
Podstawy Konstrukcji

Maszyn

Wały i osie

Pojęcie osi i wału

Oś lub **wał** nazywa się element maszyny podparty w łożyskach

i podtrzymujący osadzone na nim części maszyn. Na wale mogą być osadzone różne elementy wykonujące ruchy obrotowe (np. koła zębate, piasty, tarcze hamulcowe itp.) lub ruchy wahadłowe (np. koło zębate współpracujące z zębatką).

Różnica pomiędzy osią a wałem:

Oś – element obciążony jedynie momentem gnącym

Wał – element, którego głównym zadaniem jest przenoszenie momentu obrotowego

Typy osi i wałów

Gładkie



Stopniowane



Korbowe



Rozrzędu

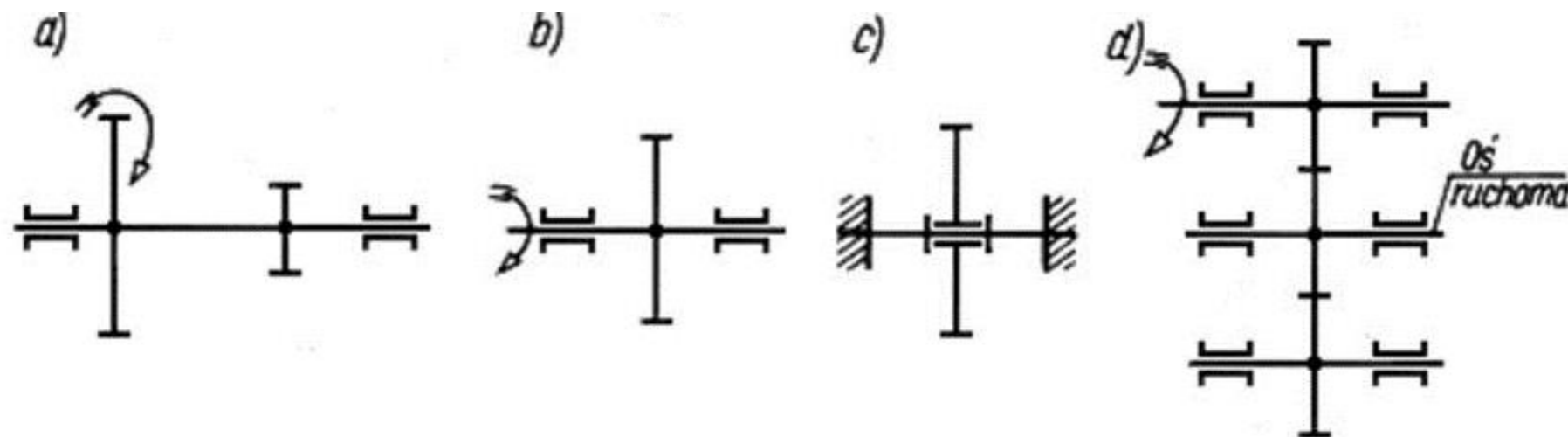


Osie



Stałe – kierunek działania obciążenia jest stały względem osi

Ruchome – obciążenie zmienia kierunek działania



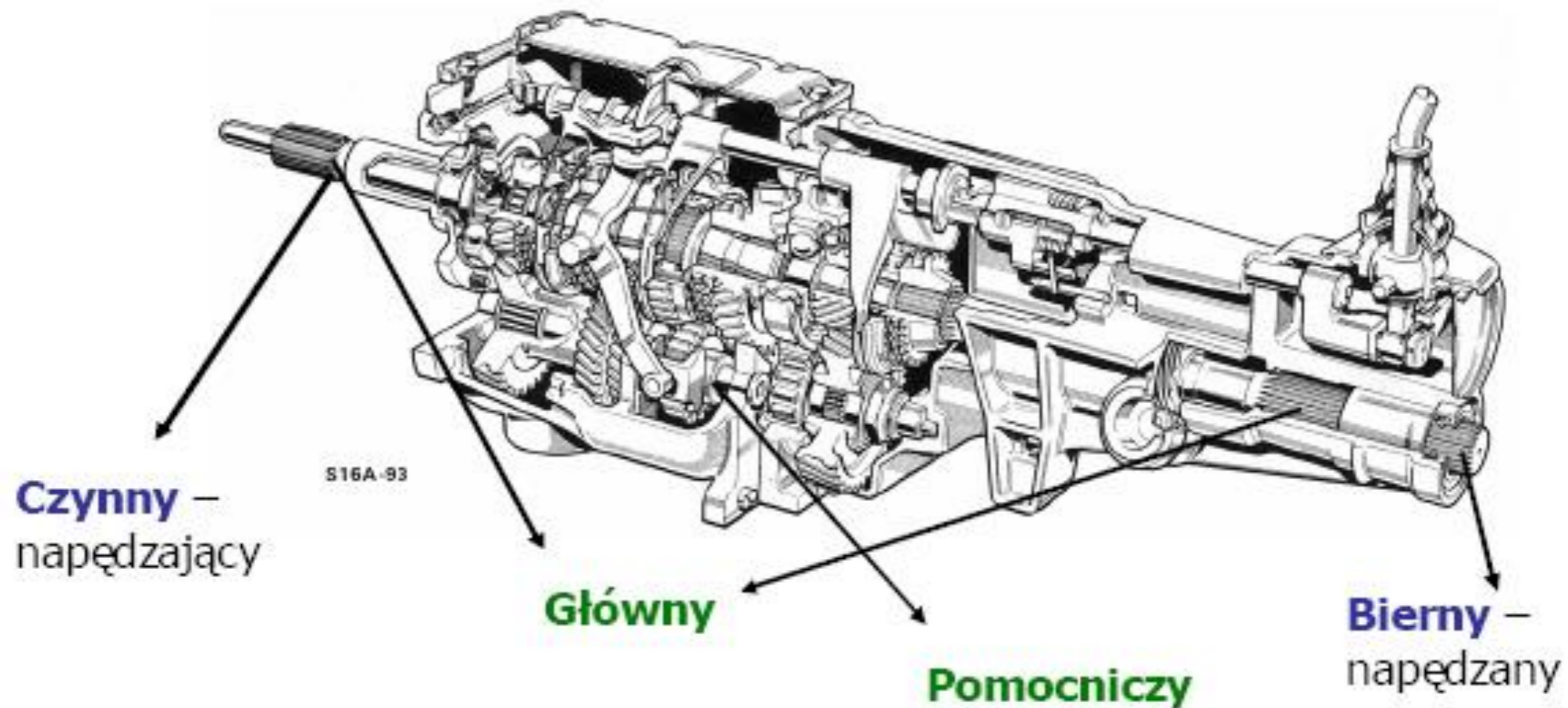
Schematy: a, b) wału, c) osi nieruchomej, d) osi ruchomej

Przykłady wałów

Głównym zadaniem wału jest przeniesienie momentu obrotowego, zatem wał wykonuje zawsze ruch obrotowy. W związku z tym wał jest narażony jednocześnie na skręcanie oraz - pod wpływem sił poprzecznych - na zginanie. W niektórych przypadkach wał może być narażony tylko na skręcanie (np. samochodowy wał napędowy w sprzęgle Cardana).



Przykłady wałów c.d.



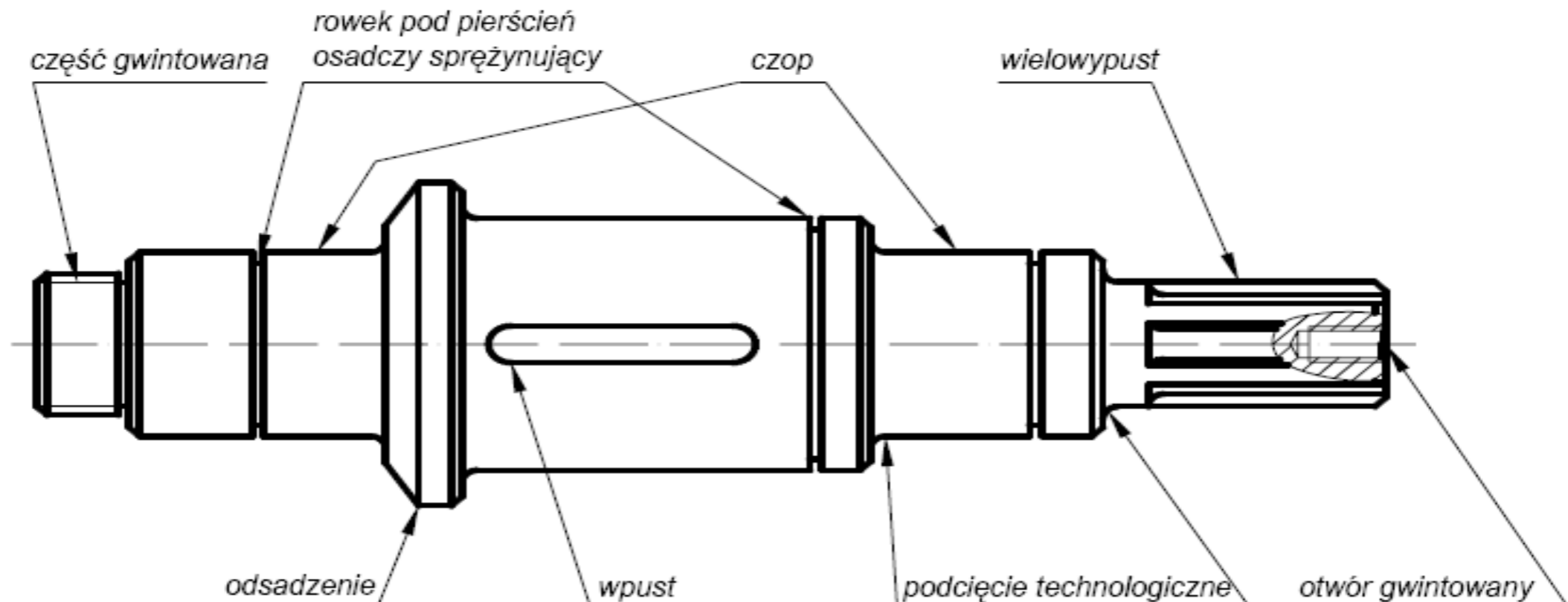
Przykłady wałów c.d.

Wał wykonany z kompozytów



Charakterystyczne powierzchnie wału

Czopami nazywa się odcinki osi lub wału, których powierzchnie stykają się ze współpracującymi elementami: łożyskami, kołami zębatymi itd. Rozróżnia się czopy ruchowe i czopy spoczynkowe. Czopy ruchowe współpracują z panewkami łożysk ślizgowych, z kołami przesuwными lub obracającymi się względem nieruchomej osi itp., natomiast czopy spoczynkowe współpracują z elementami osadzonymi na stałe względem wału i obracającymi się wraz z nim.



Czopy - wymiary

PN/M-85000

Zalecane:

10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80 ...

Dopuszczane:

19, 24, 30, 38, 42, 56, 63, 65, 71, 75

Materiały stosowane na osie i wały

Osie i wały wykonuje się najczęściej ze stali:

- **konstrukcyjnej węglowej zwykłej jakości** (najczęściej E295, E360), gdy elementy są mało obciążone w maszynach mniej ważnych, stosowane bez obróbki cieplnej i gdy bardziej wymagana jest sztywność elementu niż jego wytrzymałość;
- **konstrukcyjnej węglowej wyższej jakości** (najczęściej C25, C35 i C45). Stale C25 i C35 stosuje się w stanie normalizowanym i ulepszonym lub hartowanym powierzchniowo (45), stosowane gdy wyższe obciążenia i temperatura;
- **konstrukcyjnej stopowej do ulepszania cieplnego**, najczęściej chromoniklowej, gdy wymagana jest mała średnica wału (w tym przypadku zalecane jest ulepszanie cieplne) oraz gdy na wale są odkute elementy pracujące jak koła zębate lub półowki sprzęgła, wymagające powierzchni odpornych na ścieranie – duże obciążenia zmienne i udarowe;
- **konstrukcyjnej stopowej do nawęglania lub azotowania** - jak w powyższym punkcie, ale gdy bardziej zależy nam na twardości powierzchni niż na wytrzymałości rdzenia elementu (zawsze nawęglone lub azotowane oraz zawsze hartowane przynajmniej na niektórych powierzchniach) – bardzo duże obciążenia zmienne, udarowe oraz wysokie obroty np wałki wirówek, wałki rozrządu;
- **konstrukcyjnej stopowej o szczególnych własnościach**, gdy wymagane są szczególne cechy, jak żaroodporność, nierdzewność, kwasoodporność itp.

W wyjątkowych przypadkach wykonuje się wały odlewane, stalowe lub żeliwne (głównie do wykonania wałów wykorbionych). Najczęściej stosuje się żeliwo modyfikowane lub sferoidalne.

Projektowanie osi i wałów - dane

- Schematy dotyczące wymiarów wałka, wymiary elementów osadzonych na wale oraz ich rozmieszczenie
- Dane dotyczące obciążenia wału ilościowe (siły, momenty, prędkości obrotowe, zmienność wartości) jak i jakościowe (kierunki działania sił, ich zwroty)
- Dane dotyczące oceny sztywności wałka (dopuszczalne ugięcie, typy łożysk, itp.)

Etapy projektowania

■ **Etap I – Projektowanie wstępne**

- Obliczenia reakcji i momentów
- Wyznaczenie średnic (zarys teoretyczny)

■ **Etap II – Kształtowanie wału**

- Wyznaczenie zarysu rzeczywistego
- Kształtowanie przejść, obliczenia wpustów

■ **Etap III – Obliczenia sztywności**

- Obliczenia sztywności (strzałka ugięcia, kąt ugięcia, kąt skręcenia)
- Obliczenia dynamiczne (prędkość krytyczna)

■ **Etap IV – Obliczenia sprawdzające**

- Obliczenia zmęczeniowe (wyznaczenie rzeczywistego wsp. bezpieczeństwa)

Etap I

Wały mogą być zginane, skręcane oraz rozciągane (ściskane), zatem niezbędne jest zastosowanie odpowiedniej teorii wytrzymałościowej - Hubera

$$\sigma_z = \sqrt{(\sigma_g + \sigma_{r(c)})^2 + (\alpha \cdot \tau_s)^2}$$

Gdy naprężenia normalne są dominujące

$$\tau_z = \sqrt{\left[\frac{1}{\alpha}(\sigma_g + \sigma_{r(c)})\right]^2 + (\tau_s)^2}$$

Gdy naprężenia styczne są dominujące

α – współczynnik redukcyjny (materiał i sposób obciążenia)

Obciążenia tego samego typu:

$$\alpha = \frac{k_g}{k_s} = \frac{k_{go}}{k_{so}} = \frac{k_{gj}}{k_{sj}} \approx \sqrt{3}$$

Obciążenia różnych typów:

$$\alpha = \frac{k_{gj}}{k_{so}} \approx \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\alpha = \frac{k_{go}}{k_{sj}} \approx 2 \cdot \sqrt{3}$$

Etap I c.d.

Rozpoczynając obliczenia nie znamy naprężeń, natomiast obciążenia są znane.

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_x} \leq k_{g(jo)} \qquad \tau_s = \frac{M_s}{W_o} \leq k_{s(jo)}$$

Dla przekroju kołowego, typowego dla osi i wałów, wskaźniki przekrojów można policzyć:

$$W_o = 2 \cdot W_x = 2 \cdot \frac{\pi d^3}{32} = \frac{\pi d^3}{16}$$

Etap I c.d.

ZATEM

W przypadku przewagi naprężeń normalnych ($M_s < 2M_g$)

$$\sigma_z = \frac{1}{W_x} \sqrt{(M_g)^2 + \left(\frac{\alpha}{2} \cdot M_s\right)^2} = \frac{M_z}{W_x} \leq k_{go}$$

W przypadku przewagi naprężeń stycznych ($M_s > 2M_g$)

$$\tau_z = \frac{1}{W_o} \sqrt{\left(\frac{2}{\alpha} M_g\right)^2 + (M_s)^2} = \frac{M_z}{W_o} \leq k_s \quad (k_{sj} \quad k_{so})$$

Etap I c.d.

