

POLITECHNIKA SZCZECINSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA MECHANIKI i PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN
ZAKŁAD MECHANIKI TECHNICZNEJ
Laboratorium Wytrzymałości Materiałów

BADANIE METALI NA ZAMĘCZENIE

Opracował: Jędrzej Ratajczak

SZCZECIN 2005

1. Cel ćwiczenia

Zmęczeniem materiału nazywa się zmiany występujące w materiale pod wpływem okresowo zmiennych naprężeń lub odkształceń, które mogą doprowadzić do zniszczenia materiału.

Charakterystyczną cechą zniszczenia zmęczeniowego materiału jest to, że występuje ono przy maksymalnych naprężeniach znacznie niższych od wytrzymałości doraźnej R_m , a nawet od granicy plastyczności R_e lub $R_{0,2}$. Pęknięcia zmęczeniowe mają charakter pęknięć kruchych. Są one szczególnie niebezpieczne z tego względu, że powstanie szczeliny zmęczeniowej pozostaje często nie zauważone, a ostateczne zniszczenie części następuje nagle i niespodziewanie, i prowadzi zwykle do niebezpiecznych awarii. Badania wykazały, że ok. 80% wszystkich pęknięć w maszynach spowodowanych jest zmęczeniem materiału, a tylko ok. 20% - przeciążeniem statycznym.

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z podstawami badań doświadczalnych wytrzymałości zmęczeniowej materiału, używanymi do tego celu próbkami i urządzeniami oraz praktycznym wyznaczeniem wskaźników charakteryzujących zachowanie się materiału w warunkach naprężeń okresowo zmiennych.

Wykonanie ćwiczenia polega na przeprowadzeniu zmęczeniowej próby zginania, zbadaniu zachowania się materiału w warunkach okresowo zmiennych naprężeń wywołanych zginaniem obrotowym oraz wyznaczeniu wytrzymałości na zmęczenie.

2. Opis badań zmęczeniowych

2.1. Uwagi ogólne

Odporność elementów maszyn na zmęczenie zależy od:

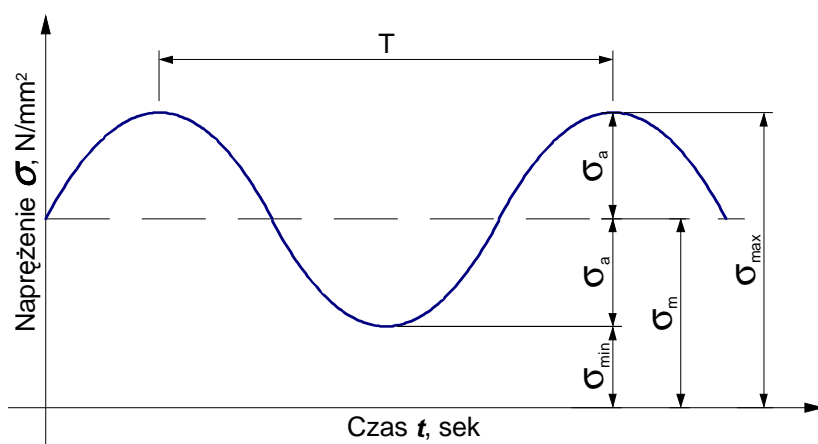
- rodzaju i właściwości materiału,
- kształtu elementu,
- rodzaju obróbki powierzchniowej - gładkości powierzchni,
- zakresu zmienności naprężeń w materiale.

W związku z tym badania wytrzymałości zmęczeniowej dzielą się wyraźnie na badania próbek materiału z uwzględnieniem sposobu obróbki i gładkości powierzchni oraz badania wytrzymałości zmęczeniowej kształtowej, tzn. badania gotowych elementów technicznych, posiadających skomplikowane kształty, jak np. wały korbowe, połączenia gwintowe itp. Do drugiej grupy należy także zaliczyć badania próbek z wykonanymi na nich różnego rodzaju

karbami, zmierzające do ustalenia wpływu spiętrzania się naprężeń w karbach na obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej. Niekiedy specjalnym badaniom zmęczeniowym poddaje się całe zespoły konstrukcyjne a nawet gotowe urządzenia.

