

NW

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

Rozprawy
nr 51

JANUSZ SEMPRUCH

KRYTERIUM WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ
STALI KONSTRUKCYJNEJ 25CrMo4
W WARUNKACH ZŁOŻONEGO STANU NAPRĘŻENIA

.04

pruch, Janusz.
erium wytrzymałości z

BYDGOSZCZ – 1992

624.04,

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

Rozprawy
nr 51

JANUSZ SEMPRUCH

KRYTERIUM WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ
STALI KONSTRUKCYJNEJ 25CrMo4
W WARUNKACH ZŁOŻONEGO STANU NAPRĘŻENIA

BYDGOSZCZ – 1992

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
prof. dr hab. Ojcumiła Stefaniak

OPINIODAWCY

prof. dr hab. inż. Zbigniew Orłóś
prof. dr hab. inż. Marian Warszński

REDAKTOR NAUKOWY

prof. dr hab. inż. Józef Szala

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE

mgr Aleksandra Ławniczak, Zbigniew Gackowski



76562

Wydano za zgodą Rektora
Akademii Techniczno-Rolniczej
w Bydgoszczy

ISSN 0209-0597

**WYDAWNICTWO UCZELNIANE AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ
W BYDGOSZCZY**

Wyd. I. Nakład 150 egz. Ark. aut. 4,8, ark. druk. 4,75. Papier druk. kl. III.
Oddano do druku w styczniu 1992 r. Druk ukończono w lutym 1992 r.
Prasowe Zakłady Graficzne w Bydgoszczy, ul. Dworcowa 13.
Zamówienie nr 192/92

Spis treści

	str.
Wykaz ważniejszych oznaczeń	7
1. WPROWADZENIE	9
1.1. Geneza pracy	9
1.2. Złożony stan naprężeń zmęczeniowych, teza pracy	10
1.3. Cel i zakres pracy	14
2. OCENA WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ NA PODSTAWIE HIPOTEZ WYŁĘŻENIO- WYCH ORAZ INNYCH ZNANYCH METOD OBLICZENIOWYCH	15
2.1. Wprowadzenie do zagadnienia oceny wytrzymałości w złożonym stanie naprężeń	15
2.2. Adaptacja hipotez wyłężeniowych dla przypadku złożonego wa- hadłowego obciążenia zmęczeniowego o składowych nie przesun- niętych w fazie	16
2.3. Rozwinięcia hipotez wyłężeniowych dla przypadku obciążenia bez przesunięć fazowych, zawierającego składową statyczną .	17
2.4. Eksperymentalne dane dotyczące wpływu przesunięć fazowych na wytrzymałość zmęczeniową	20
2.5. Metody obliczeniowe stosowane w przypadku przesuniętego w fazie, złożonego naprężenia zmęczeniowego	22
2.6. Uwagi do rozdziału 2	25
3. WYBRANE ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ W JED- NOOSIOWYM STANIE NAPRĘŻEŃ I ICH WYKORZYSTANIE DLA OCENY WYTRZY- MAŁOŚCI W STANACH ZŁOŻONYCH	27
3.1. Wykres zmęczeniowy WÖHLER'a	27
3.2. Pęknięcie zmęczeniowe	28
3.3. Wpływ naprężenia średniego w cyklu zmęczeniowym na wytrzy- małość zmęczeniową	29
3.4. Uwagi do rozdziału 3	32
4. BADANIA WŁASNE, UZYSKANE WYNIKI I ICH ANALIZA	33
4.1. Cel i zakres badań własnych	33
4.2. Warunki badań zmęczeniowych	33
4.2.1. Materiał, z którego wykonano próbki do badań zmęcze- niowych	33
4.2.2. Próbkki do badań zmęczeniowych	35
4.2.3. Stosowane obciążenia	36
4.2.4. Stanowisko badawcze	37

	str.
4.3. Obserwacje makroskopowe uzyskanych złomów zmęczeniowych ..	39
4.4. Obserwacje mikrofraktograficzne pęknięć zmęczeniowych	41
4.5. Analiza zmienności wartości maksymalnych naprężeń i kierunków głównych dla stosowanych obciążeń	47
4.6. Analiza uzyskanych rezultatów	50
5. KRYTERIUM USZKODZENIA ZMĘCZENIOWEGO W WARUNKACH ZŁOŻONEGO STANU NAPRĘŻEŃ - METODA PŁASZCZYZNY WYŁĘŻENIA KRYTYCZNEGO	53
5.1. Sformułowanie kryterium	53
5.2. Zakres weryfikacji eksperymentalnej	59
5.3. Wyniki weryfikacji	59
5.4. Analiza uzyskanych wyników	62
6. WNIOSKI KOŃCOWE Z PRACY	63
LITERATURA	67
STRESZCZENIA	75

Panom, prof. Józefowi Szali za zawsze życzliwe popieranie starań podejmowanych przeze mnie dla realizacji badań własnych oraz dyskusję na temat niniejszej pracy, prof. Alexowi Troost za umożliwienie przeprowadzenia badań w Institut für Werkstoffkunde RWTH Aachen oraz krytyczne ustosunkowanie się do uzyskanych wyników, serdecznie dziękuję. Dziękuję także recenzentom niniejszej publikacji, panom prof. Zbigniewowi Orłowski i prof. Marianowi Warszzyńskiemu za życzliwość i cenne uwagi krytyczne wykorzystane w redakcji końcowej publikacji.

Słowa podziękowania kieruję również do Deutscher Akademischer Austauschdienst za finansowanie części zrealizowanej pracy. Praca była ponadto finansowana z funduszy CPBP 02.01 oraz w etapie końcowym ze środków własnych ATR w Bydgoszczy.

Autor



WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- A_{10} - wydłużenie względne próbki, w %
 E - moduł sprężystości podłużnej, w MPa
 I_1, I_2, I_3 - niezmienniki tensora naprężenia - oznaczenie
 P_1, P_3, P_4 - stałe materiałowe, wielkości niemiarowane
 P_2 - współczynnik wrażliwości materiału na asymetrię cyklu zmęczeniowego, stała materiałowa, wielkość niemiarowana
 R - współczynnik asymetrii cyklu, wielkość niemiarowana
 R_e - granica plastyczności materiału, w MPa
 $R_{e0.2}$ - umowna granica plastyczności, w MPa
 R_m - wytrzymałość na rozciąganie, w MPa
 s - odchylenie standardowe - oznaczenie ogólne
 t - czas - oznaczenie ogólne
 w_1, w_2 - wykładniki w równaniu linii granicznej na wykresie HAIGH'a, wielkości niemiarowane
 Z - przewężenie względne próbki, w %
 Z_{sj} - granica zmęczenia przy jednostronnym skręcaniu, w MPa
 Z_{so} - granica zmęczenia przy obustronnym skręcaniu, w MPa
 Z_{rc} - granica zmęczenia przy wahadłowym rozciąganiu - ściskaniu, w MPa
 Z_{rj} - granica zmęczenia przy jednostronnym rozciąganiu, w MPa
 X - definiowana miara dokładności obliczeń (stosunek wytrzymałości zmęczeniowej wyznaczonej doświadczalnie do wyznaczonej na drodze obliczeniowej), wielkość niemiarowana
 α_{ij} - przesunięcie fazowe pomiędzy przebiegami składowych amplitudowych tensora naprężeń, w stopniach
 γ - kąt nachylenia płaszczyzny pęknięcia mierzony w stosunku do osi x próbki, w stopniach
 ϑ - kąt obrotu transformowanego układu odniesienia - oznaczenie
 σ - naprężenie normalne - oznaczenie ogólne, jako wielkość mianowana podawane w MPa
 σ_A - graniczna wartość amplitudy naprężenia normalnego w obecności składowej średniej cyklu (wyznaczona z wykresu HAIGH'a), w MPa
 σ_a - amplituda naprężenia normalnego w jednoosiowym stanie naprężenia
 σ_m - wartość średnia naprężenia normalnego w jednoosiowym stanie naprężenia
 $\sigma_{ij}(t)$ - ogólne oznaczenie składowej tensora naprężenia T_{ij} , dla $i = j$ σ_{ij} są naprężeniami normalnymi ($\sigma_{xx} = \sigma_x, \sigma_{yy} = \sigma_y, \sigma_{zz} = \sigma_z$), dla $i \neq j$ są naprężeniami stycznymi ($\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \tau_{xy}, \sigma_{xz} = \sigma_{zx} = \tau_{xz}, \sigma_{yz} = \sigma_{zy} = \tau_{yz}$)
 σ_{ija} - amplituda składowej tensora naprężeń

- σ_{ijm} - wartość średnia składowej tensora naprężeń
 σ_1 - naprężenie główne
 σ_{1a} - amplituda naprężenia głównego
 σ_{1m} - wartość średnia naprężenia głównego
 σ_2 - naprężenie zredukowane - oznaczenie ogólne
 σ_{2a} - naprężenie zredukowane wyznaczone dla składowych amplitudowych
 σ_{2m} - naprężenie zredukowane wyznaczone dla wartości średnich
 τ - naprężenie styczne - oznaczenie ogólne, jako wielkość mianowana
 podawane w MPa
 τ_a - amplituda naprężenia stycznego w warunkach czystego ścinania
 (przy skręcaniu)
 τ_A - graniczna wartość amplitudy naprężenia stycznego w obecności
 składowej średniej cyklu (wyznaczona z wykresu HAIGH'a), w MPa
 τ_m - wartość średnia naprężenia stycznego w warunkach czystego ścina-
 nia
 ψ_1 - kąty osi głównych tensora naprężenia, w stopniach
 ω_{ij} - częstość kołowa składowej amplitudowej tensora naprężenia T_{ij} - o-
 znaczenie

WSKAŹNIKI

- ij - x, y
 l - $1, 2, 3$
 kryt - oznaczenie wartości krytycznej
 max - oznaczenie wartości maksymalnej
 min - oznaczenie wartości minimalnej
 (n) - po prawej stronie u góry - naprężenie nominalne

1. WPROWADZENIE

1.1. Geneza pracy

W latach 1980 - 83 realizowana była w Katedrze PKM ATR w Bydgoszczy praca badawcza [73,74,82], której celem było dokonanie opisu rozwoju pęknięć zmęczeniowych w warunkach zmiennego skręcania. Jednym z kierunków badań literaturowych prowadzonych przy okazji realizacji tej pracy, następnie rozwiniętym w latach kolejnych, była analiza stanu wiedzy dotyczącej w ogólności złożonego stanu naprężeń zmęczeniowych. Analiza ta wykazała, ciągle jeszcze niezadowalający stan wiedzy dotyczącej możliwości oceny wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej w warunkach złożonego stanu naprężenia, przy wzrastającym zapotrzebowaniu na aplikacyjnie pewne metody obliczeniowe (np. w zakresie zastosowań metody elementów skończonych [97], aplikacji metod odkształceniowych do opisu trwałości elementów konstrukcyjnych z korbami [34] i inne). W szeregu prac podkreślana jest ograniczoność stosowania kryteriów opracowanych dla obciążeń statycznych, w przypadku obciążenia zmęczeniowego. W [66] wskazano, że kryterium określającym zakres stosowalności hipotez wyężeńiowych opracowanych dla złożonego stanu naprężeń statycznych jest plastyczność materiału. Wyróżniane są grupy hipotez stosowanych dla materiałów kruchych, semiplastycznych i plastycznych. Wiadomym jest jednak [35,66], że mikrofraktografia złomu zmęczeniowego, także dla materiałów kruchych, wykazuje cechy plastyczności - przenoszenie zatem doświadczeń zebranych dla obciążeń statycznych, w sensie stosowalności poszczególnych hipotez, na przypadek obciążenia zmęczeniowego, jest problematyczne.

W latach 1985 - 86 zaistniała możliwość udziału w realizacji pracy [86], której celem była eksperymentalna weryfikacja kryterium wytrzymałości zmęczeniowej sformułowanego w [31,92]. Obserwacje fraktograficzne prowadzone przez autora niniejszej pracy w ramach [86] i kontynuowane w latach 1986 - 87 wykazały, że w próbkach wykonanych z jednego gatunku stali, udział cech plastycznych złomu zmęczeniowego może być silnie zróżnicowany w zależności od parametrów opisujących obciążenie zmęczeniowe, w szczególności od wartości przesunięć fazowych występujących pomiędzy składowymi stanu obciążenia. Uzyskane rezultaty dały podstawy do sformułowania własnego, odmiennego od znanych autorowi z literatury poglądu, na zagadnienie oceny wytrzymałości zmęczeniowej w warunkach złożonego stanu obciążenia.

1.2. Złożony stan naprężeń zmęczeniowych, teza pracy

Złożony stan naprężenia występujący w słabym ogniwie elementu konstrukcyjnego może być wywołany i określony przez:

- cechy geometryczne elementu konstrukcyjnego; nieciągłość przekroju powoduje w obrębie karbu zaburzenie pola odkształceń - działanie jednoosiowego obciążenia zmiennego powoduje powstanie przestrzennego (wewnątrz elementu) lub płaskiego (na jego powierzchni) stanu naprężenia,
- cechy dynamiczne elementu konstrukcyjnego: element zostaje obciążony przez wzajemnie niezależne siły zewnętrzne, z których przynajmniej jedna jest zmienną w czasie,
- cechy geometryczne i dynamiczne złożonego układu elementów konstrukcyjnych: siła lub układ sił zewnętrznych przyłożonych do złożonego układu elementów konstrukcyjnych powodują daleko zróżnicowane stany obciążenia i w konsekwencji naprężenia w różnych punktach tego układu [60].

Przedstawione relacje pomiędzy stanem obciążenia i stanem naprężenia wskazują, że pojęcia te należy zasadniczo używać rozdzielnie, a związki pomiędzy nimi występujące mogą być (szczególnie w przypadku „c”) bardzo złożone.

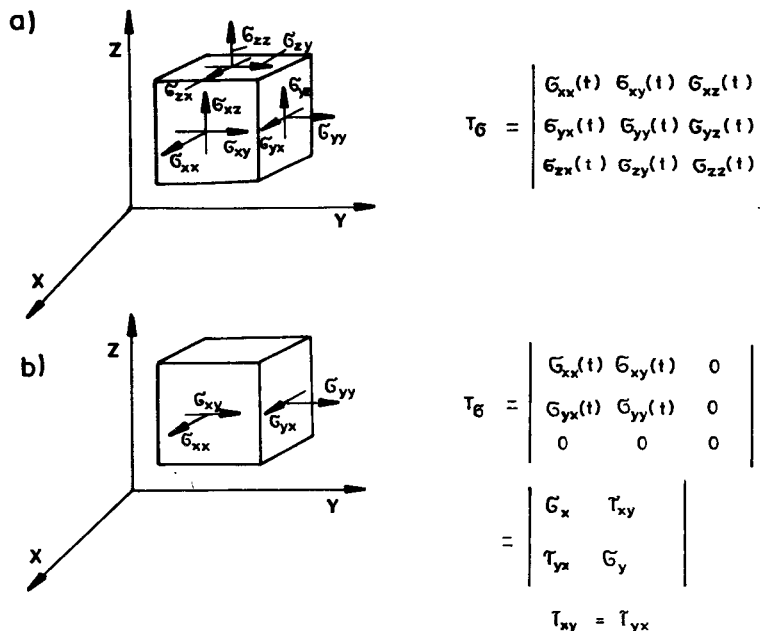
Relacje zachodzące pomiędzy elementem konstrukcyjnym a jego otoczeniem określają zmienność czasową składowych stanu naprężenia. Składowe te mogą zmieniać się w sposób losowy [1,2,46,47] lub harmoniczny. Aby móc określić wytrzymałość zmęczeniową elementu poddanego działaniu składowych o charakterze losowym, należy dysponować kryterium uszkodzenia dostatecznie zweryfikowanym w warunkach obciążeń harmonicznym o zmiennej częstotliwości [54], występujących wartościach średnich [69] i wzajemnych przesunięciach fazowych [86]. Ze względu na brak takowego kryterium dla obciążeń zmęczeniowych, zakres zainteresowania autora niniejszej pracy (zgodnie z celem pracy określonym w podrozdziale 1.3) ograniczony został do przypadku zmienności harmonicznej.

Większość rzeczywistych elementów konstrukcyjnych składa się z brył trójwymiarowych, w których panuje przestrzenny stan naprężenia i odkształcenia. Trójwymiarowy stan naprężenia jest jednoznacznie określony sześcioma składowymi tensora naprężenia - rys.1.1a, gdzie $\sigma_{xx} = \sigma_x$, $\sigma_{yy} = \sigma_y$, $\sigma_{zz} = \sigma_z$ są naprężeniami normalnymi, a $\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \tau_{xy}$, $\sigma_{xz} = \sigma_{zx} = \tau_{xz}$, $\sigma_{yz} = \sigma_{zy} = \tau_{yz}$ są naprężeniami stycznymi. Każda ze składowych tensora naprężenia może być wyrażona w sposób następujący:

$$\sigma_{ij}(t) = \sigma_{ijm} + \sigma_{ija} f_{ij}(\omega_{ij}, t, \alpha_{ij}) \quad (1.1)$$

gdzie:

f_{ij} - dowolna funkcja harmoniczna.



Rys.1.1. Przestrzenny (a) i płaski (b) stan naprężeń zmęczeniowych

Uwzględniając, że:

- źródłem większości pęknięć zmęczeniowych jest stan naprężenia w warstwie wierzchniej elementu konstrukcyjnego lub próbki (w większości technicznie ważnych przypadków, z wyjątkiem naprężeń kontaktowych i naprężeń własnych, największe naprężenia występują na powierzchniach elementu konstrukcyjnego), o przebiegu procesu zmęczenia na etapie inicjacji pęknięcia decyduje zatem głównie płaski stan naprężenia na powierzchni elementu konstrukcyjnego (próbki) [35], rys.1.1b,
- ze względów praktycznych przyjmuje się, że składowe zmęczeniowe zmieniają się w sposób sinusoidalny [37],

oraz zakładając, że poszczególne składowe stanu naprężenia zmieniają się ze stałą częstotliwością, składowe te można wyrazić następująco:

$$\sigma_x(t) = \sigma_{xm} + \sigma_{xa} \sin(\omega t) \quad (1.2a)$$

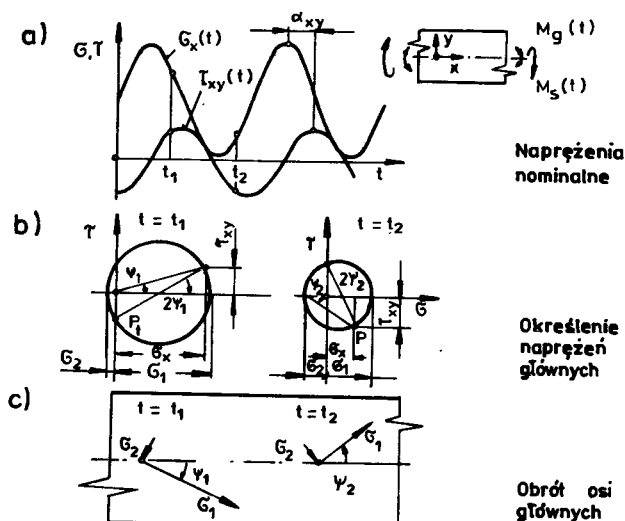
$$\sigma_y(t) = \sigma_{ym} + \sigma_{ya} \sin(\omega t + \alpha_y) \quad (1.2b)$$

$$\tau_{xy}(t) = \tau_{xym} + \tau_{xya} \sin(\omega t + \alpha_{xy}) \quad (1.2c)$$

Składowe σ_x , σ_y i τ_{xy} mogą być określone na podstawie teoretycznej lub eksperymentalnej analizy rozkładu naprężeń i odkształceń. W szczególnym przypadku elementu (lub wybranego przekroju elementu) pozbawionego karbów - np. próbka laboratoryjna na swej długości pomiarowej, składowe te odpowiadają co do wartości naprężeniom nominalnym wywołanym przez działające w odpowiednich kierunkach składowe stanu obciążenia - przypadek „b” omawiany w początkowej części niniejszego podrozdziału. Kierunek i zwrot

poszczególnych składowych stanu naprężenia jest zgodny wówczas z kierunkiem i zwrotem odpowiednich składowych obciążenia. Jest to zatem szczególny przypadek, kiedy stan obciążenia i stan naprężenia powiązane są w sposób dający się jednoznacznie określić i terminy te mogą być wykorzystywane w sposób alternatywny. Ze względu praktycznych w dalszej części pracy wszelkie analizy prowadzone będą w odniesieniu do tego przypadku.

Na rys.1.2a pokazano gładki cienkościenny element rurowy poddany działaniu momentu skręcającego $M_g(t)$ i momentu gnącego $M_g(t)$ oraz przesunięte w fazie przebiegi czasowe naprężeń zmiennych wywołanych działaniem tych momentów. Poniżej (rys.1.2b) pokazano dwa koła MOHR'a, odpowiadające czasom t_1 i t_2 oraz uzyskane tą drogą wartości naprężeń głównych i kątów osi głównych tensora naprężenia (rys.1.2c).



Rys.1.2. Związek naprężenia głównego i kierunków głównych z czasem, dla przesuniętego w fazie obciążenia momentem skręcającym i momentem gnącym

Jak pokazano na przykładzie przedstawionym na rys.1.2, naprężenie główne może zmieniać zarówno wartość, jak i kąt działania w trakcie trwania cyklu zmęczeniowego. W ogólności, analiza zależności określającej kąt osi głównych tensora naprężenia:

$$\psi(t) = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\tau_{xy}(t)}{\sigma_x(t) - \sigma_y(t)} \quad (1.3)$$

pozwała stwierdzić, że ψ przyjmuje wartości zmienne w czasie, jeżeli:

- wystąpią przesunięcia fazowe pomiędzy składowymi stanu naprężenia,
- cykle zmęczeniowe składowych wykazują wartości średnie,
- składowe są zmiennymi harmonicznymi o różnej częstotliwości,
- składowe zmieniają się w sposób nieharmoniczny.

Efekt zmienności kąta osi głównych jest nieznan z innych działań nauki o zmęczeniu materiałów i elementów konstrukcyjnych. Powstaje zatem pytanie, na ile jest on istotnym dla przebiegu procesu zmęczenia?

Jedyną pracą eksperymentalną, w której program badań był opracowany przede wszystkim z myślą o wykazaniu istotności oddziaływania zmienności kierunku osi głównych, jest praca [100]. Porównano w niej wytrzymałość i trwałość zmęczeniową cylindrycznych próbek stalowych poddanych działaniu tętniącego obciążenia rozciągającego, z wytrzymałością i trwałością uzyskaną przy na przemian występujących cyklach tętniącego rozciągania i ciśnienia wewnętrznego w próbce (skokowa zmiana kierunku osi głównych o kąt 90°). Uzyskano 30 % obniżenia granicy zmęczenia i blisko 10-krotne obniżenie trwałości zmęczeniowej w zakresie ograniczonej trwałości zmęczeniowej krzywej WÖHLER'a.

W pracy [6] zauważono trafnie, że wielkości zredukowane większości hipotez wytrzymałościowych definiowanych dla obciążeń statycznych, pomimo że są wektorami, traktowane są najczęściej tak, jak gdyby były wielkościami skalarnymi. Dla obciążeń statycznych (stałość położenia osi głównych) i przy założeniu pełnej izotropowości materiału konstrukcyjnego, podejście to jest zasadne. Natomiast zmienne w czasie położenie osi głównych powoduje, że wektor wielkości zredukowanej hipotezy wytrzymałościowej także zmienia swój kierunek w czasie cyklu zmęczeniowego. Jego oddziaływanie dotyczy zatem pewnej płaszczyzny lub objętości, a nie określonego kierunku. W żadnej jak dotąd pracy nie zwrócono uwagi na fakt, że informacja o zmienności kierunku wielkości zredukowanej może być istotną z punktu widzenia oceny wytrzymałości zmęczeniowej w warunkach złożonego stanu obciążenia.

W szeregu pracach [12,32,50,70,76] uznano, że przypadek, kiedy cykle zmęczeniowe składowych stanu naprężenia wykazują wartości średnie różne od zera, może być przedstawiany jako nakładanie się dwóch złożonych stanów naprężeń. Pierwszego, o stałym położeniu osi głównych, wywołanego działaniem jedynie składowych o wartościach stałych w czasie (średnie cykli zmęczeniowych) oraz drugiego, dla którego położenie osi głównych może być zmienne w czasie, wywołanego działaniem składowych amplitudowych. Stałe w czasie (co do wartości i kierunku) oddziaływanie składowych pierwszego z wymienionych stanów powoduje stałe w czasie zaburzenie jednorodnego dotąd rozkładu własności wytrzymałościowych ośrodka. Efekt ten określono w [12, 87] mianem anizotropii naprężeniowej (oryginalne brzmienie w cytowanych pracach [12,87] „Spannungsanisotropie“).

