

# Wytrzymałość Materiałów II

## Wytrzymałość zmęczeniowa

opracował:

dr hab. inż. Paweł JASION

e-mail: `pawel.jasion@put.poznan.pl`

www: `pawel.jasion.pracownik.put.poznan.pl`

Politechnika Poznańska

Instytut Mechaniki Stosowanej

Zakład Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji

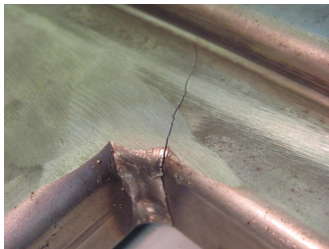
- 1 Zjawisko pęknięcia zmęczeniowego
  - Wprowadzenie
- 2 Badania zmęczeniowe
  - Przeprowadzanie testów
  - Widmo obciążeń
- 3 Projektowanie na zmęczenie
  - Podejścia do projektowania
  - Obliczenia zmęczeniowe
  - Kształtowanie konstrukcji

# Plan wykładu

- 1 Zjawisko pękania zmęczeniowego
  - Wprowadzenie
- 2 Badania zmęczeniowe
  - Przeprowadzanie testów
  - Widmo obciążeń
- 3 Projektowanie na zmęczenie
  - Podejścia do projektowania
  - Obliczenia zmęczeniowe
  - Kształtowanie konstrukcji

# Wytrzymałość a zniszczenie

- większość uszkodzeń konstrukcji powstaje przez zmęczenie materiału
- pęknięcie zmęczeniowe rozwija się przez dłuższy czas, jednak zniszczenie elementu ma charakter nagły
- nagły charakter oraz trudność przewidzenia (wykrycia) sprawia, że uszkodzenia takie są niebezpieczne



# Zmęczenie materiału

## Zmęczenie materiału

proces postępujących, lokalnych i trwałych zmian w strukturze materiału poddanego cyklicznie zmiennym naprężeniom, w jednym lub kilku punktach, które mogą zakończyć się powstaniem pęknięcia lub całkowitego przełomu po odpowiednio dużej liczbie cykli

# Zmęczenie materiału

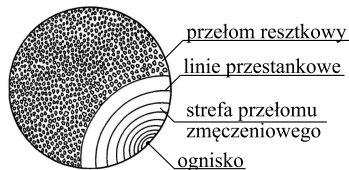
Z powyższej definicji wynika, że zmęczenie materiału

- jest procesem, trwającym przez dłuższy czas
- ma charakter lokalny; pojawia się w charakterystycznych miejscach związanych z przenoszonym obciążeniem, geometrią, wadami materiałowymi
- ma charakter trwały – zainicjowany proces będzie się rozwijał w czasie eksploatacji
- pojawia się przy zmiennych w czasie obciążeniach
- prowadzi do zniszczenia elementu; samo pęknięcie rozwija się powoli, jednak jeżeli pozostały przekrój nie jest w stanie przenieść obciążenia następuje nagle pęknięcie

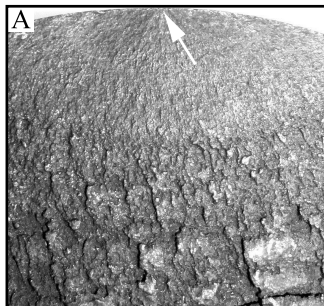
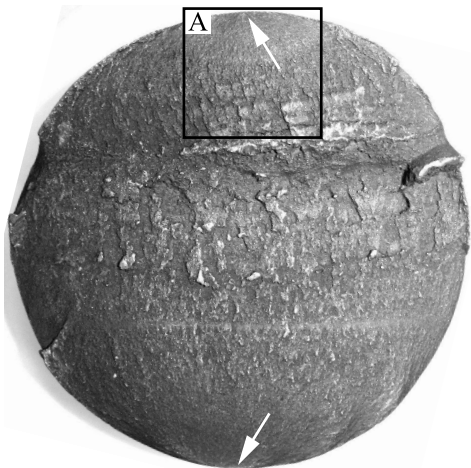
# Przełom zmęczeniowy

Pęknięcie zmęczeniowe rozwija się w kilku fazach, które pozostawiają na przełomie charakterystyczne ślady, pozwalające zidentyfikować przełom jako zmęczeniowy:

- inicjacja pęknięcia; źródłem pęknięcia może być wada materiału, uszkodzenie powierzchni, lokalne odkształcenia plastyczne; **miejsce inicjacji pęknięcia nazywa się ogniskiem**
- rozwój pęknięcia zmęczeniowego; jest to gładki obszar rozciągający się wokół ogniska; czasami widoczne są na nim linie przestankowe
- dołamanie; kruche pęknięcie pozostawiające chropowatą powierzchnię



# Przełom zmęczeniowy – przykład

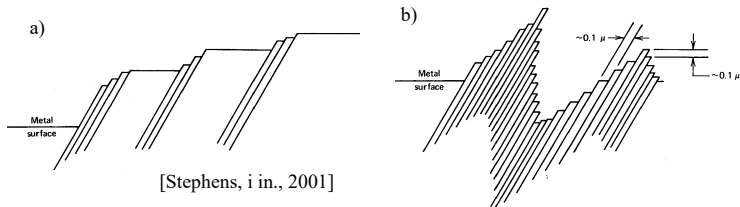


# Przełom zmęczeniowy – przykład

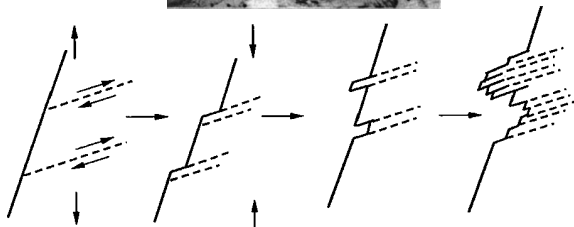
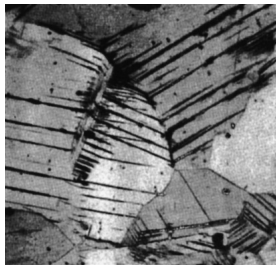


# Inicjacja pęknięcia

- odkształcenie plastyczne polega na poślizgu warstw atomowych zgodnych z największymi naprężeniami stycznymi
- przy obciążeniu statycznym poślizgi takie powodują uskoki na powierzchni (a)
- przy obciążeniu zmiennym uskoki te kumulują się i formują zagłębienia będące źródłem spiętrzenia naprężeń i inicjacji pęknięcia zmęczeniowego (b)



# Inicjacja pęknięcia

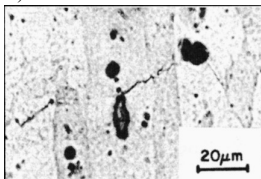


# Inicjacja pęknięcia

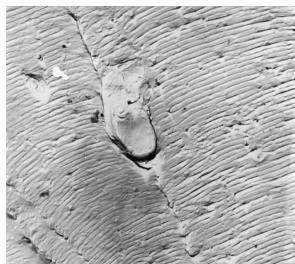
- innymi źródłami nieciągłości, mogącymi zainicjować pęknięcie są
  - wtrącenia obce
  - składniki fazowe
  - korozja
  - granice ziaren
  - pory

[Schijve, 2009]

a)



b)



# Plan wykładu

- 1 Zjawisko pękania zmęczeniowego
  - Wprowadzenie
- 2 **Badania zmęczeniowe**
  - **Przeprowadzanie testów**
  - Widmo obciążeń
- 3 Projektowanie na zmęczenie
  - Podejścia do projektowania
  - Obliczenia zmęczeniowe
  - Kształtowanie konstrukcji

# Cel testów zmęczeniowych

- proces projektowania produktu wymaga zarówno analizy jak i testów
- analizy przeprowadzane przy użyciu oprogramowania przeprowadzane są na modelach konstrukcji
- zachowanie się rzeczywistej konstrukcji można sprawdzić tylko w testach laboratoryjnych
- celem testu może być
  - określenie właściwości zmęczeniowych materiału
  - określenie charakteru i miejsc pęknięć projektowanego elementu
  - określenie trwałej wytrzymałości zmęczeniowej
  - określenie bezpiecznego okresu eksploatacji