Naprężenia dopuszczalne

$$k = \frac{R_e}{x_e} \quad \text{lub} \quad k = \frac{R_m}{x_m}$$

Material	x_e	x_m	x_z
Stale, staliwa, żeliwa ciągliwe	2÷2,3	-	3,5÷4
Żeliwa szare	-	3,5	3
Stopy miedzi	3÷4	-	4,5÷6
Stopy aluminium	3,5÷4	-	5÷7

Rodzaj obciążenia	Symbol	Stale, staliwa	Żeliwa szare	Stopy miedzi	Stopy aluminium
Rozciąganie i ściskanie	Z_{rj}	$(0,55 \div 0,63) R_m$	$\sim 1,5 Z_{rc}$	śr. $0,50 R_m$	śr. $0,48 R_m$
	Z_{rc}	$(0,28 \div 0,4) R_m$	śr. $0,7 Z_{go}$	śr. $0,28 R_m$	$0,7 Z_{go} \approx 0,25 R_m$
	Z_{cj}	Z_{rj}	$(3,4 \div 4) Z_{rj}$	Z_{rj}	Z_{rj}
Zginanie	Z_{gj}	$(0,66 \div 0,75) R_m$	$\sim 1,5 Z_{go}$	$\sim 1,8 Z_{go}$	$\sim 1,8 Z_{go}$
	Z_{go}	śr. $0,45 R_m$	śr. $0,4 R_m$	śr. $0,35 R_m$	śr. $0,34 R_m$
Skręcanie i ścinanie	Z_{sj}	$(0,46 \div 0,5) R_m$	$\sim 1,5 Z_{so}$	$\sim 1,7 Z_{so}$	$\sim 1,7 Z_{so}$
	Z_{so}	$(0,22 \div 0,25) R_m$	$\sim 0,8 Z_{go}$	$\sim 0,58 Z_{go}$	$\sim 0,56 Z_{go}$

Etap I c.d.

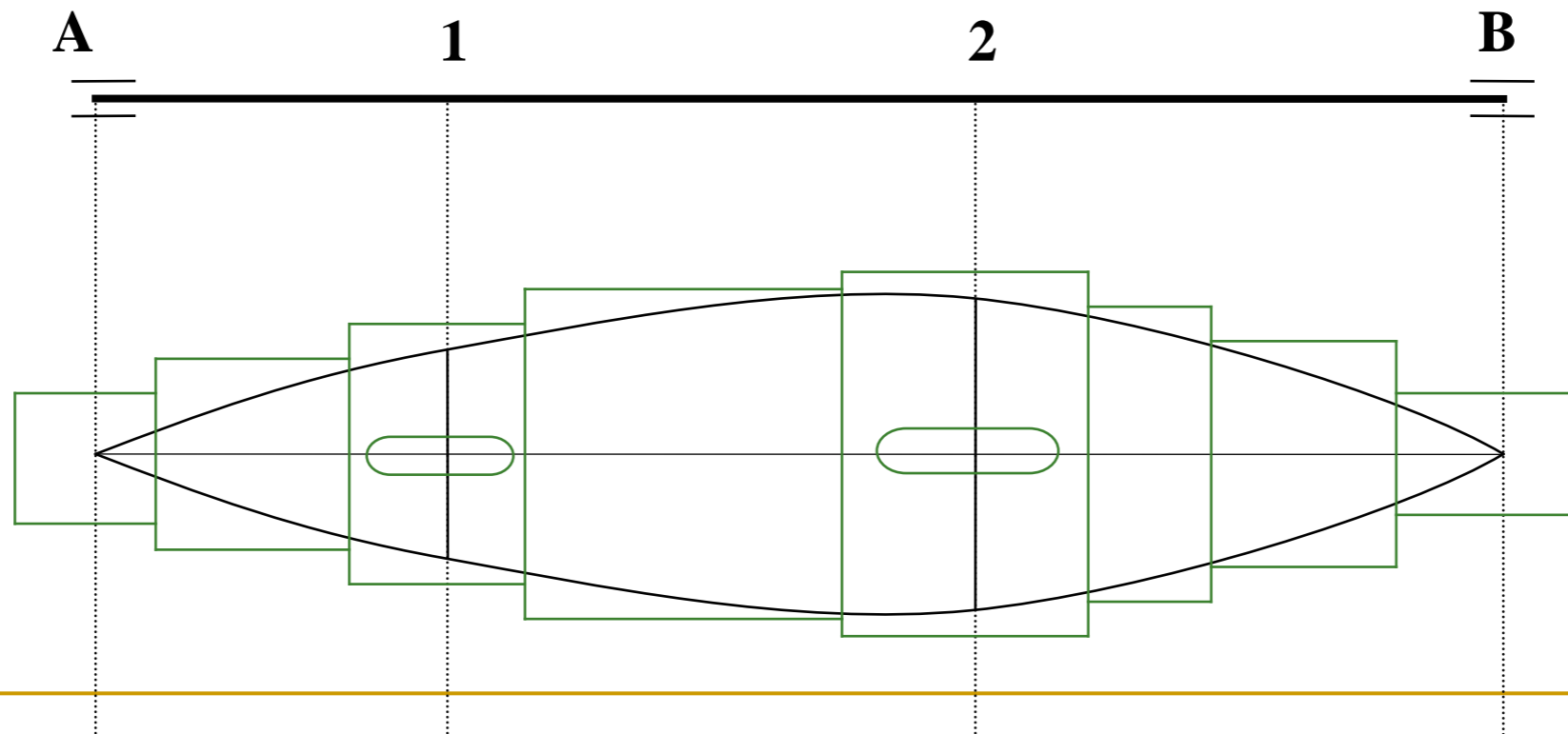
Wyznaczenie średnic wału

*W przypadku przewagi
naprężeń normalnych*

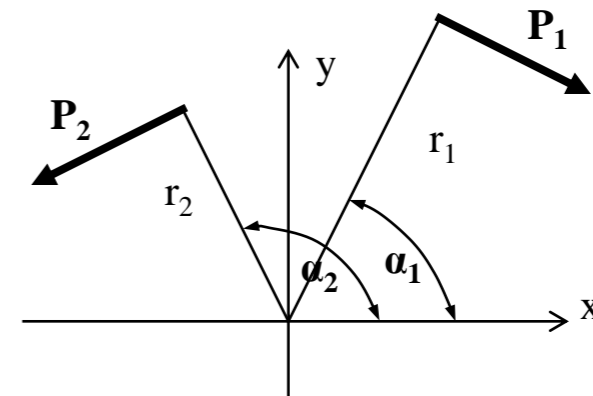
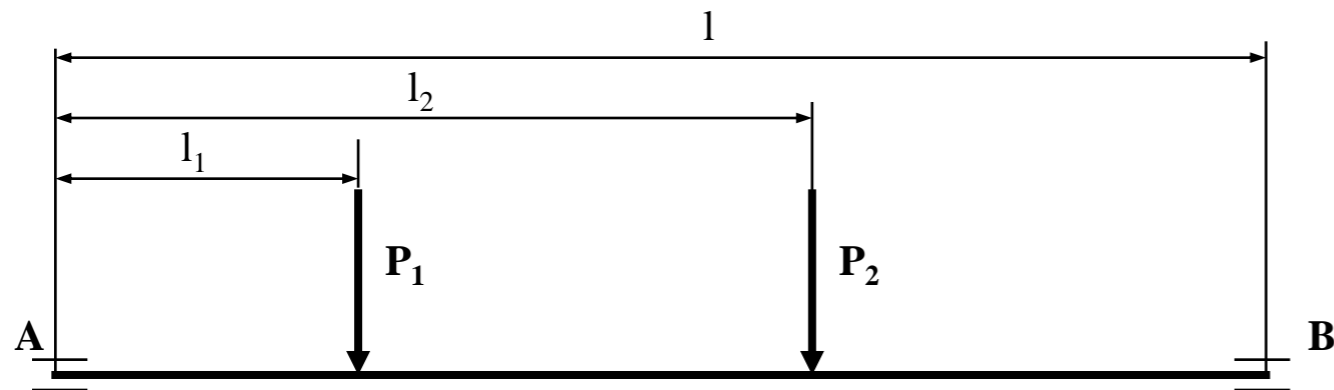
$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_z}{\pi \cdot k_{go}}}$$

*W przypadku przewagi
naprężeń stycznych*

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_z}{\pi \cdot k_s} \leftarrow k_{sj} \quad k_{so}}$$

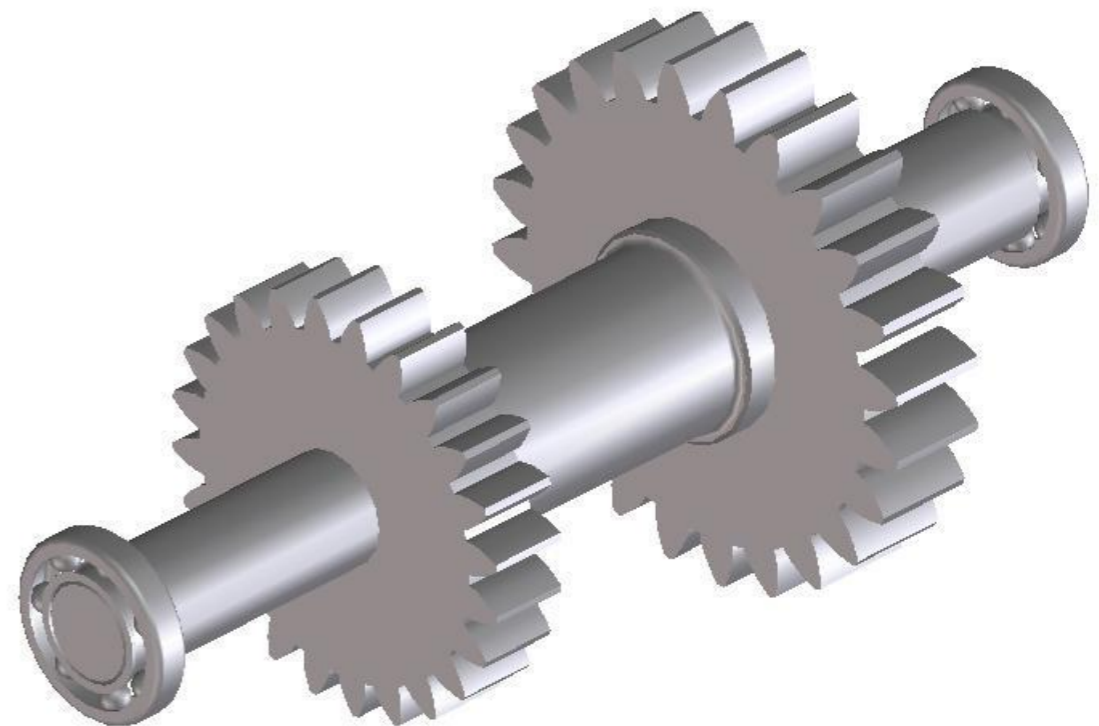


Obliczenia wstępne - przykład



Dane:

$P_1=10000\text{N}$ $r_1=0,08\text{m}$
 $l=0,4\text{m}$ $r_2=0,05\text{m}$
 $l_1=0,1\text{m}$ $\alpha_1=60^\circ$
 $l_2=0,25\text{m}$ $\alpha_2=120^\circ$
stal 45 ulepszana cieplnie
 $Z_{go}=250\text{MPa}$ $Z_{sj}=300\text{MPa}$

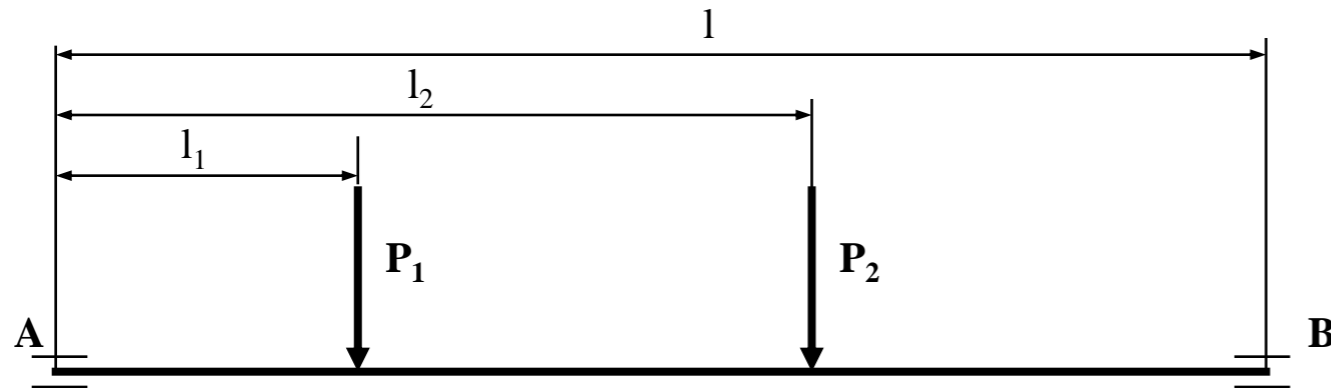


Obliczamy wartości siły P_2 z warunku równowagi momentów:

$$P_1 \cdot r_1 = P_2 \cdot r_2 \Rightarrow P_2 = \frac{P_1 \cdot r_1}{r_2} = \frac{10\text{kN} \cdot 0,08\text{m}}{0,05\text{m}} = 16\text{kN}$$

Obliczenia wstępne - przykład

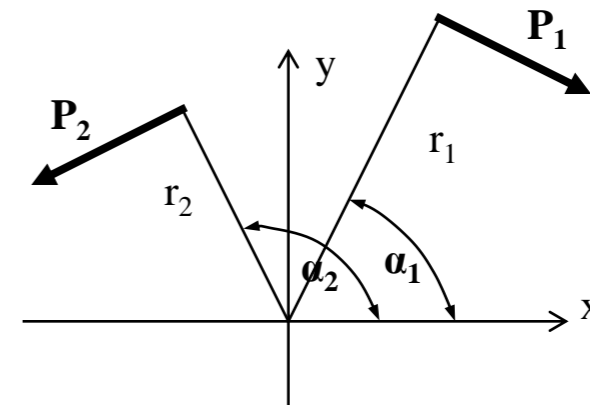
Obliczamy wartości składowych sił w płaszczyznach xz i yz:



płaszczyzna xz



płaszczyzna yz



Dane:

$$P_1 = 10000\text{N} \quad r_1 = 0,08\text{m}$$

$$l = 0,4\text{m} \quad r_2 = 0,05\text{m}$$

$$l_1 = 0,1\text{m} \quad \alpha_1 = 60^\circ$$

$$l_2 = 0,25\text{m} \quad \alpha_2 = 120^\circ$$

stal 45 ulepszana cieplnie

$$Z_{go} = 250\text{MPa} \quad Z_{sj} = 300\text{MPa}$$

$$P_{1x} = P_1 \cdot \sin 60^\circ = 10\text{kN} \cdot 0,8660 = 8,66\text{kN}$$

$$P_{2x} = P_2 \cdot \sin 60^\circ = 16\text{kN} \cdot 0,8660 = 13,856\text{kN}$$