2.2. Charakterystyka naprężeń zmęczeniowych

Zmienność naprężeń w próbie zmęczeniowej charakteryzuje się cyklem naprężeń, okresem zmian T lub częstością zmian f oraz zakresem zmian naprężeń, które można rozpatrywać jako wynik nałożenia składowej statycznej σ_m (naprężenie średnie) i wahadłowo zmieniającej się dynamicznej o amplitudzie σ_a (rys.1).



Rys.1. Wielkości charakterystyczne naprężenia okresowo zmiennego

Cyklem naprężeń nazywa się okresowo zmienne naprężenie o wartościach zmieniających się w sposób ciągły w czasie jednego okresu.

Okresowo zmienne naprężenia występujące w próbach zmęczeniowych mają najczęściej charakter sinusoidalny (rys.60). Można je wyrazić wzorem

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t$$

gdzie: ω - częstość kołowa zmian naprężenia, t - czas.

Największa wartość naprężenia cyklu jest równa

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$$

a najmniejsza

$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$$

gdzie: σ_a - amplituda naprężenia, σ_m - naprężenie średnie cyklu.

Wzajemne zależności można również wyrazić wzorami

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Stosunek χ naprężenia średniego σ_m do amplitudy naprężenia σ_a nazywa się współczynnikiem stałości obciążenia

$$\chi = \frac{\sigma_m}{\sigma_a}$$

Stosunek R najmniejszego naprężenia σ_{\min} do największego naprężenia σ_{\max} cyklu nazywa się współczynnikiem asymetrii cyklu (lub charakterystyką cyklu) .

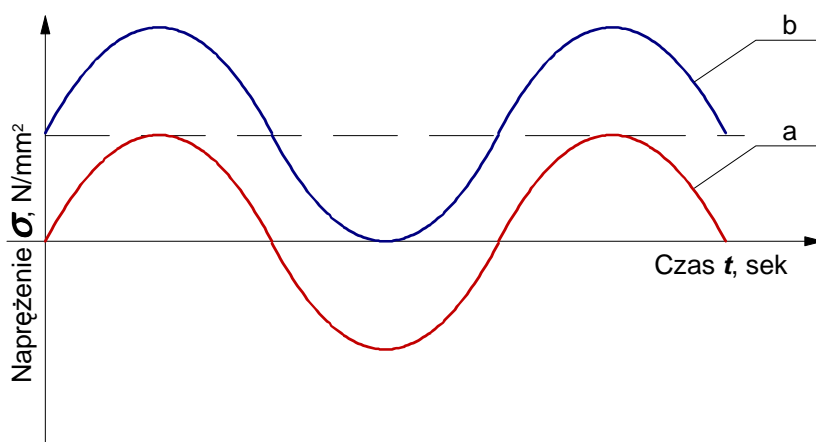
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Między współczynnikami χ i R zachodzi następująca zależność

$$\chi = \frac{\sigma_m}{\sigma_a} = \frac{1 + R}{1 - R}$$

Cykl, w którym σ_{\max} i σ_{\min} mają ten sam znak nazywa się cyklem jednostronnym, a cykl, w którym naprężenia zmieniają znak - cyklem dwu-stronnym (przeziennym).

Cykl, w którym $\sigma_m = 0$, nazywa się cyklem wahadłowym (symetrycznym); ($\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} = \sigma_a$, $\chi = 0$, $R = -1$; rys. 61a).



Rys.2. Przebiegi zmian naprężenia: a) przy cyklu wahadłowym, b) przy cyklu tętniącym.

Cykl, w którym jedno ze skrajnych naprężeń głównych cyklu jest równe zero nazywa się cyklem tętniącym; ($\sigma_m = \sigma_a = 0,5\sigma_{\max}$, $\chi = 1$, $R = 0$; rys.61.b).

Dla określenia dowolnego naprężenia okresowo zmiennego potrzebne są dwie wartości, np. σ_{\max} , i σ_{\min} lub σ_a i σ_m .