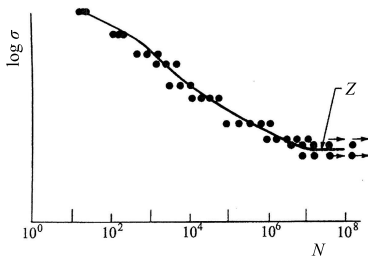
# Rodzaje testów zmęczeniowych

W zależności od celu testu i dostępnych środków można przeprowadzać dwa typy testów:

- pełny test zmęczeniowy
  - w efekcie otrzymuje się krzywą Wöhler'a przedstawiającą zależność naprężeń od liczby cykli
  - próba wymaga przebadania kilkudziesięciu próbek, aż do zniszczenia, jest więc czasochłonna i kosztowna
- przyspieszony test zmęczeniowy
  - przykładem jest próba Locatti'ego
  - pozwala wyznaczyć trwałą wytrzymałość zmęczeniową
  - przeprowadza się ją na jednej próbce, zwiększając obciążenie po ustalonej liczbie cykli; jest więc szybsza i tańsza

# Krzywa Wöhlera

- serię kilku próbek poddaje się testom zmęczeniowym tak aby każda kolejna seria pracowała przy mniejszym naprężeniach
- przy dużych naprężeniach próbki pękają przy małej liczbie cykli, przy mniejszych naprężeniach wytrzymują więcej cykli
- przy pewnej wartości naprężeń próbki nie pękają



# Krzywa Wöhlera

- wartość naprężeń, przy których próbki przestają pękać przy założonej liczbie cykli nazywamy trwałą wytrzymałością zmęczeniową i oznaczamy literą  $Z$
- do tego oznaczenia dodaje się dwa indeksy wskazujące na rodzaj obciążenia (rozciąganie, zginanie) i jego charakter (obustronny, jednostronny)
- dla obustronnego zginania oznaczenie ma postać  $Z_{go}$

## Trwała wytrzymałość zmęczeniowa $Z$

największe naprężenie sinusoidalnie zmienne, o stałych parametrach, które nie powoduje złomu próbki po przepracowaniu bazowej liczby cykli

# Rodzaje testów zmęczeniowych

Aby przyspieszyć testy zmęczeniowe stosuje się następujące zabiegi

- zwiększenie częstotliwości obciążenia
- zwiększenie obciążenia testowego
- usuwanie z widma obciążeń cykli z małym obciążeniem

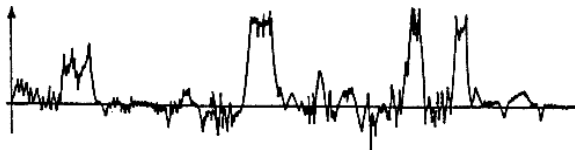
Wszystkie te zabiegi wpływają jednak na zaburzenie końcowego wyniku.

# Plan wykładu

- 1 Zjawisko pęknięcia zmęczeniowego
  - Wprowadzenie
- 2 **Badania zmęczeniowe**
  - Przeprowadzanie testów
  - **Widmo obciążeń**
- 3 Projektowanie na zmęczenie
  - Podejścia do projektowania
  - Obliczenia zmęczeniowe
  - Kształtowanie konstrukcji

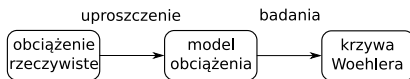
# Widmo obciążeń

- rzeczywiste spektrum obciążenie ma zwykle bardzo złożony charakter i zmienia się w zależności od trybu pracy



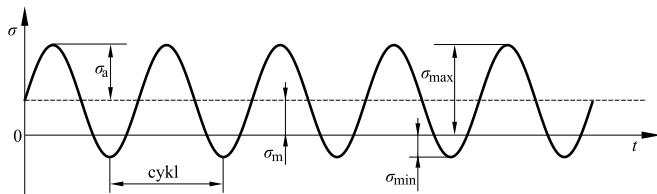
obciążenie czopa piasty koła samochodu osobowego

- do badań laboratoryjny upraszcza się je, zastępując sinusoidą o zadanych parametrach



# Widmo obciążeń

## Parametry obciążenia zmiennego



- naprężenia maksymalne i minimalne:

$$\sigma_{max} \quad \text{i} \quad \sigma_{min}$$

- naprężenia średnie i amplitudę naprężeń

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad \text{i} \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