Na podstawie przedstawionej analizy cech charakterystycznych złożonego stanu naprężeń zmęczeniowych sformułowano następującą tezę pracy: kryterium uszkodzenia zmęczeniowego, wykorzystywane do oceny wytrzymałości zmęczeniowej elementu konstrukcyjnego poddanego działaniu złożonego stanu naprężenia, powinno uwzględniać możliwość wystąpienia zmienności położenia osi głównych tensora naprężenia oraz zaburzenie jednorodnego dotąd rozkładu własności wytrzymałościowych izotropowego materiału konstrukcyjnego, w wyniku oddziaływania wartości średnich cykli zmęczeniowych składowych stanu naprężenia.

1.3. Cel i zakres pracy

Zasadniczym celem pracy jest wskazanie kryterium zniszczenia zmęczeniowego w warunkach złożonego stanu naprężenia, uwzględniającego charakterystyczne cechy obciążenia zmęczeniowego, tj. oddziaływania wartości średnich cykli zmęczeniowych i zmianę położenia osi głównych tensora naprężenia. Wskazanie kryterium nastąpić powinno w oparciu o studia literaturowe dotyczące aktualnego stanu wiedzy, jak i propozycje własne.

Ponadto cele pracy stanowią: określenie istotności wpływu przesunień fazowych α_{1j} na przebieg procesu zmęczenia oraz analiza czasowej zmienności kąta osi głównych tensora naprężenia i jej oddziaływanie na przebieg procesu zmęczeniowego niszczenia.

Praca podzielona została na sześć rozdziałów. Rozdział pierwszy zawiera przede wszystkim sformułowanie genezy, tezy i celu pracy.

Rozdział drugi stanowi krótkie omówienie wyników przeprowadzonych studiów literaturowych, dotyczących możliwości oceny wytrzymałości zmęczeniowej w warunkach złożonego stanu naprężenia. Rozdział został podzielony na podrozdziały w ten sposób, aby umożliwić czytającemu łatwe zorientowanie się w zakresie stosowności omawianych metod. Zawarto w nim ponadto przedstawienie literaturowych danych eksperymentalnych dotyczących wpływu przesunień fazowych na wytrzymałość zmęczeniową. Rozdział ten zamykają wnioski dotyczące aktualnego stanu wiedzy i wnioski o charakterze wytycznych do prac własnych.

Rozdział trzeci zawiera prezentację wybranych zagadnień związanych z jednoosiowym stanem obciążeń. Omówiono wykres zmęczeniowy WÖHLER'a, w powiązaniu z nim makroskopowe kryterium uszkodzenia zmęczeniowego oraz wpływ naprężenia średniego na wytrzymałość zmęczeniową. Omówienie to dokonane zostało pod kątem aplikacji prezentowanego stanu wiedzy do podejmowanej w niniejszej pracy problematyki.

W rozdziale czwartym zostały przedstawione badania własne. Omówiono przeprowadzone badania zmęczeniowe. Badania prowadzono na cylindrycznych próbkach wykonanych ze stali 25CrMo4, poddanych działaniu trzech składowych obciążenia. Przedstawiono wyniki obserwacji mikro- i makrofraktograficznych uzyskanych pęknięć zmęczeniowych. Wyniki badań eksperymentalnych zestawiono z wynikami analizy teoretycznej, dotyczącej przede wszystkim zmiany kierunków i wartości naprężeń głównych w warunkach obciążeń stosowanych w badaniach eksperymentalnych.

Przeprowadzone studia literaturowe, analiza wyników eksperymentalnych, jak i rozważania teoretyczne, stanowiły podstawę sformułowania kryterium uszkodzenia zmęczeniowego w warunkach złożonego stanu naprężenia (metoda płaszczyzny krytycznej). Omówienie proponowanego kryterium i wyniki jego eksperymentalnej weryfikacji przedstawiono w rozdziale piątym pracy.

Rozdział szósty stanowią wnioski końcowe z pracy.

2. OCENA WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ NA PODSTAWIE HIPOTEZ WYŁĘŻENIOWYCH ORAZ INNYCH ZNANYCH METOD OBLICZENIOWYCH

2.1. Wprowadzenie do zagadnienia oceny wytrzymałości w złożonym stanie naprężeń

Główne założenie, wspólne wszystkim hipotezom wyłężeniowym, polega na tym, że uszkodzenie nastąpi wówczas, jeżeli maksymalna wartość wybranej wielkości w złożonym stanie naprężenia (wielkość zredukowana) stanie się równa lub większa od wartości, dla której wystąpi uszkodzenie w prostym stanie naprężenia (między innymi [7]):

$$\sigma_z \geq K \quad (2.1)$$

gdzie:

K - stała materiałowa.

Hipotezy wyłężeniowe sformułowane dla obciążeń statycznych określają kryteria, jakie powinien spełnić stan naprężenia ze względu na niebezpieczeństwo powstania odkształceń plastycznych lub niebezpieczeństwo utraty spójności. Ich celem jest określenie wyłężenia, jako funkcji składowych stanu naprężenia oraz pewnych parametrów charakteryzujących materiał [63].

Istnieje szereg hipotez wyłężeniowych opracowanych dla przypadku obciążeń statycznych. Według zastosowanych parametrów zniszczenia, można podzielić je na cztery grupy [86]:

- kryteria naprężeniowe,
- kryteria odkształceniowe,
- kryteria energetyczne,
- kryteria formalne (w [11,20] nazywane są one także naprężeniowo-odkształceniowymi).

Hipotezy opracowane dla obciążeń statycznych nierzadko wykorzystywane są dla przypadku obciążeń zmęczeniowych. Analiza wyników badań zmęczeniowych w warunkach złożonego stanu naprężenia wykazuje, że stosunek granic zmęczenia Z_{50} do Z_{rc} wynosi 0,5 - 0,7 dla stali oraz 0,75 - 0,9 dla żeliw [66]. Odpowiada to relacjom wynikającym z większości teorii wytrzymałości statycznej. Według [66] świadczy to o formalnej możliwości rozszerzenia zakresu zastosowania zadowalająco eksperymentalnie zweryfikowanych hipotez dla obciążeń statycznych, na przypadek naprężeń zmęczeniowych. Należałoby zatem zastanowić się nad zakresem zastosowań poszczególnych hipotez. Dostępne dane eksperymentalne pozwalają sformułować następujące zalecenia [7,63,66]:

- dla materiałów izotropowych wykazujących złom kruchy, zaleca się stosowanie hipotezy głównego naprężenia normalnego, pamiętając, że w szeregu przypadków daje ona wyniki z zapasem;

w przypadku materiałów, dla których doraźna wytrzymałość przy ścisaniu jest zasadniczo różna od doraźnej wytrzymałości przy rozciąganiu, zaleca się stosowanie zmodyfikowanej hipotezy MOHR'a,

- dla izotropowych materiałów wykazujących złom plastyczny zaleca się stosowanie hipotez opartych na koncepcji HUBER'a-MISES'a-HENKY'ego.

Należy zaznaczyć, że spośród tych hipotez, hipoteza energii odkształcenia postaciowego daje najlepszą zgodność wyników obliczeń z wynikami eksperymentu dla większości stali konstrukcyjnych.

Przeniesienie wprost wymienionych hipotez na przypadek obciążenia zmęczeniowego napotyka na przeszkody formalne. Jak wynika z zależności (1.2a) - (1.2c) każda ze składowych tensora naprężeń zmęczeniowych charakteryzowana jest przez σ_{ija} , σ_{ijm} i σ_{ij} . Znane zależności dla hipotez statycznych w swej podstawowej postaci nie dają możliwości uwzględnienia tych wszystkich parametrów, jak i uwzględniania fizycznego oddziaływania wartości średnich cykli zmęczeniowych, czy też występujących przesunięć fazowych. Odrębny problem stanowi kwestia podnoszona już w rozdziale 1, a dotycząca odmienności budowy złomu zmęczeniowego.

Wracając do przedstawionego podziału kryteriów (ze względu na przyjęty parametr uszkodzenia) należy podkreślić, że w zakresie problematyki oceny trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej zainteresowanie poszczególnymi grupami kryteriów jest związane z analizowanym zakresem wykresu zmęczeniowego WÖHLER'a. W obszarze granicy zmęczenia, ze względu na przyjęty, ogólny opis zjawisk zmęczeniowych tam występujących, wykorzystywane są przede wszystkim kryteria naprężeniowe. Ponieważ zdecydowana większość elementów maszyn (blisko 90 %) konstruowana jest z uwzględnieniem postulatu wytrzymałości nieograniczonej, w niniejszej pracy przyjęto naprężenie jako wielkość podstawową do opisu procesu zmęczenia. W przedstawionej w dalszej części niniejszego rozdziału analizie pominięto grupę kryteriów odkształceniowych. Wyczerpujący przegląd danych literaturowych dotyczących tej grupy można znaleźć w pracach [20,36].

2.2. Adaptacja hipotez wyężeńiowych dla przypadku złożonego wahadłowego obciążenia zmęczeniowego o składowych nie przesuniętych w fazie

W przypadku, kiedy składowe stanu naprężenia nie wykazują wzajemnych przesunięć w fazie i zmieniają się w cyklu wahadłowym, kierunek osi głównych pozostaje niezmienny, a wartości ekstremalne naprężeń głównych σ_1 i σ_2 korelują w czasie z ekstremami σ_x , σ_y i τ_{xy} . Naprężenie zredukowane hipotezy wyężeńiowej opracowanej dla obciążeń statycznych, zastąpione zostanie przez amplitudę naprężenia zredukowanego σ_{za} , a składowe stanu naprężenia wyrażone są jako ich składowe amplitudowe.

Zestawienie najczęściej w literaturze wymienianych hipotez zaliczanych do omawianej grupy pokazano w tablicy 2.1. Pokrywa ono obszar analizy siedmiu prac przeglądowych [5,7,19,46,71,84,103] i może być uznane za reprezentatywne.

Tablica 2.1

Najczęściej wykorzystywane zależności dla oceny wytrzymałości zmęczeniowej w przypadku obciążeń wahadłowych nie przesuniętych w fazie

Określenie kryterium	Postać kryterium
Głównego naprężenia normalnego	$\sigma_{za} = \sigma_{1a}$
Odształcenia głównego	$\sigma_{za} = \sigma_{1a} - \nu(\sigma_{2a} + \sigma_{3a})$
Maksymalnego naprężenia stycznego	$\sigma_{za} = \sigma_{1a} - \sigma_{3a}$
Maksymalnego odkształcenia	$\sigma_{za} = (1 + \nu) (\sigma_{1a} - \sigma_{3a})$
Całkowitej energii odkształcenia	$\sigma_{za} = \sqrt{\sigma_{1a}^2 + \sigma_{2a}^2 + \sigma_{3a}^2 - 2\nu(\sigma_{1a}\sigma_{2a} + \sigma_{2a}\sigma_{3a} + \sigma_{3a}\sigma_{1a})}$
Energii odkształcenia postaciowego	$\sigma_{za} = \sqrt{\sigma_{1a}^2 + \sigma_{2a}^2 + \sigma_{3a}^2 - (\sigma_{1a}\sigma_{2a} + \sigma_{2a}\sigma_{3a} + \sigma_{3a}\sigma_{1a})}$

2.3. Rozwinięcia hipotez wytrzymałościowych dla przypadku obciążenia bez przesunięć fazowych, zawierającego składową statyczną

Według [70], w przypadku kiedy składowe (lub składowa) stanu naprężenia będą dane jako:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ijm} \pm \sigma_{ija} \quad (2.2)$$

wówczas naprężenie zredukowane może być wyrażone:

$$\sigma_z = \sigma_{zm} \pm \sigma_{za} \quad (2.3)$$

σ_{zm} i σ_{za} są rozumiane tutaj jako wartości naprężeń zredukowanych, wyznaczonych odrębnie dla składowych σ_{ijm} i σ_{ija} . Zarówno składowa statyczna σ_{zm} , jak i składowa zmęczeniowa σ_{za} w równaniu (2.3) wynikają z zaistniałego stanu naprężenia, jak i przyjętej hipotezy wytrzymałościowej [70]. Z porównania wartości dopuszczalnej amplitudy $\sigma_A = f(\sigma_{zm})$ uzyskamy odpowiedź, czy przyłożone obciążenie może być przeniesione, czy też nie.

Podobny sposób postępowania zaproponował MARIN [50]. Naprężenie zredukowane tworzone jest tutaj z wykorzystaniem hipotezy odkształcenia postaciowego w następujący sposób:

$$\sigma_{zm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1m} - \sigma_{2m})^2 + (\sigma_{2m} - \sigma_{3m})^2 + (\sigma_{3m} - \sigma_{1m})^2} \quad (2.4)$$

$$\sigma_{za} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{3a} - \sigma_{1a})^2} \quad (2.5)$$

Zależność pomiędzy przenoszona amplitudą a wartością średnią cyklu zmęczeniowego opisuje MARIN równaniem elipsy. Linia graniczna opisana zostanie zatem równaniem:

$$\left(\frac{\sigma_{za}}{Z_{rc}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{zm}}{R_m}\right)^2 = 1 \quad (2.6)$$

Dyskusja równań (2.4) - (2.6) pozwala sformułować następujące uwagi i wnioski:

- równanie (2.6) jest słuszne dla stosunku $Z_{so}/Z_{rc} = 1/\sqrt{3}$ [103],
- rozszerzenie hipotezy na ogólny stan naprężenia określony składowymi σ_x , σ_y i τ_{xy} jest zasadniczo możliwe, ale jedynie przy założeniu stałości kierunków głównych [103],
- σ_{zm} wyznaczone według równania (2.4) jest zawsze dodatnie, także gdy wszystkie σ_{ijm} będą ujemne; zaleca się przyjąć σ_{zm} jako dodatnie, gdy przynajmniej jedna ze składowych σ_{ijm} jest dodatnia i $\sigma_{zm} = 0$ gdy wszystkie $\sigma_{ijm} < 0$ [10],
- w przypadku gdy $\sigma_{1m} = \sigma_{2m} = \sigma_{3m}$, wówczas $\sigma_{zm} = 0$, co jest praktycznie nie do przyjęcia [10].

Formalne trudności wskazane w dyskusji równań (2.4) - (2.6) nie występują, jeżeli w miejsce hipotezy energii odkształcenia postaciowego skorzystamy z innej zależności. Tę drogę wykorzystał SINES [77] w odniesieniu do σ_{zm} . Zaproponował on następującą postać hipotezy wytrzymałościowej:

$$\frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{3a} - \sigma_{1a})^2} \leq k_1 - k_2 (\sigma_{1m} + \sigma_{2m} + \sigma_{3m}) \quad (2.7)$$

gdzie:

k_1, k_2 - stałe materiałowe

$$k_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} Z_{rc} \quad (2.8)$$

$$k_2 = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{Z_{rc}}{R_m} \quad (2.9)$$

(przy założeniu słuszności opisu prostą GERBER'a zależności $\sigma_A = f(\sigma_m)$).

Lewa strona równania (2.7) jest naprężeniem stycznym oktaedrycznym, natomiast zapis w nawiasie po prawej stronie znaku równości jest proporcjonalny do normalnego naprężenia oktaedrycznego. Równanie (2.7) stanowi zatem związek pomiędzy τ_{okt} i σ_{okt} . Dla ogólnego płaskiego stanu naprężenia przyjmuje ono następującą postać (po uwzględnieniu k_1 i k_2):

$$\sqrt{(\sigma_{xa}^2 - \sigma_{xa} \sigma_{ya} + \sigma_{ya}^2 + 3\tau_{xya}^2)} = Z_{rc} - \frac{Z_{rc}}{R_m} (\sigma_{xm} + \sigma_{ym}) \quad (2.10)$$

Dyskusja równania (2.10):

- dla $\sigma_{ym} = -\sigma_{xm}$ zanika wpływ naprężenia średniego,
- dla $\sigma_{xm} = \sigma_{ym} = R_m$ lewa strona równania jest równa zero,
- według równania (2.10) wartość τ_{xym} nie posiada żadnego wpływu na uzyskiwaną wytrzymałość zmęczeniową.

Rozwinięciem równania (2.10) jest propozycja KAKUNO i KAWADA [32], w której uwzględniono ponadto amplitudę oktaedrycznego naprężenia normalnego. Dla ogólnego płaskiego stanu naprężenia:

$$\sqrt{(\sigma_{xa}^2 - \sigma_{xa} \sigma_{ya} + \sigma_{ya}^2 + 3\tau_{xya}^2)} = 3 \left[Z_{so} - \left(\sqrt{3} \frac{Z_{so}}{Z_{rc}} - 1 \right) (\sigma_{xa} + \sigma_{ya}) - \left(\frac{2Z_{rc}}{Z_{rj}} - 1 \right) \frac{Z_{so}}{Z_{rc}} (\sigma_{xm} + \sigma_{ym}) \right] \quad (2.11)$$

W stosunku do równania (2.11) można sformułować te same zastrzeżenia, które zostały przedstawione w dyskusji równania (2.10).

W propozycji McDIARMID'a [52], jako odpowiedzialną za wystąpienie uszkodzenia uznano amplitudę maksymalnego naprężenia stycznego, jednakże w płaszczyźnie, w której występuje $\tau_{a \max}$ uwzględniono ponadto składową statyczną i zmienną naprężenia normalnego. Dla $Z_{so}/Z_{rc} = 1/\sqrt{3}$:

$$\tau_{\max} = \left[\left(\frac{\sigma_{xa} - \sigma_{ya}}{2} \right)^2 + \tau_{xya}^2 \right] = \left[\frac{Z_{rc}}{\sqrt{3}} - \frac{0,225}{\sqrt{Z_{rc}}} \left(\frac{\sigma_{xa} + \sigma_{ya}}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \left(1 - \frac{\sigma_{xm} + \sigma_{ym}}{R_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

Także w tym przypadku można sformułować te same zastrzeżenia, które zostały przedstawione w dyskusji równania (2.10).

W pracy [14] przedstawiono zależność uwzględniającą fakt silnego zróżnicowania wartości Z_{rc}/Z_{so} dla tworzyw konstrukcyjnych (dla elipsy MISES'a i propozycji jej pochodnych $Z_{rc}/Z_{so} = \sqrt{3}$). Zakładając, że Z_{rc}/Z_{so} może zmieniać się w granicach od 1,0 do 2,0, zaproponowano:

$$\sigma_{za} = (1 - \nu) \sigma_{za \text{ HMNS}} + \nu \sigma_{za \text{ HGNN}} \quad (2.13a)$$

gdzie:

$\sigma_{za \text{ HMNS}}$ - naprężenie zastępcze wyznaczone według hipotezy maksymalnego naprężenia stycznego

$$\sigma_{za \text{ HMNS}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa} - \sigma_{ya}}{2} \right)^2 + \tau_{xya}^2} \quad (2.13b)$$

$\sigma_{za \text{ HGNN}}$ - naprężenie zastępcze wyznaczone według hipotezy głównego naprężenia normalnego

$$\sigma_{za \text{ HGNN}} = \frac{\sigma_{xa} + \sigma_{ya}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa} + \sigma_{ya}}{2} \right)^2 + \tau_{xya}^2} \quad (2.13c)$$

v - współczynnik równania (2.13a)

$$v = 2 - \frac{Z_{rc}}{Z_{so}} \quad (2.13d)$$

W pracy [14] podano także możliwości uwzględnienia wartości średnich cykli zmęczenia. Na podkreślenie zasługuje fakt uwzględnienia w powyższej propozycji alternatywności zachowania się różnych tworzyw konstrukcyjnych, w tych samych warunkach obciążeń.

Poza podanymi powyżej, do omawianej grupy hipotez zaliczyć można rozwiązania szczególne hipotez o szerszym zakresie zastosowań, które przedstawione zostaną w kolejnym punkcie. Są to propozycje TROOST'a-EL-MAGD'a [93] oraz propozycja ZENNER'a [101].

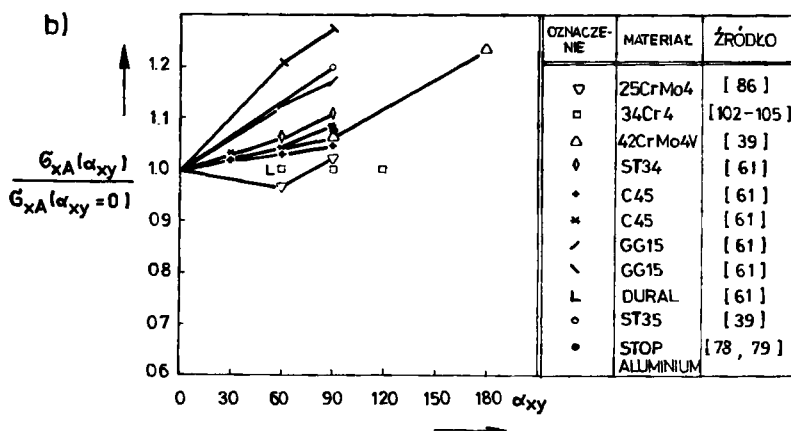
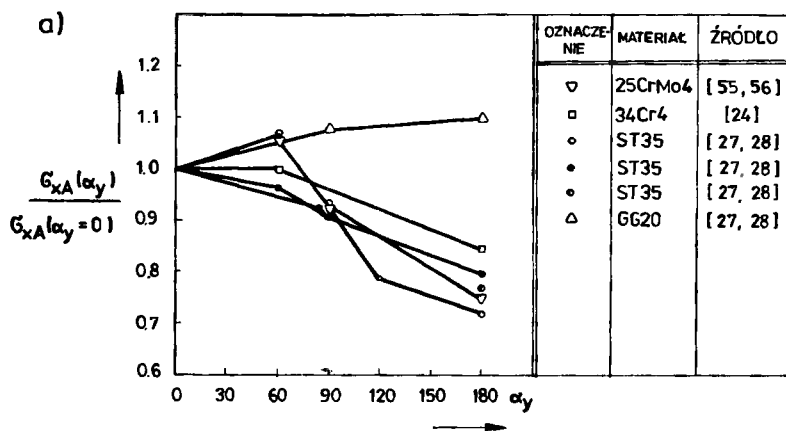
2.4. Eksperymentalne dane dotyczące wpływu przesunięć fazowych na wytrzymałość zmęczeniową

Istnieje dosyć znaczna grupa prac eksperymentalnych dotyczących wyznaczenia wytrzymałości zmęczeniowej próbek poddanych działaniu dwóch składowych obciążenia: zmiennego rozciągania - ściskania (składowa $\sigma_x(t)$) wraz ze zmiennym ciśnieniem wewnętrznym w cylindrycznej próbce (składowa $\sigma_y(t)$) oraz zmiennego rozciągania - ściskania (składowa $\sigma_x(t)$) wraz ze zmiennym skręcaniem (składowa $\tau_{xy}(t)$).

Przegląd prac z lat 1945 - 1989 pozwolił zestawić aż 365 wyników dotyczących różnych warunków badań i różnych materiałów konstrukcyjnych. Część z tych wyników pozwala prześledzić wpływ przesunięcia fazowego α_y (pierwszy z wymienionych przypadków obciążenia) oraz α_{xy} (drugi z wymienionych przypadków obciążenia) na uzyskiwaną w warunkach eksperymentalnych wartość granicy zmęczenia.

Na rys.2.1 przedstawiono 54 najbardziej reprezentatywne wyniki. Wybrano prace, w których badania były prowadzone dla przynajmniej dwóch wartości przesunięć fazowych. Punkty odpowiadające α_y i α_{xy} równym zero dla przyjętego sposobu prezentacji pokrywają się dla wszystkich warunków badań, stąd na rys.2.1 sumaryczna liczba oznaczonych punktów jest mniejsza niż 54.

Wartość granicy zmęczenia może początkowo wzrastać wraz ze wzrastającą wartością α_y (rys.2.1a), wykazując maksimum dla $\alpha_y = 60^\circ$, by następnie obniżyć się, osiągając minimum dla $\alpha_y = 180^\circ$. Uzyskany spadek wytrzymałości dla $\alpha_y = 180^\circ$ wynosi od 15,5 % [24] do 28,2 % [27,28]. Z rezultatów podanych w [27] wynika, że rozstęp pomiędzy wartością maksymalną uzyskaną dla $\alpha_y = 60^\circ$ a wartością minimalną uzyskaną dla $\alpha_y = 180^\circ$ wynosi aż 33,8 %. Odmienny od dotąd omawianego charakter zmienności wartości granicy zmęczenia (wyrażonej przez wartość składowej σ_{xA}) w zależności od α_y uzyskano w pracy [28] dla próbek wykonanych z żeliwa GG20. W przypadku tym wzrastającej wartości α_y towarzyszy wzrost wytrzymałości.



