spawanego z zastosowaniem metody ESPI do wyznaczania gradientów odkształceń w strefie przejścia pomiędzy materiałem bazowym a spoiną. Metodę ESPI zastosowano także w badaniach zmęczeniowych stali SUS304 pokrywanej napyłanym termicznie związkami $Al_2O_3/NiCr$ opisanych w pracy [215]. 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 prostopadłych kierunkach u i v przedstawiono w pracy [128] na przykładzie analizy stanu odkształceń w próbce typu CT wykonanej z stopu aluminium HS30TF. W opracowaniu [127] 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 [47].

Również w przypadku metody interferometrii siatkowej, przegląd literatury wykazuje liczne przypadki jej stosowania w analizowanym zakresie badań. Przykładowo wyniki badań 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 różniących się m.in. wartościami granicy plastyczności przedstawiono w pracy [143]. W badaniach opisanych w pracy [157] metodę laserowej interferometrii siatkowej zastosowano w doświadczalno-numerycznej analizie współczynnika wyzwala energii potencjalnej G (prędkości intensywności wyzwala energii – ang.: strain energy release rate) opisującej spadek energii poten-

cialnej odkształcenia podczas powiększania się pęknięcia. Ponadto w badaniach wyznaczano wartość współczynnika intensywności naprężeń K w wyniku zastosowania metody rozwarcia wierzchołkowego pęknięcia CTOD (ang.: crack tip opening displacement). W badaniach wykorzystano wykonane ze stopu tytanu Ti-6-4, IMI 318 płaskie próbki z jednostronnym pęknięciem poddane czteropunktowemu zginaniu. W pracy [118] wyznaczano wielkości mechaniki pęknięcia dla szybko rozwijającego się pęknięcia w próbce typu SEN wykonanej ze stopu aluminium 7075-T6. Z kolei próbka z nierdzewnej stali austenitycznej 304L w kształcie pierścienia z jednostronnym karbem wykonanym od jej wewnętrznej strony była przedmiotem badań przedstawionych w pracy [147]. W trakcie badań próbkę poddawano dwustronnemu ścisnieniu pod różnymi kątami. Wyniki 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 [120].

Pomimo stosowania obydwu metod w podobnych zagadnieniach z zakresu zmęczenia i mechaniki pęknięcia, porównanie metody laserowej interferometrii siatkowej z metodą ESPI wskazuje na występowanie, obok cech wspólnych, także cech istotnie je różniących. Między innymi, przy zbliżonych czułościach bazowych, metody różnią się istotnie bezwzględnym zakresem pomiarowym, na korzyść metody laserowej interferometrii siatkowej. 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 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 częstość, 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.

W pracy [117] przeprowadzono porównanie metody laserowej interferometrii siatkowej oraz metody ESPI na podstawie pomiarów odkształceń w elemencie z pęknięciem poddanym obciążeniu statycznemu. Uzyskane wyniki potwierdzają porównywalną czułość bazową metod, ale jednocześnie wskazują na znacznie większe trudności w analizie obrazów prążkowych uzyskanych metodą ESPI. W przypadku odkształceń o małej wartości słaba jakość obrazów prążkowych uzyskiwanych metodą ESPI znacz-

nie zakłóca dokładność pomiaru. Wpływa na to w znaczny sposób szum będący specyficzną cechą metody. Autorzy pracy [117] wskazują także na mniejszą czułość pomiarową metody ESPI w porównaniu z metodą laserowej interferometrii siatkowej.

W tablicy 3.1 przedstawiono kryteria, na podstawie których dokonano szczegółowego porównania metod ESPI i IS, wskazując każdorazowo metodę lepiej je spełniającą. W świetle przedstawionego porównania można przyjąć, że metoda laserowej interferometrii siatkowej lepiej spełnia wymogi związane z realizacją pomiaru odkształceń w warunkach obciążeń zmęczeniowych. Wpływa na to głównie jej wyższa czułość i większy zakres pomiarowy, a także możliwość „zapamiętywania” historii obciążenia oraz większa podatność na automatyzację procesu pomiarowego.

Tym samym, do doświadczalnej analizy odkształceń wybrano metodę laserowej interferometrii siatkowej IS, dostosowaną do wymogów wynikających z prowadzenia badań w warunkach obciążeń zmęczeniowych w „zautomatyzowanym systemie laserowego ekstensometru siatkowego LES”.

Tablica 3.1. Porównanie metod ESPI i IS

| Kryterium oceny | Wynik porównania |
|---|------------------|
| wielkości mierzone | IS = ESPI |
| czułość | IS |
| rozdzielczość | IS |
| dokładność | IS |
| wymiary pole pomiarowego | ESPI |
| przygotowanie powierzchni obiektu | ESPI |
| możliwość pomiaru na maszynie wytrzymałościowej | IS = ESPI |
| możliwość automatyzacji pomiaru | IS |
| zakres pomiarowy w jednym kroku analizy | IS |
| „pamięć” deformacji obiektu | IS |

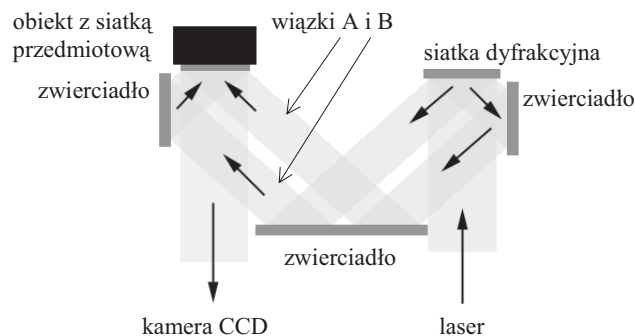
3.2. Laserowy ekstensometr siatkowy LES

System laserowego ekstensometru siatkowego LES, którego autor pracy jest współtwórcą stanowi unikatowe w skali światowej instrumentarium badawcze oparte na nowoczesnych rozwiązaniach optoelektronicznych oraz cyfrowych metodach analizy obrazu i sterowania procesem pomiarowym. Idea systemu opracowanego w ramach współpracy trzech ośrodków: Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy (zespół prof. Józefa Szali), Zakładu Technik Optycznych Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej (zespół prof. Małgorzaty Kujawińskiej) i Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu (zespół prof. Adama Mazurkiewicza) wywodzi się z prac autora realizowanych pod koniec lat 90 w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn [13, 17, 18, 19, 23, 24, 25, 29, 33, 36]. Jednym z ich efektów było opracowanie i zweryfikowanie automatycznego układu do pomiaru odkształceń [14, 17] opartego na kompaktowym interferometrze [90]. System LES jest, w znacznym zakresie, komercyjnym rozwinięciem opracowanego układu pomiarowego.

Zastosowanie techniki laserowej interferometrii siatkowej do badań w zakresie obciążeń zmęczeniowych wymagało jej adaptacji do warunków obciążeń zmiennych w czasie oraz zintegrowania z systemem sterowania hydraulicznych maszyn do badań

zmęczeniowych. Zintegrowanie głowicy pomiarowej z maszyną wytrzymałościową umożliwiło zautomatyzowany pomiar odkształcenia z jednoczesną rejestracją wszystkich sygnałów pomiarowych maszyny w warunkach monotonicznie, cyklicznie i nieregularnie zmiennych obciążeń. W tym celu opracowane zostało wielomodułowe oprogramowanie do sterowania pracą systemu oraz do analizy rejestrowanych w trakcie badań danych pomiarowych. Szczegółowe omówienie budowy, parametrów użytkowych i zakresu zastosowań systemu LES przedstawione zostało w pracach [26, 31, 32, 34, 66, 89]. Poniżej przedstawiona zostanie jego krótka charakterystyka.

Zastosowana w systemie LES do pomiaru przemieszczeń metoda dwuwiazkowej laserowej interferometrii siatkowej realizowana jest w układzie optycznym pokazanym na rysunku 3.1. Wiązka światła emitowana przez diodę laserową o długości fali $\lambda = 670 \text{ nm}$ po przejściu przez kolimator oświetla jednokierunkową siatkę dyfrakcyjną o częstotliwości $f_s = 1200 \text{ linii/mm}$. W wyniku jej ugięcia na siatce powstają dwie wzajemnie sprzężone (sprężone) wiązki A i B , które po odbiciu od zwierciadeł kontrolowanych przez napędy liniowe oświetlają siatkę przedmiotową naniesioną na obiekt badań. Zgodnie z zasadą pomiaru ugięte na siatce wiązki interferują, dając obraz prążków interferencyjnych obserwowany przez kamerę CCD. Zastosowanie siatki dyfrakcyjnej jako generatora sprzężonych wiązek A i B pozwoliło na uzyskanie małej wrażliwości na zmiany długości światła, a tym samym umożliwiło zastosowanie prostych diód laserowych. Zdublowanie układu pokazanego na rysunku 3.1 umożliwia realizację pomiaru w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach x i y z zastosowaniem krzyżowych siatek przedmiotowych.

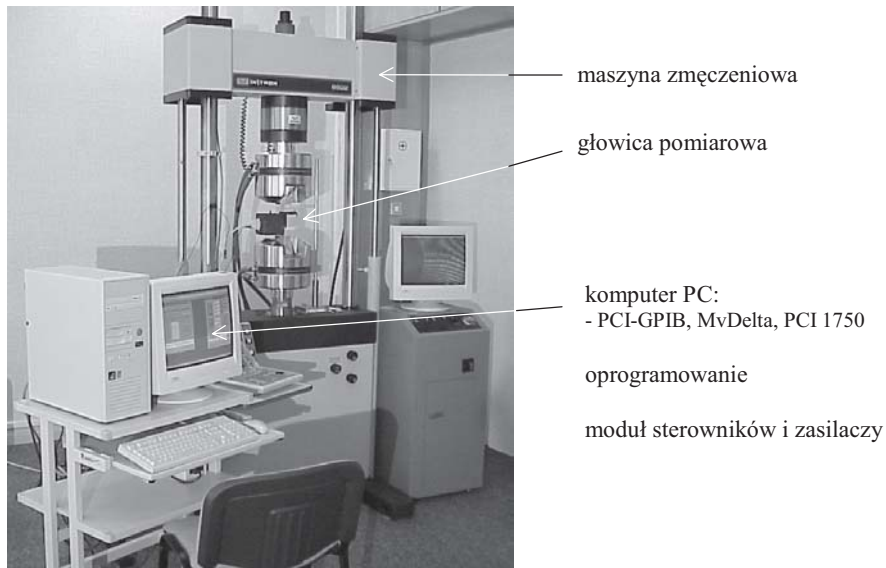


Rys. 3.3. Schemat układu optycznego toru pomiarowego laserowego ekstensometru siatkowego

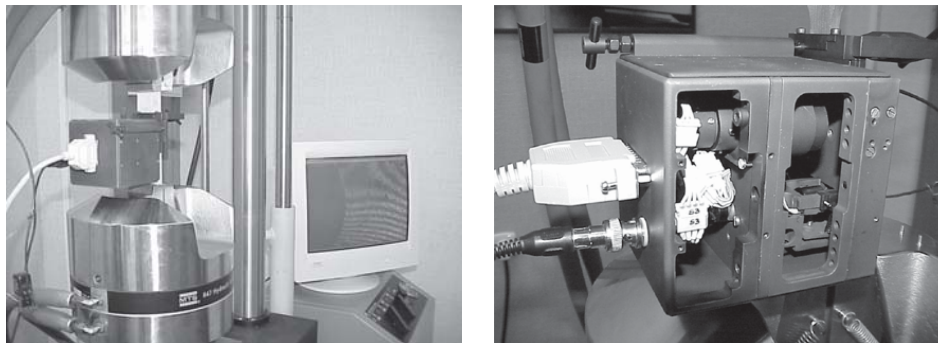
Na rysunku 3.4 przedstawiona została pełna konfiguracja systemu pomiarowego LES, obejmująca głowicę pomiarową, maszynę wytrzymałościową z cyfrowym systemem sterowania, komputer PC z zestawem kart rozszerzeń sprzętowych, moduł sterowników i zasilaczy oraz magnetowid i monitor telewizyjny.

Mechatroniczna budowa głowicy pomiarowej systemu LES pokazanej na rysunku 3.5 umożliwia automatyzację pomiaru oraz znaczne uproszczenie czynności związanych z przygotowaniem i realizacją pomiaru. Zastosowany układ optyczny umożliwia pomiar w polu o wymiarach około $4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, na płaskich lub zbliżonych do płaskich obiektach. Czułość bazowa układu optycznego wynosi 417 nm/prążek , co umożliwia uzyskanie czułości pomiarowej około 20 nm , przy zakresie pomiarowym około $\pm 20 \text{ }\mu\text{m}$ (przyrostu przemieszczenia).

Oprogramowanie systemu LES daje możliwość pomiaru odkształcenia lokalnego na wskazanym odcinku pomiarowym w trybie czasu rzeczywistego (ang.: on the fly) oraz wyznaczenie rozkładów odkształceń w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach na podstawie zarejestrowanych danych pomiarowych.



Rys. 3.4. Konfiguracja systemu LES



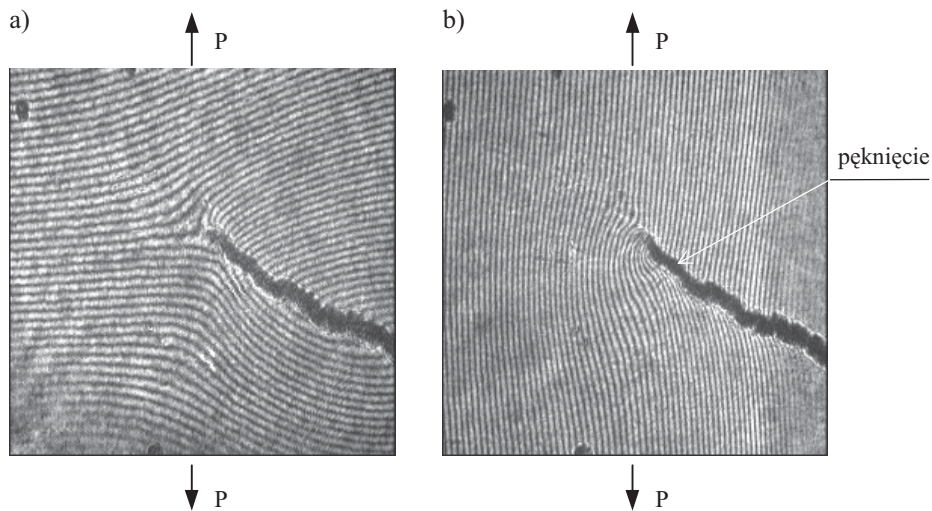
Rys. 3.5. Głowica LES: a) widok ogólny, b) widok głowicy po zdemontowaniu bocznej osłony

Podstawowym wynikiem pomiaru z zastosowaniem systemu laserowego ekstensometru siatkowego LES są mapy prążków interferencyjnych, uzyskiwane dla dwóch wzajemnie prostopadłych kierunków analizy x i y , zgodnych z kierunkami linii dyfrakcyjnej siatki przedmiotowej. Przykładowe mapy prążków interferencyjnych otrzymane dla próbki z pęknięciem pokazano na rysunku 3.6.

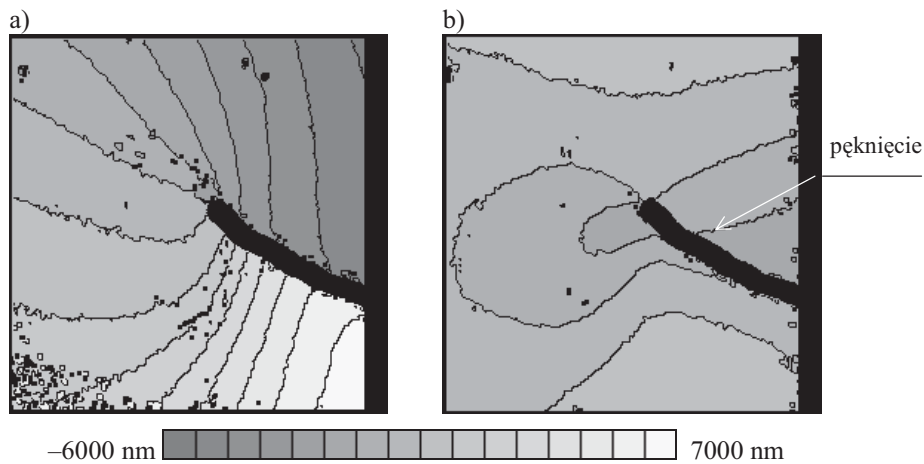
Analiza obrazów prążkowych umożliwia wyznaczenie rozkładów przemieszczeń δ_u – w kierunku osi x i δ_v – w kierunku osi y (rys.3.7), a na ich podstawie składowych odkształceń:

$$\varepsilon_y = \frac{\partial \delta_v}{\partial y}, \varepsilon_x = \frac{\partial \delta_u}{\partial x} \text{ i } \gamma_{xy} = \frac{\partial \delta_x}{\partial y} + \frac{\partial \delta_y}{\partial x}. \quad (3.4)$$

Rozkłady składowych odkształceń wyznaczone dla obrazu prążków interferencyjnych pokazanych na rysunku 3.6 przedstawiono na rysunku 3.8.



Rys. 3.6. Mapy prążków interferencyjnych: a) obraz prążków dla przemieszczeń w kierunku obciążenia $-y$, b) obraz prążków dla kierunku poprzecznego do kierunku obciążenia $-x$



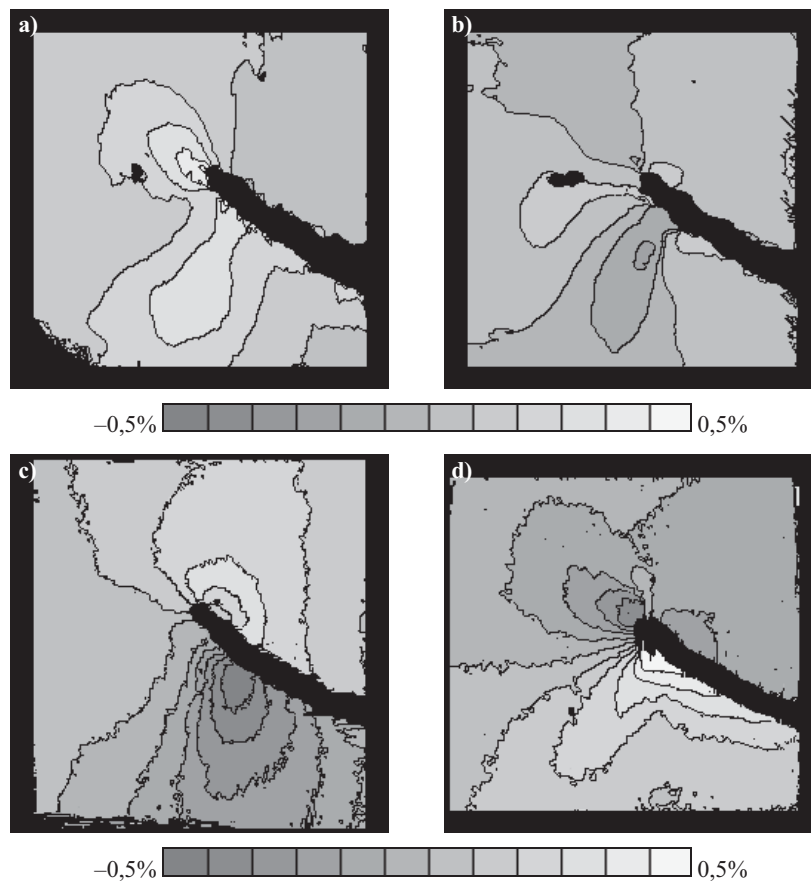
Rys. 3.7. Rozkłady przemieszczeń: a) δ_v – w kierunku y , zgodnym z kierunkiem obciążenia, b) δ_u – w kierunku x , poprzeczny do kierunku obciążenia (rys.3.6)

Na podstawie wyznaczonych wartości odkształceń możliwe jest obliczenie odkształceń głównych ε_1 i ε_2 oraz kierunków ich działania. Dysponując z kolei wartościami odkształceń głównych (jak i poszczególnymi składowymi stanu odkształceń) możliwe jest wyznaczenie – zgodnie z jednym z przyjętych kryteriów – wartości odkształceń ekwiwalentnych.

Przykładowo, odkształcenia ekwiwalentne ε_e obliczane zgodnie z kryterium Hubera-Misesa-Hencky'ego opisane są zależnością (3.5):

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1+\nu'} \sqrt{\frac{3}{2} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \quad (3.5)$$

Występująca w zależności (3.5) efektywna wartość liczby Poissona ν' zmienia się w zależności od charakteru odkształceń. W przypadku odkształceń sprężystych ν' odpowiada liczbie Poissona materiału ν , zaś dla odkształceń plastycznych przyjmuje wartość $\nu' = 0,5$. Oznacza to, że przy jednoczesnym występowaniu stref odkształconych plastycznie i sprężysto, co ma miejsce w regionach spiętrzeń odkształceń, może wystąpić problem w określeniu, które obszary obiektu wymagają stosowania mniejszej, a które większej wartości ν' .



Rys. 3.8. Rozkłady odkształceń: a) ε_y – kierunek y , b) ε_x – kierunek x , c) $\partial\delta_y/\partial x$, d) $\partial\delta_x/\partial y$

Metody analizy zmęczeniowej opisane w literaturze bazują w ocenie wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych na bardzo różnych wielkościach kryterialnych. Wykorzystują one w tym celu także wartości odkształceń, przy

czym są to zarówno wartości odkształceń ekwiwalentnych, jak i wartości odkształceń głównych, czy też poszczególne składowe odkształceń.

Ze względu na przyjęty zakres pracy, który nie obejmuje rozważań dotyczących bezpośrednich związków pomiędzy odkształceniami a stosowanymi metodami obliczeń wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej, w tym ich weryfikacji, w dalszej części pracy rozważano tylko dwie składowe stanu odkształcenia ε_y , zgodną z kierunkiem obciążenia rozpatrywanego obiektu i ε_x , prostopadłą do kierunku obciążenia. W niektórych przypadkach, w celu pełniejszego zobrazowania łącznego oddziaływania wyznaczonych składowych odkształcenia, obliczano także ich geometryczną sumę zgodnie z zależnością:

$$\varepsilon_w = \sqrt{\varepsilon_y^2 + \varepsilon_x^2} \quad (3.6)$$

Obliczanej w ten sposób wartości odkształcenia ε_w nie należy jednak traktować jako jednej z wartości kryterialnych stosowanych w metodach analizy zmęczeniowej konstrukcji.

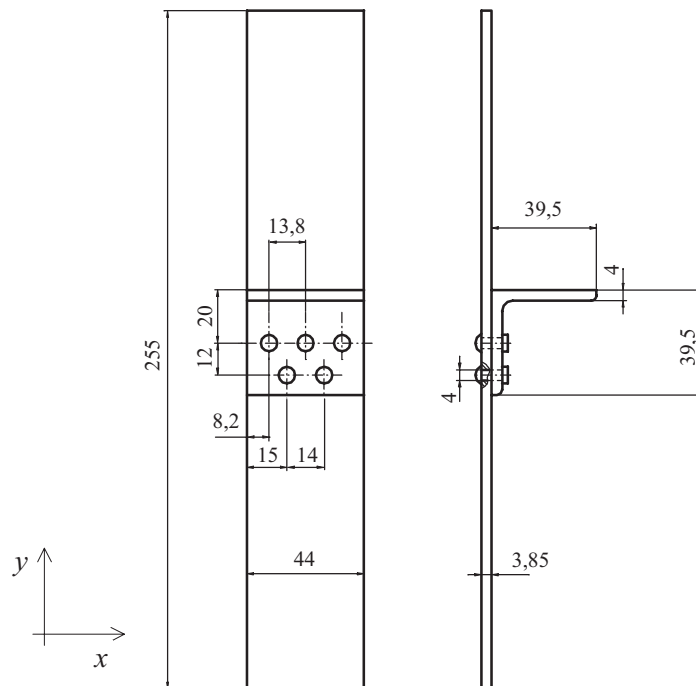
Wszystkie przykłady badań przedstawione w dalszych rozdziałach pracy realizowano w laboratorium Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy z zastosowaniem hydraulicznych maszyn do badań zmęczeniowych Instron 8501 i 8502.

4. Rozkład odkształceń lokalnych w karbie geometrycznym w warunkach obciążeń zmiennych

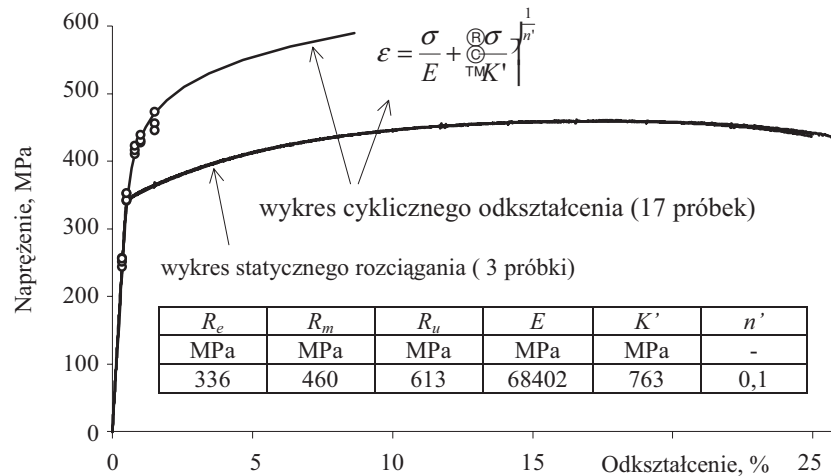
4.1. Wprowadzenie

Wpływ nieciągłości geometrycznych na stan odkształceń w elementach konstrukcyjnych poddanych obciążeniom zmęczeniowym zilustrowano na przykładzie wyników badań odkształceń lokalnych w próbkach nitowanych. Próbki o strukturze i właściwościach materiałowych typowych dla rozwiązań stosowanych w lotnictwie odzwierciedlały fragment nitowanej struktury obejmującej płaskownik wzmocniony poprzecznym kątownikiem. Ich budowę i podstawowe wymiary pokazano na rysunku 4.1.

Próbki wykonano ze stopu aluminium D16CzATW stosowanego na pokrycia w konstrukcjach lotniczych. Statyczne oraz zmęczeniowe własności materiału próbek oraz samych próbek (w tym naprężeniowe i odkształceniowe wykresy trwałości zmęczeniowej) wyznaczono w badaniach opisanych w pracy [190]. Na rysunku 4.2 przedstawiono statyczne oraz cykliczne własności stopu D16CzATW wyznaczone w próbach statycznego rozciągania oraz w próbach zmęczeniowych z zakresu trwałości niskocyklowej.

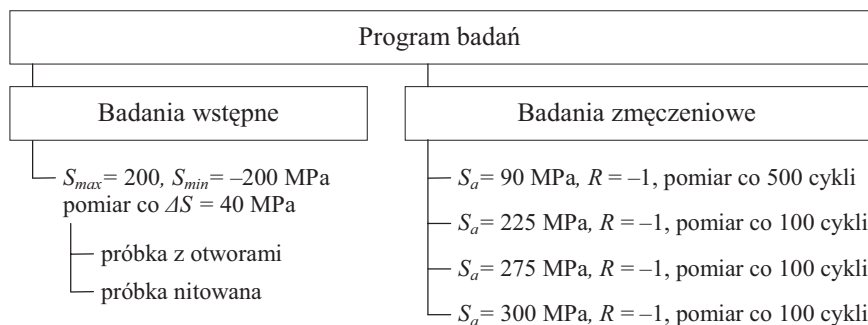


Rys. 4.1. Obiekt badań



Rys. 4.2. Własności statyczne i cykliczne stopu aluminium D16CzATW

Badania przeprowadzone zostały zgodnie z programem przedstawionym schematycznie na rysunku 4.3. Obejmował on wstępne badania w warunkach obciążeń quasi- statycznych oraz zasadnicze badania zmęczeniowe.



Rys. 4.3. Program badań

Badania wstępne miały na celu rozpoznanie wpływu nitu na rozkład odkształceń w strefie otworu w poszczególnych fazach cyklu obciążenia stosowanego w trakcie badań zmęczeniowych. W zasadniczych badaniach zmęczeniowych stosowano obciążenie wahadłowo zmienne o stałej wartości amplitudy siły dla czterech poziomów naprężenia nominalnego $S_a = 90, 225, 275$ i 300 MPa. Rozkłady odkształceń rejestrowano z zadaniem odstępem liczb cykli obciążenia, w większości przypadków w pięciu fazach cyklu. W pojedynczych testach stosowano pomiar dla dwudziestu wartości naprężenia nominalnego S w cyklu lub w sposób „ciągły” z częstotliwością zapisu danych ograniczoną wydajnością komputera.

Realizacja obciążeń ściskających wymagała przygotowania oprzyrządowania zapobiegającego wyoboczeniu próbki. Na rysunku 4.4 pokazano próbkę z zamocowaną

głowicą LES umieszczoną w uchwytach maszyny zmęczeniowej wyposażonych w prowadnice przeciwdziałające poprzecznym przemieszczeniom próbki.

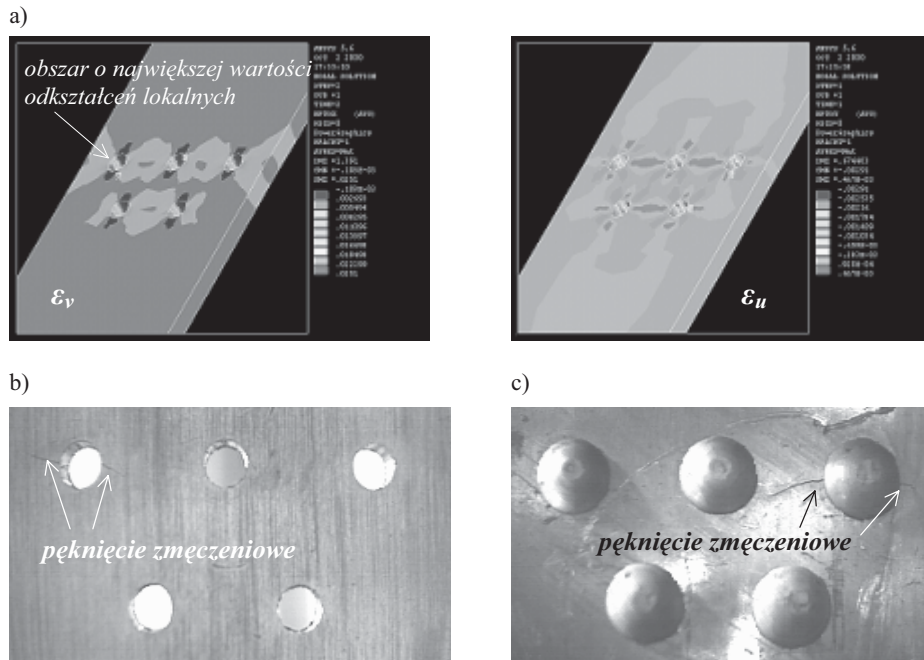


Rys. 4.4. Próbką w trakcie badań

4.2. Wyniki badań oraz ich analiza

W badaniach główną uwagę poświęcono analizie zmienności odkształceń lokalnych w strefie inicjacji pęknięcia zmęczeniowego w warunkach obciążeń o stałej wartości amplitudy naprężenia nominalnego. Pomiar odkształceń prowadzono w obszarach próbek zagrożonych powstaniem pęknięć zmęczeniowych. Prawdopodobne miejsca inicjacji pęknięcia wyznaczono na podstawie analizy rozkładów odkształceń metodą elementów skończonych [103] oraz na bazie wyników wstępnych badań zmęczeniowych (rys.4.5) próbek bez wzmocnienia (płaskownik z otworami) oraz próbek nitowanych.

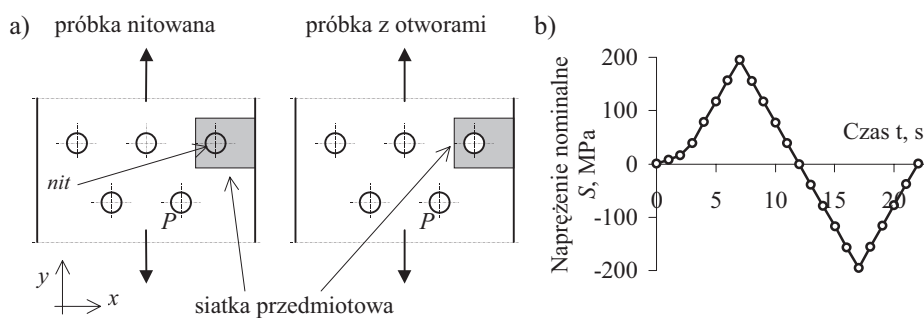
Analiza numeryczna wykazała, że maksymalne wartości odkształceń lokalnych powinny powstawać po zewnętrznej stronie skrajnych otworów w rzędzie z trzema nitami. Związek maksymalnych odkształceń lokalnych z miejscem inicjacji pęknięcia pośrednio potwierdzały wyniki wstępnych badań zmęczeniowych dla obydwu typów próbek (rys.4.5b). Pierwsze pęknięcia pojawiały się w większości przypadków po zewnętrznej stronie otworu w rzędzie z trzema nitami (otworami), przy czym należy jednocześnie zaznaczyć, że po niewielkiej liczbie cykli następowała także inicjacja pęknięcia po przeciwnej stronie otworu. Szczegółowy opis rozwoju przebiegu pęknięcia próbek zamieszczono między innymi w pracach [30, 190].



Rys. 4.5. Rozkład odkształceń w próbce bez wzmocnienia [103] (a) oraz próbki z rozwijającym się pęknięciem (b) i (c)

A. Badania wstępne

W trakcie badań wstępnych przeprowadzono pomiar odkształceń w otoczeniu skrajnego otworu w pojedynczym cyklu obciążenia dla próbek bez i ze wzmocnieniem. Na rysunku 4.6 pokazano schemat próbki z zaznaczonym miejscem naniesienia siatki przedmiotowej oraz schemat przebiegu obciążenia z zaznaczonymi punktami realizacji pomiaru.

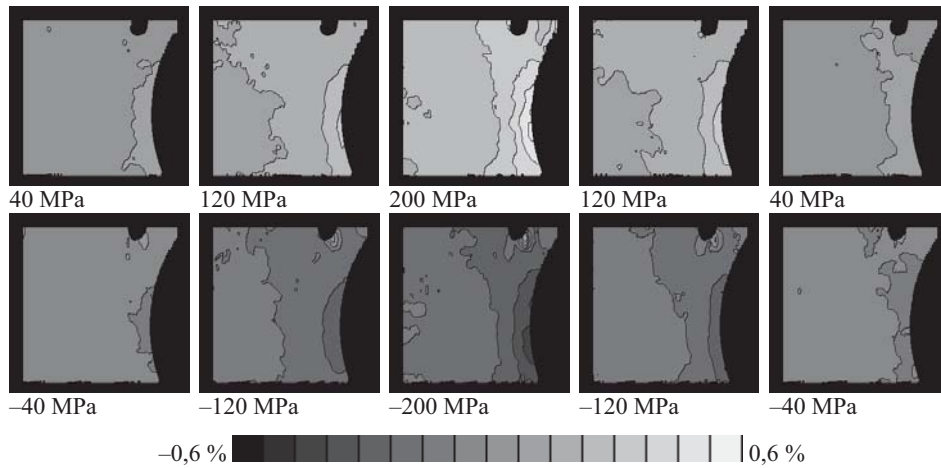


Rys. 4.6. Próbkę z siatką przedmiotową (a) oraz schemat obciążenia (b)

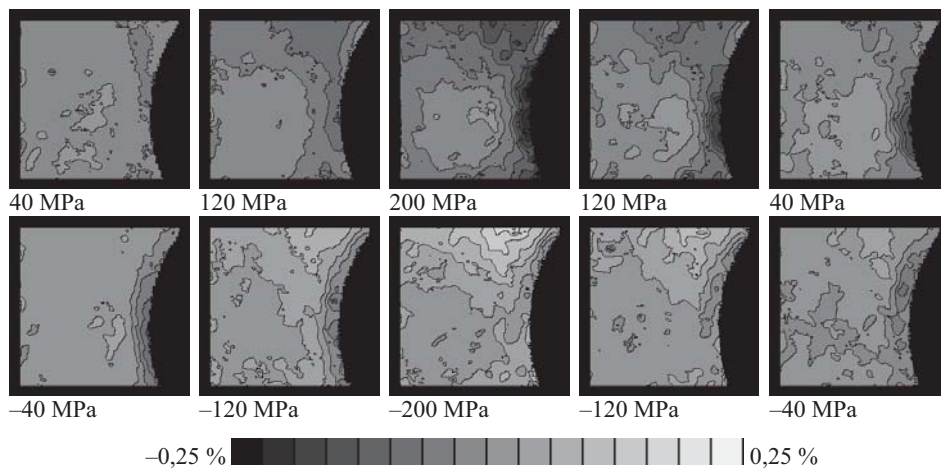
W przypadku próbek nitowanych konieczne było usunięcie głów nitów od strony płaskownika. Dzięki takiemu zabiegowi możliwa była analiza odkształceń w strefie kontaktu płaskownika i trzonu nitu. Spowodowało to jednakże częściowe uwolnienie sił

napięcia wstępnego pomiędzy płaskownikiem a wzmocnieniem i jednocześnie zmniejszenie udziału sił tarcia w dystrybucji obciążenia w strefie połączenia.

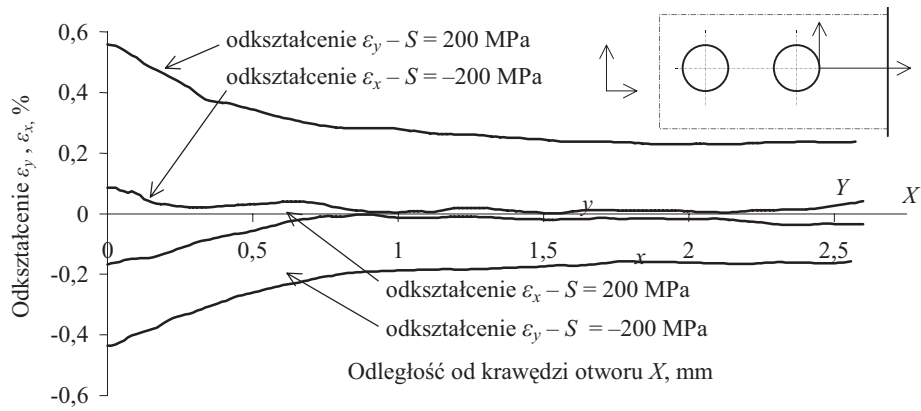
Wyniki badań wstępnych dla próbek bez wzmocnienia pokazano w postaci map rozkładów odkształceń na rysunkach 4.7, 4.8 i 4.9, zaś dla próbek nitowanych na rysunkach 4.10, 4.11, 4.12.



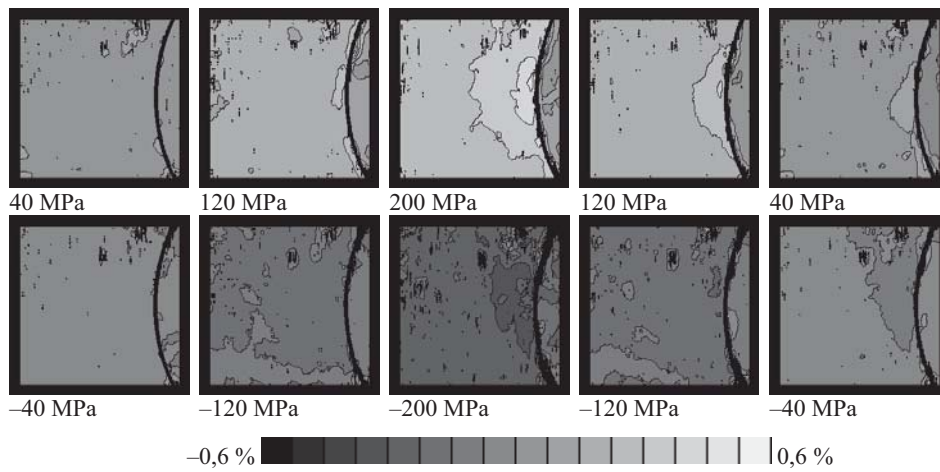
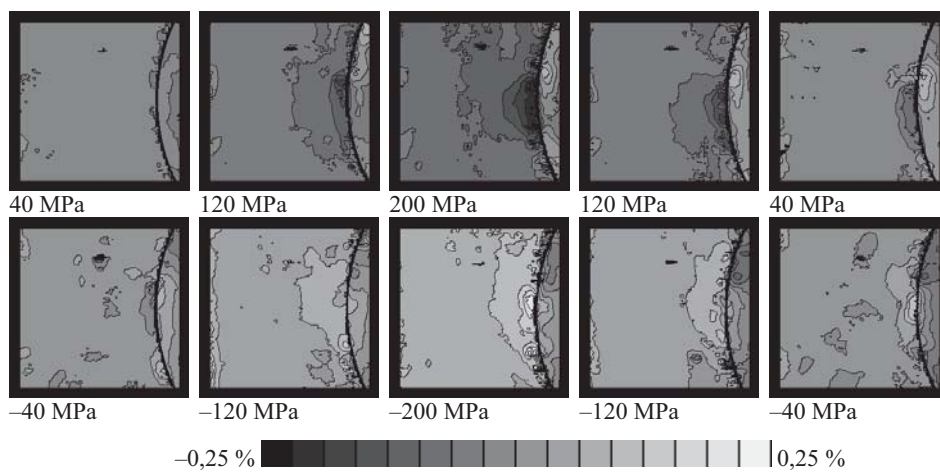
Rys. 4.7. Rozkłady odkształceń w próbce z otworami w kierunku y (rys.4.6)

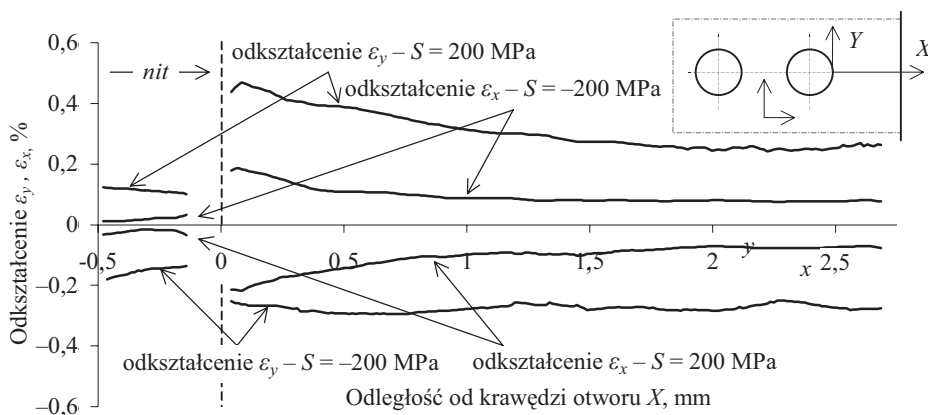


Rys. 4.8. Rozkłady odkształceń w próbce z otworami w kierunku x (rys.4.6)



Rys. 4.9. Rozkłady odkształceń w minimalnym przekroju próbki z otworami

Rys. 4.10 Rozkłady odkształceń w próbce nitowanej w kierunku y Rys. 4.11. Rozkłady odkształceń w próbce nitowanej w kierunku x



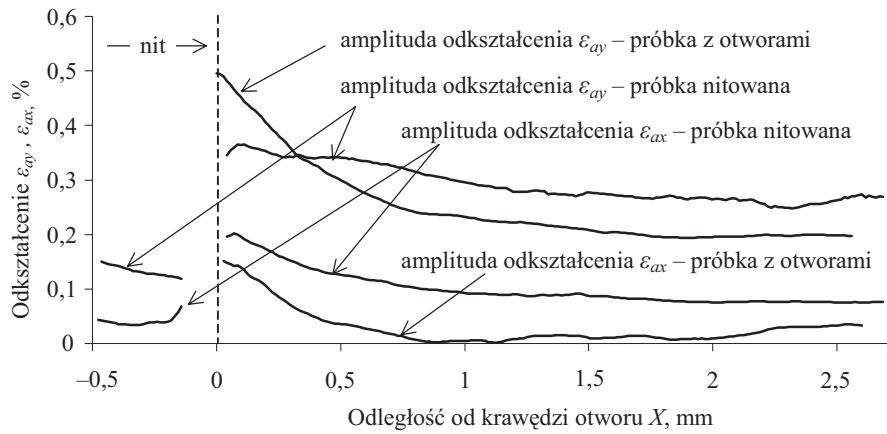
Rys. 4.12. Rozkłady odkształceń ε_y i ε_x w minimalnym przekroju próbki nitowanej

Wpływ nitu na rozkład odkształceń w płaskowniku

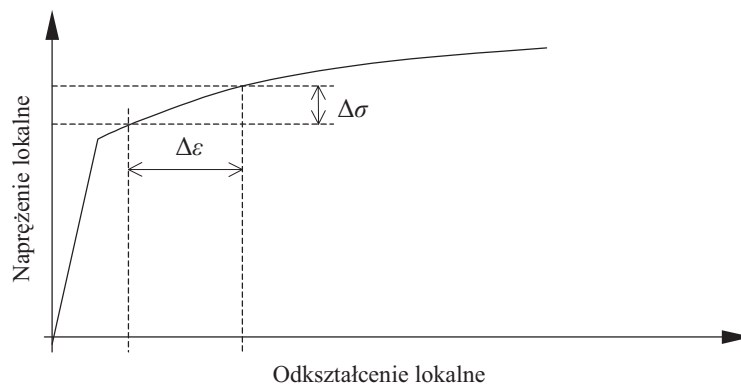
Głównym celem badań wstępnych była analiza wpływu nitu na zmiany rozkładu odkształceń w strefie otworu w próbce nitowanej. Analizę prowadzono bez uwzględniania naprężeń własnych wywołanych efektem spęczania nitu w procesie jego zakuwania, przyjmując stan po montażu połączenia jako stan wyjściowy. Ze względu na zmęczeniowy charakter analiz w trakcie badań skoncentrowano się na zakresie zmienności odkształceń lokalnych wywołanych pojedynczym cyklem obciążenia wahadłowo-zmiennego o zakresie naprężenia nominalnego $\Delta S = 200$ MPa.

