



**POLITECHNIKA  
RZESZOWSKA**  
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ  
BUDOWY MASZYN  
I LOTNICTWA**  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

# Podstawy wytrzymałości zmęczeniowej

dr inż. Michał Batsch

E-mail: [mbatsch@prz.edu.pl](mailto:mbatsch@prz.edu.pl)

Strona: <https://mbatsch.v.prz.edu.pl/>

Pokój: L-28.323a (Katedra Konstrukcji Maszyn, WBMiL, bud. L)

# Zagadnienia

1. Proces projektowo-konstrukcyjny
2. Warunki stawiane konstrukcjom
3. Rodzaje obciążeń
4. Wytrzymałość zmęczeniowa
5. Trwałość
6. Hipoteza kumulacji uszkodzeń Palmgrena-Minera
7. Blokowe widmo obciążenia
8. Naprężenia dopuszczalne
9. Sprawdzające obliczenia zmęczeniowe

# Proces projektowo-konstrukcyjny

## 1. Założenia konstrukcyjne

- wymagania stawiane konstrukcji
- rozwiązanie konstrukcyjne

## 2. Koncepcja konstrukcyjna

- wstępne obliczenia
- schemat strukturalny

## 3. Opracowie modelu 3D CAD

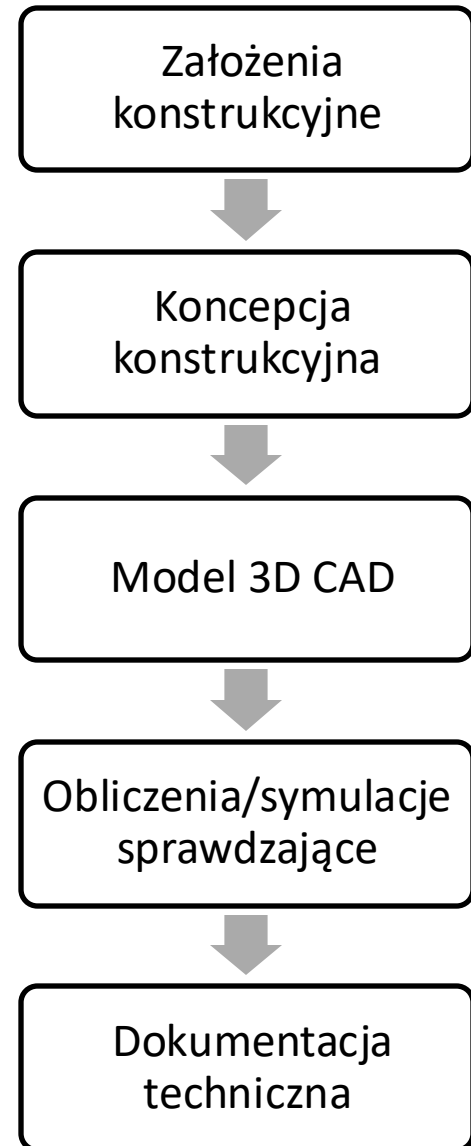
- modelowanie części i złożeń

## 4. Obliczenia/symulacje sprawdzające

- symulacje MES
- symulacje dynamiczne
- obliczenia sprawdzające

## 5. Opracowanie dokumentacji

- przejście z modelu 3D na dokumentację wykonawczą



# Warunki stawiane konstrukcjom

Wytrzymałość to zdolność materiału z którego wykonano część do przenoszenia obciążeń bez jego uszkodzenia. Jej miarą jest najczęściej naprężenie wyrażane w MPa, którego wielkość decyduje o bezpieczeństwie konstrukcji.

$$\sigma = \frac{\partial F}{\partial A}$$

Sztywność definiowana jest jako zdolność elementu do przeciwstawiania się obciążeniom. Wyraża zależność pomiędzy odkształceniem, a naprężeniem. W niektórych zastosowaniach jest równie ważna co wytrzymałość jak np. w obrabiarkach, gdzie sztywność podzespołów decyduje o dokładności części obrabianej.

Trwałość to zdolność do zachowania funkcji użytkowej (często wytrzymałości) w określonym przez konstruktora czasie.

# Warunki stawiane konstrukcjom

Wskaźniki eksploatacyjne wśród nich wyróżnić można między innymi sprawność, lekkość i ekonomiczność.

Sprawność to stosunek energii lub mocy wyjściowej do wejściowej. Jest wielkością bezwymiarową, która zawiera się w przedziale od 0 do 1 (lub od 0% do 100%) i charakteryzuje stopień wykorzystania energii dostarczonej w procesie jej przekształcania na inny rodzaj. Na ogół dąży się do tego aby sprawność była jak największa, co wiąże się z pojęciem ekonomiczności. Nie zawsze jednak wysoka sprawność jest możliwa do uzyskania jak w przypadku gwintów samohamownych czy przekładni ślimakowych niosących za sobą inne korzyści (samohamowność, duże przełożenie) usprawiedliwiający ich zastosowanie pomimo niskiej sprawności.

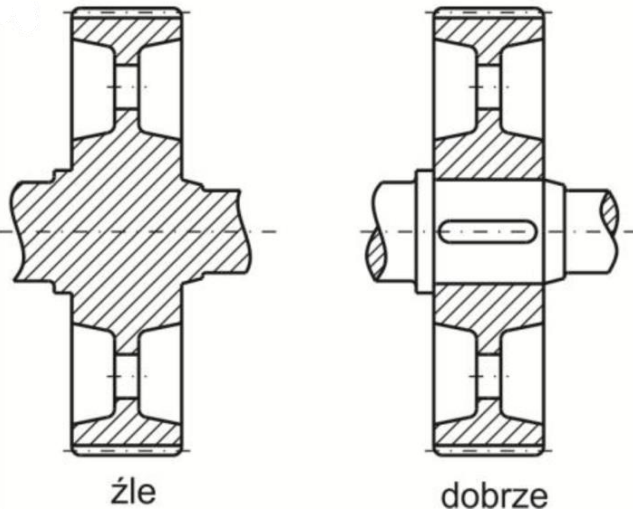
Pod pojęciem ekonomiczności rozumie się możliwie niskie koszty zakupu urządzenia oraz jego eksploatacji w tym serwisu i napraw.

Lekkość konstrukcji jest pojęciem związanym z jej masą. Przekroje elementów obciążonych nie powinny być zbyt duże aby nie zwiększać kosztów materiałów użytych do ich budowy przy czym powinny spełniać stawiane przed nimi wymagania np. wytrzymałościowe czy sztywnościowe. Lekkość wyraża się niekiedy w stosunku mocy do masy (sporty motorowe) czy też ciągu silnika do masy samolotu (lotnictwo) i jest wówczas decydująca o możliwości uzyskiwania wysokich osiągnięć.

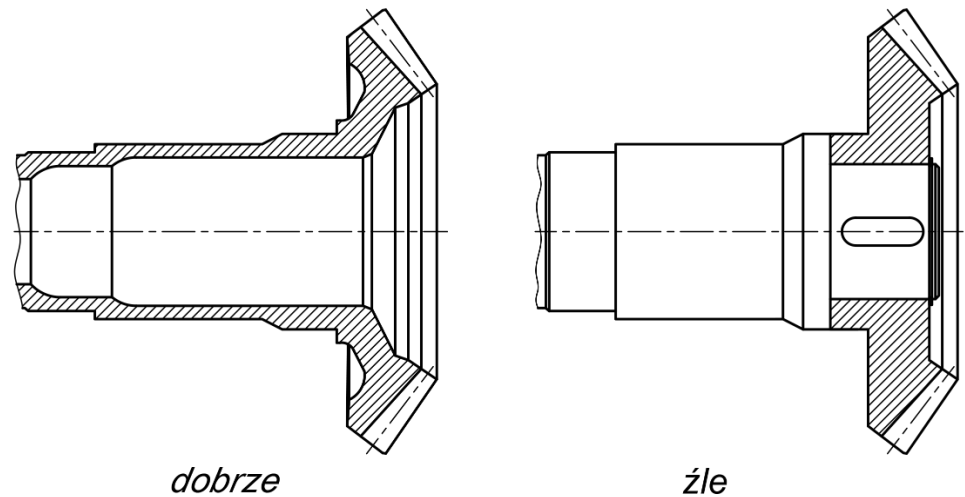
# Warunki stawiane konstrukcjom

Technologiczność konstrukcji oznacza stopień łatwości z jaką można wykonać/zmontować część/zespół możliwie ekonomicznie przy wykorzystaniu dostępnego parku maszynowego.