Rys.2.1. Wpływ przesunięć fazowych α_y (a) i α_{xy} (b) na wytrzymałość zmęczeniową

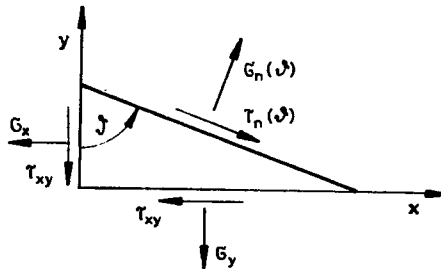
Na rys.2.1b zestawiono wyniki badań dla zmiennego α_{xy} . Dla tych warunków istnieje zdecydowanie większa liczba danych. Ich wadą jest fakt, że praktycznie wszystkie dostępne wyniki dotyczą badań w zakresie zmienności α_{xy} od 0 do 90°. Generalnie, na podstawie rys.2.1b można powiedzieć, że wzrostowi α_{xy} (w zakresie od 0 do 90°) towarzyszyć może wzrost wytrzymałości zmęczeniowej sięgający dla badań próbek wykonanych z żeliwa GG15 [61] dla $\alpha_{xy} = 60^\circ$ - 21 % i dla $\alpha_{xy} = 90^\circ$ - 28 %. Dla próbek wykonanych z większości wymienionych na rys.2.1 stali konstrukcyjnych wzrost ten nie przekracza kilku procent. Dla duralu [61] i dla stali 34Cr4 [24] nie uzyskano żadnego wpływu α_{xy} .

Przedstawiony przegląd wyników prac eksperymentalnych wskazuje, że w obu analizowanych przypadkach należy liczyć się z możliwością istotnego oddziaływania występujących przesunięć fazowych na wartość uzyskiwanej wytrzymałości zmęczeniowej. Przedstawione dotychczas metody obliczeniowe nie posiadały możliwości uwzględnienia tego oddziaływania.

2.5. Metody obliczeniowe stosowane w przypadku przesuniętego w fazie, złożonego naprężenia zmęczeniowego

Hipotezy uwzględniające możliwość wystąpienia przesunięć fazowych pomiędzy składowymi stanu naprężenia można określić wspólnym mianem hipotez „płaszczyzny krytycznej” [102] lub hipotezy „płaszczyzny wyężenia krytycznego” [83].

Według [6] pierwsza propozycja hipotezy bazująca na koncepcji płaszczyzny wyężenia krytycznego opracowana została w 1967 roku przez GASSNER'a i GRUBISIC'a. Autorzy tej propozycji opierając się na obserwacjach makro- i mikrofraktograficznych pęknięć zmęczeniowych próbek wykonanych ze stali przyjęli, że odpowiedzialnym za wystąpienie złomu zmęczeniowego jest naprężenie normalne działające prostopadle do powierzchni złomu $\sigma_n(\vartheta)$ - rysunek 2.2.



Rys.2.2. Schemat do metody obliczeń zaproponowanej przez GASSNER'a i GRUBISIC'a [79]

Dla dwóch cykli zmienności składowych stanu naprężenia można wyznaczyć wartość minimalną $\sigma_{n \min}$ i wartość maksymalną $\sigma_{n \max}$ dla każdej płaszczyzny nachylonej pod kątem ϑ . Wartość naprężenia średniego σ_{nm} i amplitudy naprężenia normalnego σ_{na} do płaszczyzny określonej kątem ϑ można określić jako:

$$\sigma_{nm} = \frac{\sigma_{n \max} + \sigma_{n \min}}{2} \quad (2.14a)$$

$$\sigma_{na} = \frac{\sigma_{n \max} - \sigma_{n \min}}{2} \quad (2.14b)$$

Wówczas naprężenie zmęczeniowe działające w analizowanej płaszczyźnie można wyrazić następująco:

$$\sigma_n(\vartheta) = \sigma_{nm}(\vartheta) \pm \sigma_{na}(\vartheta) \quad (2.14c)$$

Krytyczna kombinacja amplitudy i wartości średniej zostaje ustalona z wykorzystaniem wykresu HAIGH'a [79].

W latach '70 i '80 ukazała się seria prac [85-93] autorstwa TROOST, EL-MAGD, podejmujących próbę opracowania kryterium uszkodzenia w warunkach złożonego stanu naprężenia dla materiałów elastoplastycznych przy wyko-

rzyścianiu koncepcji płaszczyzny krytycznej. W koncepcji tej zakłada się, że dla każdej dowolnie zorientowanej płaszczyzny (potencjalnej płaszczyzny pęknięcia) możliwym jest wyznaczenie składowych zmiennej $\sigma_{ija}(\vartheta)$ i statycznej $\sigma_{ijm}(\vartheta)$. Pomiedzy wielkościami tymi zachodzą związki znane z przypadku obciążenia jednoosiowego, tzn. obowiązuje warunek:

$$\sigma_{ija}(\vartheta, \sigma_{ijm})_{\text{kryt}} \geq \sigma_{ija} \quad (2.15)$$

Wykorzystując to założenie sformułowano następującą propozycję ujęcia hipotezy głównego naprężenia normalnego [12,88]:

$$\sigma_{xA}(\vartheta, \sigma_{xm})_{\text{kryt}} - \sigma_{xA}(\vartheta) = \min \quad (2.16)$$

oraz maksymalnego naprężenia stycznych [12,90]:

$$\tau_{xyA}(\vartheta, \tau_{xym})_{\text{kryt}} - \tau_{xyA}(\vartheta) = \min \quad (2.17)$$

Przedstawione równania wyrażają zależność wartości dopuszczalnej amplitudy naprężenia normalnego (zależność (2.16)) i naprężenia stycznego (zależność (2.17)) od kąta ϑ . Efekt ten wywołany jest poprzez związane z określonym kierunkiem składowe statyczne cyklu zmęczeniowego. Zaproponowano powiązania przedstawionego sposobu postępowania z ogólną teorią anizotropii [9]. Kryterium uszkodzenia przybiera wówczas następującą postać:

$$\left(\frac{\sigma_{xA}(\vartheta)}{\sigma_{xA}(\vartheta)} \right)^2 - \frac{\sigma_{xA}(\vartheta) \sigma_{yA}(\vartheta)}{\sigma_{xA}(\vartheta) \sigma_{yA}(\vartheta)} + \left(\frac{\sigma_{yA}(\vartheta)}{\sigma_{yA}(\vartheta)} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xyA}(\vartheta)}{\tau_{xyA}(\vartheta)} \right)^2 = F \quad (2.18)$$

Kryterium to nazwane zostało przez autorów „Quadratische Versagenshypothese”, w skrócie QVH.

Bardzo interesująca wydaje się koncepcja SIMBÜRGER'a (1975) rozwinięta następnie przez ZENNER'a (1976). Autorzy szukając kryterium uszkodzenia dla materiałów sprężysto-plastycznych jako punkt wyjścia przyjęli koncepcję MISES'a. Według MISES'a trwałe odkształcenie plastyczne nastąpi wówczas, kiedy J_2 tensora naprężenia osiągnie wartość krytyczną:

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] = J_2 \text{ kryt} \quad (2.19)$$

Warunek MISES'a był w wielu pracach różnie interpretowany [10]:

- krytyczna energia odkształcenia postaciowego (MAXWELL 1856, HUBER 1904, HENCKY 1924)

$$W \sim J_2$$

- krytyczna wartość stycznego naprężenia oktaedrycznego (NADAI 1937)

$$\tau_{\text{okt}} \sim J_2$$

- krytyczna wartość średniokwadratowa naprężenia stycznego (PAUL 1968)
- krytyczna wartość średniokwadratowa naprężenia stycznego wszystkich powierzchni chwilowych badanej objętości elementarnej (NOVOSHILOV 1952)

$$\tau_{\text{int}} \sim J_2$$

Według [101] przedstawione interpretacje są równoważne dla przypadku naprężeń statycznych (pomijając ich interpretację fizyczną), a z punktu widzenia naprężeń zmęczeniowych, jedynie interpretacja NOVOSHILOV'a spełnia konieczny (ze względu na zmienność kierunku osi głównych) warunek niezależności od układu odniesienia. Intensywność naprężenia stycznego (w cytowanej pracy [101] użyto określenia proponowanej metody „Schubspannungsintensitätshypothese” i stąd wynikającej skrótowej nazwy metody SIH) może być obliczona jako:

$$\tau_{\text{inta}} = \sqrt{\frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \tau_{\gamma\varphi a}^2 d\Omega} = \sqrt{\frac{1}{4\pi} \int_{\gamma=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{\pi} \tau_{\gamma\varphi a}^2 \sin\gamma d\gamma d\varphi} \quad (2.20)$$

gdzie:

- Ω - powierzchnia kuli jednostkowej, $\Omega = 4\pi r^2$,
- $d\Omega$ - $r^2 \sin\gamma d\gamma d\varphi$,
- r, γ, φ - współrzędne biegunowe wyrażone w mierze łukowej.

Jak wynika z doświadczeń [89, 101] całkowanie numeryczne zależności (2.20) jest nadzwyczaj kłopotliwe i czasochłonne. Wykazano, że wystarczającym jest całkowanie po obwodzie okręgu o $\gamma = \text{const}$. Wskazano na $\gamma = 90$ oraz $\gamma = 63,4$ co spowoduje, że zależność (2.20) uprości się do postaci:

$$\tau_{\text{inta}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \tau_{\varphi a}^2 d\varphi} \quad (2.21)$$

Dla $\gamma = 90$ rozwiązanie równania (2.21) przyjmie następującą postać [89]:

$$\tau_{\text{inta}} = \frac{1}{\sqrt{8}} \sqrt{6\sigma_{xa}^2 - 2\sigma_{xa}\sigma_{ya} \cos\alpha_y + \alpha_{ya}^2 + 4\tau_{xya}^2} \quad (2.22)$$

Celem uwzględnienia wpływu naprężeń średnich oraz uzyskania zmienności stosunku Z_{s0}/Z_{rc} zaproponowano [27, 28], aby w miejsce $\tau_{\varphi a}$ wprowadzić $\tau_{\varphi\text{eff}a}$ o postaci:

$$\tau_{\varphi\text{eff}a} = \sqrt{(a\tau_{\varphi a}^2 + b\sigma_{\varphi a}^2)} (1 + d\sigma_{\varphi m}) \quad (2.23)$$

gdzie:

a, b, d - wielkości przyjmowane jako stałe.

Nadmienić należy, że równanie (2.22) spełniające warunek niezależności od układu odniesienia, posiada bardzo wąski zakres zastosowania. Wprowadzenie natomiast zapisu (2.23) jest rezygnacją ze spełnienia postulatu niezależności od układu odniesienia. Problem ten nie znajduje jednak dalszego komentarza w publikacjach ZENNER'a.

Publikacje [9, 10, 27, 28, 101-104] przynoszą szereg rozwiązań równania (2.21) w połączeniu z (2.23) dla konkretnych przypadków obciążenia.

W pracach [94, 95, 105] dokonano szerokiej weryfikacji doświadczalnej ostatnio omówionych metod. Uzyskano zadowalające wyniki obliczeń. Autorzy [94, 95] wskazują na metodę QVH jako na lepszą z punktu widzenia średniego

błędu względnej (eksperymentalnej i obliczeniowej) wytrzymałości zmęczeniowej oraz rozrzutu uzyskiwanych wyników.

2.6. Uwagi do rozdziału 2

Na zakończenie rozważań prezentowanych w rozdziale 2 przedstawionych zostanie kilka uwag podsumowujących i stanowiących jednocześnie wskazanie dróg poszukiwań nowych rozwiązań.

Jak wynika z przedstawionego przeglądu, w literaturze podawanych jest bardzo wiele propozycji metod oceny wytrzymałości zmęczeniowej w warunkach złożonego stanu naprężenia. Stopień weryfikacji, zarówno samych koncepcji jak i proponowanych do wykorzystania zapisów jest jednak częstokroć niezadowolający. Charakterystycznym jest, i pod tym kątem przeprowadzono zaprezentowany przegląd, że poszczególne metody posiadają na ogół bardzo ograniczony zakres zastosowania. Próby kompleksowej oceny większej grupy hipotez dla tych samych danych eksperymentalnych, prowadzone przez postronnych badaczy [103,105], wskazują na duży rozrzut wyników i nie wykazują zdecydowanej wyższości określonej metody nad innymi.

Zwyczajowo, na podstawie wiedzy z zakresu obciążeń statycznych, zagadnienie złożonego stanu naprężenia czy odkształcenia wiąże się z pojęciem hipotezy wytężeńowej. Przy rozważaniach dotyczących różnych hipotez wytężeńowych istotne znaczenie ma warunek niezależności od przyjętego układu współrzędnych, tzn. charakterystyczne wielkości powinny być wyrażone przez niezmienniki stanu naprężenia, względnie stanu odkształcenia. W stosunku do przedstawionego poglądu, stan taki można jedynie przypisać metodom omawianym w podrozdziale 2.2, tzn. metodom znajdującym zastosowanie dla obciążeń zmęczeniowych zmiennych w cyklu wahadłowym i nie wykazujących wzajemnych przesunięć fazowych. We wszystkich innych przypadkach trudno jest mówić o tak rozumianej niezależności. Dla ogólniej definiowanego obciążenia zmęczeniowego niezmienniki definiowane dla obciążeń statycznych zachowują swoje znaczenie jedynie w sensie dyskretnym (dla określonej chwili). Natomiast dla całego cyklu zmęczeniowego tracą swój dotychczasowy sens. Podkreślić należy, że problem ten bardzo rzadko jest podnoszony w literaturze i nie znalazł jak dotąd zadowolającej interpretacji. W powyższym ujęciu byłoby błędym stosowanie do metod przedstawionych w podrozdziałach 2.3 - 2.5 określenia hipoteza wytężeńowa. W literaturze stosuje się powszechnie określenie kryterium uszkodzenia zmęczeniowego w warunkach złożonego stanu naprężeń zmęczeniowych.

Na szczególną uwagę zasługują metody omawiane w podrozdziale 2.5. Wyróżnienie to związane jest z faktem, że metody te, poza największą uniwersalnością (jeżeli idzie o przypadki obciążenia), uwzględniają najszerzej dotychczasowy stan wiedzy, także wynikający z prób jednoosiowych. Podkreślenia wymaga fakt nowatorskiego podejścia do zagadnienia oceny wytrzymałości w warunkach złożonego stanu naprężenia, uwzględniającego specyfikę

obciążenia zmęczeniowego (konceptcja płaszczyzny krytycznej). Należy jednak zauważyć, że okupione zostało to utratą przejrzystości i zwartości zapisu. Ilustrują to doskonale prace dotyczące rozwiązań szczegółowych takich metod jak QVH [31] czy SIH [104]. Częstokroć trudno jest tu mówić o określonej zależności stanowiącej kryterium uszkodzenia zmęczeniowego, a jest to raczej określony algorytm postępowania w celu znalezienia stanu krytycznego. W tym kontekście zauważyć należy, że pomimo licznych publikacji dotyczących np. metody QVH i dobrych rezultatów jej eksperymentalnej weryfikacji [94,95], nie doczekała się ona żadnych weryfikacji dokonanych przez badaczy spoza kręgu jej twórców.

Z grupy metod przedstawionych w podrozdziale 2.3 (najczęściej wykorzystywane w praktyce), na wyróżnienie zasługuje metoda opublikowana przez EL-MAGD'a w roku 1984 [14]. Różni się ona od wszystkich pozostałych zapisem umożliwiającym alternatywne uwzględnienie hipotez maksymalnego naprężenia stycznego i głównego naprężenia normalnego (lub ich równoległego wykorzystania). Biorąc pod uwagę złożoność budowy złomu zmęczeniowego koncepcja ta wydaje się być zasadną i godną dalszej analizy.

3. WYBRANE ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ W JEDNOOSIOWYM STANIE NAPRĘŻEŃ I ICH WYKORZYSTANIE DLA OCENY WYTRZYMAŁOŚCI W STANACH ZŁOŻONYCH

3.1. Wykres zmęczeniowy WÖHLER'a

Efekt zmęczenia materiałów i elementów konstrukcyjnych jest procesem wieloparametrycznym. Począwszy od pierwszych prac WÖHLER'a, między innymi [98], wykazywano wielokrotnie oddziaływanie praktycznie wszystkich cech konstrukcyjnych (dynamicznych, geometrycznych i materiałowych) badanego elementu na uzyskiwaną trwałość bądź wytrzymałość zmęczeniową, a w konsekwencji na położenie wykresu zmęczeniowego. Ze względu na liczbę parametrów mających istotny wpływ na przebieg procesu zmęczenia, jego opis na etapie elementu konstrukcyjnego pozostał do dnia dzisiejszego opisem czysto fenomenologicznym. Podstawowa charakterystyka zmęczeniowa, wykres zmęczeniowy WÖHLER'a, pozostał wykresem płaskim (istnieją próby tworzenia wykresów przestrzennych, jak np. próba powiązania wykresu WÖHLER'a z wykresem HEYWOOD'a [81], ale nie znajdują one szerszego zastosowania), określającym zależność pomiędzy wartością amplitudy obciążenia (naprężenia, odkształcenia) a trwałością zmęczeniową wyrażoną liczbą cykli. Wszystkie pozostałe parametry są przy wyznaczaniu charakterystyki ustalone. I tak spotyka się wykresy dla ustalonej np. asymetrii cyklu R, dla ustalonego α_k , dla określonego stanu materiału itp. [35, 37].

Wykorzystując powyższą zasadę, przyjęto konstruowanie wykresu WÖHLER'a dla złożonego stanu naprężenia w ten sposób, że oś rzędnych wykresu utożsamiana jest z wielkością reprezentatywną dla złożonego stanu naprężenia. Tą wielkością najczęściej (np. [10, 24, 39, 60, 86, 103]) jest amplituda naprężenia w kierunku ustalonej osi x. Uwzględniając wszystkie wielkości występujące w równaniach (1.2a - 1.2c) należy przyjąć, że w obrębie jednego wykresu, dla zmiennego co do wartości σ_{xa} mogą występować następujące relacje:

- dla składowych amplitudowych

$$\frac{\sigma_{1ja}}{\sigma_{xa}} = a_{1j} = \text{const} \quad (3.1)$$

- dla wartości średnich

$$\frac{\sigma_{1jm}}{\sigma_{xa}} = b_{1j} = \text{const} \quad (3.2a)$$

lub

$$\frac{\sigma_{1jm}}{Z_{rc}} = b_{1j} = \text{const} \quad (3.2b)$$

Należy zwrócić uwagę na zróżnicowanie wynikające z zależności (3.2a) i (3.2b). W przypadku badań, których celem jest określenie granicy zmęczenia według np. metody schodkowej [86], wraz ze zmianą poziomu obciążenia zmianie podlegają obie składowe obciążenia (amplitudowa i statyczna) - zależności (3.1) i (3.2a) - stosowane między innymi w pracach [24, 102], lub jedynie składowa amplitudowa - zależności (3.1) i (3.2b), stosowane w pracach [13, 86]. Na etapie symulacji komputerowej (np. weryfikacja metod obliczeniowych), należy konsekwentnie przestrzegać ustaleń z etapu badań.

3.2. Pęknięcie zmęczeniowe

Podobnie jak nośność złożonego układu konstrukcyjnego jest determinowana nośnością jego najsłabszego ogniwa, tak wytrzymałość pojedynczego elementu konstrukcyjnego jest związana z przekrojem, w którym wielkości odkształceń i naprężeń osiągają wartości maksymalne. W przypadku niejednorodnego rozkładu naprężeń, poszukiwany obszar może być wskazany w wyniku analitycznej (np. metodą elementów skończonych) lub eksperymentalnej (np. metody elastooptyki) analizy rozkładu naprężeń. Dla elementów z rozkładem jednorodnym poszukiwania takie mogłyby być realizowane poprzez analizę niewielkich różnic wartości naprężeń i wytrzymałości w siatce strukturalnej materiału i jako takie są trudne do zrealizowania, zarówno na drodze eksperymentalnej, jak i analitycznej. O ile w obu wyszczególnionych przypadkach, określenie a priori miejsca limitującego wytrzymałość jest mniej lub bardziej problematyczne, o tyle w sytuacji a posteriori miejsce to ujawnia się w postaci pęknięcia. Analiza powstałego pęknięcia może być źródłem bardzo cennej informacji dotyczących przyczyny powstania uszkodzenia, jak i rozgraniczenia udziału różnych czynników mających wpływ na proces zmęczeniowego niszczenia [35, 65].

Przewodną ideą, leżącą u podstaw kryteriów naprężeniowych i odkształceniowych (wyróżnionych w podrozdziale 2.1), jest założenie, że o złomie zmęczeniowym materiałów decydują jedynie te składowe stanu naprężenia lub odkształcenia, które działają w płaszczyźnie zaistniałego złomu zmęczeniowego. Podobnie w przypadku kryteriów energetycznych zakłada się, że o złomie zmęczeniowym decyduje ta część energii, która jest równa pracy właściwej wykonanej na odkształcenie nie we wszystkich kierunkach, lecz tylko w jednym, związanym z płaszczyzną złomu zmęczeniowego [46]. Analiza pęknięć zmęczeniowych powstałych w warunkach złożonego stanu naprężeń zmęczeniowych może zatem dostarczyć informacji o udziale poszczególnych wielkości (np. wybranych składowych stanu naprężenia) w przebiegu procesu zmęczeniowego niszczenia.

W niniejszej pracy jako kryterium uszkodzenia przyjmuje się pojawienie się pierwszego makroskopowego zauważalnego zarysowania powierzchni, świadczącego o istnieniu pęknięcia zmęczeniowego. Pozostałe dwie fazy, faza rozwoju pęknięcia i faza pęknięcia resztkowego, podlegające opisowi zgod-

nie z regułami pęknięcia, pozostają poza zakresem tutaj omawianym.

Nadmienić należy, że udział etapu tworzenia się pęknięcia zmęczeniowego w całkowitej trwałości (do utraty sztywności elementu lub złomu rozdzielczego) zależy przede wszystkim od cech geometrycznych próbki czy elementu konstrukcyjnego, sposobu obciążenia (wyrażonych w zależności od etapu procesu zmęczeniowego niszczenia przez współczynnik kształtu α_k lub współczynnik intensywności naprężenia np. K_T), jak i od poziomu naprężenia [73]. Udział ten może być także zależny od gradientu naprężenia w przekroju pozbawionym karbów - stan naprężenia wywołany zmiennym rozciąganiem i stan naprężenia wywołany zmiennym momentem gnącym. Dla próbek wykonanych ze stali konstrukcyjnej udział ten może sięgać 99% [73, 74, 82] i wraz z wzrastającą wartością α_k może zmaleć do kilku procent trwałości całkowitej [35, 73].

3.3. Wpływ naprężenia średniego w cyklu zmęczeniowym na wytrzymałość zmęczeniową

Jak wskazano w rozdziałach 1 i 2, jednym z istotnych problemów oceny wytrzymałości w warunkach złożonego stanu naprężeń zmęczeniowych jest potrzeba uwzględnienia oddziaływania wartości średnich cykli zmęczeniowych.

Wykorzystywane są dwa typy wykresów zmęczeniowych, ujmujących wpływ naprężenia średniego na wytrzymałość zmęczeniową [37]. Są to wykresy granicznych naprężeń cyklu w układzie σ_{\max} i σ_{\min} , σ_m lub granicznych amplitud cyklu σ_a , σ_m . Wykresy granicznych naprężeń cyklu wykorzystywane są dla określenia wpływu współczynnika asymetrii cyklu R. Wartość dopuszczalnej amplitudy cyklu:

$$\sigma_A \overline{\text{def}} (\sigma_a)_{\text{kryt}} \quad (3.3)$$

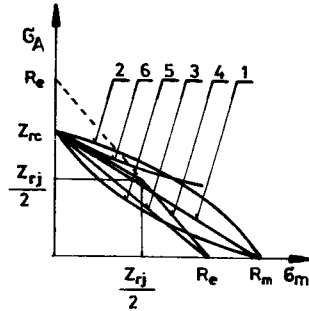
w obecności naprężenia średniego σ_m określana jest na wykresach granicznych amplitud cyklu.

Związek pomiędzy σ_A i σ_m opisano szeregiem zależności, które były przedmiotem kilku prac przeglądowych (między innymi [12, 35, 47, 89]). Najogólniej mówiąc, zwiększenie wartości σ_m powoduje, że złom zmęczeniowy uzyskuje się przy mniejszej wartości σ_a . Istotną rolę odgrywają tu odkształcenia plastyczne i zjawiska relaksacyjne, zatem różne materiały są w różnym stopniu wrażliwe na działanie σ_m .

