
Politechnika Lubelska



MECHANIKA

Laboratorium wytrzymałości materiałów ...

Ćwiczenie 11 - Wyznaczanie wytrzymałości zmęczeniowej Z_{rc}

Przygotował: Andrzej Teter
(do użytku wewnętrznego)

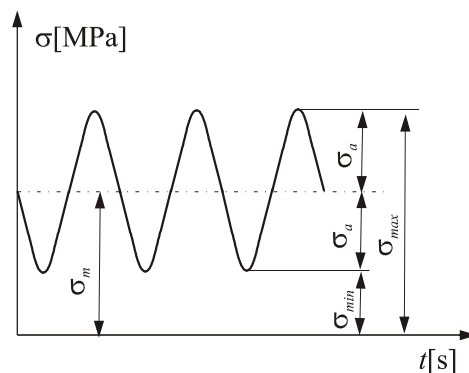
Wyznaczanie wytrzymałości zmęczeniowej Z_{rc}

Podczas eksploatacji różnych konstrukcji, a szczególnie maszyn stwierdzono, że w przypadku długotrwałego działania zmiennych obciążeń elementy konstrukcyjne ulegają zniszczeniu przy naprężeniach znacznie niższych od wytrzymałości doraźnej użytego materiału, wyznaczonej z próby statycznej. Proces ten nazywano **zmęczeniem materiału**. Do najważniejszych czynników, które wpływają na wytrzymałość zmęczeniową zalicza się: widmo obciążenia, wielkość amplitudy naprężeń w cyklu, a także wartość średniego naprężenia, kształt elementu, wielkość elementu, jakość powierzchni, działanie dodatkowych czynników eksploatacyjnych np. korozji, zużycia, naprawy.

Obciążenia zmienne

Obciążenia zmienne wywołując zmęczenie elementów konstrukcyjnych mogą mieć charakter przebiegów **ustalonych** lub **nieustalonych**. Przy obciążeniach ustalonych (okresowych) siły działające na konstrukcję zmieniają się w sposób periodyczny. Oznacza to, że rozpatrywane w dowolnej chwili obciążenie powtarza się identycznie co do wartości, kierunku i zwrotu po upływie pewnego stałego przedziału czasu zwanego okresem T . Do najprostszego typu obciążenia okresowego zalicza się **obciążenia harmoniczne** zmieniające się zgodnie z funkcją sinus bądź cosinus. W praktyce są spotykane obciążenia o charakterze losowym np. siły wzajemnych oddziaływań samochód-droga.

W przypadku osiowego rozciągania bądź ściskania na analizowany element może działać stałe naprężenie σ_m oraz harmonicznie zmienne naprężenie o amplitudzie σ_a i częstotliwości ω (rys. 1).



Rys. 1

Na skutek działania tych sił w przekroju poprzecznym analizowanego elementu występuje jednoosiowy stan naprężeń o głównym, chwilowym naprężeniu normalnym σ równym:

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega \cdot t = \frac{P_m}{S_o} + \frac{P_a}{S_o} \sin \omega \cdot t \quad (1)$$

gdzie: P_a - amplituda siły, P_m - średnie siła cyklu, S_o - pole przekroju poprzecznego. Maksymalną wartość naprężeń zmiennych oznacza się σ_{\max} zaś minimalną wartość naprężeń - σ_{\min} . Ze wzoru (1) wynika:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \sigma_m + \sigma_a \\ \sigma_{\min} &= \sigma_m - \sigma_a \end{aligned} \quad (2)$$

Znając wartości naprężeń: σ_{\max} oraz σ_{\min} można obliczyć amplitudę naprężenia σ_a i naprężenie średnie σ_m :

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \\ \sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

Stosunek naprężeń średnich σ_m do amplitudy naprężenia σ_a jest nazywany **współczynnikiem stałości obciążenia**:

$$H = \frac{\sigma_m}{\sigma_a} \quad (4)$$

a stosunek wartości maksymalnego naprężenia σ_{\max} do wartości minimalnej σ_{\min} **współczynnikiem asymetrii cyklu**:

$$R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (5)$$

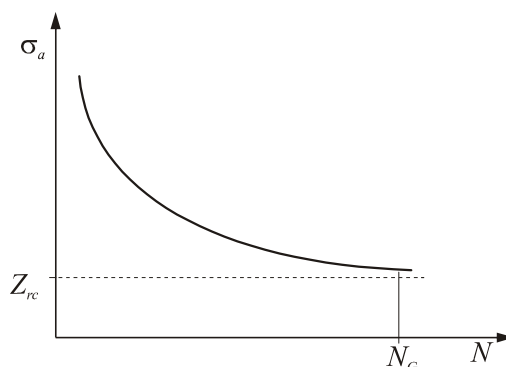
Dowolny okresowy zmienny stan naprężeń (1), w którym σ_{\max} oraz σ_{\min} mają taki sam znak nazwano **cyklem jednostronnym (tętniącym)**, a cykl, w którym naprężenia σ_{\max} oraz σ_{\min} różnią się znakami – **dwustronnym**. Szczególnym przypadkiem cyklu jednostronnego jest **cykl odzerowy tętniący**, dla którego jedno z naprężeń σ_{\max} bądź σ_{\min} jest równe zero ($H=1$, $R=0$ lub $H=-1$, $R=\infty$). Zaś szczególnym przypadkiem cyklu dwustronnego jest **cykl wahadłowy**, dla którego naprężenia σ_{\max} oraz σ_{\min} są równe co do wartości i różne co do znaku ($H=0$, $R=-1$).