Na rysunku 4.13 przedstawiono porównanie rozkładu amplitudy odkształceń w minimalnym przekroju próbek z otworami i nitowanej w kierunku x i y . Wypełnienie otworu nitem w znaczący sposób zmieniło jakościowo i ilościowo rozkład amplitudy odkształcenia w strefie karbu. Jak wynika z rysunku 4.13, w próbce nitowanej nastąpiło złagodzenie efektu spiętrzenia odkształceń w kierunku y przy jednoczesnym spadku maksymalnej wartości amplitudy odkształcenia na krawędzi otworu i wzroście średniego odkształcenia w rozpatrywanym przekroju próbki.

Podobnie w przypadku odkształceń w kierunku x zaobserwowano złagodzenie efektu spiętrzenia odkształceń, lecz towarzyszył temu jednoczesny wzrost zarówno maksymalnej, jak i średniej wartości odkształcenia. Na wzrost wartości odkształcenia ε_x w płaskowniku próbki nitowanej w półcyklu rozciągania w stosunku do odkształcenia próbki z otworami może wpływać, obok wypełnienia otworu nitem blokującym swobodne przemieszczenia płaskownika w strefie otworu, wstępne odkształcenie plastyczne wywołane zakuciem nitu. Obciążenie próbki z nitem może w takim przypadku powodować przyrost odkształcenia lokalnego w zakresie plastycznym, w zależności od rozległości strefy uplastycznionej wskutek nitowania, co schematycznie pokazano na rysunku 4.14.

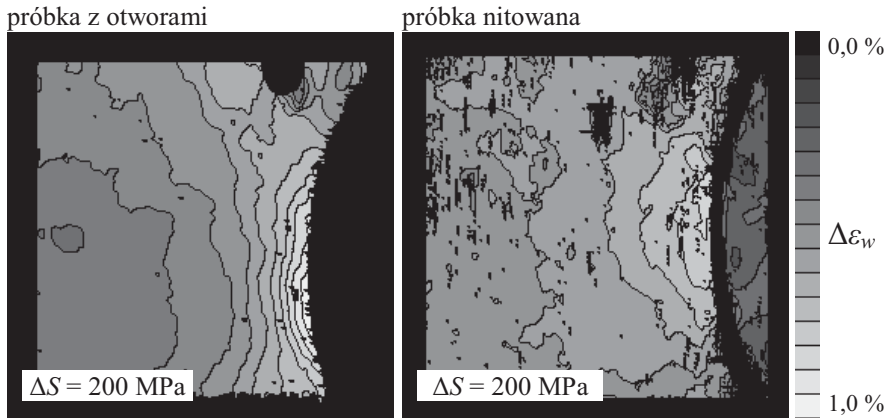


Rys. 4.13. Porównanie rozkładów amplitudy odkształceń ε_{ax} i ε_{ay} w minimalnym przekroju próbek z otworami i nitowanej ($\Delta S = 200$ MPa)

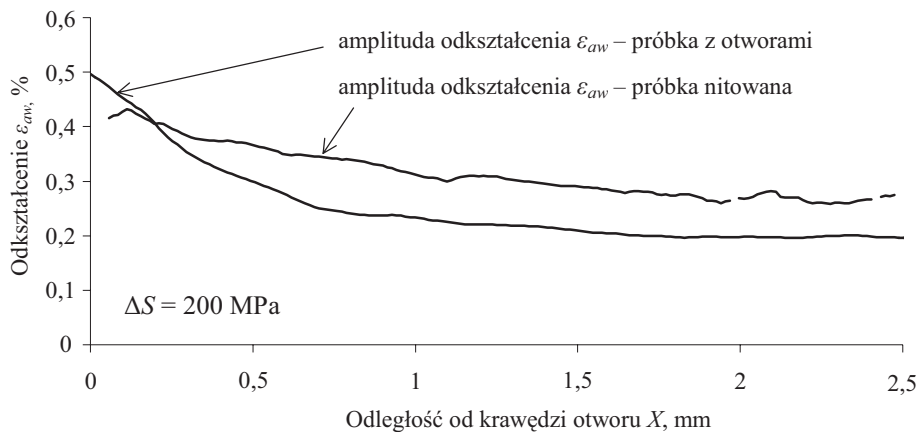


Rys. 4.14. Przyrost odkształcenia lokalnego wywołany nitowaniem

W celu określenia łącznych zmian w rozkładzie odkształceń na rysunku 4.16 przedstawiono porównanie wartości ich geometrycznej sumy (rys.4.15) obliczanej zgodnie z zależnością (4.3). Podobnie jak w przypadku niezależnej analizy odkształceń w kierunkach x i y , efekt spiętrzenia odkształceń w próbce z otworami jest znacznie silniejszy niż w próbce z otworem wypełnionym nitem. Należy jednak pamiętać o tym, że pełna analiza stanu odkształcenia w próbce w strefie złącza nitowego wymaga uwzględnienia odkształceń związanych z procesem zakuwania nitu.



Rys. 4.15. Rozkłady zakresów odkształceń $\Delta\varepsilon_w$ w próbkach z otworami i nitowanej ($\Delta S = 200$ MPa)



Rys. 4.16. Rozkład amplitudy geometrycznej sumy składowych odkształcenia $\varepsilon_{\sigma w}$ w minimalnym przekroju próbek z otworami i nitowanej ($\Delta S = 200$ MPa)

Rozkład odkształceń w strefie kontaktu płaskownika i nitu

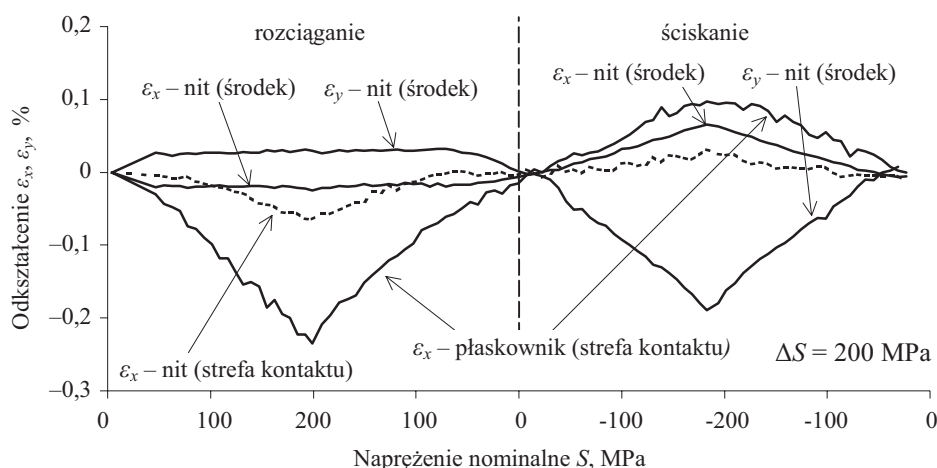
Spęczenie nitu w procesie zakuwania wywołuje powstawanie stałych ściskających odkształceń promieniowych w płaskowniku [190]. Wpływ tego efektu na średnią wartość odkształcenia w otoczeniu otworu będzie w dużej mierze zależał od własności materiału nitu, jak i przebiegu oraz jakości samego procesu nitowania. Przyjmując stan odkształceń w płaskowniku i nicie po jego zakuciu jako stan początkowy, przeprowadzono analizę zmienności odkształceń w trakcie pierwszego, pojedynczego cyklu obciążenia.

Na rysunku 4.17 przedstawiono przebieg zmian odkształceń ε_x , ε_y w środkowej części nitu oraz odkształceń ε_x w strefie kontaktu nitu i płaskownika. Wartość odkształcenia ε_x w części nitu znajdującej się blisko jego osi, w początkowej fazie półcyklu

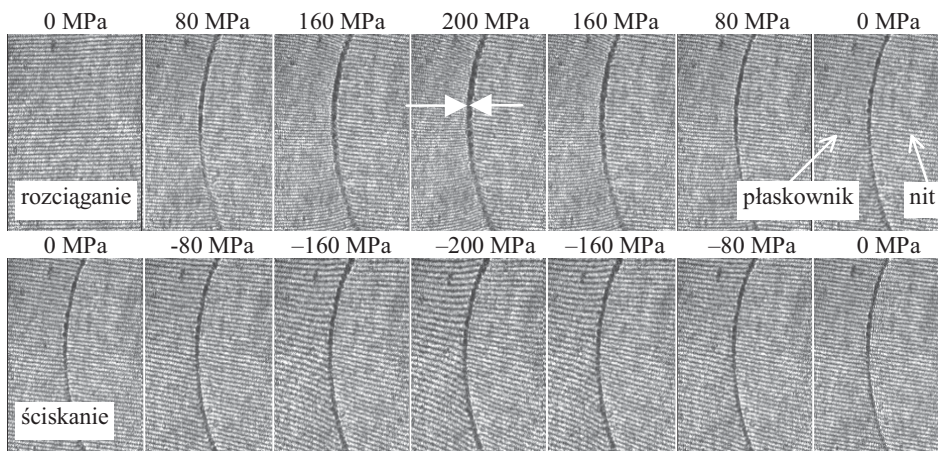
rozciągania ($S < 50$ MPa) osiąga niewielką wartość ujemną przy jednoczesnej dodatniej wartości odkształceń ε_y , co oznacza zwężenie nitu w kierunku poprzecznym do obciążenia i jego wydłużenie w kierunku obciążenia. Taki przebieg zmian odkształceń w nicie związany jest z oddziaływaniem płaskownika na boczne powierzchnie trzonu nitu. Jednak dalszy wzrost obciążenia nie powoduje wzrostu odkształceń w nicie, co może być spowodowane „ściskającym” oddziaływaniem płaskownika na nit. Taka sytuacja może wystąpić, m.in. w przypadku uplastycznienia płaskownika lub ustalenia naprężeń na powierzchni styku na stałym poziomie.

Sytuacja nie zmienia się w trakcie odciążania, aż do momentu, gdy naprężenie nominalne nie jest mniejsze od $S = 50$ MPa. Następuje wówczas spadek wartości odkształceń do wartości z początku cyklu obciążenia. Przejście do fazy ściskania powoduje wzrost zarówno wartości odkształceń ε_x , jak i ε_y , co tłumaczyć można ściskaniem nitu w kierunku obciążenia poprzez płaskownik.

O okresowych zmianach oddziaływania nitu i płaskownika w półcyklu rozciągania może świadczyć także analiza obrazu prążków w kolejnych fazach obciążenia. Wzrastająca szerokość cienia będącego efektem uszkodzenia siatki przedmiotowej w strefie kontaktu może być efektem „oddalania się” powierzchni otworu i trzonu nitu. Przedstawione na rysunku 4.18 obrazy prążków kolejnych faz obciążenia próbki wskazują na wzrost szerokości cienia w półcyklu rozciągania i jej stałej wartości podczas ściskania próbki.



Rys. 4.17. Przebieg zmian odkształceń w pierwszym cyklu obciążenia w płaskowniku i nicie ($\Delta S = 200$ MPa)



Rys. 4.18. Obrazy prążków interferencyjnych dla kolejnych faz obciążenia próbki nitowanej

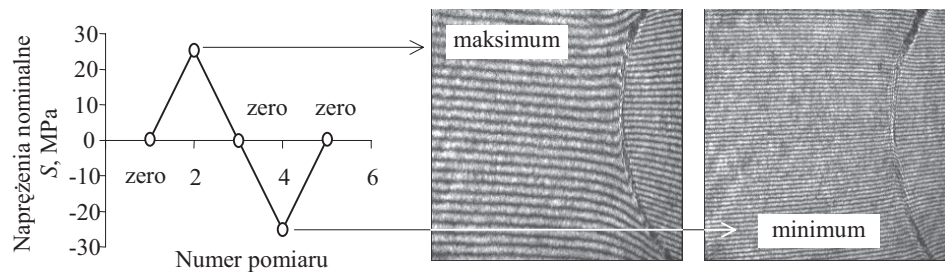
Obserwowane efekty mogą być również skutkiem zmiany podziałki szwu nitów w odkształcanym płaskowniku przy jej stałej wartości w kątowniku. Potwierdzenie tego wymagałoby jednak przeprowadzenia pomiarów odkształceń w całym otoczeniu otworu pod nit.

B. Badania zmęczeniowe

Większość metod lokalnej analizy zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych z nieciągłościami geometrycznymi nie uwzględnia zmian amplitudy odkształceń zachodzących w trakcie ich cyklicznego obciążenia. Zmiany te obserwowane są w szczególności wówczas, gdy obciążenia wywołują powstawanie nawet niewielkich odkształceń plastycznych, które często mogą stawać się przyczyną zmiany lokalnych właściwości materiału. Sprawa komplikuje się dodatkowo, gdy na obszar spiętrzenia odkształceń wpływają inne czynniki, tak jak w rozpatrywanym przypadku – efekty związane z oddziaływaniem nitu.

Podobnie jak w przypadku badań wstępnych, badania zmęczeniowe prowadzono dla próbek nitowanych z usuniętymi głowami nitów od strony płaskownika. W badaniach skoncentrowano się przede wszystkim na analizie zmian odkształceń ε_y w płaskowniku pomijając ich analizę w trzonie nitu. Pomiary odkształceń prowadzono w większości przypadków dla pięciu wybranych faz cyklu obciążenia dla zadanych cykli obciążenia.

Na rysunku 4.19 pokazano schemat obciążania próbki ze wskazanymi fazami pomiaru odkształceń oraz przykładowe mapy prążków dla próbki o $S = 225$ MPa.

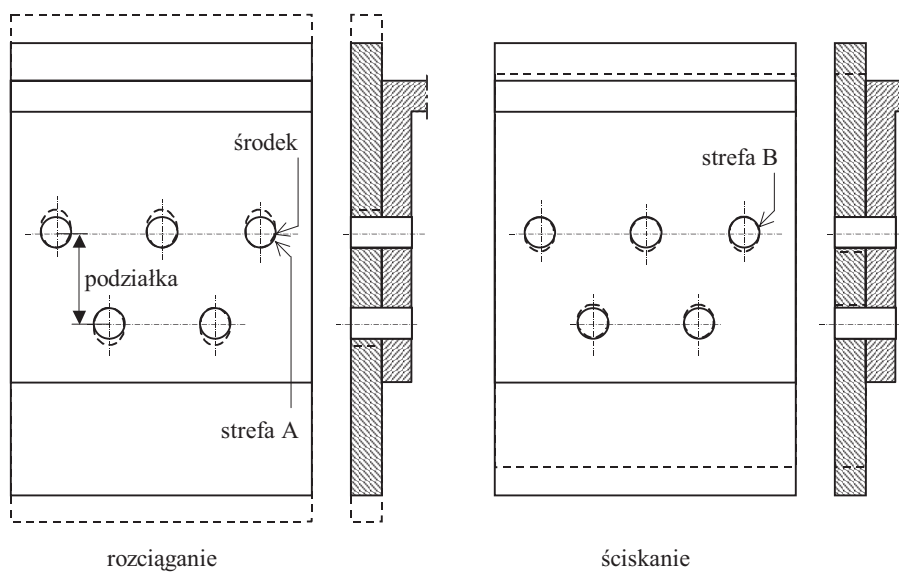


Rys. 4.19. Schemat obciążenia i punkty pomiarowe

Odkształcenia lokalne w strefie zmęczeniowego pęknięcia

Wyznaczane w trakcie badań rozkłady odkształceń analizowano głównie pod kątem amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{acy} w miejscu jego maksymalnej wartości lokalnej w strefie otworu.

Omawiając rozkład odkształceń w strefie kontaktu płaskownika i nitu (rys.4.17), wskazano na problem zmiany podziałki szwu nitów w płaskowniku w trakcie pojedynczego cyklu obciążenia w stosunku do podziałki w kątowniku (rys.4.20).

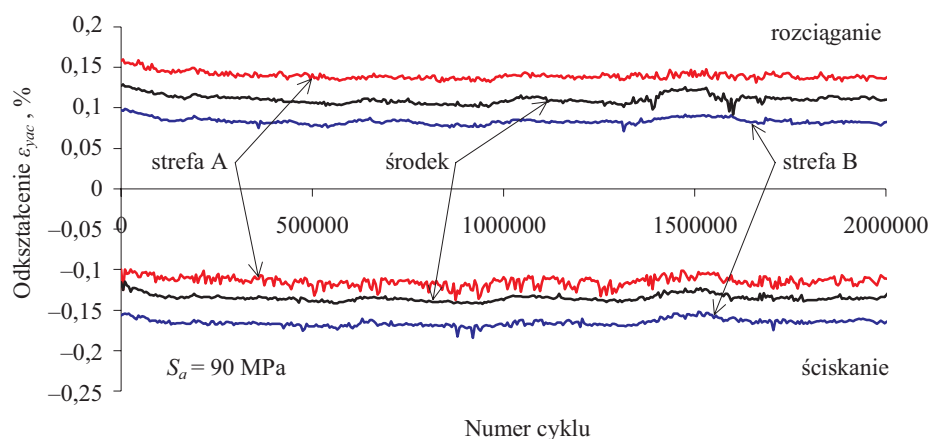


Rys. 4.20. Schemat odkształcania elementów próbki nitowanej

Efekt ten może powodować przemieszczanie stref maksymalnych odkształceń z minimalnego przekroju próbki w kierunku stref kontaktu w półcyklu rozciągania i ściskania. Strefy te oczywiście są przesunięte względem siebie, co wskazywałoby na

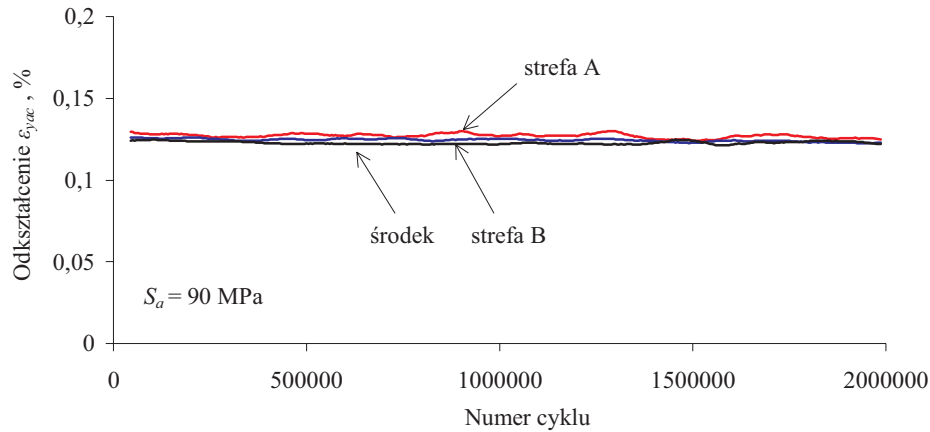
konieczność rozpatrywania co najmniej dwóch obszarów maksymalnej amplitudy odkształceń lokalnych różniących się wartością średnią.

Na rysunku 4.21 przedstawiono przebieg zmian odkształceń lokalnych w kierunku y w trzech rejonach próbki: w strefie maksymalnych odkształceń w półcyklu rozciągania (strefa A), strefie maksymalnych odkształceń w półcyklu ściskania (strefa B) i w minimalnym przekroju próbki (środek) dla obciążenia wahadłowego o $S_a = 90$ MPa. Ich maksymalne wartości są mniejsze od odkształceń odpowiadających zarówno statycznej, jak i cyklicznej granicy plastyczności (rys.4.2). Stąd można założyć, że w analizowanym obszarze występowały głównie odkształcenia sprężyste. Należy jednak pamiętać o ewentualnym wstępnym odkształceniu plastycznym wywołanym zakuciem nitu.

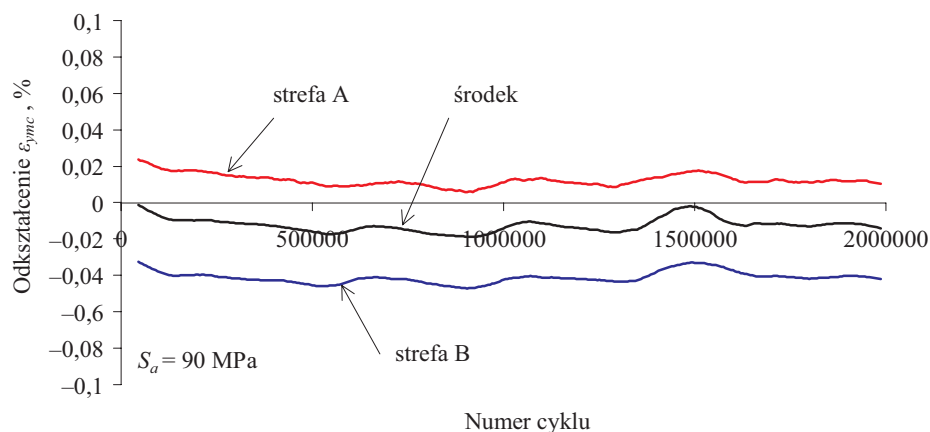


Rys. 4.21. Przebieg zmian odkształceń lokalnych w kolejnych cyklach obciążenia dla trzech stref próbki nitowanej, $S_a = 90$ MPa

Analiza otrzymanych wyników pomiarów potwierdza efekt niezgodności położenia stref maksymalnych odkształceń wywołanych oddziaływaniem płaskownika i nitu w półcyklu ściskania i rozciągania. Jednak zauważalna symetria maksymalnych i minimalnych wartości odkształceń wskazuje jednocześnie na porównywalne wartości amplitudy odkształceń we wszystkich trzech strefach. Na rysunkach 4.22 i 4.23 pokazano porównanie przebiegów zmian amplitudy i wartości średniej odkształcenia ε_y w rozpatrywanych rejonach próbki. Jak można zauważyć, przebieg zmian tych wartości w analizowanych strefach różni się bardzo nieznacznie. Nieco większe różnice wystąpiły jedynie w przypadku wartości średnich.

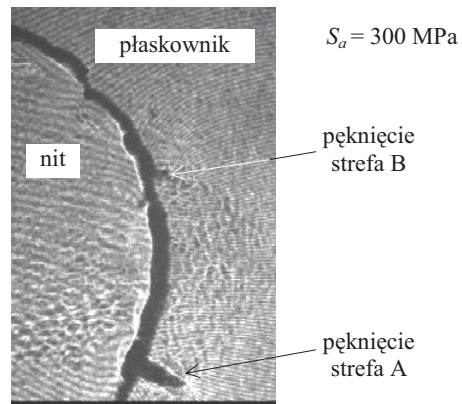


Rys. 4.22. Przebieg zmian amplitudy odkształcenia lokalnego w kolejnych cyklach obciążenia dla trzech stref próbki nitowanej

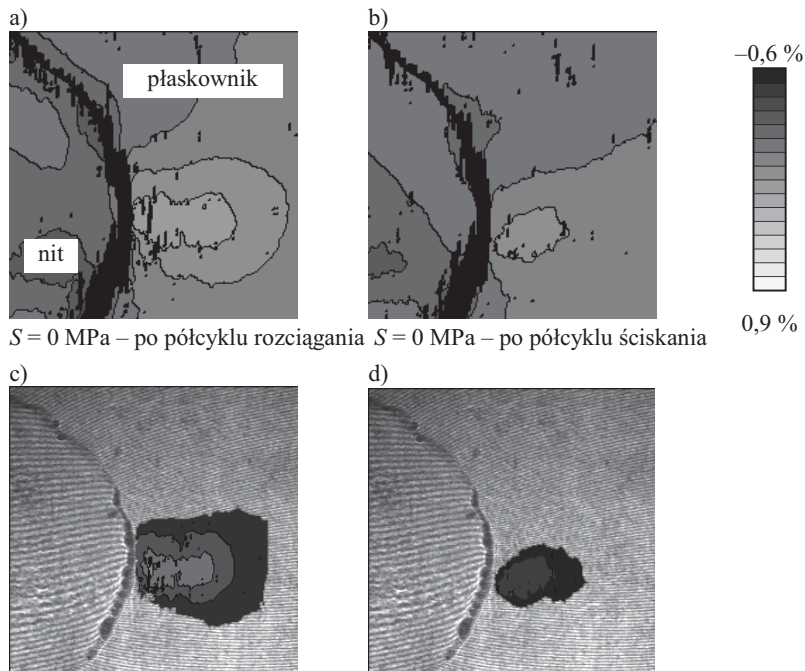


Rys. 4.23. Przebieg zmian wartości średniej odkształcenia lokalnego w kolejnych cyklach obciążenia dla trzech stref próbki nitowanej

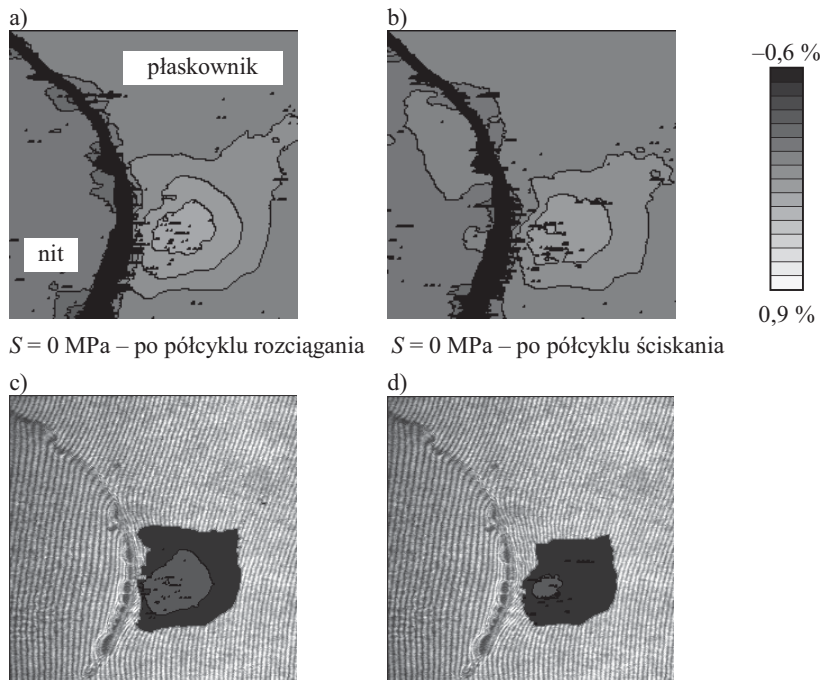
Występowanie kilku obszarów zagrożonych powstaniem pęknięcia potwierdził także wynik badania dla $S_a = 300$ MPa, podczas którego zaobserwowano jednoczesny rozwój pęknięć w strefach A i B, co pokazano na rysunku 4.24. Na taki przebieg pęknięcia w tym przypadku wpływ mogła mieć dodatkowo strefa odkształcenia plastycznego w płaskowniku. Dużą wartość naprężenia nominalnego powodowała pojawienie się rozległej strefy trwałych odkształceń plastycznych (pozostających w próbce po pełnym cyklu obciążenia) już w pierwszym cyklu obciążenia. Przebieg zmian jej kształtu w pojedynczym cyklu obciążenia dla odkształceń w kierunkach x i y przedstawiono na rysunkach 4.25 i 4.26. Analizując rozmiar strefy odkształceń plastycznych w kierunku prostopadłym do kierunku obciążenia (kierunek x), można zaobserwować niewielkie zmiany jej wielkości w półcyklu ściskania i rozciągania.



Rys. 4.24. Pęknięcia zmęczeniowe – $S_a = 300$ MPa



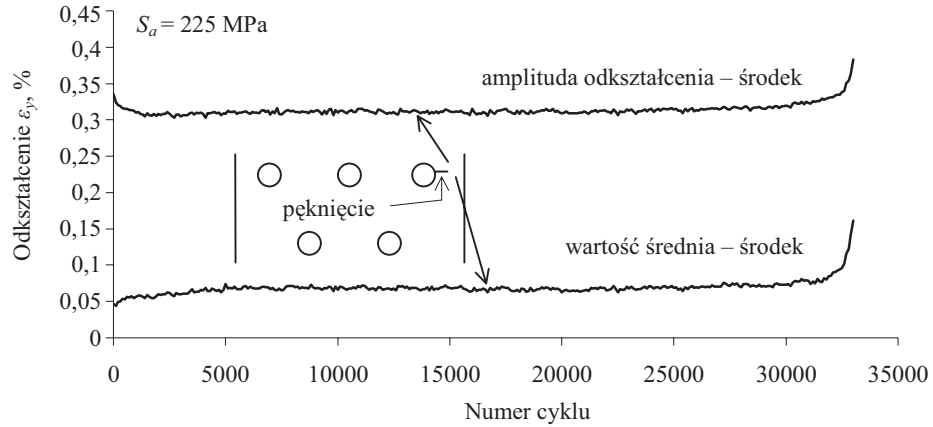
Rys. 4.25. Rozkłady odkształceń ε_y i strefa odkształceń plastycznych w kierunku y dla obciążenia $S_a = 300$ MPa: a) rozkład odkształceń ε_y po półcyklu rozciągania, b) rozkład odkształceń ε_y po pełnym cyklu ściskania, c) strefa plastyczna po półcyklu rozciągania, d) strefa plastyczna po pełnym cyklu ściskania



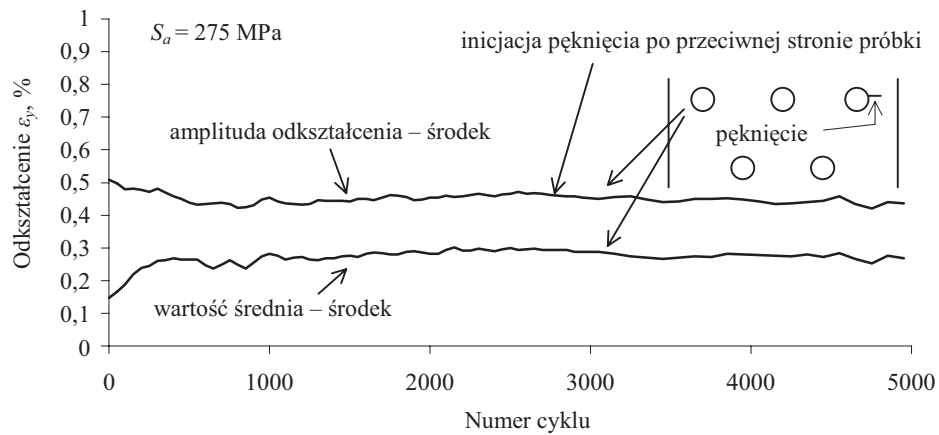
Rys. 4.26. Rozkłady odkształceń ε_x i strefa odkształceń plastycznych w kierunku x dla obciążenia $S_a = 300$ MPa: a) rozkład odkształceń ε_x po półcyklu rozciągania, b) rozkład odkształceń ε_x po pełnym cyklu obciążenia, c) strefa plastyczna po półcyklu rozciągania, d) strefa plastyczna po pełnym cyklu obciążenia

Zarówno analiza bezwzględnych wartości odkształceń, jak i ich amplitud dla naprężenia nominalnego $S_a = 90$ MPa wskazuje na zmianę ich wartości w kolejnych cyklach obciążenia. Jednak zakres tych zmian jest stosunkowo niewielki. Nieco inaczej wygląda sytuacja w przypadku większych obciążeń mogących powodować powstawanie odkształceń plastycznych. Na rysunkach 4.27 i 4.28 pokazano przebieg zmian amplitudy odkształcenia ε_y dla minimalnego przekroju płaskownika (środek) w próbkach badanych przy $S_a = 225$ i 275 MPa, natomiast na rysunku 4.29 wykresy prędkości zmian odkształcenia dla poszczególnych cykli obciążenia. W początkowej okresie trwałości próbek zarówno w pierwszym, jak i drugim przypadku, powstająca w półcyklach rozciągania strefa plastyczna wywołuje cykliczne umocnienie materiału, któremu towarzyszy spadek wartości amplitudy odkształceń lokalnych oraz wzrost ich wartości średniej w cyklu. Analiza przedstawionych wykresów wykazuje jednak, że dalsze obciążanie próbek powoduje stabilizowanie odkształcenia z tendencją do powolnego wzrostu jego wartości. Końcowy okres trwałości w omawianych próbkach przebiegał w różny sposób. W przypadku próbki o $S_a = 225$ MPa pomiar odkształcenia prowadzono w obszarze inicjacji pęknięcia, natomiast dla próbki badanej przy $S_a = 275$ MPa w otoczeniu otworu leżącego po drugiej stronie szwu. Wynikają z tego istotne różnice w przebiegu zmian amplitudy odkształcenia lokalnego związane z efektami redystrybucji obciążenia. Pomiar odkształceń w strefie powstającego makropęknięcia wykazywał dalszy wzrost ich wartości, przy czym ich zdecydowany przyrost następował dopiero w okresie bezpo-

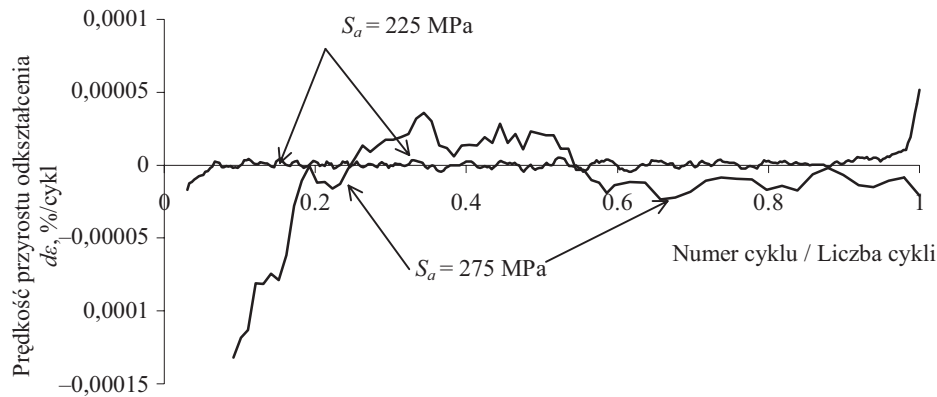
średnio poprzedzającym inicjację pęknięcia. Z kolei w przypadku próbki badanej przy $S_a = 275$ MPa następował stopniowy, niewielki spadek odkształcenia.



Rys. 4.27. Przebieg zmian odkształceń lokalnych w kolejnych cyklach obciążenia w próbce badanej przy $S_a = 225$ MPa



Rys. 4.28. Przebieg zmian odkształceń lokalnych w kolejnych cyklach obciążenia w próbce badanej przy $S_a = 275$ MPa



Rys. 4.29. Prędkość przyrostu odkształcenia lokalnego dla $S_a = 225$ MPa i $S_a = 275$ MPa

Strefa odkształceń plastycznych

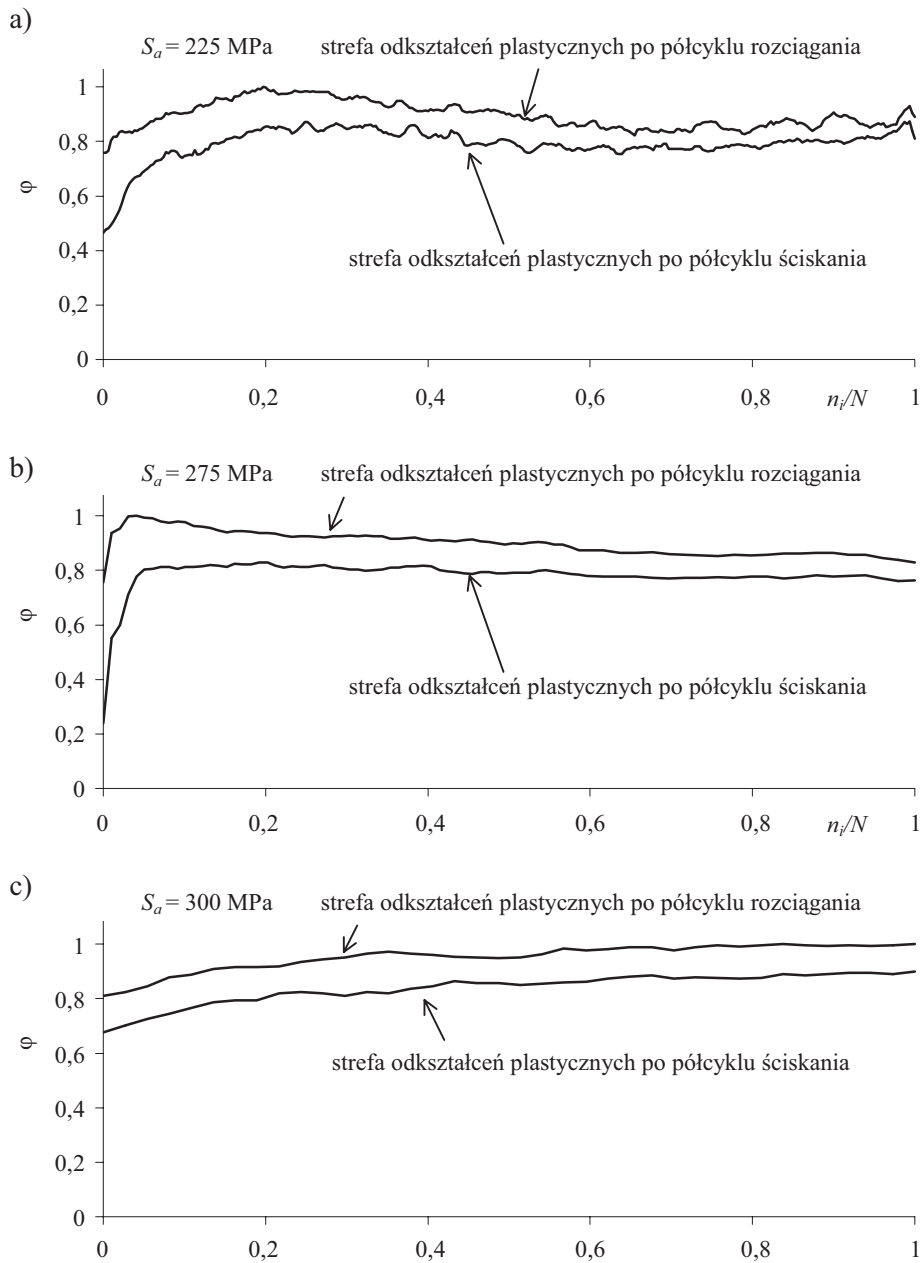
Jak już wspomniano w poprzednim punkcie, pomimo realizacji cyklicznego, w pełni symetrycznego obciążenia, w próbce mogą powstawać trwałe odkształcenia plastyczne, pozostające po jej odciążeniu. Przyczyną tego mogą być zarówno różnice własności materiału w zakresie rozciągania i ściskania, umocnienie materiału wywołane jego plastycznym odkształceniem, jak i „blokujące” działanie nitu, który w fazie ściskania niejako zwiększa nominalny przekrój próbki, zmniejszając udział siły ściskającej płaskownik w stosunku do siły go rozciągającej.

Do ilościowej analizy obszaru odkształconego plastycznie zastosowano parametr φ . Jego wartość obliczano jako stosunek pola powierzchni F_i obszaru objętego odkształceniem plastycznym w danej fazie obciążenia do jego maksymalnej wartości F_{max} w rozpatrywanym zakresie trwałości

$$\varphi = F_i / F_{max} . \quad (4.1)$$

W obliczeniach wartości parametru φ uwzględniano jedynie obszar próbki w otoczeniu otworu w miejscu spodziewanej inicjacji pęknięcia zmęczeniowego.

Analiza zmian wartości parametru φ w kolejnych cyklach obciążenia, przeprowadzona dla dwóch faz obciążenia: po realizacji półcyklu rozciągającego i po następującym po nim półcyklu ściskającym nasunęła kilka spostrzeżeń. We wszystkich przypadkach obciążenia, dla których obserwowano powstawanie odkształcenia trwałego, jego obszar po półcyklu rozciągającym, jak i po półcyklu ściskającym pozostawał w zakresie odkształceń o znaku dodatnim (rys.4.30).



Rys. 4.30. Przebieg zmian wielkości obszaru odkształconego plastycznie w płaskowniku w otoczeniu otworu: a) $S_a = 225 \text{ MPa}$, b) $S_a = 275 \text{ MPa}$, c) $S_a = 300 \text{ MPa}$

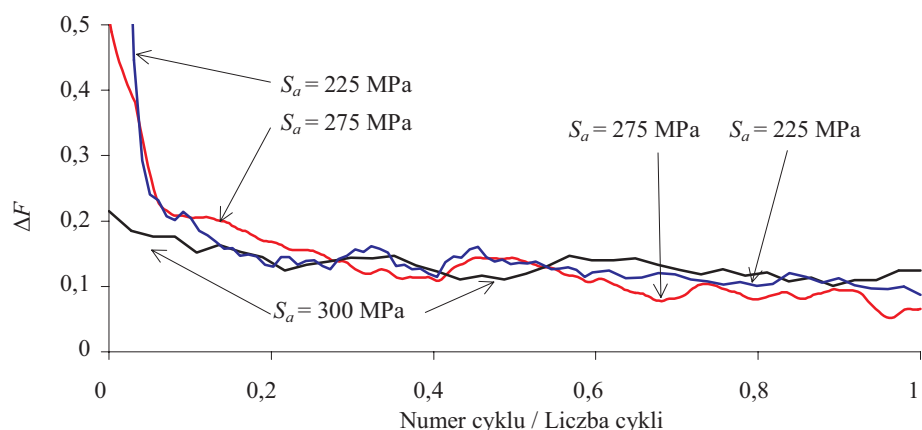
W przypadku największej wartości amplitudy naprężenia nominalnego $S_a = 300 \text{ MPa}$ zarówno strefa plastyczna po półcyklu rozciągającym, jak i ściskającym zwiększała się, co może wskazywać na proces cyklicznego pełzania, podczas którego

efekty wpływające na wzrost strefy plastycznej w półcyklu rozciągania nie mogą zostać zniwelowane półcyklem ściskania, a każdy kolejny cykl powiększa jej obszar.

W przypadku mniejszych wartości naprężenia nominalnego, tj. dla $S_a = 225$ i 275 MPa, strefa odkształcenia plastycznego pozostającego w próbce po pełnym cyklu obciążenia, po początkowym okresie wzrostu, stabilizowała swój rozmiar (z lekką tendencją spadkową), aż do momentu inicjacji pęknięcia (stosunek $n_i/N_i = 1$). Towarzyszył temu jednak nieco odmienny przebieg zmian strefy plastycznej po półcyklu rozciągającym. Zasadnicza różnica polegała na wyraźnym zmniejszaniu się jej rozmiaru w kolejnych cyklach obciążenia w okresie odpowiadającym stabilnemu przebiegowi strefy po pełnych cyklach obciążenia. Jednak pomimo tych różnic, we wszystkich trzech analizowanych przypadkach, względna różnica rozległości obszarów odkształconych plastycznie ΔF obliczana jako stosunek różnicy pól objętych odkształceniem trwałym po fazach rozciągania F_{i_tens} i ściskania F_{i_comp} i pola po fazie ściskania:

$$\Delta F = \frac{F_{i_tens} - F_{i_comp}}{F_{i_comp}} \quad (4.2)$$

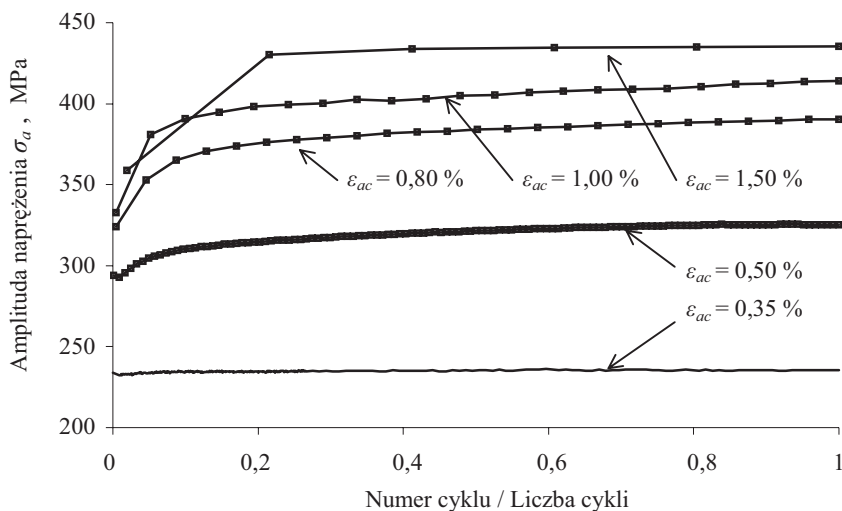
zmniejszała się systematycznie w kolejnych cyklach obciążenia, co pokazano na rysunku 4.31.