Zależnością najczęściej wykorzystywaną jest zależność o postaci:

$$\sigma_A = Z_{rc} \left[1 - \left(p_2 \frac{\sigma_m}{R_m} \right)^{w_1} \right]^{w_2} \quad (3.4)$$

W pracy [47] zestawiono aż jedenaście różnych interpretacji zależności (3.4), podanych przez różnych badaczy. Na rys.3.1 przedstawiono graficzną interpretację trzech najbardziej znanych spośród nich:



Rys.3.1. Wybrane wykresy granicznych amplitud cykli zmęczeniowych [96]

- linia 1 - zależność GOODMANA'a, $p_2 = w_1 = w_2 = 1$,
 linia 2 - zależność GERBERA'a, $p_2 = w_2 = 1, w_1 = 2$,
 linia 3 - zależność SODERBERGA'a, $p_2 = R_m/R_e, w_1 = w_2 = 1$.

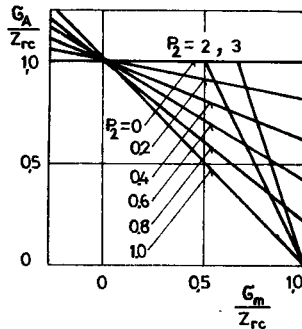
Najczęściej wykorzystywaną interpretacją zależności (3.4) jest zależność liniowa o postaci (linia 4 na rys.3.1):

$$\sigma_A = Z_{rc} \left(1 - p_2 \frac{G_m}{R_m} \right) \quad (3.5)$$

Znając jedynie Z_{rc} i R_m wartość p_2 można wyznaczyć z zależności:

$$p_2 = p_1 \frac{Z_{rc}}{R_m} \quad (3.6)$$

Zmieniając wartość p_1 można uzyskać dobre przybliżenie wykresu określonego eksperymentalnie dla małych i średnich wartości G_m - rys.3.2.



Rys.3.2. Liniowa zależność (3.5) w powiązaniu z (3.6) na wykresie HAIGH'a

W przypadku, kiedy poza Z_{rc} znane jest także Z_{rj} , wówczas:

$$p_{2s} = \frac{2Z_{rc} - Z_{rj}}{Z_{rj}} \quad (3.7a)$$

lub w przypadku obciążeń skręcających:

$$p_{2r} = \frac{2Z_{so} - Z_{sj}}{Z_{sj}} \quad (3.7b)$$

$p_{2\sigma}$ i $p_{2\tau}$ nazywane są w [37] współczynnikami wrażliwości na asymetrię cyklu, odpowiednio dla naprężeń normalnych i dla naprężeń stycznych.

Inną spotykaną postacią zależności opisującej wartości amplitud granicznych jest zależność w postaci:

$$\sigma_A = Z_{rc} \frac{1 - \frac{\sigma_m}{R_m}}{1 + p_3 \frac{\sigma_m}{R_m}} \quad (3.8)$$

Dla $p_3 = 1$ uzyskujemy znaną zależność SMITH'a - linia 5 na rys.3.1.

Linia 6 odpowiada zależności ODING'a [96] o następującej postaci:

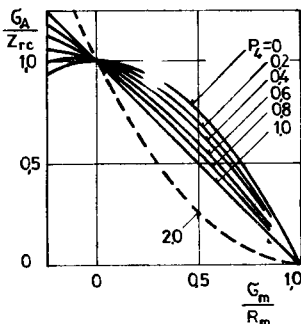
$$\sigma_A (\sigma_m + \sigma_A) = Z_{rc}^2 \quad (3.9)$$

Według [96] zależności (3.9) należy przypisywać bardzo ograniczone znaczenie praktyczne w porównaniu w zależnościami (3.4) i (3.5).

W pracy [89] podano zależność o ogólniejszym niż dotychczas przedstawione znaczeniu praktycznym:

$$\sigma_A = Z_{rc} \left[1 - p_4 \frac{\sigma_m}{R_m} - (1 - p_4) \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 \right] \quad (3.10)$$

Zmieniając parametr p_4 w zakresie od 0,0 do 2,0 [13] - rys.3.3 - obejmujemy obszar opisywany zależnościami (3.4) i (3.5).



Rys.3.3. Wykres granicznych amplitud cyklu wg zależności (3.10) dla zmiennej wartości parametru p_4 [13]

Parametr p_4 można określić w sposób przybliżony dysponując następującymi danymi: R_m , Z_{rc} i Z_{rj} [89]:

$$p_4 = \frac{4 - \left[2 \frac{Z_{rj}}{Z_{rc}} + \left(\frac{Z_{rj}}{R_m} \right)^2 \right]}{\frac{Z_{rj}}{R_m} \left(2 - \frac{Z_{rj}}{R_m} \right)} \quad (3.10a)$$

W sposób dokładniejszy p_4 można uzyskać aproksymując krzywą σ_A f (σ_m) na kilku punktach eksperymentalnych:

$$P_4 = \frac{\sum_{i=1}^{l_p} \left[\left(\frac{\sigma_{mi}}{R_m} \right)^2 - \frac{\sigma_{mi}}{R_m} \right] \left[\frac{\sigma_{ai}}{Z_{rc}} + \left(\frac{\sigma_{mi}}{R_m} \right)^2 - 1 \right]}{\sum_{i=1}^{l_p} \left[\left(\frac{\sigma_{mi}}{R_m} \right)^2 - \frac{\sigma_{mi}}{R_m} \right]^2} \quad (3.10b)$$

gdzie: l_p określa liczbę punktów pomiarowych pozostających do dyspozycji, indeksem i oznaczono kolejne punkty pomiarowe.

Należy podkreślić, że przedstawione zależności znajdują zastosowanie do materiałów w stanie:

- elastoplastycznym - zależność SODERBERGA'a, wówczas musi zostać spełniony warunek:

$$\sigma_{\max} = \sigma_a + \sigma_m \leq R_e \quad (3.11a)$$

- zarówno elastoplastycznym jak i elastokruchym - zależności pozostałe; musi być spełniony warunek:

$$\sigma_{\max} = \sigma_a + \sigma_m \leq R_m \quad (3.11b)$$

Warunki (3.11a) i (3.11b) określają położenie linii ograniczającej zakres rozpatrywanych σ_m na tzw. praktycznym wykresie HAIGH'a.

3.4. Uwagi do rozdziału 3

W rozdziale 3 przedstawiono jedynie wybrane, istotne z punktu widzenia poruszanej w niniejszej pracy tematyki, zagadnienia z ogólnej problematyki zmęczenia materiałów i elementów konstrukcyjnych. Przedstawione podejście do wykresu zmęczeniowego WÖHLER'a i pęknięcia, jako efektu a' posteriori przyłożonego obciążenia, wykorzystane zostanie w części dotyczącej badań własnych. Niektóre zależności omawiane w podrozdziale 3.3 wykorzystane zostaną dalej w trakcie omawiania proponowanego kryterium uszkodzenia w warunkach złożonego stanu naprężenia.

4. BADANIA WŁASNE, UZYSKANE WYNIKI I ICH ANALIZA

4.1. Cel i zakres badań własnych

Zasadniczym celem eksperymentalnych badań własnych jest dokonanie jakościowej i ilościowej oceny wpływu przesunięć fazowych na fraktograficzne cechy złomu zmęczeniowego. Cel ten zostanie zrealizowany na podstawie analizy wyników obserwacji makro- i mikrofraktograficznych pęknięć zmęczeniowych, uzyskanych w trakcie realizacji prób zmęczeniowych z trzema, przesuniętymi w fazie, składowymi stanami obciążenia.

Aby umożliwić rozszerzenie zakresu analizy uzyskanych wyników badań eksperymentalnych, przeprowadzona zostanie ponadto analiza zmienności wybranych wielkości związanych z tensorem naprężeń. Celem tej analizy jest dokonanie ocen, przede wszystkim jakościowych, zmienności czasowej naprężeń głównych, maksymalnego naprężenia stycznego, jak i kierunków głównych w warunkach obciążeń stosowanych we własnych badaniach eksperymentalnych.

4.2. Warunki badań zmęczeniowych

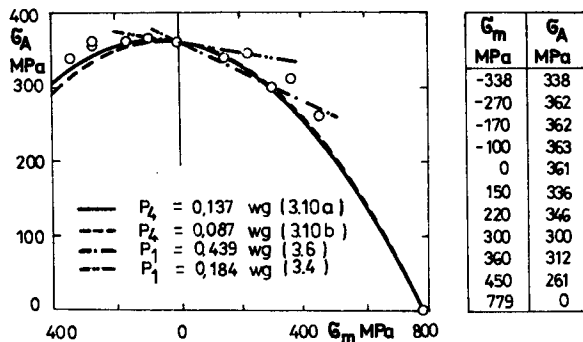
4.2.1. Materiał, z którego wykonano próbki do badań zmęczeniowych

Badania zmęczeniowe realizowane były na próbkach wykonanych ze stali konstrukcyjnej do ulepszania cieplnego 25CrMo4. Wybór materiału do badań był w dużym stopniu spowodowany powiązaniem prezentowanych badań z tematem [86], będącym kontynuacją szeregu wcześniejszych prac (między innymi [13, 31, 55, 56]) realizowanych na próbkach wykonywanych z tego samego gatunku stali. Obszerny materiał porównawczy, wynikający z tych prac, był czynnikiem wspierającym wybór. Jak wskazano w genezie pracy (podrozdział 1.1), wcześniejsze badania autora realizowane były także na stalach konstrukcyjnych i wybór ten stanowi logiczną ich kontynuację.

Materiał do badań dostarczono w postaci walcowanych i wyżarzonych odprężająco prętów o średnicy 53 mm. Dane dotyczące statycznych własności mechanicznych oraz składu chemicznego stali 25CrMo4 [86] zestawiono w tabelicy 4.1. Zamieszczono w niej również szkic określający sposób pobrania materiału na próbki do próby statycznego rozciągania. Próbki te pobrano na promieniu odpowiadającym średniemu promieniowi próbek cylindrycznych wybranych do badań zmęczeniowych.

W tabelicy 4.2 zestawiono dane dotyczące własności statycznych i zmęczeniowych próbek o przyjętych do badań zmęczeniowych cechach geometrycznych - rys.4.1, i wykonanych ze stali 25CrMo4 [86].

Celem określenia wrażliwości stali 25CrMo4 na działanie naprężenia średniego zrealizowano [31,86] badania przy zmiennych wartościach σ_m - rys. 4.2 (wartości podane na rys.4.2 są wartościami średnimi określonej według metody schodkowej granicy zmęczenia). Na tle uzyskanych rezultatów wykreślono krzywe odpowiadające zależności (3.10) dla parametru p_4 określonego zgodnie z (3.10a) i (3.10b) oraz prostą zgodnie z (3.5) dla p_{10} określonego według (3.7a).



Rys.4.2. Wykres HAIGH'a dla stali 25CrMo4 [31]

4.2.2. Próbkki do badań zmęczeniowych

Do badań zmęczeniowych w warunkach złożonego stanu naprężeń wykorzystywane są zasadniczo trzy typy próbek:

- płaskie krzyżowe - próbki te wymagają specjalnych układów obciążających składających się ze sztywnej ramy oraz zamocowanych w przemieszczonych o 90° płaszczyznach układów obciążających; stosowane obciążenie - dwuosiowe rozciąganie,
- walcowe pełne - badania realizowane są na stanowiskach standardowych, stosowane obciążenia - rozciąganie ze skręcaniem oraz zginanie ze skręcaniem,
- cylindryczne - badania realizowane są na stanowiskach standardowych, stosowane obciążenia - dwie do trzech składowych: rozciąganie, skręcanie oraz ciśnienie wewnętrzne w próbce.

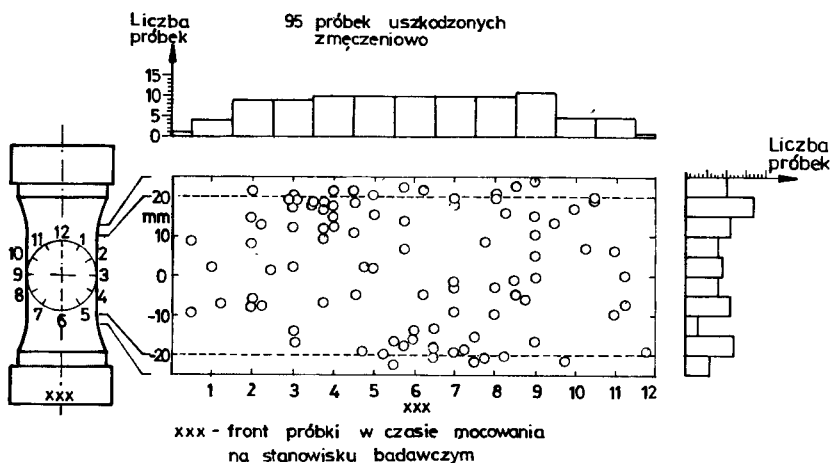
Nadmienić należy, że w każdym z wymienionych przypadków badania te są bardzo kosztowne. O ostatecznym wyborze formy próbki decyduje częstokroć w głównej mierze możliwość wykorzystania określonego zestawu aparatury badawczej.

Z punktu widzenia określonego celu badań najbardziej uniwersalną jest próba realizowana z wykorzystaniem próbek cylindrycznych - możliwość sterowania wartością przesunięć fazowych α_y i α_{xy} . Tę też formę próbki przyjęto do badań własnych.

Cechy geometryczne przyjętych próbek cylindrycznych pokazano na rys.4.1. Próbkki kształtowano w taki sposób, że oś próbki pokrywa się z osią pręta stanowiącego półfabrykat. Obróbka zgrubna i kształtująca realizowane były na obrabiarce numerycznej, co zapewniło stałość warunków ob-

róbki i stałość (w zakresie założonej tolerancji) wymiarów i dokładności kształtu. Obróbka wykańczająca otworu realizowana była przez honowanie, natomiast powierzchni zewnętrznej przez szlifowanie. Zgodność stanu powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej z wartościami podanymi na rysunku wykonawczym, jak i błędy położenia wskazanych na rysunku powierzchni, zweryfikowano z wynikiem pozytywnym na wybranych próbkach.

Celem weryfikacji sumarycznego oddziaływania cech geometrycznych próbki, jak i oddziaływań związanych z mocowaniem próbki na stanowisku badawczym, zestawiono położenia rzeczywistych punktów inicjacji pęknięć zmęczeniowych dla wszystkich badanych (i w formie makropęknięcia uszkodzonych zmęczeniowo) próbek - rys.4.3.



Rys.4.3. Rozkład populacji uzyskanych pęknięć zmęczeniowych po obwodzie i na długości próbki [86]

Zarówno rozkład pęknięć po obwodzie próbki (histogram umieszczony w górnej części rysunku) jak i po długości powierzchni pomiarowej (histogram umieszczony po prawej stronie rysunku) nie wykazują błędu tendencyjnego. Do badań fraktograficznych przyjęto jedynie pęknięcia znajdujące się w walcowej części pomiarowej próbki.

4.2.3. Stosowane obciążenia

Badania zmęczeniowe realizowane były w zakresie przejściowym krzywej zmęczeniowej WÖHLER'a, według metody schodkowej. Wyniki opracowania uzyskanych rezultatów, celem określenia granicy zmęczenia, dla wybranych warunków badań, podano w pracach [86,94]. Wyniki te wykorzystane zostaną w rozdziale 5 niniejszej pracy do weryfikacji zgodności obliczeń według proponowanego kryterium z wynikami eksperymentalnymi.

Próbka podlegała działaniu trzech składowych obciążenia zgodnie z równaniem (1.2): zmiennemu rozciąganiu (według (1.2a)), zmiennemu ciśnieniu wewnętrznemu w próbce (według (1.2b)) oraz zmiennemu skręcaniu (według (1.2c)). Relacje pomiędzy poszczególnymi składowymi równań (1.2a) - (1.2c)

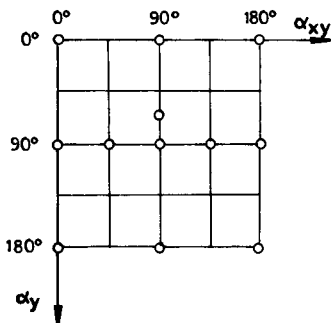
przyjęte w badaniach jako stałe zestawiono w tabelicy 4.3.

Tablica 4.3

Relacje pomiędzy składowymi równań (1.2a) - (1.2c) przyjęte w badaniach zmęczeniowych

$\frac{\sigma_{ya}}{\sigma_{xa}}$	$\frac{\tau_{xya}}{\sigma_{xa}}$	$\frac{\sigma_{xm}}{Z_{rc}}$	$\frac{\sigma_{ym}}{Z_{rc}}$	$\frac{\tau_{xym}}{Z_{rc}}$
0,75	0,50	0,75	0,62	0,00

Zmienne w badaniach były wartości przesunięć fazowych α_y i α_{xy} . Ich wartości zmieniano w zakresie od 0 do 180 stopni, tworząc 10 kombinacji wg rys.4.4. Częstotliwość obciążenia wynosiła 15 Hz.



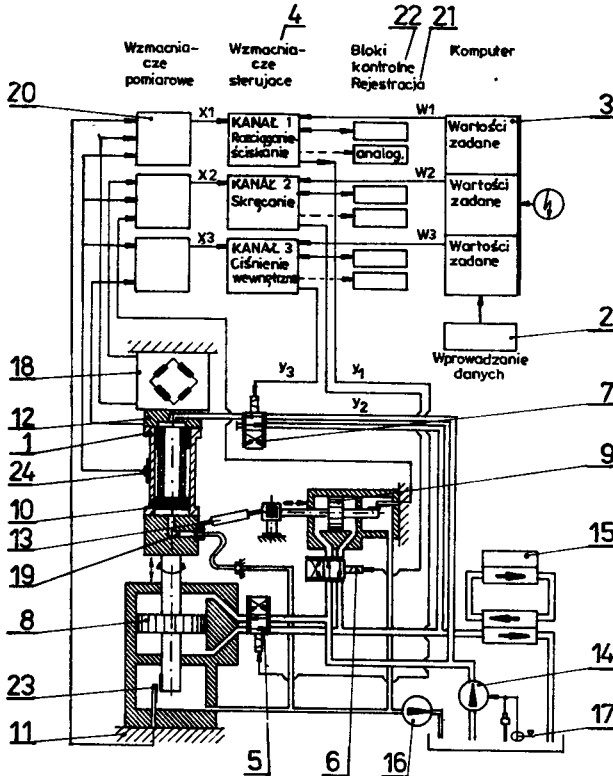
Rys.4.4. Warunki badań odnośnie przyjętych przesunięć fazowych α_y i α_{xy}

4.2.4. Stanowisko badawcze

Do badań zmęczeniowych wykorzystano elektro-hydrauliczną maszynę wytrzymałościową firmy SCHENCK, ze specjalnie zaprojektowanym i rozbudowanym układem obciążającym próbkę. Na rys.4.5 pokazano schemat zmodyfikowanego, trójkanałowego układu pracy maszyny wytrzymałościowej, zapewniającego niezależne sterowanie wartością siły wzdłużnej (kanał 1), momentu skręcającego (kanał 2) i ciśnienia wewnętrznego w próbce 1 (kanał 3).

Wartości charakterystyczne obciążenia zadawane są z klawiatury 2 komputera 3. Wartości te są podstawą obliczenia wielkości sterujących pracą serwowzorów i pozostają w pamięci układu od momentu zakończenia wprowadzenia danych jako wielkości zadane, odpowiednio w1, w2 i w3. Sygnały te podlegają wzmocnieniu na wzmacniaczach sterujących 4 i zostają przesłane jako wielkości nastawiające stopnia pierwszego dwustopniowych elektro-hydraulicznych serwowzorów 5, 6 i 7. Zastosowanie układów tłokowych dwustronnego działania (8 i 9) w połączeniu z układem przepływkiwania przeciwkomory hydropulsatora strumieniem o dużej prędkości przepływu, umożliwia

sterowanie kanału 1 i 2 w zakresie dowolnych obciążeń zmiennych, także w zakresie sinusoidalnych cykli wahadłowych i tętniących. Dla kanału 3 wkładka 10 umożliwia jedynie uzyskanie obciążeń o cyklu jednostronnym. Pulsatory wraz z ich serwowzaworami tworzą ze stołem pomiarowym maszyny 11, układem mocowania próbki 12 i oprzyrządowania do realizacji momentu skręcania 13 układ obciążający. Na rys.4.5 oznaczono ponadto: 14 - pompa główna, 15 - urządzenie schładzające olej, 16 - pompa odsysająca, 17 - urządzenie zabezpieczające (stan oleju, temperatura oleju).



Rys.4.5. Schemat stanowiska do badań zmęczeniowych

Pomiar chwilowych wartości rzeczywistych realizowany jest poprzez układ pomiaru siły wzdłużnej (kanał 1) i momentu obrotowego (kanał 2) 18 oraz układ pomiaru ciśnienia (kanał 3) 19. Sygnały będące wynikiem pomiaru podlegają wzmocnieniu w wzmacniaczach pomiarowych 20 i zostają podane jako sygnały x_1 , x_2 i x_3 do wzmacniaczy sterujących 4 celem porównania z w_1 , w_2 i w_3 . Oba sygnały mogą podlegać obserwacji i rejestracji w formie analogowej 21. Po każdorazowej realizacji przedstawionej pętli pomiarowo-sterującej wartości x_1 , x_2 i x_3 są wyświetlane w formie dyskretnej przez bloki kontrolne 22. Bloki kontrolne wstrzymują realizację obciążenia w wybranym kanale lub we wszystkich kanałach w przypadku gwałtownej zmiany wartości x_1 , x_2 lub x_3 . Ma to miejsce w momencie wystąpienia pęknięcia zmęczeniowego. Odpowiednio precyzyjne ustawienie bloków kontrolnych zapewnia uzyska-

nie pęknięć o niewielkiej długości, reprezentatywnych dla fazy inicjacji pęknięcia (podrozdział 3.2).

Stanowisko umożliwia także prowadzenie prób przy regulowanym przemieszczeniu. Wykorzystane są wówczas czujnik przemieszczenia 23 lub tensometr 24 naklejony bezpośrednio na próbce.

4.3. Obserwacje makroskopowe uzyskanych złomów zmęczeniowych

Jako obserwacje makroskopowe rozumie się obserwacje prowadzone okiem nieuzbrojonym lub przy niewielkim powiększeniu. W niniejszym rozdziale obserwacje te obejmują zakres powiększeń do około 70 razy. W obserwacjach wykorzystano optyczny mikroskop stereoskopowy oraz optyczny mikroskop warsztatowy, oba firmy ZEISS. Obserwacje na mikroskopie stereoskopowym pozwalały na identyfikację obszarów pozbawionych makroskopowych odkształceń plastycznych i tym samym na identyfikację miejsca inicjacji pęknięcia. Miejsce to w celach dokumentacyjnych fotografowano. Pomiaru kąta pęknięcia dokonywano w określonym wcześniej miejscu inicjacji pęknięcia z wykorzystaniem mikroskopu warsztatowego.

Obserwacjom makroskopowym poddano wszystkie próbki, które podczas badań zmęczeniowych uległy uszkodzeniu w formie makropęknięcia, a uzyskane pęknięcia znajdowało się w części pomiarowej próbki. W sumie obserwowano około 50 pęknięć uzyskanych w zakresie przejściowym wykresu zmęczeniowego WÖHLER'a. Średnie wyniki pomiaru kąta pęknięcia wraz z liczbą próbek, na podstawie której ta średnia została obliczona oraz odchylenie standardowe uzyskanego wyniku zestawiono w tabelicy 4.4.

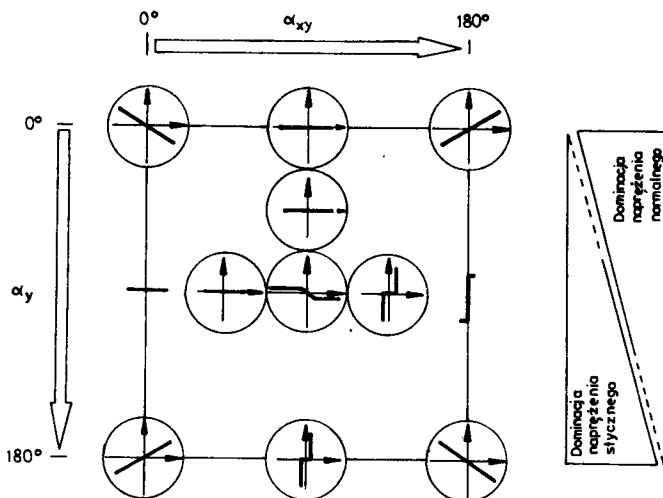
Tablica 4.4

Wyniki pomiaru kąta pęknięcia

Oznaczenie serii badań	Przesunięcia fazowe		Liczba próbek n	Średnia wartość $\bar{\delta}$	Odchylenie standardowe S_f
	α_y	α_{xy}			
2	0	0	3	-56,21	3,59
2a	0	90	5	90,00	0,00
2b	0	180	6	55,61	3,76
2c	60	90	6	90,00	0,00
2d	90	45	5	90,00	0,00
2e	90	90	6	90,00	0,00
2f	90	135	5	-61,89	7,76
			3	00,00	0,00
2g	180	0	7	60,75	8,08
2h	180	90	4	00,00	0,00
2i	180	180	4	90,00	0,00
			3	-51,78	4,80

Uzyskane wartości odchylenia standardowego wskazują na bardzo dobrą powtarzalność położenia płaszczyzny pęknięcia.