Przedstawienie graficzne wyników badań zmęczeniowych

Wyniki badań zmęczeniowych zazwyczaj przedstawia się graficznie za pomocą wykresów Wöhlera, Smitha lub Haigha. Wykres Wöhlera stosuje się wówczas, gdy są przeprowadzane badania, mające na celu wyznaczanie wytrzymałości

zmęczeniowej w warunkach określonego cyklu obciążenia. Krzywą Wöhlera można także wykonać dla serii próbek badanych przy jednakowym średnim naprężeniu $\sigma_m = \text{const}$ czy też w wyniku badań próbek przy cyklach, dla których współczynnik asymetrii cyklu jest wielkością stałą $R = \text{const}$ lub przy stałym minimalnym naprężeniu $\sigma_{\min} = \text{const}$.

Dla charakterystyki własności zmęczeniowych, w zakresie dowolnych obciążeń niesymetrycznych, buduje się wykres naprężeń granicznych Haigha lub Smitha. Wykresy te charakteryzują zachowanie się materiału przy różnych cyklach obciążenia, a są sporządzane na podstawie wykresów Wöhlera wykonanych przy różnych cyklach obciążeń.



Rys. 2

Wykres Wöhlera sporządza się zaznaczając maksymalne σ_{\max} lub amplitudę naprężeń σ_a na osi rzędnych, oraz liczbę cykli do momentu zniszczenia N na osi odciętych. Liczne badania zmęczeniowe wykazały, że punkty reprezentujące wyniki doświadczeń skupiają się w pobliżu pewnej linii, którą nazwano **krzywą (wykresem) Wöhlera** (rys. 2). Krzywa Wöhlera zbliża się asymptotycznie do prostej o rzędnej odpowiadającej naprężeniu Z , to jest **wytrzymałości na zmęczenie materiału**. W przypadku szczególnych cykli naprężeń dodaje się do oznaczenia wytrzymałości na zmęczenie Z dwa indeksy. Pierwszy indeks określa rodzaj obciążenia (*r*-rozciąganie, *g*-zginanie, *s*-skręcanie, *c*-ściskanie), zaś drugi indeks rodzaj cyklu naprężeń (*j*-tętniący, *o*-wahadłowy). Wytrzymałość na zmęczenie przy wahadłowym rozciąganiu-ściskaniu oznacza się - Z_{rc} , zaś przy próbie odzerowo tętniącego rozciągania - Z_{rj} . Stwierdzono, że położenie asymptoty linii wykresu Wöhlera można wyznaczyć z wystarczającą dla praktyki dokładnością, podając rzędną punktu o odciętej równej pewnej określonej dla danego materiału granicznej liczbie N_G cykli zmęczeniowych. Graniczną liczbę cykli zmęczeniowych N_G nazywa się **bazą próby zmęczeniowej**. Przyjmując graniczną liczbę cykli N_G zakłada się jednocześnie, że osiągnięcie przez próbkę tej liczby obciążeń zapewnia dalsze nieograniczone znoszenie przez nią okresowo zmiennych obciążeń o tym samym charakterze i wartości. Zgodnie z normą PN-H-04325:1976 wartość N_G dla stali wynosi 10^7 cykli, a dla metali i stopów żelaznych mieści się w granicach: $2 \cdot 10^7 - 10^8$ cykli w zależności od rodzaju stopu. Zakres, w którym $N < N_G$, nazywa się **zakresem ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej**, opa-

trując tą samą nazwą również wartości naprężeń w tym przedziale. Wykres Wöhlera często przedstawia się w układzie półlogarytmicznym (oś odciętych $\log N$, oś rzędnych σ_a) lub dwulogarytmicznym (oś odciętych $\log N$, oś rzędnych $\log \sigma_a$). W tych układach osi współrzędnych wykres Wöhlera ma dla niektórych materiałów przebieg zbliżony do odcinków linii prostej.

Należy podkreślić, że wyniki nawet bardzo starannie wykonanych badań zmęzeniowych wykazują znaczny rozrzut. Właściwe ujęcie wyników badań zmęzeniowych wymaga opracowania ich metodami statystycznymi. W związku z tym wykresy zmęzeniowe należy traktować jako linie uzyskane przez uśrednienie dużej liczby wyników badań zmęzeniowych przeprowadzanych na tym samym materiale i w identycznych warunkach pomiarów. W praktyce dla uniknięcia niepewności przy wyznaczaniu naprężeń dopuszczalnych w elementach pracujących w warunkach zmiennych obciążeń, często stosuje się wykresy zmęzeniowe oparte na liniach, które ograniczają od dołu pasmo rozrzutu wyników odpowiednich badań zmęzeniowych.