Rys. 4.31. Przebieg zmian względnej różnicy wielkości obszarów odkształconych plastycznie ΔF

Zmniejszająca się wartość parametru ΔF świadczy o cyklicznym umacnianiu materiału w strefie otworu. Porównywalny we wszystkich przypadkach (z pominięciem początkowego, krótkiego okresu trwałości) przebieg zmian wartości ΔF wskazuje na małą wrażliwość zjawiska umocnienia materiału na wartość obciążenia nominalnego. Różnica jego wartości pomiędzy poszczególnymi próbami obliczana w poszczególnych okresach trwałości nie przekraczała 30%. Celowe tym samym wydaje się podjęcie dalszych prac w celu oceny możliwości zastosowania parametru ΔF w analizie stopnia uszkodzenia zmęczeniowego obiektu z nieciągłościami geometrycznymi. Obserwowane w trakcie pomiarów umacnianie się materiału w kolejnych cyklach obciążenia zgodne jest z przebiegiem prób niskocyklowego zmęczenia, w których zakres odkształcenia plastycznego charakteryzował się podobną zmiennością jak parametr ΔF . Na rysunku 4.32 pokazano przebiegi zmian amplitudy naprężenia zarejestrowane w trakcie badań

zmęczeniowych próbek wykonanych ze stopu D16CzATW dla amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{ac} równej 0,35; 0,5; 0,8; 1,0 i 1,5 %.



Rys. 4.32. Wykresy zmian amplitudy naprężenia σ_a w zależności od liczby cykli w warunkach stałej wartości amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{ac}

4.3. Podsumowanie

Analiza wyników badań odkształceń w połączeniu nitowym wykazała istotny wpływ obciążenia zmiennego w czasie na rozkład odkształceń lokalnych w strefie karbu geometrycznego. Cyklicznie zmienne obciążenie badanych próbek spowodowało zmiany początkowego rozkładu odkształceń (z pierwszego nawrotu obciążenia), w wyniku których w strefie karbu powstało kilka miejsc o zbliżonej, maksymalnej wartości amplitudy odkształcenia (rys.4.22). W efekcie, w próbce nastąpiła jednoczesna inicjacja pęknięć w dwóch ogniskach zmęczeniowych (rys.4.24). Wzajemne oddziaływania nitów, kątownika i płaskownika, które są główną przyczyną omawianego przebiegu procesu pęknięcia mogą uniemożliwić w takim przypadku jednoznaczne wskazanie miejsc inicjacji pęknięcia zmęczeniowego. Tym samym stosowanie metod obliczeń trwałości zmęczeniowej opartych na analizie zmienności wartości odkształceń lokalnych może być bardzo utrudnione. Zmiana stanu odkształcenia w obszarze nieciągłości geometrycznej wywołana cyklicznie zmiennym obciążeniem zmniejsza także dokładność analizy zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych prowadzonej na podstawie teoretycznej analizy odkształceń w strefie karbu. Występujący w przedstawionym w pracy przykładzie wielogniskowy charakter pęknięcia może utrudniać przewidywanie dalszego rozwoju pęknięcia zmęczeniowego metodami mechaniki pęknięcia.

Efektom działania obciążenia zmiennego był także zmieniający się rozmiar strefy plastycznej w strefie karbu (rys.4.30, 4.31). Zmiana rozmiaru obszaru objętego odkształceniami plastycznymi w warunkach symetrycznie zmiennego obciążenia świadczy o zmianach własności materiałowych w strefie nieciągłości geometrycznej. Obserwowany podczas badań stref plastycznych efekt stałego umacniania materiału w trakcie

cyklicznego obciążenia dodatkowo komplikuje możliwość analizy zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych z zastosowaniem tzw. stałych własności zmęczeniowych materiału, które w rzeczywistości są zależnymi od historii obciążenia materiału.

Zbliżony przebieg procesu ewolucji strefy plastycznej w karbie dla różnych wartości naprężenia nominalnego uzasadnia celowość działań zmierzających do zastosowania „monitoringu” strefy plastycznej w analizie stopnia uszkodzenia zmęczeniowego elementów konstrukcyjnych z nieciągłościami geometrycznymi.

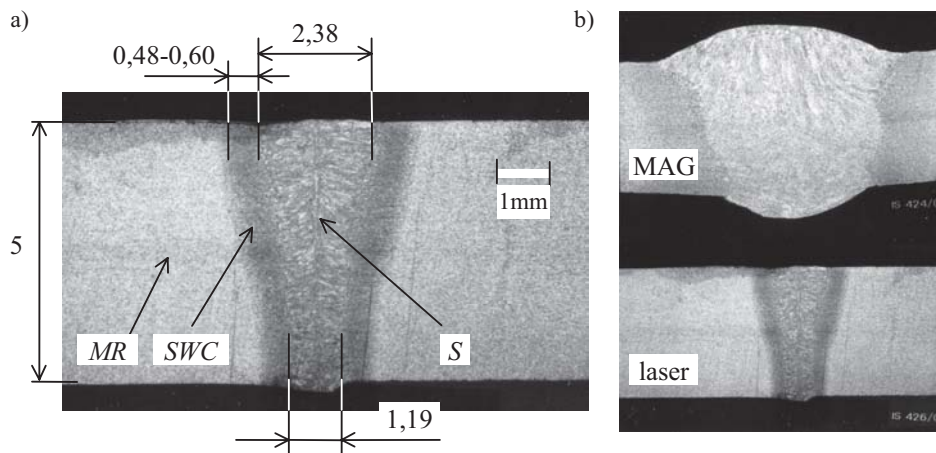
Przeprowadzone badania odkształceń w strefie nieciągłości geometrycznych w warunkach obciążeń zmiennych w czasie wykazały pełną przydatność zastosowanej metody pomiaru przemieszczeń i odkształceń. Umożliwiła ona zarówno analizę maksymalnych wartości odkształceń lokalnych, jak i stref odkształceń plastycznych w całym zakresie trwałości badanych próbek.

Przeprowadzone badania wskazały także na inne obszary analizy połączenia nitowego, w którym proponowana metoda może znaleźć zastosowanie. Dotyczy to między innymi efektu przemieszczania się nitu w otworze w fazie rozciągania i ściskania i towarzyszącego temu zjawisku frettingu oraz analizy wpływu procesu zakuwania nitu na stan odkształceń w strefie karbu.

5. Lokalne własności zmęczeniowe w laserowym złączy spawanym

5.1. Sformułowanie problemu

Omawiane w rozdziale 2.3 zagadnienia związane z zastosowaniem lokalnego podejścia w analizie zmęczeniowej złączy spawanych laserowo wskazywały na potrzebę określenia lokalnych własności zmęczeniowych w poszczególnych strefach spoiny. Zastosowanie tradycyjnego postępowania w przypadku analizy lokalnych własności zmęczeniowych w obrębie zmęczeniowego pęknięcia spoiny laserowej przysparza szereg niedogodności, związanych głównie z przygotowaniem powtarzalnych próbek do badań oraz koniecznością budowy małych maszyn do badań zmęczeniowych. Opisywane w literaturze i omówione w rozdziale 2.3 badania złączy spawanych prowadzone są głównie na małych próbkach pobieranych z wybranych obszarów spoiny i jej otoczenia. W przypadku spawania laserowego wiąże się z tym wiele trudności wywołanych m.in. niewielkimi wymiarami złącza i jego poszczególnych stref, które wymuszają znaczne ograniczenie wymiarów próbek. Uzyskanie wiarygodnego opisu lokalnych własności zmęczeniowych może być zatem w takim przypadku bardzo utrudnione. Dla zobrazowania kształtu i wymiarów złącza spawanego laserowo na rysunku 5.1a pokazano zdjęcie przekroju złącza będącego przedmiotem badań prezentowanych w pracy. Na rysunku 5.1b zamieszczono także w celach porównawczych zdjęcie makrostruktury złącza spawanego metodą MAG.



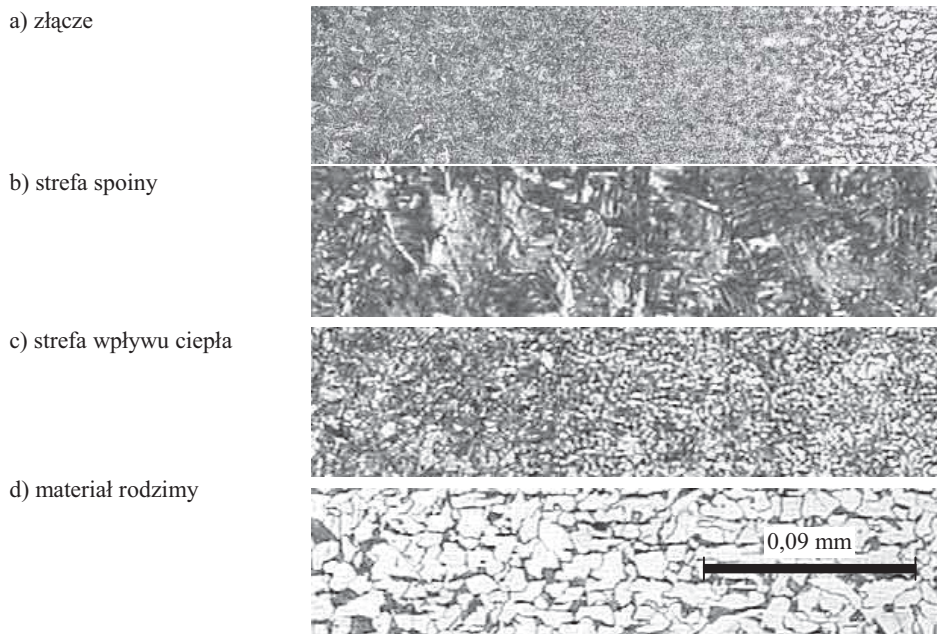
Rys. 5.1. Zdjęcie makrostruktury złącza spawanego laserowo (a) : *MR* – materiał rodzimy, *SWC* – strefa wpływu ciepła, *S* – spoina, oraz porównanie makrostruktury złączy wykonanych techniką laserową i MAG (b)

Analiza literatury [99, 130, 132] wskazuje jednak na możliwość wyznaczania zmęczeniowych własności materiału w badaniach uproszczonych, tzw. metodą stopniowego wzrostu prowadzonych na pojedynczej próbce. W uproszczeniu, polega ona na

analizie parametrów pętli histerezy wyznaczonych dla różnych wartości amplitudy odkształcenia/naprężenia.

Założenia metody stopniowego wzrostu wykorzystano w pracy do opracowania koncepcji metody analizy lokalnych własności zmęczeniowych w strefach niejednorodności materiałowych. W opracowanej metodzie do analizy parametrów pętli histerezy zastosowano system laserowego ekstensometru siatkowego LES. Możliwości zaproponowanej metody wykorzystano w analizie lokalnych własności zmęczeniowych w strefach laserowego złącza spawanego.

W badaniach własności materiałowych stosowano próbki pobrane ze złączy laserowych wykonanych ze stali 18G2A. Złącza wykonano w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach z zastosowaniem wiązki lasera o mocy 3,8 kW. Próbki spawano w osłonie helu z prędkością $v = 1,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.



Rys. 5.2. Mikrostruktura poszczególnych stref złącza spawanego laserowo

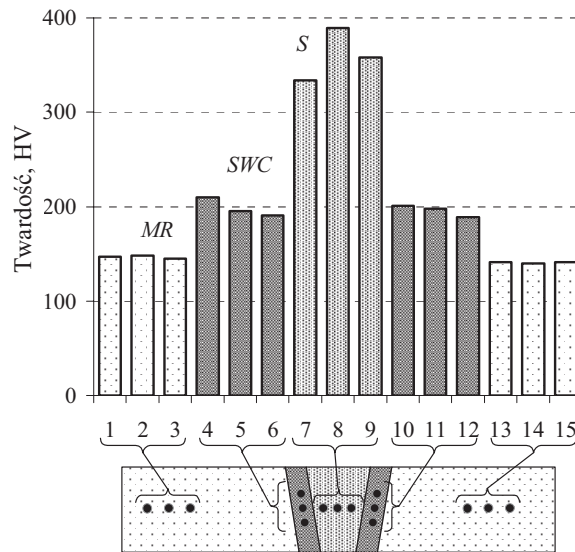
Spawaniu podlegały dwa jednakowe arkusze blachy o grubości 5 mm o płaskich krawędziach, bez ukosowanych brzegów. Obraz makrostruktury złącza pozwala wyróżnić jego poszczególne strefy oznaczone na rysunku 5.1a jako *MR* – strefa materiału rodzimego, *SWC* – strefa wpływu ciepła *SWC* i *S* – strefa spoiny. Na rysunku 5.1a podano także przybliżone wymiary poszczególnych stref.

Zróznicowanie własności w wyróżnionych strefach złączach wynika ze zmienionej w wyniku spawania mikrostruktury materiału. Badania próbek (rys.5.2) wykazały ferrytyczno-perlityczną budowę strefy *MR*, bainityczną – strefy *SWC* i bainityczną z niewielką ilością martenzytu – strefy *S*. Takie zróznicowanie własności odzwierciedla pomiar mikrotwardości metodą HV. Na rysunku 5.3 pokazano wykres zmian twardości w zależności od miejsca jej pomiaru.

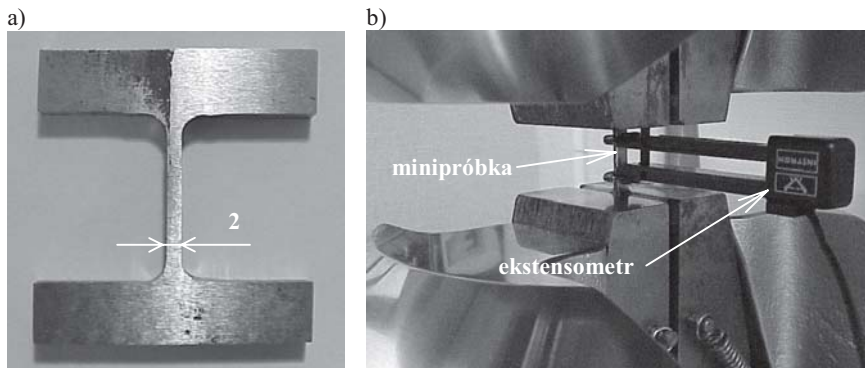
5.2. Wyniki badań oraz ich analiza

A. Badania własności statycznych

W celu wyznaczenia statycznych własności materiału spoiny przeprowadzono badania na minipróbkach (rys.5.4a) pobranych ze środkowego fragmentu złącza.



Rys. 5.3. Rozkład mikrotwardości w złączu spawanym laserowo



Rys. 5.4. Badania własności statycznych materiału spoiny S – minipróbka (a) i jej widok podczas badania (b)

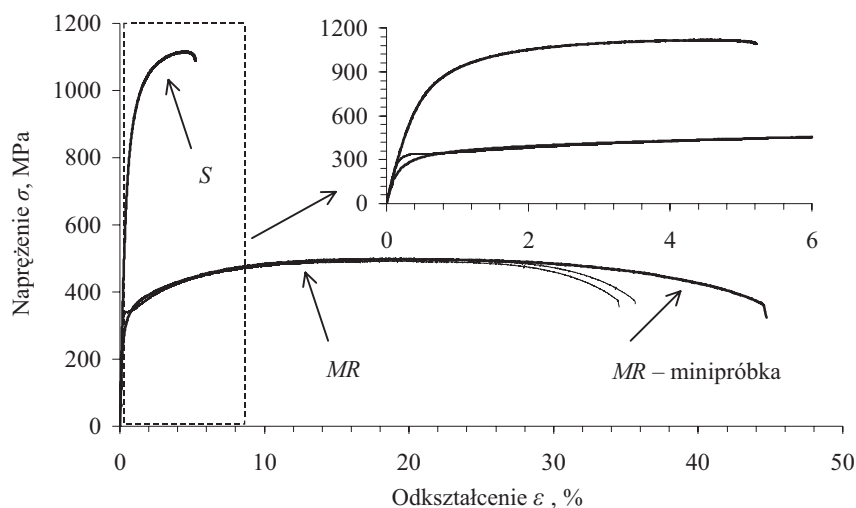
Badania własności statycznych złącza w obszarze materiału rodzimego przeprowadzono zarówno na znormalizowanych próbkach materiałowych wykonanych ze stali 18G2A, jak i na minipróbkach pobranych z rejonu połączenia. Wyznaczony wykres

rozciągania dla spoiny i dla materiału rodzimego (stali 18G2A) przedstawiono na rysunku 5.5. Ich opis ilościowy zamieszczono w tabelicy 5.1.

Tablica 5.1. Własności statyczne

| Strefa złącza | $R_{e 0,2\%}$ | R_m | E | |
|---|---------------|-------|------------------|------------------|
| | | | styczny | sieczny |
| spoina S | 770 | 1115 | $2.1 \cdot 10^5$ | $1.8 \cdot 10^5$ |
| materiał rodzimy MR minipróbka | 290 | 500 | $2.3 \cdot 10^5$ | $1.9 \cdot 10^5$ |
| materiał rodzimy MR próbka znormalizowana | 270*/340 | 495 | $2.3 \cdot 10^5$ | $2.0 \cdot 10^5$ |

* wyraźna granica plastyczności



Rys. 5.5. Wykresy rozciągania materiału rodzimego i materiału ze strefy spoiny S

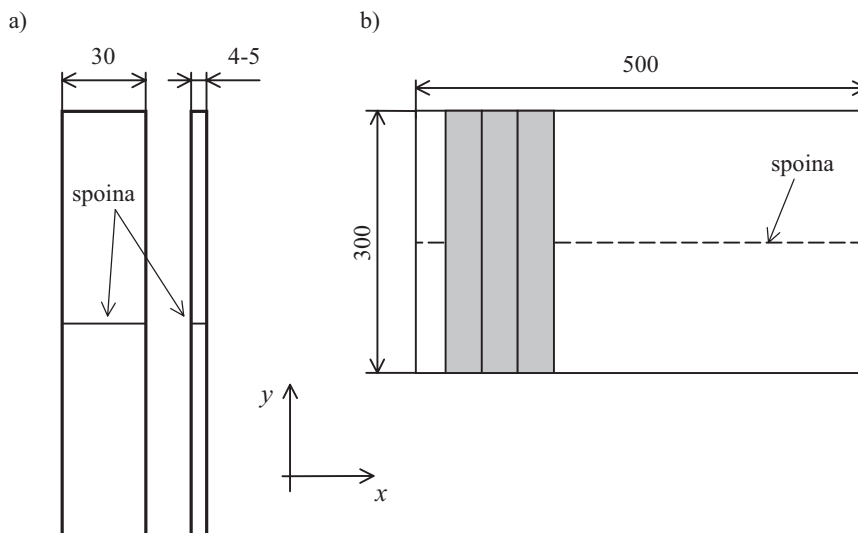
Porównanie własności statycznych materiału rodzimego MR i spoiny S wskazuje na występowanie znacznych różnic granicy plastyczności i wytrzymałości doraźnej przy porównywalnej wartości modułu sprężystości wzdłużnej, co jest zgodne z danymi literaturowymi prezentowanymi w rozdziale 2.3.

Badania własności materiału na mini- lub mikropróbkach wiążą się z pewnymi trudnościami i ograniczeniami. Jedną z podstawowych trudności stanowią małe wymiary próbek, co jest szczególnie widoczne w analizie materiału w strefie wpływu ciepła. W przypadku spawania laserowego często jej szerokość nie przekracza ułamków milimetra, a złożony kształt utrudnia wyodrębnienie próbki do badań.

Z kolei istotnym ograniczeniem tego typu badań jest brak uwzględnienia wzajemnego oddziaływania poszczególnych stref w trakcie obciążania złącza, szczególnie w przypadku obciążeń zmiennych w czasie.

B. Badania własności zmęczeniowych

Badania lokalnych własności zmęczeniowych przeprowadzono metodą stopniowego wzrostu na płaskich próbkach o wymiarach podanych na rysunku 5.6a, pobieranych ze złącza spawanego zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 5.6b.



Rys. 5.6. Próbkki do badań lokalnych własności zmęczeniowych w spoinie laserowej (a) oraz sposób ich pobierania ze złącza (b)

Badania zmęczeniowe prowadzono w warunkach obciążeń wahadłowo-zmiennych, co wymagało zastosowania dodatkowego oprzyrządowania zabezpieczającego próbkę przed wyboczeniem. Dla zminimalizowania wpływu tarcia oraz efektu frettingu, boczne powierzchnie próbek współpracowały z prowadnicami poprzez cienką folię teflonową. Na rysunku 5.7 pokazano próbkę przygotowaną do badania bez i z zamocowaną głowicą pomiarową LES.

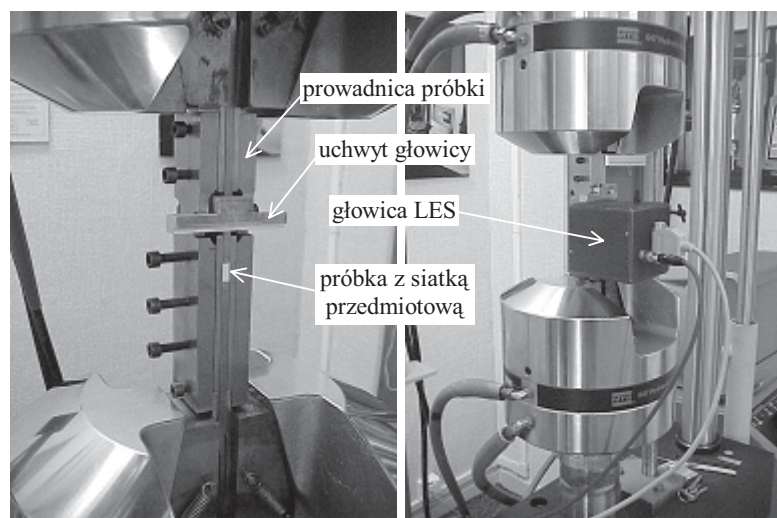
Jako wielkość kontrolującą próbę zmęczeniową zastosowano sygnał siły, przyjmując dziesięć poziomów amplitudy naprężenia nominalnego obliczanego zgodnie z zależnością

$$S = \frac{P}{F}, \quad (5.1)$$

gdzie:

P – siła,

F – pole przekroju poprzecznego próbki.



Rys. 5.7. Badania odkształceń lokalnych – stanowisko badawcze

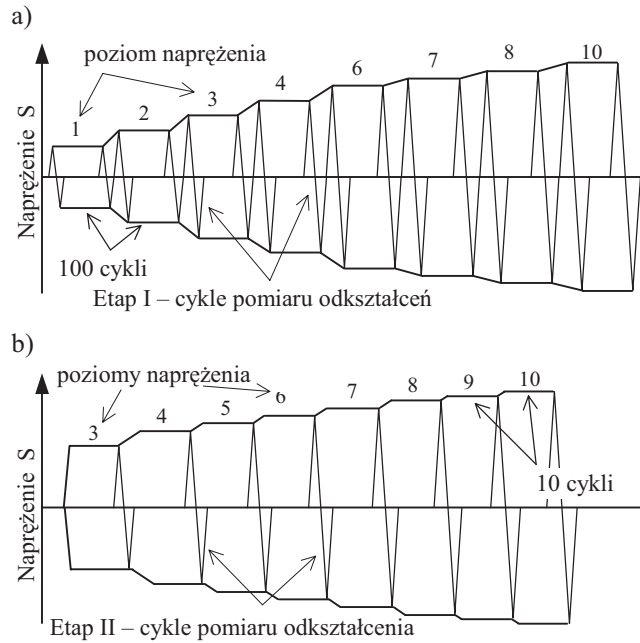
W tabelicy 5.2 przedstawiono program pomiarów parametrów pętli histerezy zrealizowany w trakcie badań w warunkach programowanego, stopniowo narastającego obciążenia. Schemat zastosowanego obciążenia pokazano na rysunku 5.8.

Tabelica 5.2. Program pomiarów

| Nr poziomu obciążenia | S_a MPa | etap I | | | | etap II | |
|-----------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| | | 1 | | 2 | | 3 | |
| | | nr cyklu n_i | Δn^* | nr cyklu n_i | Δn^* | nr cyklu n_i | Δn^* |
| 1 | 100 | 1 | 0 | 100 | 100 | - | - |
| 2 | 150 | 101 | 0 | 200 | 100 | - | - |
| 3 | 200 | 201 | 0 | 300 | 100 | 1010 | 10 |
| 4 | 250 | 301 | 0 | 400 | 100 | 1020 | 10 |
| 5 | 275 | - | - | - | - | 1030 | 10 |
| 6 | 300 | 401 | 0 | 500 | 100 | 1040 | 10 |
| 7 | 325 | 501 | 0 | 600 | 100 | 1050 | 10 |
| 8 | 350 | 601 | 0 | 700 | 100 | 1060 | 10 |
| 9 | 360 | - | - | - | - | 1070 | 10 |
| 10 | 375 | 701 | 0 | 710 | 10 | 1080 | 10 |

* liczba cykli zrealizowanych na poziomie S_a przed przeprowadzeniem pomiaru

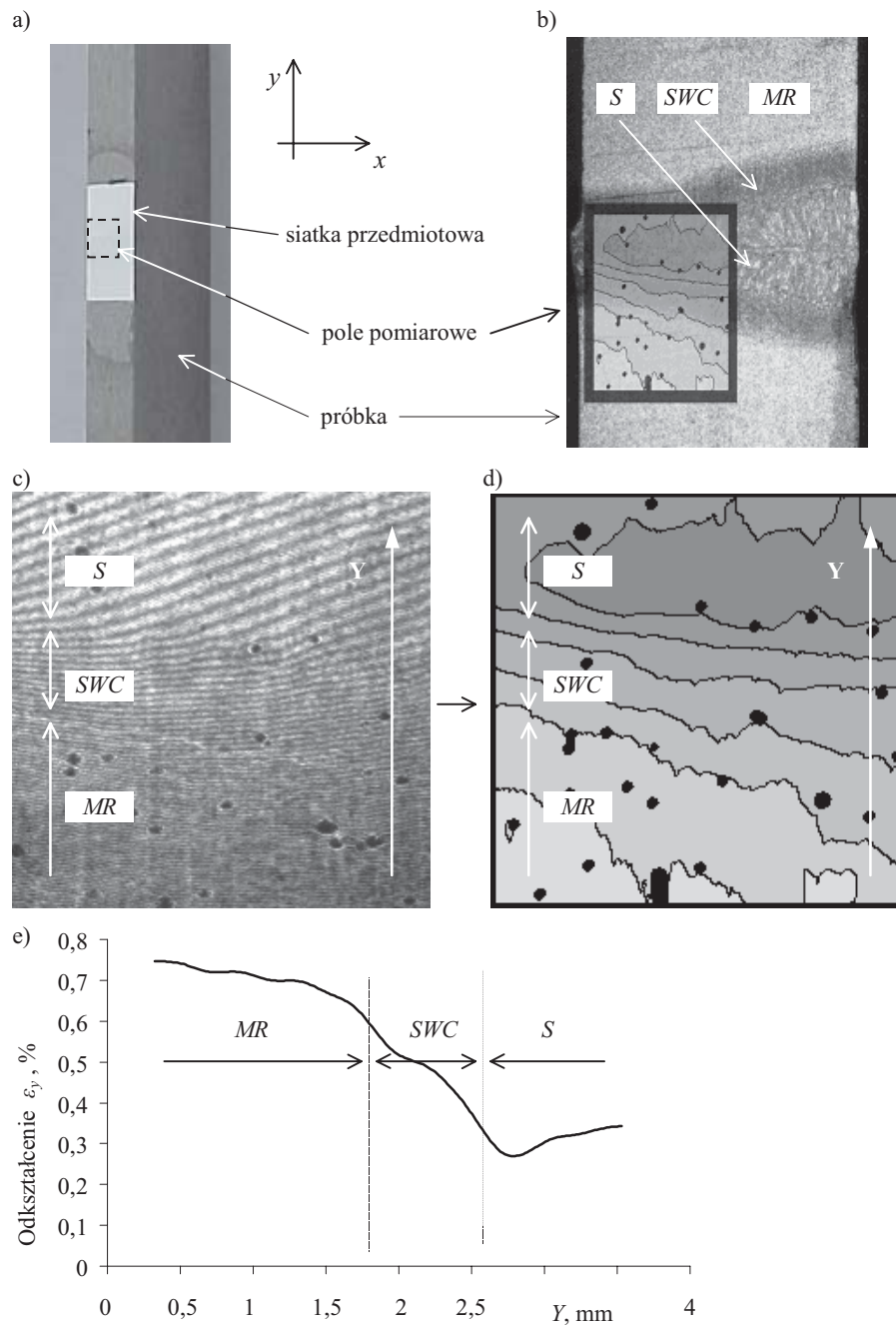
Pomiary realizowano w dwóch etapach. Podczas etapu I rejestrowano pętle histerezy dla pierwszego i ostatniego cyklu obciążenia na kolejnych poziomach naprężenia nominalnego. W etapie II pomiarów dokonywano dla dziesiątego cyklu następujących bezpośrednio po sobie poziomów obciążenia oznaczonych na rysunku 5.8 numerami 3-10 (tabelica 5.2).



Rys. 5.8. Schemat obciążenia próbek w trakcie badań zmęczeniowych: a) etap I, b) etap II

W trakcie badań zmęczeniowych analizowano przebieg zmian odkształceń lokalnych w poszczególnych strefach złącza spawanego. Wyznaczenie lokalnych własności zmęczeniowych wymaga analizy parametrów pętli histerezy odkształcenie-naprężenie rejestrowanych w pojedynczych cyklach obciążenia. Dla możliwie dokładnego zobrazowania przebiegu zmian siły i odkształcenia, pomiar realizowano w stu punktach pomiarowych ze stałym krokiem zmian siły. Zarejestrowane mapy prążków interferencyjnych umożliwiły wyznaczenie rozkładów odkształceń w złączu, co pozwalało na niezależną analizę przebiegu zmian odkształcenia w jego poszczególnych strefach w zadanych punktach pomiarowych.

Na rysunku 5.9 pokazano przykładową mapę prążków oraz określony na jej podstawie rozkład odkształceń w złączu z zaznaczonymi strefami materiału rodzimego *MR*, strefy wpływu ciepła *SWC* i spoiny *S*. W strefach tych, zgodnie z przyjętym programem badań, wyznaczono przebiegi pętli histerezy w układzie odkształcenie-naprężenie dla dziesięciu poziomów amplitudy naprężenia nominalnego. Do ich opracowania przyjęto założenie o jednakowej wartości naprężeń nominalnych wzdłuż całego złącza. Umożliwiło to późniejsze bezpośrednie wykorzystanie parametrów pętli histerezy w opracowywanych modelach materiałowych opisujących cykliczne własności złącza.



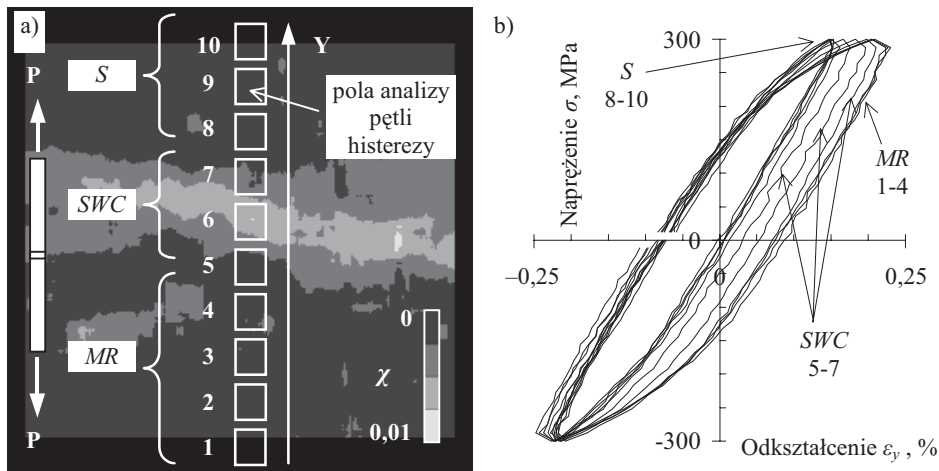
Rys. 5.9. Rozkład odkształceń w strefie złącza spawanego dla maksymalnej wartości naprężenia nominalnego dla $S_\sigma = 300$ MPa: a) próbka z siatką przedmiotową, b) rozkład odkształceń na tle makrostruktury złącza, c) obraz prążków interferencyjnych, d) e) rozkłady odkształceń z oznaczonymi strefami złącza

Jak łatwo zauważyć na podstawie rysunku 5.9d, odkształcenie w złączu charakteryzuje się zróżnicowaniem jego polowego rozkładu, które powoduje że w rzeczywistości w każdej części złącza występują inne jego wartości. Można tym samym założyć, że w konsekwencji w każdym miejscu złącza posiada ono inne własności zmęczeniowe, a wyznaczane parametry je opisujące będą zależeć od miejsca pomiaru odkształceń. Jednakże analiza wpływu miejsca pobierania danych na przebieg pętli histerezy wykazała, że problem ten dotyczy głównie strefy wpływu ciepła, w której gradient odkształcenia ma największe wartości. Na rysunku 5.10a pokazano przykładowy rozkład gradientu odkształcenia wyznaczony dla złącza poddanego obciążeniu wahadłowo zmiennemu o amplitudzie naprężenia nominalnego $S_a = 300$ MPa dla maksymalnej wartości siły w cyklu. Gradient odkształcenia χ obliczono jako

$$\chi = \left| \frac{\Delta \varepsilon_y}{\Delta L} \right| \quad (5.2)$$

gdzie: $\Delta \varepsilon_y$ – zakres zmiany odkształcenia ε_y w % na odcinku ΔL ,
 ΔL – długość odcinka odpowiadająca 0,28 mm.

Zróżnicowanie własności materiału w obszarze strefy wpływu ciepła potwierdza także analiza pętli histerezy wyznaczonych wzdłuż przekroju przez poszczególne strefy złącza (rys.5.10b). Różnice kształtu i rozmiaru pętli w strefie spoiny i materiale rodzimym są niewielkie, natomiast stają się istotne w strefie wpływu ciepła.

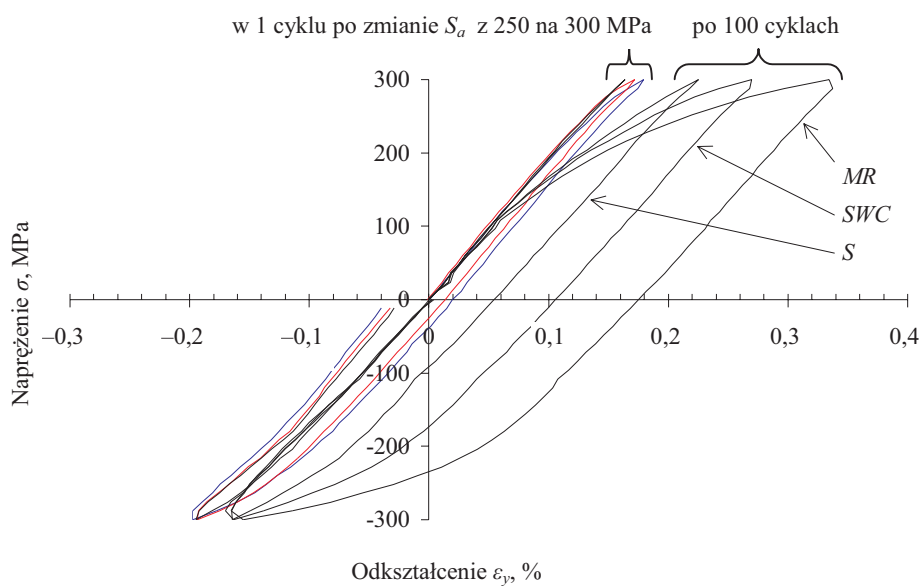


Rys. 5.10. Gradient odkształcenia w kierunku X (a) oraz pętli histerezy wyznaczone w strefach złącza oznaczonych na rysunku (b)

W związku z tym, do obliczeń odkształceń przyjęto metodę uśredniania ich wartości w polach pomiarowych obejmujących poszczególne strefy złącza. Taki zabieg oznacza, że wyznaczone w dalszej części pracy wartości K' i n' w przypadku strefy wpływu ciepła mają charakter średnich dla całego obszaru przejścia pomiędzy spoiną i materiałem rodzimym.

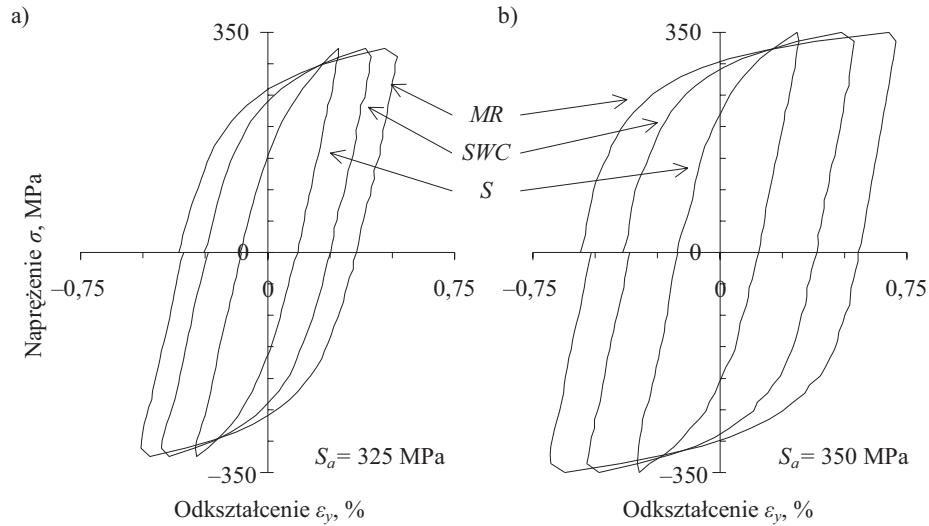
W pierwszym etapie badań, wyraźne odkształcenia plastyczne i co za tym idzie pętla histerezy pojawiły się dla wartości $S_a = 300$ MPa. W pierwszym cyklu obciążenia na

tym poziomie obciążenia (tj. przy przejściu z wartości naprężenia $S_a = 250$ na 300 MPa) odkształcenia plastyczne rozwinęły się głównie w półcyklu ściskania. Jednak po kolejnych cyklach obciążenia pomiary wykazały kształtowanie się pełnej pętli histerezy, co pokazano na rysunku 5.11. Dla łatwiejszego porównania otrzymanych przebiegów, pętle histerezy przemieszczono wzdłuż osi odkształcenia do środka układu współrzędnych. Charakter zmian pętli histerezy wskazuje na silne osłabianie materiału we wszystkich strefach złącza, wywołane pierwszymi cyklami obciążenia w zakresie odkształceń plastycznych.



Rys. 5.11. Pętle histerezy zarejestrowane dla $S_a = 300$ MPa – I faza badań

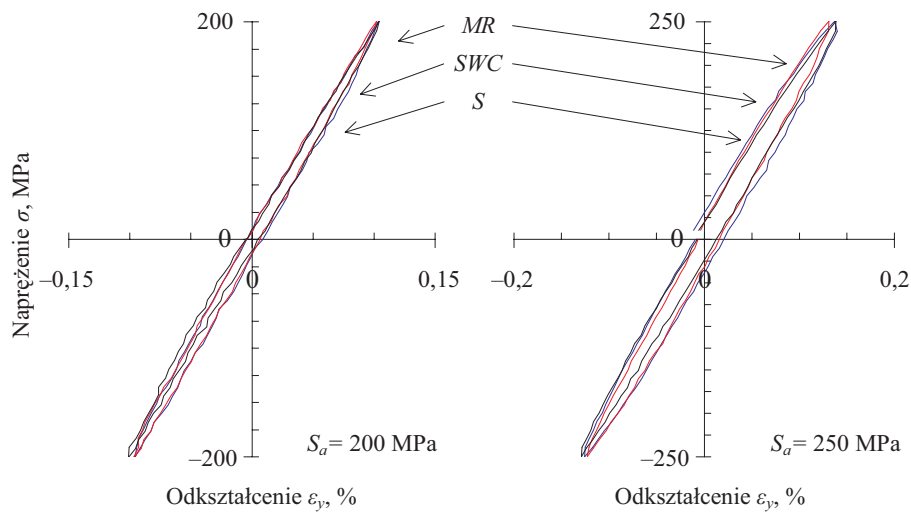
Pętle histerezy zarejestrowane dla dwóch następnych poziomów amplitudy naprężenia nominalnego $S_a = 325$ i 350 MPa po zrealizowaniu 100 cykli na każdym z poziomów pokazano na rysunku 5.12. Podobnie jak w przypadku naprężenia nominalnego $S_a = 300$ MPa, pętle przemieszczono wzdłuż osi odkształcenia, przy czym w tym przypadku dla uzyskania lepszej przejrzystości wykresów centrowano je względem ich środka.



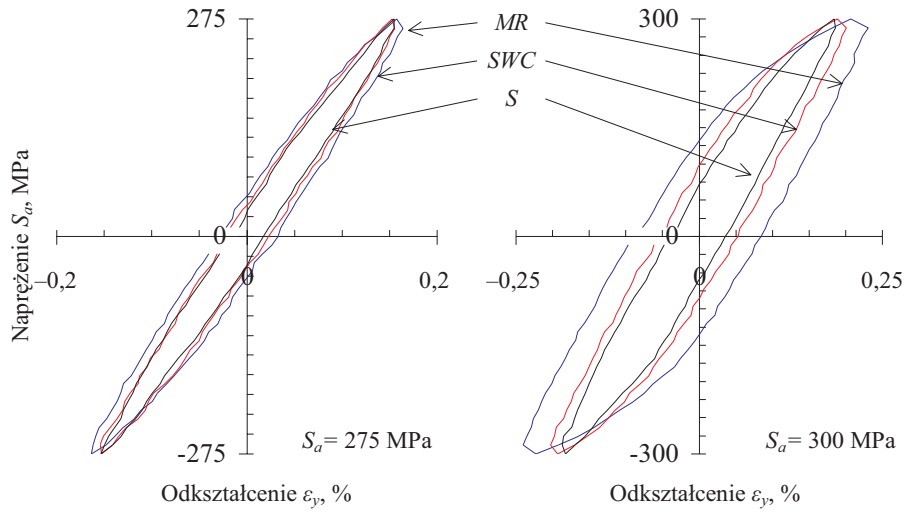
Rys. 5.12. Pętle histerezy zarejestrowane dla $S_a = 325$ MPa (a) i $S_a = 350$ MPa (b) – I etap badań

Realizacja prób w II etapie badań wykazała występowanie odkształceń plastycznych już na poziomie $S_a = 200$ MPa. Z tego względu, w drugiej – zasadniczej części badań – wyznaczano parametry pętli histerezy także dla poziomów $S_a = 200$ i 250 MPa.

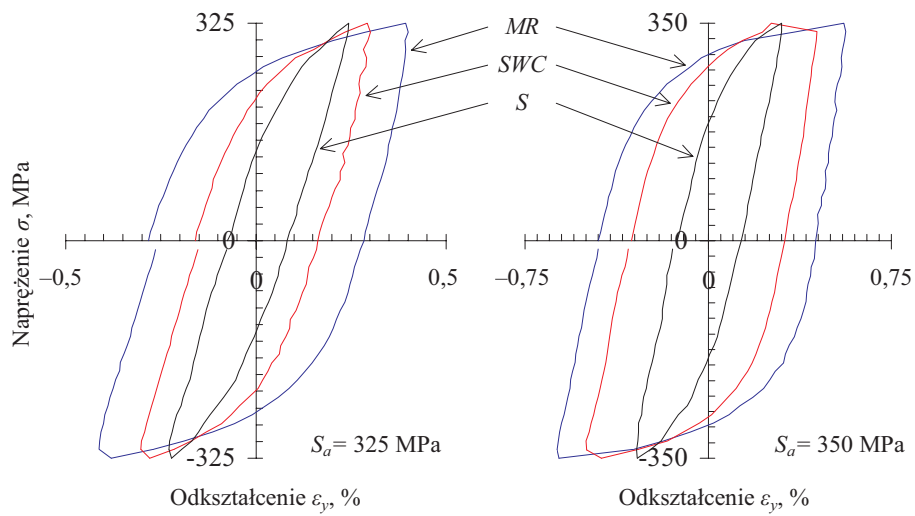
Wyniki pomiarów odkształceń zrealizowanych w II fazie badań przedstawiono na kolejnych wykresach (rys.5.13, 5.16).