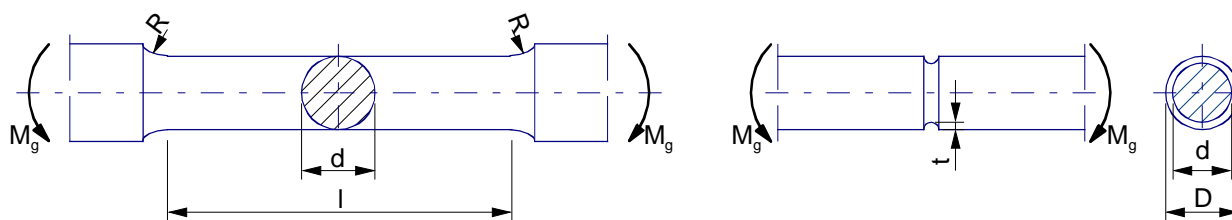
Kształt krzywej, wg której zmienia się naprężenie przy tych samych wartościach ekstremalnych, nie ma istotnego wpływu na proces zmęczenia. Również zmiany częstości w zakresie 300 - 6000 cykli na minutę nie mają wyraźnego wpływu na wyniki badań zmęczeniowych.

Proces zmęczenia zależy w decydującym stopniu od doboru wartości, σ_{\max} i σ_{\min} . Ponieważ może tu być nieograniczona liczba możliwości, dla uporządkowania przyjmuje się, że podstawowe próby zmęczeniowe wykonuje się przy naprężeniach zmieniających się wg cyklu wahadłowego, w którym $\sigma_m = 0$, a zmienia się tylko wartość amplitudy σ_a . Dla takiego przypadku wytrzymałość zmęczeniowa ma wartość najmniejszą.

2.3. Próbki

Kształt i wymiary próbek ustala się w zależności od rodzaju mierzonych wielkości i warunków ich określania. Dla określenia wskaźników Zmęczeniowych materiałów stosuje się próbki o prostym kształcie. Dla określenia wytrzymałości zmęczeniowej części maszyn i elementów konstrukcji stosuje się próbki o takich kształtach i wymiarach, które zapewniają możliwie pełną analogię rozkładu naprężeń i warunków obciążania.

Materiał do badań, powinien być możliwie jak najbardziej jednorodny i jak najlepiej reprezentować tworzywo, którego własności zmęczeniowe chce się badać. Seria próbek metalowych powinna być wykonana nie tylko z jednego wytopu ale nawet z jednego wlewka. Kształty próbek nie są na ogół znormalizowane. Zależą one w głównej mierze od tego, jaką własność zmęczeniową chce się badać oraz za pomocą jakiego urządzenia będzie przeprowadzone to badanie. Wyjątek stanowią niektóre próbki do zmęczeniowej próby zginania, objęte normą PN-76/H-04326. Przykłady próbek pokazano na rys.3. Zalecane przez normę wymiary części roboczej tych próbek podano w tablicach 1 i 2. Części chwytowe próbek dostosowuje się do uchwytów maszyny zmęczeniowej.



Rys.3. Próbki okrągłe do próby zmęczeniowej zginania (wg PN-67/H-04326): a) o stałym przekroju, b) z karbem obrączkowym U

Przy wykonywaniu próbek należy przestrzegać jednakowej technologii. Duży wpływ na wytrzymałość zmęczeniową ma stan powierzchni próbki (gładkość, zgniot). Najwyższą wytrzymałość zmęczeniową osiąga się przy próbkach szlifowanych i polerowanych.

Tablica 1

Zalecane wymiary części roboczej próbek okrągłych o stałym przekroju w mm

d	l	R
5	$l \geq 5d$	5
7,5		7,5
10		10

Tablica 2

Zalecane wymiary części roboczej (karbów) próbek okrągłych z karbem obrączkowym U oraz współczynniki kształtu α_k przy zginaniu

D	d	r	t	α_k
mm				
6,00	5,0	0,50	0,50	1,89
9,00	7,5	0,75	0,75	1,89
12,00	10,0	1,00	1,00	1,89