Ogólna budowa maszyn

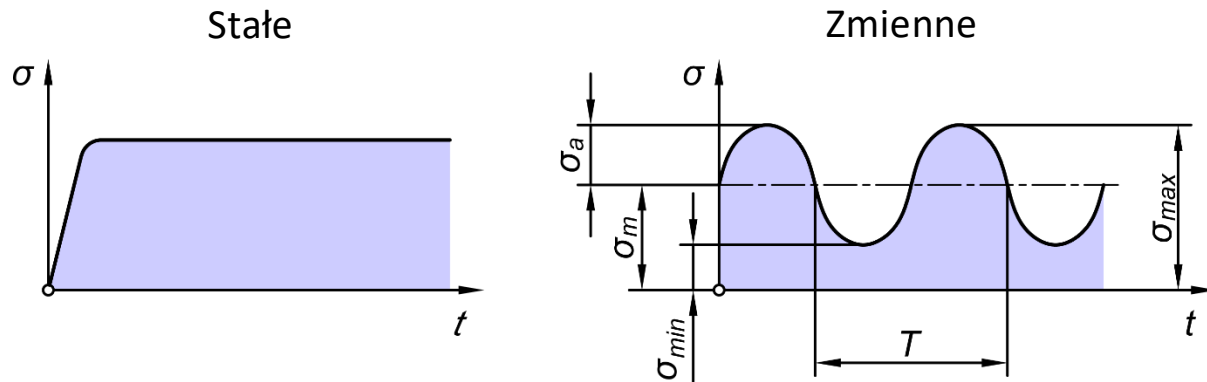


Lotnictwo



# Rodzaje obciążeń

Obciążenia części maszyn można podzielić na: stałe i zmienne lub na ustalone i nieustalone. Obciążeniem może być: siła, moment, naprężenie. Widmo obciążenia to jego przebieg w czasie.



- wartość średnia  $\sigma_m$
- amplituda  $\sigma_a$
- wartość maksymalna  $\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$
- wartość minimalna  $\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$
- okres cyklu obciążenia  $T$  (uzyskiwany z parametrów pracy)

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

$$\sigma_m = \sigma_{max} \frac{K}{K + 1}$$

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

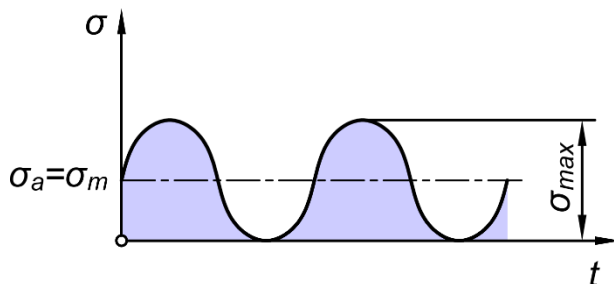
$$\sigma_a = \sigma_{max} \frac{1}{K + 1}$$

# Rodzaje obciążeń

W praktyce najczęściej występują dwa rodzaje obciążeń zmiennych:

- jednostronnie zmiennie (odzerowo-tętniące)
- obustronnie zmiennie (wahadłowe)

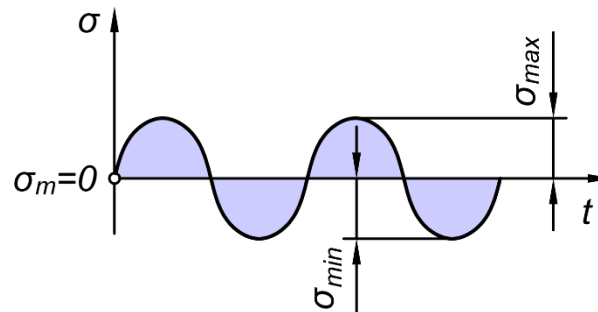
Jednostronnie zmiennie  
(odzerowo-tętniące)



$$\sigma_{max} = 2\sigma_m = 2\sigma_a$$

$$\kappa = 1, R = 0$$

Obustronnie zmiennie  
(wahadłowe)

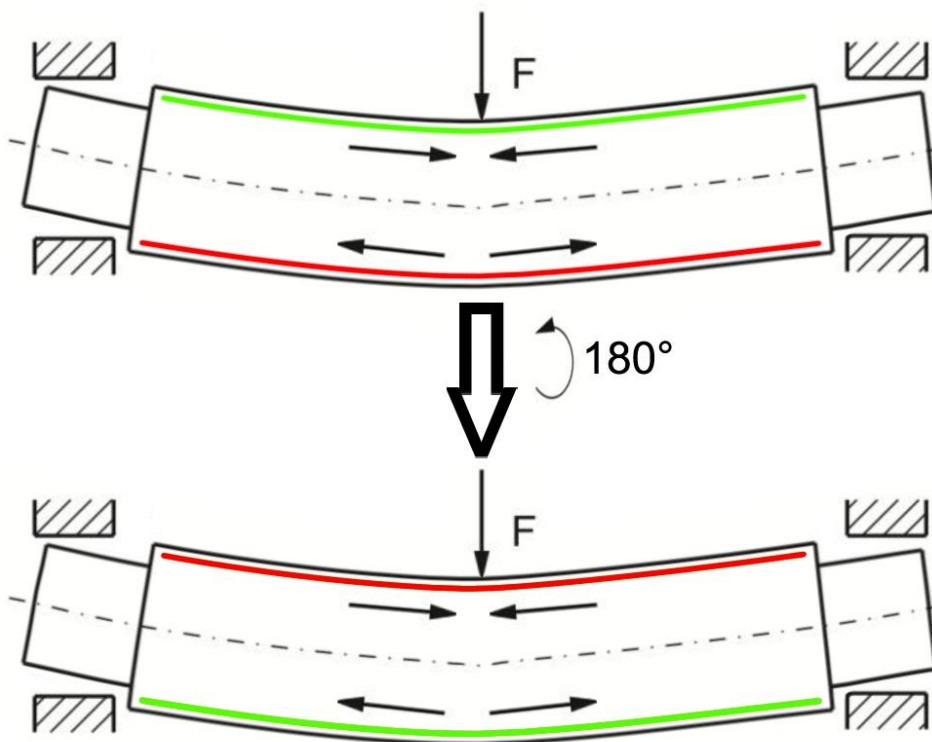


$$\sigma_{max} = \sigma_a$$

$$\kappa = 0, R = -1$$

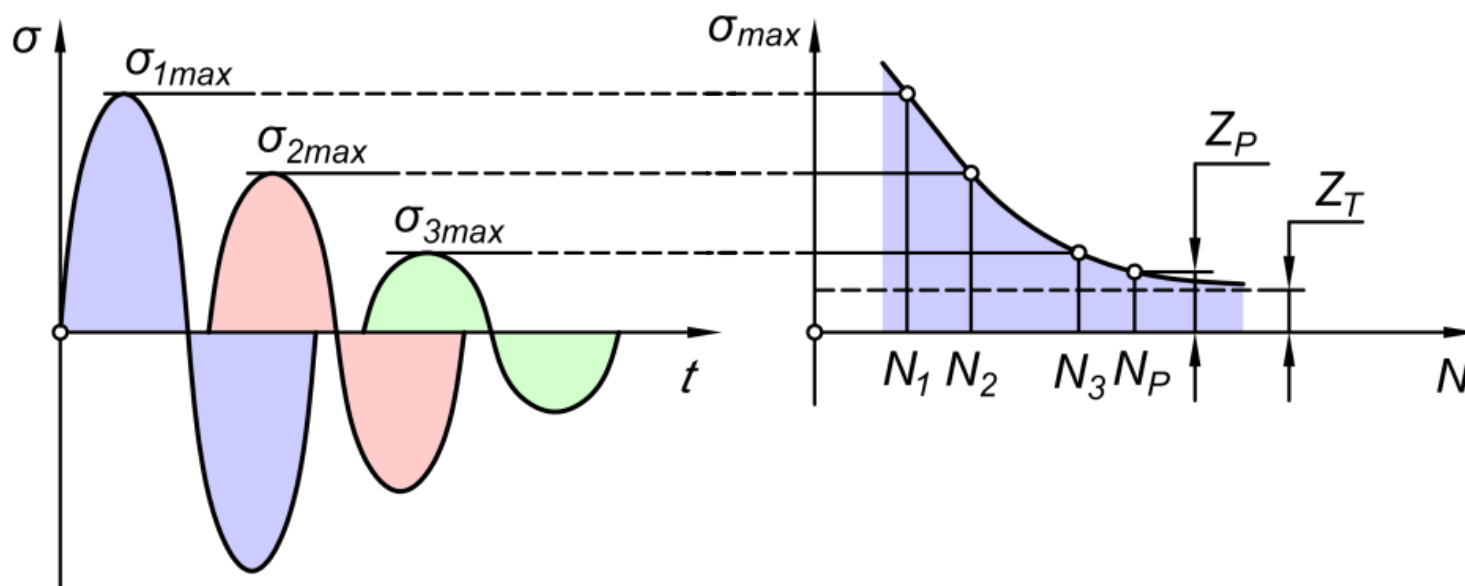
# Wytrzymałość zmęczeniowa

Początki wytrzymałości zmęczeniowej sięgają pierwszej połowy XIX wieku. Dotyczyły one zginania osi wagonowych. Zauważono bowiem, że osie te obliczane na podstawie wytrzymałości doraźnej pękały. Okazało się, że szczególnie niekorzystne są obciążenia wahadłowe. Obserwacje te dały początek licznym badaniom oraz sformułowaniu pojęcia wytrzymałość zmęczeniowa.