Na zakończenie warto dodać, że na podstawie badań statystycznych ustalono przybliżone relacje zachodzące pomiędzy wytrzymałością na zmęczenie a granicą plastyczności R_e i doraźną wytrzymałością na rozzerwanie R_m dla próbek wykonanych z różnych materiałów obciążonych w sposób prosty (np. rozciąganych, ściskanych, zginanych, skręcanych lub ścinanych). Dla prostego rozciągania zachodzą następujące przybliżone zależności:

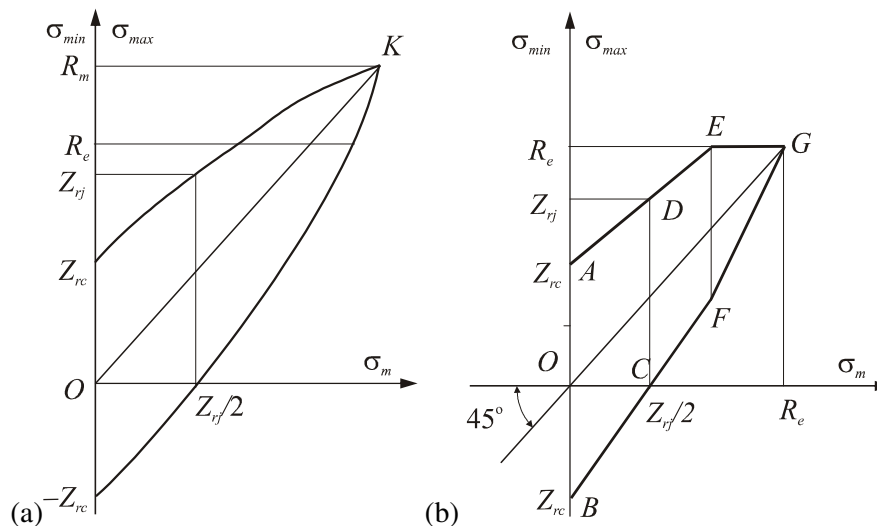
Tabela 1

Material	Z_{rj}	Z_{rc}
Stale węglowe	$0,56 \cdot R_m$	$0,31 \cdot R_m$
Stale stopowe	$0,52 \cdot R_m$	$0,31 \cdot R_m$
Żeliwo szare	$0,44 \cdot R_m$	$0,30 \cdot R_m$
Mosiądz	$0,50 \cdot R_m$	$0,31 \cdot R_m$
Brąz	$0,44 \cdot R_m$	$0,26 \cdot R_m$
Stop aluminium	$0,48 \cdot R_m$	$0,29 \cdot R_m$
Stop magnezu	$0,52 \cdot R_m$	$0,31 \cdot R_m$

Wykres Wöhlera przedstawia w sposób graficzny wyniki badań zmęzeniowych dla wybranego cyklu obciążeń. Wykonując szereg prób zmęzeniowych dla różnych cykli obciążeń otrzymuje odpowiednio wytrzymałość zmęzeniową próbki dla określonego cyklu obciążeń.

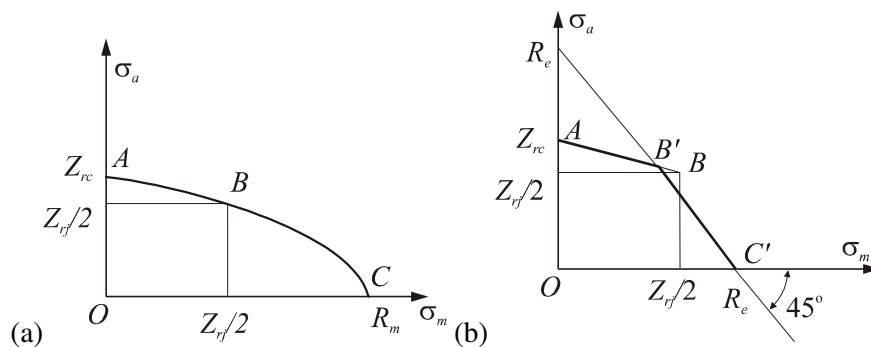
Zestawienie graficzne wyznaczonych wytrzymałości na zmęczenie określonych dla szeregu różnych wartości naprężenia średniego σ_m i amplitudy cyklu σ_a umożliwia **wykres Smitha** (rys. 3a). W celu zbudowania tego wykresu przyjmuje się prostokątny układ współrzędnych, w którym na osi odciętych zaznaczono naprężenia średnim σ_m , a oś rzędnych – naprężenia równe wytrzymałości na zmęczenie Z odpowiadające danemu σ_m . Punkty tworzące wykres Smitha wyznacza się zaznaczając dla każdego σ_m wartość odpowiadającą wytrzymałości zmęzeniowej $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$ (górną gałąź wykresu Smitha) oraz wartość