2.4. Maszyny do prób zmęczeniowych

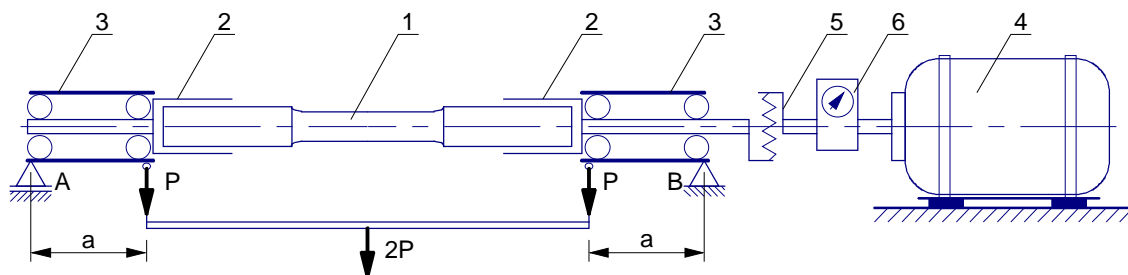
Najbardziej rozpowszechnione są tzw. zmęczeniówki giętno-obrotowe (rys.4). Próbka 1 zaciśnięta jest w uchwytych samocentrujących 2, ułożyskowanych obrotowo w tulejach 3. Próbka z tulejami i wrzecionami stanowi jak gdyby belkę podpartą w punktach A i B i obciążoną dwiema symetrycznie położonymi siłami poprzecznymi P. Cała próbka znajduje się więc w stanie czystego zginania momentem gnącym $M_g = Pa$, a naprężenia w najwyższych i najniższych włóknach próbki wynoszą

$$\sigma = \pm \frac{Pa}{W} = \pm \frac{32Pa}{\pi d^3}$$

gdzie: P - siła obciążająca próbkę, N,

d - średnica próbki, mm,

a - odległość siły P od punktu podparcia, mm.



Rys.4. Uproszczony schemat zmęczeniówki giętno-obrotowej

Maszyna napędzana jest silnikiem 4, za pośrednictwem sprzęgła podatnego 5. Z wałkiem napędowym połączony jest licznik obrotów 6. Nie uwidocziony na schemacie wyłącznik przyciskowy powoduje wyłączenie silnika w momencie złamania próbki.

Zmęczeniówki omawianego typu dają częstość zmian naprężenia 3000-6000 cykli na minutę. Zamierzone wartości naprężenia osiąga się przez dobór odpowiedniego obciążenia P . Próba polega na ustaleniu liczby cykli naprężeń N , którą próbka wytrzyma do chwili jej zniszczenia.

Oprócz omówionej najprostszej zmęczeniówki istnieje bardzo dużo różnorodnych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn do badań zmęczeniowych. Szczególnie szerokie zastosowanie do badań próbek lub elementów konstrukcyjnych na cykliczne rozciąganie, ściskanie i zginanie mają maszyny zmęczeniowe zwane potocznie pulsatorami z układem napędowym hydraulicznym, elektromagnetycznym lub dźwigniowo-sprężynowym. Częstość pulsatorów hydraulicznych jest zazwyczaj mała i nie przekracza 700 - 900 cykli/min.

Ze względu na znaczne niekiedy różnice między poszczególnymi konstrukcjami maszyn zmęczeniowych oraz brak ogólnie obowiązujących międzynarodowych norm wykonania próbek i warunków przeprowadzania prób, należy zachować szczególną ostrożność przy interpretowaniu i uogólnianiu wyników badań zmęczeniowych.

2.5. Przeprowadzenie próby metodą klasyczną

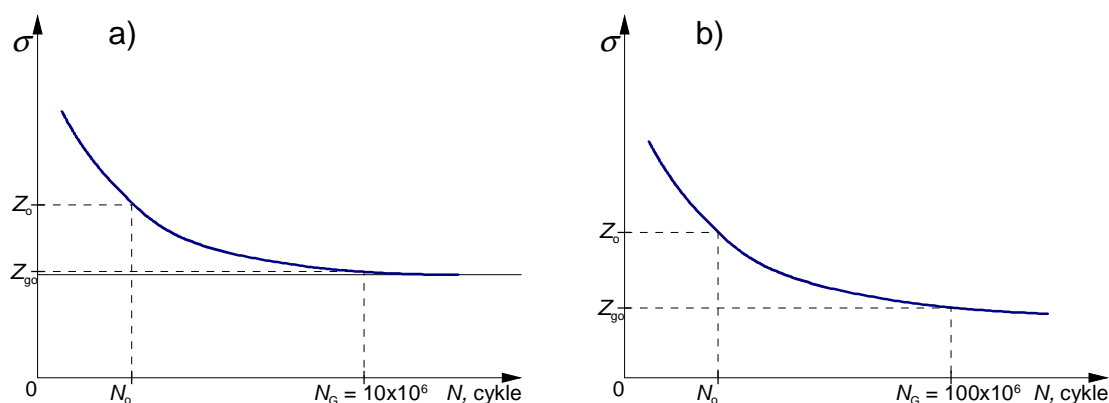
Klasyczna metoda badania wytrzymałości zmęczeniowej metali polega, na sporządzeniu wykresu zmęczeniowego (Wöhlera) i wyznaczeniu wytrzymałości na zmęczenie. Minimalna liczba próbek potrzebna do tego celu wynosi 8 - 12 sztuk.