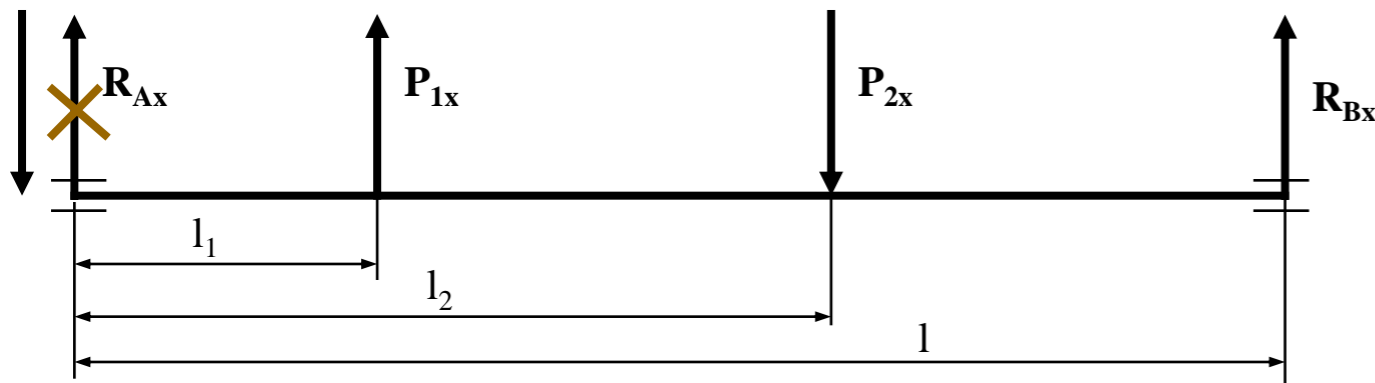
$$P_{1y} = P_1 \cdot \cos 60^\circ = 10\text{kN} \cdot 0,5 = 5\text{kN}$$

$$P_{2y} = P_2 \cdot \cos 60^\circ = 16\text{kN} \cdot 0,5 = 8\text{kN}$$

Obliczenia wstępne - przykład

Obliczamy wartości reakcji z warunków równowagi sił w kierunku x i y, oraz z warunków równowagi momentów względem łożysk:

plaszczyzna xz



$$\sum P_{ix} = 0 \quad R_{Ax} + P_{1x} - P_{2x} + R_{Bx} = 0 \quad \Rightarrow \quad R_{Ax} = -P_{1x} + P_{2x} - R_{Bx}$$

$$\sum M_{ixA} = 0 \quad P_{1x} \cdot l_1 - P_{2x} \cdot l_2 + R_{Bx} \cdot l = 0 \quad \Rightarrow \quad R_{Bx} = \frac{-P_{1x} \cdot l_1 + P_{2x} \cdot l_2}{l}$$

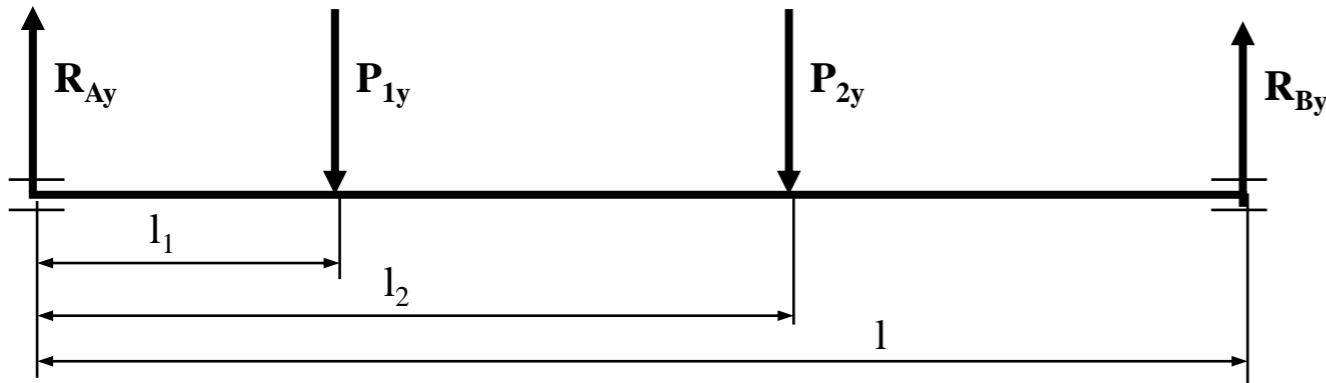
$$R_{Bx} = \frac{-8,66kN \cdot 0,1m + 13,856kN \cdot 0,25m}{0,4m} = 6,495kN$$

$$R_{Ax} = -8,66kN + 13,856kN - 6,495kN = -1,299kN$$

Ujemna wartość reakcji R_{Ax} oznacza błędnie założony zwrot. Należy więc go skorygować.

Obliczenia wstępne - przykład

płaszczyzna yz



$$\sum P_{iy} = 0 \quad R_{Ay} - P_{1y} - P_{2y} + R_{By} = 0 \quad \Rightarrow \quad R_{Ay} = P_{1y} + P_{2y} - R_{By}$$

$$\sum M_{iyA} = 0 \quad -P_{1y} \cdot l_1 - P_{2y} \cdot l_2 + R_{By} \cdot l = 0 \quad \Rightarrow \quad R_{By} = \frac{-P_{1y} \cdot l_1 + P_{2y} \cdot l_2}{l}$$

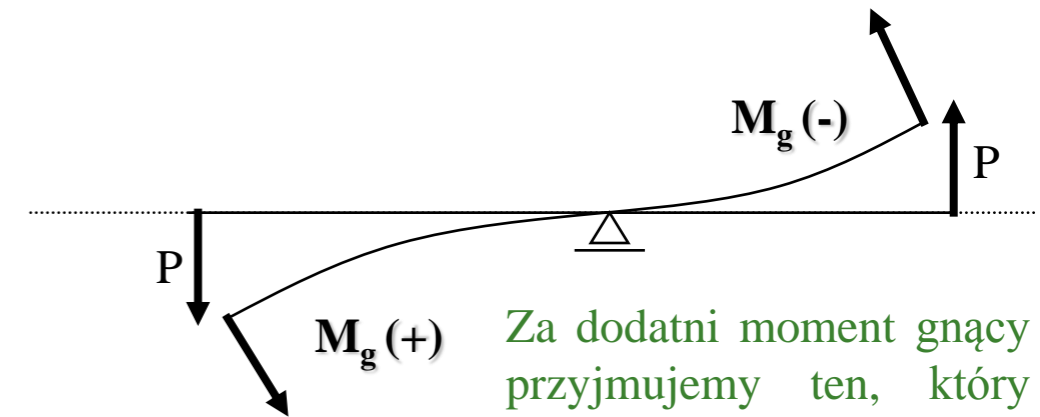
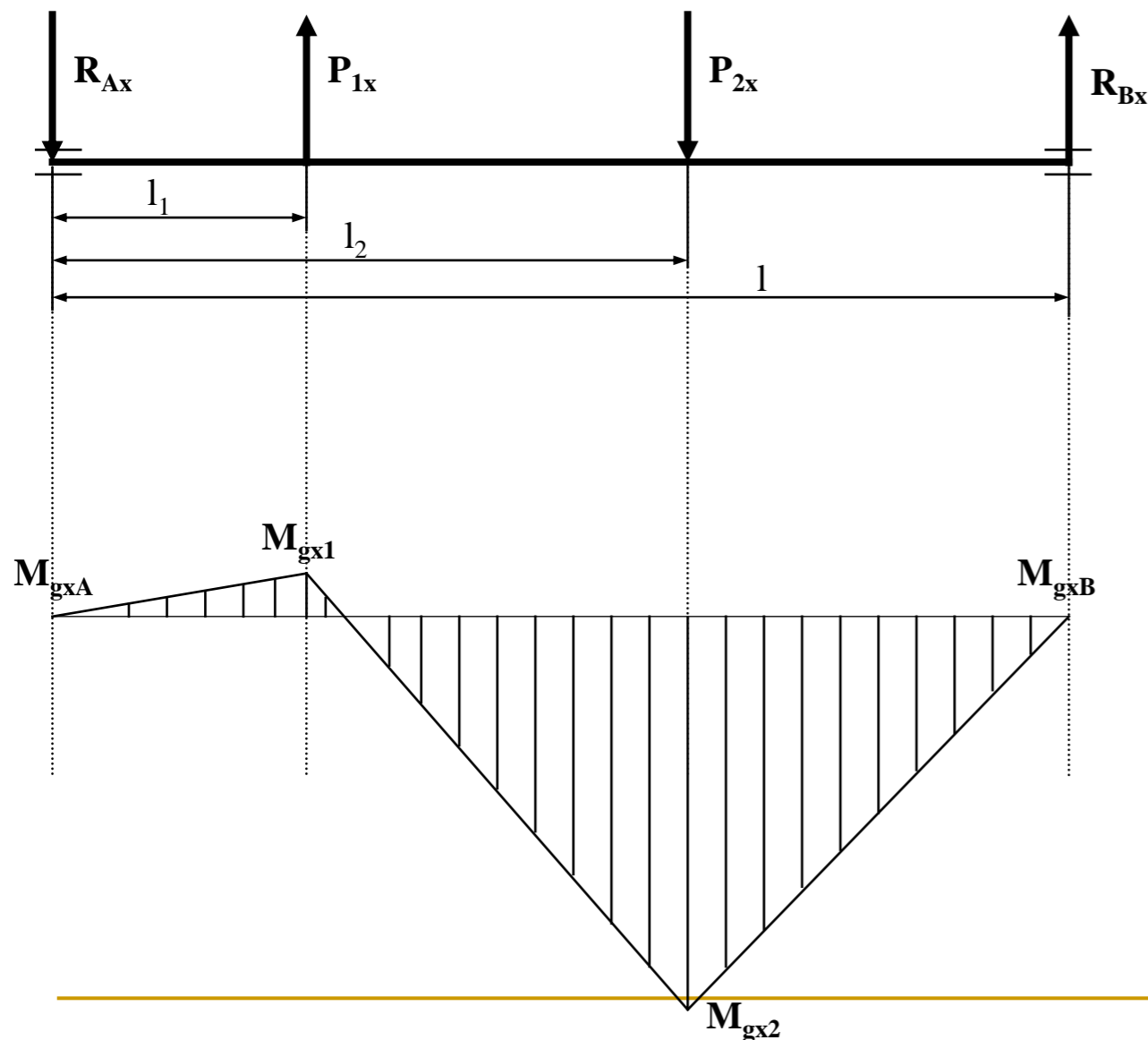
$$R_{By} = \frac{5\text{kN} \cdot 0,1\text{m} + 8\text{kN} \cdot 0,25\text{m}}{0,4\text{m}} = 6,25\text{kN}$$

$$R_{Ay} = 5\text{kN} + 8\text{kN} - 6,25\text{kN} = 6,75\text{kN}$$

Obliczenia wstępne - przykład

Obliczamy wartości momentów gnących w płaszczyznach xz i yz .

płaszczyzna xz



Za dodatni moment gnący przyjmujemy ten, który powoduje ugięcie wału ku dołowi.

$$M_{gxA} = 0$$

$$M_{gx1} = R_{Ax} \cdot l_1 = 1.299 \text{ kN} \cdot 0,1 \text{ m} = 129,9 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned} M_{gx2} &= R_{Ax} \cdot l_2 - P_{1x} \cdot (l_2 - l_1) = \\ &= 1,299 \text{ kN} \cdot 0,25 \text{ m} - 8,66 \text{ kN} \cdot (0,25 \text{ m} - 0,1 \text{ m}) = \\ &= -974,25 \text{ Nm} \end{aligned}$$

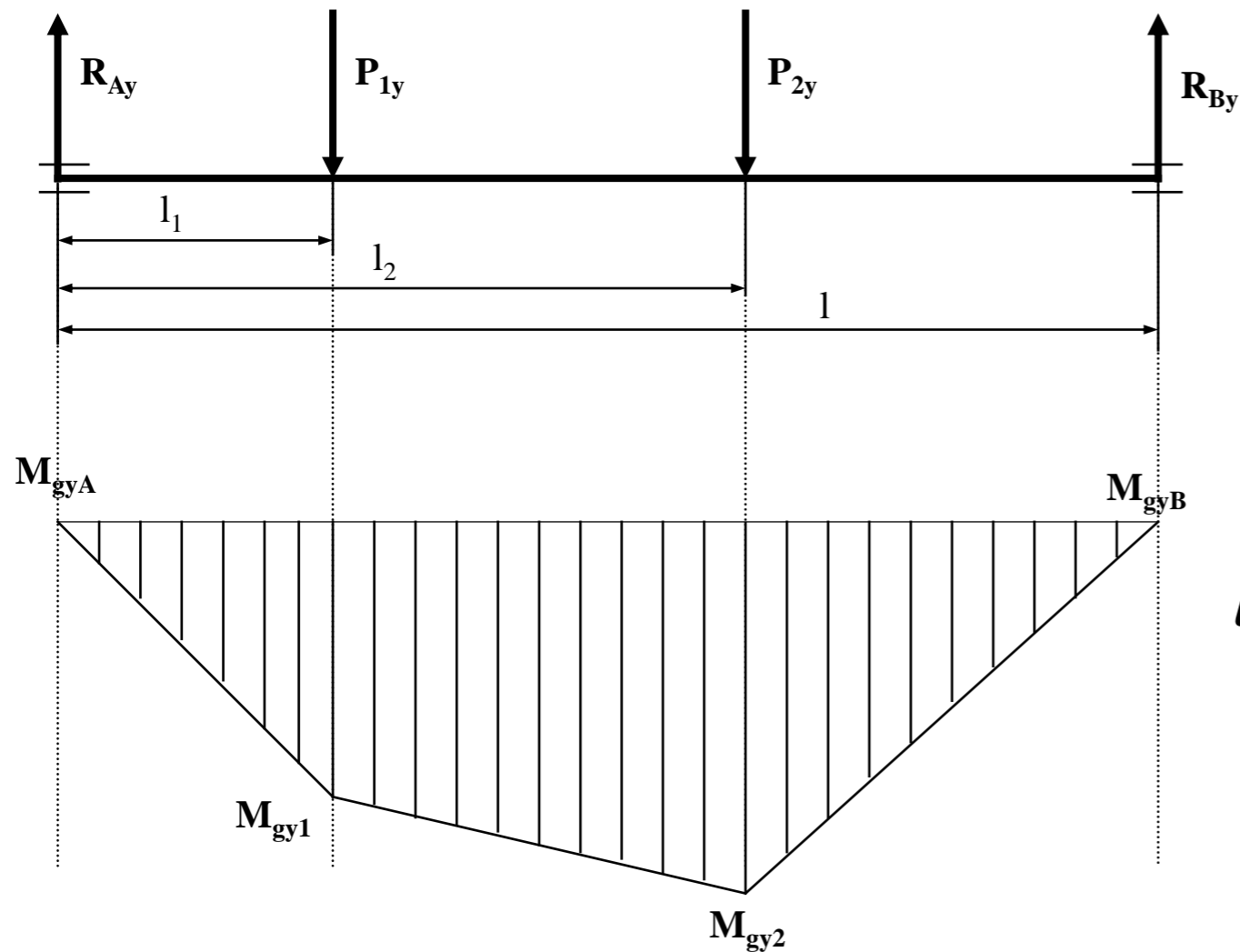
lub

$$\begin{aligned} M_{gx2} &= -R_{Bx} \cdot (l - l_2) = \\ &= 6,495 \text{ kN} \cdot (0,4 \text{ m} - 0,25 \text{ m}) = -974,25 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$M_{gxB} = 0$$

Obliczenia wstępne - przykład

płaszczyzna yz



$$M_{gyA} = 0$$

$$M_{gy1} = -R_{Ay} \cdot l_1 = -6,75kN \cdot 0,1m = -675Nm$$

$$\begin{aligned} M_{gy2} &= -R_{Ay} \cdot l_2 + P_{1y} \cdot (l_2 - l_1) = \\ &= -6,75kN \cdot 0,25m + 5kN \cdot (0,25m - 0,1m) = \\ &= -937,5Nm \end{aligned}$$