# Wytrzymałość zmęczeniowa

Wytrzymałość zmęczeniowa określana jest doświadczalnie na podstawie wykresu Wöhlera. Wykres ten budowany jest dla konkretnego stanu naprężeń np.: zginanie, skręcanie itp. Próbka jest obciążana obciążeniem zmiennym ustalonym oraz mierzona jest liczba cykli zmian obciążenia, podczas których próbka nie uległa zniszczeniu. Powtórzenie tych prób dla obciążeń o różnych wartościach maksymalnych pozwala na konstrukcję wykresu Wöhlera, zależności pomiędzy wartością maksymalną (lub amplitudą) obciążenia a liczbą cykli zmian obciążenia.



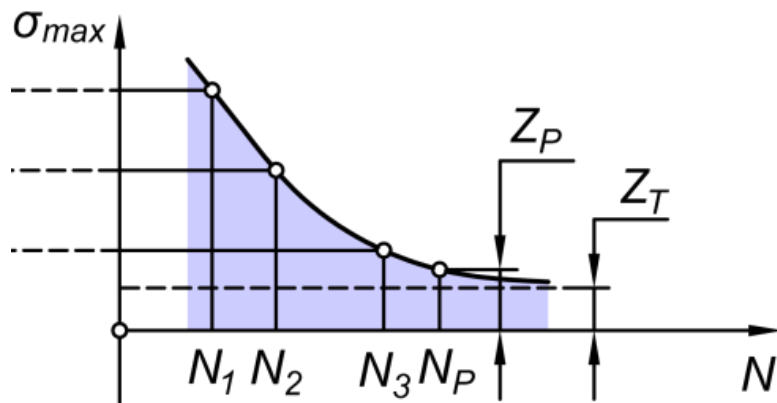
Wykres Wöhlera asymptotycznie zmierza do wartości  $Z_T$  nazywaną teoretyczną (nieograniczoną) wytrzymałością zmęczeniową.

# Wytrzymałość zmęczeniowa

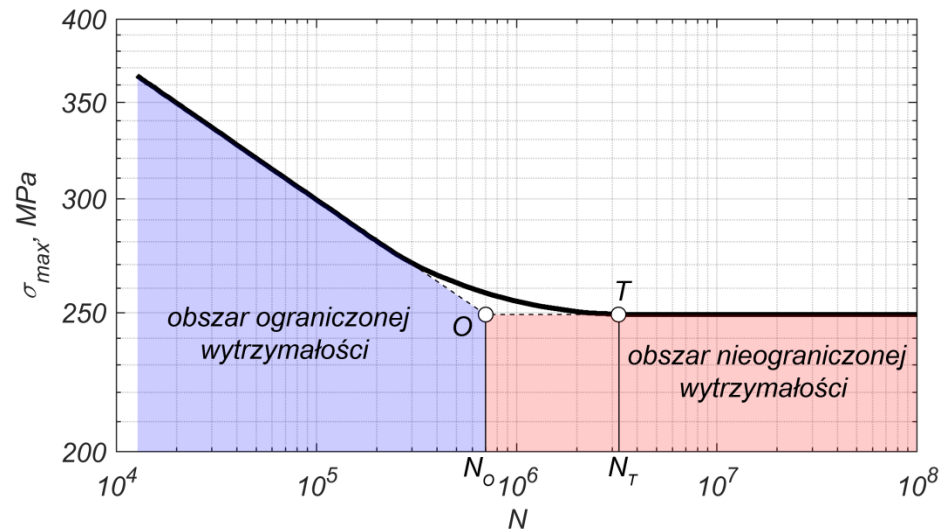
Nieograniczona wytrzymałość zmęczeniowa  $Z_T$  to takie największe naprężenie (obciążenie), przy którym próbka wytrzymuje nieskończoną liczbę cykli zmian obciążenia.

Praktyczna (ograniczona) wytrzymałość zmęczeniowa  $Z_P$  to takie największe naprężenie, przy którym próbka wytrzymuje założoną przez konstruktora liczbę cykli zmian obciążenia np.:  $N_P = 10^7$ .

Parametry odczytywane z wykresu Wöhlera



Wykres Wöhlera dla obustronnego zginania (stal C35) w skali logarytmicznej



# Trwałość

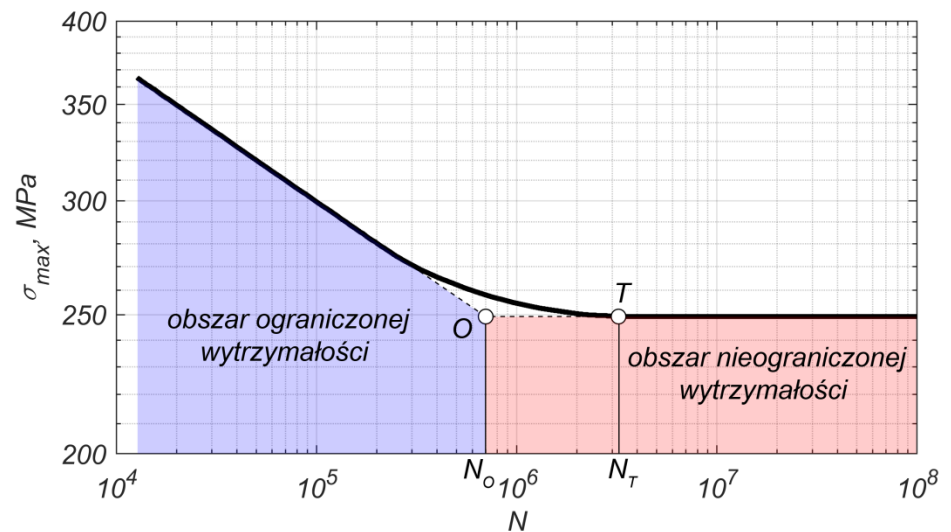
Trwałość to liczba cykli zmian obciążenia lub czas, przez który element nie ulega zniszczeniu. Można ją wyznaczyć z wykresu Wöhlera. Lewy fragment tego wykresu w skali logarytmicznej przybliża się prostą, co bezpośrednio prowadzi do równania na liczbę cykli w funkcji obciążenia:

$$N = N_O \left( \frac{Z_T}{\sigma_{max}} \right)^q$$

gdzie:

- $q$  to wykładnik krzywej,
- $Z_T$  to nieograniczona wytrzymałość zmęczeniowa,
- $N_O$  to liczba cykli zmian obciążenia odpowiadająca nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej
- $\sigma_{max}$  to maksymalna wartość obciążenia działającego na część.

Wykres Wöhlera dla obustronnego zginania (stal C35) w skali logarytmicznej



Chcąc wyznaczyć trwałość niezbędna jest znajomość wykładnika  $q$ . Wykładnik ten może przyjąć różne wartości w zależności od rodzaju materiału, rodzaju obciążenia, rodzaju karbu czy kształtu elementu. Ogólnie dla stali zawiera się w przedziale od 3 do 20.