Przed przystąpieniem do prób zmęczeniowych należy wyznaczyć granicę wytrzymałości na rozciąganie R_m badanego materiału. Pierwszą próbkę obciąża się tak aby maksymalne naprężenie wyniosło ok. $0,67R_m$. Po pęknięciu pierwszej próbki, obciążenie drugiej i następnych próbek dobiera się w ten sposób, aby otrzymać kolejno coraz niższe naprężenia σ_{max} , przy tym

samym naprężeniu średnim σ_m . Różnice pomiędzy kolejnymi wartościami naprężeń σ_{max} przyjmuje się rzędu 20 – 40 N/mm². Zmniejszając, naprężenia otrzymuje się coraz większe liczby cykli N , przy których próbki ulegają pęknięciu. Dla próbek stalowych liczby te dochodzą do rzędu 10 milionów, zaś dla innych materiałów - do 100 i więcej milionów. Liczne badania zmęczeniowe wykazały, że punkty reprezentujące wyniki prób w układzie współrzędnych $\sigma - N$, skupiają się, w pobliżu pewnej krzywej, zwanej krzywą (wykresem) Wöhlera.

Krzywa Wöhlera dla stali (rys.5a) przy obniżaniu naprężeń zdąża asymptotycznie do linii równoległej do osi cykli, a dla próbek z innych materiałów (rys.5b) obniża się asymptotycznie do samej osi cykli. Z tego wynika, że dla materiałów, stalowych istnieją graniczne naprężenia, poniżej których próbka nie ulegnie zniszczeniu przy dowolnie dużej liczbie cykli obciążeń.

Największą wartość naprężenia okresowo zmiennego σ_{max} (przy danym cyklu), przy której próbki nie ulegają zniszczeniu po przeniesieniu nieograniczonej liczby cykli obciążenia nazywa się **nieograniczoną wytrzymałością zmęczeniową** albo rzeczywista, (fizyczna) granicą zmęczenia. Wartość tę na wykresie Wöhlera wyznacza asymptota (rys.5a).



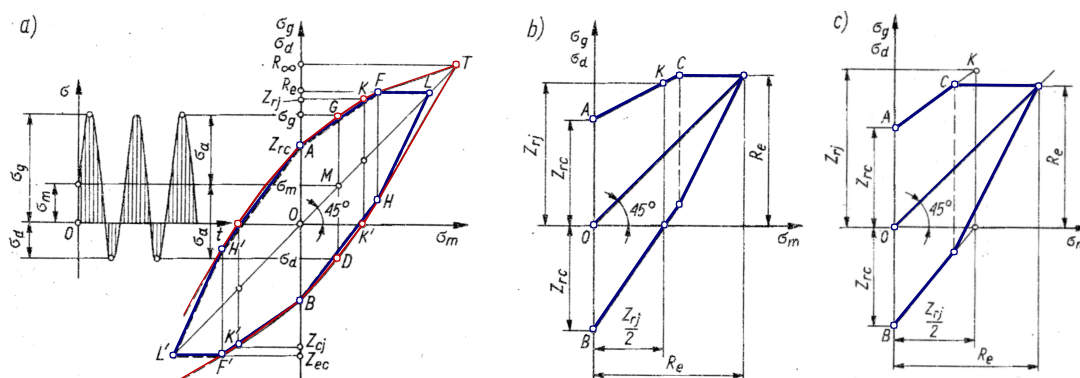
Rys. 5. Wykresy Wöhlera: a) dla stali, b) dla stopu aluminium