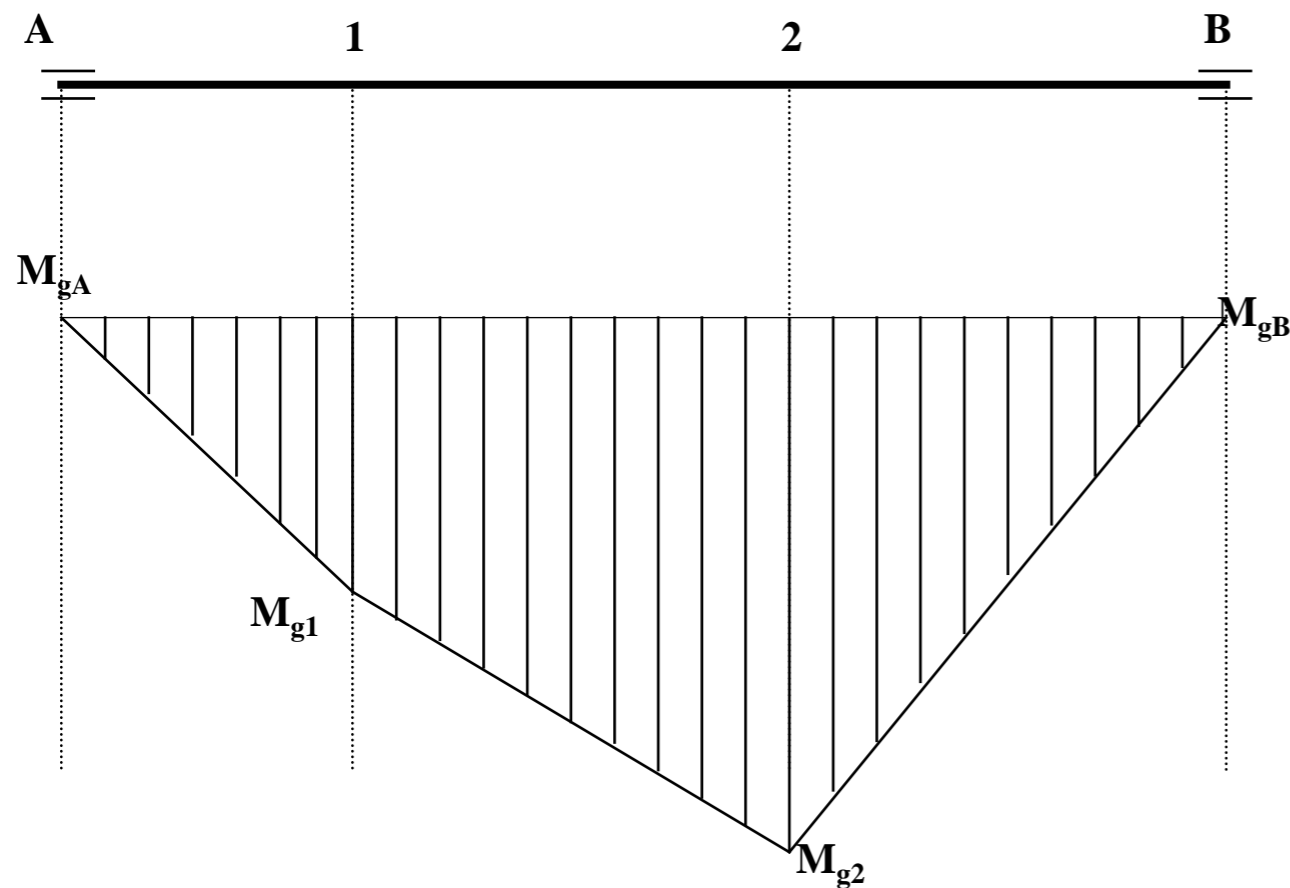
lub

$$\begin{aligned} M_{gy2} &= -R_{By} \cdot (l - l_2) = \\ &= -6,25kN \cdot (0,4m - 0,25m) = -937,5Nm \end{aligned}$$

$$M_{gyB} = 0$$

Obliczenia wstępne - przykład

Obliczamy wartości momentów gnących wypadkowych



$$M_{gA} = 0$$

$$\begin{aligned} M_{g1} &= \sqrt{M_{gx1}^2 + M_{gy1}^2} = \\ &= \sqrt{(129,9Nm)^2 + (-675Nm)^2} = 687,385Nm \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{g2} &= \sqrt{M_{gx2}^2 + M_{gy2}^2} = \\ &= \sqrt{(-974,25Nm)^2 + (-937,5Nm)^2} = \\ &= 1352,061Nm \end{aligned}$$

$$M_{gB} = 0$$

Obliczenia wstępne - przykład

Obliczamy moment skręcający, który działa pomiędzy przekrojem 1 i 2

$$M_s = P_1 \cdot r_1 = P_2 \cdot r_2 = 10kN \cdot 0,08m = 800Nm$$

Wyznaczamy moment zastępczy zakładając obustronne zginanie wału i jednostronne zmienne skręcanie.

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_g^2 + (\alpha\tau_s)^2}$$

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_x}$$

gdzie

$$W_x = \frac{\pi d^3}{32}$$

$$\tau_s = \frac{M_s}{W_o}$$

gdzie

$$W_o = \frac{\pi d^3}{16}$$

$$\Rightarrow W_x = 2W_o$$

zatem

$$\sigma_{red} = \sqrt{\left(\frac{M_g}{W_x}\right)^2 + \left(\alpha \frac{M_s}{2W_x}\right)^2} = \frac{1}{W_x} \sqrt{M_g^2 + \left(\frac{\alpha}{2} M_s\right)^2}$$

i

$$M_z = \sqrt{M_g^2 + \left(\frac{\alpha}{2} M_s\right)^2}$$

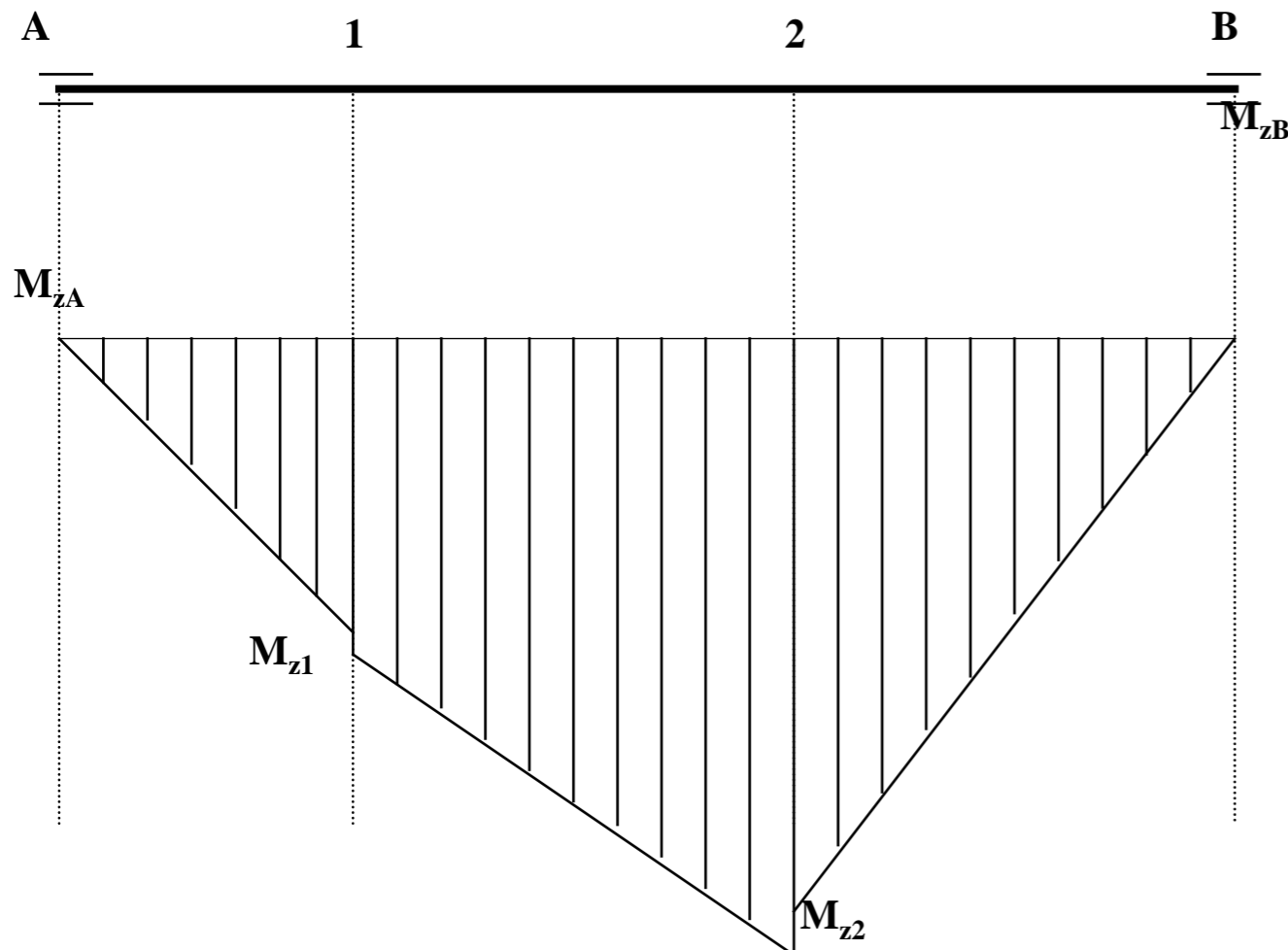
Obliczenia wstępne - przykład

Dla tego typu zmienności obciążenia wartość współczynnika redukcyjnego α wynosi:

$$\alpha = \frac{k_{go}}{k_{sj}} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

zatem:

$$M_{zi} = \sqrt{M_{gi}^2 + \frac{3}{16} M_s^2}$$



$$M_{zA} = 0$$

$$M_{z1} = \sqrt{(687,385Nm)^2 + \frac{3}{16} (800Nm)^2} = 769,75Nm$$

$$M_{z2} = \sqrt{(1352,061Nm)^2 + \frac{3}{16} (800Nm)^2} = 1395,73Nm$$

$$M_{zB} = 0$$

Obliczenia wstępne - przykład

W przypadku, gdy dominuje zginanie mamy warunek:

$$\sigma_{red} = \frac{M_z}{W_x} \leq k_{go}$$

Dopuszczalne naprężenia przy obustronnie zmiennym zginaniu przyjmujemy przy założonym współczynniku bezpieczeństwa $x=4$ wynoszą:

$$k_{go} = \frac{Z_{go}}{x} = \frac{250MPa}{4} = 62,5MPa$$

Dla przekroju okrągłego wału mamy:

$$W_x = \frac{\pi d^3}{32}$$

Stąd po przekształceniach otrzymujemy wzór na średnicę wału:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32M_z}{\pi k_{go}}}$$

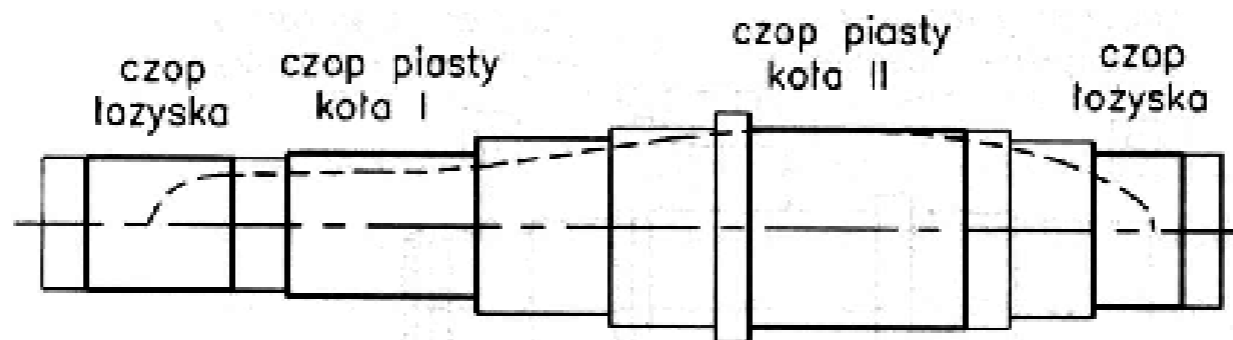
Obliczenia wstępne - przykład

Obliczenia średnic teoretycznych wału

$$d_A \geq 0 \quad d_B \geq 0$$

$$d_1 \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 769,75 \text{ Nm}}{\pi \cdot 62,5 \text{ MPa}}} = 0,05060 \text{ m} = 50,6 \text{ mm}$$

$$d_2 \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 1395,73 \text{ Nm}}{\pi \cdot 62,5 \text{ MPa}}} = 0,08496 \text{ m} = 84,96 \text{ mm}$$



ETAP II – kształtowanie wałów

1. Wszystkie średnice muszą być większe od zarysu teoretycznego

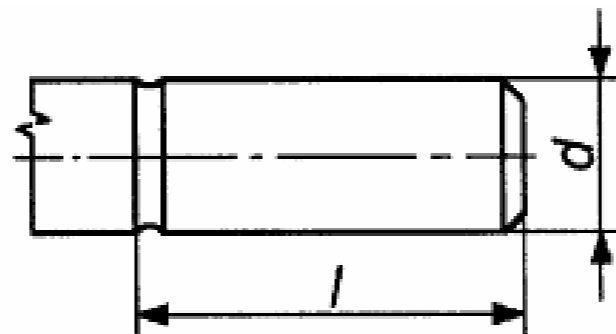
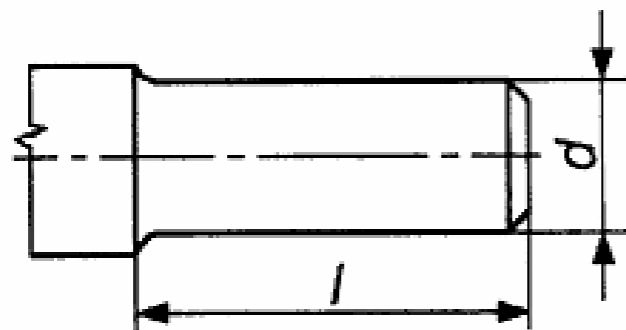
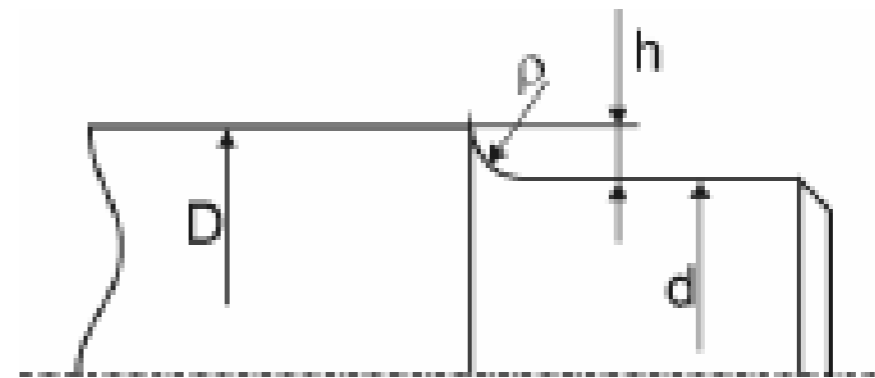
2. Stopniowanie średnic