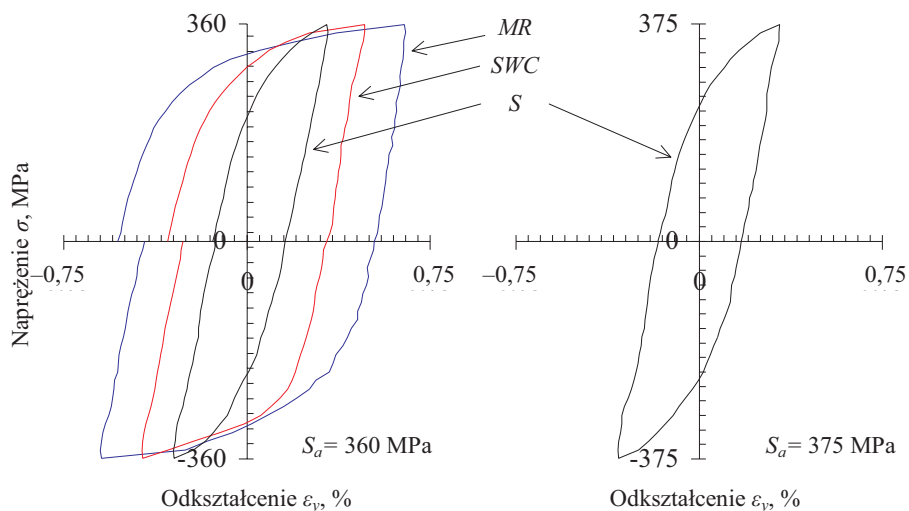
Rys. 5.13. Pętle histerezy zarejestrowane dla $S_a = 200$ i 250 MPa – II faza badań



Rys. 5.14. Pętle histerezy zarejestrowane dla $S_a = 275$ i 300 MPa – II faza badań



Rys. 5.15. Pętle histerezy zarejestrowane dla $S_a = 325$ i 350 MPa – II faza badań

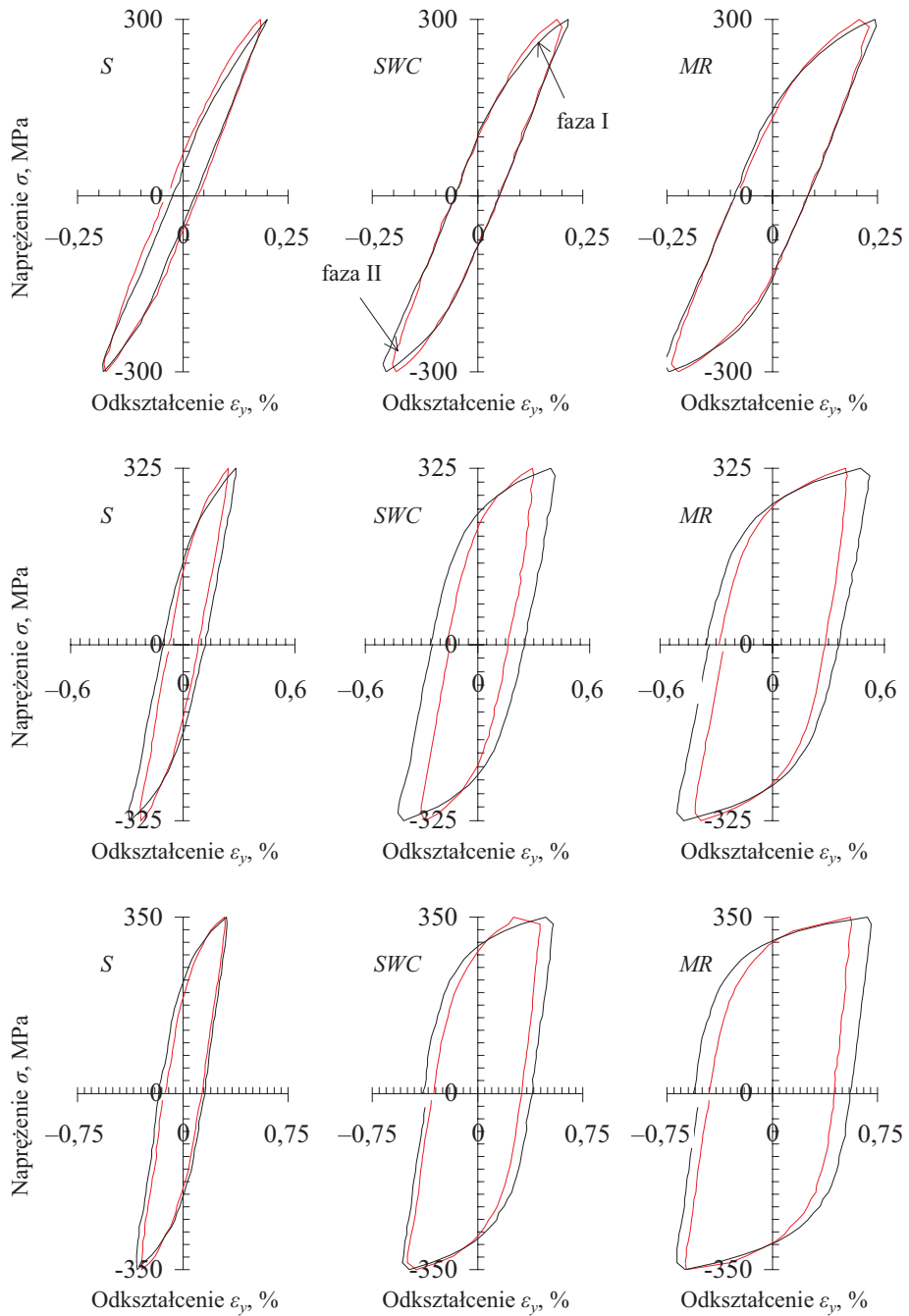


Rys. 5.16. Pętle histerezy zarejestrowane dla $S_a = 360$ i 375 MPa – II faza badań

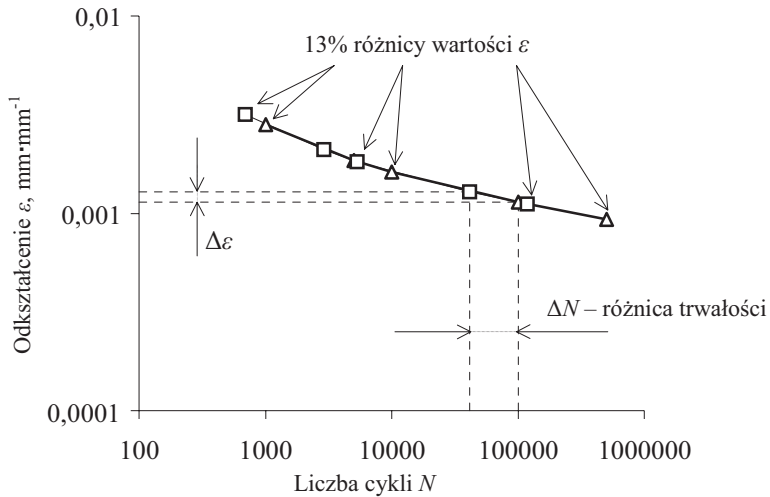
Wyniki pomiaru odkształceń dla amplitudy naprężenia nominalnego $S_a = 300$ MPa, przy której wystąpiły pierwsze odkształcenia plastyczne, wykazały skłonność materiału do osłabiania w pierwszych cyklach obciążenia we wszystkich analizowanych strefach złącza. Świadczyć o tym może przebieg zmian kształtu pętli histerezy po zrealizowaniu 100 cykli obciążenia pokazany na rysunku 5.11, gdzie zaobserwowano wzrost zakresu odkształcenia ε_y od około 20% dla strefy spoiny do 48% dla strefy materiału rodzimego.

Jednak porównanie pętli histerezy otrzymanych w pierwszej i drugiej fazie badań (rys.5.17) wskazuje na stosunkowo stabilne zachowanie materiału z tendencją do umacniania się. Różnice amplitudy odkształcenia całkowitego wyniosły od 4,5% dla strefy spoiny S ($S_a = 300$ MPa) do 28% dla strefy wpływu ciepła SWC ($S_a = 325$ MPa), przy ich średniej wartości wynoszącej 13%.

Jednak w przypadku obliczeń trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem odkształceniowych wykresów zmęczeniowych, nawet niewielka różnica wartości odkształceń może powodować duże różnice w wartościach przewidywanych trwałości. Schematycznie pokazano to na rysunku 5.18, gdzie w zależności od poziomu obciążenia różnice trwałości wyniosły od 30-80%.

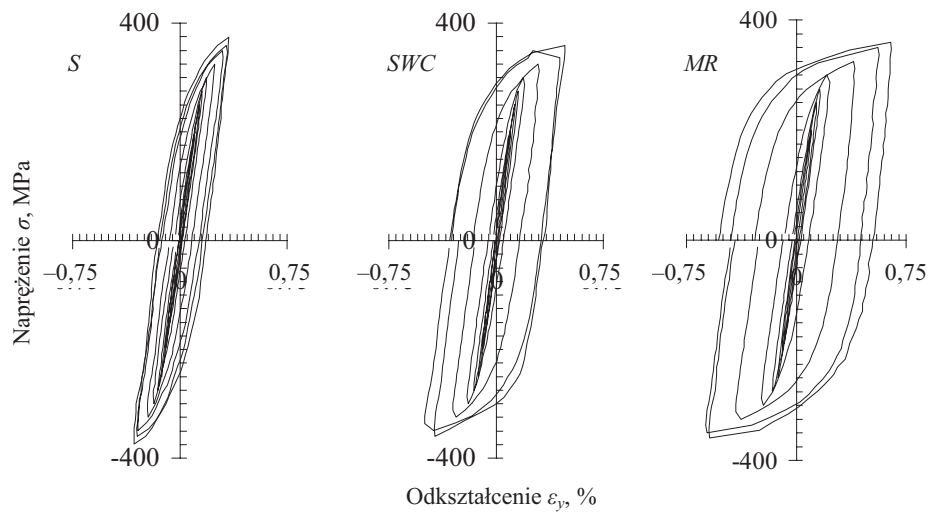


Rys. 5.17. Porównanie pętli histerezy I i II faza badań



Rys. 5.18. Różnice trwałości zmęczeniowej spowodowane różnicą wartości odkształceń

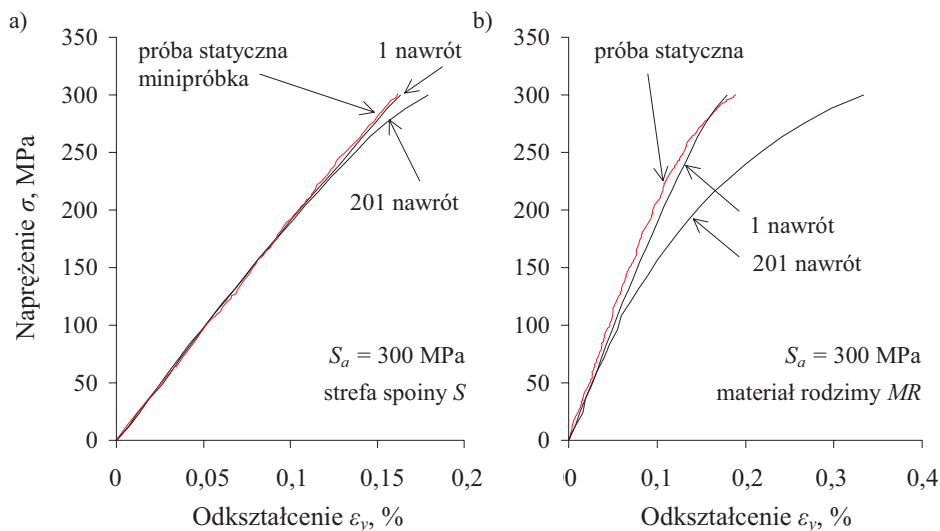
Porównanie pętli histerezy przedstawionych na rysunkach 5,13-5,16 oraz ich zestawienie przedstawione na rysunku 5.19 pozwala stwierdzić jednakowe zachowanie materiału we wszystkich strefach złącza w zakresie amplitudy naprężenia do 275 MPa.



Rys. 5.19. Porównanie pętli histerezy dla poszczególnych stref złącza

Przy jego wyższych wartościach, zgodnie z przewidywaniami wynikającymi z badań statycznych oraz z analizy mikrostruktury złącza, wystąpiło znaczne zróżnicowanie zakresu odkształceń plastycznych w pojedynczych cyklach obciążenia. Jednak przebiegi zmian naprężenia w funkcji odkształcenia w strefie spoiny i w materiale rodzimym wyznaczone w warunkach obciążenia zmiennego w czasie różnią się od wyników badań statycznych. Potwierdzają to wykresy na rysunku 5.20, na których porównano przebiegi naprężenie-

odkształcenie zarejestrowane w trakcie obciążenia zmęczeniowego ($S_a = 300$ MPa) z przebiegami otrzymanymi w próbie statycznej. Pomimo zgodności przebiegu „stycznego” i „zmęczeniowego” uzyskanego w pierwszym nawrocie obciążenia, wspomniany wcześniej efekt cyklicznego osłabiania materiału spowodował, że w kolejnych cyklach obciążenia nastąpił znaczny wzrost zakresu odkształceń plastycznych. Dotyczy to zarówno strefy spoiny (rys.5.20a), jak i materiału rodzimego (rys.5.20b). Z tego względu można przyjąć, że w przypadku badanej stali statyczne własności mechaniczne złącza nie mogą dawać miarodajnych informacji o jego własnościach zmęczeniowych.



Rys. 5.20. Porównanie przebiegu odkształcenie-napężenie dla próby statycznej i dla obciążenia zmęczeniowego w 1 i 201 (101 cykl) nawrocie dla strefy spoiny (a) i materiału rodzimego (b)

W trakcie badań zaobserwowano, przy wyższych poziomach obciążenia, efekt cyklicznego pełzania, głównie w strefie wpływu ciepła *SWC* i strefie materiału rodzimego *MR*, wynikający częściowo z przyjętego sposobu obciążania próbki, czyli z kontrolowaną wartością napężenia. Wystąpienie pełzania powoduje przede wszystkim zmianę wartości średniej odkształcenia, ale może także utrudniać jednoznaczne wyznaczenie zakresu odkształceń plastycznych w pojedynczym cyklu obciążenia, ze względu na brak efektu „zamykania się” pętli histerezy.

5.3. Wykresy cyklicznego odkształcenia

Jednym z podstawowych modeli, opisujących cykliczne własności materiału, stosowanych w zmęczeniowej analizie konstrukcji jest model Ramberga-Osgooda opisany zależnością:

$$\varepsilon_{ac} = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{TMK'} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.3)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ac} &= \Delta \varepsilon_c / 2 - \text{amplituda odkształcenia całkowitego,} \\ \varepsilon_{ae} &= \Delta \varepsilon_e / 2 - \text{amplituda odkształcenia sprężystego,} \\ \varepsilon_{ap} &= \Delta \varepsilon_p / 2 - \text{amplituda odkształcenia plastycznego,} \\ \sigma_a &= \Delta \sigma / 2 - \text{amplituda naprężenia,} \\ E &- \text{moduł Younga,} \\ K' &- \text{współczynnik wytrzymałościowy,} \\ n' &- \text{wykładnik cyklicznego umocnienia.} \end{aligned}$$

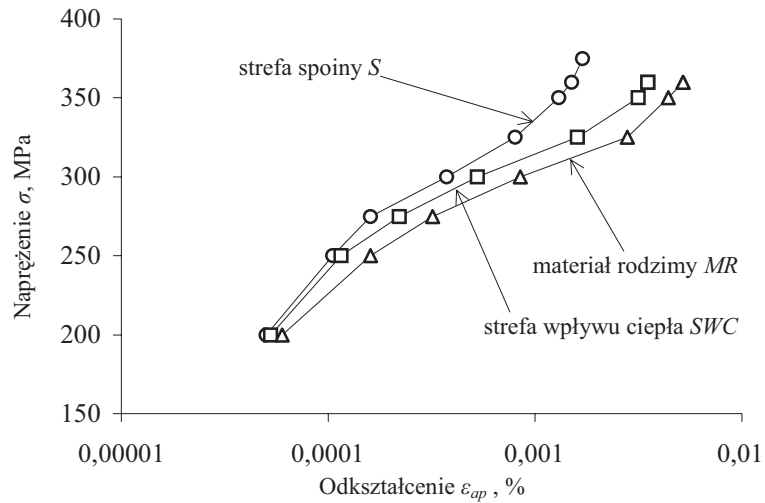
W celu wyznaczenia wykresu cyklicznego odkształcenia opisanego zależnością (5.3), niezbędna była analiza parametrów pętli histerezy. Na jej podstawie wyznaczono amplitudy odkształceń plastycznych dla poszczególnych stref złącza dla kolejnych wartości amplitudy naprężenia nominalnego. Ich wartości zestawiono w tabelicy 5.4 oraz przedstawiono w postaci graficznej na wykresie – rysunek 5.21. Z kolei w tabelicy 5.5 zawarto wyznaczone na ich podstawie wartości K' i n' , a na rysunku 5.22 opisane nimi wykresy cyklicznego odkształcenia WCO.

Tabela 5.4. Amplituda odkształcenia plastycznego ε_{ap}

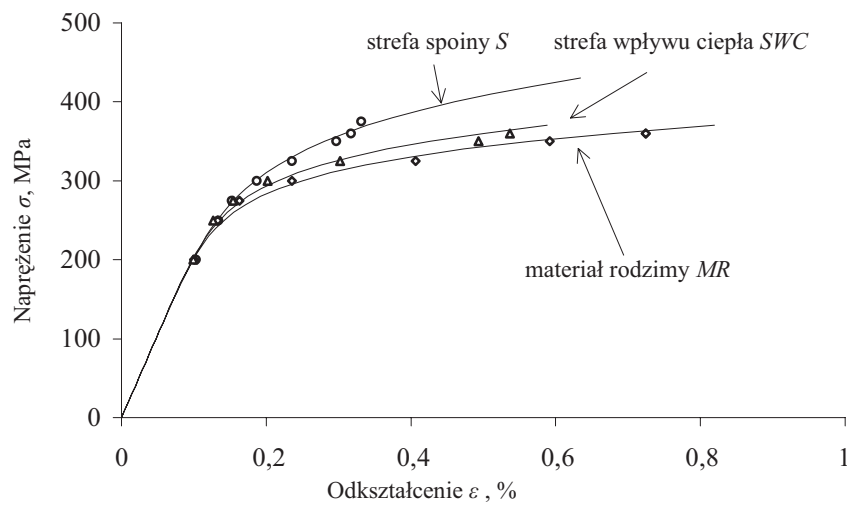
| Strefa złącza | S_a , MPa | | | | | | | |
|----------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 200 | 250 | 275 | 300 | 325 | 350 | 360 | 375 |
| | ε_{ap} , % | | | | | | | |
| spoina S | 0,005 | 0,011 | 0,016 | 0,038 | 0,081 | 0,132 | 0,151 | 0,170 |
| strefa wpływu ciepła SWC | 0,005 | 0,012 | 0,022 | 0,053 | 0,160 | 0,314 | 0,351 | - |
| materiał rodzimy MR | 0,006 | 0,016 | 0,032 | 0,085 | 0,281 | 0,441 | 0,523 | - |

Tabela 5.5. Cykliczne własności zmęczeniowe złącza spawanego laserowo

| Strefa złącza | n' | K' |
|----------------------------|--------|--------|
| | - | MPa |
| spoina S | 0,1555 | 1003,7 |
| strefa wpływu ciepła SWC | 0,1211 | 719,6 |
| materiał rodzimy MR | 0,1167 | 666,9 |

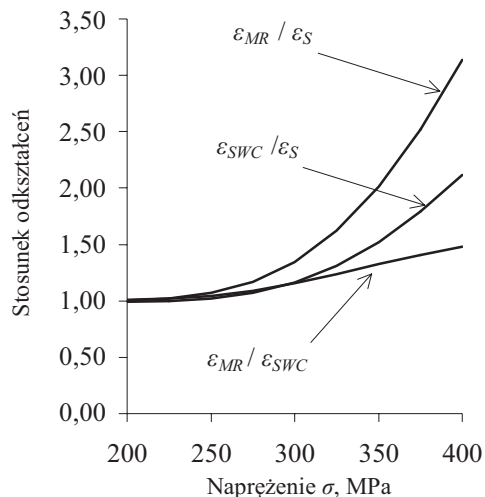


Rys. 5.21. Przebieg zmian wartości amplitudy odkształcenia plastycznego w SWC, MR i S



Rys. 5.22. Cykliczne własności zmęczeniowe złącza spawanego laserowo

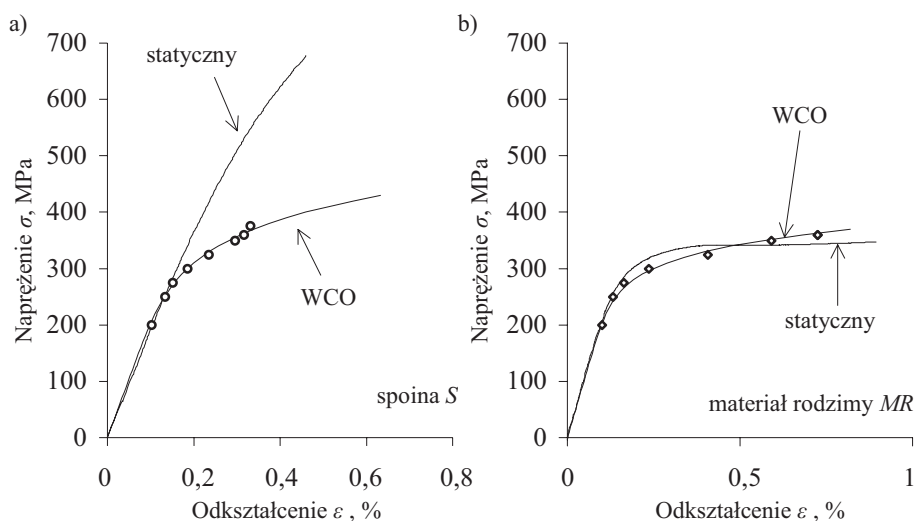
Silne zróżnicowanie odkształceń plastycznych występujące w poszczególnych strefach złącza spowodowało znaczne różnice wartości współczynnika wytrzymałościowego K' i wykładnika cyklicznego umocnienia n' . Jak wynika z rysunku 5.23, dla takiej samej wartości naprężeń stosunek wartości odkształceń w poszczególnych strefach może zmieniać się w przedziale od 1 do 3.



Rys. 5.23. Porównanie wartości odkształceń wyznaczonych na podstawie wykresów cyklicznego odkształcenia: ε_{MR} – odkształcenie materiału rodzimego, ε_S – odkształcenie spoiny, ε_{SWC} – odkształcenie strefy wpływu ciepła

Znajomość lokalnych własności zmęczeniowych w złączu w znaczący sposób wpływa na dokładność analizy odkształceń lokalnych w metodach obliczeń trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych. Wykorzystanie różnych wartości K' i n' pozwala m.in. na zróżnicowanie opisu materiału w obliczeniach numerycznych zmierzających do wyznaczenia lokalnego stanu naprężeń i odkształceń w połączeniu spawanym.

Na zakończenie analizy cyklicznych własności materiału w złączu spawanym, na rysunku 5.24 przedstawiono ich porównanie z własnościami wyznaczonymi w próbach statycznych. W tabelicy 5.6 zestawiono statyczne i cykliczne wartości umownej granicy plastyczności (wyznaczone dla odchylenia od liniowości o wartość $\varepsilon = 0,05\%$) dla materiału rodzimego i strefy spoiny. Jak już wspomniano podczas omawiania przebiegu pętli histerezy, własności statyczne znacznie odbiegają od własności cyklicznych. Dotyczy to w szczególności strefy spoiny S . Jak wykazały badania w warunkach obciążeń zmiennych, materiał w strefie spoiny ulegał znacznemu osłabieniu, któremu towarzyszyło duże obniżenie wartości cyklicznej granicy plastyczności. W przypadku materiału rodzimego można zauważyć obniżenie wartości granicy plastyczności przy jednoczesnym umocnieniu materiału w zakresie większych wartości odkształceń. Takie zachowanie spotyka się w przypadku stali konstrukcyjnych z wyraźną granicą plastyczności i odcinkiem plastycznego płynięcia.



Rys. 5.24. Porównanie własności statycznych i cyklicznych złącza spawanego laserowo: a) spoina S , b) materiał rodzimy MR

Tablica 5.6. Cykliczna i statyczna granica plastyczności: $\varepsilon = 0,05\%$

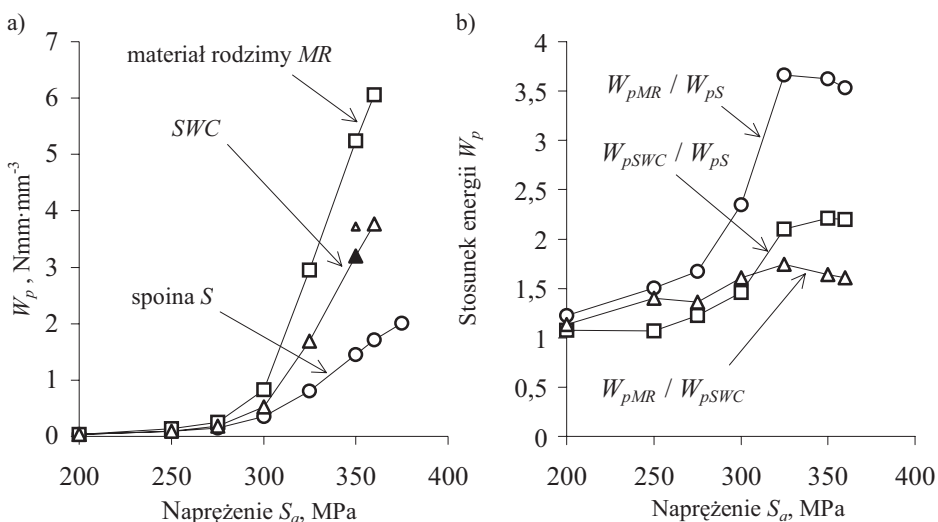
| Strefa złącza | statyczna | cykliczna | Różnica |
|-----------------------|------------------|------------------|--|
| | $R_{es\ 0,05\%}$ | $R_{ec\ 0,05\%}$ | $100\% \cdot (R_{es} - R_{ec}) / R_{es}$ |
| | MPa | MPa | % |
| spoina S | 560 | 320 | 43 |
| materiał rodzimy MR | 305 | 275 | 10 |

5.4. Energia pętli histerezy

Wyznaczone pętle histerezy umożliwiają, obok analizy odkształcenia lokalnego, także analizę energii odkształcenia plastycznego W_p . Na rysunku 5.25 przedstawiono przebieg zmian energii W_p , obliczanej jako pole wewnątrz pętli histerezy, w zależności od amplitudy naprężenia nominalnego S_a dla poszczególnych stref złącza. Porównanie wartości energii W_p dla tych samych poziomów amplitudy naprężenia nominalnego pokazane na rysunku 5.25b, podobnie jak w przypadku analizy odkształceń plastycznych, dowodzi silnego zróżnicowania jej wartości dla poszczególnych stref złącza. Jednak w odróżnieniu od wykresów pokazanych na rysunku 5.23 dynamika wzrostu stosunku energii odkształcenia plastycznego zostaje zahamowana na poziomie $S_a = 325$ MPa, co może wynikać z różnic w stopniu uplastycznienia materiału rodzimego i spoiny. Po przekroczeniu granicy plastyczności w spoinie następuje proporcjonalny wzrost energii odkształcenia plastycznego we wszystkich strefach, z lekką tendencją spadkową dla stosunku W_{pMR} / W_{pS} .

Możliwość wyznaczenia lokalnych parametrów energetycznych powinna wpłynąć na dokładność obliczeń trwałości zmęczeniowej metodami energetycznymi. Powinna także umożliwić ich rozwój w przypadku analiz zmęczeniowych połączeń spawanych, a w szczególności połączeń wykonywanych techniką laserową. Jednak w tym celu nie-

zbędne jest przeprowadzenie szerszego programu badań, obejmującego analizę trwałości zmęczeniowej próbek wykonanych z różnych materiałów, w różnych warunkach obciążenia i różnej geometrii złączy.



Rys. 5.25. Energia odkształcenia plastycznego W_{pMR} – w strefie materiału rodzimego, W_{pS} – w strefie spoiny, W_{pSWC} – w strefie wpływu ciepła: a) wartości bezwzględne, b) porównanie energii w poszczególnych strefach złącza

5.5. Podsumowanie

Jak wykazano w analizie wyników badań, niejednorodność struktury wywołana spawaniem laserowym jest przyczyną silnego zróżnicowania własności materiału w poszczególnych strefach złącza, przy czym różnice te dotyczą zarówno własności statycznych (rys.5.5), jak i cyklicznych (rys.5.22). Na podstawie porównania własności statycznych i cyklicznych (zmęczeniowych) wykazano jednocześnie, że cyklicznie zmienne obciążenie spowodowało zmianę stanu materiału w stosunku do obciążeń statycznych (rys.5.20 i 5.24), objawiającą się jego osłabieniem.

Wyznaczane w zaprezentowany sposób lokalne własności cykliczne złącza mogą znaleźć bezpośrednie zastosowanie zarówno w odkształceniowych metodach obliczeń trwałości zmęczeniowej spawanych elementów konstrukcyjnych (punkt 2.1c), jak i numerycznej analizie stanu odkształceń i naprężeń w połączeniach spawanych, w tym w połączeniach wykonanych technikami spawania laserowego. Możliwość wyznaczania lokalnych, cyklicznych własności materiałowych powinna wpłynąć także na skuteczność numerycznej analizy stanu odkształceń i naprężeń w innych elementach konstrukcyjnych wykazujących zróżnicowanie własności materiałowych.

Rejestracja przebiegów pętli histerezy w poszczególnych strefach złącza spawane- go umożliwia także, obok analizy cyklicznych własności materiałowych, wyznaczanie odkształceniowych i energetycznych wykresów trwałości zmęczeniowej.

Przedstawione w pracy wyniki badań pozwalają stwierdzić, że zastosowana w badaniach metoda stopniowego wzrostu w połączeniu z metodą laserowej interferometrii siatkowej umożliwiła skuteczne wyznaczenie lokalnych własności materiałowych w poszczególnych strefach złącza spawanego laserowo. Pozwala to wnioskować, że również w innych przypadkach lokalnego zróżnicowania własności materiałowych będzie możliwe wyznaczenie danych niezbędnych do ich opisu.

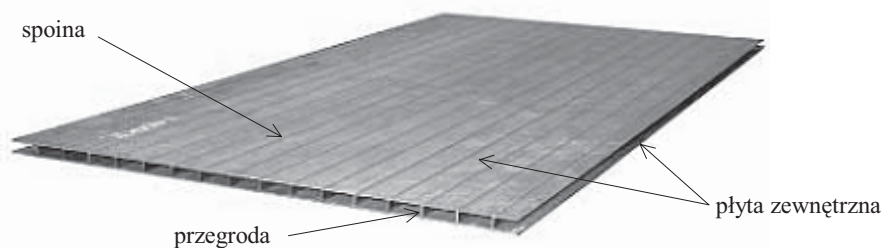
6. Rozkład odkształceń w obszarach nieciągłości geometrycznych i zróżnicowanych własności materiałowych

6.1. Wprowadzenie

Możliwość powstawania pęknięć zmęczeniowych w miejscach spiętrzeń naprężeń i odkształceń to najczęstszy przypadek zakładany w analizie zmęczeniowej różnorodnych obiektów technicznych. W większości rozważań i analiz podstawowe znaczenie nadaje się w tym zakresie karbom geometrycznym. Jednak jak wykazały badania przedstawione w rozdziale 5. gradient odkształceń może być także spowodowany zróżnicowaniem własności materiałowych.

Obiektami, w których omawiane zagadnienia znajdują silne odbicie są połączenia spawane. Omawiane w rozdziale 2. metody obliczeń trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych, a w tym w szczególności metody bazujące na podejściu lokalnym, traktują obydwie źródła koncentracji odkształceń niezależnie, np. poprzez analizę współczynnika spiętrzenia naprężeń K_t i wybór w analizie trwałości zmęczeniowej cyklicznych własności materiałowych dla jednej ze stref złącza: materiału rodzimego lub strefy wpływu ciepła. Takie podejście nie gwarantuje jednak pełnego uwzględnienia skutków oddziaływania nieciągłości geometrycznych i niejednorodności materiałowych występujących w elementach konstrukcyjnych. Doświadczalną analizę łącznego wpływu działania karbu oraz zróżnicowania własności zmęczeniowych na rozkład odkształceń przedstawiono na przykładzie złącza spawanego poddanego cyklicznemu obciążeniu.

Badania rozkładów odkształceń w połączeniu spawanym przeprowadzono na złączu laserowym modelu stalowej struktury panelowej typu „sandwich” (rys.6.1), w której dwie równoległe płyty zewnętrzne połączone są prostopadłe do ich powierzchni przegrody (wzmocnienia). Przegrody te mocowane są do płyt spoinami laserowymi wykonywanymi od zewnętrznej strony panelu.



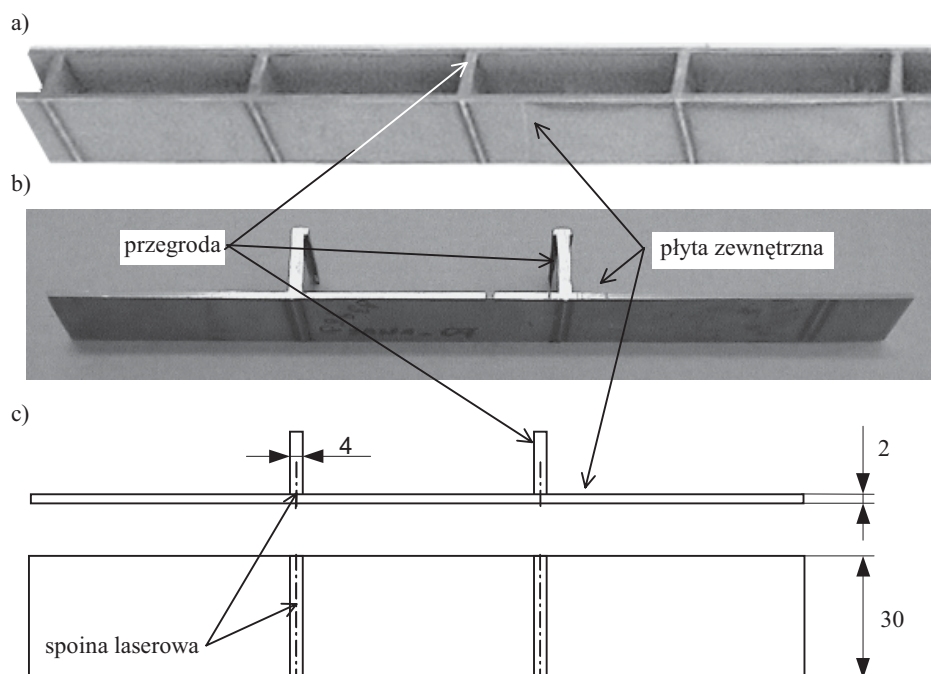
Rys. 6.1. Stalowa struktura panelowa typu „sandwich” firmy (MW Niemcy) [50]

Uwagę skoncentrowano głównie na badaniach odkształceń w pojedynczym złączu w próbkach o budowie pokazanej na rysunku 6.2. Pobierane do badań fragmenty panelu obejmowały płytę z jednostronnie przyspawanymi przegrodami. Materiał płyty i przegrody stanowiła stal okrętowa o składzie chemicznym podanym w tabelicy 6.1.

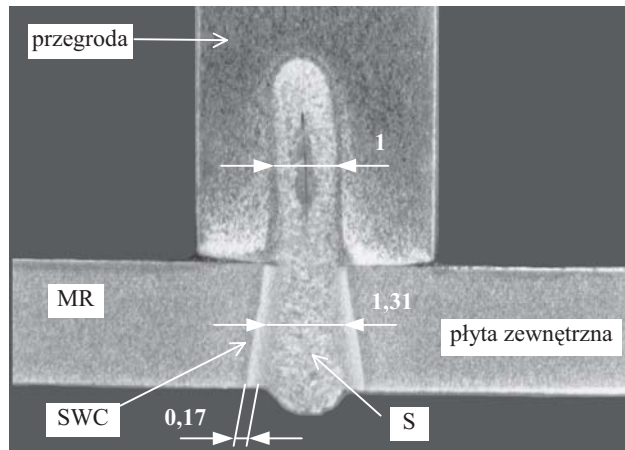
Analiza makrostruktury próbek wykazała charakterystyczną dla złączy laserowych, wykonanych w stalach ferrytycznych, postać strefy wpływu ciepła i spoiny. Ich kształt oraz wymiary pokazano na rysunku 6.3.

Tablica 6.1. Skład chemiczny materiału płyty i przegrody (w % zawartości)

| | | | | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Płyta | C | Si | S | P | Mn | Ni | Cr | Mo |
| | 0,083 | 0,004 | 0,007 | 0,014 | 0,393 | 0,066 | 0,024 | 0,000 |
| | Cu | Ti | Al | Sn | Zn | Mg | Cr | |
| | 0,021 | 0,004 | 0,036 | 0,004 | 0,019 | 0,044 | 0,039 | |
| Przegroda | C | Si | S | P | Mn | Ni | Cr | Mo |
| | 0,033 | 0,000 | 0,014 | 0,010 | 0,207 | 0,052 | 0,021 | 0,004 |
| | Cu | Ti | Al | Sn | Zn | Mg | Cr | |
| | 0,018 | 0,004 | 0,030 | 0,004 | 0,018 | 0,044 | 0,034 | |

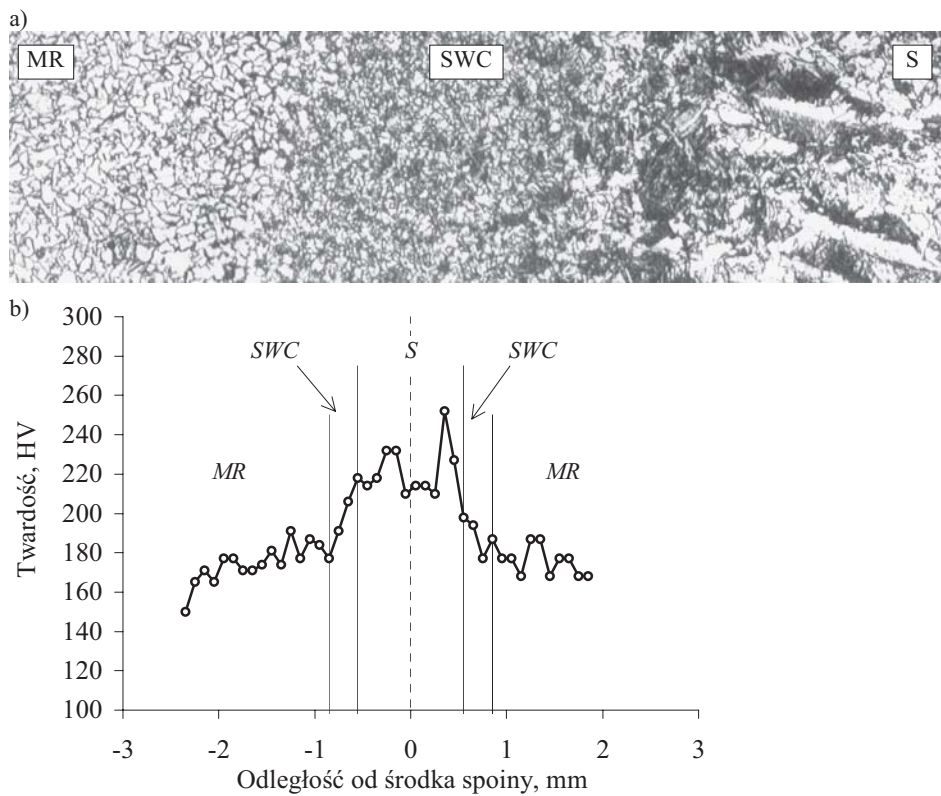


Rys. 6.2. Próbkę do badań: a) fragment panelu typu „sandwich”, b) próbka, c) wymiary próbki



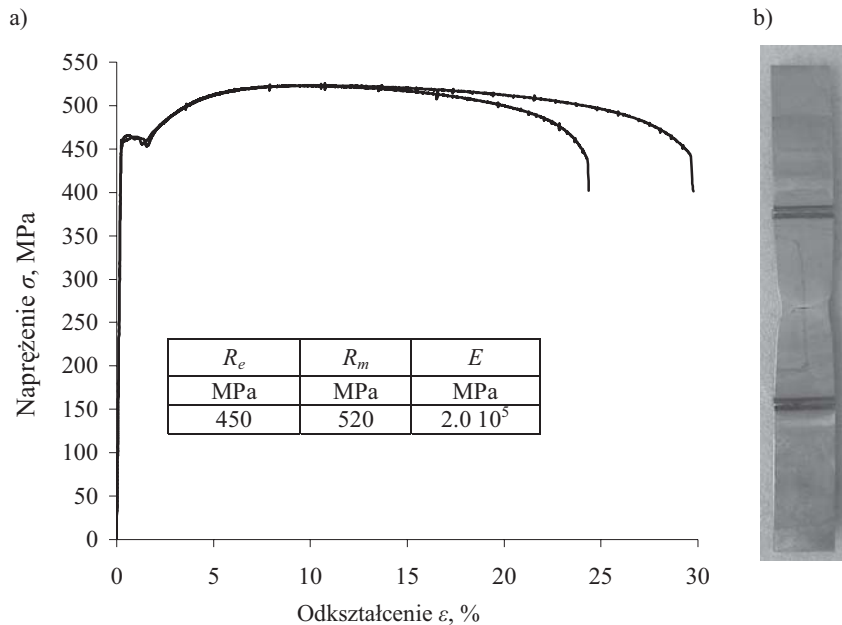
Rys. 6.3. Makrostruktura złącza w próbce

Wyniki badań mikrograficznych złącza z oznaczonymi strefami wpływu ciepła i spoiny pokazano na rysunku 6.4a. Zróżnicowanie własności materiału w strefie złącza widoczne jest także na wykresie rozkładu mikrotwardości przedstawionym na rysunku 6.4b.



Rys. 6.4. Mikrostruktura (a) i twardość (b) złącza w płycie zewnętrznej

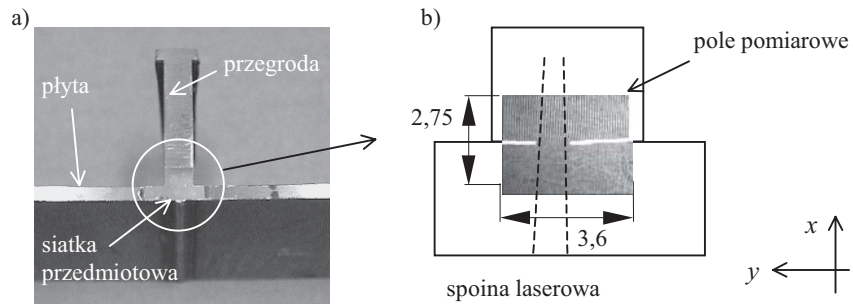
Rysunek 6.5a ilustruje wykres statycznego rozciągania oraz wartości granicy plastyczności R_e , wytrzymałości doraźnej R_m i modułu E wyznaczone dla próbki pokazanej na rysunku 6.5b.



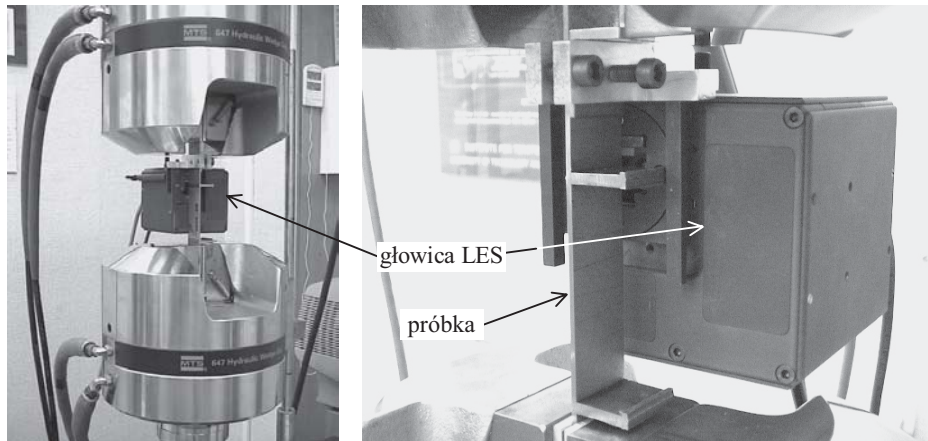
Rys. 6.5. Własności statyczne materiału płyty (a) dla próbek panelu typu „sandwich” (b)

W trakcie badań analizowano rozkłady odkształceń w strefie złącza powstające w wyniku obciążenia próbki siłą osiową zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 6.6a. Do pomiaru odkształceń w dwóch kierunkach x i y w polu o wymiarach około 3 mm x 4 mm zastosowano system laserowego ekstensometru siatkowego LES. Pole pomiaru odkształceń objęło fragment płyty zewnętrznej i przegrody. Jego położenie przedstawiono na rysunku 6.6. Z kolei na rysunku 6.7 pokazano próbkę z zamocowaną głowicą pomiarową LES.

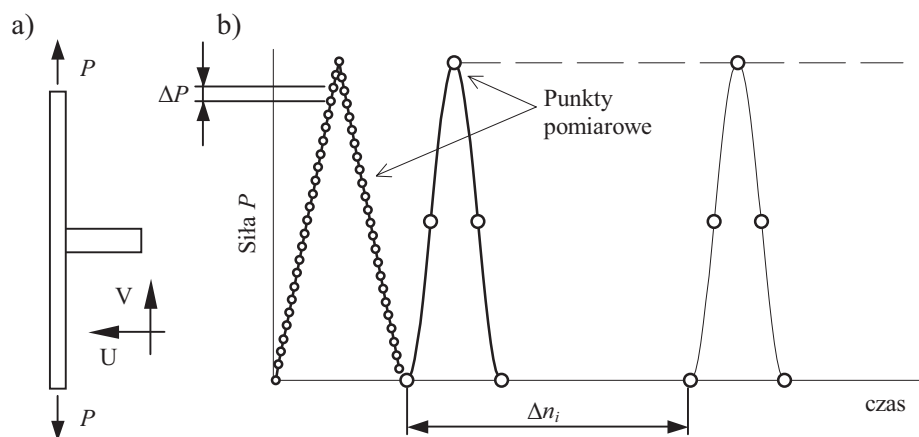
Program badań (rys.6.8), opisany w tablicy 6.2, obejmował realizację prób zmęczeniowych, podczas których analizowano rozkłady odkształceń w próbkach poddanych obciążeniom jednostronnie zmiennym o współczynniku asymetrii cyklu $R = 0$. Próby realizowano dla kontrolowanej wartości naprężenia nominalnego S . Dla większości próbek, w pierwszym cyklu obciążenia realizowano pomiar odkształceń z zadanym krokiem przyrostu naprężenia nominalnego S . W dalszej części próby zmęczeniowej pomiar odkształceń odbywał się dla pięciu faz cyklu, co zadaną liczbę cykli obciążenia Δn_i , aż do pojawienia się pęknięcia.