$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$ – dolna gałąź wykresu Smitha. Procedurę można uprościć wykreślając przez początek układu współrzędnych prostą pod kątem 45° (punkty ją tworzące mają równe współrzędne wynoszące σ_m) a następnie od tej prostej dla każdej wartości σ_m pionowo w górę oraz w dół odłożyć wyznaczoną z wykresu Wöhlera wartość σ_a odpowiedniego cyklu granicznego. Na rys. 3a zaznaczono charakterystyczne wartości wytrzymałości na zmęczenie: Z_{rc} - przy wahadłowym rozciąganiu-ściskaniu, Z_{rj} - przy próbie odzerowo tętniącego rozciągania. Wartość naprężenia R_m , odpowiadającą najwyższemu punktowi na wykresie Smitha nazywa się **wytrzymałością długotrwałą materiału**. Naprężenie R_m można uważać za granicę wytrzymałości zmęczeniowej przy amplitudzie obciążenia dążącej do zera. Miękka stal konstrukcyjna wykazuje w badaniach statycznych wyraźną granicę plastyczności R_e . Stwarza to niebezpieczeństwo pojawienia się w materiale odkształceń plastycznych gdy $\sigma_{\max} > R_e$. Z tego względu ogranicza się wykres Smitha poziomą linią o współrzędnej równej R_e . Zwykle stosowane jest inne jeszcze uproszczenie przebiegu wykresu Smitha polegające na zastąpieniu pozostałych krzywoliniowych części wykresu odcinkami prostych. Wykres Smitha złożony z odcinków prostych da się zwykle wykreślić, jeżeli znamy wartości podstawowych wielkości wytrzymałościowych jak granicy plastyczności R_e oraz wytrzymałości na zmęczenie dla obciążeń tętniących Z_{rj} oraz dla obciążeń wahadłowych Z_{rc} . **Uproszczony wykres Smitha** (rys. 3b) przy rozciąganiu stali buduje się następująco: na osi rzędnych w górę i w dół odmierza się wartość Z_{rc} . Następnie na osi odciętych odmierza się wartość $\sigma_m = 0,5Z_{rj}$, a na osi rzędnych wartości Z_{rj} (punkt D). Przez punkty A i D oraz B i C prowadzi się proste. Następnie odmierza się na osi rzędnych i odciętych wartości R_e . Prowadząc pionową linię z punktu $(0, R_e)$ wyznacza się punkt G. Uproszczony wykres Smitha dla rozciągania przedstawia linię łamaną AEGFB (rys. 3).



Rys. 3

Często wykresy zmęczeniowe rysuje się jedynie w zakresie dodatnich wartości σ_m , przyjmując dla prostoty, że całkowity wykres Smitha jest biegunowo symetryczny względem początku O układu współrzędnych. Należy jednak pamiętać, że dla różnych gatunków stali konstrukcyjnej a szczególnie żeliwa obserwuje się znaczący wzrost wartości granicznych naprężeń w obszarze ściskania i dlatego w rzeczywistości wykresy Smitha wykazują zwykle różne własności w obszarze ściskania i rozciągania.



Rys. 4

Wyniki badań zmęczeniowych można graficznie przedstawić na **wykresie Haigha** (zamiast na wykresie Smitha), który rysuje się w prostokątnym układzie współrzędnych, odkładając na osi odciętych wartości σ_m , a na osi rzędnych wartości σ_a (rys. 4). Wykres Haigha można uprościć podobnie jak wykres Smitha, zastępując rzeczywisty wykres odcinkami prostych. **Uproszczony wykres Haigha** (rys. 4b) buduje się następująco: na osi rzędnych odmierza się wartość Z_{rc} . Następnie na osi rzędnych i odciętych odmierza się wartość $0,5Z_{rf}$ i wyznacza punkt B. Na osi rzędnych i odciętych odmierza się wartości R_e . Na koniec łączymy jak na rys. 4b. Łamana $AB'C'$ przedstawia uproszczony wykres Haigha.

Metodyka wyznaczania charakterystyki zmęczeniowej

Przy określaniu wytrzymałości na zmęczenie materiału należy przeprowadzić badania jednakowych próbek przy kilku różnych poziomach naprężeń. Charakterystykę zmęczeniową można określać dla różnych wartości: σ_a , σ_m , σ_{min} lub R . Próbę osiowego rozciągania-ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych należy prowadzić zgodnie z normą PN-H-04327:1974. Norma dopuszcza do badań gładkie próbki o stałym przekroju płaskim bądź okrągłym, próbki z karbem typu U bądź V oraz płaskie próbki z otworem. Należy podkreślić, że w procesie przygotowania próbki nie mogą zmienić swoich właściwości zmęczeniowych. Proces ich przygotowania musi wykluczyć powstawanie pęknięć, rys bądź innych wad powierzchniowych, przypaleń szlifierskich, zgniotu powierzchniowego itp. Należy również bacznie zwrócić uwagę na chropowatość powierzchni.

Badania należy zaczynać od najwyższego poziomu naprężeń, przy którym wystąpi zniszczenie próbek po około 10^4 cyklach, a następnie kolejno obniżać poziomy naprężeń aż do momentu, w którym badane próbki nie ulegną zniszczeniu przy N_G cyklach odpowiadających przyjętej podstawie próby zmęczeniowej. Przy badaniach wskaźników zmęczenia metali dla stali stosuje się podstawę 10^7 cykli, a dla metali i stopów nieżelaznych podstawę $2 \cdot 10^7 - 10^8$ cykli w zależności od rodzaju stopu.

Wyniki badań nanosi się na wykres Wöhlera w skali półlogarytmicznej. Poziomy lub lekko nachylony odcinek krzywej Wöhlera wyznacza wartość wytrzymałości na zmęczenie materiału. Liczba próbek badanych na poziomie naprężeń odpowiadających wytrzymałości na zmęczenie nie może być mniejsza niż 3 sztuki. Liczba poziomów naprężeń do sporządzenia krzywej Wöhlera dla wyznaczenia wytrzymałości na zmęczenia nie może być niższa od 5. Celowe jest zwiększenie liczby próbek badanych na każdym poziomie naprężeń gdyż zwiększa to dokładność wyznaczania charakterystyk zmęczenia metali.