$$\frac{D}{d} \leq 1.2$$

3. Promienie zaokrągleń

$$\frac{\rho}{d} \approx 0.02$$

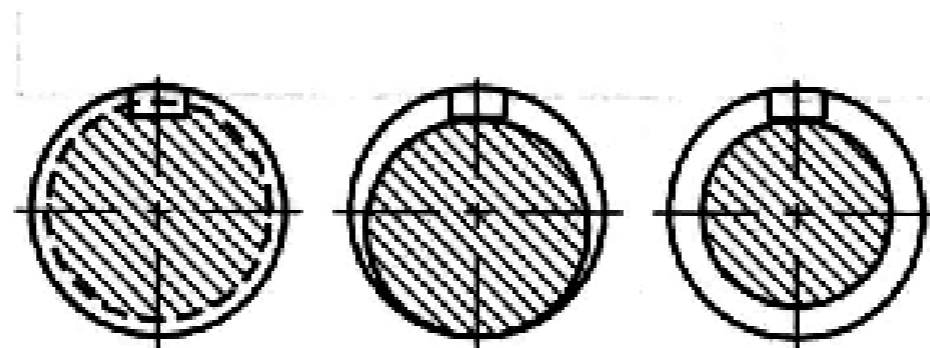
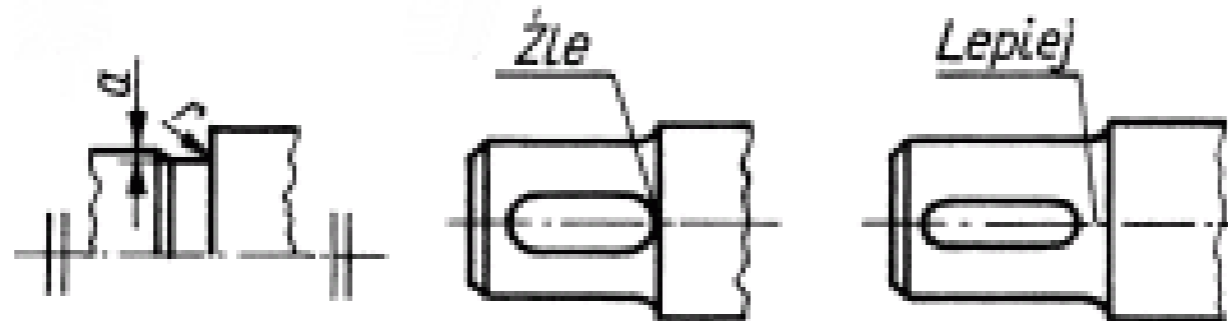
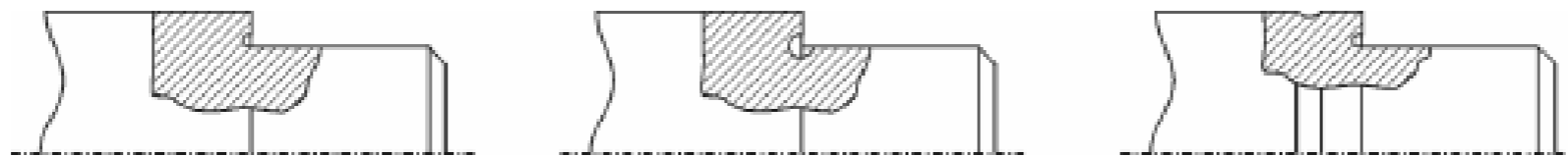
4. Średnice i długości czopów



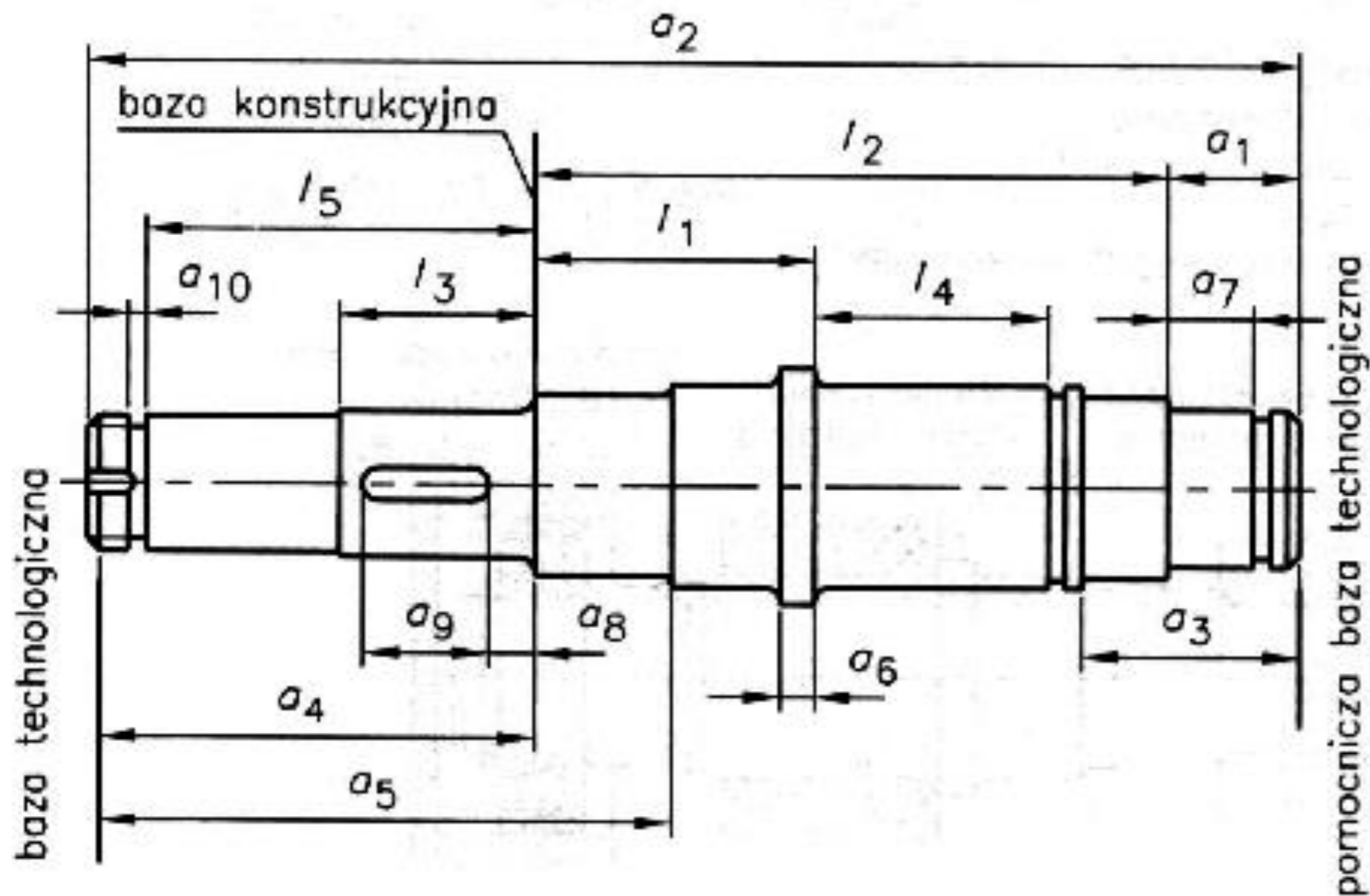
PN-78/M-85000

ETAP II – kształtowanie wałów

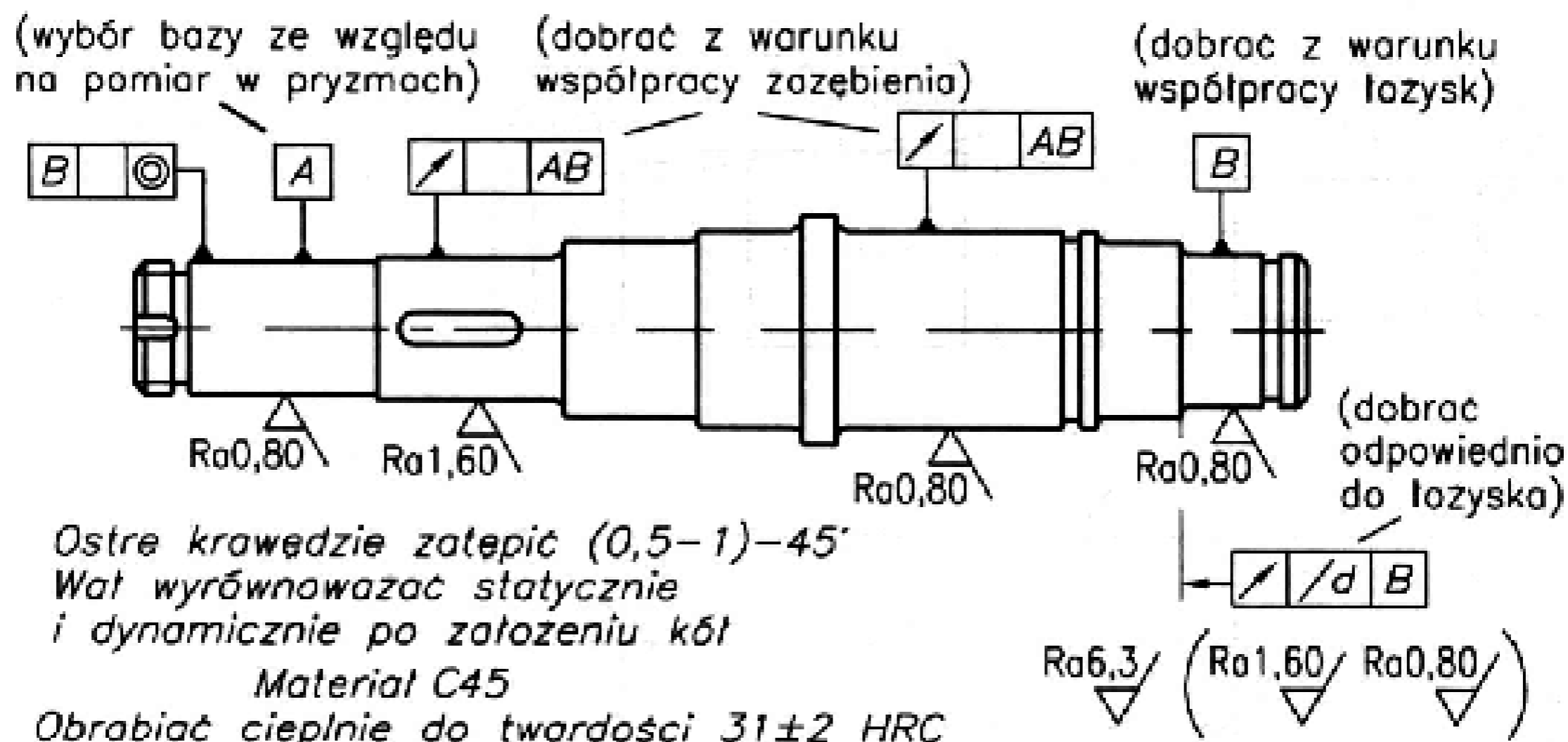
4. Poprawa wytrzymałości zmęczeniowej



ETAP II – kształtowanie wałów



ETAP II – kształtowanie wałów



Etap III – Sztywność wału

Strzałka ugięcia i kąt skręcenia

Równanie linii ugięcia belki

$$y'' = \frac{M_g(x)}{EJ}$$

Kąt ugięcia

$$y' = \frac{1}{EJ} \int M_g(x) dx + C$$

Strzałka ugięcia

$$y = \frac{1}{EJ} \int \left[\int M_g(x) dx + C \right] dx + D$$

Etap III – Sztywność wału

Wyznaczenie stałych całkowania

- Podpora przegubowa lub przesuwana – w miejscu podpory zakłada się zerowe przemieszczenie ($y=0$)
- Wspornik – zerowe przemieszczenie oraz zerowy kąt obrotu ($y=0$ oraz $y'=0$)
- W miejscu maksymalnego ugięcia, kąt ugięcia jest równy zero ($y'=0$)
- Koniec swobodny – zerowy moment gnący ($y'' = 0$)

Etap III – Sztywność wału

Dopuszczalne wartości strzałek ugięcia:

$$f_{\text{dop}} = (0.0002 \div 0.0003)l$$

$$f_{\text{dop}} = (0.005 \div 0.01)m$$

Dopuszczalny kąt ugięcia β przyjmuje się w granicach od 0,0003 rad dla łożysk ślizgowych do 0,05 rad dla łożysk wahlowych (ślizgowych lub tocznych).

Rodzaje łożysk	Dopuszczalny kąt ugięcia w rad
Kulkowe wahlowe	0,07
Baryłkowe jednorzędowe	0,035 ÷ 0,07
Kulkowe zwykłe, jeśli pasowanie jest K5/h6	
a) luz poprzeczny normalny	0,0023
b) luz poprzeczny C3	0,0035
c) luz poprzeczny C4	0,0047
Walczkowe i stożkowe	
a) łożyska walczkowe typów N i NU serii 10, 2, 3, 4	0,00116
b) pozostałe	0,00058

Etap III – Sztywność wału

$$\varphi = \frac{M_s l}{G J_o}$$

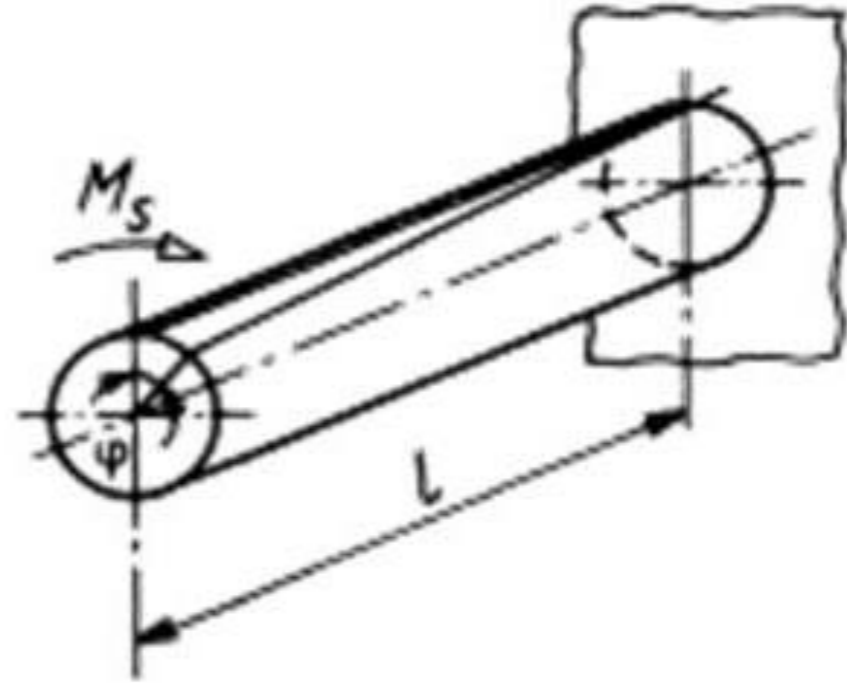
gdzie:

M_s – moment skręcający,

G – moduł sprężystości poprzecznej (dla stali $G=80\ 000 - 85\ 000$ MPa),

J_o – biegunowy moment bezwładności przekroju,

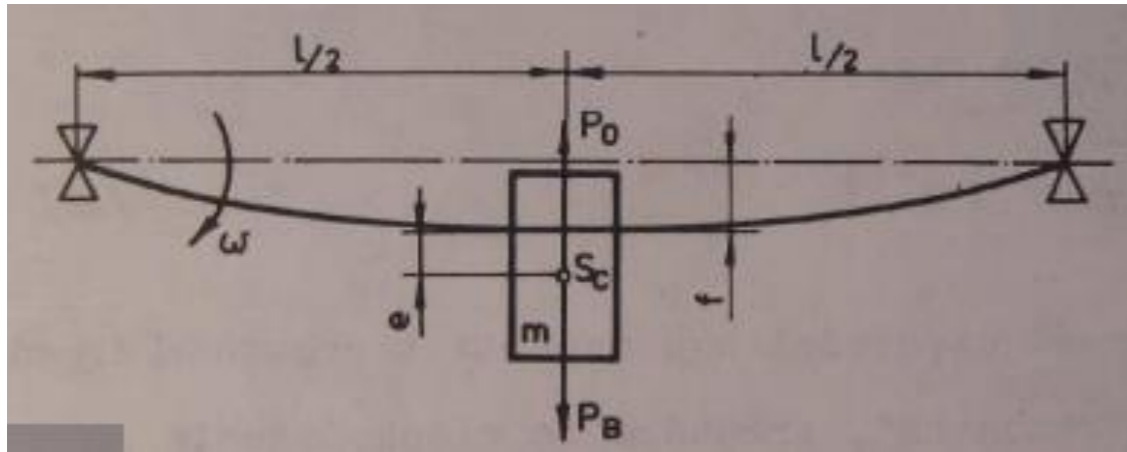
l – długość wału



Wartość dopuszczalnego kąta skręcenia φ_{dop} zależy od funkcji wału w maszynie. Dla wałów maszynowych najczęściej przyjmuje się $\varphi \leq 0,25^\circ$, tj.