W praktyce za granicę zmęczenia (wytrzymałość zmęczeniowa) przyjmuje się (PN-76/H-04325) największą wartość naprężenia okresowo zmiennego σ_{max} (przy danym cyklu), przy której próbki nie ulegają zniszczeniu w ciągu określonej liczby cykli N_G , przyjętej umownie za bazę (podstawę) próby zmęczeniowej. Dla stali konstrukcyjnych przyjmuje się za bazę $N_G = 10 \cdot 10^6$ cykli, a dla metali i stopów żelaznych – $N_G = 100 \cdot 10^6$ cykli. Wyznaczone w ten sposób granice zmęczenia oznacza się przez: Z_{go} - przy wahadłowym zginaniu, Z_{so} - przy wahadłowym skręcaniu, Z_{rc} - przy wahadłowym rozciąganiu i ściskaniu. Charakteryzują one własności zmęczeniowe dla poziomej względnie lekko nachylonej części krzywej Wöhlera (rys. 5). Dla stali praktyczna granica zmęczenia pokrywa się z fizyczną granicą zmęczenia.

Oprócz nieograniczonej i praktycznej wytrzymałości zmęczeniowej rozróżnia się jeszcze tzw. ograniczoną wytrzymałość zmęczeniową Z_{00} . Definiuje się ją jako największą wartość naprężenia okresowo zmiennego (przy danym cyklu), przy której średnia żywotność próbek N_{sr} równa się przyjętej liczbie cykli N . Ograniczona wytrzymałość zmęczeniowa charakteryzuje właściwości zmęczeniowe materiału w zakresie wyraźnie nachylonej części krzywej Wöhlera. Można ją łatwo wyznaczyć wprost z wykresu (rys.5a).

Zmieniając wartość naprężenia średniego σ_m , otrzymuje się inną krzywą Wöhlera oraz inną wartość wytrzymałości zmęczeniowej. Komplet krzywych Wöhlera, wyznaczonych dla różnych wartości σ_m służy do sporządzenia bardziej złożonych wykresów obrazujących właściwości zmęczeniowe materiału w szerokim zakresie zmienności cykli, jak np. wykres Smith'a (rys.6).

Cechą charakterystyczną badań zmęczeniowych jest duży rozrzut otrzymywanych wyników poszczególnych prób. Dlatego też badania muszą być przeprowadzone dla serii próbek a ich wyniki opracowane metodami statystycznymi. Każda próbka z danej serii jest w trakcie próby obciążana aż do zniszczenia lub też do przetrwania liczby cykli odpowiadającej bazie (N_G) próby zmęczeniowej. Liczba próbek w jednej serii może być różna w zależności od rodzaju informacji, będącej celem badań. W przypadku badań statystycznych liczba próbek jest zależna od stosowanej metody statystycznej.

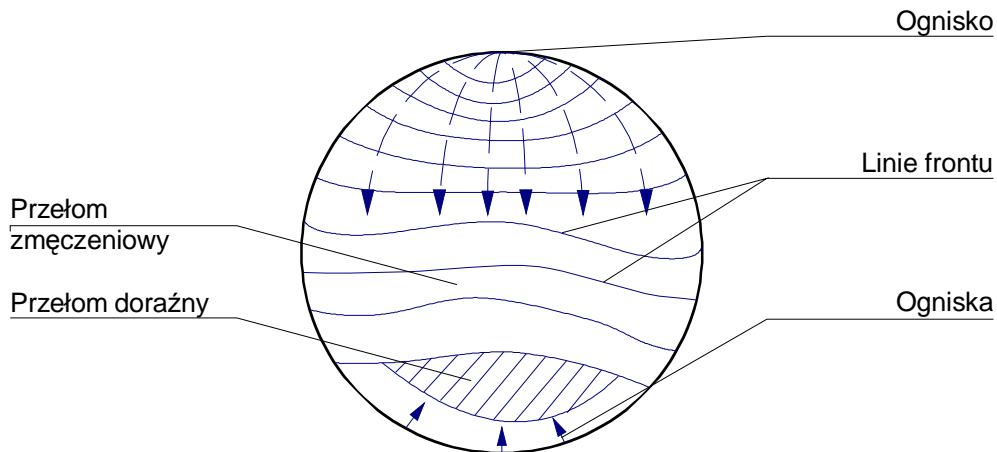


Rys.6. Wykres zmęczeniowy Smith'a, a) metoda wykreślenia, b) uproszczony dla przypadku, gdy $Z_{ij} < R_e$, c) dla przypadku, gdy $Z_{ij} > R_e$

Do badań używa się na ogół nie mniej niż 10 próbek, a w przypadku elementów maszyn - nie mniej niż 6 sztuk. Co najmniej 2 próbki nie powinny ulec zniszczeniu w ciągu N_G cykli przy naprężeniu równym granicy zmęczenia lub o 5% wyższym. Przy dużym rozrzucie właściwości zmęczeniowych, średnią granicę zmęczenia należy wyznaczyć metodą statystyczną, używając do tego celu co najmniej 5 próbek dla danego naprężenia.