# Widmo obciążeń

- położenie sinusoidy względem osi zerowej określa współczynnik asymetrii cyklu

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

- w zależności od wartości  $R$  wyróżnia się cykle:
  - wahadłowe ( $R = -1$ )
  - jednostronne ( $1 > R > 0$ )
  - dwustronne ( $-1 < R < 0$ )
  - odzerowo tętniące ( $R = 0$ )

# Plan wykładu

- 1 Zjawisko pękania zmęczeniowego
  - Wprowadzenie
- 2 Badania zmęczeniowe
  - Przeprowadzanie testów
  - Widmo obciążeń
- 3 **Projektowanie na zmęczenie**
  - **Podejścia do projektowania**
  - Obliczenia zmęczeniowe
  - Kształtowanie konstrukcji

# Podejścia do projektowania

- *infinite-life design* (nieskończona trwałość)
  - zakłada się, że naprężenia pozostają w zakresie sprężystym, a element będzie pracował **nieskończoną liczbę cykli**
  - podejście jest uzasadnione przy projektowaniu elementów, które muszą przepracować miliony cykli, np. pierścienie tłokowe
  - w większości przypadków podejście to jest ekonomicznie nieuzasadnione; większość projektowanych elementów pracuje skończoną, dającą się określić, liczbę cykli; spełnienie warunku nieskończonej liczby cykli wymagałoby zwiększenia przekroji poprzecznych, a tym samym zwiększenia masy (elementy samolotu)

# Podejścia do projektowania

- *safe-life design* (skończona trwałość)
  - zakłada się, że element będzie pracował **skończoną liczbę cykli**, ustaloną z góry
  - ustalenie liczby wymaga przeprowadzenia odpowiednio dużej liczby badań laboratoryjnych i przyjęcia współczynnika bezpieczeństwa, np. wyznaczona w laboratorium liczba cykli =  $5 \times$  liczba cykli przewidzianych w eksploatacji
  - podejście to jest konieczne w sytuacji, kiedy nie można przeprowadzać okresowych kontroli np. z powodu braku dostępu do elementu; po przepracowanej, założonej liczbie cykli element wymienia się na nowy
  - skończoną trwałość zmęczeniową stosuje się np. przy projektowaniu łożysk

# Podejścia do projektowania

- *fail-safe design*
  - dopuszcza się powstawanie „kontrolowanych” pęknięć w czasie eksploatacji; konstrukcja jest tak zaprojektowana, że pęknięcia te nie powodują jej zniszczenia, a element jest wymieniany przy najbliższej kontroli
  - podejście to jest uzasadnione, gdy nie da się przewidzieć wytrzymałości zmęczeniowej oraz gdy wymiana elementów na nowe po przepracowaniu założonej liczby cykli jest bardzo droga; często elementy takie mogą jeszcze długo pracować

# Podejścia do projektowania

- *fail-safe design*
  - podejście takie stosuje się w przemyśle lotniczym, gdzie wysokie współczynniki bezpieczeństwa zwiększają masę, a części są drogie
  - odpowiedni poziom bezpieczeństwa uzyskuje się przez stosowanie różnych ścieżek przenoszenia obciążenia, elementów zatrzymujących pęknięcie, stosowanie materiałów, w których pęknięcie rozprzestrzenia się powoli

# Podejścia do projektowania

- *damage-tolerant design*
  - zakład się, że **pęknięcia zawsze są**; jako efekt procesu produkcyjnego lub efekt zmęczenia
  - stosuje się narzędzia mechaniki pęknięcia do określenia, czy te pęknięcia doprowadzą do zniszczenia konstrukcji przed przewidzianym terminem kontroli
  - podejście to jest trudne do realizacji, jednak pozwala wyłączać z użytkowania tylko te elementy, które rzeczywiście nie mogą być dalej eksploatowane

# Plan wykładu

- 1 Zjawisko pękania zmęczeniowego
  - Wprowadzenie
- 2 Badania zmęczeniowe
  - Przeprowadzanie testów
  - Widmo obciążeń
- 3 Projektowanie na zmęczenie
  - Podejścia do projektowania
  - **Obliczenia zmęczeniowe**
  - Kształtowanie konstrukcji