Na rys.4.6 zestawiono schematycznie położenie płaszczyzny pęknięcia dla wszystkich uwzględnionych w badaniach kombinacji α_y i α_{xy} .



Rys.4.6. Położenie makropłaszczyzny złomu zmęczeniowego w zależności od α_y i α_{xy}

Płaszczyzny złomu przedstawione w układzie α_y i α_{xy} wykazują daleko idącą regularność i częściową symetrię położenia. Dają się wyróżnić trzy podstawowe formy pęknięcia - tablica 4.5.

Tablica 4.5

Wyróżnione w trakcie obserwacji makrofraktograficznych formy pęknięcia zmęczeniowego

Oznaczenie formy pęknięcia	Schematyczne ujęcie płaszczyzny pęknięcia
Ia	
Ib	
IIa	
IIb	
IIIa	
IIIb	

4.4. Obserwacje mikrofraktograficzne pęknięć zmęczeniowych

Pod pojęciem obserwacji mikrofraktograficznych rozumie się w niniejszej pracy obserwacje przeprowadzone za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego.

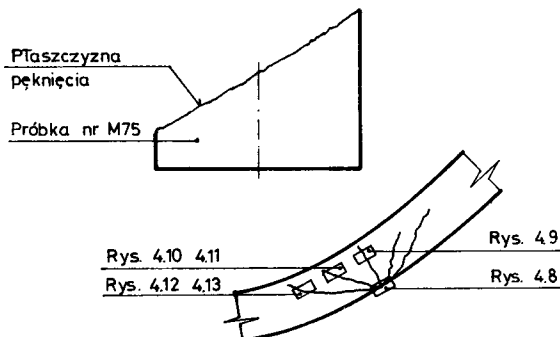
Obserwacjom elektronooptycznym poddano strefę bezpośrednio przylegającą do ogniska pęknięcia, strefę stabilnego rozwoju pęknięcia oraz strefę przejściową w zakres przełomu resztkowego. Dla próbek, dla których ognisko pęknięcia nie było identyfikowalne na powierzchni przełomu, obserwacjom poddano strefę przylegającą do ogniska zidentyfikowanego w trakcie obserwacji makrofraktograficznych.

W trakcie obserwacji szczególną uwagę zwrócono na identyfikację ogniska pęknięcia, poszukiwanie prążków zmęczeniowych, układów dołków i identyfikację ich kształtu, częstości występowania i położenia (ukierunkowanie) pęknięć odzłomowych, strukturę powierzchni przełomu.

Obserwacjom poddano wybrane próbki (minimum dwie) z każdej ze zrealizowanych serii badań. Uzyskano silnie zróżnicowane obrazy mikrofraktograficzne dla poszczególnych serii badań. Obrazy te dają się zaszerzować do jednej z niżej omówionych trzech grup.

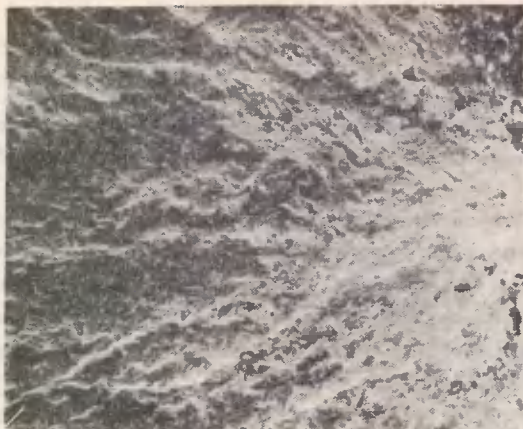
Grupa 1

Do grupy tej należą próbki z serii badań z przesunięciami fazowymi $\alpha_y = \alpha_{xy} = 0$; $\alpha_y = 0$ oraz $\alpha_{xy} = 180$. Próbki z tych serii badań, pomimo innej formy makropęknięcia (odpowiednio Ia i Ib) wykazują identyczny obraz mikrofraktograficzny przełomu zmęczeniowego. Poniżej przedstawione i omówione zostaną zdjęcia dla próbki M75 badanej w warunkach $\alpha_y = 0$, $\alpha_{xy} = 180$. Miejsca, w których wykonano zdjęcia pokazane na rys.4.8 - 4.13, oznaczono na rys.4.7.

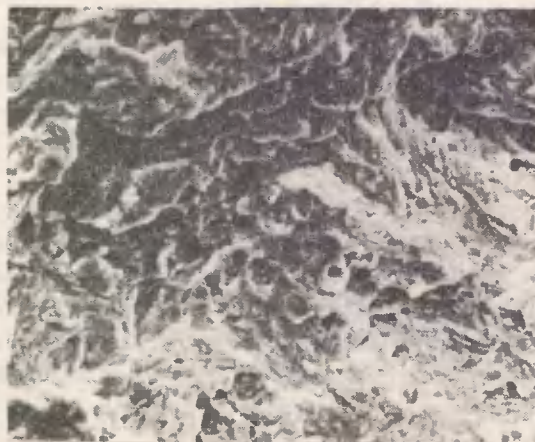


Rys.4.7. Miejsca obserwacji mikrofraktograficznych próbki M75 - grupa 1

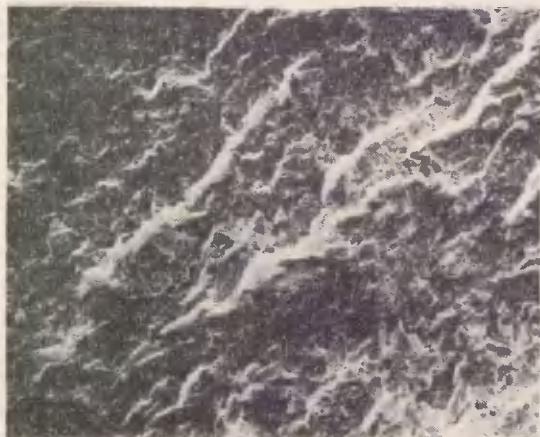
Na rys.4.8 pokazano wyraźnie widoczne ognisko pęknięcia położone na powierzchni zewnętrznej próbki oraz strefę przyogniskową. Strefa stabilnego pęknięcia - rysunki 4.9, 4.10 i 4.12 - wykazuje obraz podobny w porównaniu z rys.4.8. Na rys.4.8 - 4.11 widoczne są promieniście rozchodzące się od ogniska linie uskoków. W pewnej odległości od ogniska pęknięcia zauwa-



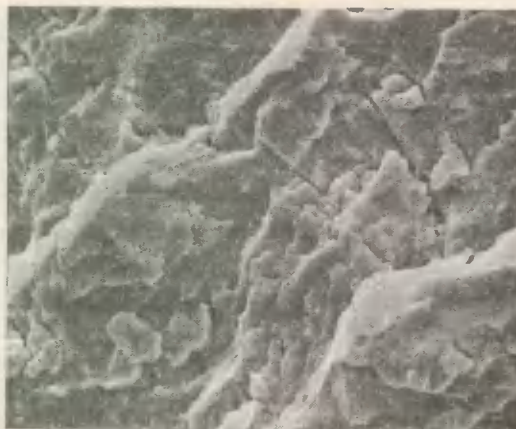
Rys.4.8. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 1, próbka M75, $\alpha_y = 0$
i $\alpha_{xy} = 180$, powiększenie 150x, ognisko pęknięcia



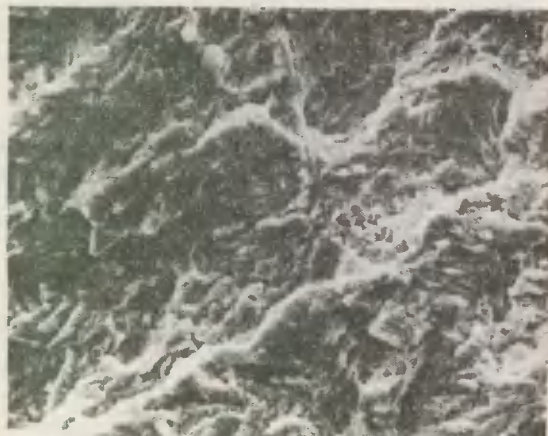
Rys.4.9. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 1, próbka M75, $\alpha_y = 0$
i $\alpha_{xy} = 180$, powiększenie 1000x, strefa przyogniskowa



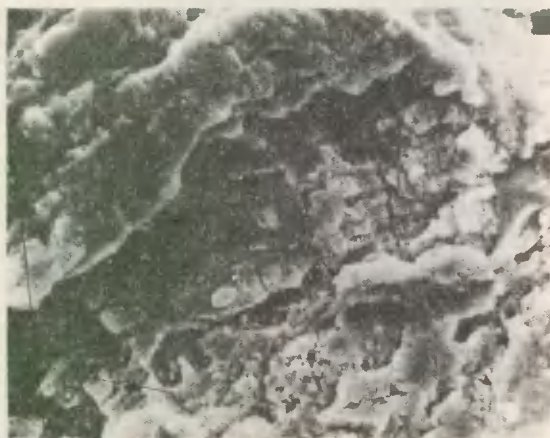
Rys.4.10. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 1, próbka M75, $\alpha_y = 0$
i $\alpha_{xy} = 180$, powiększenie 300x, strefa przyogniskowa



Rys.4.11. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 1, próbka M75, $\alpha_y = 0$ i $\alpha_{xy} = 180$, powiększenie 1000x (fragment z rys.4.10)



Rys.4.12. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 1, próbka M75, $\alpha_y = 0$ i $\alpha_{xy} = 180$, powiększenie 1000x

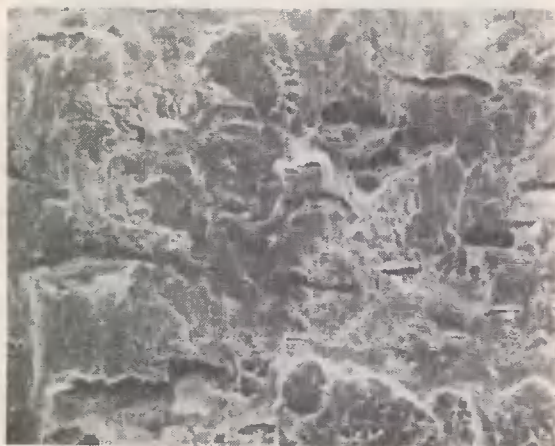


Rys.4.13. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 1, próbka M75, $\alpha_y = 0$ i $\alpha_{xy} = 180$, powiększenie 3000x

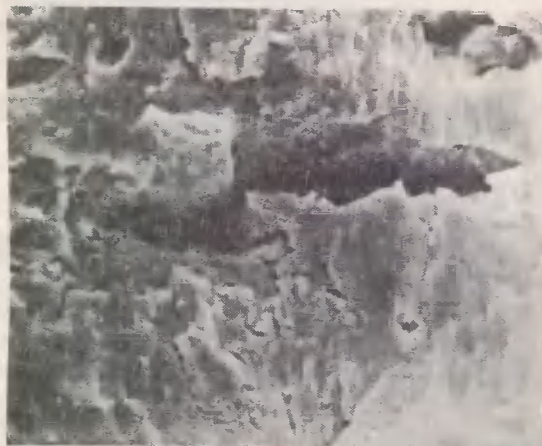
żalne są pierwsze, rzadko rozsiiane pęknięcia odłamowe - rysunki 4.10 i 4.11 oraz 4.12 i 4.13, o kierunku prostopadłym do linii uskoków (kierunku rozwoju pęknięcia). Na próbce tej, jak i na innych próbkach tej grupy, nie stwierdzono powierzchni wytartych i miejsc występowania dołków.

Grupa 2

Do tej grupy należą próbki z serii badań z przesunięciami fazowymi $\alpha_y = 180$; $\alpha_{xy} = 0$ i $\alpha_y = \alpha_{xy} = 180$. Także w tym przypadku obie serie badań wykazywały zróżnicowaną formę makropęknięcia (odpowiednio Ib i Ia), jednak ich obraz mikrofraktograficzny był identyczny. Przedstawione poniżej zdjęcia dotyczą próbki K108 badanej w warunkach $\alpha_y = \alpha_{xy} = 180$.



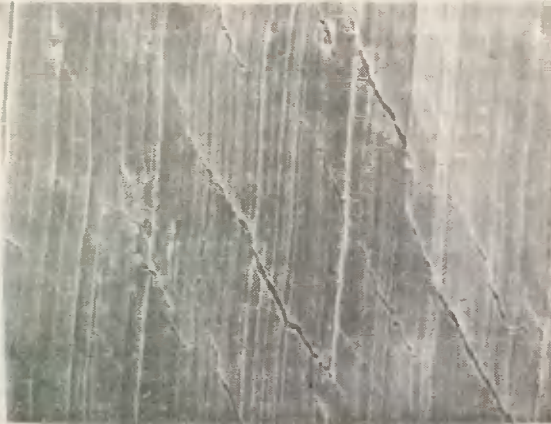
Rys.4.14. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 2, próbka K108, $\alpha_y = \alpha_{xy} = 180$, powiększenie 600x



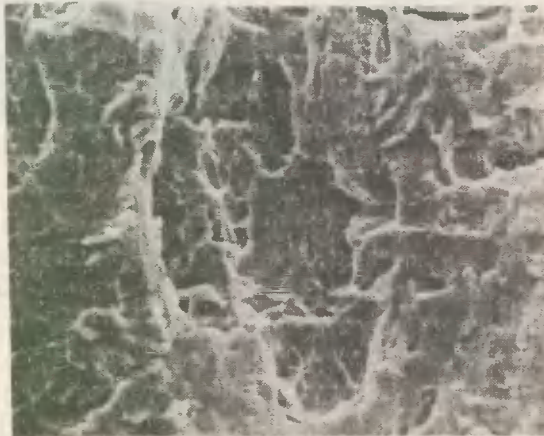
Rys.4.15. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 2, próbka K108, $\alpha_y = \alpha_{xy} = 180$, powiększenie 1500x (fragment z rys.4.14)



Rys.4.16. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 2, próbka K108, $\alpha_y = \alpha_{xy} = 180$, powiększenie 480x, powierzchnia zewnętrzna próbki



Rys.4.17. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 2, próbka K108, $\alpha_y = \alpha_{xy} = 180$, powiększenie 480x, powierzchnia wewnętrzna próbki



Rys.4.18. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 2, próbka K108, $\alpha_y = \alpha_{xy} = 180$, powiększenie 1000x, środkowy fragment próbki

Powierzchnia pęknięcia dla próbek grupy 2 wykazuje całkowicie różny obraz mikrofraktograficzny w porównaniu z grupą 1. Charakterystycznym przy tym jest:

- ognisko pęknięcia nie daje się zidentyfikować,
- na całej powierzchni pęknięcia występują gęsto rozsiane (rys.4.14), szeroko rozwarte (rys.4.15) pęknięcia odłamowe; ich kierunek jest prostopadły do powierzchni zewnętrznej próbki,
- na powierzchni zewnętrznej, jak i wewnętrznej próbki widoczna jest siatka wzajemnie prostopadłych pęknięć (rys.4.16) o kierunku równoległym i prostopadłym do pęknięcia głównego,
- w środkowej części pęknięcia (obszar ogniska pęknięcia zidentyfikowany w obserwacjach makroskopowych) występują rozległe układy eliptycznie ukształtowanych dołków plastycznych (rys.4.18).

Grupa 3

Do tej grupy należą próbki wykazujące formę makropęknięcia II i III. Powierzchnia pęknięcia wykazuje rozległe obszary wytarcia spowodowanego tarciami dwóch przeciwpowierzchni pęknięcia. Ognisko pęknięcia jest nieidentyfikowalne. Dla pęknięć formy II, pęknięcia wykazują kierunek idealnie zgodny z kierunkiem śladów poobróbkowych - rys.4.19.



Rys.4.19. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 3, próbka K86, $\alpha_y = \alpha_{xy} = 90$, powiększenie 600x, środkowa część pęknięcia

Strefom przejściowym (forma pęknięcia IIa i IIIa) towarzyszy bardzo silne odkształcenie plastyczne spowodowane przez przemieszczenie się przeciwpowierzchni pęknięcia - rys.4.20.



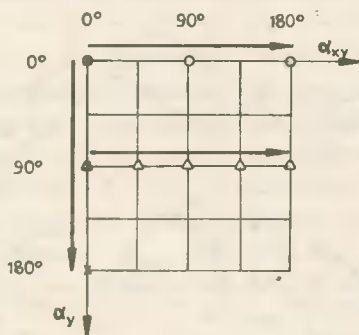
Rys.4.20. Obraz mikrofraktograficzny, grupa 3, próbka K86, $\alpha_y = \alpha_{xy} = 90$, powiększenie 1000x, uskok charakterystyczny dla formy pęknięcia IIa i IIIa

4.5. Analiza zmienności wartości maksymalnych naprężeń i kierunków głównych dla stosowanych obciążeń

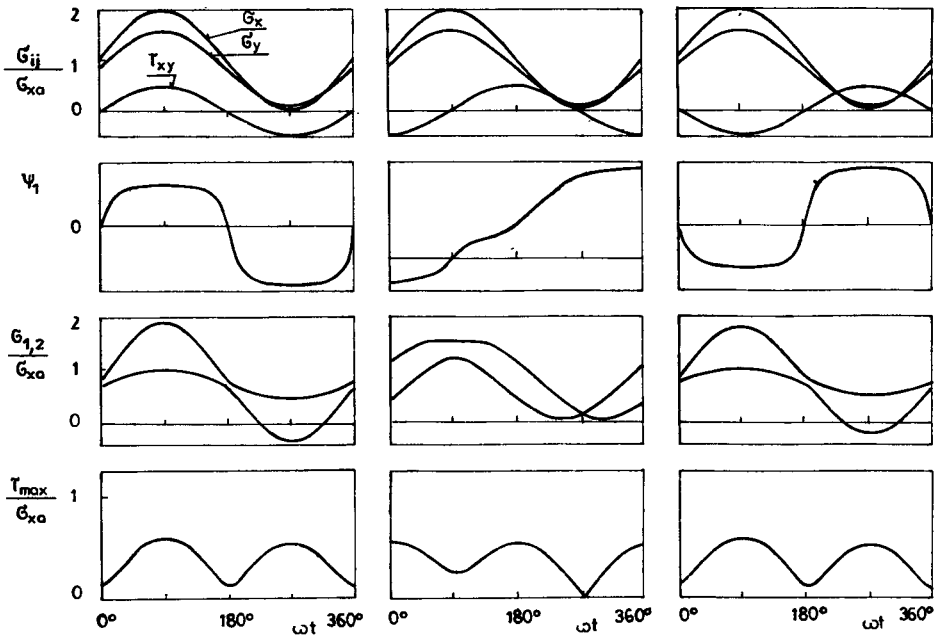
Dla wszystkich, wynikających z rys.4.4, możliwych kombinacji przesunięć fazowych α_y i α_{xy} , składowych stanu naprężenia danych równaniami (1.2a) - (1.2c) oraz tablicą 4.3 przeanalizowano przebiegi zmienności czasowej:

- kierunków głównych tensora naprężenia,
- wartości naprężeń głównych,
- wartości maksymalnego naprężenia stycznego.

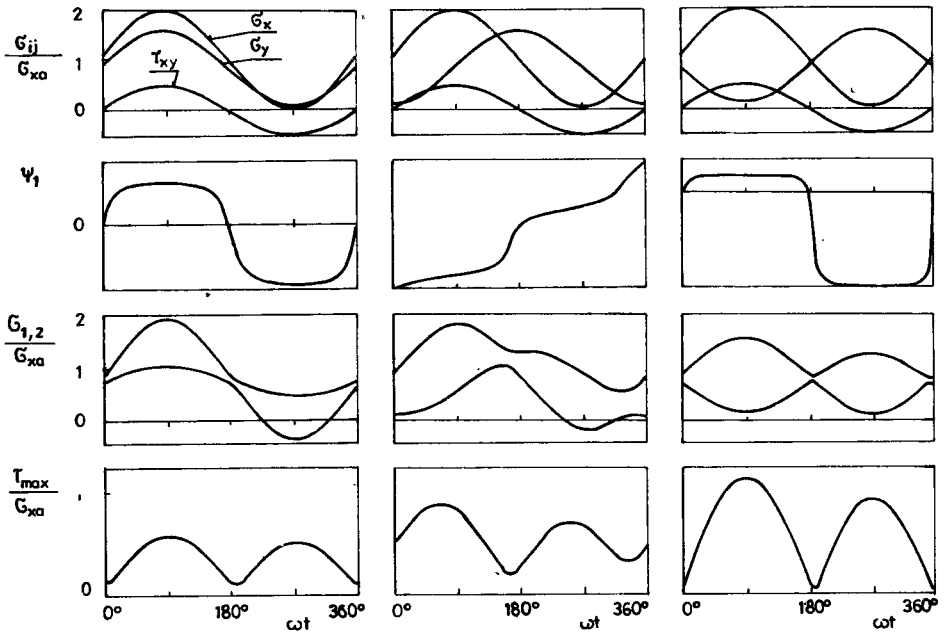
Analizę prowadzono dla pojedynczych przypadków, jak i dla zestawów wykresów, zachowując stałość jednej wybranej wartości α_{1j} . Przykładowe zestawy wykresów dla warunków oznaczonych na rys.4.21 pokazano kolejno na rysunkach 4.22 - 4.24.



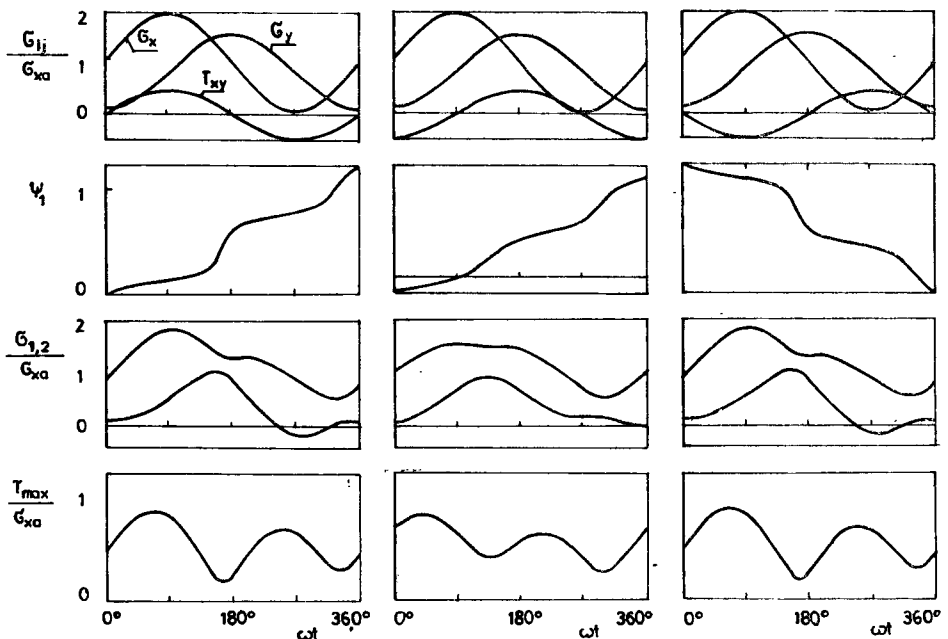
Rys.4.21. Przykładowe warunki obciążeń przyjęte w badaniach teoretycznych



Rys.4.22. Zmiana kierunków głównych oraz wartości naprężenia głównego i maksymalnego naprężenia stycznego dla $\alpha_y = 0$ i zmiennych wartości α_{xy}



Rys.4.23. Zmiana kierunków głównych oraz wartości naprężenia głównego i maksymalnego naprężenia stycznego dla $\alpha_{xy} = 0$ i zmiennych wartości α_y



Rys. 4.24. Zmiana kierunków głównych oraz wartości naprężenia głównego i maksymalnego naprężenia stycznego dla $\alpha_y = 90$ i zmiennych wartości α_{xy}

Analiza uzyskanych wykresów pozwala przede wszystkim wyróżnić dwa przypadki zmienności kątów głównych:

- przypadek „H” - kiedy wartości kątów głównych zmieniają się w sposób harmoniczny - rys. 4.25a i b, w szerokich zakresach cyklu zmęczenia zmieniają swą wartość jedynie nieznacznie; okresy ograniczonej zmienności kąta korelują z punktami występowania maksymalnych wartości głównego naprężenia normalnego - rys. 4.25a lub maksymalnego naprężenia stycznego - rys. 4.25b,
- przypadek „O” - kiedy wektory naprężeń głównych dokonują pełnego obrotu, a prędkość zmiany kierunku jest w przybliżeniu stała - rys. 4.25c i d.