2.7. Przełom zmęczeniowy

Badania mikroskopowe wykazały, że istota zmęczenia polega na tworzeniu się w materiale (pod działaniem naprężeń okresowo zmiennych) mikropęknięć, których liczba zwiększa się z czasem i obejmuje coraz większą partię materiału. Gdy przekrój zostanie już dostatecznie osłabiony następuje doraźne zniszczenie elementu.

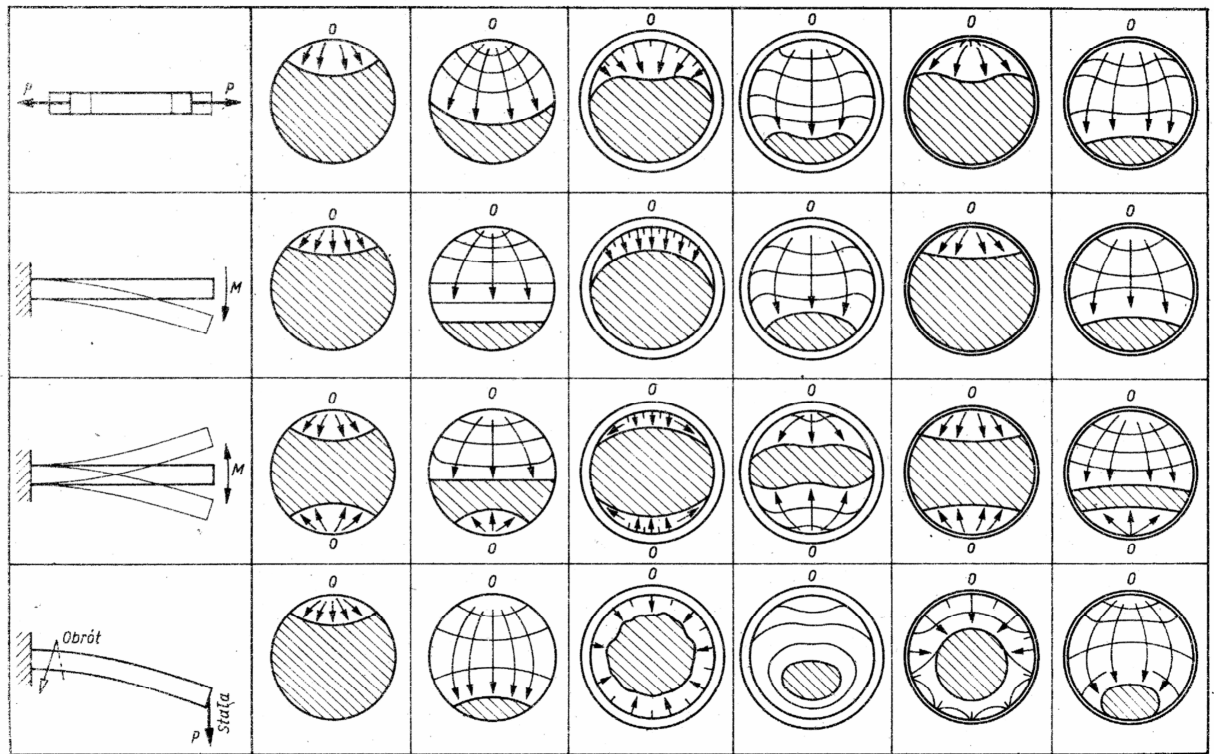


Rys.9. Charakterystyczny przełom zmęczeniowy czopa wału zginanego.

Zniszczenie zmęczeniowe można poznać po charakterystycznym przełomie. Dla większości metali można wyróżnić w nim dwie odmienne strefy, odpowiadające dwóm etapom niszczenia materiału (rys.9). Strefa pierwsza, nazwana **strefą zniszczenia zmęczeniowego** ma zwykle charakterystyczną wygładzoną powierzchnię (w skutek docierania się i doklepywania ścianek szczeliny) o kształtach muszlowych z widocznymi niekiedy tzw. liniami przystankowymi (liniami frontu), świadczącymi o nierównomiernym, skokowym pogłębianiu się szczeliny.