$\varphi \leq 0,0044$ rad na 1 m długości wału. W przypadku wałków skrętnych, służących m.in. do łagodzenia nierównomierności momentu obrotowego, dopuszcza się $\varphi \leq 11^\circ$ i więcej (np. dla wałka w sprzęgle Cardana, półosi samochodowych itp.).

Etap III - drgania



$$m \omega^2 (f + e) = c \cdot f$$

Siła
odśrodkowa
a

Siła
sprężystości
ci

$$f = \frac{m \omega^2 e}{c - m \omega^2}$$

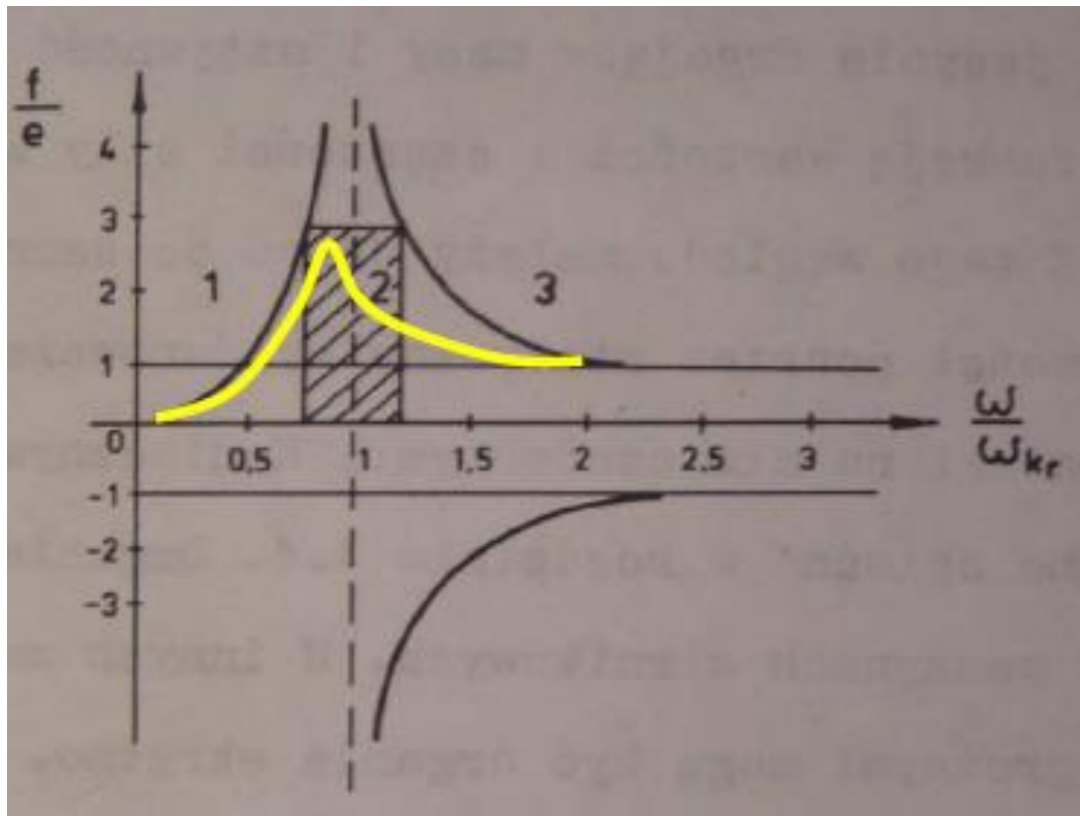
Dla $f = \infty \Rightarrow \omega = \omega_{kr}$

$f = \infty$ gdy $c - m \omega^2 = 0_r$

$$\omega_{kr} = \sqrt{\frac{c}{m}}$$

Etap III - drgania

$$\frac{f}{e} = \frac{1}{\frac{k}{m} \cdot \frac{1}{\omega^2} - 1} = \frac{1}{\omega_{kr}^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} - 1} = \frac{\omega^2}{\omega_{kr}^2 - \omega^2}$$



Zakres pracy

$$0.85\omega_{kr} \geq \omega \geq 1.25\omega_{kr}$$

Wały

Wały

podkrytycz
ne

nadkrytycz
ne

Etap III - drgania

Metody inżynierskie szacowania prędkości krytycznej

$$Q = mg$$

Ciężar wału i elementów na nim osadzonych

$$P_s = cf_{stat}$$

Ugięcie wału pod wpływem siły Q

$$mg = cf_{stat}$$

$$\frac{c}{m} = \frac{g}{f_{stat}} = \omega_{kr}^2$$

$$\omega_{kr} = \sqrt{\frac{g}{f_{stat}}}$$

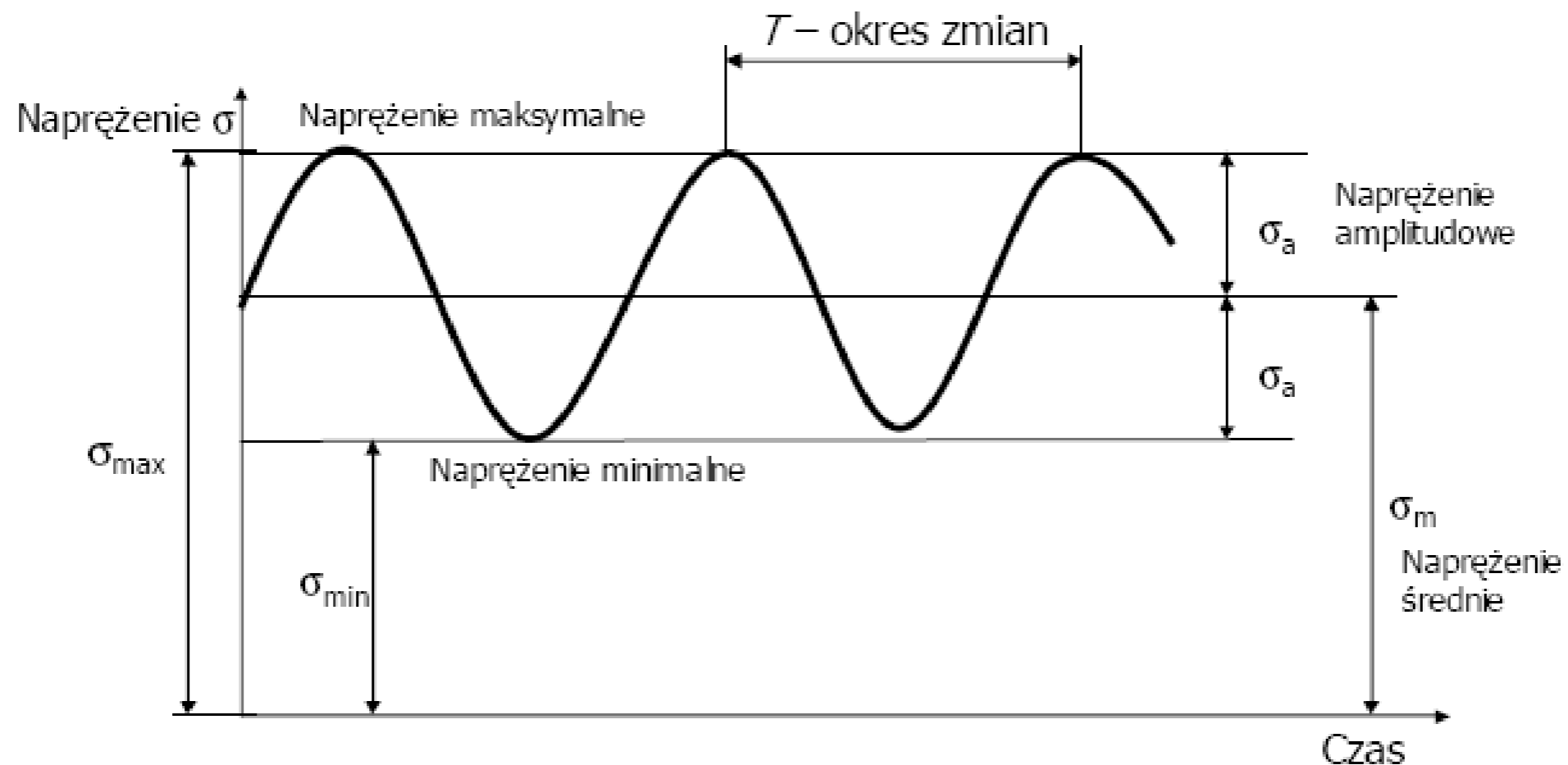
W przypadku skręcania

$$\omega_{kr} = \sqrt{\frac{C_s}{\Theta}}$$

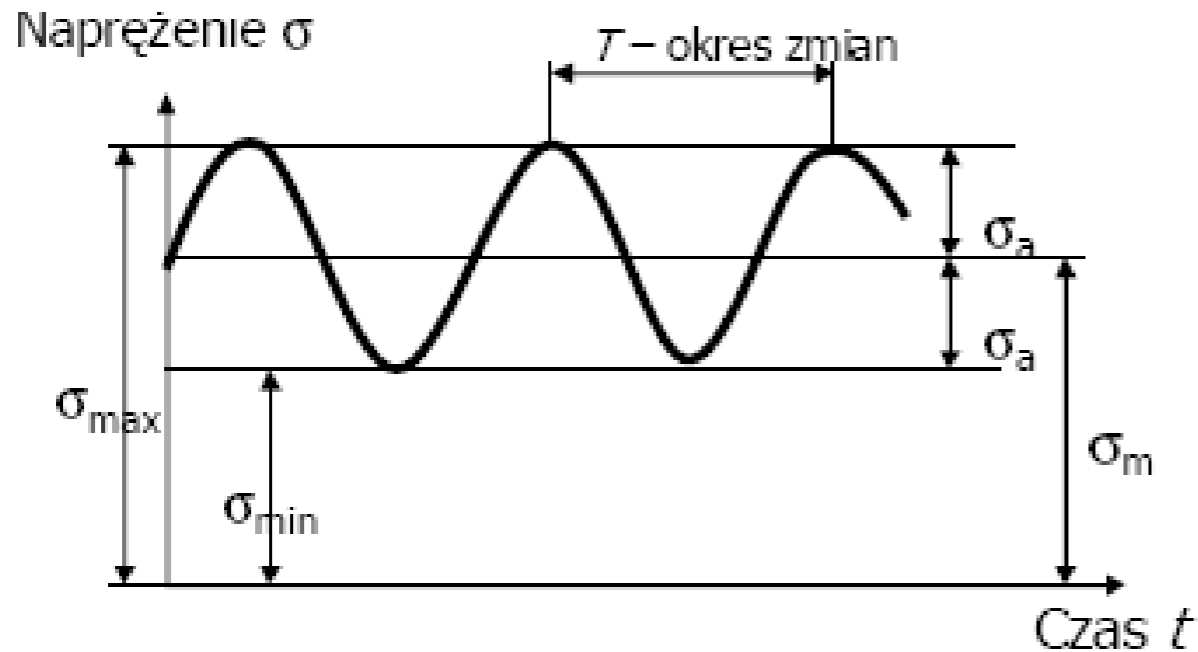
$$C_s = \frac{J_o G}{L}$$

ETAP IV – obliczenia sprawdzające zmęczeniowe

Jeśli wartość, kierunek lub zwrot obciążenia ulega zmianie w czasie to mamy do czynienia



ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe



$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

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

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

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

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

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

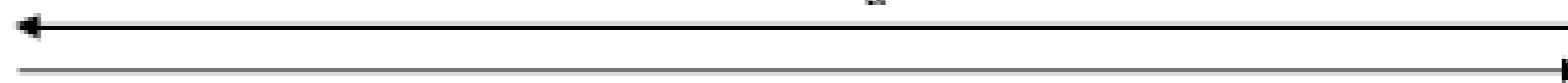
Współczynnik
amplitudy
cyklu

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

Współczynnik
stałości obciążenia

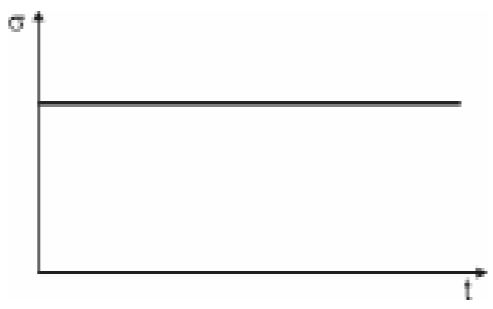
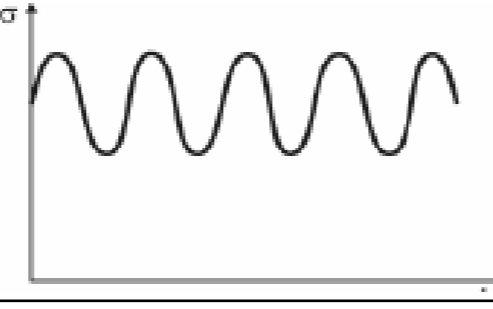
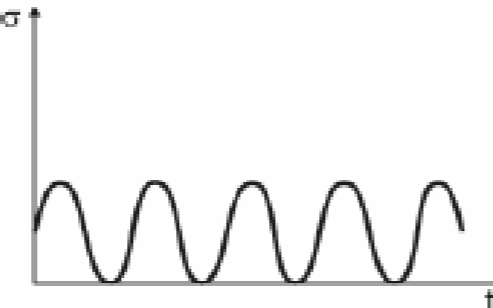
$$K = \frac{\sigma_m}{\sigma_a}$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a} = \frac{\frac{\sigma_m}{\sigma_a} - 1}{\frac{\sigma_m}{\sigma_a} + 1} = \frac{K - 1}{K + 1}$$


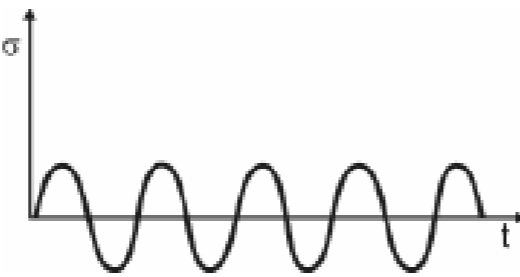


$$K = \frac{\sigma_m}{\sigma_a} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} = \frac{1 + \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}}{1 - \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}} = \frac{1 + R}{1 - R}$$

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Rodzaj cyklu	Schemat	Naprężenia	Współczynniki
Stałe	 A graph showing a constant horizontal line representing stress (σ) over time (t). The vertical axis is labeled σ and the horizontal axis is labeled t.	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = \sigma_m > 0$ $\sigma_a = 0$	$R = +1$ $K = +\infty$
Jednostronne	 A graph showing a sinusoidal wave representing stress (σ) over time (t). The wave oscillates between a positive maximum and a positive minimum, with the minimum value being greater than zero. The vertical axis is labeled σ and the horizontal axis is labeled t.	$\sigma_{\max} > \sigma_{\min} > 0$ $\sigma_a > 0$	$0 < R < 1$ $1 < K < +\infty$
Odzerowotężniace	 A graph showing a sinusoidal wave representing stress (σ) over time (t). The wave oscillates between a positive maximum and zero, with the minimum value being zero. The vertical axis is labeled σ and the horizontal axis is labeled t.	$\sigma_{\max} > 0 \quad \sigma_{\min} < 0$ $\sigma_a > 0 \quad \sigma_m > 0$	$R = 0$ $K = 1$