Próbki z jednej serii należy badać przy tej samej częstotliwości zmian obciążenia. Częstotliwość obciążenia w przypadku badań metali powinna mieścić się w granicach od 5 do 100 Hz. Dopuszcza się do stosowania innych częstotliwości, ale wyłącznie do prób specjalnych. Wskazane jest prowadzenie prób zmęczeniowych bez przerw. W czasie próby zmęczeniowej próbka nie powinna się zbyt nagrzewać. Dopuszczalne jest tylko takie podwyższenie temperatury, które nie wpływa na wyniki próby (np. temperatura próbki stalowej nie może przekroczyć 50°C).

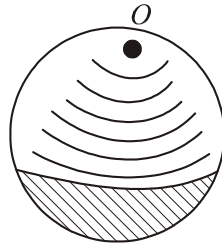
Przełom zmęczeniowy

Pęknięcie zmęczeniowe jest inicjowane przez lokalne uszkodzenia tzw. **ognisko**, które powstaje w miejscach spiętrzenia naprężeń (np. ostre podcięcie, gwałtowne zmiany przekrojów, rysy, korozyjne wżery) lub wad materiałowych (np. pory, wtrącenia niemetaliczne). Zapoczątkowane w ogniskach małe lokalne pęknięcia rozwijają się i obejmują coraz większą część przekroju poprzecznego. Pęknięcia stopniowo rozwijają się aż do momentu, w którym pozostała nienaruszona część przekroju ulegnie zniszczeniu w sposób nagły.

Obserwując typowe przełomy zmęczeniowe można wyróżnić dwie strefy zniszczenia różniące się wyglądem. Strefa pierwsza nazywana **strefą zniszczenia zmęczeniowego** ma charakterystyczną wygładzoną i błyszczącą powierzchnię poprzecinaną liniami przedstawiającymi kolejne położenia czoła szczeliny zmęczeniowej (tzw. **linie spoczynkowe**). Podczas stopniowego rozwoju pęknięcia obydwie powierzchnie okresowo naciskają na siebie, co powoduje ich ścięcie. Im częściej naciskają na siebie, tym gładsza jest powierzchnia przełomu.

Druga strefa przełomu zmęczeniowego o matowej, ziarnistej powierzchni powstaje nagle w ostatnim okresie pracy elementu gdy naprężenia maksymalne cyklu przekroczą wartość naprężeń dopuszczalnych R_m dla materiału próbki. Ta

część przełomu nosi nazwę **strefy doraźnej** i nie różni się niczym od przełomów uzyskiwanych w próbach statycznych.



Rys. 5

Na rys. 5 zakreskowana część przełomu odpowiada strefie doraźnej, zaś części niezakreskowana - strefie zmęczeniowej. Literami O oznaczono ogniska. Przedstawiony przekrój był stosunkowo słabo obciążony ponieważ ma bardzo rozwiniętą strefę zmęczenia. Ponieważ do przeniesienia danego obciążenia - ze względu na jego stosunkowo małą wartość - wystarcza mała część przekroju, przeto proces rozwoju pęknięcia zmęczeniowego trwał długo i w tym czasie następuje wyraźnie widoczne na przełomie wygładzenie strefy zmęczeniowej. Ogólnie ujmując próbki silnie obciążone charakteryzują się dużą powierzchnią strefy doraźnej a małą powierzchnią strefy zmęczeniowej, zaś w przypadku próbki słabo obciążonej sytuacja jest odwrotna.

Przyspieszone badania zmęczeniowe

Czasochłonność i bardzo duże koszty prowadzenia badań zmęczeniowych zmusiły badaczy do poszukiwania metod przyspieszonych służących doświadczałnemu wyznaczeniu wytrzymałości zmęczeniowej. Opracowano szereg metod badań przyspieszonych, ale nie istnieje dotychczas żadna całkowicie pewna metoda umożliwiająca uzyskanie pełnej krzywej Wöhlera. W literaturze najczęściej spotyka się następujące metody przyspieszone:

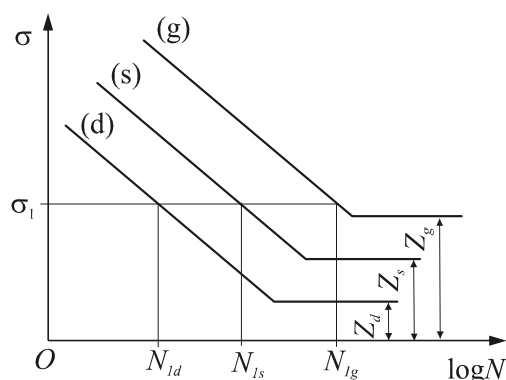
- a) **metoda Lehra**, która wykorzystuje zjawisko polegające na tym, że po przekroczeniu wartości amplitudy naprężeń zmiennych, bliskiej wytrzymałości zmęczeniowej, w badanych próbkach występuje wyraźny wzrost temperatury, odkształcenia oraz rozpraszania energii. Istotą tej metody jest zastosowanie zmiennego obciążenia o amplitudach rosnących i dokonywanie jednocześnie pomiarów, na przykład zmian temperatury bądź też odkształceń badanej próbki, a także zmian momentu obrotowego. W efekcie uzyskuje się dane pozwalające sporządzić szereg wykresów zależności tych wielkości od wzrastającej amplitudy naprężenia. Okazuje się, że przy małych wartościach amplitudy - zależności te są liniowe, natomiast gdy amplituda naprężeń zmiennych przekroczy wartość wytrzymałości na zmęczenie, wykresy zakrzywiają się odchylając od pierwotnych linii prostych.
- b) **metoda Prot**. W tej metodzie stosuje się obciążenie zmienne o narastającej