# Trwałość

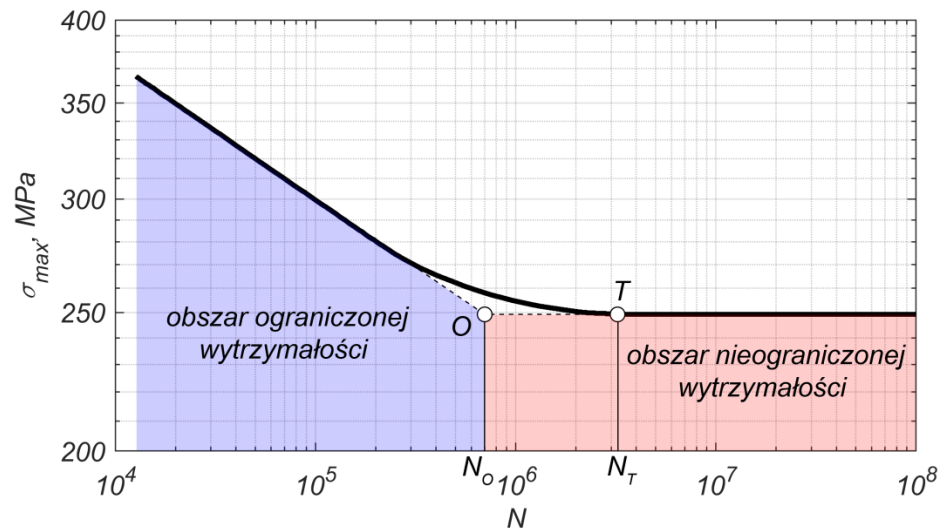
**Przykład** Wyznaczyć trwałość osi poddawanej obustronnemu zginaniu wykonanej ze stali C35, obciążonej naprężeniem o amplitudzie  $\sigma_{max} = \sigma_a = 300$  MPa. Do obliczeń przyjąć, że oś obraca się ze stałą prędkością  $n = 1000$  obr/min, oraz że nieograniczona wytrzymałość zmęczeniowa stali C35 to  $Z_{go} = 250$  MPa, a wykładnik krzywej Wöhlera  $q = 10$ .

Z wykresu Wöhlera można odczytać, że liczba cykli obciążenia odpowiadająca punktowi O to  $N_0 = 7 \cdot 10^5$ .

$$N = N_0 \left( \frac{Z_{go}}{\sigma_{max}} \right)^q \approx 10^5$$

Jeden cykl zmiany obciążenia odpowiada jednemu obrotowi, wobec czego trwałość osi można oszacować na  $N/n = 100$  min.

Wykres Wöhlera dla obustronnego zginania (stal C35) w skali logarytmicznej



# Hipoteza kumulacji uszkodzeń Palmgrena-Minera

Zakłada, że uszkodzenia kumulują się, a każde obciążenie  $\sigma_i$  o liczbie cykli  $m_i$  wyczerpuje nośność proporcjonalnie do ilorazu  $m_i/N_i$  gdzie  $N_i$  jest liczbą cykli jaka może być przeniesiona przez element przy naprężeniu  $\sigma_i$ . Jako miarę uszkodzenia przyjmuje się funkcję:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{m_i}{N_i}$$

W celu oszacowania trwałości zakłada się, że na element działa pewne obciążenie zastępcze o stałej amplitudzie, które wywoła ten sam efekt niszczący co rzeczywiste widmo obciążenia:

$$\sum_{i=1}^k \frac{m_i}{N_i} = \frac{\sum_{i=1}^k m_i}{N_L} \quad N_i = N_O \left( \frac{Z_T}{\sigma_i} \right)^q \quad \sigma_{zast} = \left( \frac{\sum_{i=1}^k m_i \sigma_i^q}{\sum_{i=1}^k m_i} \right)^{\frac{1}{q}}$$
$$N_L = N_O \left( \frac{Z_T}{\sigma_{zast}} \right)^q$$

Hipoteza stosowana gdy:

1. Obciążenia są sinusoidalne
2. Materiał się nie umacnia w wyniku przeciążenia
3. Pęknięcie uważane jest za uszkodzenie
4. **Naprężenia są większe od granicy zmęczenia ( $Z_T$ )**

# Hipoteza kumulacji uszkodzeń Palmgrena-Minera

**Przykład** Wyznaczyć obciążenie zastępcze wału maszynowego ze stali o wykładniku krzywej Wöhlera  $q = 10$ , pracującego w układzie napędowym, którego cykl pracy opisano trzema stopniami obciążenia:

1.  $n_1 = 1000$  obr/min;  $M_1 = 300$  Nm;  $t_{p1} = 20\%$ ,
2.  $n_2 = 500$  obr/min;  $M_2 = 150$  Nm;  $t_{p2} = 30\%$ ,
3.  $n_3 = 500$  obr/min;  $M_3 = 100$  Nm;  $t_{p3} = 50\%$ ,

gdzie  $n_i$  - to prędkość obrotowa i-tego stopnia,  $M_i$  - maksymalny zredukowany moment gnący w i-tym stopniu,  $t_{pi}$  - to procentowy udział czasu trwania i-tego stopnia obciążenia.

Obliczenia zostaną odniesione do najbardziej wyętego przekroju wału o wskaźniku wytrzymałości na zginanie  $W_x$ , w którym naprężenia wynoszą  $\sigma_i = M_i / W_x$ . Przyjmując, że całkowity czas trwania cyklu pracy układu napędowego to  $t_c$  (w godzinach), liczbę zmian cykli obciążenia w i-tym stopniu wyznacza się w postaci  $m_i = 60 \frac{t_{pi}}{100} t_c n_i$ . Ponadto biorąc pod uwagę, że  $\sigma_{zast} = M_{zast} / W_x$  oblicza się moment zastępczy jako:

$$M_{zast} = \left( \frac{\sum_{i=1}^k t_{pi} n_i M_i^q}{\sum_{i=1}^k t_{pi} n_i} \right)^{1/q} = 268.8 \text{ Nm}$$

# Hipoteza kumulacji uszkodzeń Palmgrena-Minera

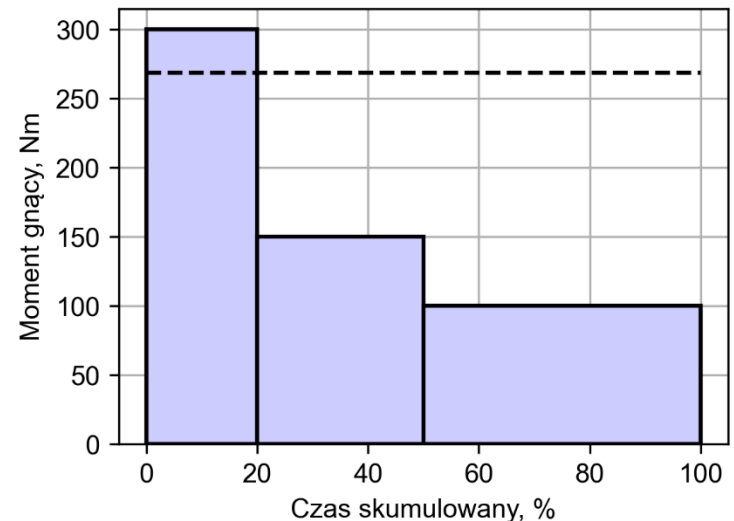
**Przykład** Wyznaczyć obciążenie zastępcze wału maszynowego ze stali o wykładniku krzywej Wöhlera  $q = 10$ , pracującego w układzie napędowym, którego cykl pracy opisano trzema stopniami obciążenia:

1.  $n_1 = 1000$  obr/min;  $M_1 = 300$  Nm;  $t_{p1} = 20\%$ ,
2.  $n_2 = 500$  obr/min;  $M_2 = 150$  Nm;  $t_{p2} = 30\%$ ,
3.  $n_3 = 500$  obr/min;  $M_3 = 100$  Nm;  $t_{p3} = 50\%$ ,

gdzie  $n_i$  - to prędkość obrotowa i-tego stopnia,  $M_i$  - maksymalny zredukowany moment gnący w i-tym stopniu,  $t_{pi}$  - to procentowy udział czasu trwania i-tego stopnia obciążenia.

$$M_{zast} = \left( \frac{\sum_{i=1}^k t_{pi} n_i M_i^q}{\sum_{i=1}^k t_{pi} n_i} \right)^{1/q} = 268.8 \text{ Nm}$$

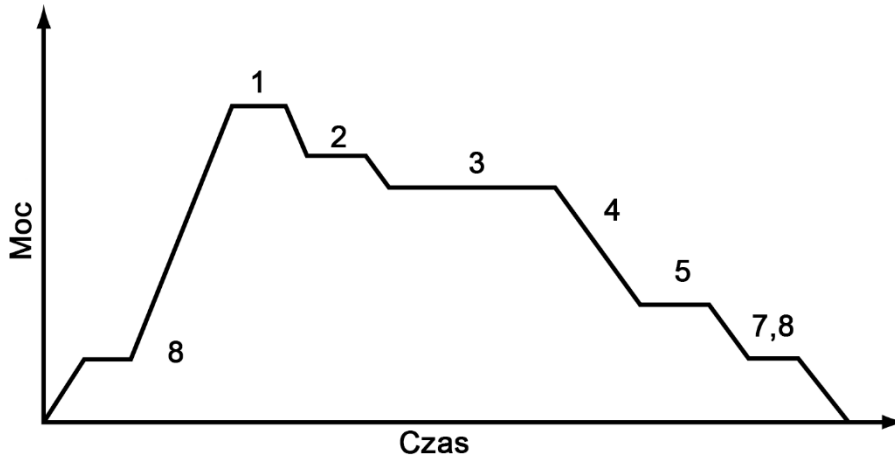
Na podstawie wyznaczonego momentu zastępczego można określić wymagany przekrój wałka, który zapewni nieograniczoną wytrzymałość zmęczeniową lub odpowiednią trwałość w obszarze wytrzymałości ograniczonej.