Ponadto stwierdzić należy, że zmienność czasowa wartości naprężeń głównych i maksymalnego naprężenia stycznego nie odpowiada zmienności sinusoidalnej. Zmiana przesunięcia fazowego powoduje zmianę ich wartości maksymalnych, ich amplitudy i wartości średniej, także zmiany ich częstotliwości. Rozkład wartości maksymalnych G_1 i T_{max} dla współrzędnych α_y i α_{xy} przedstawiono na rys. 4.26. Szczególnie na rys. 4.26b widoczne jest bardzo silne oddziaływanie α_y na wartości T_{max} . Wartości T_{max} dla $\alpha_y = 0$ stanowią zaledwie 51,8 % wartości tego naprężenia uzyskanego dla $\alpha_y = 180$.

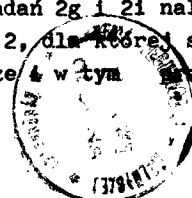
którym δ_1 osiąga wartość maksymalną. W kolumnie 9 podano wartości kąta określającego położenie płaszczyzny pęknięcia równoległej do kierunku, w którym naprężenie styczne wykazuje wartość maksymalną. W kolumnie 7 scharakteryzowano przypadek zmienności osi głównych.

Tablica 4.6

Zestawienie wyników pomiaru kąta pęknięcia z hipotetyczną płaszczyzną pęknięcia wyznaczoną przy założeniu istotności oddziaływania głównego naprężenia normalnego i maksymalnego naprężenia stycznego

Oznaczenie serii badań	Przesunięcia fazowe		Forma pęknięcia	Średnia wartość kąta pęknięcia		Osie główne	Hipotetyczne płaszczyzny pęknięcia	
	α_y	α_{xy}		δ_1	δ_2		wg δ_1	wg τ_{max}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0	0	Ia	<u>-56,21</u>	-	H	<u>-56,8</u>	78,2
2 a	0	90	IIa	90,00	-	0	79,7	-83,5
2 b	0	180	Ib	<u>55,61</u>	-	H	<u>57,4</u>	-77,6
2 c	60	90	IIb	90,00	-	0	90,0	-65,9
2 d	90	45	IIa	90,00	-	0	-68,4	50,8
2 e	90	90	IIa	90,00	-	0	90,0	-59,7
			IIb	90,00	-61,89	0	90,0	-59,7
2 f	90	135	III	0,00	-	0	74,3	-62,2
				0,00	90,00	0	74,3	-62,2
2 g	180	0	Ib	<u>60,75</u>	-	H	-76,6	<u>58,3</u>
2 h	180	90	III	0,00	-	0	90,0	-45,0
				0,00	90,00	0	90,0	-45,0
2 i	180	180	Ia	<u>-51,78</u>	-	H	68,5	<u>-50,7</u>

Dla wszystkich tych warunków badań określonych przesunięciami fazowymi, dla których wyróżniono przypadek H, uzyskano zadowalającą zgodność rzeczywistego kierunku pęknięcia z jedną z wartości wyszczególnionych w kolumnach 8 i 9 (odpowiednie wielkości podkreślono w tablicy 4.6). W ten sposób wyszczególnionym seriom badań odpowiada zawsze forma pęknięcia Ia lub Ib. Na podkreślenie zasługuje fakt, że wskazana zgodność położenia płaszczyzn rzeczywistych i hipotetycznych dotyczy kierunku (znak wielkości) jak i wartości bezwzględnej (maksymalny błąd wykazany w tablicy 4.6 wynosi 2,45 stopnia, co w odniesieniu do zagadnienia szacowania położenia płaszczyzny złomu uznać można za błąd bardzo mały). Serie badań 2 i 2b należą do wyróżnionej w trakcie badań mikrofraktograficznych grupy 1, dla której stwierdzono wzmożone oddziaływanie naprężeń normalnych. Wyniki zestawione w tablicy 4.6 fakt ten potwierdzają. Serie badań 2g i 2i należą do wyróżnionej w badaniach mikrofraktograficznych grupy 2, dla której stwierdzono wzmożone oddziaływanie naprężeń atycznych. Także w tym przypadku wyniki podane w tablicy 4.6 fakt ten potwierdzają.



Dla pozostałych serii badań (zawsze przypadek 0) zgodność występuje jedynie w sposób przypadkowy (serie badań 2c, 2e i 2h) i dotyczy tylko płaszczyzny 90 stopni, tzn. płaszczyzny pokrywającej się z kierunkiem śladów poobróbkowych szlifowania powierzchni zewnętrznej próbki (rys.4.19). W trakcie obserwacji mikrofraktograficznych próbki należące do tych serii badań zaliczono do grupy 3. Analiza zmienności kierunków głównych (rysunki 4.22 - 4.25) nie wykazała istnienia, dla przypadku 0, kierunków w których obserwowano wzmożone oddziaływanie naprężeń głównych lub maksymalnego naprężenia stycznego. Można przyjąć zatem twierdzenie, że wobec równoważności oddziaływań stanu naprężenia w każdym kierunku, o położeniu płaszczyzny pęknięcia zadecydowały właściwości próbki. Bardzo słabe oddziaływanie poobróbkowego karbu powierzchniowego, nie mające w przypadku serii badań 2, 2b, 2g i 2i istotniejszego wpływu na przebieg procesu zmęczenia, tutaj okazało się decydujące.

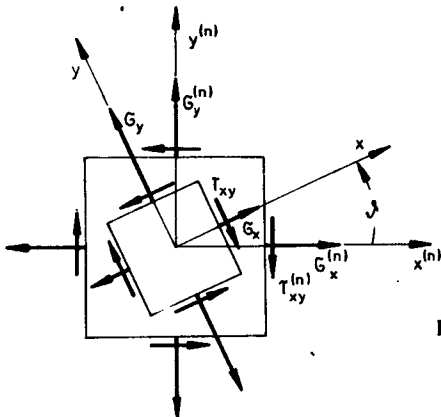
5. Kryterium uszkodzenia zmęczeniowego w warunkach złożonego stanu naprężeń - metoda płaszczyzny wyteżenia krytycznego

5.1. Sformułowanie kryterium

Na podstawie dokonanego w rozdziale 2 przeglądu znanych hipotez wyteżeniowych oraz innych prób sformułowania kryterium uszkodzenia zmęczeniowego w złożonym stanie naprężenia, wyróżniono koncepcję płaszczyzny krytycznej. Wykorzystując tę koncepcję, znajomość zależności dotyczących stanu jednoosiowego oraz wnioski wynikające z obserwacji fraktograficznych złomów zmęczeniowych zaproponowano opisany poniżej tok postępowania zmierzający do sformułowania kryterium uszkodzenia zmęczeniowego. Wyróżnione punkty A - C odzwierciedlają przyjęty tok myślenia i powinny uczynić przedstawiony opis bardziej przejrzystym.

A. Wspólnym dla większości znanych kryteriów uszkodzenia w warunkach złożonego stanu naprężenia jest założenie, że o złomie zmęczeniowym decydują jedynie te składowe stanu naprężenia, które działają w płaszczyźnie zaistniałego złomu zmęczeniowego. Z przeprowadzonych obserwacji fraktograficznych wynika, że położenie płaszczyzny złomu zmęczeniowego jest zmienne. Uzyskiwane położenia płaszczyzny złomu były zależne od wielkości charakteryzujących ogólnie rozumiany stan naprężenia. Przyjęto zatem, że skoro jest trudnym, a w większości przypadków niemożliwym określenie a priori położenia płaszczyzny pęknięcia, to konieczną jest identyfikacja stanu naprężenia we wszystkich potencjalnie możliwych jej położeniach.

Na rys.5.1 oznaczono $x^{(n)}$, $y^{(n)}$ układ współrzędnych związany z działającym obciążeniem, gdzie $G_{ij}^{(n)}$ - oznacza naprężenia nominalne wynikające z działającego obciążenia.



Rys.5.1. Powierzchnie elementarna poddana działaniu składowych obciążenia danych równaniami (1.2a) - (1.2c) przed $(x^{(n)}, y^{(n)})$ i po transformacji przez obrót (x, y)

Zgodnie z równaniami (1.2a) - (1.2c) naprężenia nominalne będą dane jako:

$$\sigma_x^{(n)}(t) = \sigma_{xm}^{(n)} + \sigma_{xa}^{(n)} \sin \omega t \quad (5.1a)$$

$$\sigma_y^{(n)}(t) = \sigma_{ym}^{(n)} + \sigma_{ya}^{(n)} \sin(\omega t + \alpha_y) \quad (5.1b)$$

$$\tau_{xy}^{(n)}(t) = \tau_{xym}^{(n)} + \tau_{xya}^{(n)} \sin(\omega t + \alpha_{xy}) \quad (5.1c)$$

Układ współrzędnych x, y i związane z nim naprężenia σ_x , σ_y i τ_{xy} odnoszą się do sytuacji po transformacji przez obrót o kąt ϑ i określają stan naprężenia w hipotetycznej płaszczyźnie pęknięcia. W nowym układzie x, y średnie naprężenia cykli dane są zależnościami:

$$\sigma_{xm}(\vartheta) = (1 + \cos 2\vartheta) \sigma_{xm}^{(n)} + (1 - \cos 2\vartheta) \sigma_{ym}^{(n)} + \sin 2\vartheta \tau_{xym}^{(n)} \quad (5.2a)$$

$$\sigma_{ym}(\vartheta) = (1 - \cos 2\vartheta) \sigma_{xm}^{(n)} + (1 + \cos 2\vartheta) \sigma_{ym}^{(n)} - \sin 2\vartheta \tau_{xym}^{(n)} \quad (5.2b)$$

$$\tau_{xym}(\vartheta) = \sin 2\vartheta (\sigma_{ym}^{(n)} - \sigma_{xm}^{(n)}) + \cos 2\vartheta \tau_{xym}^{(n)} \quad (5.2c)$$

natomiast składowe amplitudowe mogą być określone za pomocą następujących zależności:

$$a_x = \sin \alpha_y (1 - \cos 2\vartheta) \sigma_{ya}^{(n)} + \sin \alpha_{xy} \sin 2\vartheta \tau_{xya}^{(n)} \quad (5.3a)$$

$$b_x = (1 + \cos 2\vartheta) \sigma_{xa}^{(n)} + \cos \alpha_y (1 - \cos 2\vartheta) \sigma_{ya}^{(n)} + \cos \alpha_{xy} \sin 2\vartheta \tau_{xya}^{(n)} \quad (5.3b)$$

$$a_y = \sin \alpha_y (1 + \cos 2\vartheta) \sigma_{ya}^{(n)} - \sin \alpha_{xy} \sin 2\vartheta \tau_{xya}^{(n)} \quad (5.3c)$$

$$b_y = (1 - \cos 2\vartheta) \sigma_{xa}^{(n)} + \cos \alpha_y (1 + \cos 2\vartheta) \sigma_{ya}^{(n)} - \cos \alpha_{xy} \sin 2\vartheta \tau_{xya}^{(n)} \quad (5.3d)$$

$$a_{xy} = \sin \alpha_y \sin 2\vartheta \sigma_{ya}^{(n)} + \sin \alpha_{xy} \cos 2\vartheta \tau_{xya}^{(n)} \quad (5.3e)$$

$$b_{xy} = -\sin 2\vartheta \sigma_{xa}^{(n)} + \cos \alpha_y \sin 2\vartheta \sigma_{ya}^{(n)} + \cos \alpha_{xy} \cos 2\vartheta \tau_{xya}^{(n)} \quad (5.3f)$$

$$\sigma_{xa}(\vartheta) = a_x \cos \omega t + b_x \sin \omega t \quad (5.4a)$$

$$\sigma_{ya}(\vartheta) = a_y \cos \omega t + b_y \sin \omega t \quad (5.4b)$$

$$\tau_{xya}(\vartheta) = a_{xy} \cos \omega t + b_{xy} \sin \omega t \quad (5.4c)$$

B. Średnie naprężenie cyklu wywiera istotny wpływ na wartość granicy zmęczenia. Ze stanu jednoosiowego znanych jest szereg wykresów zmęczenio-

wych 1 z nich wynikających równań opisujących zależność pomiędzy wartością średnia cyklu zmęczeniowego a graniczną amplitudą cyklu σ_A (omówieniu tego zagadnienia został poświęcony podrozdział 3.3).

Wykorzystując liniową zależność na wykresie HAIGH'a, można (dla zakresu $-1 < R < 0$) zapisać równanie linii granicznych amplitud naprężenia jako:

$$\sigma_A(\vartheta) = Z_{rc} - p_{2\sigma} \sigma_m(\vartheta) \quad (5.5a)$$

$$\tau_A(\vartheta) = Z_{so} - p_{2\tau} \tau_{xym}(\vartheta) \quad (5.5b)$$

gdzie p_2 (zgodnie z równaniem (3.5)) jest współczynnikiem wrażliwości materiału na asymetrię cyklu, a współczynnik $p_{2\tau}$ dla naprężeń stycznych jest istotnie mniejszy od współczynnika $p_{2\sigma}$ dla naprężeń normalnych.

Przedstawione rozważania dotyczą ośrodka izotropowego. Średnie naprężenia cykli zmęczeniowych nie powodują uszkodzenia analizowanego elementu (ich wartości są mniejsze od wartości granicy plastyczności). Powodują jednak, że związane z nimi, stałe w czasie kierunki działania stanowią kierunki charakterystyczne, w tych bowiem kierunkach materiał ulega silniejszemu statycznemu obciążeniu niż w kierunkach pozostałych. Efekt ten określony został w [87,88] mianem „Spannungsanisotropie” (anizotropii naprężeniowej).

Rozwijając zależność (5.5) na składowe $\sigma_{ijm}(\vartheta)$ uzyskamy:

$$\sigma_{xA}(\vartheta) = Z_{rc} - p_{2x} \sigma_{xm}(\vartheta) \quad (5.6a)$$

$$\sigma_{yA}(\vartheta) = Z_{rc} - p_{2y} \tau_{xym}(\vartheta) \quad (5.6b)$$

$$\tau_{xyA}(\vartheta) = Z_{so} - p_{2xy} \tau_{xym}(\vartheta) \quad (5.6c)$$

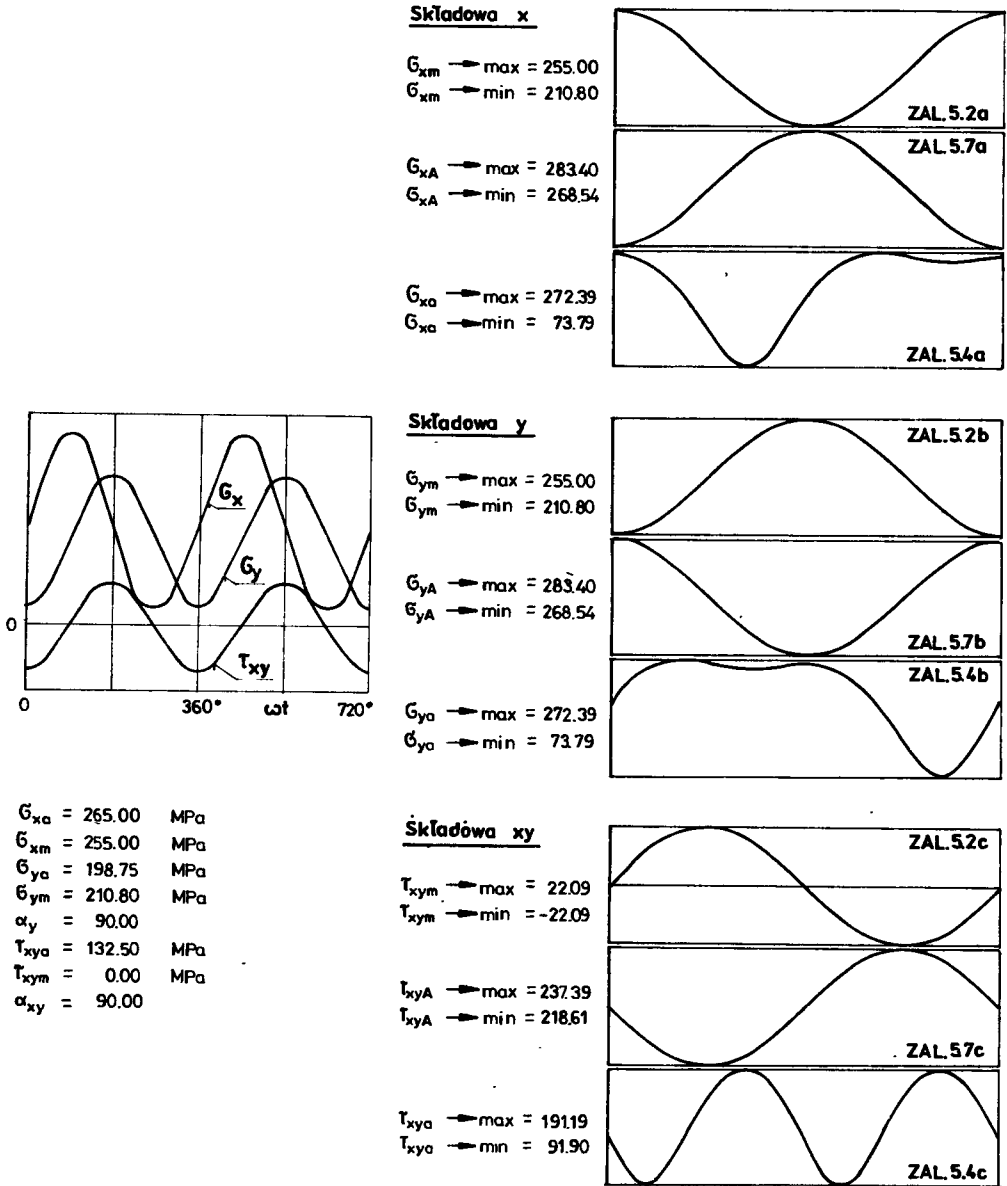
oraz wprowadzając równanie (5.2) do powyższego zapisu uzyskamy:

$$\sigma_{xA}(\vartheta) = Z_{rc} - p_{2x} \left[0,5(1 + \cos 2\vartheta) \sigma_x^{(n)} + 0,5(1 - \cos 2\vartheta) \sigma_{ym}^{(n)} + \sin 2\vartheta \tau_{xym}^{(n)} \right] \quad (5.7a)$$

$$\sigma_{yA}(\vartheta) = Z_{rc} - p_{2y} \left[0,5(1 - \cos 2\vartheta) \sigma_{xm}^{(n)} + 0,5(1 + \cos 2\vartheta) \sigma_{ym}^{(n)} - \sin 2\vartheta \tau_{xym}^{(n)} \right] \quad (5.7b)$$

$$\tau_{xyA}(\vartheta) = Z_{so} - p_{2xy} \left[0,5 \sin 2\vartheta (\sigma_{ym}^{(n)} - \sigma_{xm}^{(n)}) + \cos 2\vartheta \tau_{xym}^{(n)} \right] \quad (5.7c)$$

Przykładowe przebiegi funkcji opisanych równaniami (5.1) - (5.7) przedstawiono na rys.5.2.



Rys.5.2. Przykładowe przebiegi funkcji danych równaniami (5.1), (5.2), (5.4) i (5.7)

C. Zakłada się, że uszkodzenie nastąpi wówczas, gdy różnica pomiędzy wartością graniczną wynikającą z równania (5.7) a wartością amplitudy naprężenia określoną równaniem (5.4) będzie równa zero. W zapisie ogólnym kryterium uszkodzenia przyjmie (zgodnie z (2.10)) postać:

$$\sigma_{1jA}(\vartheta) - \sigma_{1ja}(\vartheta) = 0 \quad (5.8a)$$

lub stosując zapis o charakterze współczynnika bezpieczeństwa:

$$1 - \frac{\sigma_{1ja}(\vartheta)}{\sigma_{1jA}(\vartheta)} = 0 \quad (5.8b)$$

Wyniki badań przedstawione w rozdziale 4 pozwalają przypuszczać, że zmienna wartość przesunięć fazowych powodować może zmianę mechanizmu zmęczeniowego niszczenia. Wskazano przypadki, kiedy dominującą rolę przypisać można naprężeniom normalnym oraz takie, kiedy rolę taką przypisuje się naprężeniom stycznym. Zakłada się zatem dalej, że kryterium zmęczeniowego niszczenia w warunkach złożonego stanu naprężeń powinno uwzględniać możliwość takiej zmiany. Jak wskazano w rozdziale 2, sugestie takie spotkać można także w literaturze [14]. Dokonano zatem następującego rozwinięcia zależności (5.8a) i (5.8b):

$$\sqrt{(\sigma_{xA}(\vartheta) - \sigma_{xa}(\vartheta)) (\sigma_{yA}(\vartheta) - \sigma_{ya}(\vartheta)) (\tau_{xyA}(\vartheta) - \tau_{xya}(\vartheta))} = 0 \quad (5.9a)$$

$$\sqrt{\left(1 - \frac{\sigma_{xa}(\vartheta)}{\sigma_{xA}(\vartheta)}\right) \left(1 - \frac{\sigma_{ya}(\vartheta)}{\sigma_{yA}(\vartheta)}\right) \left(1 - \frac{\tau_{xya}(\vartheta)}{\tau_{xyA}(\vartheta)}\right)} = 0 \quad (5.9b)$$

Rozwiązanie zależności (5.9) następuje sposobem iteracyjnym względem wielkości ωt i ϑ . Ze względu na ten sposób rozwiązania w zależnościach (5.9a) i (5.9b) wprowadzono pierwiastek drugiego stopnia formalnie ograniczający obszar możliwej analizy na przypadek, kiedy $\sigma_{1ja} \leq \sigma_{1jA}$. Warunkiem wystarczającym aby lewa strona kryterium była równa zero, jest równość zera jednego (dowolnego) z członów równania (5.9). Który z członów równania (5.9) osiągnie jako pierwszy wartość równą zero, zależy to od własności mechanicznych materiału (Z_{rc} , Z_{go} - równanie (5.7)) oraz zdefiniowanego stanu naprężenia (równania (5.2) i (5.4)).

Strukturę programu realizującego obliczenia celem znalezienia wartości spełniających równanie (5.9) przedstawiono na rys.5.3.

METODA PŁASZCZYZNY KRYTYCZNEJ	
PŁASKI STAN NAPRĘŻENIA (PRZEBIEGI SINUSOIDALNE, STAŁA CZĘSTOTLIWOŚĆ)	
DANE	
1. DANE MATERIAKOWE . Z_{rc} , Z_{so} , Z_{rj} 2. DANE O OBCIĄŻENIU : $\frac{G_{ija}}{G_{xa}} , \frac{G_{ijm}}{Z_{rc}} \text{ lub } \frac{G_{ijm}}{G_{xa}} , \alpha_x , \alpha_{xy}$ 3. DANE FUNKCJONALNOŚCI : DOKŁADNOŚĆ POCZĄTKOWA DP DOKŁADNOŚĆ KOŃCOWA DK	
PĘTLA : DOKŁADNOŚĆ OBLICZEŃ	
PĘTLA : G_{xa}	
PĘTLA : $\mathcal{J} / [0,360^\circ]$	
G_{ijm}	< ZALEŻNOŚĆ (5.2) >
G_{ija}	< ZALEŻNOŚĆ (5.7) >
PĘTLA : $\omega t / [0,360^\circ]$	
G_{ija}	< ZALEŻNOŚĆ (5.4) >
KRYTERIUM USZKODZENIA < ZALEŻNOŚĆ (5.9) >	
WYNIK NEGATYWNY	WYNIK POZYTYWNY
$G_{xa} := G_{xa} + \text{DOKŁADNOŚĆ OBLICZEŃ}$	↓
DOKŁADNOŚĆ OBLICZEŃ = DK	
WYNIK NEGATYWNY	WYNIK POZYTYWNY
DOKŁADNOŚĆ OBLICZEŃ := DOKŁADNOŚĆ OBLICZEŃ / 10	↓
WYNIKI	
1. G_{xA} 2. \mathcal{J}_{kryt} , ωt_{kryt}	

Rys.5.3. Schemat blokowy programu obliczeniowego według proponowanej metody

5.2. Zakres weryfikacji eksperymentalnej

Weryfikację wyników obliczeń według proponowanego kryterium przeprowadzono przede wszystkim w oparciu o wyniki badań próbek wykonanych z dwóch gatunków stali do ulepszenia cieplnego 25CrMo4 i 34Cr4. Przy wyborze tych danych eksperymentalnych kierowano się następującymi względami: dobrą dokumentacją w dostępnej literaturze odnośnie badań na próbkach ze stali 34Cr4 [24,102,105] oraz udziałem autora niniejszej pracy w realizacji badań na próbkach wykonanych ze stali 25CrMo4. Poza wymienionymi względami, badania te były prowadzone w zadowalająco zróżnicowanych warunkach odnośnie stosowanych obciążeń (dwie i trzy składowe stanu obciążenia) jak i postaci badanych próbek (próbki walcowe pełne i cylindryczne). Odnośnie tych badań istnieją wyniki porównawcze obliczeń zrealizowanych według metod QVH i SIH (metody te przedstawiono w podrozdziale 2.5) [95,105].