Rys. 6.6. Pole pomiaru odkształceń: a) widok próbki z naniesioną siatką przedmiotową, b) położenie pola pomiarowego



Rys. 6.7. Próbką z zamocowaną głowicą LES w trakcie badań



Rys. 6.8. Program badań: a) sposób obciążania próbek, b) przebieg obciążenia

Tablica 6.2. Program badań

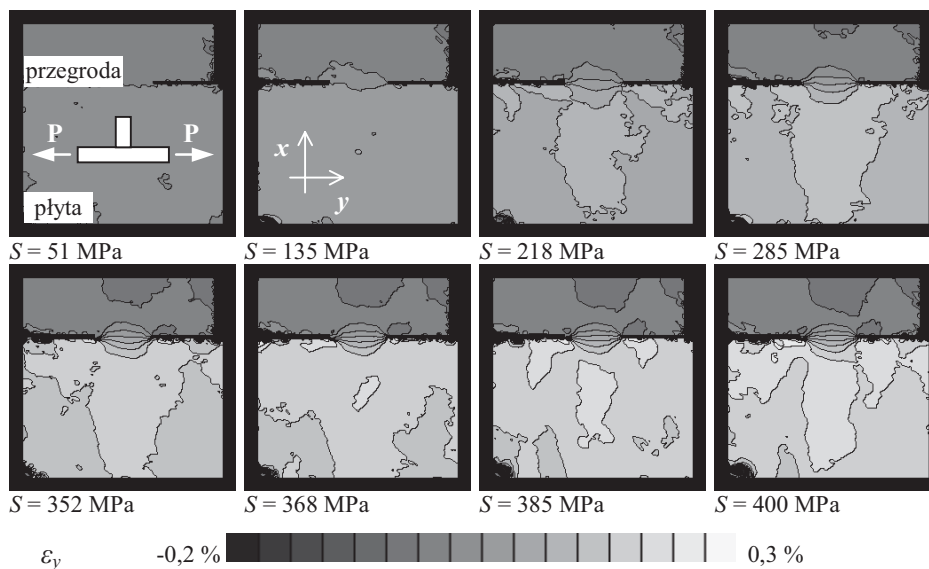
| Lp. | Siła P_{max} , kN | Nap.nom. S_{max} , MPa | Krok ΔS , MPa | Zakres trwałości, kilocykle | | | | |
|-----|------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------|---------|----------|---------|
| | | | | Krok pomiaru Δn_i , cykle | | | | |
| 1 | 21 | 350 | - | do 0,1 | 0,1-1 | 1-60 | 60-68 | 68-88 |
| | | | | 10 | 100 | 500 | 1000 | 2000 |
| 2 | 23 | 383 | 17 | 0,1-53* | | | | |
| | | | | 500 | | | | |
| 3 | 18 | 300 | 2-12 | 0,1-1,8 | 1,8-71 | 71-242 | | |
| | | | | 100 | 500 | 1000 | | |
| 4 | 24 | 400 | 34 | 0,1-3,9 | 3,9-23 | 23-38 | | |
| | | | | 100 | 200 | 100 | | |
| 5 | 24 | 400 | - | 0,1-0,5 | 0,5-75 | 75-94,6 | 94,6-107 | |
| | | | | 100 | 500 | 100 | 200 | |
| 6 | 24 | 400 | 17 | 0,05-8,2 | 8,2-13,5 | 13,5-64 | 64-75,8 | 75,8-83 |
| | | | | 100 | 500 | 1000 | 100 | 500 |

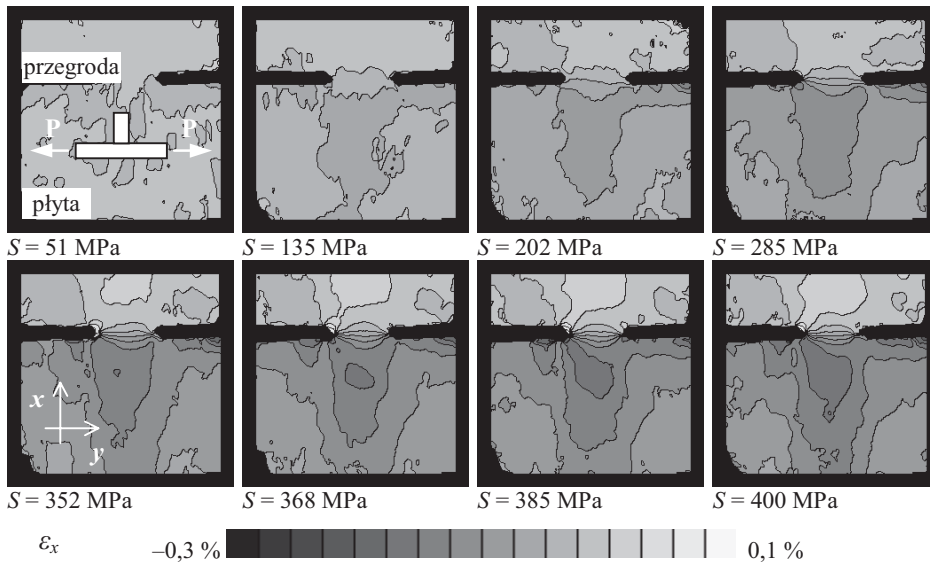
* próba nie zakończona

6.2. Wyniki badań oraz ich analiza

A. Rozkład odkształceń w strefie złącza w pojedynczym cyklu obciążenia

Wyniki pomiarów odkształceń w pojedynczym cyklu obciążenia przedstawiono na przykładzie próbki oznaczonej w tablicy 6.2 numerem 6. Na podstawie zarejestrowanych map prążków interferencyjnych wyznaczono rozkłady odkształceń dla kierunków x i y , a ich wybrane przykłady pokazano na rysunkach 6.9 i 6.10.

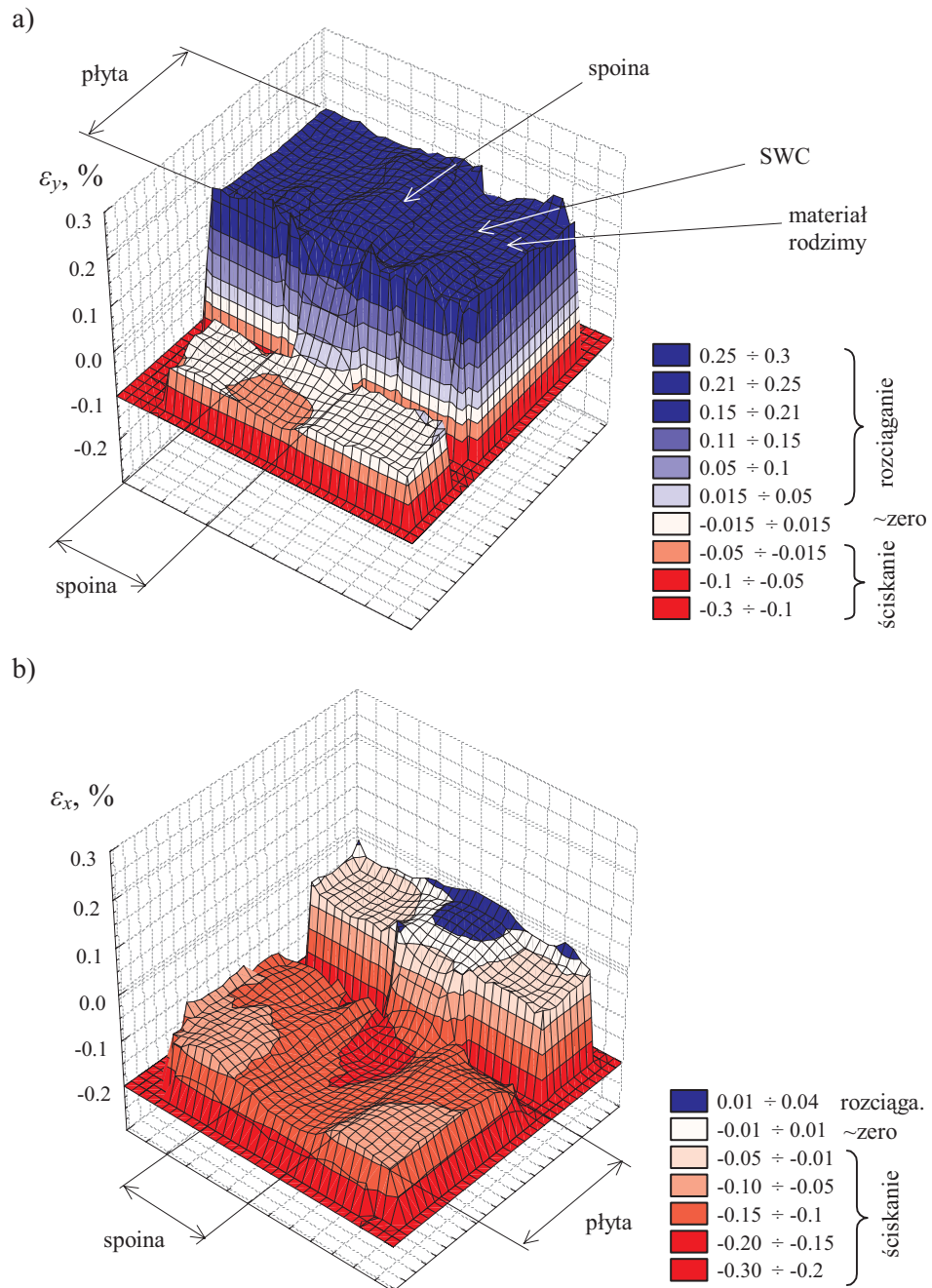
Rys. 6.9. Przykładowe mapy rozkładu odkształceń w złączu dla kierunku y



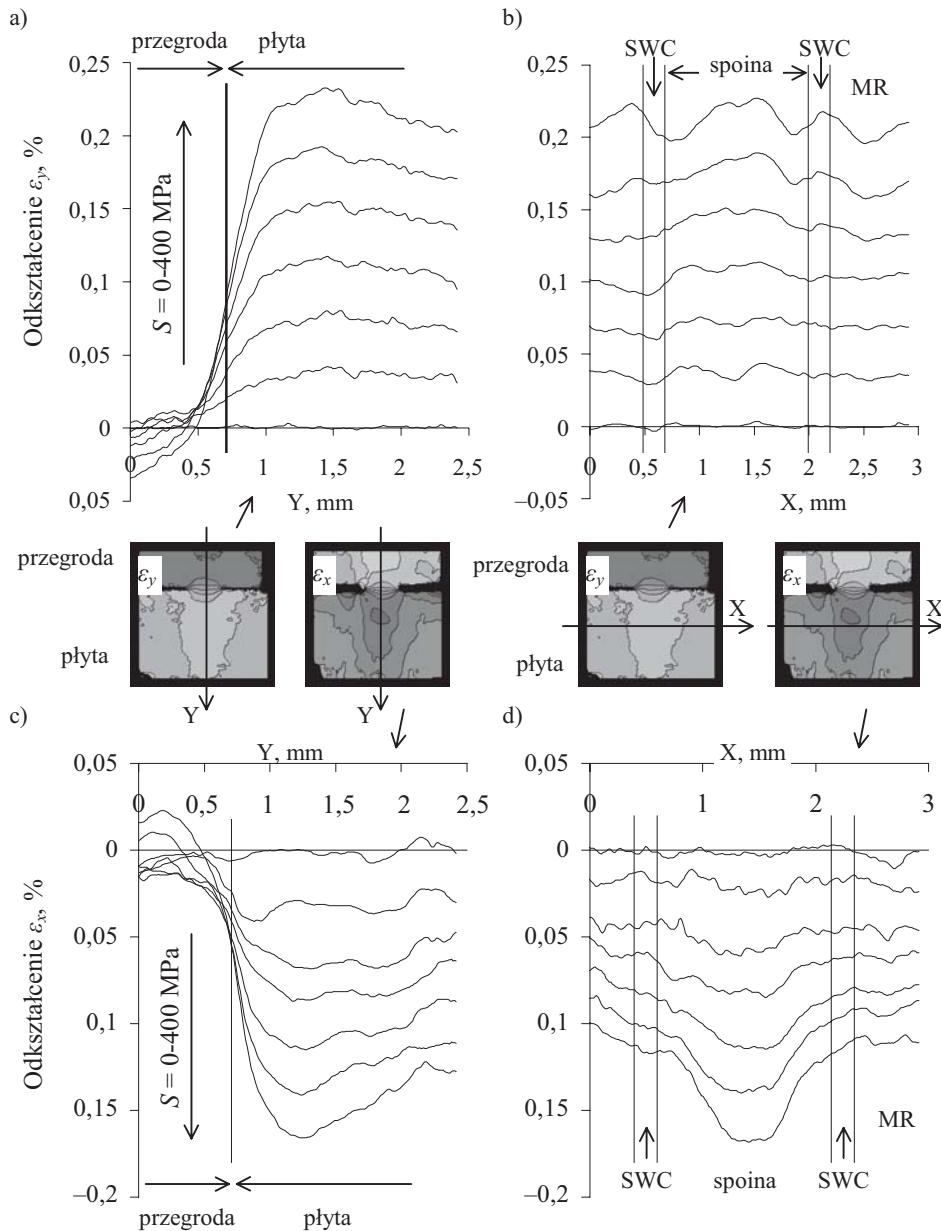
Rys. 6.10. Przykładowe mapy rozkładu odkształceń w złączu dla kierunku x

Spoina laserowa łącząca płytę z przegrodą w bardzo istotny sposób wpływa na stan odkształceń w próbce, powodując zaburzenia ich jednorodnego rozkładu. Pokazane na rysunku 6.11 rozkłady odkształceń w strefie złącza w próbce obciążonej osiową siłą rozciągającą (dla $S = 400$ MPa) wskazują na występowanie gradientów odkształceń wywołanych zarówno zróżnicowaniem własności materiałowych w strefie spoiny, jak i karbem geometrycznym, jakim jest samo złącze w obszarze przejścia z płyty do przegrody. W przypadku odkształceń w kierunku y (kierunek działania obciążenia – rys.6.11a), połączenie spoiną dwóch elementów, z których jeden jest obciążony siłą osiową, a drugi pozostaje w stanie swobodnym spowodowało, że w spoinie na odcinku przejścia pomiędzy płytą a przegrodą musiała nastąpić gwałtowna zmiana odkształceń z rozciągających w płycie do zbliżonych do zera w przegrodzie. Doprowadziło to do powstania silnego gradientu odkształcenia na całej szerokości spoiny. Podobny efekt zaobserwowano w przypadku analizy odkształceń w kierunku x (rys.6.11b), przy czym w tym przypadku w płycie powstały odkształcenia ściskające, a w przegrodzie niewielkie odkształcenia rozciągające.

Przedstawione rozkłady odkształceń pozwoliły także zaobserwować występowanie gradientu odkształceń w kierunku wzdłużnym próbki. Jednak w tym przypadku wywołany jest on głównie zróżnicowaniem własności materiału w poszczególnych strefach złącza i ujawnił się przy wyższych wartościach naprężenia nominalnego. Szczegółowy przebieg rozkładu odkształceń w przekrojach poprzecznych i wzdłużnych próbki dla kolejnych poziomów naprężenia nominalnego S pokazano na rysunku 6.12.



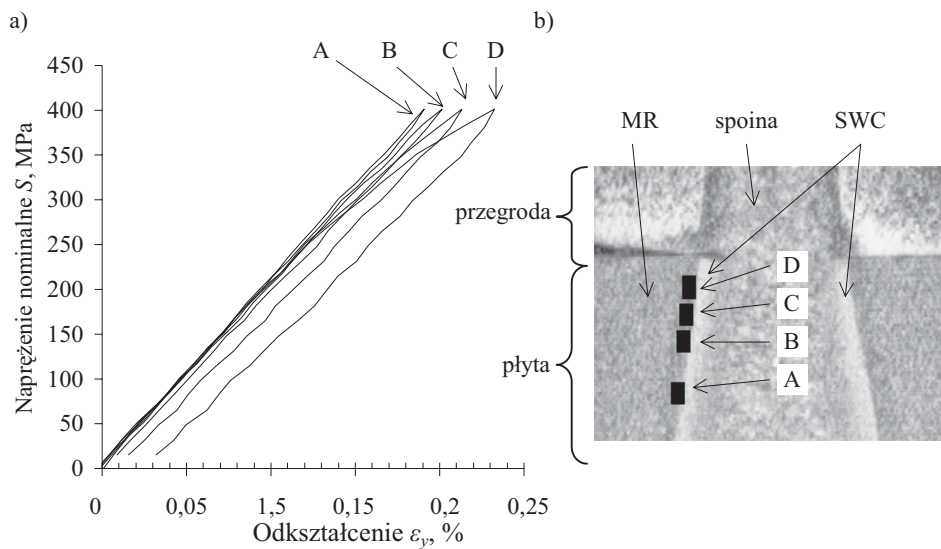
Rys. 6.11. Strefy odkształceń rozciągających i ściskających w złączu



Rys. 6.12. Przebieg zmian rozkładu odkształceń ε_y (a,b) i ε_x (c,d) w złączu laserowym dla kolejnych poziomów naprężenia nominalnego S

Analiza zmian rozkładów odkształceń ε_y i ε_x wzdłuż osi Y wskazuje na stopniowy, proporcjonalny do zmian obciążenia przebieg zmian odkształceń, co może wskazywać na ściśle „geometryczny” (wywołany działaniem karbu) charakter spiętrzenia odkształceń. Nieco inaczej przebiegały zmiany rozkładu odkształceń wzdłuż osi X, w szczególności w kierunku y (rys.6.12b). Gradienty odkształcenia w strefie przejścia pomiędzy

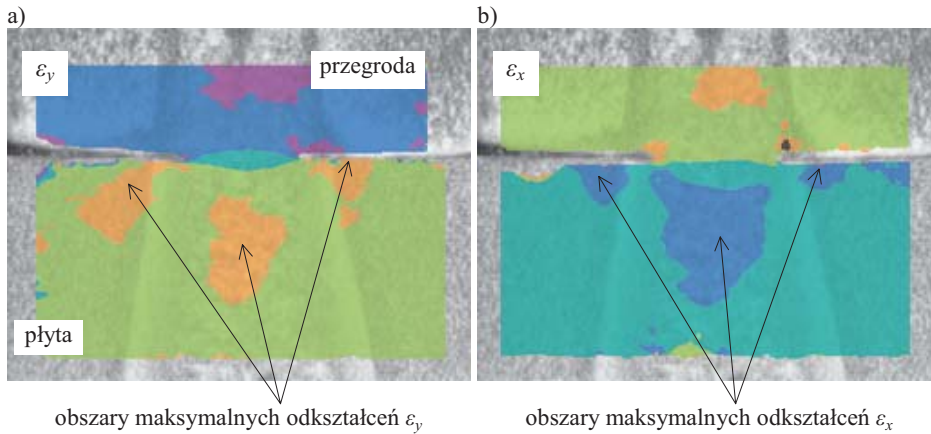
spoiną, strefą wpływu ciepła a materiałem rodzimym ujawniły się głównie przy wyższych wartościach naprężeń nominalnych, co może być związane ze zróżnicowaniem własności materiału w analizowanych strefach. Jednak na przebieg zmian odkształceń w tym przypadku wpływa także geometria połączenia. Na wykresie (rys.6.13a) pokazano przebieg zmian odkształceń w kierunku obciążenia ε_y odniesionych do kolejnych poziomów naprężenia nominalnego S w wybranych strefach próbki zaznaczonych na rysunku 6.13b. Pozwalają one zauważyć uplastycznienie materiału rodzimego w sąsiedztwie strefy wpływu ciepła SWC, przy czym jest ono tym większe im bliżej karbu (połączenie płyta-przegroda).



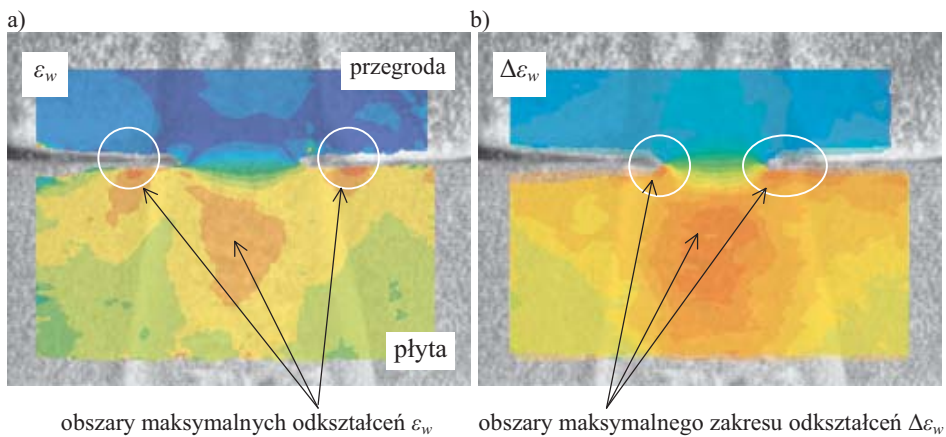
Rys. 6.13. Przebieg zmian odkształcenia w pierwszym cyklu obciążenia: a) wykres S - ε_y , b) punkty pomiarowe

Takie zachowanie materiału oraz efekty spiętrzenia odkształceń wywołane działaniem karbu geometrycznego powodują, że w próbce występuje kilka obszarów o podobnej maksymalnej wartości odkształceń, pokazanych na rysunku 6.14. Analiza rozkładów odkształceń pod kątem ich maksymalnych wartości lokalnych wywołanych pierwszym cyklem obciążenia nie zawsze odzwierciedla jednak sytuację występującą w próbce w trakcie obciążenia cyklicznego, a w szczególności w przypadku współczynnika asymetrii cyklu $R = 0$. W większości znanych kryteriów oceny trwałości zmęczeniowej większe znaczenie ma analiza amplitudy lub zakresu odkształcenia.

Dla zobrazowania zmian odkształceń ε_x i ε_y w pełnym cyklu obciążenia na rysunku 6.15 przedstawiono rozkład zakresu zmian ich sumy geometrycznej ε_w obliczanej zgodnie z zależnością (3.3) w porównaniu z rozkładem ich maksymalnych wartości w próbce w pierwszym cyklu obciążenia.



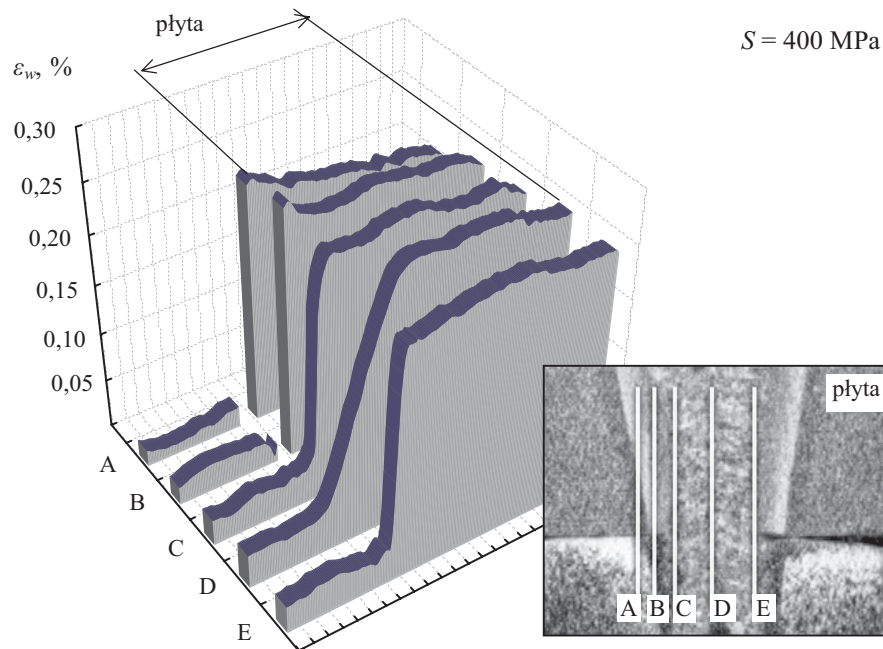
Rys. 6.14. Położenie stref maksymalnych odkształceń lokalnych w próbce: a) odkształcenia ε_y , b) odkształcenia ε_x



Rys. 6.15. Suma geometryczna odkształceń ε_w : a) położenie maksymalnych wartości ε_w , b) położenie maksymalnych wartości zakresu odkształcenia ε_w w pierwszym cyklu obciążenia

Z przedstawionego porównania wynika, że strefy o maksymalnym odkształceniu lokalnym nie stały się jednocześnie obszarami o największym zakresie odkształceń w cyklu. Maksymalne odkształcenia lokalne zajmowały obszar na granicy materiału rodzimego i strefy wpływu ciepła, zaś maksymalny zakres odkształceń w cyklu przemieścił się w kierunku przejścia pomiędzy płytą a przegrodą, które jednocześnie stanowi granicę pomiędzy materiałem spoiny a strefą wpływu ciepła.

Różnice zakresów odkształceń ε_w w rozpatrywanych obszarach złącza były stosunkowo niewielkie. Jednak porównanie rozkładu odkształcenia ε_w w przekrojach oznaczonych na rysunku 6.16 pozwala zaobserwować silne zróżnicowanie gradientów odkształceń w kierunku prostopadłym do osi obciążenia próbki.



Rys. 6.16. Rozkłady odkształceń ε_w w strefie złącza

Na rysunku 6.17 zestawiono rozkłady wartości gradientu χ odkształcenia ε_w w rozpatrywanym obszarze badanych złączy oraz odpowiadające im rozkłady zakresu odkształceń wyznaczone w trakcie badań dla trzech różnych wartości amplitudy naprężenia nominalnego. Wartość gradientu obliczano jako

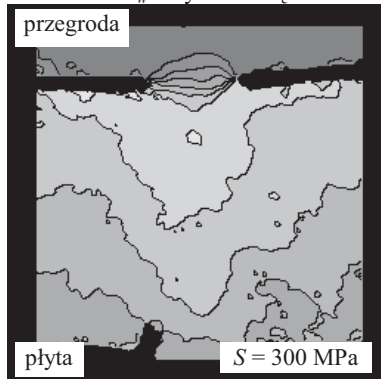
$$\chi = \left| \frac{\Delta\varepsilon_w}{\Delta L} \right| \quad (6.1)$$

gdzie:

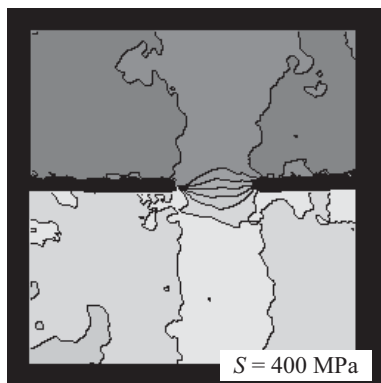
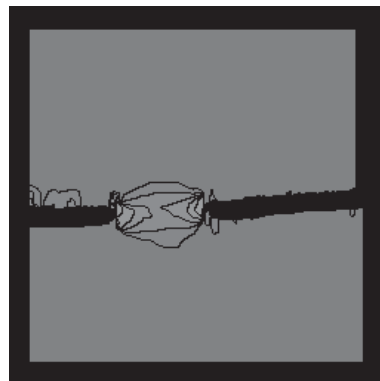
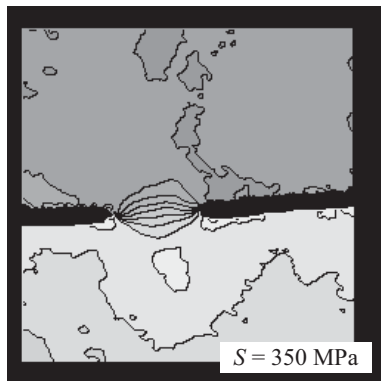
$\Delta\varepsilon_w$ – oznacza zakres zmiany odkształcenia ε_w w % na odcinku o długości ΔL .

Pokazane na rysunku 6.17b rozkłady wartości gradientów wyznaczano dla kierunku prostopadłego do kierunku działania obciążenia. Największe wartości tak określonego gradientu χ wystąpiły w strefie przejścia pomiędzy płytą a przegrodą na krawędziach spoiny. Powiązanie informacji o gradiencie odkształcenia i danych o maksymalnej wartości jego zakresu w cyklu pozwoliło wskazać obszar przejścia jako najbardziej prawdopodobne miejsce inicjacji pęknięcia zmęczeniowego.

a) rozkład zakresu zmienności odkształceń ε_w w cyklu obciążenia



b) rozkład gradientów odkształceń ε_w w cyklu obciążenia



Rys. 6.17. Rozkłady zakresów zmienności odkształceń ε_w w pojedynczym cyklu obciążenia (a) oraz ich gradientów χ wyznaczone w kierunku poprzecznym do kierunku działania obciążenia (b)

Przy przewidywaniu miejsca inicjacji i sposobu rozwoju pęknięcia zmęczeniowego w badanych złączach nie można zapomnieć o wpływie innych czynników, takich jak efekty stykowe lub naprężenie własne wywołane procesem spawania. Wyniki badań zmęczeniowych przeprowadzonych w pracy [15, 27] pokazały ponadto możliwość wieloogniskowego pęknięcia i „jednoczesnej” inicjacji pęknięć wzdłuż szerokości próbki, w tym także w płycie, w strefie przejścia pomiędzy materiałem rodzimym i strefą wpływu ciepła od strony lica spoiny. Stwierdzenie, który z rozważanych parametrów będzie w wyższym stopniu decydował o pęknięciu, może pomóc w rozwoju modeli zmęczeniowych stosowanych w lokalnych metodach oceny trwałości zmęczeniowej.

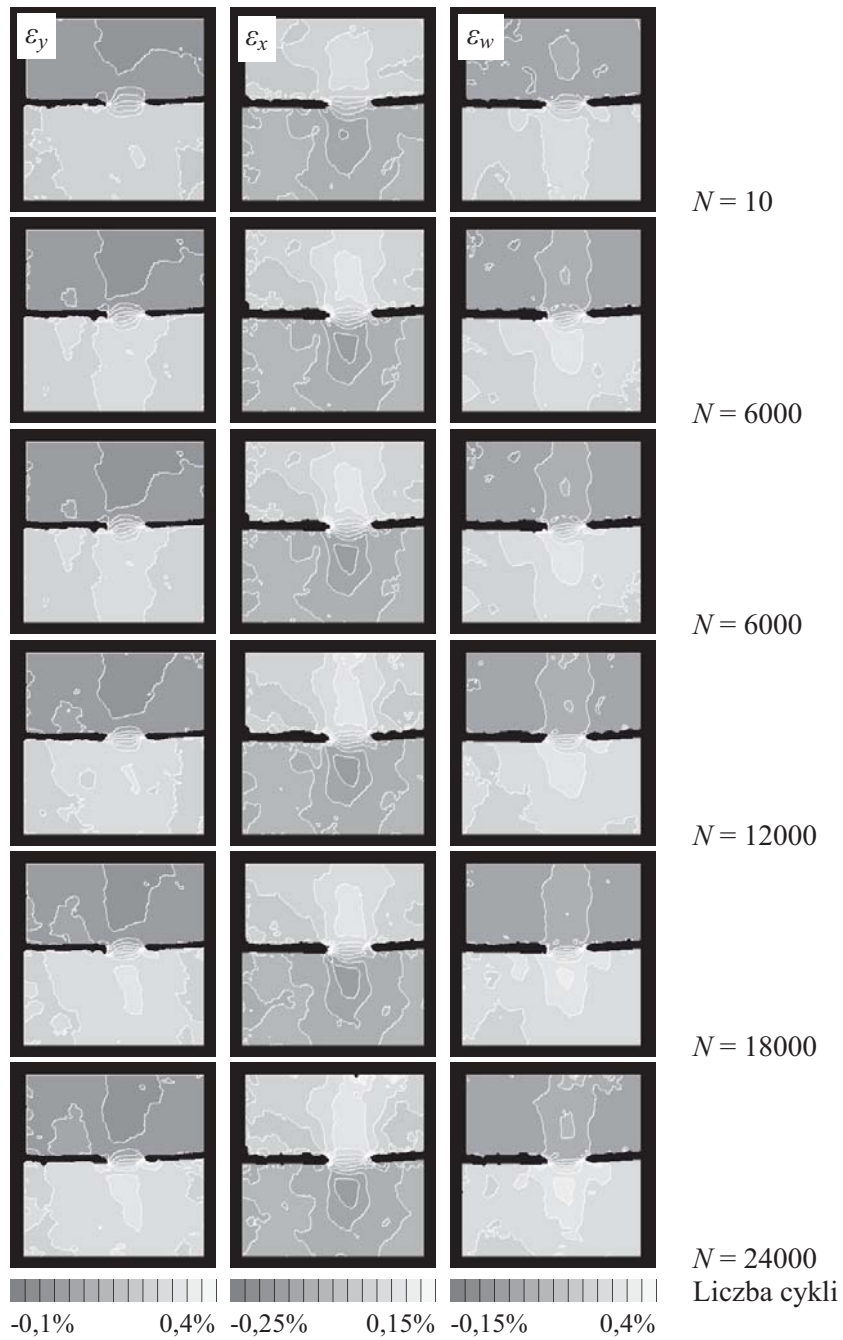
B. Przebieg zmian odkształceń w trakcie obciążenia zmęczeniowego w miejscach inicjacji pęknięcia zmęczeniowego

Wyniki badań odkształceń lokalnych w wybranych strefach złącza

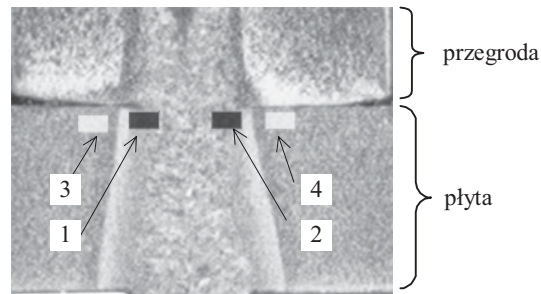
Przeprowadzona analiza odkształceń w złączu pozwoliła wskazać jego obszary szczególnie zagrożone powstaniem pęknięcia zmęczeniowego. W dalszej części pracy przedstawiona zostanie analiza przebiegu zmian stanu odkształcenia w analizowanych obszarach złącza w trakcie cyklicznie zmiennego obciążenia stałoaamplitudowego o współczynniku asymetrii cyklu $R = 0$.

Pomiary odkształceń zrealizowane w warunkach obciążeń zmiennych, umożliwiły wyznaczenie ich rozkładów w analizowanych obszarach złącza w kolejnych fazach cyklu i dla wskazanych cykli obciążenia. Pozwoliło to na analizę przebiegu zmienności wybranych parametrów opisujących stan odkształceń w złączu i wskazanie ich związku z miejscami inicjacji pęknięcia zmęczeniowego. Na rysunku 6.18 pokazano przykładowe rozkłady odkształceń w próbce, wyznaczone dla maksymalnej wartości naprężenia nominalnego w cyklu równej $S = 400$ MPa, w okresie poprzedzającym pojawienie się pęknięcia zmęczeniowego.

Podobnie jak w przypadku analizy odkształceń w pierwszym cyklu obciążenia, do łącznego opisu odkształceń w kierunku działania obciążenia ε_y i w kierunku poprzecznym do jego kierunku ε_x , zastosowano geometryczną sumę ich wartości ε_w obliczaną zgodnie z zależnością (3.3). W analizie wyników badań szczególną uwagę zwrócono na obszary próbki najbardziej narażone na działanie obciążeń zmiennych. Ich położenie wyznaczone na podstawie analiz opisanych w punkcie 6.2.A, a także oznaczenia stosowane w dalszej części rozdziału pokazano na rysunku 6.19.



Rys. 6.18. Rozkłady maksymalnych odkształceń ε_y , ε_x i ε_w dla $S_{max} = 400$ MPa w różnych okresach trwałości



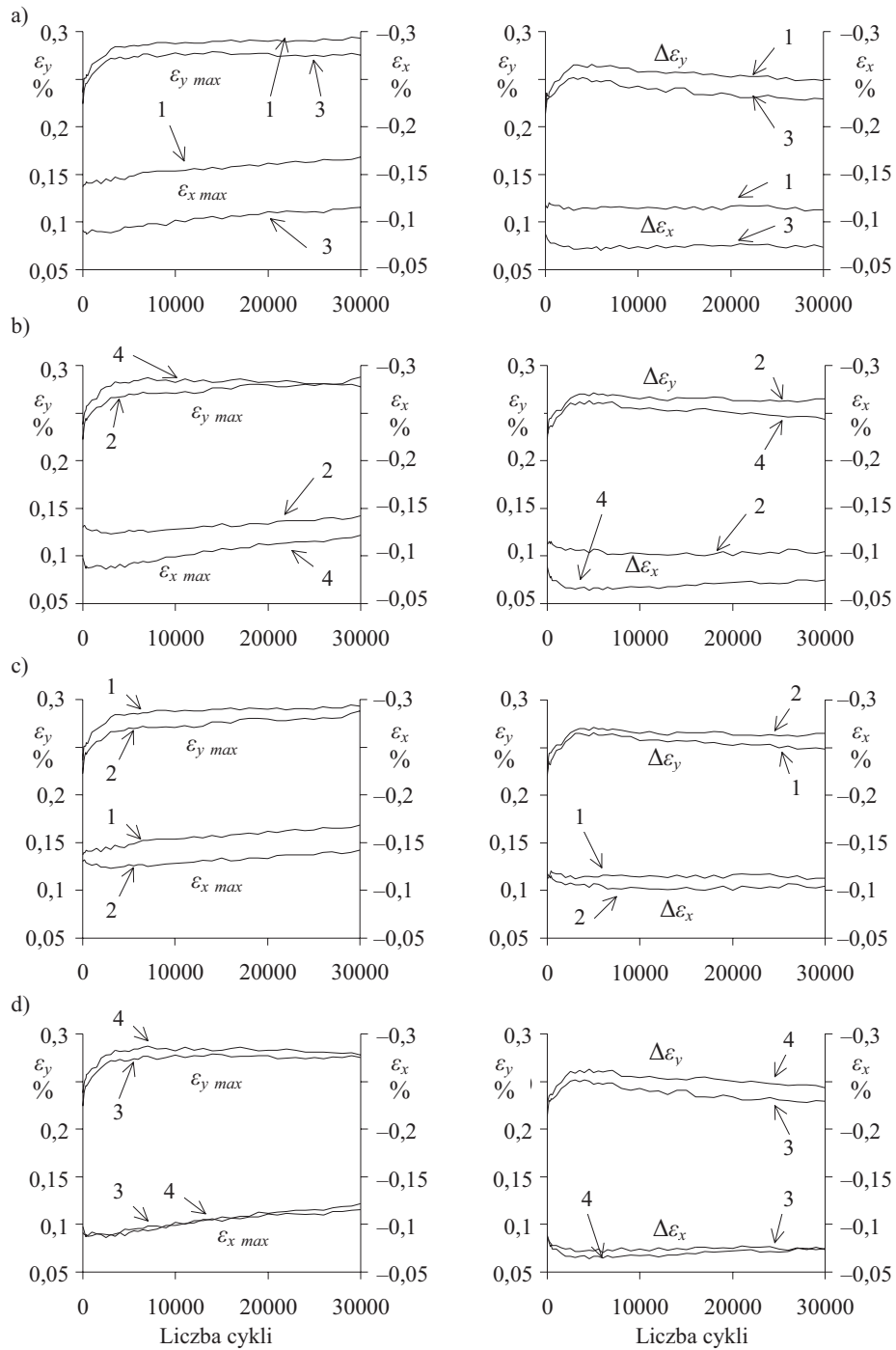
Rys. 6.19. Strefy analizy zmian odkształceń w złączu spawanym

Obszary analizy, oznaczone jako 1 i 2, znajdują się w strefie przejścia pomiędzy płytą a przegrodą, a sąsiadujące z nimi „punkty” 3 i 4 zlokalizowano w obszarze maksymalnych odkształceń w materiale rodzimym na granicy ze strefą wpływu ciepła. Na rysunku 6.20 zestawiono przebiegi odkształceń maksymalnych ε_{max} oraz przebiegi zakresu odkształcenia w cyklu obciążenia $\Delta\varepsilon$ wyznaczone dla tak oznaczonych stref złącza. Przedstawione porównanie odkształceń pozwala stwierdzić nieco odmienny charakter zmian ich wartości w kolejnych cyklach obciążenia zmęczeniowego. W przypadku odkształceń maksymalnych ε_{max} , we wszystkich strefach analizy, ich wartość wzrasta lub po niewielkim wzroście w początkowym okresie trwałości stabilizuje się na stałym poziomie, podczas gdy wartość zakresu odkształceń w cyklu $\Delta\varepsilon$, po początkowym okresie wzrostu, w trakcie dalszego obciążania zaczyna spadać.

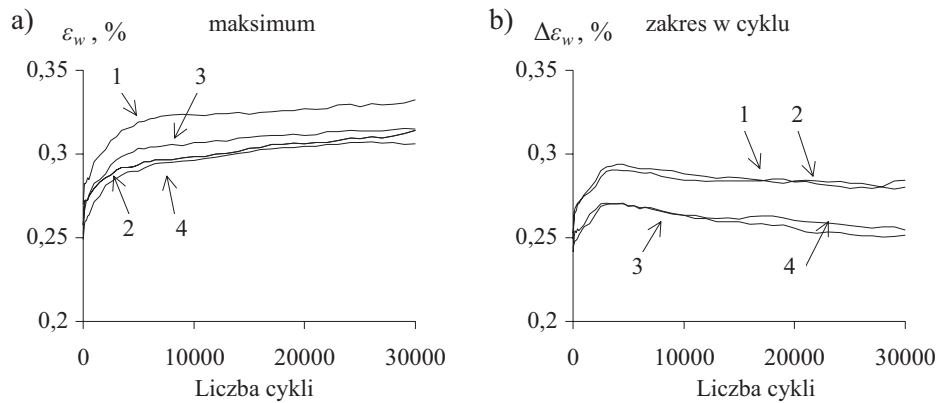
Wzrost wartości odkształceń maksymalnych ε_{max} , obserwowany zarówno w przypadku odkształceń ε_x , jak i ε_y , wynika głównie z efektu cyklicznego płynięcia materiału. Efekt ten wywołany jest jednostronnym charakterem obciążenia w warunkach występowania odkształceń plastycznych.

Cykliczne płynięcie materiału pomijane jest w przypadku analizy zakresu zmienności odkształceń $\Delta\varepsilon$ w pojedynczym cyklu obciążenia. Widoczne na rysunku 6.20 stopniowe zmniejszanie wartości $\Delta\varepsilon$, przy stałej amplitudzie naprężenia nominalnego, może świadczyć o lokalnym umacnianiu się materiału. Podobnie jak w poprzednim przypadku dotyczy ono wszystkich analizowanych stref w złączu.

Przy porównywalnych wartościach odkształceń maksymalnych ε_{max} w strefach 1, 2, 3 i 4, największe wartości $\Delta\varepsilon$ występują w strefach 1 i 2. Jest to szczególnie dobrze widoczne w przypadku porównania zakresu zmienności geometrycznej sumy odkształceń $\Delta\varepsilon_w$ w strefach 1,2,3 i 4 pokazanej na rysunku 6.21.



Rys. 6.20. Porównanie przebiegu zmian odkształceń ϵ_{\max} i $\Delta\epsilon$ w trakcie zmiennego obciążenia w strefach 1 i 3 (a), 2 i 4 (b), 1 i 2 (c) oraz 3 i 4 (d)

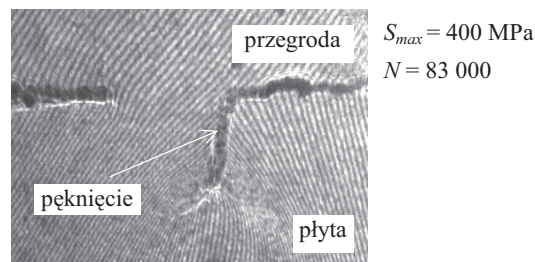


Rys. 6.21. Porównanie przebiegu zmian odkształceń ε_w (a) i ich zakresu $\Delta\varepsilon_w$ (b) w trakcie cyklicznie zmiennego obciążenia w strefach 1, 2, 3 i 4

Z kolei porównanie odkształceń ε_{max} i $\Delta\varepsilon$ w strefach 1 i 2 (rys.6.20c) oraz 3 i 4 (6.20d) leżących po przeciwnych stronach spoiny pozwala zauważyć zbliżony charakter ich zmian. Może to świadczyć o symetrii obciążenia próbki i porównywalnych właściwościach materiału – odpowiednio w strefach 1 i 2 oraz 3 i 4.