# Blokowe widmo obciążenia

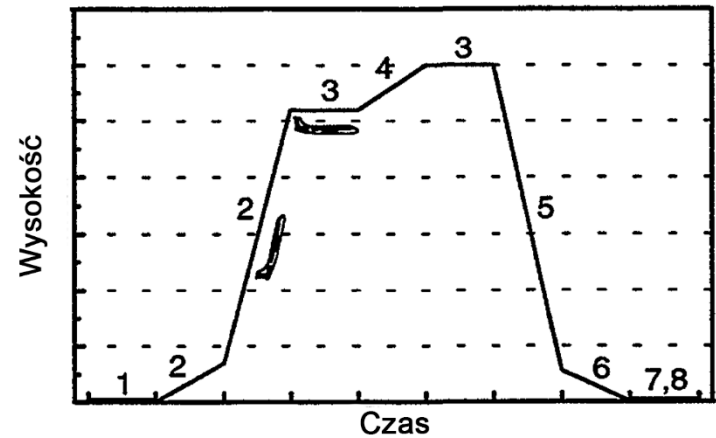
Blokowe widmo obciążenia jest to wykres ukazujący czas trwania oraz wartość każdego z cykli obciążenia. Uzyskiwane jest na podstawie warunków pracy urządzenia lub badań doświadczalnych. Wykorzystywane do wyznaczenia obciążenia zastępczego i trwałości eksploatacyjnej. Czasami podawany w formie tabelarycznej.

Wykorzystanie mocy podczas typowej misji samolotu pasażerskiego



1 - start, 2 - wznoszenie, 3 - przelot, 4 - zmiana wysokości, 5 - zniżanie, 6 - podejście, 7 - lądowanie, 8 - kołowanie

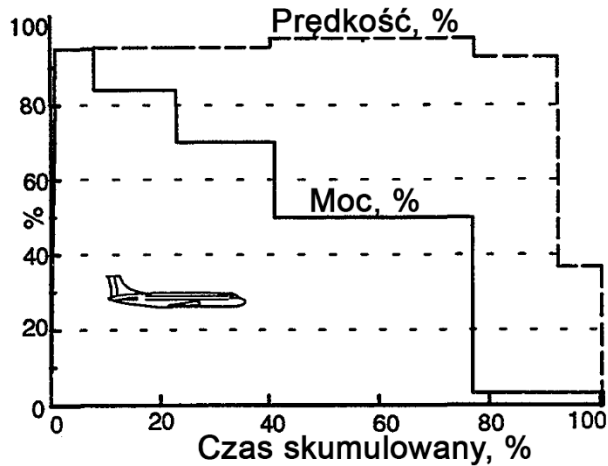
Zmiana wysokości podczas typowej misji samolotu pasażerskiego



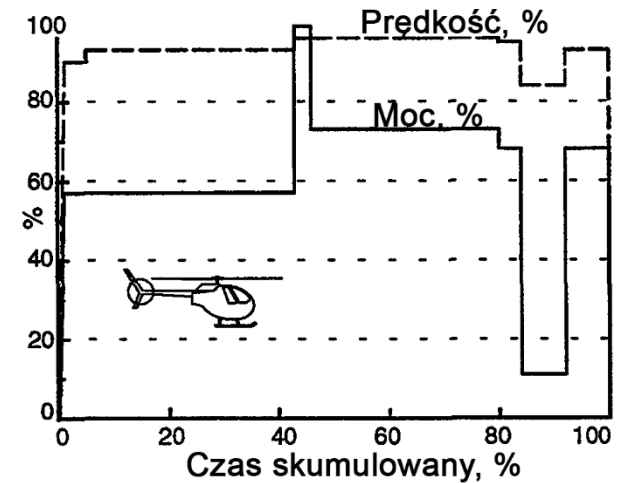
1 - start, 2 - wznoszenie, 3 - przelot, 4 - zmiana wysokości, 5 - zniżanie, 6 - podejście, 7 - lądowanie, 8 - kołowanie

# Blokowe widmo obciążenia

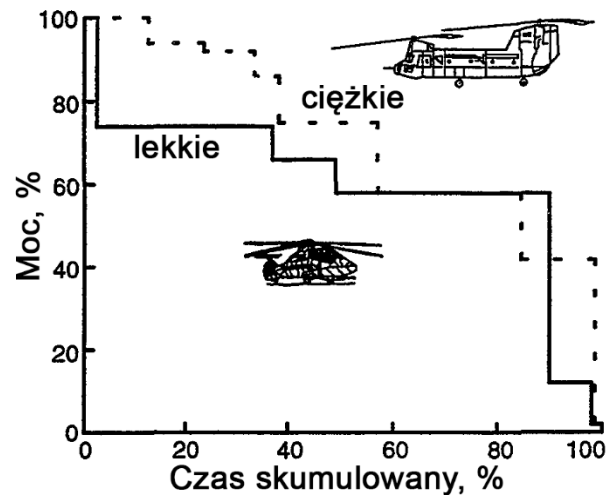
Typowe blokowe widmo obciążenia napędu samolotu pasażerskiego (turbowentylator)



Typowe blokowe widmo obciążenia napędu śmigłowca wojskowego



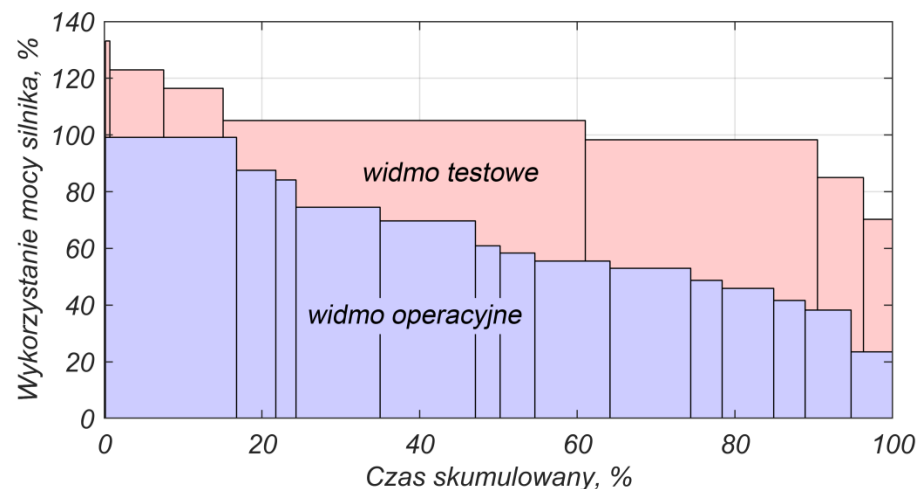
Typowe blokowe widma obciążenia napędu śmigłowców wojskowych



# Blokowe widmo obciążenia

**Przykład** Przeanalizować blokowe widmo obciążenia napędu śmigłowca UH-60 „Black Hawk” podczas testów i trwania misji w kontekście elementów jego przekładni głównej.

Przyjmując, że czas trwania testów wynosi 200 h, a prędkość wału wejściowego to 20900 obr/min całkowita liczba cykli zmian obciążenia podczas testów przeciążeniowych wyniesie  $2.5 \cdot 10^8$ . Dla wału wirnika głównego natomiast, dla którego prędkość wynosi 258 obr/min liczba ta będzie dużo mniejsza, bo wyniesie ok.  $3 \cdot 10^6$ .