Celem szerszej weryfikacji zgromadzono możliwie pełne dane literaturowe dotyczące badań zmęczeniowych w warunkach złożonego stanu obciążenia. W sumie udało się zgromadzić dane dotyczące dokładnie 529 zróżnicowanych serii badań. Zróżnicowania te dotyczą stosowanych obciążeń (od jednej do trzech składowych zmęczeniowych z jedną do trzech składowymi statycznymi) i relacji między obciążeniami, materiałów konstrukcyjnych i postaci próbek. Wyniki weryfikacji w oparciu o większą część danych tej populacji będą przedmiotem odrębnej pracy.

5.3. Wyniki weryfikacji

Wyniki obliczeń zestawiono z wynikami eksperymentalnymi dotyczącymi próbek wykonanych ze stali 25CrMo4 i 34Cr4 w tablicach 5.1 - 5.3. Podane w tych tablicach oznaczenie serii badań są oryginalne w stosunku do cytowanych prac źródłowych. W tablicach tych podano poza wielkościami bezwzględny, wartość wielkości X będącej stosunkiem wartości eksperymentalnej do wartości uzyskanej z obliczeń:

$$X = \frac{\sigma_{xA \text{ eks}}}{\sigma_{xA \text{ obl}}} \quad (5.10)$$

Wielkość X jest zatem przyjętą miarą dokładności obliczeń. W tablicach 5.1 - 5.3 podano także wartości średnie i odchylenie standardowe wielkości X dla wyróżnionych poszczególnymi tablicami grup wyników. Każdorazowo w ostatniej kolumnie tablicy podano informacje o tym, który człon równania (5.9) spowodował przerwanie pętli iteracyjnych i zakończenie obliczeń. Taki człon równania (5.9) nazwano wyrzutnikiem obliczeń i tego określenia użyto w tablicach 5.1 - 5.3.

W tablicy 5.4 zestawiono wartości parametrów statystycznych dotyczące siedemnastu serii badań spośród przedstawionych (wyniki dotyczące badań z trzema składowymi obciążeniami - wyniki podano w tablicach 5.1 i 5.3).

Tablica 5.1

Zestawienie wyników obliczeń według proponowanego kryterium z wynikami eksperymentalnymi dla danych podanych w pracy [86]

Źródło wyników eksperymentalnych: TROOST i współpracownicy [86]																																			
Materiał: 25CrMo4																																			
Próbka: cylindryczna																																			
Dane materiałowe:																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;"></td> <td style="width: 15%; text-align: center;">R_m</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">R_{e02}</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Z_{rc}</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Z_{rj}</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Z_{so}</td> <td colspan="6"></td> </tr> <tr> <td>(wartości średnie w MPa)</td> <td style="text-align: center;">801</td> <td style="text-align: center;">672</td> <td style="text-align: center;">340</td> <td style="text-align: center;">600</td> <td style="text-align: center;">228</td> <td colspan="6"></td> </tr> </table>													R_m	R_{e02}	Z_{rc}	Z_{rj}	Z_{so}							(wartości średnie w MPa)	801	672	340	600	228						
	R_m	R_{e02}	Z_{rc}	Z_{rj}	Z_{so}																														
(wartości średnie w MPa)	801	672	340	600	228																														
Seria badań	Stosowane obciążenia					Przesunięcie fazowe		$\sigma_{xA}^{(n)exp}$ [MPa]	$\sigma_{xA}^{(n)obl}$ [MPa]	X	Wyrzutnik																								
	$\sigma_{ya}^{(n)}$	$\tau_{xya}^{(n)}$	$\sigma_{xm}^{(n)}$	$\sigma_{ym}^{(n)}$	$\tau_{xym}^{(n)}$	α_y	α_{xy}																												
	$\sigma_{xa}^{(n)}$	$\sigma_{xa}^{(n)}$	Z_{rc}	Z_{rc}	Z_{rc}	[stopnie]																													
1/1	1,00	0,50	1,00	0,65	0,00	60	90	205,0	202,0	1,015	x																								
1/2						180	90	185,0	219,0	0,845	xy																								
2/3	0,75	0,50	0,75	0,62	0,00	0	90	207,5	248,0	0,837	y																								
2/4						0	180	212,1	222,0	0,955	y																								
2/5						60	90	225,0	233,0	0,966	x																								
2/6						90	45	222,1	229,0	0,966	x																								
2/7						90	90	205,0	246,0	0,833	xy																								
2/8						90	135	215,0	226,0	0,951	xy																								
2/9						180	0	187,9	225,0	0,835	xy																								
2/10						180	90	223,6	252,0	0,887	xy																								
3/11	0,75	0,50	0,75	0,62	0,26	90	135	215,0	229,0	0,939	xy																								
$\bar{X} = 0,912$; $s_x = 0,063$																																			

Tablica 5.2

Zestawienie wyników obliczeń według proponowanego kryterium z wynikami eksperymentalnymi dla danych podanych w pracy [103]

Źródło wyników eksperymentalnych: ZENNER i współpracownicy [103]																																			
Materiał: 34Cr4																																			
Próbka: walcowa pełna																																			
Dane materiałowe:																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;"></td> <td style="width: 15%; text-align: center;">R_m</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">R_{e02}</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Z_{rc}</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Z_{rj}</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Z_{so}</td> <td colspan="6"></td> </tr> <tr> <td>(wartości średnie w MPa)</td> <td style="text-align: center;">795</td> <td style="text-align: center;">657</td> <td style="text-align: center;">410</td> <td style="text-align: center;">640</td> <td style="text-align: center;">256</td> <td colspan="6"></td> </tr> </table>													R_m	R_{e02}	Z_{rc}	Z_{rj}	Z_{so}							(wartości średnie w MPa)	795	657	410	640	256						
	R_m	R_{e02}	Z_{rc}	Z_{rj}	Z_{so}																														
(wartości średnie w MPa)	795	657	410	640	256																														
Seria badań	Stosowane obciążenia					Przesunięcie fazowe		$\sigma_{xA}^{(n)exp}$ [MPa]	$\sigma_{xA}^{(n)obl}$ [MPa]	X	Wyrzutnik																								
	$\sigma_{ya}^{(n)}$	$\tau_{xya}^{(n)}$	$\sigma_{xm}^{(n)}$	$\sigma_{ym}^{(n)}$	$\tau_{xym}^{(n)}$	α_y	α_{xy}																												
	$\sigma_{xa}^{(n)}$	$\sigma_{xa}^{(n)}$	$\sigma_{xa}^{(n)}$	$\sigma_{xa}^{(n)}$	$\sigma_{xa}^{(n)}$	[stopnie]																													
17	-	0,50	0,00	-	0,00	-	0	314,0	285,0	1,102	x																								
18	-	-	-	-	-	-	60	315,0	287,0	1,098	xy																								
19	-	-	-	-	-	-	90	316,0	318,0	0,994	xy																								
20	-	-	-	-	-	-	120	315,0	269,0	1,171	xy																								
21	-	1,00	0,00	-	0,00	-	90	224,0	196,0	1,143	xy																								
22	-	0,25	0,00	-	0,00	-	90	380,0	341,0	1,114	y																								
23	-	0,50	0,00	-	0,50	-	0	316,0	262,0	1,206	x																								
24	-	-	-	-	-	-	60	314,0	264,0	1,189	xy																								
25	-	-	-	-	-	-	90	315,0	304,0	1,036	xy																								
26	-	0,50	1,00	-	0,00	-	0	279,0	235,0	1,187	x																								
27	-	-	-	-	-	-	90	284,0	258,0	1,101	y																								
28	-	0,25	0,00	-	0,50	-	0	355,0	302,0	1,175	x																								
29	-	1,00	1,00	-	0,00	-	90	212,0	192,0	1,104	xy																								
$\bar{X} = 1,125$; $s_x = 0,060$																																			

Tablica 5.3

Zestawienie wyników obliczeń według proponowanego kryterium z wynikami eksperymentalnymi dla danych podanych w pracy [24]

Źródło wyników eksperymentalnych: ZENNER i współpracownicy [24]											
Materiał: 34Cr4											
Próbka: cylindryczna											
Dane materiałowe:											
R_m R_{e02} Z_{rc} Z_{rj} Z_{se}											
(wartości średnie w MPa) 710 550 343 530 204											
Seria badań	Stosowane obciążenia					Przesunięcie fazowe		$\sigma_{xA}^{(n) \text{ exp}}$ [MPa]	$\sigma_{xA}^{(n) \text{ obl}}$ [MPa]	X	Wy- rzu- t- nik
	$\sigma_{ya}^{(n)}$	$\tau_{xya}^{(n)}$	$\sigma_{xm}^{(n)}$	$\sigma_{ym}^{(n)}$	$\tau_{xym}^{(n)}$	α_y	α_{xy}				
	$\sigma_{xa}^{(n)}$	$\sigma_{xa}^{(n)}$	$\sigma_{xa}^{(n)}$	$\sigma_{xa}^{(n)}$	$\sigma_{xa}^{(n)}$	[stopnie]					
01	1,00	0,47	1,22	1,22	0,00	0	0	205,0	198,0	1,035	x
02						180	0	175,0	186,0	0,941	xy
03	1,00	0,47	1,22	1,22	0,47	0	0	181,0	176,0	1,028	x
04						0	90	195,0	199,0	0,980	x
05						60	90	192,0	174,0	1,103	x
06						180	90	180,0	203,0	0,887	xy
$\bar{X} = 0,996$; $s_x = 0,070$											

Tablica 5.4

Porównanie parametrów statystycznych wielkości X dla danych zawartych w tablicach 5.1-5.3 z danymi dotyczącymi obliczeń wg QVH i SIH

Podstawowe parametry statystyczne		Kryterium			
		QVH [94]	SIH [94]	płaszczyzny krytycznej	
Liczba serii badań		17	17	17	30
Wartość średnia	\bar{X}	1,010	1,063	0,941	1,021
Odchylenie standardowe	s_x	0,059	0,141	0,077	0,115
Rozrzut wyników	%	21,3	49,6	27,0	37,3
Największe odchylenie	%	13,6	29,0	16,7	20,6

Wartości zestawione w tablicy 5.4 dają możliwości porównania uzyskanej dokładności obliczeń z dokładnością uzyskaną w obliczeniach według innych znanych z literatury kryteriów uszkodzenia zmęczeniowego. Wartości zestawione w tablicy 5.4, a dotyczące QVH i SIH, zaczerpnięto z pracy [94]. W ostatniej kolumnie tablicy 5.4 podano dane dotyczące wszystkich prezentowanych w tablicach 5.1 - 5.3 wyników obliczeń.

5.4. Analiza uzyskanych wyników

Proponowana metoda obliczeń wykazała wrażliwość na zmianę mechanizmu zniszczenia w zależności od warunków obciążenia. Porównanie danych zestawionych na rys.4.6 z danymi zestawionymi w ostatniej kolumnie tablicy 5.1 pozwala stwierdzić zgodność wyniku obserwacji fraktograficznych i odpowiedzi programu obliczeniowego odnośnie dominacji naprężeń stycznych (np. $\alpha_y = \alpha_{xy} = 180$) lub normalnych (np. $\alpha_y = \alpha_{xy} = 0$).

Dane zestawione w tablicy 5.2 dotyczą badań, w których uzyskano duże różnice pomiędzy wynikami eksperymentalnymi; dla poszczególnych serii badań uzyskano wartości $\sigma_{xA}^{(n)exp}$ w zakresie od 212 MPa do 380 MPa. Wyniki obliczeń „nadążają” za tą zmiennością i uzyskana wartość odchylenia standardowego jest tu podobna jak dla pozostałych dwóch zestawów danych (tablice 5.1 i 5.3).

Uzyskane wartości średniego błędu obliczeń oraz jego odchylenia standardowego dla zróżnicowanych warunków badań można uznać za zadawalające. Dla wszystkich warunków badań uzyskano porównywalne wartości odchylenia standardowego s_x . Wartość średnia X wykazuje natomiast pewną zależność od warunków badań. Wartości parametrów statystycznych zestawionych w tablicy 5.4 są porównywalne z odpowiednimi wartościami uzyskanymi przez autorów QVH [94] i mogą być uznane za lepsze od wyników uzyskanych według SIH.

6. WNIOSKI KOŃCOWE Z PRACY

Wnioski o charakterze ogólnym

Jedną z podstawowych kwestii wynikających przy próbie oceny wytrzymałości zmęczeniowej w warunkach złożonego stanu naprężenia jest kwestia możliwości wykorzystania hipotez wytrzymałościowych znanych z zakresu obciążeń statycznych. Wskazano, że przenoszenie kryteriów uszkodzenia sformułowanych dla przypadku obciążeń statycznych na przypadek wieloosiowego obciążenia zmęczeniowego jest formalnie (konieczność uwzględnienia wszystkich wielkości charakteryzujących cykl zmęczeniowy) i praktycznie (zróżnicowanie cech przełomu statycznego i zmęczeniowego oraz wynikająca z tego trudność określenia zakresu zastosowań poszczególnych hipotez) związane z dużym przybliżeniem i w konsekwencji prowadzić może do znacznych błędów oceny wytrzymałości zmęczeniowej. Podstawowe zastrzeżenia sformułowane w pracy w stosunku do dotychczas stosowanych metod obliczeniowych dotyczą następujących zagadnień:

- nie zostaje uwzględniona związana ze zmiennością czasową składowych stanu naprężenia czasowa zależność wszystkich funkcji wynikających z analizy tensora naprężenia; ma to szczególnie wyraz przy wyznaczaniu niezmienników tensora naprężenia oraz przy definiowaniu osi głównych, które dla poszczególnych przypadków obciążeń zmęczeniowych zmieniają swoje położenie w sposób dalece zróżnicowany,
- wartości średnie asymetrycznych cykli zmęczeniowych składowych stanu naprężenia powodują, że izotropowy materiał konstrukcyjny poddany jest poza obciążeniem o charakterze zmęczeniowym (amplitudowe składowe stanu naprężenia) działaniu stałych (co do wartości i kierunku) składowych statycznych; pojmowanie średnich wartości cyklu jedynie jako obniżających wartość amplitudy granicznej uznano jako błędne, bardziej celowym jest potraktowanie ich jako zaburzające jednorodny rozkład własności wytrzymałościowych materiału konstrukcyjnego.

Nadmienić należy, że natrafiono na zasadniczy problem natury terminologicznej, dotyczący takich pojęć jak: naprężenie główne, maksymalne naprężenie styczne, niezmiennik tensora naprężenia. Ponieważ wielkości te są zmienne w ramach cyklu zmęczeniowego, ich definicje z zakresu obciążenia statycznego przestają być wystarczające. Problem ten nie rozwiązany w niniejszej pracy, wydaje się być zagadnieniem pierwszoplanowym do dalszych badań własnych.

Wnioski dotyczące wpływu przesunięć fazowych

Pewne zależności pomiędzy wielkościami opisującymi złożony stan naprężeń zmęczeniowych mogą być interpretowane na podstawie wiedzy o zmęczeniu w jednoosiowym stanie naprężenia. Zagadnienie przesunięć fazowych nie może znaleźć takiego odniesienia. Stwierdzono także brak w literaturze prób jakościowej oceny tego tematu. Zrealizowano zatem program badań celem oceny jakościowego wpływu przesunięć fazowych na proces zmęczeniowego niszczenia w warunkach złożonego stanu naprężenia. Badania zrealizowano na cylindrycznych próbkach wykonanych ze stali 25CrMo4 poddanych działaniu trzech składowych obciążenia: jednostronnemu rozciąganiu, ciśnieniu wewnętrznemu oraz wahadłowemu skręcaniu. Pomiedzy składowymi tymi występowały przesunięcia fazowe: α_y - pomiędzy składowymi normalnymi i α_{xy} - pomiędzy składową styczną i normalną.

Przeprowadzone obserwacje pęknięć zmęczeniowych powstałych w warunkach płaskiego stanu naprężenia wykazały silne oddziaływanie przesunięć fazowych występujących pomiędzy składowymi stanu obciążenia na obraz makrofraktograficzny pęknięcia. W oparciu o obserwacje elektrooptyczne oraz analizę teoretyczną przebiegów funkcji opisujących czasową zmienność kierunków głównych wskazano na zmianę mechanizmu zniszczenia zmęczeniowego w zależności od wartości przesunięć fazowych. Silniejsze oddziaływanie stwierdzono dla przesunięcia α_{xy} . Dla każdej kombinacji przesunięć fazowych α_y i α_{xy} zrealizowanej z wartości 0 i 180, uzyskano dużą zgodność położenia makropęknięcia w porównaniu z kierunkiem uzyskanym na podstawie analizy wartości naprężeń głównych i maksymalnego naprężenia stycznego. Dla $\alpha_y = 0$ lub 180 i $\alpha_{xy} = 0$ zgodność ta dotyczy płaszczyzny prostopadłej do kierunku, w którym σ_1 osiąga wartość maksymalną. Dla $\alpha_y = 180$ i $\alpha_{xy} = 0$ lub 180 zgodność ta dotyczy płaszczyzny, w której τ_{max} osiąga wartość maksymalną.

Wnioski dotyczące zmienności kierunków głównych

Przeprowadzona analiza potwierdziła fakt zmiany wartości i kierunku naprężeń głównych oraz maksymalnego naprężenia stycznego w trakcie trwania cyklu zmęczeniowego. Dla składowych stanu naprężenia zmiennych w sposób sinusoidalny, przebieg zmienności wartości naprężeń głównych w trakcie cyklu zmęczeniowego silnie odbiega od tej formy zmienności.

Dokonana analiza funkcji opisujących czasową zmienność kierunków głównych pozwoliła wyróżnić dwie charakterystyczne postacie tych funkcji (przypadki 0 i H opisane w p. 4.3). Na szczególne podkreślenie zasługuje przypadek H takiej zmienności czasowej, kiedy kierunki główne zmieniają się jedynie w określonym zakresie kąta i przez długie okresy cyklu zmęczeniowego pozostają quasistałe. W przypadkach tych stwierdzono silne oddziaływanie wartości maksymalnych naprężenia głównego i maksymalnego napręże-

nia stycznego na przebieg procesu zniszczenia. Stwierdzenie to przeczy spotykanym w literaturze twierdzeniom (np. [24]) o braku takiej możliwości.

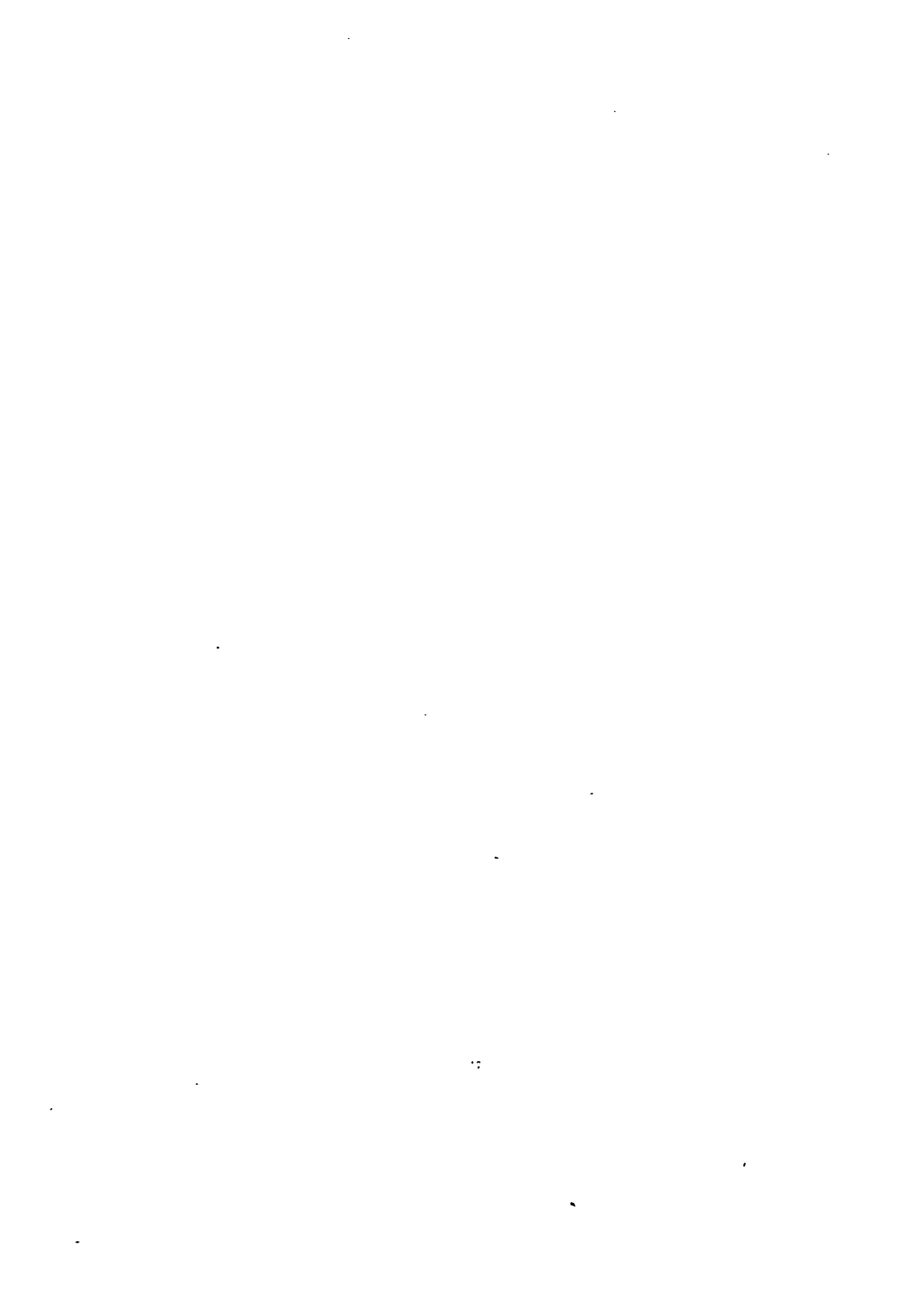
Stwierdzona zmiana wartości i kierunku naprężeń głównych i maksymalne naprężenia stycznego pozwala wnioskować, że niezmienniki stanu naprężenia zachowują swoje, znane nam z przypadku obciążeń statycznych, znaczenie jedynie w sensie dyskretnym - w odniesieniu do określonego punktu czasu. W stosunku do cyklu zmęczeniowego, którym operujemy w zakresie zagadnień związanych ze zmęczeniem materiałów i elementów konstrukcyjnych, stają się one funkcjami czasu.

Wnioski dotyczące proponowanego kryterium uszkodzenia

Przy formułowaniu kryterium uszkodzenia zmęczeniowego w warunkach złożonego stanu naprężenia wykorzystano wyniki badań literaturowych oraz wyniki własnych analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych. Za ważne w tej części pracy uznano: uwzględnienie koncepcji płaszczyzny krytycznej wskazanej na podstawie studiów literaturowych - jako najlepiej odzwierciedlającej przypadek złożonego naprężenia zmęczeniowego, wykorzystanie stanu wiedzy z zakresu zmęczenia w stanach jednoosiowych oraz uwzględnienie wskazanej w badaniach własnych możliwości zmiany mechanizmu zmęczeniowego pęknięcia w wyniku zmiany wartości przesunięć fazowych.

Przeprowadzona weryfikacja doświadczalna proponowanego kryterium uszkodzenia w warunkach złożonego stanu obciążeń zmęczeniowych wykazała jego wrażliwość na zmianę mechanizmu procesu zmęczeniowego niszczenia oraz poprawność działania w sensie uzyskiwanych wyników. Kryterium w stosunku do innych, znanych z literatury (np. QVH, SIH) kryteriów o podobnym zakresie zastosowania, posiada przejrzystą i funkcjonalną postać. Do jego rozwiązania koniecznym jest wykorzystanie komputera, jednak stopień złożoności programu obliczeniowego pozwala na realizację obliczeń za pomocą sprzętu osobistego przy niewielkim nakładzie czasu.