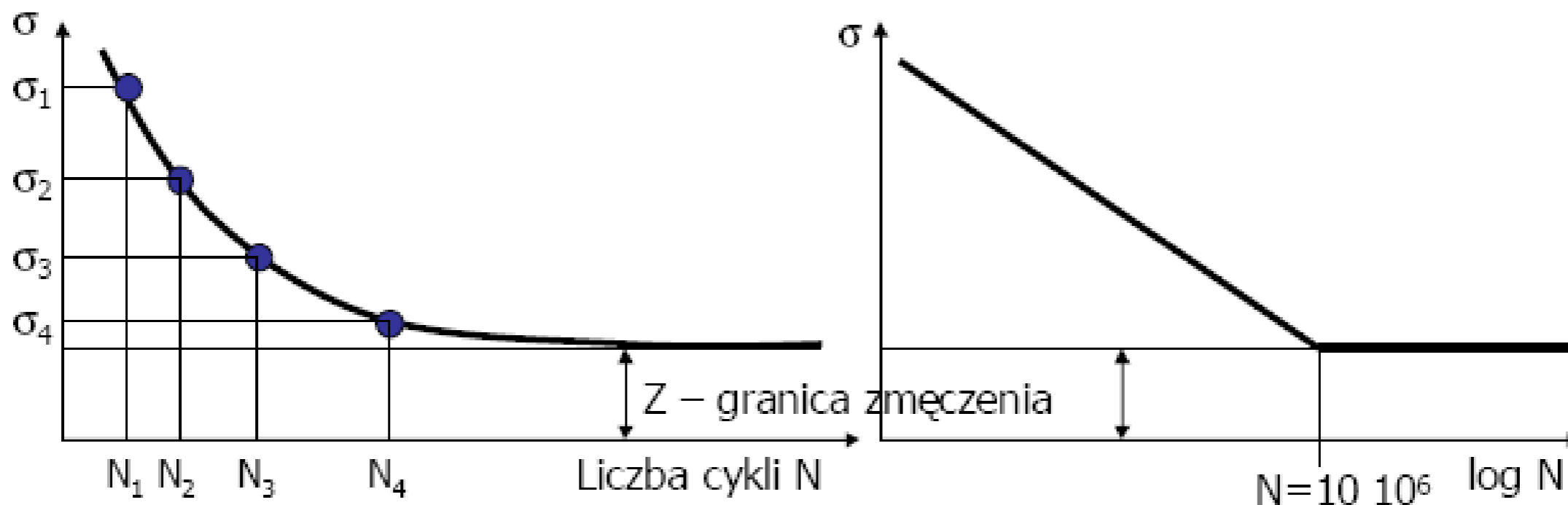
ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Rodzaj cyklu	Schemat	Naprężenia	Współczynniki
Dwustronne		$\sigma_{\max} > 0 \quad \sigma_{\min} < 0$ $\sigma_a > 0 \quad \sigma_m > 0$	$-1 < R < 0$ $0 < \kappa < 1$
Wahadłowe		$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$ $\sigma_m = 0 \quad \sigma_a = \sigma_{\max}$	$R = -1$ $\kappa = 0$

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Wytrzymałość zmęczeniowa Z – to takie naprężenie S_{max} dla danego cyklu naprężeń, określonego przez R , że element nie ulega zniszczeniu po osiągnięciu umownej granicznej liczby cykli N , nazywanej podstawą próby zmęczeniowej

Wykres Wöhlera



ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Przybliżone zależności pomiędzy Z_{go} a R_m .

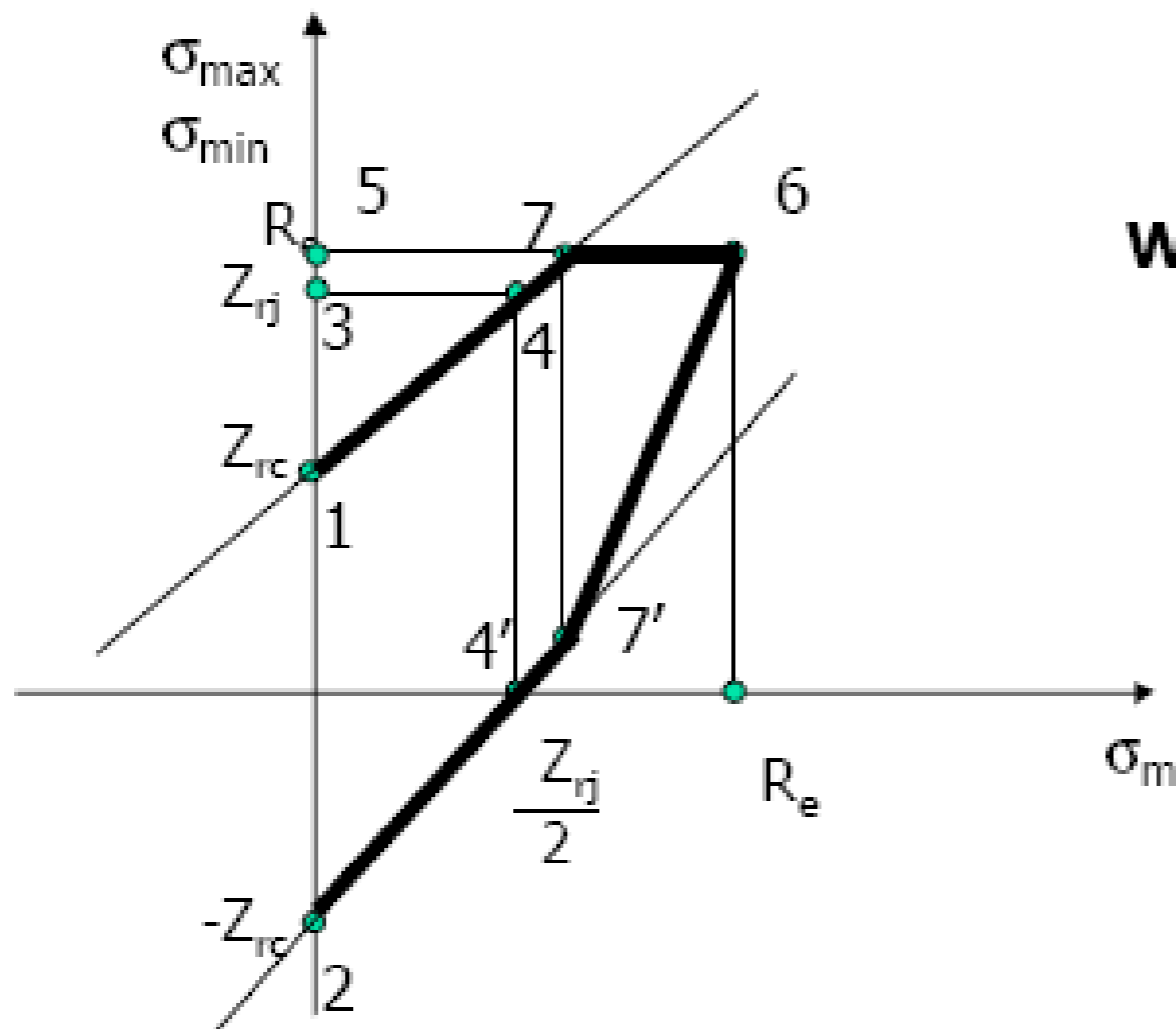
Materiał	Zależność	Przeciętnie
Stal	$Z_{go} = (0,36-0,6) R_m$	$Z_{go} = 0,47 R_m$
Żeliwo szare	$Z_{go} = (0,35-0,45) R_m$	$Z_{go} = 0,4 R_m$
Stopy aluminium i miedzi	$Z_{go} = (0,25-0,5) R_m$	$Z_{go} = 0,35 R_m$

Wytrzymałość zmęczeniową w różnych przypadkach obciążenia w funkcji Z_{go}

Materiał	Z_{rc}	Z_{so}	Z_{rj}	Z_{sj}	Z_{gj}
Stal węglowa	$(0,7-0,8) Z_{go}$	$0,55 Z_{go}$	$(1,12-1,28) Z_{go}$	$(0,99-1,1) Z_{go}$	$1,7 Z_{go}$
Stal stopowa	$0,7 Z_{go}$	$0,6 Z_{go}$	$(1,05-1,12) Z_{go}$	$(1,08-1,2) Z_{go}$	$1,6 Z_{go}$
Żeliwo	$(0,6-0,7) Z_{go}$	$(0,75-0,9) Z_{go}$	$1,5 Z_{go}$	$(0,9-1,17) Z_{go}$	$(1,2-1,5) Z_{go}$
Stopy miedzi	$(0,7-0,8) Z_{go}$	$(0,5-0,6) Z_{go}$	$(1,19-1,36) Z_{go}$	$(0,7-1,2) Z_{go}$	$1,7 Z_{go}$
Stopy aluminium	$(0,7-0,8) Z_{go}$	$(0,55-0,58) Z_{go}$	$(1,19-1,36) Z_{go}$	$(0,77-1,16) Z_{go}$	$(1,7-1,8) Z_{go}$

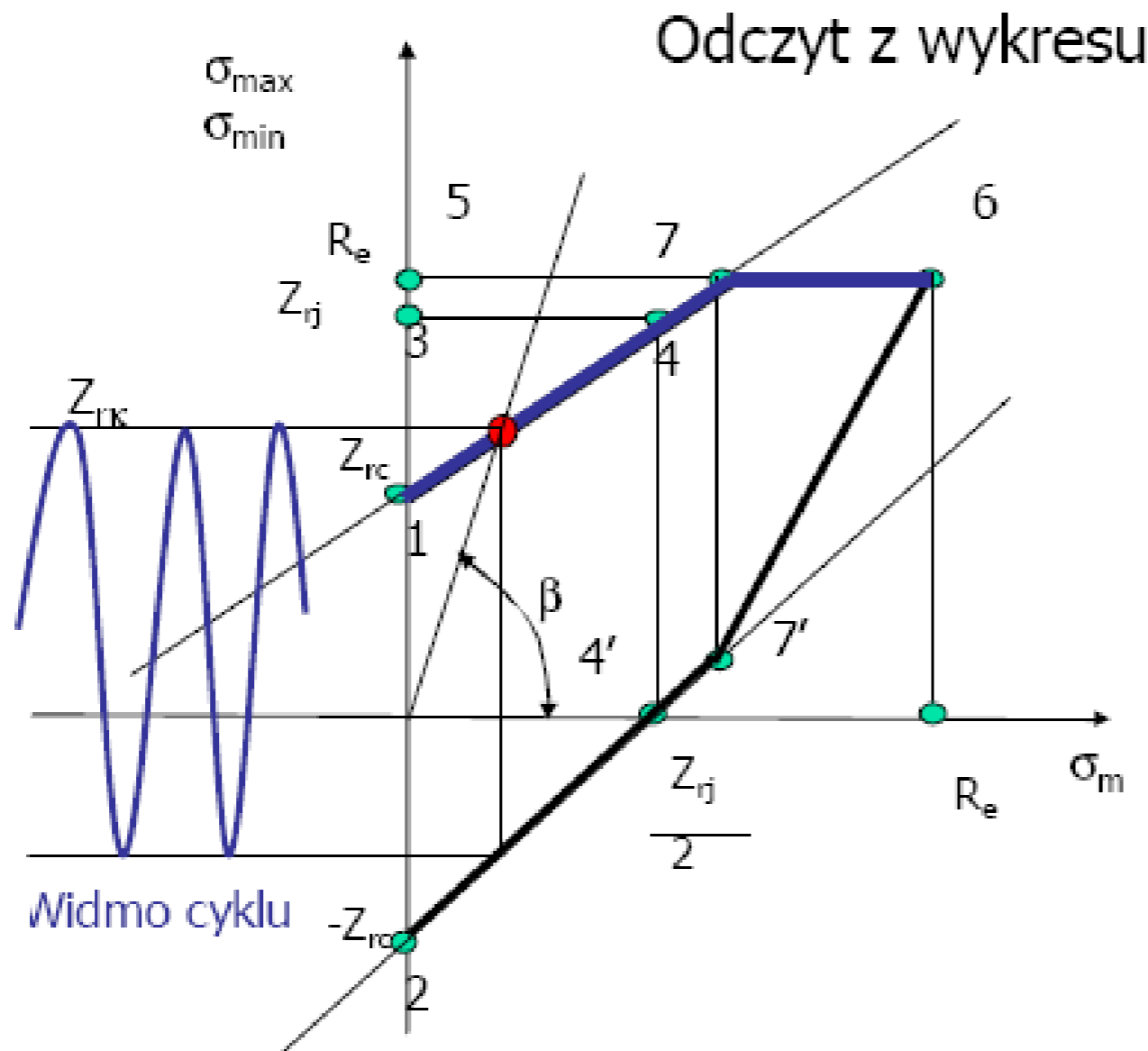
ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Uproszczony wykres Smitha



Wykres zawsze łączy punkty
1, 7, 6, 7', 2

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe



$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m}$$

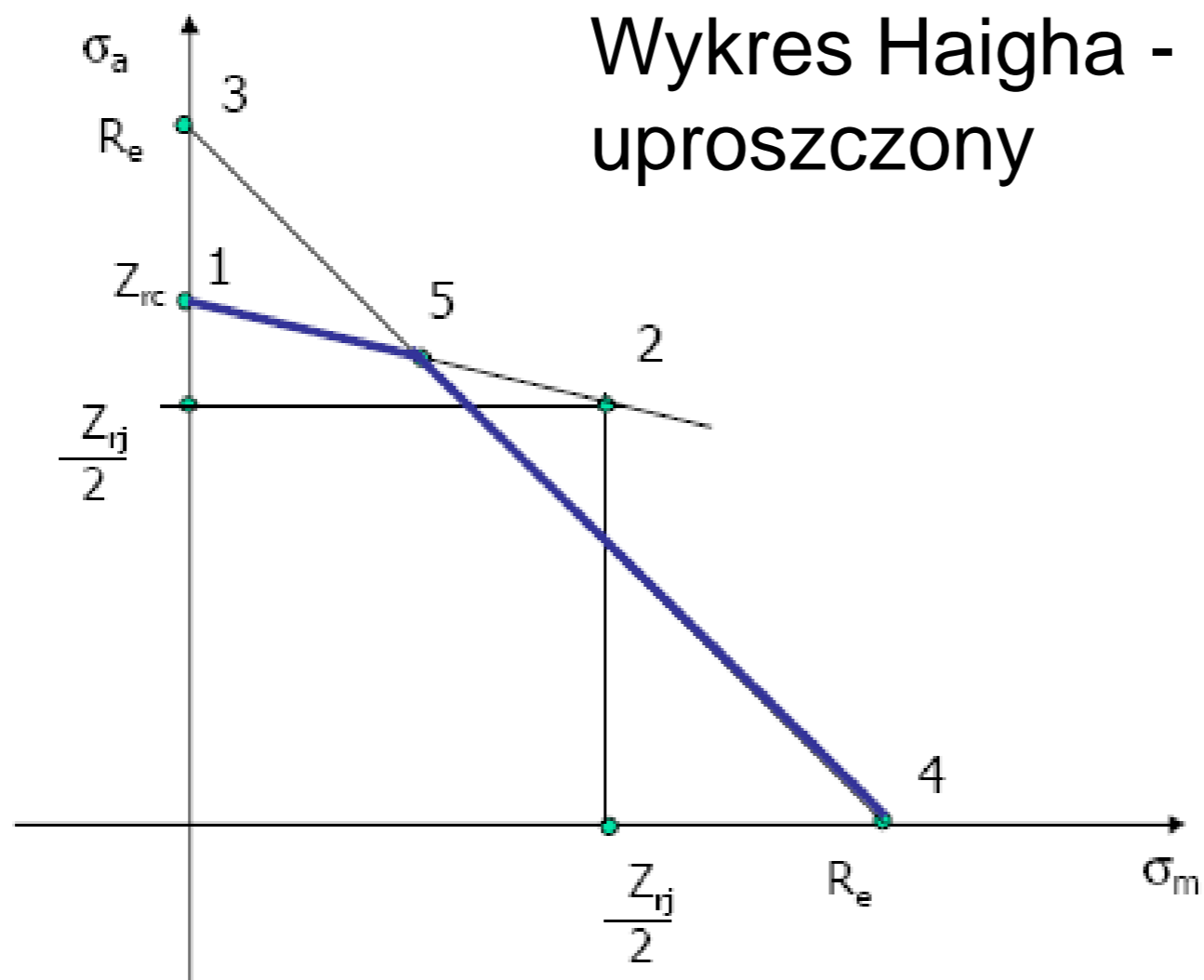
Współczynnik amplitudy cyklu

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{\max}}{\frac{1}{2} \cdot (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}$$