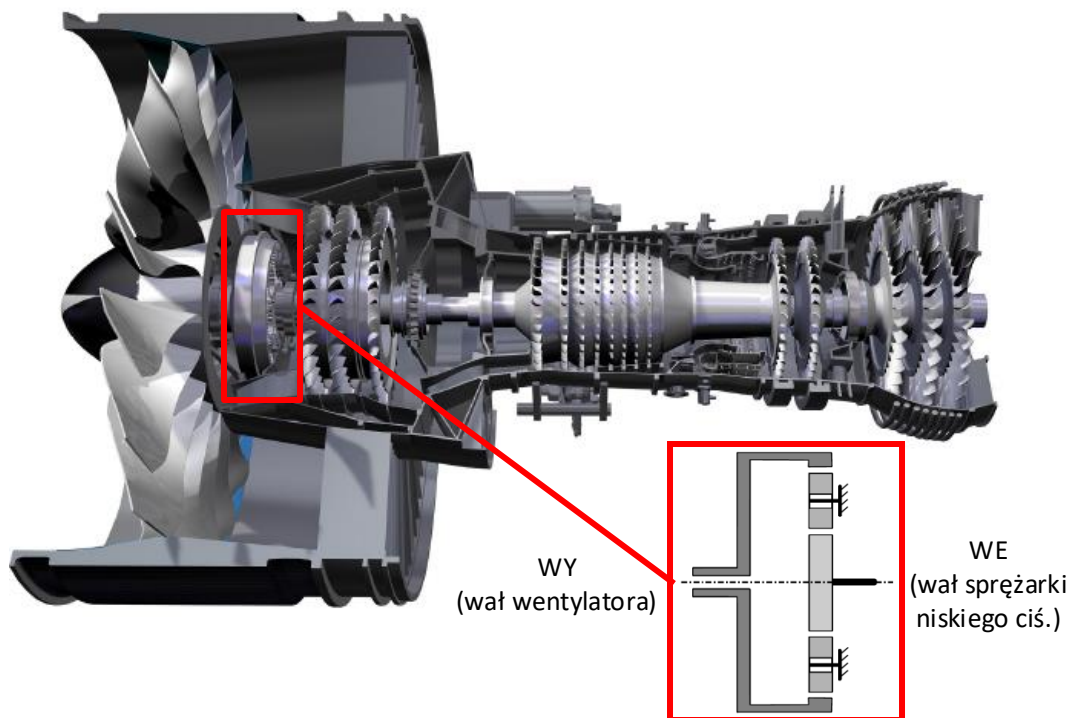
Na podstawie widma testowego można odczytać np. że najdłużej trwającym obciążeniem (ok. 45% czasu trwania testu) jest obciążenie mocą na poziomie 105% mocy nominalnej.

Podobne obliczenia można przeprowadzić dla widma operacyjnego podczas lotu przyjmując całkowity czas trwania misji np. 8 h.

# Blokowe widmo obciążenia

**Przykład** Wyznaczyć moment zastępczy na wale wejściowym przekładni silnika GTF PW1100G o startowych parametrach pracy:

- Moment: 21739.1 Nm
- Prędkość obrotowa: 9500 obr/min
- Ciąg startowy: 147280 N

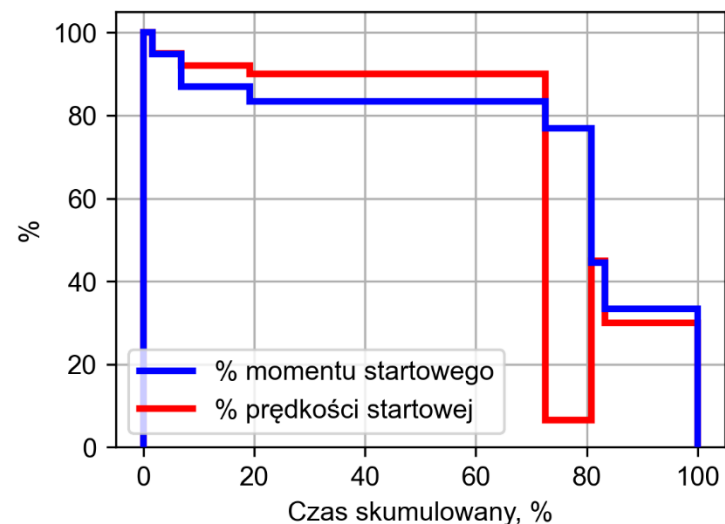


# Blokowe widmo obciążenia

**Przykład** Wyznaczyć moment zastępczy na wale wejściowym przekładni silnika PW1100G o startowych parametrach pracy:

- Moment: 21739.1 Nm
- Prędkość obrotowa: 9500 obr/min
- Ciąg startowy: 147280 N

Segment misji	Czas trwania, min	Moc, kW	Prędkość obrotowa, obr/min	Moment, Nm	Ciąg, N
Kołowanie	5	1081,2	617,5	16722,4	13991,6
Start	1,5	21625,3	9500	21739,1	147280
Pierwsze wznoszenie	6,2	19462,7	9025	20594,9	73640
Drugie wznoszenie	14,8	17300,2	8740	18903,5	51548
Przelot	64	16218,9	8550	18115,9	36820
Zejscie	20	2162,5	2850	7246,3	5154,8
Lądowanie	3	4325	4275	9661,8	22092
Wsteczny ciąg	0,5	21625,3	9500	21739,1	-117824
Kołowanie	5	1081,2	617,5	16722,4	13991,6

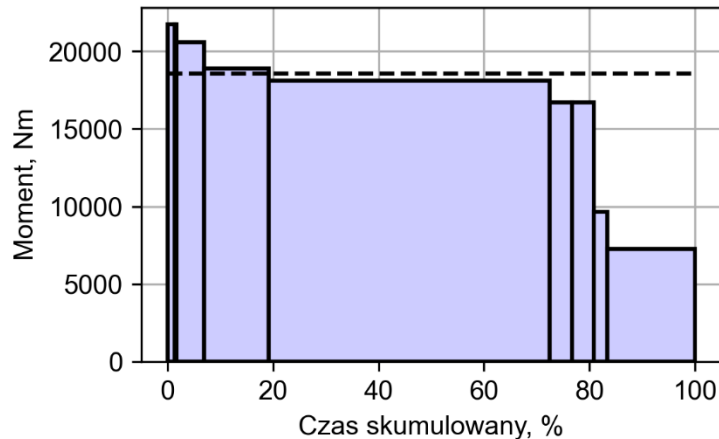


Czas trwania misji: 120 min

# Blokowe widmo obciążenia

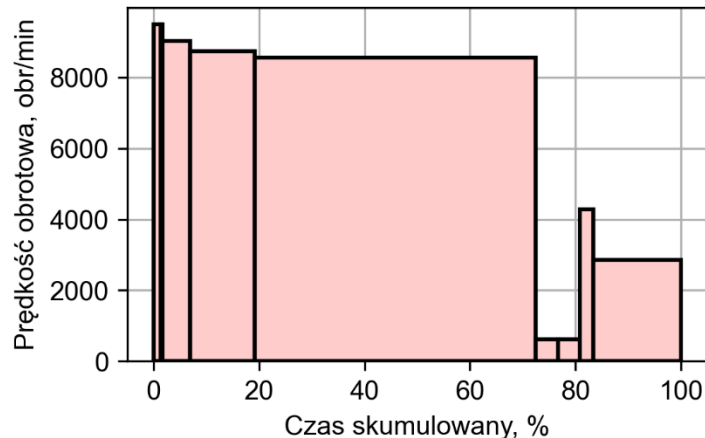
**Przykład** Wyznaczyć moment zastępczy na wale wejściowym przekładni silnika PW1100G o startowych parametrach pracy:

- Moment: 21739.1 Nm
- Prędkość obrotowa: 9500 obr/min
- Ciąg startowy: 147280 N



Dla  $q = 10$ :

$$M_{zast} = \left( \frac{\sum_{i=1}^k t_{pi} n_i M_i^q}{\sum_{i=1}^k t_{pi} n_i} \right)^{1/q} = 18583 \text{ Nm}$$



W zależności od tego do jakich obliczeń posłuży moment zastępczy można stosować różne wykładniki krzywej Wöhlera  $q$  np. inne dla zginania i inne dla naprężeń powierzchniowych.

# Naprężenia dopuszczalne

Naprężenia dopuszczalne to naprężenia, których nie należy przekroczyć w konstrukcji.