LITERATURA

- [1] BĘDKOWSKI W., MACHA E.: Maximum normal stress fatigue criterion applied to random triaxial stress state, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 7 (1987), pp. 89 - 107
- [2] BĘDKOWSKI W., MACHA E.: Fatigue criterion of the maximum strain in the direction perpendicular to a fracture plane, VDI Verlag, Reihe 5, Nr 97, 1985
- [3] BLASS J., FINDLEY W.N.: The influence of the intermediate principal stress on fatigue under triaxial stresses, Materials Research and Standards, June (1967), pp. 254 - 261
- [4] BLATHERWICK A.A., VISTE N.D.: Cumulative damage under biaxial fatigue stress, Materials Research and Standards, Vol.7, August (1967), pp. 331 - 336
- [5] BROWN M.W., MILLER J.: A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain conditions, Proc. Inst. Mech. Eng. 65, Vol.187 (1973), pp. 745 - 755 and D 229 - D 244
- [6] BUXBAUM O.: Betriebsfestigkeit, sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf 1986
- [7] DIETMANN H.: Werkstoffverhalten unter mehrachsiger schwingender Beanspruchung, Teil 1: Berechnungsmöglichkeiten, Teil 2: Experimentelle Untersuchungen, Z. f. Werkstofftech. H.4 (1973), H.5, ss. 255 - 263 und H.6, ss. 322 - 333
- [8] DIETMANN H.: Festigkeitsberechnung bei mehrachsiger Schwingbeanspruchung, Konstruktion 25 (1973), H.5, ss. 181 - 189
- [9] DIETMANN H., ISSLER L.: Festigkeitsberechnung bei mehrachsiger phasenverschobener Schwingbeanspruchung mit körperfesten Hauptspannungsrichtungen, Konstruktion 28 (1976), H.1, ss. 23 - 30
- [10] DIETMANN H., LEMPP W.: Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten von Stählen bei mehrachsiger phasenverschobener Dauerschwingbeanspruchung, Konstruktion 31 (1979), H.5, ss. 191 - 200
- [11] DIETRICH L., TURSKI K.: Badania zmęczeniowe w złożonym stanie naprężenia, Mechanika Teoretyczna i Stosowana 1, Vol.10 (1972), ss. 9 - 28
- [12] EL-MAGD E.: Versagensbedingung bei mehrachsig schwingender Beanspruchung metallischer Werkstoffe, Habilitationsschrift, RWTH Aachen, 1974

- [13] EL-MAGD E., MIELKE S.: Experimentelle Ermittlung der Dauerfestigkeitsgrenze bei beliebiger zweiachsiger Schwingungsbeanspruchung, Materialprüfung 21 (1979), No.11, ss. 400 - 403
- [14] EL-MAGD E.: Einfache schwingfestigkeitsrechnung für synchrone Beanspruchung auf der Basis der Versagensgrenze nach Mohr, Konstruktion 36 (1984), H.2, ss. 59 - 64
- [15] FINDLEY W.N.: Discussion of "Engineering steels under combined cyclic and static stresses" by Gough I., Journal of Applied Mechanics 18 (1951), pp. 211 - 213
- [16] FINDLEY W.N.: Fatigue of metals under combinations of stresses, Transactions of the ASME 79 (1957), pp. 1337 - 1348
- [17] FINDLEY W.N., MATHUR P.N., SZCZEPAŃSKI E., TEMEL A.O.: Energy versus stress theories for combined stress - A fatigue experiment using a rotation disk, Transactions of the ASME, J. of Basic Eng. March (1961), pp. 10 - 14
- [18] FINDLEY W.N., TRACY J.F.: The effect of the intermediate principal stress on triaxial fatigue of 7075-T6 aluminum alloy, Journal of Testing and Evaluation 1 (1973), No.5, pp. 432 - 434
- [19] GARUD Y.S.: Multiaxial fatigue; A survey of the state of the art, Journal of Testing and Evaluation 9 (1981), No.3, pp. 432 - 434
- [20] GOŁOS K.: Trwałość zmęczeniowa stali w ujęciu energetycznym, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Z.123, Mechanika, 1989
- [21] GOUGH H.J.: Engineering steels under combined cyclic and static stresses - I, II, III, IV, The Engineer, 28(1949), pp. 497 - 500, 510 - 514, 540 - 543, 570 - 573
- [22] GOUGH H.J.: Engineering steels under combined cyclic and static stresses, Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics 72 (1950), pp. 113 - 125
- [23] GRUBISIC V., NEUGEBAUER J.: Festigkeitsverhalten von Sphäroguss bei kombinierter statischer und dynamischer mehrachsiger Beanspruchung, Lab. f. Betriebsfestigkeit, Darmstad, Bericht Nr. FB-149 (1979)
- [24] HEIDENREICH R., SCHÜTZ W., RICHTER I., ZENNER H.: Schubspannungsintensitätshypothese - Dauerschwingfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung - Abschlußbericht, IABG-Vorhaben nr 59, Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., H.105, 1983
- [25] HEIDENREICH R., RICHTER I., ZENNER H.: Schubspannungsintensitätshypothese - weitere experimentelle und theoretische Untersuchungen, Konstruktion 36 (1984), H.3, ss. 99 - 104
- [26] HEMPEL M., HAHN H.: Fraktographische Untersuchungen an Dauerbruchflählen von Baustählen, Archiv für das Eisenüttenwesen 42 (1971), H.1, ss. 31 - 38

- [27] ISSLER L.: Festigkeitverhalten metallischer Werkstoffe bei mehrachsiger phasenverschobener Schwingbeanspruchung, Dissertation, TU Stuttgart, 1973
- [28] ISSLER L.: Festigkeitsverhalten bei mehrachsiger phasengleicher und phasenverschobener Schwingbeanspruchung, VDI - Ber. Nr 268 (1976), ss. 92 - 100
- [29] ISSLER L.: Kritische Analyse des Anstrengungsverhältnisses nach Bach, Z. f. Werkstofftechnik 18 (1987), ss. 43 - 49
- [30] KANAZAWA K., MILLER K.J., BROWN M.W.: Low-cycle fatigue under out-of-phase loading conditions, Journal of Engineering Materials and Technology, Transaction of the ASME, July (1977), pp. 222 - 228
- [31] KANIUT C.: Zur Betriebsfestigkeit metallischer Werkstoffe bei mehrachsiger Beanspruchung, Dissertation, RWTH Aachen, 1983
- [32] KAKUNO H., KAWADA Y.: A new criterion of fatigue strenght of a round bar subjected to combined static and repeated bending and torsion, Fatigue of Engineering Materials and Structures (1979), Vol.2, ss. 229 - 236
- [33] KEIL ST.: Zeitanalyse zweiachsiger Spannungszustände bei Kombination schwingender Belastung, Draht-Welt 57 (1971), ss. 395 - 399
- [34] KOCAŃDA A.: Wytrzymałość i niskocyklowa trwałość zmęczeniowa stali narzędziowej w obróbce plastycznej na półgorąco, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Z.97, Mechanika, 1986
- [35] KOCAŃDA S.: Zmęczeniowe pękanie metali, WNT, Warszawa, 1985
- [36] KOCAŃDA S., KOCAŃDA A.: Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali, PWN, Warszawa, 1989
- [37] KOCAŃDA S., SZALA J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych, PWN, Warszawa, 1985
- [38] LEA F.C., BUDGEN H.P.: Combined torsional and repeated bending stresses, Engineering 122 (1926), pp. 242 - 245
- [39] LEMPP W.: Festigkeitverhalten von Stählen bei mehrachsiger Dauerschwingbeanspruchung durch Normalspannungen mit überlagerten phasengleichen und phasenverschobenen Schubspannungen, Dissertation, TU Stuttgart, 1977
- [40] LENSING J.: Mehrachsige phasenverschobene Schwingbeanspruchung und ihr Einfluß auf die Vergleichschpannungshypothese, ZAMM Bd.61 (1981), H.4/5, ss. T.108 - T.110
- [41] LENSING J.: Vergleich zweier Vergleichspannungshypothesen für schwingende Beanspruchung mit experimentellen Ergebnissen, Konstruktion 34 (1982), H.2, ss. 45 - 48
- [42] LITTLE R.E.: A simplified method for determining fatigue stress using Mohr's circle, Machine Design 37 (1965), No.5, pp. 143 - 148

- [43] LITTLE R.E.: Fatigue stresses from complex loadings, *Machine Design*, January 6 (1966), pp. 145 - 149
- [44] LITTLE R.E.: A note on the shear stress criterion for fatigue failure under combined stress, *The Aeronautical Quarterly*, Vol.20, February (1969), pp. 57 - 60
- [45] MACHA E.: Probability function of stress reduced according to Huber-Mises-Hencky's hypothesis, at a random two-dimensional state of stress, *Scientific Papers of the Institute Materials Science and Applied Mechanics of Wrocław Technical University No.19 (1976)*
- [46] MACHA E.: Modele matematyczne trwałości materiałów w warunkach losowego złożonego stanu naprężenia, *Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej 41, Seria: Monografie 13, Wrocław, 1979*
- [47] MACHA E.: Wybrane algorytmy wytrzymałości zmęczeniowej przy obciążeniach losowych, Etap II, WSI Opole, Instytut Budowy Maszyn, Raport Nr 18/83, 1983
- [48] MACHA E.: Generalization of strain criteria of multiaxial cyclic fatigue to random loadings, *Fortschritt Berichte, VDI, Reihe 18, Nr 52, 1988*
- [49] MAJORS H., MILLS D.D., MAC GREGOR C.W.: Fatigue under combined pulsating stresses, *Journal of Applied Mechanics*, September (1949), pp. 269 - 276
- [50] MARIN J.: Biaxial tension-tension fatigue strengths of metals, *Journal of Applied Mechanics*, December (1949), pp. 383 - 388
- [51] MATAKE T.: An explanation on fatigue limit under combined stress, *Bulletin of the JSME*, Vol.20, No.141, March (1977), pp. 257 - 263
- [52] McDIARMID D.L.: A new analysis of fatigue under combined bending and twisting, *The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society*, Vol.78, July (1974), pp. 325 - 329
- [53] McDIARMID D.L.: Fatigue behaviour under out-of phase bending and torsion, *The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society*, Vol.85, March (1981), pp. 118 - 122
- [54] McDIARMID D.L.: Fatigue under out-of-phase biaxial stresses of different frequencies, *ASTM Special Technical Publication 853, 1982, pp. 606 - 621*
- [55] MIELKE S., TROOST A., EL-MAGD E.: Festigkeitsverhalten von Stählen unter zweiachsig synchron und phasenverschoben schwingenden Normalspannungen, *Z. f. Werkstofftechnik 12 (1982), H.1, ss. 1 - 7*
- [56] MIELKE S., TROOST A., EL-MAGD E.: Schwingfestigkeitsverhalten unter zweiachsiger Beanspruchung mit phasenverschoben schwingenden Normal- und Schubspannungen, *Konstruktion 34 (1982), H.5, pp. 197 - 202*

- [57] MILLER W.R., OHJI K., MARIN J.: Rotating Principal Stress Axes in High Cycle Fatigue, Transactions of the ASME (1967), pp. 76 - 80
- [58] MORRISON J.L.M., CROSSLAND B., PARRY J.S.C.: Fatigue under triaxial stress, Development of a testing machine and preliminary results, Proc. Inst. Mech. Eng. 21, No.170 (1956), pp. 697 - 712
- [59] NAUBEREIT H.: Zusammengesetzte Wechselbeanspruchung bei Phasenverschiebung, Ifl-Mitt. 16 (1977), H.3, ss. 89 - 95
- [60] NEUGEBAUER J.: Zum Schwingfestigkeitsverhalten von Gusswerkstoffen unter mehrachsiger, frequenzverschiedener Beanspruchung, Dissertation, TH Darmstadt, 1986
- [61] NISHIHARA T., KAWAMOTO M.: The strength of metals under combined alternating bending and torsion, Mem. Coll. Eng. Kyoto Imp. University, Vol.11, No.5 (1945), pp. 85 - 112
- [62] NOVOZHILOV V.V.: Theory of elasticity, Pergamon Press, London, 1961, p. 78
- [63] NOWACKI W.: Teoria sprężystości, PWN, Warszawa, 1970
- [64] NÖKLEBY J.O., WALLEN A.I.: Dauerschwingfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung - Möglichkeiten und Grenzen der Schubspannungsintensitätshypothese, Konstruktion 34 (1982), H.8, ss. 311 - 312
- [65] OHJI K., OGURA K., HARADA S.: Observation of low-cycle fatigue crack initiation and propagation in anisotropic rolled steel under biaxial stressing, Bulletin of the JSME, Vol.18, No.115, January (1975), pp. 17 - 24
- [66] OLEJNIK N.W.: Niesusćaia sposobnost' elementov konstrukcii pri ciklicieskom nagražienii, Naukova Dumka, Kiev, 1985
- [67] PAYSAN B.: Zur Frage der Dimensionierung von Bauteilen, die einer zusammengesetzten Beanspruchung unterliegen, Konstruktion 24 (1972), ss. 349 - 354
- [68] RICHTER I.: Zur Berechnung der Dauerfestigkeit duktiler Werkstoffe bei Beanspruchung mit mehreren Spannungskomponenten mit statischen und schwingenden Anteilen, Konstruktion 30 (1978), H.2, ss. 66 - 68
- [69] RICHTER I.: Negative Mittelspannungen - eine Quelle für Fehlrechnungen, Konstruktion 35 (1983), H.7, ss. 269 - 271
- [70] RICHTLINIE VDI 2227 (Entwurf): Festigkeit bei wiederholter Beanspruchung, Zeit - und Dauerfestigkeit metalischer Werkstoffe, insbesondere von Stählen, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1974
- [71] ROTVEL F.: Biaxial fatigue tests with zero means stress using tubular specimens, Int. J. Mech. Sci., Pergamon Press, Vol.12 (1970), pp. 597 - 613

- [72] SAXENA V.C., MACHIN K.E.: Strains and stress-concentration factors in plates under out-of-phase biaxial cyclic loads, *Journal of Strain Analyses* 8 (1973), No.2, pp. 90 - 98
- [73] SEMPRUCH J.: Rozwój pęknięć zmęczeniowych w cylindrycznych próbkach stalowych w warunkach zmiennego skręcania, Praca doktorska, Politechnika Częstochowska, Wydział Budowy Maszyn, 1983
- [74] SEMPRUCH J., SZALA J.: Badania trwałości zmęczeniowej próbek cylindrycznych wykonanych ze stali 10 przy skręcaniu, *Zeszyty Naukowe ATR Nr 89, Mechanika* 23, Bydgoszcz, 1981, ss. 81 - 95
- [75] SIMBÜRGER A.: Festigkeitverhalten zäher Werkstoffe bei einer mehrachsiger, phasenverschobenen Schwingbeanspruchung mit körperfesten und veränderlichen Hauptspannungsrichtungen, LFB - Bericht, nr FB-121, Darmstadt, 1975
- [76] SINES G.: Behaviour of metals unter complex static and alternating stresses, in: Sines G., Waisman J.L.: *Metal Fatigue*, New York - Toronto - London: McGraw-Hill, 1959, pp. 1145 - 1169
- [77] SINES G., OHGI G.: Fatigue criteria under combined stresses or strains, *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME* 103, April (1981), pp. 82 - 90
- [78] SONSINO C.M.: Schwingfestigkeitsverhalten von Sinterstahl unter kombinierten mehrachsiger phasegleichen und phasenverschobenen Beanspruchungszustände, LBF Darmstadt, Bericht Nr FB-168 (1983)
- [79] SONSINO C.M., GRUBISIC V.: Mechanik von Schwingbrüchen an gegossenen und gesinterten Konstruktionswerkstoffen unter mehrachsiger Beanspruchung, *Konstruktion* 37 (1985), H.7, ss. 261 - 269
- [80] STULEN F.B., CUMMINGS H.N.: A failure criterion for multi-axial fatigue stresses, *ASTM-Proc.*, Vol.54 (1954), pp. 822 - 835
- [81] SZALA J.: Badania i obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych, Prace IPPT PAN, Warszawa, 1979
- [82] SZALA J., SEMPRUCH J.: Fatigue crack growth in cylindrical steel specimens subject to variable torsion, *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej* Nr 403, Budownictwo Okrętowe XLIII, 1986, ss. 267 - 272
- [83] SZALA J., SEMPRUCH J.: Multiaxial fatigue stress state - the theoretical analysis of the influence of phase angles various, Prace 28 Konferencji Mechaniki Ciała Stałego, IPPT PAN, Kozubnik, 1990
- [84] TOOR P.M.: A unified engineering approach to the prediction of multi-axial fatigue fracture of aircraft structures, *Engineering Fracture Mechanics* Vol.7 (1975), pp. 731 - 741
- [85] TROOST A.: Einführung in die allgemeine Werkstoffkunde metallischer Werkstoffe, Bd.I, B.I.-Wissenschaftsverlag (1984), 2. Auflage

- [86] TROOST A.: Ermittlung der Versagensgrenzen zweiachsig schwingender Spannungszustände mit drei zeitabhängigen phasenverschobenen Spannungskoordinaten, DFG-Abschlußbericht Tr 73/27-1, Aachen, 1986
- [87] TROOST A., EL-MAGD E.: Anisotropes Ermüdungsverhalten isotroper metallischer Werkstoffe, Metall 28 (1974), H.1, ss. 49 - 55
- [88] TROOST A., EL-MAGD E.: Neue Auffassung der Normalspannungshypothese bei schwingender Beanspruchung, Metall 28 (1974), Nr 4, ss. 339 - 345
- [89] TROOST A., EL-MAGD E.: Allgemeine Formulierung der Schwingfestigkeitsamplitude in Haighscher Darstellung, Materialprüfung 17 (1975), H.2, ss. 47 - 49
- [90] TROOST A., EL-MAGD E.: Beurteilung der Schwingfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung auf der Grundlage kritischer Schubspannungen, Metall 30 (1979), H.1, ss. 37 - 41
- [91] TROOST A., EL-MAGD E.: Allgemeine quadratische Versagensbedingungen für metallische Werkstoffe bei mehrachsiger schwingender Beanspruchung, Metall 31 (1977), H.7, ss. 759 - 764
- [92] TROOST A., EL-MAGD E., MIELKE S.: Gegenüberstellung neuer Festigkeits-hypothesen bei zweiachsig schwingenden Spannungszuständen, Material und Technik (1981), Nr 2, ss. 63 - 71
- [93] TROOST A., EL-MAGD E.: Schwingfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung ohne und mit Phasenverschiebung, Konstruktion 33 (1981), H.8, ss. 297 - 304
- [94] TROOST A., AKIN O., KLUBBERG F.: Dauerfestigkeitsverhalten metallischer Werkstoffe bei zweiachsiger Beanspruchung durch drei phasenverschoben schwingende Lastspannungen, Konstruktion 39 (1987), H.12, ss. 479 - 488
- [95] TROOST A., AKIN O., KLUBBERG F.: Zur Dauerfestigkeit metallischer Werkstoffe bei zweiachsig synchron und phasenverschoben schwingender Beanspruchung, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 19 (1988), ss. 406 - 407
- [96] TROSCIENKO V.T., SOSNOVSKIJ L.A.: Soprativlenie ustalosti metallov i splavov, Spravočnik, Naukova Dumka, Kiev, 1987
- [97] WECK M., SCHOLLHORN H.D.: Berechnung des Schwingungsverhaltens von Umformmaschinen - Ermittlung und Auswertung der zeitabhängigen Bauteilspannungen, Konstruktion 38 (1986), H.7, ss. 253 - 257
- [98] WÖHLER A.: Über die Versuche zur Ermittlung der Festigkeit von Achsen, Z. f. Bauwesen 13 (1863), ss. 233 - 238
- [99] ZAMRIK S.Y., BILIR O.G.: Analysis of biaxial - fatigue damage at elevated temperatures, Experimental Mechanics, October (1976), pp. 373 - 379

- [100] ZENNER H.: Festigkeitsverhalten von schwingend beanspruchten Bauteilen mit schräger Kerbe in Abhängigkeit von Beanspruchungszustand, Dissertation, Stuttgart, 1970
- [101] ZENNER H., RICHTER I.: Eine Festigkeitshypothese für die Dauerfestigkeit bei beliebigen Beanspruchungskombinationen, Konstruktion 29 (1977), ss. 11 - 18
- [102] ZENNER H., HEIDENREICH R., RICHTER I.: Schubspannungsintensitätshypothese - Erweiterung und experimentelle Abstützung einer neuen Festigkeitshypothese für schwingende Beanspruchung, Konstruktion 32 (1980), H.4, ss. 143 - 152
- [103] ZENNER H., HEIDENREICH R., RICHTER I.: Bewertung von Festigkeitshypothesen für kombinierte statische und schwingende sowie synchron schwingende Beanspruchung, Z. Werkstofftech. 14 (1983), ss. 391 - 406
- [104] ZENNER H.: Neue Vorschläge zur Berechnung der Dauerschwingfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung, Konstruktion 35 (1983), H.8, ss. 313 - 318
- [105] ZENNER H., HEIDENREICH R., RICHTER I.: Dauerschwingfestigkeit bei nichtsynchrone mehrachsiger Beanspruchung, Z. Werkstofftech. 16 (1985), H.3, ss. 101 - 112

KRYTERIUM WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ
STALI KONSTRUKCYJNEJ 25CrMo4
W WARUNKACH ZŁOŻONEGO STANU NAPRĘŻENIA

Streszczenie

Z praktyki konstruktora znanych jest szereg sytuacji, kiedy wybrane lub wszystkie składowe tensora opisującego stan naprężenia w słabym ogniwie elementu konstrukcyjnego, są zależne od czasu. Dokonano przeglądu kryteriów oceny wytrzymałości zmęczeniowej w takich warunkach. Przegląd ten wskazuje na ograniczoną zastosowania znanych kryteriów. Wskazano niejednoznaczność ocen literaturowych na temat oddziaływania przesunięć fazowych pomiędzy składowymi stanu naprężenia na wytrzymałość zmęczeniową.

Przedstawiono wyniki badań własnych, dotyczących obserwacji makro- i mikrofraktograficznych pęknięć zmęczeniowych powstałych w warunkach płaskiego stanu naprężenia kontrolowanego poprzez wartości nominalne trzech składowych stanu obciążenia - zmienne rozciąganie, skręcanie i ciśnienie wewnętrzne w cylindrycznej próbce wykonanej ze stali 25CrMo4. Wykazano silne oddziaływanie przesunięć fazowych zarówno na obraz makro- jak i mikrofraktograficzny pęknięcia zmęczeniowego. W szczególnych przypadkach wykazano zróżnicowanie oddziaływania przesunięć fazowych pomiędzy składowymi normalnymi i pomiędzy składową normalną a styczną. Na podstawie badań teoretycznych wykazano związki pomiędzy charakterem zmienności osi głównych tensora naprężenia, w szczególnych przypadkach wartościami kątów wyznaczonymi z wykresów zmienności osi głównych i położenia makropłaszczyzny złomu zmęczeniowego. Sformułowano propozycję kryterium uszkodzenia o postaci:

$$\sqrt{[\sigma_{xA}(\vartheta) - \sigma_{xa}(\vartheta)] [\sigma_{yA}(\vartheta) - \sigma_{ya}(\vartheta)] [\tau_{xyA}(\vartheta) - \tau_{xya}(\vartheta)]} = 0$$

Kryterium zweryfikowano z rezultatem pozytywnym w zróżnicowanych warunkach badań (próbki, materiały i obciążenia).

FATIGUE STRENGTH CRITERION OF CONSTRUCTIONAL STEEL 25CrMo4
IN COMPLEX LOAD STATE CONDITIONS

Summary

The fact that select or all components of stress tensor in weak element depend on time is known based on designers' practice. A survey of criteria of fatigue strength evaluation in such conditions was made up in this work. All well known criteria have limited application as it is indicated from in review. The disaccord in literature opinions concerning influence of phase displacement among stress state tensor components on fatigue life was ascertained.

The results of author owns investigations were presented. The investigation were experimented using cylindrical test piece made of 25CrMo4-steel. The investigations results refer to macro- and microfractographical observations of fatigue failure, which come to existence in plain stress state controlled by nominal values of three component of load. The load conditions were complex: extending, bending charging in time and charging in time inside pressure in test piece. The strong influence of phase displacement was proved for both micro- and macrofractographical picture of fatigue failure. The differentiation of influence of phase displacement among normal components or among normal and tangent components was ascertain in particular situations. The relations between variability character of stress tensor main axis were proved upon theoretical considerations. The relations between angels values evaluated using main axis variability charts and position of macroplain of fatigue failure were proved upon theoretical considerations too, but in special cases. The proposal of failure criterion was formulated in the following form:

$$\sqrt{[\sigma_{xA}(\vartheta) - \sigma_{xA}(\vartheta)] [\sigma_{yA}(\vartheta) - \sigma_{yA}(\vartheta)] [\tau_{xyA}(\vartheta) - \tau_{xyA}(\vartheta)]} = 0$$

The criterion was positive verificated in different investigation conditions (test specimens, materials and load conditions).

76562