w sposób ciągły amplitudzie aż do zniszczenia próbki. Wzrost wartości amplitudy obciążenia odbywa się ze stałą prędkością. Zwykle do badań przyjmuje się 3 różne prędkości narastania amplitudy. W wyniku badań uzyskuje się trzy punkty krzywej Prot leżące nad krzywą Wöhlera. Można to wyjaśnić w ten sposób, że określonej liczbie cykli zmian obciążenia odpowiada punkt krzywej Wöhlera przedstawiający wartość amplitudy, która stale oddziaływała na daną próbkę, natomiast odpowiadający tej liczbie cykli punkt krzywej Prot przedstawia wartość końcową wzrastającej amplitudy. Zatem próbka badana metodą Prot jako słabiej obciążona, w czasie swej pracy, jest w końcowym okresie w stanie przeniesić naprężenia zmienne o większej wartości amplitudy.

- c) **metoda Locati.** Metoda ta pozwala oszacować wartość wytrzymałości na zmęczenie przez schodowe narastanie (aż do zniszczenia) amplitudy naprężeń cyklu.

Metoda Locati

Do przeprowadzenia badań metodą Locati należy znać przebieg krzywej Wöhlera dla analizowanego przypadku zmęczenia oraz dodatkowo rozrzut wyników badań doświadczalnych, które posłużyły do jego sporządzenia (rys. 6).



Rys. 6

Przygotowanie wykresu Wöhlera łącznie z rozrzutem wymaga przeprowadzenia badań na wielu próbkach tak aby można było przeprowadzić analizę statystyczną. Jeżeli dla dowolnego poziomu naprężeń σ_1 narysować wykres prawdopodobieństwa pęknięcia próbki to będzie to dla odpowiednio dużej ilości próbek rozkład normalny Gaussa. Wartości średnie rozkładów normalnych dla wszystkich analizowanych poziomów naprężeń σ_i wyznaczają krzywą Wöhlera - krzywą (s). Aby określić rozrzut górny i dolny należy dla ustalonego poziomu ufności α określić przedział ufności tzn zakres zmienności liczby cykli N powodujących zniszczenie próbki z prawdopodobieństwem $(1-\alpha) \cdot 100\%$. Granice przedziału ufności dla poziomu naprężeń σ_1 wynoszą: dolna N_{ld} zaś górna N_{lg} czyli

$N \in \langle N_{1d}, N_{1g} \rangle$. Łącząc dla wszystkich poziomów naprężeń σ_i dolne granice przedziałów ufności otrzymuje się dolny rozrzut krzywej Wöhlera - łamaną (d), zaś łącząc górną granicę - górny rozrzut łamaną (g).

Na wstępie badań metodą Locati przyjmuje się początkową amplitudę naprężenia σ_1 działających na badaną próbkę. Wartość naprężenia σ_1 nie może przekroczyć wartości Z_d dolnego rozrzutu krzywej Wöhlera. Dodatkowo określa się kolejne stopnie obciążenia przyjmując stały przyrost amplitudy $\Delta\sigma$. Po obciążeniu próbki zmiennymi siłami wywołującymi w próbce przyjęty poziom naprężenia σ_1 i określony cykl obciążeń próbka pracuje określoną liczbę cykli zmęczeniowych n_1 . Jeżeli nie uległa zniszczeniu po przepracowaniu n_1 cykli zmęczeniowych, to należy skokowo zwiększyć obciążenia tak aby amplituda naprężeń wzrosła o przyjętą wartość $\Delta\sigma$ i zrealizować n_2 cykli. Jeżeli próbka nie pękła to ponownie należy zwiększyć amplitudę o $\Delta\sigma$ i wykonać n_3 cykli. Postępowanie należy powtarzać aż do zniszczenia próbki. Na każdym poziomie naprężeń należy realizować jednakową liczbę cykli n_i . Wartość przyrostu amplitudy $\Delta\sigma$ oraz liczba cykli n_i nie mają wpływu na dokładność otrzymanych wyników.