Obciążenia zmienne

$$k_o = \frac{Z_o}{x_z} \quad \begin{array}{l} \text{- "o" cykl obustronnie zmienny (wahadłowy),} \\ \text{- "j" cykl jednostronnie zmienny (odzerowo-tętniący),} \\ \text{- } Z_{o,j} \text{ to wytrzymałość zmęczeniowa dla odpowiedniego cyklu,} \end{array}$$

$$k_j = \frac{Z_j}{x_z} \quad \begin{array}{l} \text{- } x_z \text{ to współczynnik bezpieczeństwa przy obciążeniach zmiennych} \\ \text{(od 3 do 4 dla materiałów plastycznych np. stal, od 3 do 6 dla} \\ \text{materiałów kruchych np. żeliwo).} \end{array}$$

Cykl	Zginanie	Skrećanie	Rozciąganie/ściskanie
Obustronnie zmienny	$k_{go} = \frac{Z_{go}}{x_z}$	$k_{so} = \frac{Z_{so}}{x_z}$	$k_{rc} = \frac{Z_{rc}}{x_z}$
Jednostronnie zmienny	$k_{gj} = \frac{Z_{gj}}{x_z}$	$k_{sj} = \frac{Z_{sj}}{x_z}$	$k_{rj} = \frac{Z_{rj}}{x_z}$

Zginanie	Skrećanie	Rozciąganie/ściskanie
$Z_{go} = 0.42R_m$	$Z_{so} = 0.25R_m$	$Z_{rc} = 0.31R_m$
$Z_{gj} = (0.66 \div 0.76)R_m$	$Z_{sj} = (0.46 \div 0.50)R_m$	$Z_{rj} = (0.52 \div 0.56)R_m$

# Naprężenia dopuszczalne

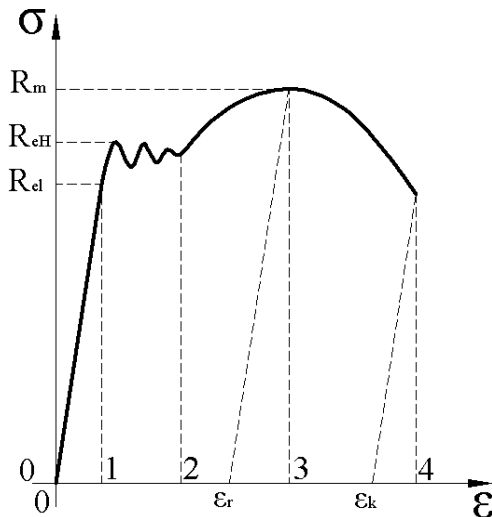
Obciążenia stałe

Materiały plastyczne (np. stal)

$$k = \frac{R_e}{x_e}$$

gdzie:

- $R_e$  to granica plastyczności
- $x_e$  to współczynnik bezpieczeństwa (dla stali od 1.2 do 2.3)

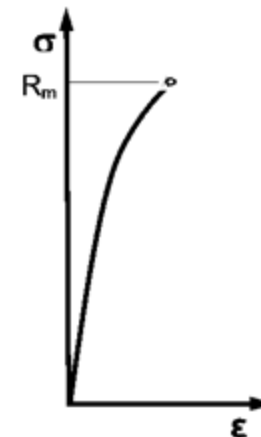


Materiały kruche (np. żeliwo)

$$k = \frac{R_m}{x_m}$$

gdzie:

- $R_m$  to wytrzymałość na rozciąganie
- $x_m$  to współczynnik bezpieczeństwa (dla żeliwa od 2 do 4)



# Sprawdzające obliczenia zmęczeniowe

Mają na celu wyznaczenie rzeczywistych współczynników bezpieczeństwa, prowadzone są po ukształtowaniu/zaprojektowaniu części.

Oblicza się rzeczywisty współczynnik bezpieczeństwa:

$$x = \frac{x_{\sigma} x_{\tau}}{\sqrt{x_{\sigma}^2 + x_{\tau}^2}} \geq x_{dop}$$

gdzie:

$$x_{\sigma} = \frac{Z_{\sigma} \epsilon}{\sigma_{na} \beta_{\sigma}} \quad \text{- to współczynnik bezpieczeństwa wg naprężeń normalnych}$$

$$x_{\tau} = \frac{Z_{\tau} \epsilon}{\tau_{na} \beta_{\tau}} \quad \text{- to współczynnik bezpieczeństwa wg naprężeń stycznych}$$

$Z_{\sigma, \tau}$  – to nieograniczona wytrzymałość zmęczeniowa na naprężenia odpowiednio normalne (np. obustronne zginanie) i styczne (np. obustronne skręcanie).

$\sigma_{na}, \tau_{na}$  – to amplitudy naprężeń rzeczywistych odpowiednio normalnych i stycznych

$\epsilon$  – to współczynnik wielkości przedmiotu

$\beta_{\sigma, \tau}$  – to współczynnik spiętrzenia naprężeń odpowiednio dla naprężeń normalnych i stycznych.

# Sprawdzające obliczenia zmęczeniowe

$$x = \frac{x_{\sigma} x_{\tau}}{\sqrt{x_{\sigma}^2 + x_{\tau}^2}} \geq x_{dop}$$

Jeżeli element poddawany jest tylko naprężeniem normalnym (np. czyste zginanie) wówczas  $x = x_{\sigma}$ , jeżeli natomiast występują tylko naprężenia styczne (np. od skręcania) to  $x = x_{\tau}$ .

Wzór wyprowadzony na podstawie złożenia naprężeń normalnych i stycznych wg hipotezy Hubera.

Jeśli jedno z obciążeń jest stałe, wówczas zmienia się jedynie średnia wartość obciążenia a amplituda pozostaje taka sama i obliczenia prowadzi się tylko dla tego obciążenia zmiennego.

# Sprawdzające obliczenia zmęczeniowe

Współczynnik spiętrzenia naprężeń

$$\beta_{\sigma, \tau} = \beta_{k\sigma, \tau} + \beta_{p\sigma, \tau} - 1$$

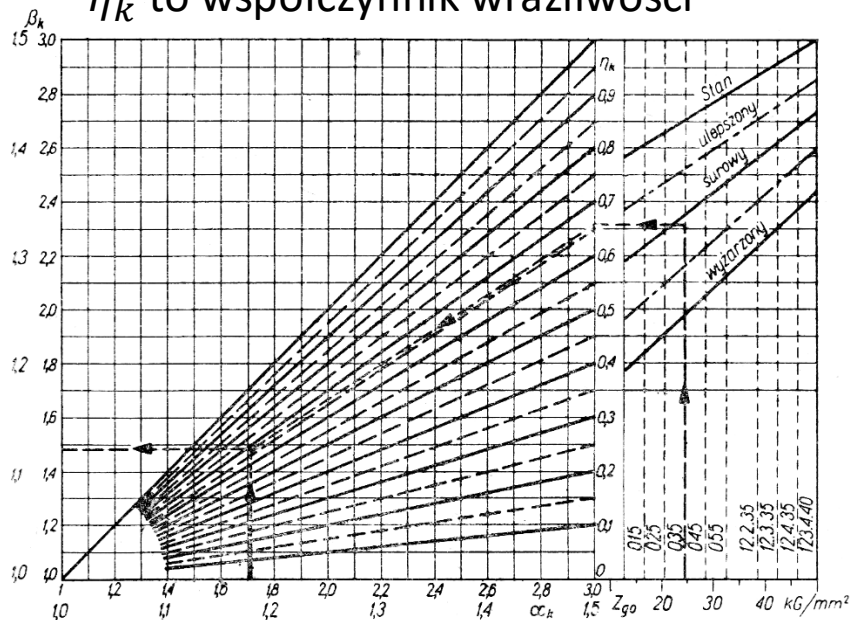
Współczynnik działania karbu

$$\beta_k = 1 + \eta_k(\alpha_k - 1)$$

gdzie:

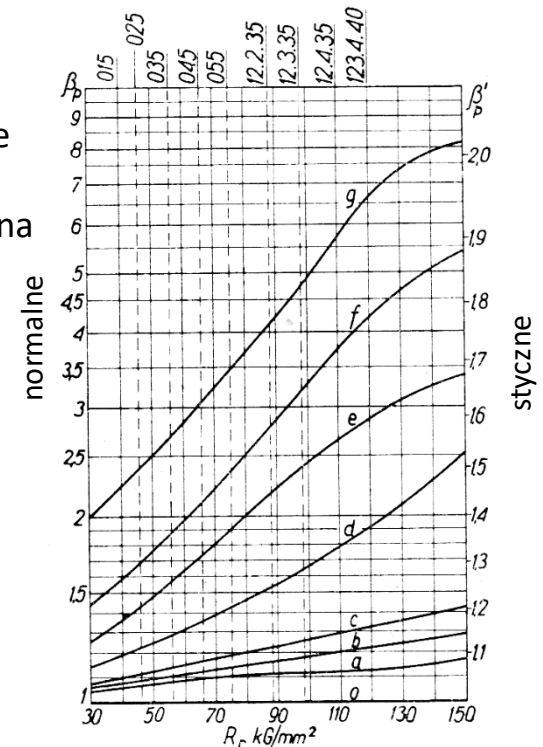
$\alpha_k$  to współczynnik kształtu

$\eta_k$  to współczynnik wrażliwości



Współczynnik stanu powierzchni

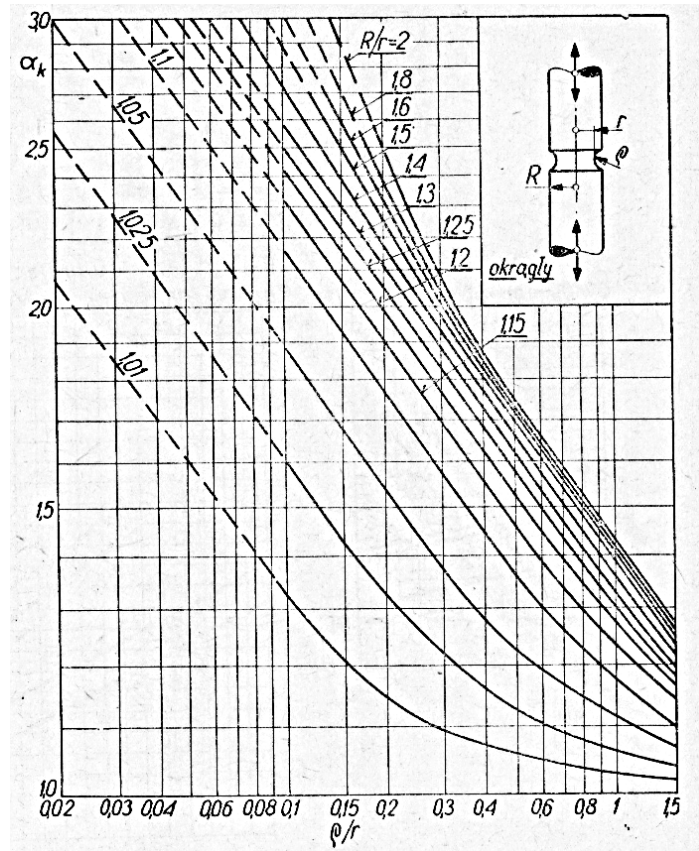
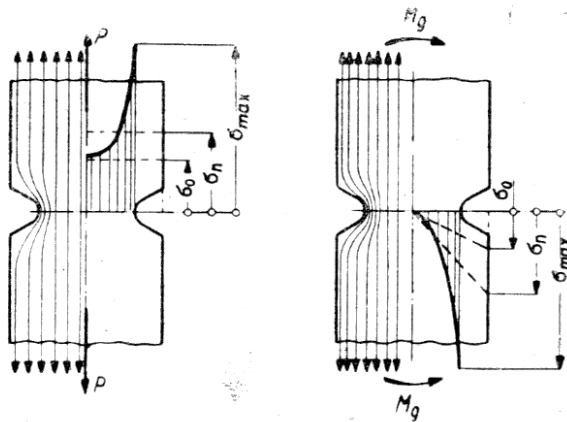
- o – polerowanie
  - a – szlifowanie
  - b – staranne toczenie
  - c – zgrubne toczenie
  - d – pow. Nakarbowana
- Rr = Rm



# Sprawdzające obliczenia zmęczeniowe

Współczynnik kształtu

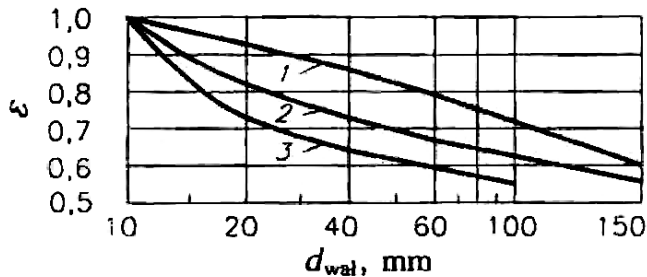
$$\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}$$



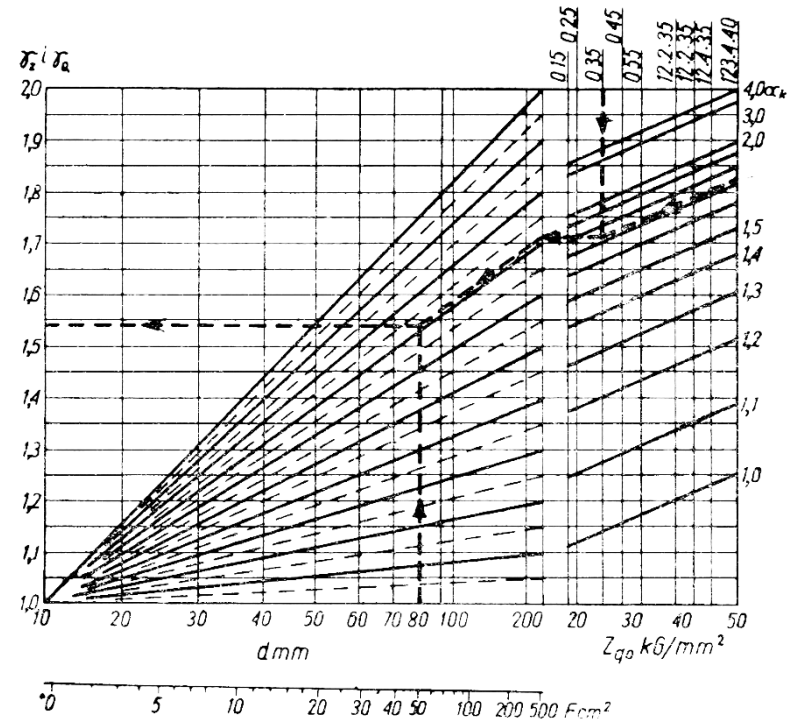
# Sprawdzające obliczenia zmęczeniowe

Współczynnik wielkości przedmiotu:

$$\varepsilon = \frac{1}{\gamma}$$



- 1 - stal węglowa  $R_m = 400 \div 500 \text{ MPa}$
- 2 - stal stopowa  $R_m = 1200 \div 1400 \text{ MPa}$
- 3 - staliwo 340-550



# Podsumowanie

Technologiczność konstrukcji jest pojęciem względnym, konstrukcja może być uznana za technologiczną lub nie w zależności od warunków i stawianych wymagań.

Obciążenie zmienne w czasie można sprowadzić do obciążenia zastępczego wywołującego ten sam efekt niszczący za pomocą hipotezy kumulacji uszkodzeń.

Na wytrzymałość zmęczeniową wpływają:

- wielkość przedmiotu,
- karby,
- stan powierzchni,
- rodzaj obciążenia,
- własności materiału.

# Literatura

1. Moszyński W.: Wytrzymałość zmęczeniowa części maszynowych. 2 wyd. Warszawa: PWT, 1954.
2. Palmgren A.G.: Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 68.14 (1924), s. 0341–7258.
3. Miner M.A.: Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, 12.3 (1945), A159–A164. doi: 10.1115/1.4009458.
4. Kurmaz L.W., Kurmaz O.L.: Podstawy konstruowania węzłów i części maszyn. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2011. isbn: 978-83-88906-34-3.
5. Moszyński W.: Wykład elementów maszyn. Część I: Połączenia. 4 wyd. Warszawa: PWT, 1955.
6. Moszyński W.: Wykład elementów maszyn. Część II: Łożyskowanie. 4 wyd. Warszawa: PWT, 1955.
7. Moszyński W.: Wykład elementów maszyn. Część III: Napędy. 4 wyd. Warszawa: PWT, 1956.
8. Moszyński W.: Wykład elementów maszyn. Część IV: Mechanizmy. 3 wyd. Warszawa: PWT, 1955.
9. M. Dietrich, red.: Podstawy konstrukcji maszyn. T. 1. Warszawa: WNT, 1999. isbn: 83-204-2344-9.
10. M. Dietrich, red.: Podstawy konstrukcji maszyn. T. 2. Warszawa: WNT, 1999. isbn: 83-204-2345-7.
11. M. Dietrich, red.: Podstawy konstrukcji maszyn. T. 3. Warszawa: WNT, 1999. isbn: 83-204-2346-5.
12. Mazanek E., Dziurski A.: Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn: Połączenia, sprężyny, zawory, wały maszynowe. T. 1. WNT, 2008. isbn: 9788320434187.
13. Mazanek E., Dziurski A.: Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn: Łożyska, sprzęgła i hamulce, przekładnie mechaniczne. T. 2. WNT, 2005. isbn: 9788320430028.
14. Homik W., Połowniak P.: Podstawy konstrukcji maszyn. Wybrane zagadnienia. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2012. isbn: 978-83-7199-764-8.
15. Rutkowski A.: Części maszyn. 6 wyd. Warszawa: WSiP, 1996. isbn: 9788302062001.



**POLITECHNIKA  
RZESZOWSKA**  
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ  
BUDOWY MASZYN  
I LOTNICTWA**  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Dziękuję za uwagę!

dr inż. Michał Batsch