Miejsca inicjacji pęknięcia zmęczeniowego

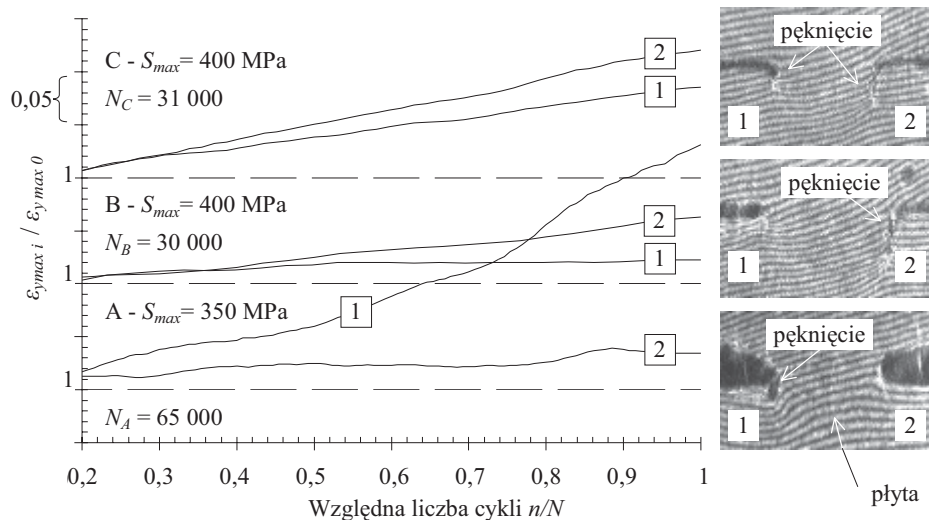
Analiza związku stanu odkształceń lokalnych z przebiegiem procesu pęknięcia wymaga znajomości miejsc inicjacji pęknięcia zmęczeniowego. W badanych złączach pęknięcia każdorazowo powstawały w strefie przejścia pomiędzy płytą a przegrodą. Na rysunku 6.22 pokazano typowy przykład pęknięć, które inicjowały z jednej lub drugiej strony spoiny (strefy 1 i 2) lub jednocześnie z obydwu jej stron.



Rys. 6.22. Przykład pęknięcia zmęczeniowego w strefie 2

Analiza przebiegu zmian odkształceń w badanych próbkach pozwoliła zauważyć, że pęknięcia zmęczeniowe powstawały w miejscu występowania maksymalnych wartości zakresu odkształcenia w cyklu, co jest zgodne z założeniami powszechnie stosowanych metod analizy zmęczeniowej. Należy jednak pamiętać o tym, że położenie miejsc o największych zakresach odkształceń w cyklu nie pokrywa się z miejscami maksymalnych odkształceń lokalnych w próbce wyznaczonymi w analizie statycznej. Podobieństwo przebiegu zakresu odkształceń w strefach 1 i 2 nie pozwala wskazać w jednoznaczny sposób, w której z nich istnieją warunki bardziej sprzyjające inicjacji pęknięcia zmęczeniowego.

Porównanie wyników badań różnych próbek wykazało, że w trzech analizowanych przypadkach pękanie rozpoczynało się od strefy, w której następował większy przyrost maksymalnego odkształcenia lokalnego w kierunku y (zgodnym z kierunkiem obciążenia), nawet w przypadku jego niższej wartości bezwzględnej. Na rysunku 6.23 pokazano przebiegi względnych zmian odkształceń lokalnych $\varepsilon_{y\max i} / \varepsilon_{y\max 0}$ w strefach 1 i 2 dla próbek o $S_{\max} = 400$ MPa i $S_{\max} = 350$ MPa. W pierwszym przypadku oznaczonym na rysunku 6.23 jako A, pęknięcie powstało w strefie 1, w drugim (B) – w strefie 2, natomiast w trzecim (C) inicjacja pęknięcia nastąpiła jednocześnie w strefach 1 i 2. W ostatnim przypadku jako dominujące rozwinęło się pęknięcie w strefie 2.

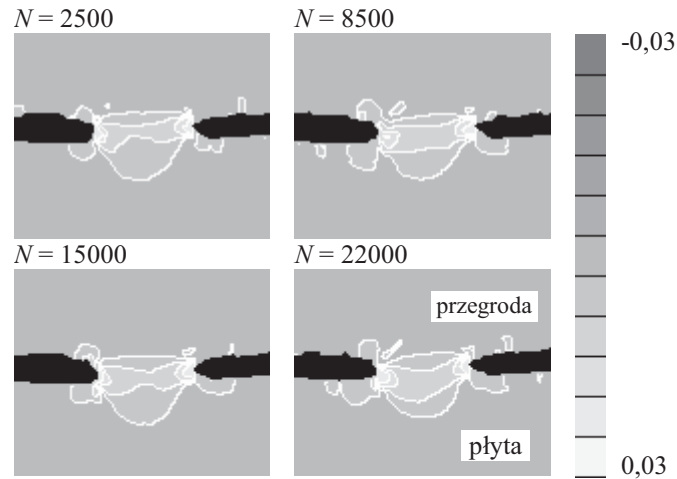


Rys. 6.23. Porównanie odkształceń lokalnych w strefach zmęczeniowego pęknięcia

Jak wynika z przedstawionych wykresów, w sytuacji jednoczesnego wystąpienia pęknięć w strefach 1 i 2 (przypadek C) przebieg maksymalnych odkształceń lokalnych był w obydwu strefach podobny i nie wykazywał stabilizacji charakterystycznej dla pęknięcia w jednym ognisku. Jednak nawet w tym przypadku pęknięcie, które doprowadziło do zniszczenia próbki powstało w strefie, w której przyrost odkształceń był większy.

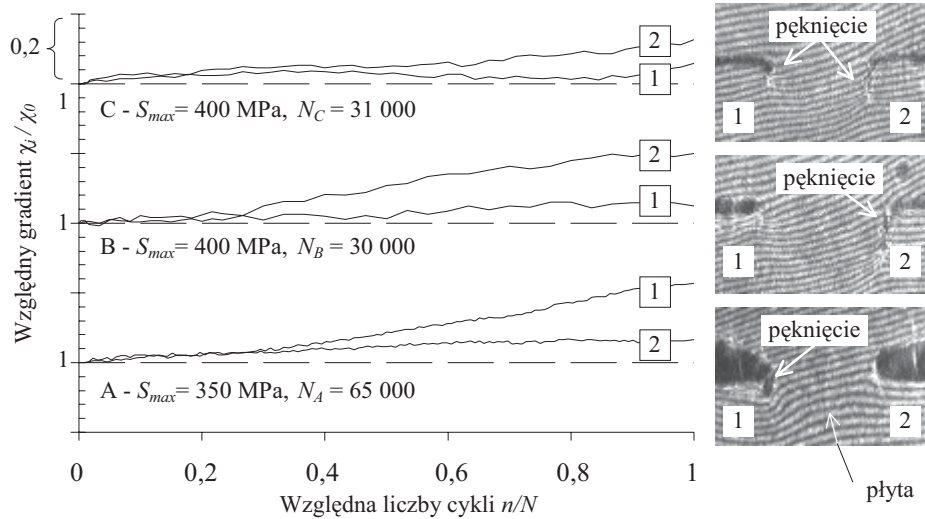
Analiza gradientu odkształcenia w miejscach inicjacji pęknięcia

Badania odkształceń w złączu w warunkach obciążenia zmęczeniowego umożliwiły zweryfikowanie zakładanego wcześniej związku gradientu odkształcenia z miejscami inicjacji pęknięć zmęczeniowych. Wartość gradientu wyznaczano na podstawie zależności (6.1) dla geometrycznej sumy odkształceń ε_x i ε_y w strefach 1 i 2 złącza. Na rysunku 6.24 pokazano przykładowe mapy rozkładów gradientów odkształcenia wyznaczonych dla próbki poddanej obciążeniu zmiennemu o $R = 0$ przy $S_{\max} = 400$ MPa dla kolejnych cykli obciążenia próbki.



Rys. 6.24. Rozkład gradientu odkształcenia χ

Na podstawie obliczonych gradientów odkształcenia wyznaczono przebiegi zmian ich maksymalnych wartości w strefach 1 i 2 w trakcie próby zmęczeniowej (rys.6.25). Ich analiza pozwala zauważyć ogólne podobieństwo zmian gradientu odkształcenia do zmian maksymalnych wartości odkształceń lokalnych (ε_y). Jednak w przypadku gradientu, w początkowym okresie trwałości próbki, przebieg zmian jego wartości w strefach 1 i 2 był bardzo zbliżony, dodatkowo przy bardzo podobnej jego bezwzględnej wartości. Porównanie przebiegów zmian względnego gradientu dla próbek z jednoogniskowym i dwuogniskowym przebiegiem inicjacji pęknięcia wskazuje na ich nieco odmienny charakter. W obydwu przypadkach, w których pęknięcie inicjowało z jednej strony spoiny różnica gradientów (około 16% dla przypadku A i 15% dla przypadku B) była wyraźnie wyższa niż w przypadku jednoczesnej inicjacji pęknięć w dwóch miejscach obserwowanego fragmentu złącza (około 6%). W przypadku dwuogniskowego pęknięcia gradienty odkształcenia w strefach nukleacji pęknięć zachowywały podobne wartości w większym zakresie trwałości (około 50%) niż w przypadku pęknięcia w jednym ognisku (około 30%). Potwierdzenie takiego zachowania materiału w obszarach zagrożonych wystąpieniem pęknięć zmęczeniowych na innych obiektach może mieć istotne znaczenie w metodach monitorowania stanu zmęczenia konstrukcji w fazie do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego.



Rys. 6.25. Porównanie względnych gradientów odkształceń ε_w w strefach zmęczeniowego pęknięcia

W odróżnieniu od maksymalnych wartości odkształceń lokalnych, wartości względnego gradientu odkształcenia nie są tak silnie uzależnione od efektów związanych z cyklicznym pełzaniem materiału. Tym samym mogą dawać pełniejszy obraz zmian stanu odkształcenia w strefie pęknięcia spowodowanych cyklicznie zmiennym obciążeniem o dowolnej wartości R . Jednak z drugiej strony, doświadczalna analiza gradientu odkształcenia jest bardzo trudna technicznie, szczególnie w przypadku rzeczywistych obiektów technicznych o silnych lokalnych zmianach wartości odkształceń. Wymaga ona znajomości polowych rozkładów odkształceń w strefach, które ze względu na swoje wymiary i usytuowanie często uniemożliwiają zastosowanie prostych technik pomiarowych. Może to w dużym zakresie utrudniać jej praktyczne zastosowanie w metodach analizy zmęczeniowej złożonych obiektów technicznych.

6.3. Podsumowanie

Badania odkształceń w laserowych złączach spawanych stalowej struktury typu „sandwich” pozwoliły stwierdzić istotne oddziaływanie zmiennego w czasie obciążenia na stan odkształceń lokalnych w strefie zmęczeniowego pęknięcia.

Porównanie odkształceń lokalnych wyznaczonych dla obciążenia statycznego oraz dla obciążenia zmęczeniowego wykazało, że strefy o maksymalnych wartościach odkształceń statycznych nie odpowiadają strefom o maksymalnym zakresie odkształcenia podczas obciążenia zmęczeniowego (rys.6.15). Prowadzenie obliczeń trwałości na bazie teoretycznych analiz maksymalnych wartości odkształceń lokalnych może zatem prowadzić do błędów.

Jednoczesne występowanie nieciągłości geometrycznej i niejednorodności materiałowej znacznie utrudnia wskazanie, który z czynników wywołujących spiętrzenia odkształceń może mieć decydujące znaczenie w ocenie jego trwałości zmęczeniowej. Potwierdzają to wyniki badań laserowego złącza spawanego stalowej struktury typu „sandwich”. Przeprowadzone badania wykazały między innymi brak jednoznacznego powiązania maksymalnych wartości odkształceń lokalnych z miejscem inicjacji pęknię-

cia zmęczeniowego (rys.6.23). Wynika to częściowo z różnic w przebiegu stabilizacji materiału w poszczególnych strefach złącza, ale także z efektu cyklicznego pełzania wywołanego jednostronnie zmiennym obciążeniem (rys.6.20 i 6.21). Tym samym, zastosowanie do obliczeń trwałości zmęczeniowej tego typu elementów metod opartych na podejściu lokalnym może napotkać na trudności.

Jednocześnie analiza wyników badań pozwoliła stwierdzić, że pomocna w określeniu miejsc inicjacji pęknięć zmęczeniowych jest analiza gradientu odkształcenia i to zarówno w przypadku odkształceń wyznaczonych dla obciążeń statycznych (rys.6.17), jak i zmęczeniowych (rys.6.25). Przeprowadzone badania odkształceń w laserowym złączu spawanym struktury typu „sandwich” pozwoliły wykazać związek gradientu odkształcenia z miejscami wystąpienia pęknięć, także w przypadku pęknięcia w dwóch ogniskach jednocześnie.

Zastosowanie gradientu w analizie zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych wymaga jednak znajomości rozkładów odkształceń w strefie zmęczeniowego pęknięcia. Jedną z możliwości pozyskania informacji o jego stanie może być analiza numeryczna, w której do modelowania złącza wykorzystywane są lokalne własności zmęczeniowe materiału (rozdział 5). Jednak w wielu przypadkach jedynym sposobem wyznaczenia gradientu odkształcenia jest pomiar odkształceń w obszarach nieciągłości geometrycznych i niejednorodności własności materiałowych. Przykład badań odkształceń w omawianym połączeniu spawanym wskazuje na możliwość stosowania w tym celu metody laserowej interferometrii siatkowej oraz laserowego interferometru siatkowego LES.

7. Hybrydowa, doświadczalno-numeryczna metoda wyznaczania odkształceń i naprężeń w strefach zmęczeniowego pęknięcia

7.1. Wprowadzenie

Część modeli stosowanych w analizie zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych oraz kryteriów przyjmowanych w ocenie ich wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej wymaga pełnej informacji o stanie odkształceń oraz naprężeń w obszarach elementów zagrożonych pękaniem. Najczęściej w celu jego wyznaczenia stosowane są metody analityczne oraz zaawansowane narzędzia numeryczne, głównie metoda elementów skończonych. Jednak zarówno w pierwszym, jak i drugim przypadku praktyczna możliwość ich stosowania 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 własności 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 własności materiałowych wywołanych cyklicznością obciążenia.

Sytuacja nie zmienia się również w przypadku stosowania 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 [80, 83, 85, 95, 96, 97, 144]. Przykładowo, w przeglądowej pracy Laermanna, twórcy pojęcia „metody hybrydowe” [96] przedstawiono ogólne sformułowanie zasad hybrydowej, numeryczno-doświadczalnej metodyki badań, natomiast w pracy [83] dokonano szczegółowej klasyfikacji metod hybrydowych ze względu na sposób i zakres „przekazywania” danych pomiędzy metodą numeryczną a doświadczalną.

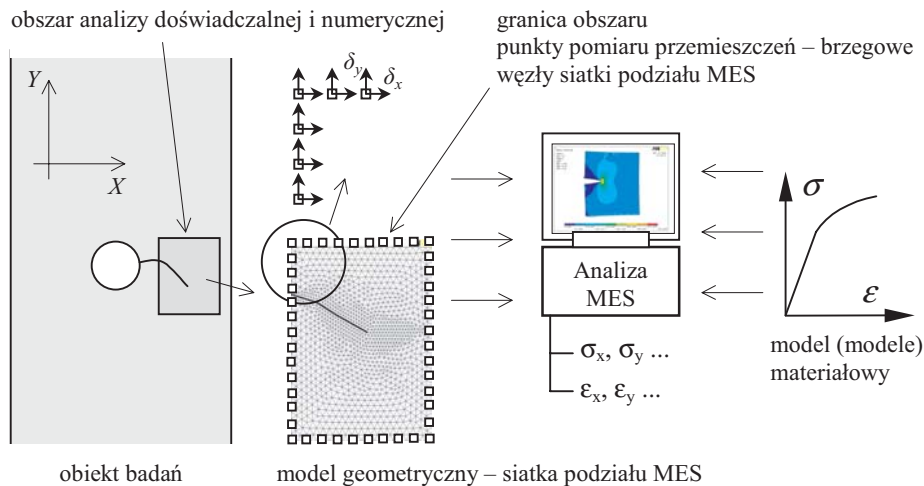
Jedną z grup metod hybrydowych stanowią, zgodnie z podziałem przedstawionym w pracy [83], tzw. „zlokalizowane techniki hybrydowe”, w których wyniki badań doświadczalnych wykorzystywane są jako warunki brzegowe w analizie numerycznej. Możliwość wyznaczania pełnego stanu odkształceń i naprężeń na podstawie 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 wie-

lokrotnie 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 korzyść wynikające z zastosowania doświadczalno-numerycznej analizy odkształceń i naprężeń w badaniach zmęczeniowych wskazują również doświadczenia zdobyte podczas badań prowadzonych w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Akademii Techniczno-Rolniczej [17, 28, 35, 36]. Ich wynikiem jest propozycja hybrydowej, numeryczno-doświadczalnej metody badań stanu odkształceń i naprężeń w strefach zmęczeniowego pęknięcia w warunkach cyklicznie zmiennego obciążenia, którą przedstawiono w dalszej części pracy wraz z przykładami analizy rozkładów odkształceń i naprężeń w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego.

7.2. Metodyka hybrydowej analizy odkształceń i naprężeń w warunkach obciążeń zmęczeniowych

Zastosowana w pracy hybrydowa metodyka analizy odkształceń i naprężeń w elementach konstrukcyjnych oparta jest na założeniu możliwości ograniczenia analizy numerycznej badanego obiektu do jego części poddanej analizie doświadczalnej. Do analizy stanu odkształceń i naprężeń zastosowano doświadczalną metodę laserowej interferometrii siatkowej adaptowaną do warunków obciążeń zmęczeniowych oraz numeryczną metodę elementów skończonych z nieliniowymi modelami cyklicznych własności materiałowych. Zastosowanie wyników pomiaru przemieszczeń jako warunków brzegowych w analizie numerycznej zalicza omawianą metodę do grupy zlokalizowanych technik hybrydowych [83].

Zgodnie ze schematem postępowania stosowanym w metodzie i pokazanym na rysunku 7.1, w wybranym lokalnym obszarze rzeczywistego obiektu (np. w strefie pęknięcia zmęczeniowego) realizowany jest połowy 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.



Rys. 7.1. Hybrydowa metoda analizy odkształceń i naprężeń na czole pęknięcia zmęczeniowego – schemat postępowania

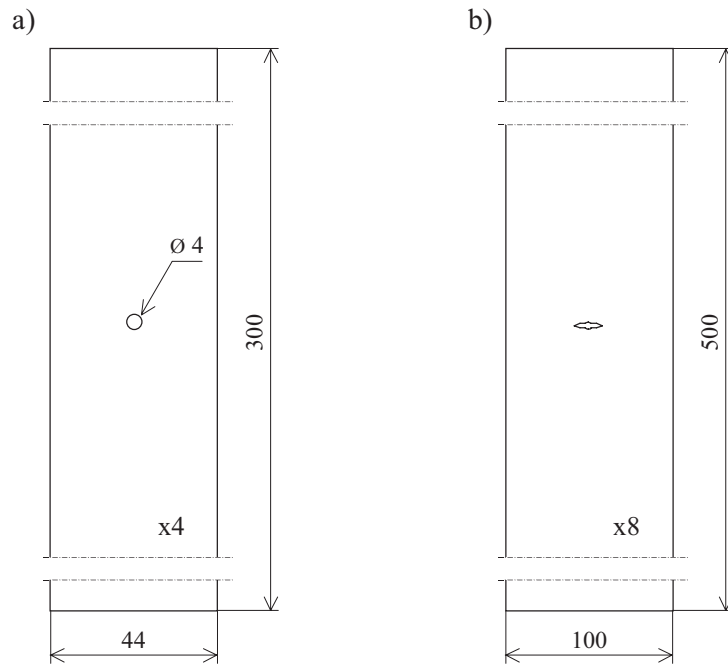
Wprowadzenie w modelu numerycznym, jako warunków brzegowych, stanu przemieszczeń wyznaczanego w badaniach doświadczalnych uwalnia od konieczności odtwarzania w analizie MES pełnej geometrii obiektu oraz warunków obciążenia w jakich znajdował się obiekt w trakcie pomiaru odkształceń.

Zastosowanie powyższej metodyki do wyznaczania rozkładów odkształceń i naprężeń przedstawiono w kolejnych podrozdziałach pracy na przykładach analizy pól odkształceń i naprężeń w otoczeniu czoła pęknięcia zmęczeniowego.

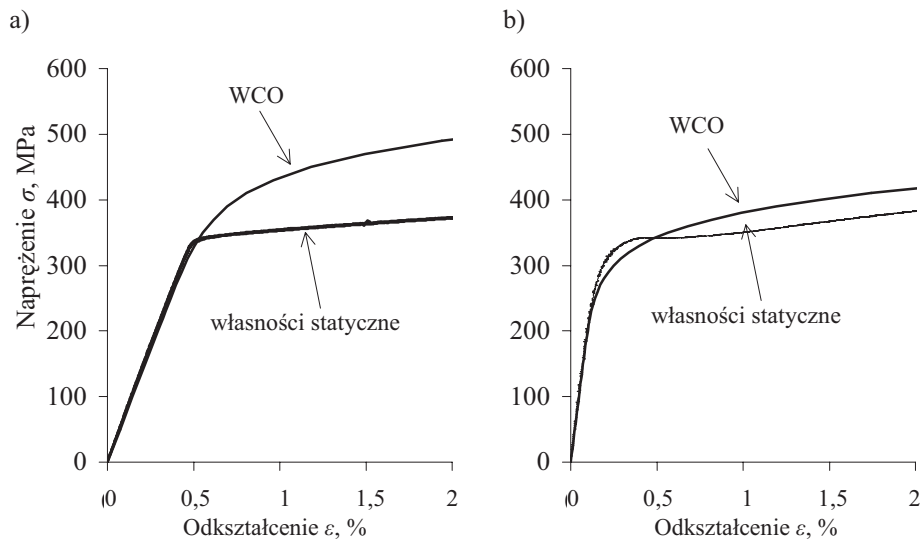
7.3. Hybrydowa analiza odkształceń i naprężeń w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego

A. Obiekty i warunki badań

W badaniach zastosowano dwa rodzaje próbek z rozwijającym się pęknięciem zmęczeniowym w karbie o różnej geometrii (rys.7.2). Próbkę oznaczoną jako AL wykonano ze stopu aluminium D16CzATW o własnościach mechanicznych podanych na rysunku 5.2. W trakcie badań próbkę poddano osiowemu obciążeniu jednostronnie zmiennemu o $R = 0$ i maksymalnej wartości naprężenia nominalnego $S_{max} = 62,5$ MPa. Druga próbka, oznaczona jako ST, wykonana została ze stali 18G2A. Ze względu na jakościowy charakter badań, zastosowane w analizie numerycznej własności cykliczne tej stali zaczerpnięto z badań przedstawionych w rozdziale 5. niniejszej pracy. W przypadku dokładnej analizy ilościowej naprężeń w badanej próbce niezbędne będzie wyznaczenie cyklicznych własności materiałowych dla materiału próbki.



Rys. 7.2. Obiekty badań: a) próbka AL wykonana ze stopu aluminium D16CzATW, b) próbka ST wykonana ze stali 18G2A



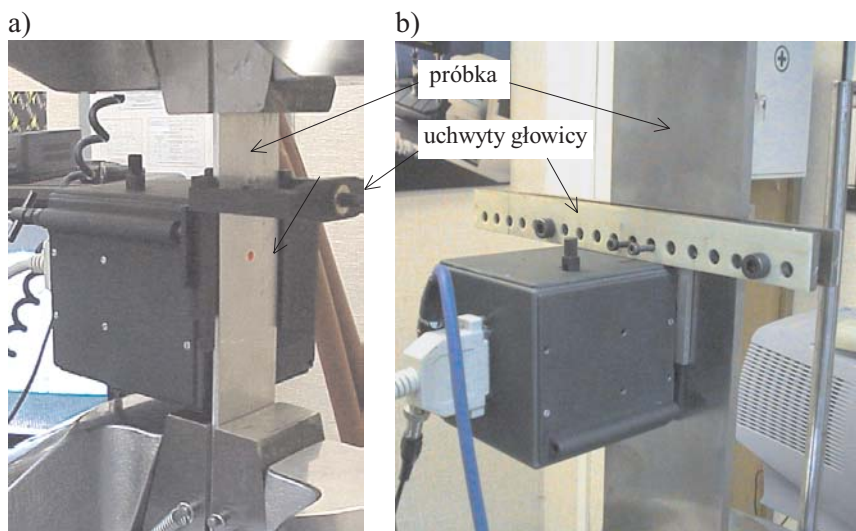
Rys. 7.3. Wykresy statycznego rozciągania i wykresy cyklicznego odkształcenia dla stopu aluminium D16CzATW (a) i stali 18G2A (b)

Podobnie jak w przypadku próbki wykonanej ze stopu aluminium, podczas badań próbki typu ST stosowano obciążenie jednostronnie zmienne o stałej amplitudzie naprężenia nominalnego o $S_{min} = 4$ MPa i $S_{max} = 64$ MPa.

B. Analiza doświadczalna

Doświadczalne badania przemieszczeń i odkształceń realizowano w dwóch celach. Pierwszym z nich był pomiar przemieszczeń niezbędnych do określenia warunków brzegowych w analizie numerycznej. Drugie zadanie polegało na wyznaczeniu pełnych map rozkładów odkształceń ε_x i ε_y w celu weryfikacji wyników badań numerycznych.

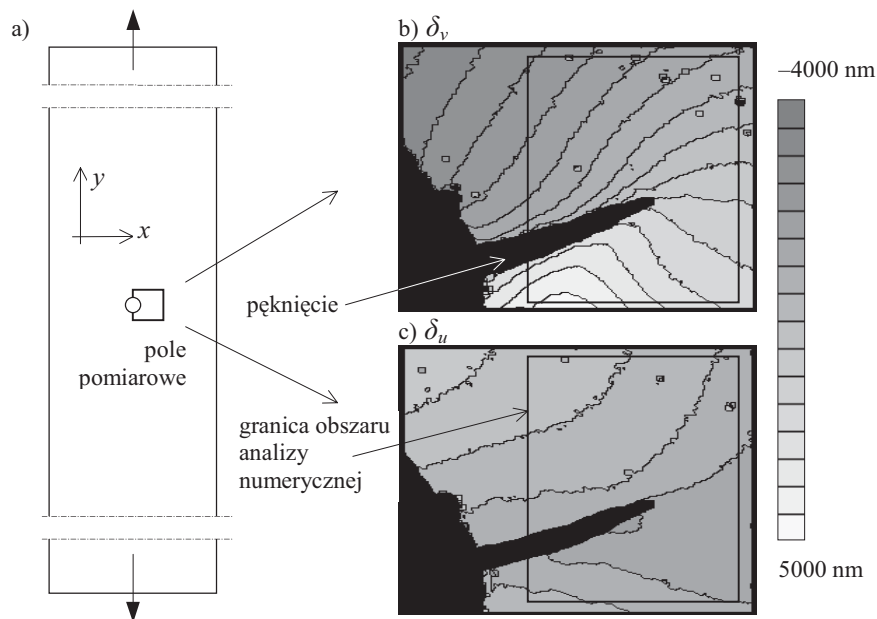
W analizie doświadczalnej do pomiaru przemieszczeń punktów w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego zastosowano zautomatyzowany system laserowego ekstensometru siatkowego LES. Na rysunku 7.4 pokazano próbki AL i ST z zamocowaną głowicą pomiarową w trakcie badań.



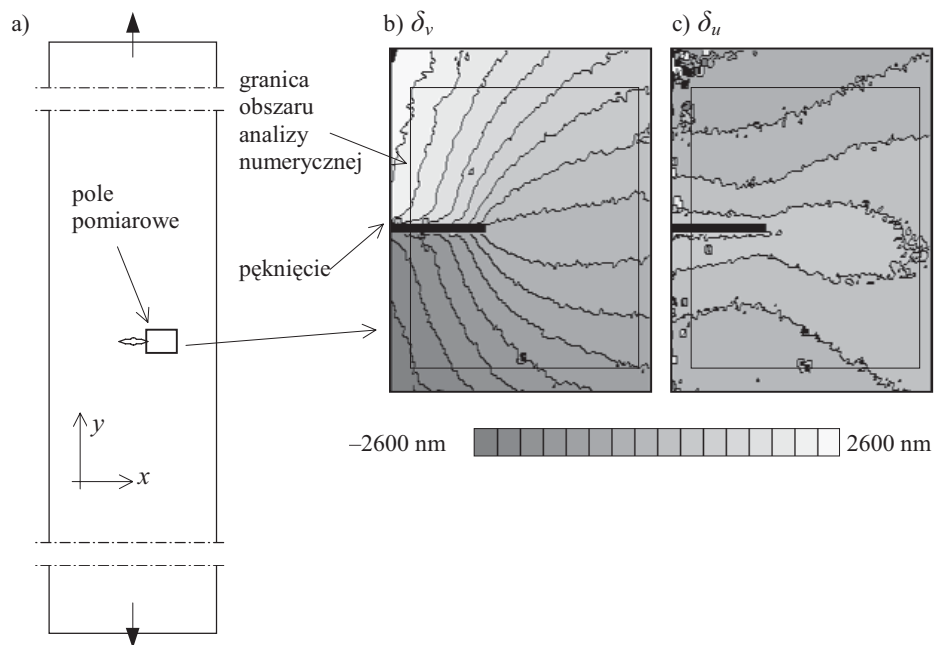
Rys. 7.4. Pomiar przemieszczeń: a) próbka AL, b) próbka ST

Wyniki pomiarów posłużyły do wyznaczenia przemieszczeń w kierunkach x i y w punktach odpowiadających węzłom siatki numerycznego modelu obiektu, leżącym na granicy obszaru analizy numerycznej. Na rysunkach 7.5 i 7.6 pokazano przykładowe mapy rozkładów przemieszczeń dla próbek AL i ST, a na rysunkach 7.7 i 7.8 ich przebiegi w przekrojach ograniczających obszar analizy numerycznej.

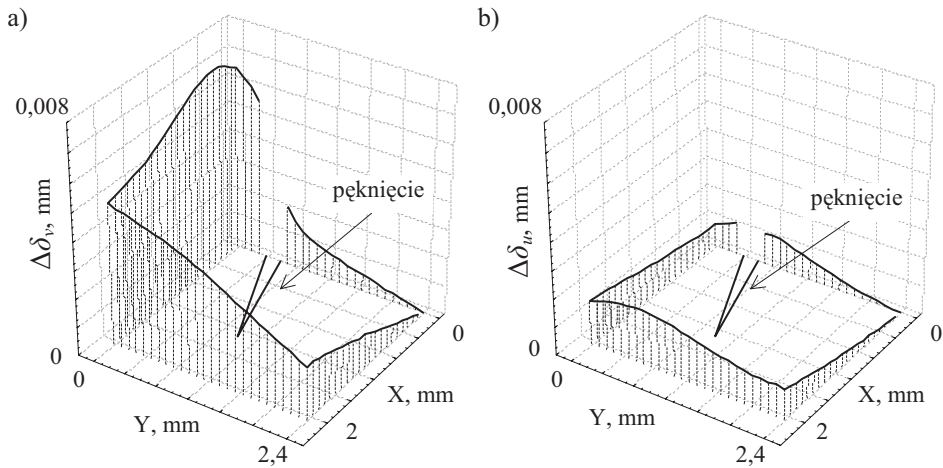
W trakcie badań rejestrowano przebieg zmian przemieszczeń dla 55. (próbka AL) i 100. (próbka ST) wartości siły w kilkunastu cyklach obciążenia. Jednak w dalszej części pracy przedstawione zostaną tylko wyniki badań dla maksymalnych wartości naprężenia nominalnego w cyklu obciążenia, tj. dla $S_{max} = 62,5$ MPa – próbka AL i $S_{max} = 64$ MPa – próbka ST.



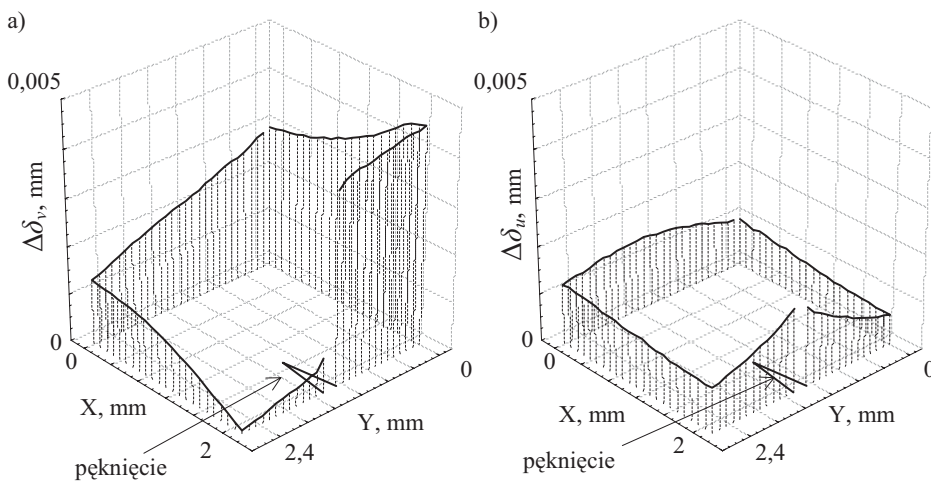
Rys. 7.5. Przykładowe rozkłady przemieszczeń w próbce AL dla naprężenia nominalnego $S = 62,5$ MPa: a) położenie strefy pomiarowej, b) rozkład przemieszczeń dla kierunku y , c) rozkład przemieszczeń dla kierunku x



Rys. 7.6. Przykładowe rozkłady przemieszczeń w próbce ST dla naprężenia nominalnego $S = 64$ MPa: a) położenie strefy pomiarowej, b) rozkład przemieszczeń dla kierunku y , c) rozkład przemieszczeń dla kierunku x



Rys. 7.7. Przykładowy rozkład przemieszczeń względnych wzdłuż granicy obszaru analizy numerycznej dla kierunku y (a) i x (b) dla próbki AL dla $S = 62,5$ MPa

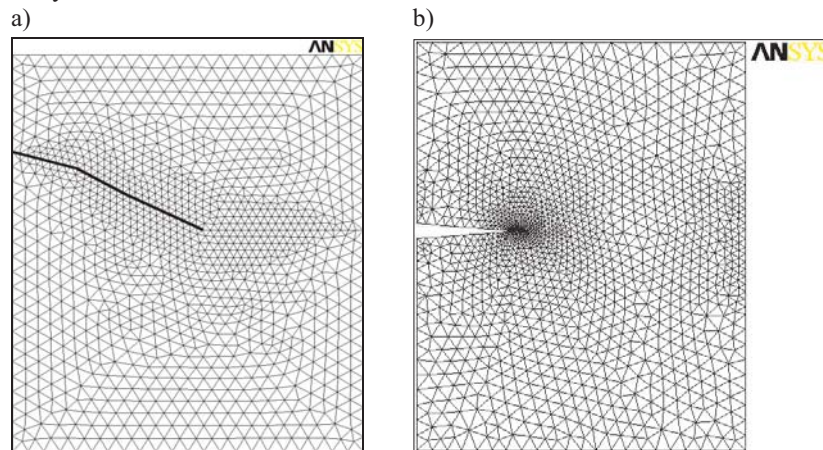


Rys. 7.8. Przykładowy rozkład przemieszczeń względnych wzdłuż granicy obszaru analizy numerycznej dla kierunku y (a) i x (b) dla próbki ST dla $S = 64$ MPa

C. Analiza numeryczna

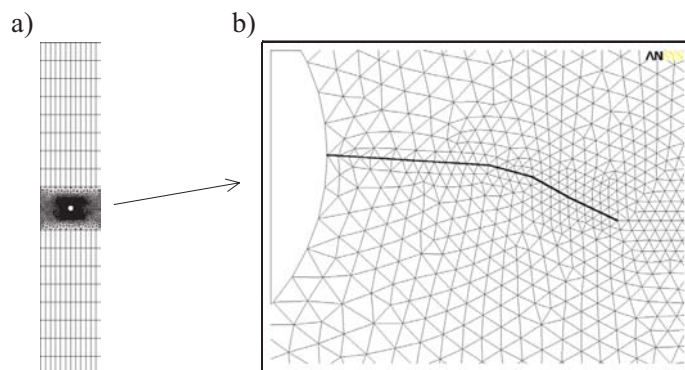
Znajomość wyznaczonych doświadczalnie rozkładów przemieszczeń w rozpatrywanych obszarach próbek pozwoliła znacznie ograniczyć obszar modelowania geometrycznego w analizie numerycznej. W obliczeniach numerycznych, prowadzonych z zastosowaniem komercyjnego oprogramowania firmy ANSYS wyodrębnione obszary próbek poddano dyskretyzacji za pomocą 6-węzłowych, trójkątnych elementów skończonych typu PLANE2 z biblioteki programu ANSYS [6, 7]. W przypadku próbki AL jej dwuwymiarowy model zawierał 2274 elementy przy 4703 węzłach, z kolei do zamodelowania próbki ST użyto 2800 elementów i 5804 węzłów. Na rysunku 7.9 pokazano

no zastosowaną siatkę podziału elementów skończonych z uwzględnieniem rzeczywistego kształtu pęknięcia zmęczeniowego dla obydwu próbek. Proces wprowadzania przemieszczeń otrzymanych na podstawie analizy doświadczalnej w węzłach odpowiadających wybranym punktom próbki, zautomatyzowano dzięki zastosowaniu procedur napisanych w języku APDL (Ansys Parametric Design Language) [6]. Do opisu własności materiałowych zastosowano nieliniowe modele materiałowe otrzymane poprzez dyskretyzację dwudziestoma punktami wykresów cyklicznego odkształcenia pokazanych na rysunku 7.3.



Rys. 7.9. Siatki elementów skończonych zastosowane w hybrydowej metodzie analizy odkształceń i naprężeń: a) próbka AL, b) próbka ST

W przypadku próbki AL przeprowadzono dodatkowo analizę numeryczną dla pełnego, dwuwymiarowego modelu próbki z pęknięciem (rys.7.10). Analizę przeprowadzono dla tego samego modelu materiałowego co w metodzie hybrydowej. W obliczeniach stosowano obciążenie próbki zgodne z obciążeniem stosowanym w trakcie badań doświadczalnych. W modelowaniu geometrycznym zastosowano dwa typy elementów skończonych: PLANE2 w strefie zawierającej otwór oraz 4-węzłowy prostokątny PLANE42 w pozostałym obszarze. Model zawierał 8504 elementów przy 17008 węzłach.



Rys. 7.10. Siatka elementów skończonych zastosowana w analizie pełnego modelu próbki AL (a) i jej powiększony fragment w strefie pęknięcia (b)

C. Wyniki badań i ich analiza

Zrealizowane badania oraz ich wyniki pozwoliły na przeprowadzenie dwóch rodzajów analizy porównawczej. Dla próbki AL dokonano porównania wyników badań rozkładów odkształceń i naprężeń wyznaczonych metodą hybrydową i numeryczną. Natomiast w przypadku próbki ST porównaniu poddano wyniki analizy przeprowadzonej z zastosowaniem metody hybrydowej i doświadczalnej.

Próbka AL

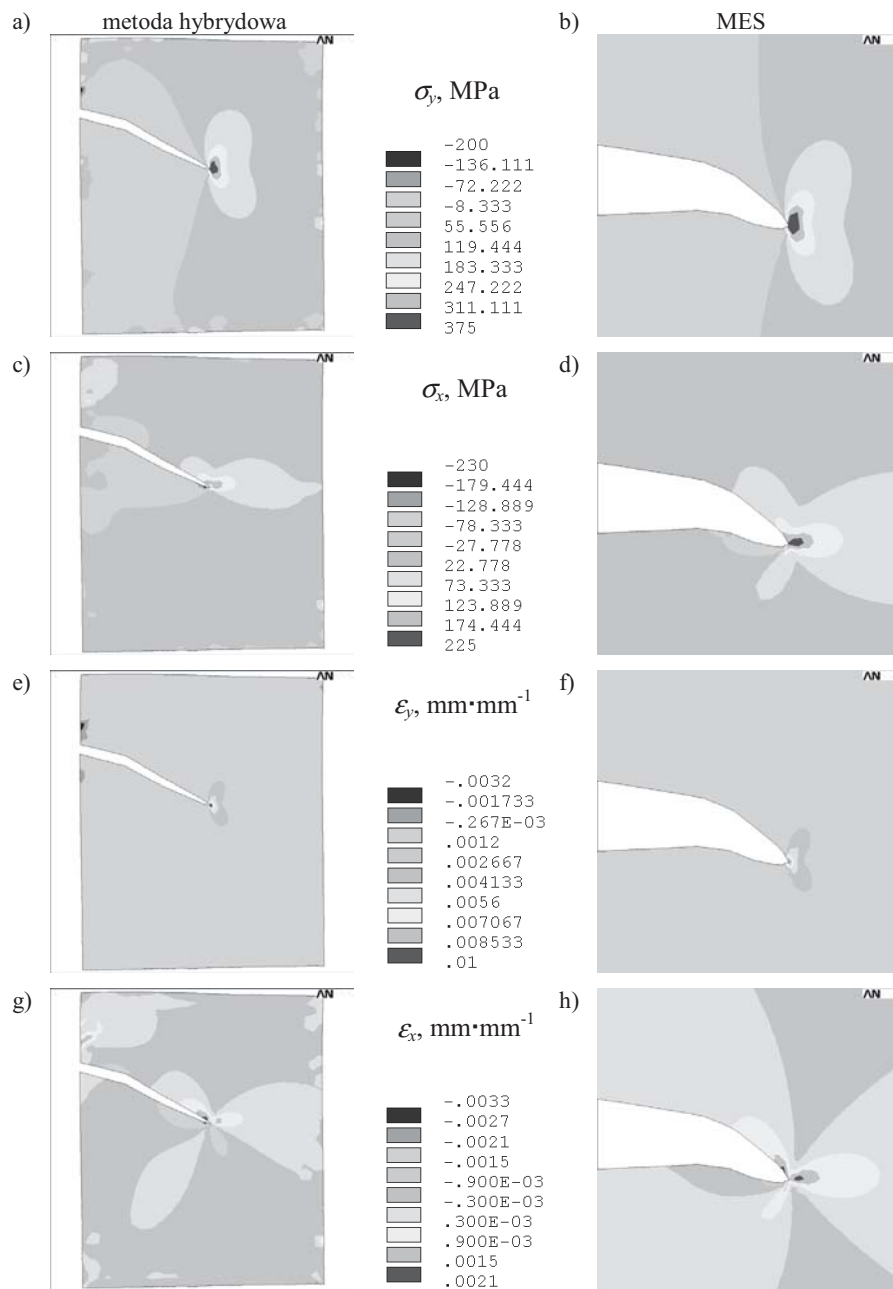
Przeprowadzone badania pozwoliły na przeprowadzenie analizy porównawczej wyników analizy rozkładów odkształceń i naprężeń metodami numeryczną i hybrydową. Do celów porównawczych wykorzystano wybrane składowe odkształceń i naprężeń zgodne z przyjętym układem współrzędnych x - y , w którym kierunek y jest zgodny z kierunkiem działania obciążenia, a kierunek x jest kierunkiem do niego prostopadłym. Na rysunku 7.11 zestawiono ich rozkłady w strefie obejmującej pęknięcie zmęczeniowe oraz jego otoczenie.

Pomimo istotnych różnic w samym modelu, jak i sposobie jego obciążania w analizie numerycznej, wyniki obliczeń w obydwu przypadkach są do siebie bardzo zbliżone. Dotyczy to zarówno ich jakościowego, jak i ilościowego charakteru. W jednym i drugim przypadku otrzymano charakterystyczną dla rozwijającego się pęknięcia postać rozkładu odkształceń i naprężeń w otoczeniu czoła pęknięcia.

Porównanie ich maksymalnych wartości otrzymanych w analizie hybrydowej i numerycznej wykazało różnice około 3% dla naprężeń σ_y , 30% dla σ_x oraz około 11% zarówno dla ε_y , jak i dla ε_x . Maksymalne naprężenia osiągnęły większe wartości w przypadku analizy numerycznej ($\sigma_y = 372$ MPa i $\sigma_x = 222$ MPa), zaś odkształcenia w analizie hybrydowej ($\varepsilon_y = 1\%$ i $\varepsilon_x = 0,2\%$).

Przedstawione na rysunku 7.11 rozkłady odkształceń i naprężeń wyznaczone metodą hybrydową dotyczą próbki z pewną historią obciążenia, czego nie uwzględniano w tradycyjnej analizie numerycznej. Jedną z głównych przyczyn występowania różnic może być zatem brak uwzględnienia w metodzie elementów skończonych zmian stanu odkształcenia w okolicy czoła pęknięcia spowodowanego kumulowaniem odkształceń plastycznych w trakcie cyklicznie zmiennego obciążenia oraz nieuwzględnienie lokalnych zmian własności materiału.