Wytrzymałość zmęczeniową badanej próbki określa się z hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. W procesie zmęczenia po każdym cyklu obciążeń w materiale badanej próbki powstają nowe uszkodzenia wewnętrzne, które w miarę narastania liczby cykli kumulują się w efekcie prowadząc próbkę do zniszczenia. W celu oszacowania wielkości uszkodzeń zmęczeniowych przyjmuje się miarę uszkodzeń jako funkcję liczby przepracowanych przez próbkę liczby cykli obciążenia n . Jeżeli próbka przepracowała n_1 cykli pod działaniem stałej amplitudy naprężenia σ_1 to za miarę uszkodzeń można przyjąć:

$$H_1 = \frac{n_1}{N_1} \quad (6)$$

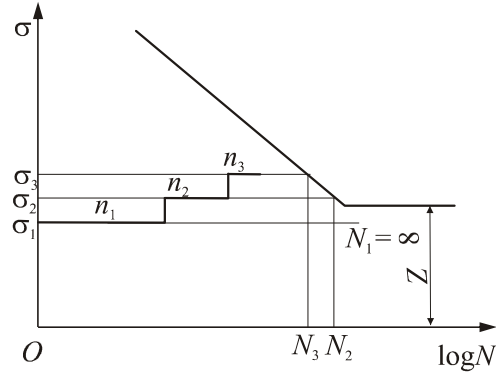
gdzie N_1 – oznacza liczbę cykli powodujących zniszczenia próbki na analizowanym poziomie obciążeń (wartość N_1 odczytuje się z wykresu Wöhlera – rys. 7).

Problem z kumulacją uszkodzeń powstaje w momencie gdy próbka obciążana jest schodkowo (rys. 8) ponieważ uszkodzenia powstają na różnych poziomach obciążenia. Sumowanie uszkodzeń w tym przypadku odbywa się wg przyjętej hipotezy. W literaturze można spotkać bardzo wiele hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, do prostoty rozważań przyjęto najprostszą z nich tzw. hipotezę liniową. Zgodnie z tą hipotezą warunek zniszczenia próbki pracującej na wielu poziomach obciążenia można zapisać w postaci równania:

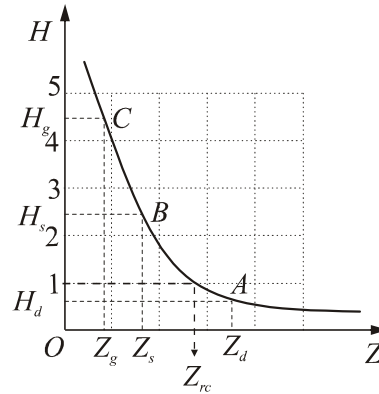
$$H = \sum_{i=1}^q H_i = \sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (7)$$

gdzie: q – liczba poziomów obciążenia, n_1, n_2, \dots, n_q – liczba cykli obciążenia (fizycznie wykonana przez próbkę) o amplitudach równych odpowiednio $\sigma_1, \dots, \sigma_q$, N_1, N_2, \dots, N_q – liczba cykli obciążenia o amplitudach równych odpowiednio

$\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_q$ powodujących zniszczenie próbki (wartości odczytuje się z wykresu Wöhlera – rys. 8).



Rys. 7



Rys. 8

W metodzie Locati wytrzymałość zmęczeniową wyznacza się metodą interpolacyjną sporządzając wykres sumy miar zniszczenia H oddzielnie dla każdej z 3 krzywych wykresu Wöhlera. Na osi rzędnych wykresu interpolacyjnego zaznaczono sumę miar zniszczenia H , zaś na osi odciętych wartość wytrzymałości zmęczeniowej Z . Następnie oblicza się H_g dla górnego rozrzutu wykresu Wöhlera, H_d – dolnego rozrzutu, H_s – wartości średniej (rys. 8):

$$H_g = \sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_{ig}} \quad H_d = \sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_{id}} \quad H_s = \sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_{is}} \quad (8)$$

Dodatkowo z wykresu Wöhlera odczytuje się wartości wytrzymałości na zmęczenie oddzielnie dla każdej krzywej odpowiednio: Z_g , Z_d , Z_s . Współrzędne $A(Z_d, H_d)$, $B(Z_s, H_s)$, $C(Z_g, H_g)$ wyznaczają trzy punkty wykresu, które należy połączyć krzywą gładką (rys. 8). Poszukiwaną wartość wytrzymałości na zmęczenie dla badanej próbki wyznacza się z liniowej hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych (7). W tym celu na osi rzędnych zaznacza się wartość $H=1$ i odnosząc na wykres odczytuje na osi odciętych wartość wytrzymałości na zmęczenie Z_{rc} .

Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny
Katedra Mechaniki Stosowanej
Laboratorium Wytrzymałości Materiałów

<i>Imię i nazwisko</i>	<i>Grupa</i>	<i>Data wykonania</i>	<i>Prowadzący</i>	<i>Ocena</i>

Laboratorium Wytrzymałości Materiałów

Wyznaczanie wytrzymałości zmęczeniowej Z_{rc}

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest doświadczalne wyznaczenie wytrzymałości na zmęczenie przy wahadłowym rozciąganiu-ściskaniu Z_{rc} oraz sporządzenie uproszczonego wykresu zmęczeniowego Smitha i Haigha, dla zadanych wartości wyraźnej granicy plastyczności R_e i wytrzymałości na rozciąganie R_m badanego materiału.

2. Opis stanowiska badawczego

Badania zmęczeniowe zostaną przeprowadzone na hydraulicznym pulsatorze firmy MTS z oprzyrządowaniem. Maszyna ta pozwala prowadzić badania zmęczeniowe dla dowolnego cyklu rozciągania i ściskania. Badana próbka mocowana jest w szczękach. Komputerowe sterowanie pozwala w dowolny sposób zadawać obciążenie rozciągające lub ściskające i jednocześnie wizualizować przebieg próby.