# Warunek wytrzymałości

## Obciążenie zmienne

Ogólna postać warunku wytrzymałościowego:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{dop}$$

W przypadku obciążenia zmiennego:

$$\sigma_{max} = \max \{ \sigma_{zast} \} \quad \sigma_{zast} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$
$$\sigma_{dop} = \frac{Z}{n_z}$$

gdzie:  $Z$  – wytrzymałość zmęczeniowa,  $n_z$  – współczynnik bezpieczeństwa ( $n_z > 1$ )

# Ustalanie współczynnika bezpieczeństwa

Przy ustalaniu wartości współczynnika bezpieczeństwa należy uwzględnić:

- adekwatność modelu obliczeniowego
- dodatkowe naprężenia wywołane
  - mikro- i makro defektami
  - niedokładnością wykonania i montażu
- zadanie jakie spełnia projektowany element

# Granica plastyczności a granica zmęczenia

- w przypadku obciążenia statycznego konstrukcja ulega zniszczeniu, gdy w jednym lub kilku punktach materiał ulegnie uplastycznieniu; naprężenia graniczne są zatem równe granicy plastyczności
- badając próbkę materiału można określić naprężenia graniczne

# Granica plastyczności a granica zmęczenia

- w przypadku obciążenia zmiennego naprężenia graniczne zależą od wielu czynników; materiał jest tylko jednym z nich; inne to kształt elementu, widmo obciążeń
- zatem badając próbkę na maszynie zmęczeniowej możemy co najwyżej określić naprężenia graniczne dla tej próbki; nie ma to bezpośredniego przełożenia na zachowanie się konstrukcji

# Granica plastyczności a granica zmęczenia

 $R_e$ 

granica plastyczności  
określona dla danego  
materiału

zależy od:

- jakości materiału

 $Z$ 

granica zmęczenia  
określona dla próbki  
wykonanej z danego  
materiału

zależy od:

- jakości materiału
- warunków obciążenia
- rodzaju cykli
- kształtu próbki
- stanu powierzchni

# Granica plastyczności a granica zmęczenia

Zależność między granicą zmęczenia przy obustronnym zginaniu a granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie (dla stali)

$$Z_{go} = (0,2 \div 0,3)R_m \left( 1 + \frac{R_{0,2}}{R_m} \right)$$

# Plan wykładu

- 1 Zjawisko pęknięcia zmęczeniowego
  - Wprowadzenie
- 2 Badania zmęczeniowe
  - Przeprowadzanie testów
  - Widmo obciążeń
- 3 Projektowanie na zmęczenie
  - Podejścia do projektowania
  - Obliczenia zmęczeniowe
  - Kształtowanie konstrukcji

# Zwiększanie wytrzymałości zmęczeniowej

Konstruując element maszyny należy dążyć do eliminacji czynników prowadzących do pęknięcia zmęczeniowego:

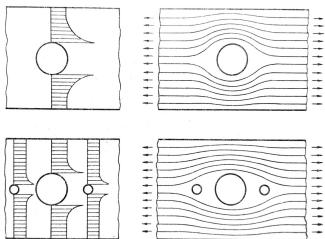
- unikanie obciążeń zmiennych; zmniejszanie amplitudy naprężeń

Jeżeli czynników tych nie można wyeliminować, należy stosować:

- technologiczne zwiększanie wytrzymałości zmęczeniowej
  - obróbka cieplna, chemiczna i mechaniczna powierzchni....
- konstrukcyjne zwiększanie wytrzymałości zmęczeniowej
  - unikanie karbów, wyokrąglenia.....

# Zwiększanie wytrzymałości zmęczeniowej

- ponieważ zmęczenie materiału pojawia się między innymi w miejscach spiętrzeń naprężeń generowanych przez karby, najlepszym sposobem unikania pęknięć zmęczeniowych jest takie kształtowanie konstrukcji, aby wyeliminować karby
- właściwe kształtowanie polega na zapewnieniu gładkiego „przepływu sił”



# Literatura

- 1 Stephens RI, i in. *Metal fatigue in engineering*, John Willey & Sons, Inc., New York, 2001
- 2 Schijve J. *Fatigue of structures and materials*, Springer, 2009