Druga strefa przełomu zmęczeniowego o powierzchni wizualnie bardziej gruboziarnistej powstaje nagle w ostatnim okresie pracy elementu. Ta część przełomu nosi nazwę **strefy doraźnej**. W okolicy przełomu brak jest widocznych odkształceń plastycznych, a więc ma on charakter przełomu kruchego.

Zniszczenia doraźne są uwarunkowane naprężeniami nominalnymi, natomiast zniszczenia zmęczeniowe - naprężeniami lokalnymi. Stąd też istotny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową elementów wywierają wszelkiego rodzaju karby, powodujące lokalne spiętrzenia naprężeń.



Rys.10. Przykłady przełomów zmęczeniowych - schematy.





Rys.10. Przykłady przełomów zmęczeniowych - widoki.

3. Przebieg ćwiczenia

1. Przygotować arkusz protokołu pomiarów wg podanego wzoru (przed przystąpieniem do wykonania ćwiczenia).
2. Zapisać w protokole dane dotyczące próbki i maszyny wytrzymałościowej. Średnicę próbki zmierzyć z dokładnością do 0,05 mm.
3. Zamocować w uchwytach maszyny próbkę z karbem i poddać ją próbie zginania do wystąpienia przełomu zmęczeniowego. Obciążenie próbki przyjąć wg wskazań prowadzącego ćwiczenie.
4. Na papierze milimetrowym sporządzić wykres Wöhlera wg danych pomiarowych oraz podanych przez prowadzącego.
5. Odczytać z wykresu wartość granicy zmęczenia (wytrzymałości zmęczeniowej) Z_{go} .
6. Naszkicować i opisać przełom próbki.

4. Wytyczne do sprawozdania

Sprawozdanie winno zawierać:

1. Określanie celu próby zmęczeniowej zginania.
2. Definicje podstawowych pojęć.
3. Opis przebiegu ćwiczenia.
4. Wykres Wohlera w układzie współrzędnych $\sigma - N$ względnie $\sigma - \lg(N)$, sporządzony na podstawie wyników pomiarów i podanych przez prowadzącego ćwiczenie.
5. Omówienie wyników badań zawierające analizę otrzymanych zależności (wykresów), ocenę stosunku Z_{go} i R_m oraz szkic i opis przełomu próbki.

6. Protokół pomiarów (zawierający schemat obciążania próbki i pomiaru ugięć).
7. Uwagi i wnioski.

5. Literatura

1. K. Grudziński; Ćwiczenia Laboratoryjne z Wytrzymałości Materiałów, *Skrypt PS*.
2. PN-76/H-04325 - *Badanie metali na zmęczenie. Pojęcia podstawowe i ogólne wytyczne przygotowania próbek oraz przeprowadzenia prób.*
3. PN-76/H-04326 - *Badanie metali na zmęczenie. Próba zginania.*
4. *Mały Poradnik Mechanika*, WNT 1984.
5. M. Zakrzewski, J. Zawadzki; *Wytrzymałość materiałów*, PWN 1983.
6. Z. Brzoska; *Wytrzymałość materiałów*, PWN 1974.

Protokół pomiarów

Schemat obciążenia próbki i oraz dane charakterystyczne

Szkic:

Wymiary:

d =mm

a =mm

$w = \pi d^3/32 = \dots\dots\dots\text{mm}^3$

Materiał próbki:....., $R_m = \dots\dots\dots \text{N/mm}^2$, sposób obróbki:.....

Typ maszyny zmęczeniowej:

Obroty wrzeciona maszyny zmęczeniowej $n = \dots\dots\dots 1/\text{min}$.

Wyniki pomiarów

Lp.	Obciążenie	Moment gnący	Napężenie zginające	Liczba cykli	
	$Q = 2P$	$M_g = Pa$	$\sigma_g = M_g/w$	N	Lg(N)
	N	Nmm	N/mm^2		
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

Granica zmęczenia $Z_{go} = \dots\dots\dots \text{N/mm}^2$

$Z_{go}/R_m = \dots\dots\dots$

Data wykonania ćwiczenia

podpis