3. Przebieg ćwiczenia

1. Przed przystąpieniem do próby należy zapoznać się z normami PN-H-04325:1976 i PN-H-04327:1974.
2. Zmierzyć wszystkie wymiary próbki i sprawdzić, czy próbka jest zgodna z normą.
3. Korzystając z wcześniej przygotowanego wykresu Wöhlera z rozrzutem dolnym i górnym dobrać amplitudę obciążenia dla pierwszego poziomu obciążenia σ_1 . W uzgodnieniu z prowadzącym dobrać przyrost amplitudy naprężeń $\Delta\sigma$ i liczbę cykli obciążenia n_i .
4. Zamocować próbkę w uchwytach maszyny zmęczeniowej.

5. Obliczyć i ustawić obciążenie odpowiadające amplitudzie σ_1 .
6. Uruchomić maszynę i zrealizować założoną liczbę cykli n_1 .
7. Jeżeli próbka nie uległa zniszczeniu wyłączyć maszynę i zwiększyć obciążenie tak aby amplituda naprężeń wzrosła o $\Delta\sigma$.
8. Ponownie uruchomić maszynę i zrealizować założoną liczbę cykli n_1 .
9. Czynności 7 i 8 powtarzać aż do zniszczenia próbki.
10. Wyniki notować w tabeli pomiarów.
11. Dla każdego poziomu amplitudy naprężeń $\sigma_i = \sigma_1 + (i-1)\Delta\sigma$ wyznaczyć liczbę cykli N_i niszczących próbkę niezależnie dla każdego z trzech wykresów Wohlera.
12. Obliczamy dla każdego z wykresów sumę miar zniszczenia H odpowiednio: H_g dla górnego rozrzutu wykresu Wöhlera, H_d – dolnego rozrzutu, H_s - wartości średniej.
13. Wyznaczyć granicę wytrzymałości zmęczeniowej badanej próbki.
14. Wykonać uproszczony wykres Smitha i Haigha dla zadanych R_m i R_e przyjmując Z_{rj} z tabeli 1.

4. Opracowanie wyników

Wykres do interpolacyjnego wyznaczenia granicy zmęczenia

Na osi rzędnych wykresu interpolacyjnego zaznaczono sumę miar zniszczenia H , zaś na osi odciętych wartość wytrzymałości zmęczeniowej Z . Następnie oblicza się H_g dla górnego rozrzutu wykresu Wöhlera, H_d – dolnego rozrzutu, H_s - wartości średniej (rys. 8):

$$H_g = \sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_{ig}} \quad H_d = \sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_{id}} \quad H_s = \sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_{is}}$$

Dodatkowo z wykresu Wöhlera odczytuje się wartości wytrzymałości na zmęczenie oddzielnie dla każdej krzywej odpowiednio: Z_g , Z_d , Z_s . Współrzędne $A(Z_d, H_d)$, $B(Z_s, H_s)$, $C(Z_g, H_g)$ wyznaczają trzy punkty wykresu, które należy połączyć krzywą gładką. Poszukiwaną wartość wytrzymałości na zmęczenie dla badanej próbki wyznacza się z liniowej hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. W tym celu na osi rzędnych zaznacza się wartość $H=1$ i odnosząc na wykres odczytuje na osi odciętych wartość wytrzymałości na zmęczenie Z_{rc} .

5. Wykonanie sprawozdania

Sprawozdanie należy wykonać zgodnie z załączonym szablonem. Powinno zawierać następujące dane:

1. Charakterystyka materiału:
2. Charakterystyka użytych urządzeń pomiarowych:
3. Dane dotyczące próbki i warunki badania:
4. Wyniki:
 - a) odczytane z wykresu Wöhlera liczby cykli powodujące zniszczenie próbki na każdym poziomie naprężeń,

- b) wartości miar zniszczenia H oddzielnie dla każdego poziomu naprężeń,
 - c) skumulowane wartości uszkodzeń,
 - d) wykres interpolujący wartość wytrzymałości na zmęczenia Z ,
 - e) określenie miejsca pęknięcia,
 - f) opis przełomu,
 - g) odczytane z tabel wartości wytrzymałości materiału próbki R_e i R_m ,
 - h) obliczona wartość Z_{rj} wg zależności zamieszczonych w tabeli 1,
 - i) uproszczony wykres Smitha i Haigha.
5. Wnioski i uwagi końcowe.

6. Zarys próbki.

7. Charakterystyka materiału próbki.

8. Wymiary próbki i inne dane:

9. Przebieg próby:*Tabela 1*

Lp.	σ_i	n_i	N_{id}	N_{id}	N_{ig}
	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
1					
2					
3					
4					
5					

10. Wyniki obliczeń:*Tabela 2*

Lp.	σ_i	n_i	H_{id}	H_{is}	H_{ig}
	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
1					
2					
3					
4					
5					
SUMA					

Tabela 3

Lp.	H_d	H_s	H_g	Z_d	Z_s	Z_g
	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
1						
2						
3						
4						
5						

11. Wykres do interpolacyjnego wyznaczenia granicy zmęzeniowej Zrc:

12. Uproszczony wykres Smitha i Haigha:

13. Wnioski i uwagi końcowe.