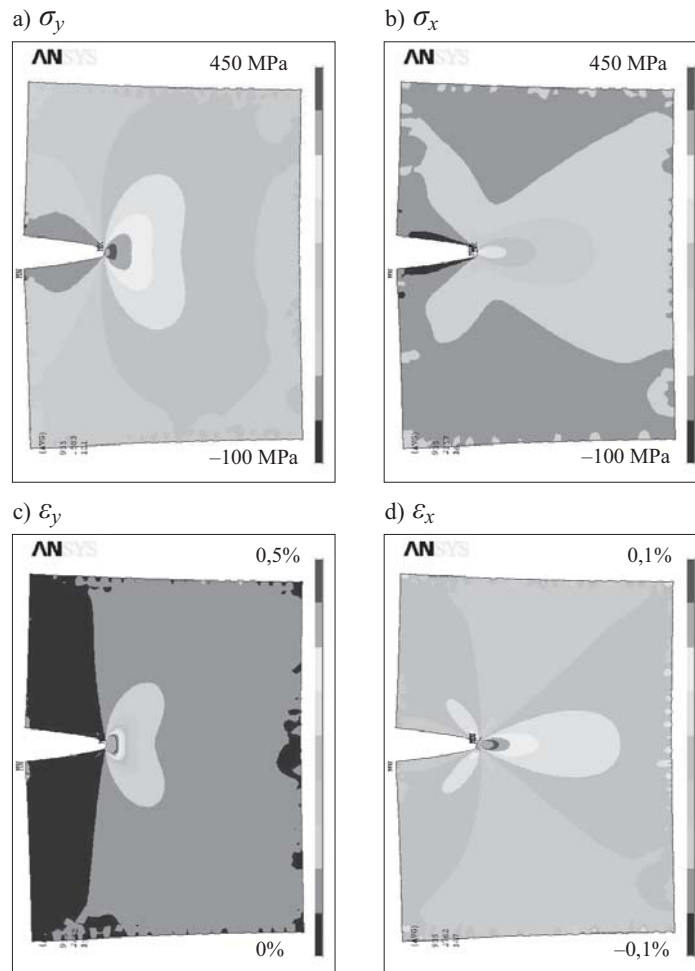
Wprowadzenie wyników pomiaru do rozwiązań numerycznych daje znacznie większe możliwości uwzględnienia w obliczeniach zmęczeniowych efektów związanych ze zrealizowanym wcześniej przebiegiem obciążenia. Jednak dokładność obliczeń w dużej mierze zależy od przyjętego sposobu modelowania własności materiałowych, wymagającego uwzględnienia wpływu zmieniającej się cyklicznej strefy plastycznej w otoczeniu pęknięcia. Wymaga to także opracowania procedur umożliwiających sprężyste odciążanie próbki z zachowaniem efektów plastycznych i przeniesieniem ich skutków na kolejne cykle obciążenia w kolejnych fazach analizy numerycznej.



Rys. 7.11. Rozkłady naprężeń i odkształceń uzyskane w metodzie elementów skończonych dla metody hybrydowej (a, c, e, g) oraz w pełnej analizie numerycznej (b, d, f, h)

Próbka ST

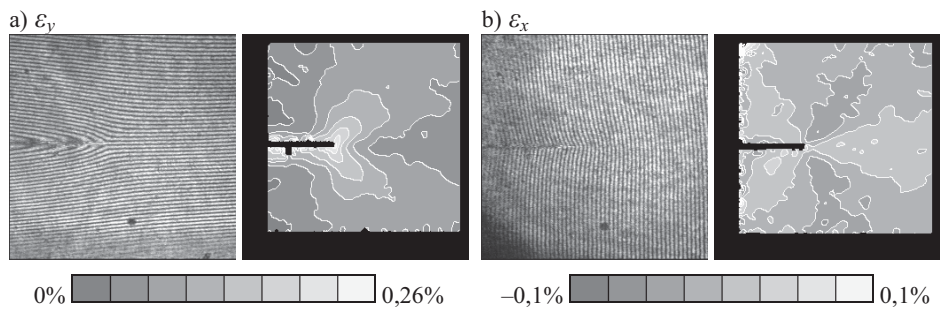
W trakcie doświadczalnej części badań próbki ST, obok pomiarów rozkładów przemieszczeń niezbędnych w analizie hybrydowej, wyznaczano również rozkłady odkształceń w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego. Umożliwiło to weryfikację rozkładów odkształceń wyznaczonych metodą hybrydową, zgodnie z metodyką opisaną w punkcie 7.2. Otrzymane w ten sposób przykładowe mapy rozkładów naprężeń i odkształceń w próbce ST pokazano na rysunku 7.12.



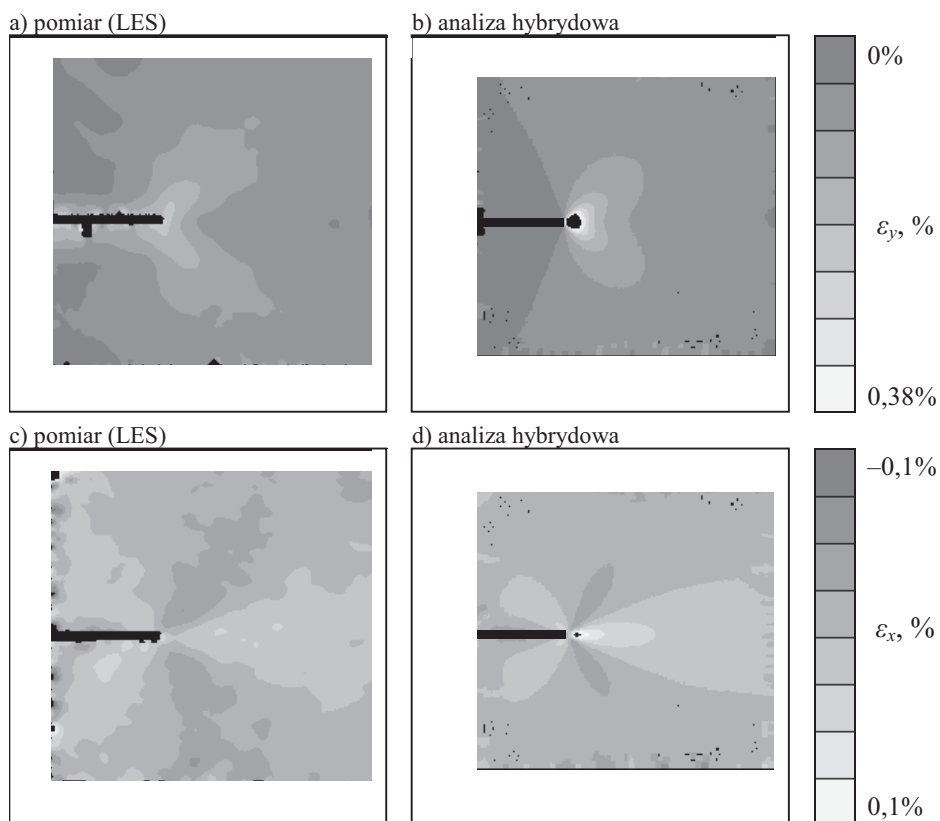
Rys. 7.12. Przykładowe mapy rozkładów odkształceń (c,d) i naprężeń (a,b) wyznaczone doświadczalno-numeryczną metodą hybrydową

Analizę porównawczą wyników badań przeprowadzono dla rozkładów odkształceń w kierunkach x i y wyznaczonych dla maksymalnej wartości naprężenia nominalnego w cyklu $S_{max} = 64$ MPa. Obserwowane w trakcie badań doświadczalnych obrazy prążków interferencyjnych wraz z wyznaczonymi na ich podstawie rozkładami odkształceń dla całego obserwowanego pola pomiarowego pokazano na rysunku 7.13.

W celu ułatwienia porównywania wyników analiz prowadzonych z zastosowaniem obydwu metod (rys.7.12 i 7.13), opracowano oprogramowanie umożliwiające wprowadzenie wartości odkształceń wyznaczonych metodą hybrydową dla poszczególnych węzłów siatki na mapę odkształceń wyznaczonych metodą doświadczalną. Na rysunku 7.14 porównano wyznaczone w ten sposób mapy odkształceń ε_y i ε_x .



Rys. 7.13. Rozkłady odkształceń w kierunkach y (a) i x (b) uzyskane metodą doświadczalną

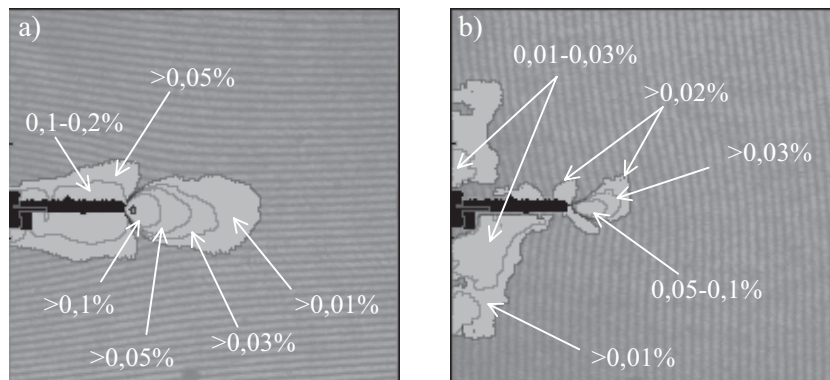


Rys. 7.14. Porównanie rozkładów odkształceń wyznaczonych metodą doświadczalną (a,c) i hybrydową (b,d)

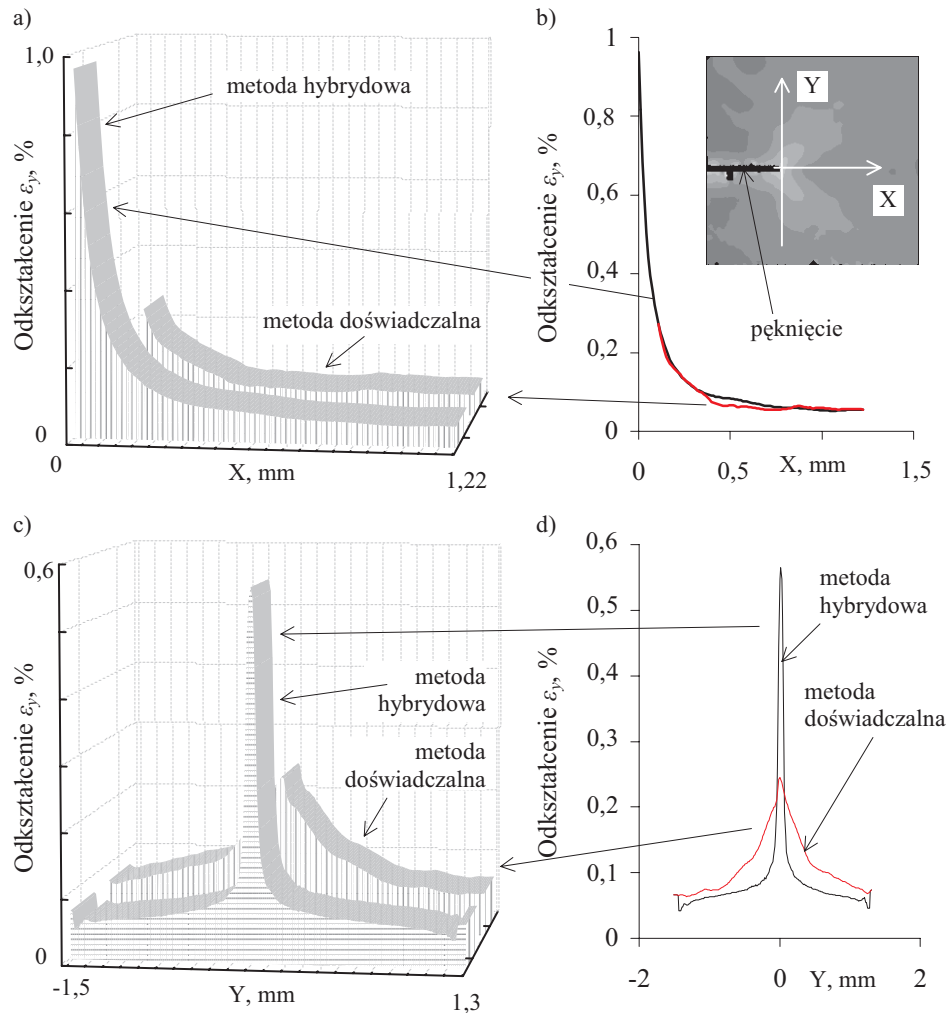
Porównanie ogólnej postaci wyznaczonych rozkładów odkształceń pozwala zauważyć ich zbliżony charakter zarówno w przypadku odkształceń ε_x , jak i ε_y . Główne różnice mają charakter lokalny i dotyczą dwóch obszarów próbki: czoła pęknięcia i obszaru leżącego wzdłuż linii pęknięcia. Dla ich zobrazowania na rysunku 7.15 pokazano mapy różnic odkształceń we wskazanych obszarach próbki. Z kolei na rysunku 7.16b porównano przykładowe przebiegi odkształceń ε_y wzdłuż osi X i Y.

Źródła różnic, które ujawniły się przy porównywaniu wyników badań odkształceń metodą hybrydową i doświadczalną, występują zarówno po stronie jednej, jak i drugiej metody. Różnice maksymalnych odkształceń wyznaczanych w okolicy wierzchołka pęknięcia wynikają głównie z trudności w pomiarze ich wartości w pobliżu krawędzi pęknięcia. Problem ten jest szczególnie widoczny w przypadku silnego gradientu odkształcenia (rys.7.16). Brak danych pomiarowych z krawędzi obiektu w połączeniu z procesem filtrowania map przemieszczeń stosowanym w analizie odkształceń skutkuje w takich warunkach pozornym zaniżeniem maksymalnych wartości odkształceń. Silny gradient odkształcenia może powodować także przekroczenie zakresu pomiarowego metody laserowej interferometrii siatkowej poprzez nadmierne zagęszczenie lub rozrzedzenie prążków interferencyjnych. Pojawia się to przede wszystkim w przypadku realizacji pomiaru obejmującego pełen cykl obciążenia. Duży zakres zmienności odkształceń uniemożliwia wówczas pomiar dużych i małych wartości odkształceń przy jednych ustawieniach układu optycznego.

W przypadku metody elementów skończonych, ewentualne zawyżanie wartości odkształcenia na wierzchołku pęknięcia może być spowodowane założeniami przyjętymi w modelowaniu pęknięcia, a także nieuwzględnieniem w obliczeniach historii obciążenia.



Rys. 7.15. Mapy różnic odkształceń wyznaczonych metodą hybrydową i doświadczalną: a) odkształcenia w kierunku y , b) odkształcenia w kierunku x



Rys. 7.16. Porównanie rozkładów odkształceń wyznaczonych metodami hybrydową i doświadczalną wzdłuż osi X (a,b) i Y (c,d)

Biorąc pod uwagę stosowane w trakcie badań obciążenia można przyjąć, że różnice odkształceń w mniejszym stopniu spowodowane są strefą plastyczną na czole pęknięcia. Wartości naprężeń nominalnych nie przekraczały bowiem $0,2R_e$. Potwierdzeniem takiego założenia może być brak zauważalnej cyklicznej strefy plastycznej pozostającej w próbce po jej odciążeniu.

Drugim miejscem w otoczeniu pęknięcia wykazującym różnice wyznaczanych wartości odkształceń jest strefa występująca za czołem pęknięcia. Wyniki pomiaru nie potwierdzają efektu odciążenia próbki na krawędziach pęknięcia wynikającego z analizy MES. Podobnie jak w poprzednim przypadku, wynika to z nieuwzględnienia w obliczeniach MES zmian stanu materiału przed czołem pęknięcia w wyniku jego cyklicznego obciążenia. Może to także być rezultatem przyjmowanego w analizie MES założenia

o całkowitym rozdzieleniu próbki w miejscu pęknięcia. Pewne możliwości zweryfikowania takiego założenia w przypadku metody hybrydowej daje wprowadzenie do modelu numerycznego danych pomiarowych o przemieszczeniach w pobliżu krawędzi pęknięcia.

7.4. Podsumowanie

Analiza wyników przeprowadzonych badań pozwala na pozytywną ocenę zastosowanej metody wyznaczania rozkładów odkształceń i naprężeń w strefach zmęczenia obiektu. Wpływa na to kilka wymienionych niżej czynników.

Stosowanie w badaniach zmęczeniowych metody laserowej interferometrii siatkowej, podobnie jak i większości metod polowej analizy odkształceń, pozwala na bezpośredni pomiar jedynie przemieszczeń występujących na powierzchni analizowanych obiektów. Jest to niekiedy zbyt mała ilość informacji, aby móc wyznaczyć towarzyszące im rozkłady naprężeń, szczególnie w przypadku występowania odkształceń plastycznych. Ograniczenie to można częściowo zniwelować uzupełniając metodę doświadczalną, analizą numeryczną, co prowadzi do znacznego poszerzenia możliwości analizy odkształceń i naprężeń w obszarach ich nieciągłości.

Z drugiej strony możliwość uzyskania dodatkowych informacji o stanie obciążenia obiektu na drodze doświadczalnej znacznie uprościło samą analizę numeryczną, szczególnie poprzez uwolnienie metody numerycznej od konieczności modelowania pełnej geometrii rozpatrywanego obiektu oraz jego rzeczywistego obciążenia. Znaczne zredukowanie liczby elementów skończonych w modelu geometrycznym prowadzi do istotnego skrócenia czasu analizy przy jednoczesnym zwiększeniu jej dokładności w wyniku zmniejszenia wymiarów pojedynczego elementu skończonego. Brak konieczności modelowania rzeczywistego stanu obciążenia obiektu umożliwia także prowadzenie analizy w przypadkach, w których warunki obciążenia są niemożliwe lub trudne do określenia. Pozwala ponadto uniezależnić się od skutków redystrybucji obciążenia, w stosunku do obciążenia pierwotnego, związanych np. ze zmianą własności materiałowych rozpatrywanego obiektu.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zastosowanie przedstawionej w pracy hybrydowej metody analizy odkształceń i naprężeń umożliwia skuteczne wyznaczanie ich rozkładów w strefie pęknięcia zmęczeniowego. Wzajemne uzupełnianie się metody laserowej interferometrii siatkowej i metody elementów skończonych pozwala wykluczyć ich niedogodności, stwarzając szersze możliwości prowadzenia badań, niemożliwe do osiągnięcia przy ich samodzielnym zastosowaniu. Hybrydowa, numeryczno-doświadczalna analiza rozkładów odkształceń i naprężeń powinna umożliwić pełniejsze wykorzystanie wyników badań doświadczalnych, jak i zwiększyć zaufanie do wyników analiz numerycznych w przypadku ich zastosowania w analizach zagadnień zmęczeniowych. Wynika to głównie z możliwości oderwania się od zewnętrznych warunków obciążenia obiektu, dzięki modelowaniu tylko jego wyodrębnionej części.

Pomimo zastosowania omawianej metody do analizy zagadnień płaskich (dwuwymiarowych), przykłady badań opisanych w literaturze (między innymi w pracy [114]) wskazują na możliwość uzyskania z wykorzystaniem metod hybrydowych, pełnej informacji o stanie odkształceń i naprężeń w obiektach trójwymiarowych. Dotyczy

to także metod opartych na metodzie elementów skończonych oraz metodzie laserowej interferometrii siatkowej.

Zarówno pozytywne wyniki badań przeprowadzonych za pomocą hybrydowej metody analizy odkształceń i naprężeń, jak i zdobyte w trakcie ich realizacji doświadczenia wskazują na konieczność prowadzenia dalszych prac nad jej rozwojem, co powinno skutkować stworzeniem nowych możliwości analiz zagadnień w problematyce zmęczenia i mechaniki pękania materiałów i konstrukcji. Jednymi z głównych kierunków dalszych prac nad proponowaną metodą hybrydowej analizy rozkładów odkształceń i naprężeń będą: jej rozwój w kierunku analiz obejmujących złożone struktury w trójosiowych stanach obciążeń oraz opracowanie modułów analizy numerycznej (głównie metody elementów skończonych) umożliwiających bezpośrednio wykorzystywanie wyników pomiarów uzyskanych z zastosowaniem systemu LES.

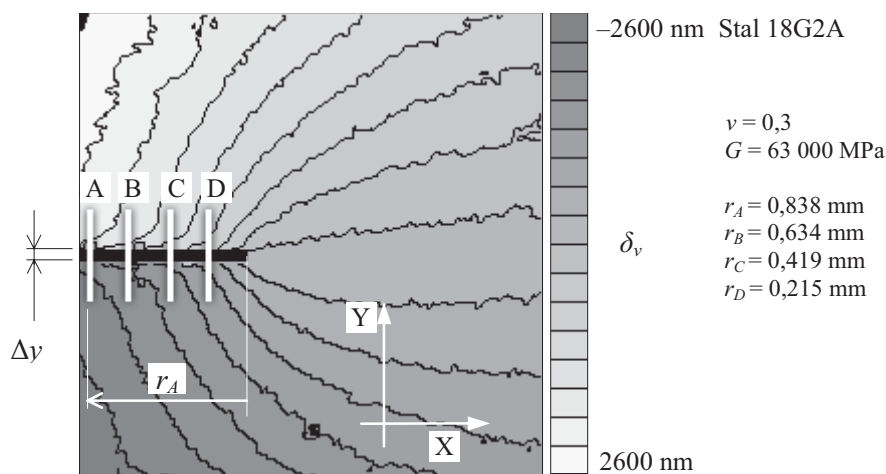
8. Przykłady doświadczalnej analizy odkształceń w strefie pęknięcia zmęczeniowego

Jednym z niezbędnych składników analizy zmęczeniowej elementów z rozwijającym się pęknięciem jest wiarygodna informacja o stanie obciążenia elementu w strefie pęknięcia. Dane takie mogą być pozyskiwane, m.in. w wyniku analizy cyklicznej strefy plastycznej na czole pęknięcia lub w przypadku odkształceń sprężystych – poprzez wyznaczenie wartości współczynnika intensywności naprężeń K_I . W dalszej części pracy przedstawione zostaną przykłady doświadczalnej analizy wspomnianych wielkości z zastosowaniem metody laserowej interferometrii siatkowej.

8.1. Współczynnik intensywności naprężeń K_I

W rozdziale 7. opisano wyniki doświadczalnych badań rozkładów odkształceń w otoczeniu pęknięcia. Pozwalają one na wyznaczenie wartości współczynnika intensywności naprężeń K_I zgodnie ze sposobem postępowania przedstawionym w rozdziale 2.2.1.

Na rysunku 8.1 przedstawiono przykładową mapę przemieszczeń wyznaczoną dla maksymalnej wartości naprężenia nominalnego w cyklu obciążenia, na podstawie której obliczono wartość współczynnika K_I z zastosowaniem zależności (2.24).

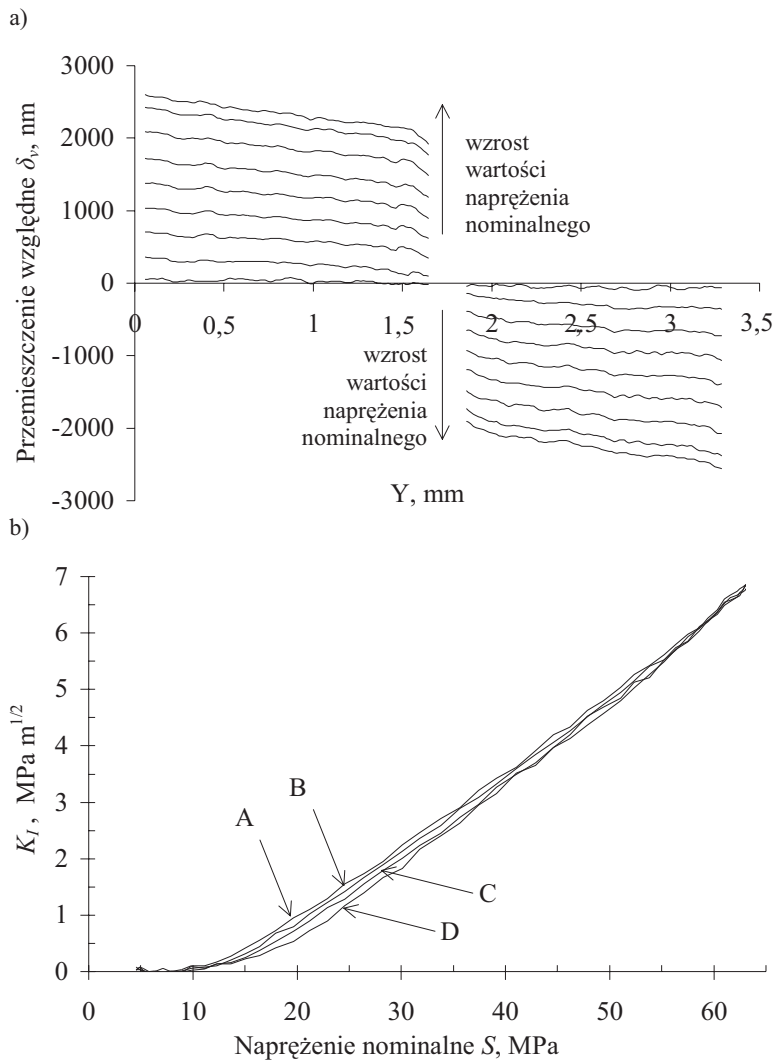


Rys. 8.1. Przykład map przemieszczeń względnych wykorzystywanych w obliczeniach współczynnika intensywności naprężeń K_I

Wartości współczynnika K_I wyznaczone dla różnych wartości obciążenia w cyklu i dla przemieszczeń określanych dla kilku punktów leżących w różnej odległości od wierzchołka pęknięcia (punkty A, B, C i D).

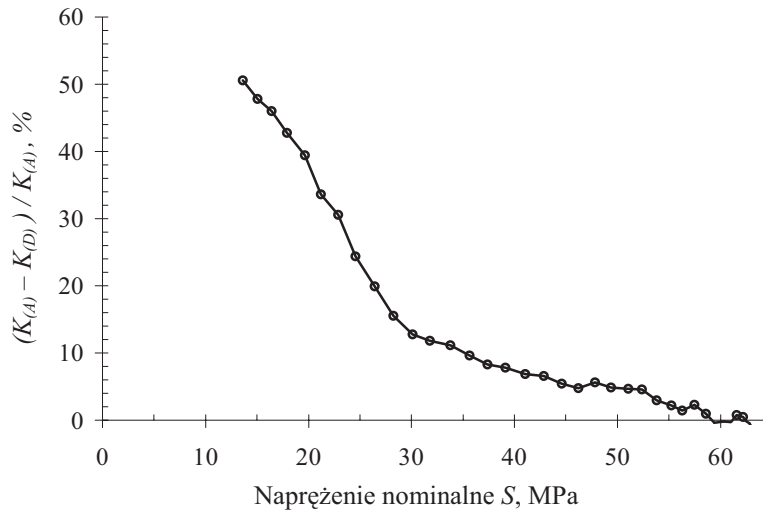
Na rysunku 8.2a pokazano przykładowe przekroje przez mapy przemieszczeń wyznaczonych dla wybranych wartości naprężenia S . Na ich podstawie obliczono przesunięcia krawędzi pęknięcia Δy , które pozwoliły wyznaczyć wartości współczynni-

ka K_I . Ich przebieg dla poszczególnych wartości naprężenia i punktów pomiarowych przedstawiono na rysunku 8.2b.



Rys. 8.2. Rozkład przemieszczeń w przekroju A dla kolejnych wartości naprężenia nominalnego (a) oraz porównanie wartości współczynnika K_I wyznaczonego dla przekrojów A,B,C i D (b)

Analiza przebiegu zmian wartości współczynnika K_I pozwala zauważyć jego zależność od miejsca pomiaru rozwarcia pęknięcia. Można także stwierdzić, że niezależnie od wartości naprężenia nominalnego największe wartości K_I otrzymywano w punkcie A, a najmniejsze w punkcie D. Obserwowane dla niższych wartości naprężeń nominalnych S znaczne różnice wartości K_I (rys.8.3) zmniejszały się wraz ze wzrostem obciążenia, aż do zgodności na poziomie kilku procent po przekroczeniu wartości $S = 55$ MPa.



Rys. 8.3. Maksymalne różnice wartości współczynnika intensywności naprężeń wyznaczonych dla danych z przekroju A i D

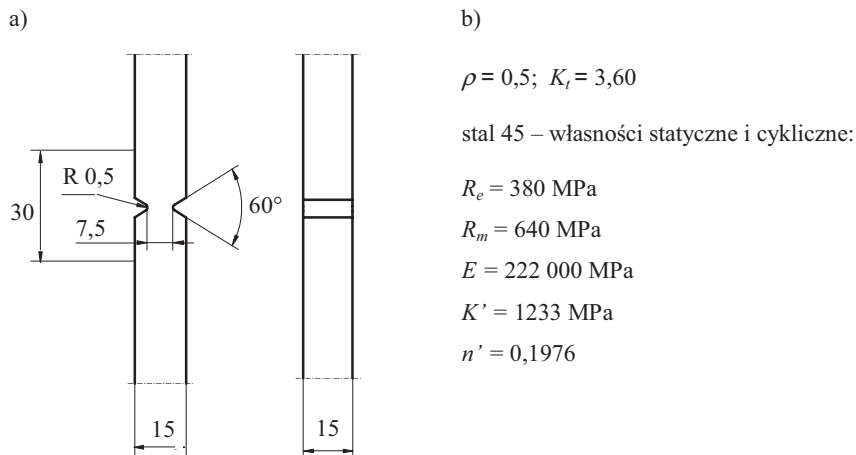
Mniejsze wartości współczynnika intensywności naprężeń K_I w pobliżu wierzchołka pęknięcia mogą być spowodowane ściskającymi naprężeniami własnymi. Ich źródłem jest strefa plastyczna występująca na czole pęknięcia. Występowanie naprężeń ściskających na brzegach pęknięcia powoduje, że do „otwarcia” (rozwarcia) pęknięcia niezbędna jest wstępna siła, która jest tym większa im bliżej jest wierzchołka pęknięcia. Oznacza to w praktyce, że w przypadku małych sił większe wartości przemieszczeń y rejestrowane są dla większego promienia r (rys.8.1), aż do momentu „otwarcia” pęknięcia. Podobne wyniki badań uzyskano w pracy [157], w której potwierdzenie występowania naprężeń własnych uzyskano w wyniku pomiaru odkształceń w próbce z pęknięciem przed i po obróbce cieplnej.

Przedstawiony prosty przykład analizy wartości współczynnika K_I pozwala wskazać potencjalne możliwości wykorzystania zastosowanej techniki pomiarowej w bardziej zaawansowanych badaniach, np. do bieżącego monitorowania wartości K_I w trakcie długotrwałych prób zmęczeniowych, w tym do kontroli pracy maszyny do badań zmęczeniowych w warunkach stałej wartości zakresu współczynnika intensywności naprężenia ΔK .

8.2. Strefy odkształceń plastycznych w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego

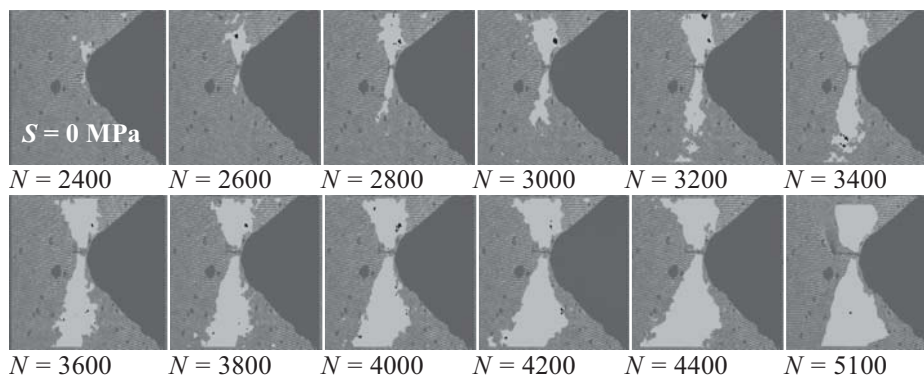
Drugim przykładem doświadczalnej analizy odkształceń w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego w trakcie wahadłowo-zmiennego obciążania są badania stalowych próbek z karbem oznaczonych jako SK. Próbki o kształcie i wymiarach podanych na rysunku 8.4 obciążano stałą wartością amplitudy naprężenia nominalnego $S_a = 300$ MPa. Spiętrzenie naprężeń wywołane działaniem karbu (wartość współczynnika kształtu wynosiła $K_t = 3,6$) powodowało w analizowanym przypadku powstawanie w próbce lokalnych odkształceń plastycznych. Z tego względu, w celu zwiększenia czytelności prowadzonej analizy, przyjmowano stan poprzedzający powstanie pęknięcia jako stan zerowy. Oznacza to, że prezentowane mapy odkształceń informują o przyro-

ście odkształcenia plastycznego przypadającego na okres propagacji pęknięcia. Należy także dodać, że w prezentowanej analizie rozpatrywano wyłącznie odkształcenia w kierunku obciążenia ϵ_y .

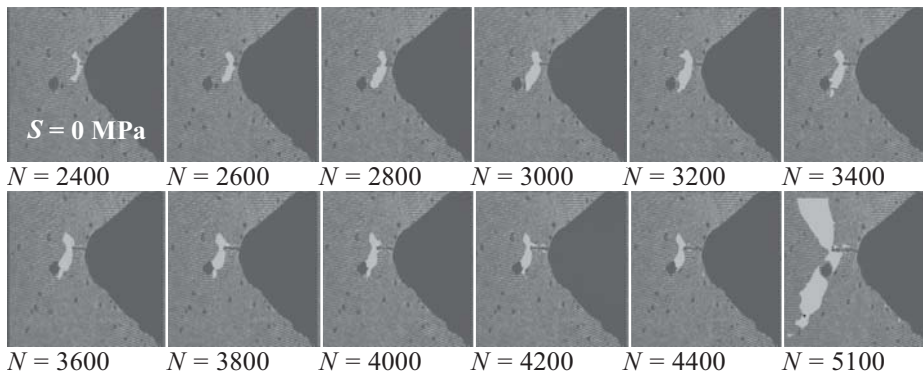


Rys. 8.4. Wymiary próbek SK (a) oraz własności statyczne i cykliczne stali 45 (b)

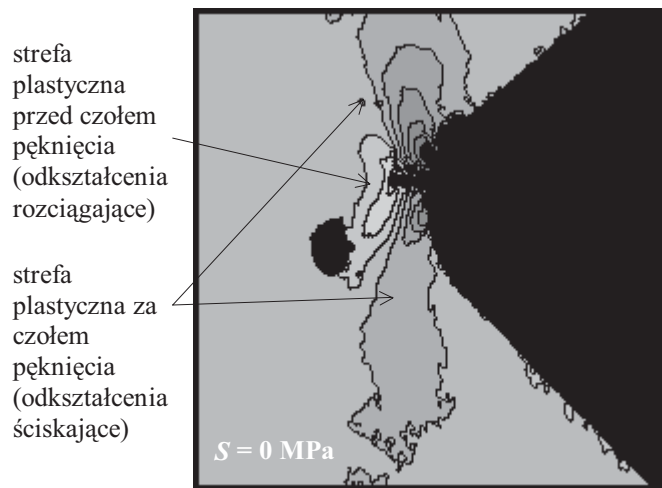
Jednym z efektów wynikających z pojawienia się pęknięcia zmęczeniowego w próbce była zmiana charakteru obciążenia materiału w strefie leżącej za czołem pęknięcia. Polegała ona na zmniejszeniu działania obciążeń rozciągających, przy zachowaniu obciążeń ściskających. Skutkiem tego, w obszarze próbki poza pęknięciem narastały strefy ściskających odkształceń plastycznych (wyznaczanych dla $S = 0 \text{ MPa}$) po obydwu stronach linii pęknięcia, co pokazano na rysunku 8.5. Strefy te znajdowały się w bezpośrednim sąsiedztwie cyklicznej strefy plastycznej powstającej na czole pęknięcia. A ta z kolei zachowywała zbliżony rozmiar po kolejnych cyklach obciążenia. Przebieg jej zmian przedstawiono na rysunku 8.6, a na rysunku 8.7 zestawiono strefy odkształceń plastycznych przed i za czołem pęknięcia dla liczby cykli $N = 3600$.



Rys. 8.5. Przebieg zmian strefy plastycznej w próbce typu SK w obszarze położonym za czołem pęknięcia



Rys. 8.6. Przebieg zmian strefy plastycznej na czole pęknięcia w próbce typu SK



Rys. 8.7. Strefy odkształceń plastycznych w próbce z pęknięciem poddanej obciążeniu wahadłowo-zmiennemu

Opisany charakter zmian stref odkształceń plastycznych w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego spowodowany jest efektem redystrybucji obciążenia, który towarzyszy rozwijającemu się pęknięciu zmęczeniowemu. W omawianym przykładzie, propagujące pęknięcie powodowało zróżnicowanie wartości współczynnika asymetrii cyklu R w poszczególnych obszarach próbki, od w pełni wahadłowego w strefie przed czołem pęknięcia do jednostronnie zmiennego z dużą wartością średnią w strefie za pęknięciem (rys.8.7). W przypadku bardziej złożonych elementów konstrukcyjnych, redystrybucja obciążenia wywołana zmęczeniowym pękaniem może być przyczyną zmian sposobu przenoszenia obciążenia w całym obiekcie, a w konsekwencji także pojawienia się nowych miejsc zagrożonych wystąpieniem pęknięć zmęczeniowych.

Możliwość doświadczalnego monitorowania parametrów opisujących stan obciążenia w strefie pęknięcia ma bardzo duże znaczenie w metodach diagnozowania stanu zmęczenia konstrukcji z istniejącym pęknięciem zmęczeniowym. Wymaga to jednak

zarówno rozwoju metod obliczania trwałości zmęczeniowej w fazie propagacji pęknięcia, jak i rozwoju metod doświadczalnego monitorowania stanu obciążenia w otoczeniu pęknięcia zmęczeniowego. Pewne możliwości w tym zakresie daje technika laserowej interferometrii siatkowej, szczególnie w przypadku zastosowania okresowego, inspekcyjnego charakteru pomiaru. Zastosowanie trwałych siatek przedmiotowych nanoszonych na regiony z rozwijającymi się pęknięciami pozwala bowiem zachować pełną informację o historii obciążenia pomiędzy kolejnymi inspekcjami, podobnie jak w przypadku analizy stref odkształceń plastycznych w fazie inicjacji pęknięcia zmęczeniowego – opisanych w pracach [16, 20, 21, 22].

9. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu nieciągłości geometrycznych oraz niejednorodności materiałowych na rozkłady odkształceń występujące w strefach zmęczeniowego pęknięcia elementów konstrukcyjnych poddanych obciążeniom zmęczeniowym. Dla realizacji przyjętego zakresu badań opracowano koncepcje doświadczalnej i doświadczalno-numerycznej analizy stanu odkształceń w strefach zmęczeniowego pęknięcia materiałów i konstrukcji. Zaproponowane metody badawcze wykorzystano w badaniach obiektów odwzorowujących rzeczywiste struktury stosowane, m.in. w lotnictwie i okrętownictwie. W pracy zaproponowano ponadto metodę wyznaczania lokalnych własności zmęczeniowych w strefach niejednorodności materiałowych, którą wykorzystano w analizie lokalnych własności zmęczeniowych laserowego złącza spawanego.

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie szeregu wniosków szczegółowych wynikających z analiz poszczególnych przypadków omawianych w pracy. Ich szersze omówienie przedstawiono w podsumowaniach do kolejnych rozdziałów. Poniżej przedstawiono w syntetycznej formie ogólne wnioski uznane za najistotniejsze uwzględniając cele pracy.

Analiza wyników badań odkształceń w strefach zmęczeniowego pęknięcia wykazała, że:

1. Nieciągłości geometryczne i niejednorodności materiałowe występujące w złożonych elementach konstrukcyjnych mogą stwarzać warunki do jednoczesnego powstawania i rozwoju wielu pęknięć zmęczeniowych w jednym obszarze spiętrzeń odkształceń i naprężeń, co wykazano na przykładach połączenia nitowego oraz laserowego złącza spawanego. Tym samym analiza miejsca inicjacji pęknięcia, wyłącznie na drodze teoretycznej analizy maksymalnych odkształceń lokalnych, w wielu przypadkach jest niewystarczająca.
2. Przeprowadzone badania doświadczalne pozwalają stwierdzić, że istnieje możliwość przewidywania miejsc inicjacji pęknięcia zmęczeniowego w wyniku jednoczesnej analizy maksymalnych odkształceń lokalnych oraz gradientu odkształcenia. Potwierdzają to wyniki badań laserowego złącza spawanego. Przebieg zmian gradientu odkształcenia w trakcie prób zmęczeniowych pozwala ponadto zauważyć jego stosunkowo małą wrażliwość na efekt cyklicznego pełzania, a także korzystne zachowanie ze względu na możliwość zastosowania w metodach monitorowania stanu zmęczenia konstrukcji w fazie do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego.
3. Jednoczesna inicjacja pęknięć w więcej niż jednym miejscu strefy koncentracji odkształceń znacznie ogranicza skuteczność analizy przebiegu zmęczenia w fazie rozwoju pęknięcia metodami opartymi na mechanice pęknięcia, m.in. ze względu na efekty związane z redystrybucją obciążenia.
4. Powstawanie lokalnych stref odkształceń plastycznych w obszarach nieciągłości geometrycznych i niejednorodności materiałowych w warunkach cyklicznie zmiennego obciążenia powoduje zmianę własności materiałowych w strefach zmęczeniowego pęknięcia. Tym samym stosowanie w opisach teoretycznych takich samych własności materiałowych dla całego obiektu może prowadzić do błędów w ocenie stanu odkształceń lokalnych w strefach zmęczeniowego pęknięcia. Podobny skutek mieć będzie nieuwzględnienie zmian własności materiału w kolejnych cyklach obciążenia.

5. Obserwowany w trakcie badań charakter zmian odkształceń plastycznych w obszarach zagrożonych powstaniem pęknięcia zmęczeniowego pozwala stwierdzić przydatność analizy strefy odkształcenia plastycznego w ocenie stopnia uszkodzenia zmęczeniowego elementów konstrukcyjnych.
6. Stwierdzony w badaniach brak stabilizacji własności materiału w strefie zmęczeniowego pęknięcia występował zarówno w przypadku obciążeń jednostronnie zmiennych, jak i obciążeń wahadłowych. Jednak przebieg zmian własności zależał od materiału – w trakcie badań obserwowano zarówno efekty jego osłabienia, jak i umocnienia, a także ich okresowego następstwa po sobie.
7. Brak stabilizacji własności materiałowych komplikuje możliwość prowadzenia analizy zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych z zastosowaniem tzw. stałych własności zmęczeniowych materiału, które w praktyce okazują się być zależnymi od historii obciążenia materiału.
8. Analiza lokalnych własności materiałowych w poszczególnych strefach laserowego złącza spawanego wykazała znaczne zróżnicowanie statycznych i cyklicznych własności materiałowych, przy czym obciążenie cykliczne istotnie zmieniało stan materiału w stosunku do obciążeń statycznych.
9. Rozwijające się pęknięcie zmęczeniowe zmienia w istotny sposób stan odkształceń zarówno w strefie „przed”, jak i „za” jego czołem. Zmiany te jednak mają różny charakter w przypadku obciążeń o różnym współczynniku asymetrii cyklu.

Z przeprowadzonych badań wynikają ponadto wnioski dotyczące zastosowanych metod badawczych:

1. Zaproponowana w pracy metoda doświadczalnych badań odkształceń w warunkach obciążeń zmiennych w czasie, z zastosowaniem laserowego ekstensometru siatkowego LES, umożliwia analizę wpływu nieciągłości geometrycznych i niejednorodności materiałowych na stan odkształceń lokalnych w strefach zmęczeniowego pęknięcia. Jej skuteczność w omawianym zakresie analizy wykazały przykłady badań rozkładów odkształceń w obiektach bazujących na współczesnych rozwiązaniach konstrukcyjnych i technologicznych, takich jak spawane laserowo stalowe struktury panelowe typu „sandwich” oraz połączenia nitowane stosowane w lotnictwie.
2. Przedstawiona koncepcja wyznaczania lokalnych własności zmęczeniowych w obszarach niejednorodności materiałowych umożliwia prowadzenie badań lokalnych własności zmęczeniowych w poszczególnych strefach złącza spawanego, co wykazano na przykładzie złącza wykonanego technikami laserowymi. Wyznaczane w proponowany sposób lokalne cykliczne własności materiałowe mogą znaleźć szerokie zastosowanie w nieliniowej analizie numerycznej w modelowaniu złożonych elementów konstrukcyjnych, w tym także w doświadczalno-numerycznych metodach hybrydowych.
3. Zastosowana w pracy hybrydowa metody analizy odkształceń i naprężeń pozwala na znaczne poszerzenie możliwości badań ich stanu w obszarach zmęczeniowego pęknięcia konstrukcji. Wprowadzenie wyników pomiarów przemieszczeń, jako warunków brzegowych w analizie numerycznej, uwalnia od konieczności modelowania pełnej geometrii rozpatrywanego obiektu oraz jego rzeczywistego obciążenia, które w przypadku złożonych obiektów może generować znaczne błędy w analizie numerycznej.

Wyniki przeprowadzonych badań i analiz pozwalają także wytyczyć kierunki dalszych prac dotyczących analizy odkształceń w strefach zmęczeniowego pęknięcia. Jed-

nym z nich jest bezpośrednio powiązanie wyników przeprowadzonych analiz z metodami obliczeń trwałości zmęczeniowej zarówno w zakresie do, jak i po inicjacji pęknięcia zmęczeniowego. Niezbędnym elementem prac w tym zakresie będzie odniesienie wyników pomiarów odkształceń w otoczeniu pęknięcia do znanych kryteriów odkształceniowych, naprężeniowych i energetycznych stosowanych w analizie zmęczeniowej konstrukcji. Wymaga to między innymi analizy wyników pomiarów uwzględniających pełny opis składowych stanu odkształcenia (lub naprężenia w przypadku metody hybrydowej) w strefie zmęczeniowego pęknięcia.

Dalsze obszary badań otwierają się także w zakresie szczegółowych zagadnień dotyczących, m.in. problematyki pęknięcia wieloogniskowego i redystrybucji obciążenia w złożonych elementach konstrukcyjnych oraz zastosowania lokalnych własności zmęczeniowych w hybrydowej analizie stanu odkształceń i naprężeń. Jednym ze szczególnie interesujących zagadnień wymagających dalszych badań jest ponadto ocena możliwości zastosowania doświadczalnej oraz doświadczalno-numerycznej metody analizy odkształceń do monitorowania stanu uszkodzenia zmęczeniowego zarówno w fazie inicjacji, jak i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego. Pewne możliwości w tym zakresie daje technika laserowej interferometrii siatkowej, szczególnie w przypadku zastosowania inspekcyjnego charakteru pomiaru. Trwała siatka przedmiotowa naniesiona na obiekt umożliwia bowiem zachowanie informacji o łącznych skutkach działania obciążenia, co pozwala na okresowe kontrolowanie odkształceń w strefach zmęczeniowego pęknięcia.

Literatura

- [1] Abdullah K., Wild P.M., Jeswiet J.J., Ghasempoor A., 2001. Tensile testing for weld deformation properties in similar gage tailor welded blanks using the rule of mixtures. *Journal of Materials Processing Technology* 112, 91-97.
- [2] Adib H., Pluvinae G., 2003. Theoretical and numerical aspects of the volumetric approach for fatigue life prediction in notched components. *International Journal of Fatigue* 25, 67-76.
- [3] Agnihotri G., 1995. Calculation of elastic-plastic strains and stresses in notches under torsion load. *Engineering Fracture Mechanics* 51, 823-835.
- [4] Ahmad H.Y., Clode M.P., Yates J.R., 1996. Predicting notch fatigue lifetimes. *Proceedings of 6th International Fatigue Congress Fatigue 96*, Berlin, Pergamon, 117-122.
- [5] Ahmad H.Y., Clode M.P., Yates J.R., 1997. Prediction of fatigue crack growth in notched members. *International Journal of Fatigue* 19, 703-712.
- [6] ANSYS Online Help, SAS IP, 1999.
- [7] ANSYS Theory Reference, Release 5.6, 12th Edition, SAS IP, 1999.
- [8] API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. API RP 2A, 18th ed., American Petroleum Institute, Washington, September 1, 1989.
- [9] Bahai H., Glinka G., Esat I.I., 1996. Numerical and experimental evaluation of SIF for threaded connectors. *Engineering Fracture Mechanics* 54 (6), 835-845.
- [10] Behler K., Berkmann J., Ehrhardt A., Frohn W., 1997. Laser beam welding of low weight materials and structures. *Materials & Design* 18 (4/6) 1997, 261-267.
- [11] Bentachfine S., Pluvinae G., Gilert J., Azari Z., Bouami D., 1999. Notch effect in low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue* 21, 421-430.
- [12] Bjerken Ch., Persson Ch., 2001. A numerical method for calculating stress intensity factors for interface cracks in bimetals. *Engineering Fracture Mechanics* 68, 235-246.
- [13] Boroński D., 2000. Analiza odkształceń lokalnych w karbie w warunkach obciążeń zmiennych. *Mat. konf. XVIII Sympozjum Zmęczenie Materiałów i Konstrukcji*, Bydgoszcz-Pieczyska, 55-62.
- [14] Boroński D., 1999. Automatyczny układ do badań rozkładów odkształceń w karbie w warunkach obciążeń zmęczeniowych. *Mat. konf. XIX Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn*, Zielona Góra - Świnoujście, 297-299.
- [15] Boroński D., 2004. Badania doświadczalne odkształceń lokalnych w spawanych laserowo stalowych strukturach panelowych metodą laserowej interferometrii siatkowej. *Przegląd Spawalnictwa* 2-3, 17-21.
- [16] Boroński D., 2003. Badania odkształceń lokalnych i stref odkształceń plastycznych w karbach geometrycznych metodą interferometrii siatkowej ze względu na diagnozowanie stanu zmęczenia. *Przegląd Mechaniczny* 4, 26-32.
- [17] Boroński D., 1999. Badania rozkładu odkształceń i naprężeń lokalnych w próbkach z karbem w warunkach cyklicznego obciążenia. *Praca doktorska*, ATR Bydgoszcz.
- [18] Boroński D., 1998. Badanie stabilizacji własności zmęczeniowych stali 45 w obszarze karbu. *Mat. konf. XVII Sympozjum Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji*, Komitet Budowy Maszyn PAN, Bydgoszcz-Pieczyska, 51-56.

- [19] Boroński D., 1999. Hybrydowa metoda analizy odkształceń w elementach konstrukcyjnych w konstruowaniu ze względu na zmęczenie. Mat. konf. XIX Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn, Zielona Góra - Świnoujście, 289-295.
- [20] Boroński D., 2003. Investigations of plastic strain zone in notched specimens in low-cycle fatigue loading conditions. Proceedings of Fifth International Conference on Low Cycle Fatigue, DVM FEMS, Berlin, 383-388.
- [21] Boroński D., 2002. Możliwości diagnozowania stanu zmęczenia materiałów i konstrukcji z zastosowaniem systemu monitorowania pęknięcia zmęczeniowego SMP. Materiały II Seminarium: Wibroakustyczna diagnostyka procesów zmęczeniowych, Warszawa.
- [22] Boroński D., 2001. Quasihybrydowa metoda wyznaczania odkształceń w diagnostyce trwałości zmęczeniowej. Problemy Eksploatacji 3, 29-37.
- [23] Boroński D., 2000. Rozwój strefy odkształceń plastycznych w karbie w warunkach cyklicznego obciążenia. Mat. konf. XVIII Sympozjum Zmęczenie Materiałów i Konstrukcji, Bydgoszcz-Pieczyska 63-70.
- [24] Boroński D., 2000. The investigations of strain distribution in notched specimens in cyclic loading conditions. Solid Mechanics Conference 4th EUROMECH, Metz, France, 392 (book of abstracts II).
- [25] Boroński D., 1996. Wyznaczanie pętli histerezy w obszarze karbu z wykorzystaniem metody interferometrii siatkowej. Mat. konf. XVI Sympozjum Międzysekcyjnego Zespołu Zmęczenia i Mechaniki Pękania Materiałów i Konstrukcji, Komitet Budowy Maszyn PAN, Bydgoszcz-Pieczyska 23-26.
- [26] Boroński D., Giesko T., Sałbut L., 2001. Projekt i wykonanie laserowego ekstensometru siatkowego do połowej analizy rozkładów odkształceń w elementach konstrukcyjnych. Zesz. Nauk. Politechniki Opolskiej, Mechanika 68, 103-110.
- [27] Boroński D., Kozak J., 2004. Research on deformation of laser-welded joint of a steel sandwich structure model. Polish Maritime Research 11 (2), 3-8.
- [28] Boroński D., Lipski A., 2002. Hybrydowa analiza odkształceń i naprężeń na czole pęknięcia zmęczeniowego. Mat. konf. XIX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz-Pieczyska, 59-66.
- [29] Boroński D., Sałbut L., 1996. Wykorzystanie interferometrii siatkowej do badania odkształceń w niskocyklowym zmęczeniu elementów z karbem. Mat. konf. XVII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Komitet Mechaniki PAN, Jachranka, 105-111.
- [30] Boroński D., Szala J., 2003. Badania przebiegu pęknięcia zmęczeniowego z zastosowaniem systemu SMP. Zesz. Nauk. Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 78, 55-62.
- [31] Boroński D., Szala J., 2002. Badania stref inicjacji i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego za pomocą laserowego ekstensometru siatkowego LES. Przegląd Mechaniczny 7-8, 25-32.
- [32] Boroński D., Szala J., 2002. Laser grating extensometer LES for fatigue full-field strain analysis. ECF 14 Fracture Mechanics Beyond 2000, EMAS, 297-304.
- [33] Boroński D., Szala J., 1998. Strain distributions in notched specimens in low-cycle loading conditions. Proceedings of 32nd Solid Mechanics Conference, IPPT PAN, Zakopane, 91-92.
- [34] Boroński D., Szala J., 2002. System Laserowego Ekstensometru Siatkowego LES - budowa, parametry użytkowe, zastosowanie. Mat. konf. XIX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz-Pieczyska, 369-372.

- [35] Boroński D., Szala J., 2002. The hybrid strain analysis in fatigue loading conditions. Proceedings of the 8th International Fatigue Congress, Stockholm, EMAS, 2775-2782.
- [36] 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.
- [37] Boutabout B., Bachir Bouiadjra B., Ranganathan N., 2000. Three-dimensional element analysis of the behaviour of quarter-elliptical corner cracks emanating from fastener holes. ECF 14 Fracture Mechanics Beyond 2000, EMAS, 329-336.
- [38] Bui-Quoc T., 1973. Cyclic stress, strain and energy variations under cumulative damage tests in low-cycle fatigue. Journal of Testing and Evaluation, ASRM 1, 58-64.
- [39] Çam G., Erim S., Yeni Ç., Koçak M., 1999. Determination of mechanical and fracture properties of laser beam welded steel joints. Welding Research Supplement To The Welding Journal, The American Welding Society And The Welding Research Council, 193-201.
- [40] Chien C.-H., Coffin L.F., 1998. A new method for predicting fatigue life in notched geometries. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 21, 1-15.
- [41] Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures, BS 7608: 1993, BSI, London.
- [42] Coffin L.F., 1954. A study of cyclic-thermal stresses in a ductile metal. ASME Transaction 76, 931-950.
- [43] Conle A., Nowack H., 1977. Verification of a Nuber-based notch analysis by the companion-specimen method. Experimental Mechanics, February, 57-63.
- [44] Creager M., Paris P.C., 1967. Elastic field equations for blunt cracks with reference to stress corrosion cracking. International Journal of Fracture Mechanics 3 (4), 247-252.
- [45] Det Norske Veritas: Fatigue Analysis of H SLC Proposal for Classification Note Oslo 1998.
- [46] Diaz F.V., Armas A.F., Kaufmann G.H., Galizzi G.E., 2004. Nondestructive evaluation of the fatigue damage accumulation process around a notch using a digital image measurement system. Optics and Lasers in Engineering 41, 477-487.
- [47] 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 37, 621-629.
- [48] Dijkstra O.D., de Back J., 1980. Fatigue strength of welded tubular T- and X-joints. Proceedings of 12th Offshore Technology Conference, OTC Paper No. 3639, Houston.
- [49] Doerk O., Fricke W., Weissenborn C., 2003. Comparison of different calculation methods for structural stresses at welded joints. International Journal of Fatigue 25, 359-369.
- [50] Dolby R. E., 2003. Trends in welding processes in engineering construction for infrastructure projects, 56th IIW Annual Assembly, Bucharest, Romania.
- [51] Dong P., 2001. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints. International Journal of Fatigue 23, 865-876.
- [52] Dugdale D.S., 1960. Yielding of steel sheets containing slits. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 8, 100-104.

- [53] Dulieu-Barton J.M., Fulton M.C., Stanley P., 2000. The analysis of thermoelastic isopachic data from crack tip stress fields. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 23, 301-313.
- [54] Du-yi Y., De-jun W., 1996. A new approach to the prediction of fatigue notch reduction factor K_f . *International Journal of Fatigue* 18, 105-109.
- [55] Elber W., 1971. The significance of fatigue crack closure, *Damage tolerance in aircraft structures*. ASTM STP 486, 230-242.
- [56] Fatemi A., Yang L., 1998. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials. *International Journal of Fatigue* 20, 9-34.
- [57] *Fatigue Design Handbook*, II edition, Society of Automotive Engineering, 1988.
- [58] Fawaz S.A., Andersson B., 2004. Accurate stress intensity factor solutions for corner cracks at a hole. *Engineering Fracture Mechanics* 71, 1235-1254.
- [59] Ferahi M., Meguid S.A., 1998. A novel approach for evaluating weight function for cracks in finite bodies. *Engineering Fracture Mechanics* 59, 343-352.
- [60] Fett T., Munz D., 1999. Technical Note. Local stress intensity factors for small semi-elliptical cracks under exponentially distributed stresses. *Engineering Fracture Mechanics* 64, 105-116.
- [61] Fett T., 2000. Estimation of stress intensity factors for semi-elliptical surface cracks. *Engineering Fracture Mechanics* 66, 349-356.
- [62] Fetta T., Bahrb H-A., 1999. Technical note. Mode I stress intensity factors and weight functions for short plates under different boundary conditions. *Engineering Fracture Mechanics* 62, 593-606.
- [63] Fonte M., Freitas M., 1999. Stress Intensity Factors for semi-elliptical surface cracks in round bars under bending and torsion. *International Journal of Fatigue* 21, 457-463.
- [64] Franck L.M., Violette DUT., 1995. Lloyd's register integrated fatigue design assessment system. *Proceedings of Fatigue Design 95*, Helsinki, 253-286.
- [65] Fuchs H.O., Stephens R., 1980. *Metal fatigue in engineering*. Wiley, New York.
- [66] Giesko T., Boroński D., 2003. Zautomatyzowane systemy maszynowego widzenia w badaniach zmęczeniowych. *Problemy Eksploatacji* 3, 177-188.
- [67] Glinka G., Newport A., 1987. Universal features of elastic notch-tip stress fields. *International Journal of Fatigue* 9, 143-150.
- [68] Glinka G., 1985. Energy density approach to calculation of inelastic strain-stress near notched and cracks. *Engineering Fracture Mechanics* 22, 485-508.
- [69] Gołoś K., Ellyin F., 1988. A total strain energy density theory for cumulative fatigue damage. *ASME Journal of Pressure Vessel Technology* 110, 36-41.
- [70] Guo W., Shen H., Li H., 2003. Stress intensity factors for elliptical surface cracks in round bars with different stress concentration coefficient. *International Journal of Fatigue* 25, 733-741.
- [71] Gurney T.R., 1979. *Fatigue of welded structures*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [72] Gurney T.R., 1973. *Zmęczenie konstrukcji spawanych*. WNT Warszawa.
- [73] Haibach E., 1968. Die schwingfesigkeit von schweissverbindunge aus der sicht einer örtlichen Beanspruchungsmessung. LBF-bericht no. FB-77, Lab. F. Betriebsfestigt. Darmstadt.

- [74] Hammouda M.M.I., Sallam H.E.M., Osman H.G., 2004. Significance of crack tip plasticity to early notch fatigue crack growth. *International Journal of Fatigue* 26, 173-182.
- [75] Harman G.A., Provan J.W., 1997. Fatigue crack-tip plasticity revisited - the issue of shape addressed. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 26, 63-79.
- [76] Heo S.P., Yang W.H., 2003. Approximate weight function method for elliptical arc through cracks in mechanical joints. *Engineering Fracture Mechanics* 70, 1171-1192.
- [77] Hobbacher A., 1977. On the service strength of welded joints on the basis of the fracture mechanics. *Archiv Eisenhüttenwesen* 48, 109-114.
- [78] Irwin G.R., 1958. *Fracture. Handbuch der Physik*, t.VI, Springer, Berlin.
- [79] James M.N., Dimitriou C., Chandler H.D., 1989. Low cycle fatigue lives of notched components. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 12, 213-225.
- [80] 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.
- [81] Kang K.-J., Beom H.G., 2000. Plastic zone size near the crack tip in a constrained ductile layer under mixed mode loading. *Engineering Fracture Mechanics* 66, 257-268.
- [82] Kang S.W., Kim W. S., 2003. A Proposed S-N Curve for Welded Ship Structures - a hot-spot stress-based design S-N curve for fillet weld joints takes into account the effects of static cargo loads. *Welding Research Supplement to the Welding Journal*, 161-169.
- [83] Kapkowski J., Kujawińska M., 1994. Współczesne zastosowania technik hybrydowych w mechanice ciała stałego. *Mat. konf. XVI Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego*, Jachranka, 132-151.
- [84] Knop M., Jones R., Molent L., Wang C., 2000. On the Glinka and Neuber methods for calculating notch tip strains under cyclic load spectra. *International Journal of Fatigue* 22, 743-755.
- [85] Kobayashi A.S., 1999. Hybrid method in elastic and elastoplastic fracture mechanics. *Optics and Lasers in Engineering* 32, 299-323.
- [86] Kocańda S., 1985. *Zmęczeniowe pękanie metali*, WNT Warszawa.
- [87] Kocańda S., Szala J., 1997. *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- [88] Koko T.S., Matthews J.R., 2001. Plastic zone development in dynamic tear-type test specimens. *Finite Elements in Analysis and Design* 37, 997-1012.
- [89] Kujawińska M., Sałbut L., Józwick M., Boroński D., 2000. Ekstensometr laserowy zintegrowany z maszyną wytrzymałościową. *Mat. konf. XIX Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego*, Jachranka, 361-366.
- [90] Kujawińska M., Sałbut L., Dymny G., 1994. Portable, automatic grating interferometer for laboratory and field studies of materials and mechanical elements. *Photomechanics* 2342, 58-65.
- [91] Kujawińska M., Sałbut L., 1995. Recent developments in instrumentation of automated grating interferometry. *Optica Applicata* 25, 211-232.
- [92] Kujawińska M., 2000. Automated in-plane moiré techniques and grating interferometry. [In] *Optical Methods in Experimental Solid Mechanics*, K-H. Laermann eds. Springer-Verlag.

- [93] Kujawski D., Ellyin F., 1984. A cumulative damage theory of fatigue crack initiation and propagation. *International Journal of Fatigue* 6, 83-88.
- [94] Kujawski D., 1991. Estimation of stress intensity factors for small cracks at notches. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 14, 953-965.
- [95] Laermann K.-H., 1999. Hybrid analysis of two- and three-dimensional solids composed of different materials. *Optics and Lasers in Engineering* 32, 183-203.
- [96] Laermann K.-H., 1995. New achievements and perspectives of optical methods in experimental solid mechanics. *Optics and Lasers in Engineering* 22, 249-270.
- [97] Laermann K.-H., 2000. Hybrid techniques in experimental solid mechanics. [In] *Optical Methods in Experimental Solid Mechanics*, K-H Laermann eds. Springer-Verlag.
- [98] Lal K.M., Garg S.B.L., 1977. On the evaluation of monotonic and cyclic plastic zones. *Engineering Fracture Mechanics* 9, 433-442.
- [99] Landgraf R., Morrow J., Endo T., 1969. Determination of the cyclic stress-strain curve. *Journal of Materials* 4, 1621-1653.
- [100] Lawrence F.V., Mattos R.J., Higashida Y., Burk J.D., 1978. Estimation of fatigue initiation life of welds. *ASTM STP* 648, 134-158.
- [101] Lee K.Y., Kim J.S., 1996. Determination of stress intensity factor for embedded elliptical crack in turbine rotor. *Engineering Fracture Mechanics* 55, 1013-1029.
- [102] Lee S.S., 1996. Boundary element evaluation of stress intensity factors for interface edge cracks in a unidirectional composite. *Engineering Fracture Mechanics* 55, 1-6.
- [103] Lipski A., 2003. Analiza wpływu rozkładów odkształceń i naprężeń na trwałość zmęczeniową złożonych elementów konstrukcyjnych. Praca doktorska, ATR Bydgoszcz.
- [104] Liu C-F., Jou H-S., Lee Y-T., 1997. Stress intensity factor of a patched crack. *International Journal of Solids Structures* 34, 1557-1562.
- [105] Lucas P., Klesnil M., 1978. Fatigue limit of notched bodies. *Materials Science and Engineering* 34, 61-66.
- [106] Luong M.P., 1998. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique. *Mechanics of Materials* 28, 155-163.
- [107] Luong M.P., 1995. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals. *Nuclear Engineering and Design* 158, 363-376.
- [108] Machinfalah M., Zackerby L., 1995. Photoelastic determination of mixed mode stress intensity factors for sharp reentrant corners. *Engineering Fracture Mechanics* 52, 639-645.
- [109] Mackerle J., 1995. Fracture mechanics parameters and finite element and boundary element methods - a bibliography (1992-1994). *Finite Elements in Analysis and Design* 19, 209-223.
- [110] Maddox J., 1974. Assessing the Significance of Flaws in Welds Subject to Fatigue. *Welding Journal* 53, Res.Suppl., 401-409.
- [111] Maddox S. J., 2000. Fatigue design rules for welded structures. *Progress in Structural Engineering and Materials* 2, 2000, 102-109.
- [112] Maddox S.J., 2002. Hot-Spot Stress Design Curves for Fatigue Assessment of Welded Structures 12, 134-141.
- [113] Maddox S.J., 2003. Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures. *International Journal of Fatigue* 25, 1359-1378.

- [114] Magiera J., Orkisz J., Karmowski W., 1996. Reconstruction of residual stresses in railroad rails from measurements made on vertical and oblique slices. *Wear* 191, 78-89.
- [115] Manson S.S., Halford G.R., 1981. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage. *International Journal of Fracture* 17, 169-192.
- [116] Manson S.S., 1953. Behaviour of materials under conditions of thermal stress, National Advisory Committee on Aeronautics, Technical Note 2933.
- [117] Martinez A., Rodriguez-Vera R., Rayas J.A., Puga H.J., 2003. Fracture detection by grating moiré and in-plane ESPI techniques. *Optics and Lasers in Engineering* 39, 525-536.
- [118] Matthew T., Kokaly M.T., Lee J., Kobayashi A.S., 2003. Moiré interferometry for dynamic fracture study. *Optics and Lasers in Engineering* 40, 231-247.
- [119] Mattos R.J., Lawrence F.V., 1977. Estimation of the fatigue crack initiation life in welds using low-cycle fatigue concepts. SAE SP-424, Society of Automotive Engineering, Warrendale.
- [120] 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* 22, 551-558.
- [121] Meisel D., Weygandt W., 1993. Die zyklische elastizitätsgrenze, *Materialprüfung* 35, 183-186.
- [122] Moftakhar A., Buczyński A., Glinka G., 1995. Calculation of elasto-plastic strains and stresses in notches under multiaxial loading. *International Journal of Fracture* 70, 357-373.
- [123] Mollenhauer D.H., Ifju P.G., Han B., 1995. A compact, robust and versatile moiré interferometer. *Optics and Lasers in Engineering* 23, 29-40.
- [124] Molski K., Glinka G., 1981. A method of elastic-plastic stress and strain calculation at a notch root. *Materials Science and Engineering* 50, 93-100.
- [125] Molski K.L., 2000. Zastosowanie jednostkowej funkcji w wymiarowaniu konstrukcji metodami mechaniki pęknięcia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [126] Mongabure P., Matheron P., Madi Y., 2003. Mechanical cyclic behaviour of 316L welded joint, *Comportement cyclique de joints soudés en 316L. Mécanique & Industries* 4, 619-626.
- [127] 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* 78, 253-259.
- [128] Moore A.J., Tyrer J.R., 1996. Two-dimensional strain measurement with ESPI. *Optics and Lasers in Engineering* 24, 381-402.
- [129] Morbarigazzi C., Stupnicki J., Measurement of microslips of subsurface fatigue cracks faces due to rolling loads, *Journal of Strain Analysis* 39, 161-171.
- [130] Morrow J., 1965. Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals, internal friction, damping and cyclic plasticity. ASTM STP-378, ASTM, Philadelphia, 45-87.
- [131] Morrow J.D., 1964. Fatigue Properties of Metals. Manual Society of Automotive Engineers. ISTC Div.4.
- [132] Mroziński S., 2004. Analiza porównawcza dwóch metod wyznaczania własności cyklicznych metali. *Przegląd Mechaniczny* 4, 30-36.

- [133] Muller de Almeida S.F., Hansen J.S., 1998. Enhanced measurement of strain distributions. *Experimental Mechanics* 38, 48-54.
- [134] Murakami Y., Noda N., Nisitani H., 1986. Application of body force method to the analysis of stress concentration of an axi symmetric body under bending: I. basic theory and application to several simple problems. *International Journal of Solids Structures* 22, 23-37.
- [135] Neimitz A., 1998. *Mechanika pękania*. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- [136] Neuber H., 1958. *Kerbspannungslehre*. Springer-Verlag, Berlin.
- [137] 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.
- [138] Newman Jr. J.C., Phillips E.P., Swain M.H., 1999. Fatigue-life prediction methodology using small-crack theory. *International Journal of Fatigue* 21, 109-119.
- [139] Newman Jr. J.C., 2002. Advances in finite-element modelling of fatigue-crack growth and fracture. *Fatigue 2002, Proceedings of the Eighth International Fatigue Congress, EMAS, Stockholm*, 55-70.
- [140] Newman Jr., J.C., 1998. The merging of fatigue and fracture mechanics concepts: a historical perspective. *Progress in Aerospace Sciences* 34, 347-390.
- [141] Nie H., Wu F.M., Liu J.F., 1994. A variable K_f Neuber's rule for predicting fatigue crack initiation life. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 17, 1015-1023.
- [142] Niemi E., 1993. Aspects of good design practice for fatigue-loaded welded components. *Proceedings of the International Symposium on Fatigue, ESIS Publication 16, Mechanical Engineering Publications*, 233-351.
- [143] Nishioka T., Nishi M., Fujimoto T., Sakakura K., Epstein J., 1995. Moire intrferometry measurements of near tip deformation in inhomogeneous elastic-plastic fracture specimens. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 63, 261-275.
- [144] Nishioka T., 1999. Hybrid numerical methods in static and dynamic fracture mechanics. *Optics and Lasers in Engineering* 32, 205-255.
- [145] Nisitani H., Noda N.-A., 1986. Stress concentration of a strip with double edge notches under tension or in-plane bending. *Engineering Fracture Mechanics* 23, 1051-1065.
- [146] Nisitani H., Teranishi T., 2004. K_I of a circumferential crack emanating from an ellipsoidal cavity obtained by the crack tip stress method in FEM. *Engineering Fracture Mechanics* 71, 579-585.
- [147] 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* 68, 949-962.
- [148] Niu X., Glinka G., 1987. The weld profile effect on stress intensity factor in weldments. *International Journal of Fracture* 35, 3-20.
- [149] Noda N.-A., Sera M., Takase Y., 1995. Stress concentration factors for round and flat test specimens with notches. *International Journal of Fatigue* 17, 163-178.
- [150] *Offshore Installations: Guidance on Design and Construction*, UK Department of Energy, HM Stationery Office, London, 3rd ed, 1984.
- [151] Ohgi J., Hatanaka K., 1997. Assesment of J-integral for three-dimensional surface crack at notch root. *JSME International Journal, Series A* 40 (3), 290-297.

- [152] Papargyri-Pegiou S., Theofanidis D., Webb, T.W., Aifantis, E.C., 1995. A simple approach for modelling the heterogeneity of crack tip plastic zones. *Mechanics Research Communications* 22 (3), 263-269.
- [153] Paris P., Erdogan F., 1963. A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering, Transaction of ASME, Series 85*, 528-535.
- [154] Park H-B., Kim K-M., Lee B-W., 1996. Plastic zone size in fatigue cracking. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 68, 279-285.
- [155] Peterson R., 1974. *Stress concentration factors*. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- [156] Pommier S., Sakae C., Murakami Y., 1999. An empirical stress intensity factor set of equations for a semielliptical crack in a semi-infinite body subjected to a polynomial stress distribution. *International Journal of Fatigue* 21, 243-251.
- [157] Poon C.Y., Ruiz C., 1994. Hybrid experimental-numerical approach for determining strain energy release rates. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 20, 123-131.
- [158] Post D., 1993. Moiré interferometry. [In] *Handbook on Experimental Mechanics*, A.S. Kobayashi eds, SEM, Bethel.
- [159] Praca zbiorowa pod redakcją Y. Murakami, 1987. *Stress intensity factors handbook*, Pergamon Press.
- [160] Praca zbiorowa pod redakcją M. Kleibera, 1995. *Komputerowe metody mechaniki ciał stałych*. *Mechanika techniczna XI*, PAN Komitet Mechaniki, PWN Warszawa.
- [161] Praca zbiorowa pod redakcją A.S. Kobayashi, 1993. *Handbook on Experimental Mechanics, SEM, Bethel*.
- [162] Qyılafku G., Azari Z., Kadi N., Gjonaj M., Pluvillage G., 1999. Application of a new model proposal for fatigue life prediction on notches and key-seats. *International Journal of Fatigue* 21, 753-760.
- [163] Radaj D., Sonsino C.M., Flade D., 1998. Prediction of service fatigue strength of a welded tubular joint on the basis of the notch strain approach. *International Journal of Fatigue* 20, 471-480.
- [164] Radaj D., 1995. Assessment of fatigue strength of welded structures based on local parameters. *Proceedings of Fatigue Design '95*, Helsinki, 349-366.
- [165] Radaj D., 1996. Review of fatigue strength assessment of nonwelded and welded structures based on local parameters. *International Journal of Fatigue* 18, 153-170.
- [166] Remes H., 2002. Fatigue strength of laser and hybrid welded joints. *The Maritime Research Seminar 2002*, Maritime Institute of Finland, Sjököulla, <http://www.hut.fi/Yksikot/Laiva/Tutkimus/Seminar/Remes.pdf>.
- [167] Report on the Development of a Unified Procedure for Fatigue Design of Ship Structures, Working Party on Strength of Ships Ad Hoc Group on Fatigue, JACS-ABS Draft Final Report, December, 1996.
- [168] Rice J.R., 1967. Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue. *ASTM-STP 415*, 247-309.
- [169] Rigby R., Aliabadi M.H., 1997. Stress intensity factors for cracks at attachment lugs. *Engineering Failure Analysis* 4, 133-146.
- [170] Rosochowicz K., 2000. *Problemy pęknięcia zmęczeniowego kadłubów statków*. *Okrętownictwo i Żegluga*, Gdańsk.

- [171] Schijve J., 1994. Fatigue of aircraft materials and structures. *International Journal of Fatigue* 16, 21-32.
- [172] Schijve J., 2001. *Fatigue of Structures and Materials*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London.
- [173] Schijve J., 1996. Predictions on fatigue life and crack growth as an engineering problems. A state of the art survey. *Proceedings of 6th International Fatigue Congress Fatigue 96*, Pergamon, Berlin, 1149-1164.
- [174] Schubach H.R., Wegner R., Ettemeyer A. 3D-ESPI for the Characterization of Metallic Alloys during Tensile Tests, Dr. ETTEMEYER Application Report No. 02-00, <http://www.ettemeyer.de>.
- [175] Sciammarella C.A., Combel O., 1996. An elasto-plastic analysis of the crack tip field in a compact tension specimen. *Engineering Fracture Mechanics* 55, 209-222.
- [176] Sendekyj G.P., 2001. Constant life diagrams – a historical review. *International Journal of Fatigue* 23, 347-353.
- [177] Seweryn A., 1997. *Kumulacja uszkodzeń i pękanie elementów konstrukcyjnych w złożonych stanach obciążeń*. Wyd. Politech. Białostockiej, Białystok.
- [178] Seweryn A., 1998. *Numeryczne metody obliczania współczynników intensywności naprężeń*. Wyd. Uczeln. ATR, Bydgoszcz.
- [179] Shang D.S., Wang D.K., Li M., Yao W.X., 2001. Local stress-strain field intensity approach to fatigue life prediction under random cyclic loading. *International Journal of Fatigue* 23, 903-910.
- [180] Sharpe Jr. W.N., Wang K.C., 1991. Evaluation of a modified monotonic Neuber relation. *Journal of Engineering Materials and Technology* 113, 1-8.
- [181] Shin C.S., Man K.C., Wang C.M., 1994. A practical method to estimate the stress concentration of notches. *International Journal of Fatigue* 16, 242-256.
- [182] Siebel E., Stieler M., 1955. Significance of dissimilar stress distribution for cyclic loading. *Z. VDI* 97, 146-148.
- [183] Siebert T., Schubach H.R., Ettemeyer A. *Laseroptische, berührungslose Verformungsanalyse von Biowerkstoffen mit modernen 3D-ESPI Systemen*, Ettemeyer AG Application Report No. 04-02.
- [184] Singh M.N.K., Glinka G., Dubey R.N., 1995. Elastic-plastic stress-strain calculation in notched bodies subjected to non-proportional loading. *International Journal of Fracture* 76, 39-60.
- [185] Smith R.A., Miller K.J., 1978. Prediction of fatigue regimes in notched components. *International Journal of Mechanical Sciences* 20, 201-206.
- [186] Socha G., Kujala P., 2002. Experimental investigations of laser stake welds in shipbuilding industry. *Fatigue 2002, Proceedings of the 8th International Fatigue Congress, EMAS, Stockholm*, 453-460.
- [187] Socha G., Kujala P., 2000. Fracture toughness of laser stake welds in shipbuilding industry. *Engineering Transactions* 48, 135-151.
- [188] Solanki K., Daniewicz S.R., Newman Jr. J.C., 2004. Finite element analysis of plasticity-induced fatigue crack closure: an overview. *Engineering Fracture Mechanics* 71, 149-171.
- [189] Sonsino C.M., Radaj D., Brandt U., Lehrke H.P., 1999. Fatigue assesment of welded joints in AlMg4.5Mn aluminium alloy (AA 5083) by local approaches. *International Journal of Fatigue* 21, 985-999.

- [190] Sprawozdanie z realizacji Projektu Badawczego KBN Nr 7 T07B 010 18 pt. „Badania zmęczeniowe złożonych elementów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych”, Bydgoszcz, 2003.
- [191] Structural Welding Code - Steel, 13th ed., ANSI/AWSD 1.1-92, AWS, Miami, 1992.
- [192] Stupnicki J., 1984. Optyczne metody badań w mechanice. [W:] Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego. Mechanika techniczna X, praca zbiorowa pod redakcją W. Szczepińskiego, PWN, Warszawa.
- [193] Szala J., 1998. Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Wyd. Uczeln. ATR, Bydgoszcz.
- [194] Szala J., 2003. Przegląd możliwości diagnozowania obiektów technicznych ze względu na zmęczeniowe pękanie. Przegląd Mechaniczny 4, 26-32.
- [195] Tanaka K., 1983. Engineering formulae for fatigue strength reduction due to crack-like notches. *International Journal of Fracture* 22, 39-45.
- [196] Tay T.E., Yap C.M., Tay C.J., 1995. Crack tip and notch tip plastic zone size measurement by the laser speckle technique. *Engineering Fracture Mechanics* 52, 879-893.
- [197] Taylor D., Bologna P., Bel Knani K., 2000. Prediction of fatigue failure location on a component using a critical distance method. *International Journal of Fatigue* 22, 735-742.
- [198] Taylor D., 2001. A mechanistic approach to critical-distance methods in notch fatigue. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 24, 215-224.
- [199] Taylor D., 1999. Geometrical effects in fatigue: a unifying theoretical model. *International Journal of Fatigue* 21, 413-420.
- [200] Topper T.H., Wetzel R.M., Morrow J., 1969. Neuber's rule applied to fatigue of notched specimens. *Journal of Materials, ASTM*, 4(1), 200-209.
- [201] Tovo R., Lazzarin P., 1999. Relationships between local and structural stress in the evaluation of the weld toe stress distribution. *International Journal of Fatigue* 21, 1063-1078.
- [202] Tricoteaux A., Degallais S., Sauvage F., 1995. Calculations of the fatigue crack initiation life in HSS Steel welded joints by a local stress-strain approach method. *Proceedings of Fatigue Design 95*, Helsinki, 111-124.
- [203] Tu M., Gielisse P.J., Xu W., 1997. Grating holographic interferometry. *Experimental Mechanics* 37 (2), 188-196.
- [204] Uguz A., Martin J.W., 1996. Plastic zone size measurement techniques for metallic materials. *Materials Characterization* 37, 105-118.
- [205] Ushijima K., Chen D-H., Kitte N., 2002. Intensity of a plastic singular stress field at the notch tip. *JSME International Journal, Series A* 45 (2), 170-176.
- [206] Vasudevan A.K., Sadananda K., Glinka G., 2001. Critical parameters for fatigue damage. *International Journal of Fatigue* 23, 39-53.
- [207] Verreman Y., Bailon J.P., Masounave J., 1987. Fatigue life prediction of welded joints – a re-assessment. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 10, 17-36.
- [208] Visvanatha S.K., Straznický P.V., Hewitt R.L., 2000. Influence of strain estimation methods on life predictions using the local strain approach. *International Journal of Fatigue* 22, 675-681.

- [209] Vitvitskij P.M., Panasyuk V.V., Yarema Y.S., 1975. Plastic deformation around crack and fracture criteria. *Engineering Fracture Mechanics* 7, 305-319.
- [210] Wang X., Lambert S.B., 2003. On the calculation of stress intensity factors for surface cracks in welded pipe-plate and tubular joints. *International Journal of Fatigue* 25, 89-96.
- [211] Wang C.H., Guo W., Rose L.R.F., 1999. A method for determining the elastic-plastic response ahead of a notch Tipp. *Journal of Engineering Materials and Technology*, ASME 121, 313-320.
- [212] Wang W-Q., Li A-J., Li P-N., Ju D-Y., 1994. An engineering approach for notch elastic-plastic fracture analysis. *International Journal of Vessels and Piping* 60, 1-16.
- [213] Wang X., Lambert S.B., Glinka G., 1998. Approximate weight functions for embedded elliptical cracks. *Engineering Fracture Mechanics* 59, 381-392.
- [214] Wang X., Lambert S.B., 2001. Semi-elliptical surface cracks in finite-thickness plates with built-in ends. II. Weight function solutions. *Engineering Fracture Mechanics* 68, 1743-1754.
- [215] Wanga R., Kidob M., 2003. High temperature fatigue deformation behaviors of thermally sprayed steel measured with electronic speckle pattern interferometry method. *Materials Research Bulletin* 38, 1401-1411.
- [216] Weiss V., 1962. *Transaction of ASME*, Paper No.62-WA-270.
- [217] Weixing Y., Kaiquan X., Yi G., 1995. On the fatigue notch factor K_f . *International Journal of Fatigue* 17, 245-251.
- [218] Wilks M.D.B., Nowell D., Hills D.A., 1993. Evaluation of stress intensity factors for three dimensional cracks in residual stress fields. University Technology Center for Solid Mechanics, Oxford UTC Report No. 38.
- [219] Xu R.X., Thompson J.C., Topper T.H., 1995. Practical stress expressions for stress concentration regions. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 18, 885-895.
- [220] Yang Y.Y., Munz D., Sckuhr M.A., 1997. Evaluation of the plastic zone in an elastic-plastic dissimilar materials joints. *Engineering Fracture Mechanics* 56, 691-710.
- [221] Yang Z.J., Chen J.F., Holt G.D., 2001. Efficient evaluation of stress intensity factors using virtual crack extension technique. *Computers and Structures* 79, 2705-2715.
- [222] Yan-Lin Lu, 1996. A practical procedure for evaluating SIFs along fronts of semi-elliptical surface cracks at weld toes in complex stress fields. *International Journal of Fatigue* 18, 127-135.
- [223] Yao W., Ye B., Zheng L., 2001. Technical note. A verification of the assumption of anti-fatigue design. *International Journal of Fatigue* 23, 271-277.
- [224] Yao W.X., 1993. Stress field intensity approach for predicting fatigue life. *International Journal of Fatigue* 15, 243-246.
- [225] Yoshiharu M., Yoneyama S., 2001. Activities on Standardization of Full-field Optical Stress and Strain Measurement Methods in Japan, Materialy VAMAS TWA26 Round-table, SEM Annual Conference, Portland.
- [226] Yoshimura S., Kawate H., Wada Y., Yagawa G., 1999. A PC-based system for evaluation of three-dimensional stress intensity factors. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 76, 495-501.

- [227] Youshi H., Miller K.J., Brown M.W., 1991. Complex stress functions and plastic zone size for notch cracks subjected to various loading conditions. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 14, 237-258.
- [228] Yuuki R., Ohira T., 1989. Development of the method to evaluate the fatigue life of spot-welded structures by fracture mechanics, IIW Doc.XIII-1358-89. International Institute of Welding.
- [229] Zhang J-Zhen., Zhang J-Zhong., Du S-Y., 2001. Elastic-plastic finite element analysis and experimental study of short and long fatigue crack growth. *Engineering Fracture Mechanics* 68, 1591-1605.
- [230] Zhang S., 2002. Stresses in Laser-Beam-Welded Lap Joints Determined by Outer Surface Strains. *Welding Research* 1, 14-18.
- [231] Zheng M., Niemi E., 1997. Analysis of the stress concentration factor for a shallow notch by the slip-line field method. *International Journal of Fatigue* 19, 191-194.
- [232] Zheng X.J., Glinka G., Dubey R.N., 1985. Calculation of stress intensity factors for semielliptical cracks in a thick-wall cylinder. *International Journal of Vessel and Piping* 62, 249-258.
- [233] Zheng X.J., Glinka G., Dubey R.N., 1996. Stress intensity factors and weight functions for a corner crack in a finite thickness plate. *Engineering Fracture Mechanics* 54, 49-61.
- [234] Zheng X.J., Kiciak A., Glinka G., 1997. Weight functions and stress intensity factors for internal surface semi-elliptical crack in thick-walled cylinder. *Engineering Fracture Mechanics* 58, 207-221.
- [235] Zhi-Zhong H., Shu-Zhen C., 1993. Prediction of fatigue notch factor for metallic materials. *Science in China (Series A)* 36, 477-486.
- [236] Zhi-Zhong H., Shu-Zhen C., 1994. Relationship between fatigue notch factor and strength. *Engineering Fracture Mechanics* 48, 127-136.

DOŚWIADCZALNA ANALIZA ROZKŁADÓW ODKSZTAŁCEŃ W STREFACH ZMĘCZENIOWEGO PĘKANIA

Streszczenie

Jedną z przyczyn inicjowania i rozwoju pęknięć zmęczeniowych są spiętrzenia odkształceń i naprężeń, których konsekwencją jest powstawanie lokalnych stref odkształceń plastycznych. Tym samym powiązanie stanu odkształceń i naprężeń z przebiegiem procesu zmęczenia jest jednym z podstawowych zadań w zmęczeniowej analizie konstrukcji. Trudności w modelowaniu zmęczeniowego zachowania konstrukcji powodują, że nieodzownym narzędziem w skutecznej analizie zmęczeniowej różnorodnych obiektów technicznych są metody doświadczalne.

W związku z powyższym w pracy przeprowadzono doświadczalną analizę wpływu nieciągłości geometrycznych i niejednorodności materiałowych na rozkłady odkształceń występujące w strefach zmęczeniowego pękania materiałów i konstrukcji w warunkach obciążeń zmęczeniowych.

W tym celu opracowano koncepcje doświadczalnej i hybrydowej (doświadczalno-numerycznej) analizy stanu odkształceń, które wykorzystano w badaniach stref zmęczeniowego pękania w obiektach odwzorowujących rzeczywiste struktury stosowane, m.in. w lotnictwie i okrętownictwie. W pracy zaproponowano ponadto metodę wyznaczania lokalnych własności zmęczeniowych w strefach niejednorodności materiałowych, którą wykorzystano w analizie lokalnych własności zmęczeniowych laserowego złącza spawanego.

Na podstawie analizy wyników badań wykazano m.in., że nieciągłości geometryczne i niejednorodności materiałowe występujące w złożonych elementach konstrukcyjnych, mogą stwarzać warunki do jednoczesnego powstawania i rozwoju wielu pęknięć zmęczeniowych w jednym obszarze spiętrzeń odkształceń i naprężeń. W takich przypadkach skutecznym narzędziem w przewidywaniu miejsc inicjacji pęknięcia zmęczeniowego może być jednoczesna analiza maksymalnych odkształceń lokalnych oraz gradientu odkształcenia. Wykazano także wpływ lokalnych stref odkształceń plastycznych na zmianę własności materiałowych w strefach zmęczeniowego pękania. W jego efekcie, tzw. stałe własności zmęczeniowe materiału w praktyce okazują się być zależnymi od historii obciążenia obiektu.

Analiza wyników badań odkształceń w laserowym złączu spawanym wykazała znaczne zróżnicowanie własności materiałowych w jego poszczególnych strefach. Dotyczy to zarówno własności cyklicznych, jak i statycznych, przy czym obciążenie zmęczeniowe istotnie zmieniało stan materiału w stosunku do obciążeń statycznych.

Efektom przeprowadzonych badań są także pozytywne wnioski dotyczące zastosowanych metod badawczych wykorzystujących do pomiaru odkształceń technikę laserowej interferometrii siatkowej.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF STRAIN DISTRIBUTION IN FATIGUE CRACKING ZONES

Summary

Strain and stress concentration resulting in local plastic strain zones is a cause of initiation and growth of fatigue cracks; hence relating strain and stress state to fatigue process is one of the main tasks of the fatigue structure analysis. Difficulties in modelling fatigue behaviour of structure make the experimental methods an essential tool in the effective fatigue analysis of different technical objects. With that in mind an experimental analysis was carried out which involved investigating the effect of geometrical discontinuities and material inhomogeneities on strain distribution in fatigue cracking zones of materials and structures under fatigue load conditions. A concept was developed incorporating experimental and hybrid (experimental-and-numerical) analysis of the strain state used investigating the fatigue cracking zones in objects projecting real structures applied e.g. in aeronautics and shipbuilding. Moreover, a method was proposed to determine local fatigue properties in material inhomogeneities zones applied to local fatigue properties analysis for the laser welded joint. Based on the analysis of research results, it was shown that e.g. geometrical discontinuities and material inhomogeneities in complex structural parts can create conditions for a simultaneous initiation and growth of several fatigue cracks in a single area of strain and stress concentration; the simultaneous analysis of maximum local strains and strain gradient can be an efficient tool while predicting fatigue crack origin locations. Also the effect of local plastic strain zones on material property changes in fatigue cracking zones was shown. As a result the so-called constant material fatigue properties appear to depend on the load history. The analysis of research results for the laser welded joint showed considerable differences in material properties, both cyclic and static, in particular zones, while fatigue load significantly changed the material state, as compared to static loads. The present research also justified the applicability of the research methods to measure strains with laser moiré (grating) interferometry.