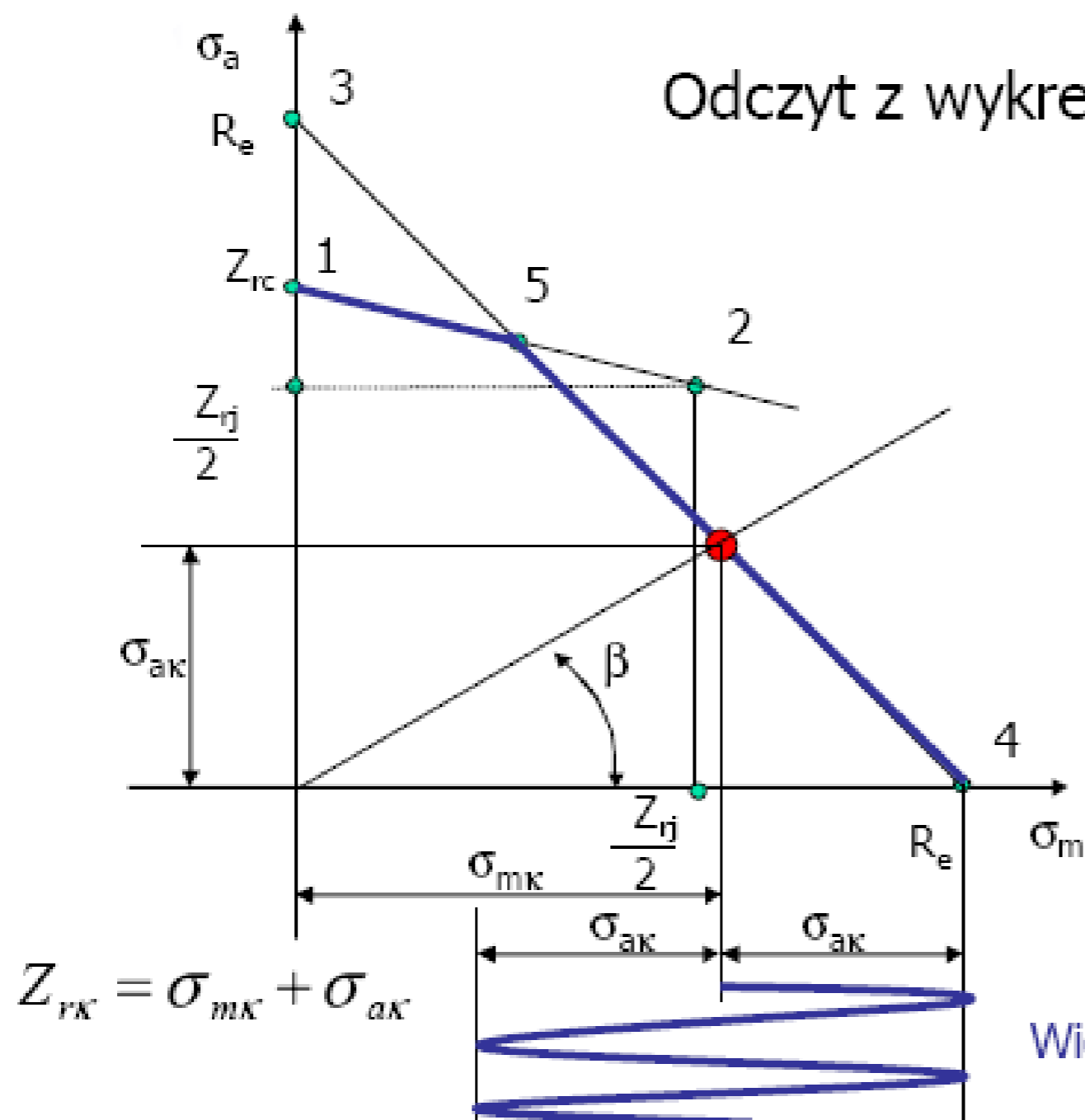
$$\operatorname{tg} \beta = \frac{2 \cdot \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\max}}}{\frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}} = \frac{2}{1 + R}$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m}$$

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe



ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe



$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

Współczynnik amplitudy cyklu

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{\frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1 - \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}}{1 + \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}} = \frac{1 - R}{1 + R}$$

Widmo cyklu

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

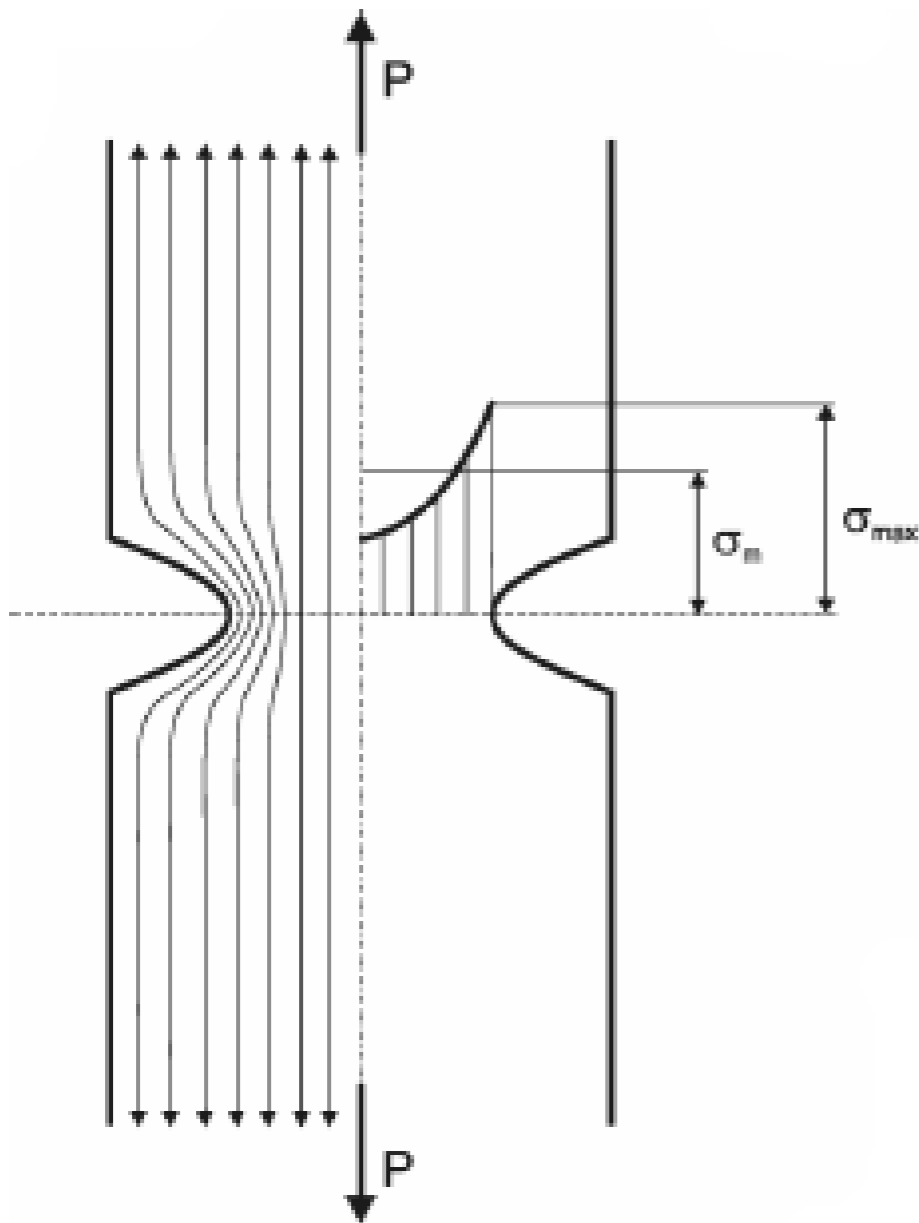
ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Czynniki wpływające na wytrzymałość zmęczeniową:

- Materiał elementu
- Charakter zmian obciążenia
- Kształt przedmiotu
- Stan powierzchni
- Wielkość przedmiotu
- Środowisko pracy
- Temperatura pracy

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Kształt przedmiotu - KARB

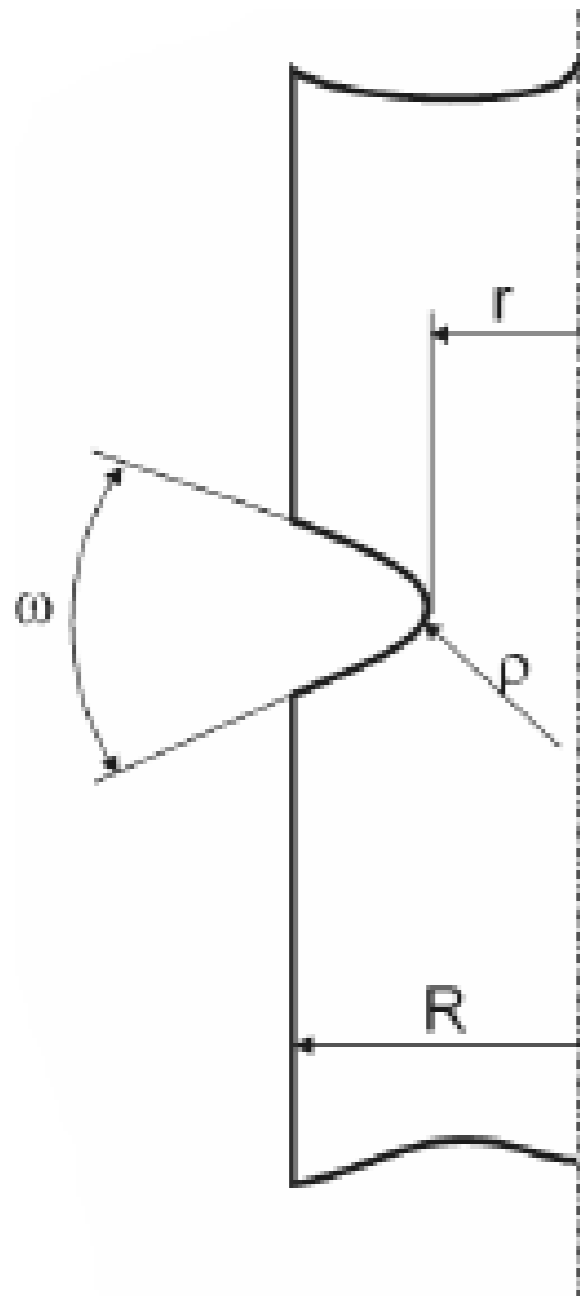


Karb – miejsce zmian poprzecznych przekrojów elementów lub zmian krzywizny powierzchni ograniczających przedmiot:

- odsadzenia,
- rowki,
- wycięcia,
- gwinty,
- otwory,
- itp.

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Kształt przedmiotu - KARB



Współczynnik kształtu
karbu

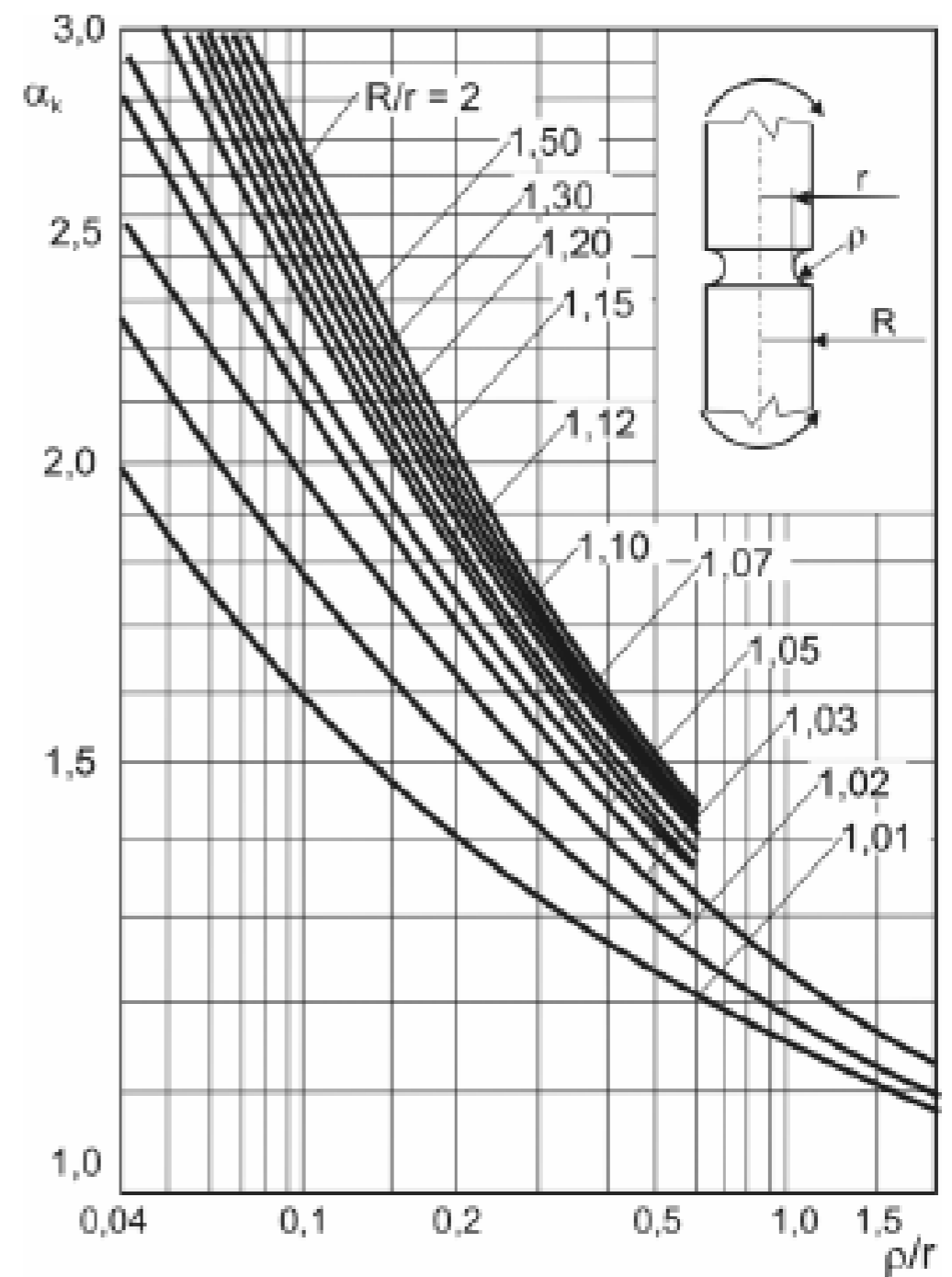
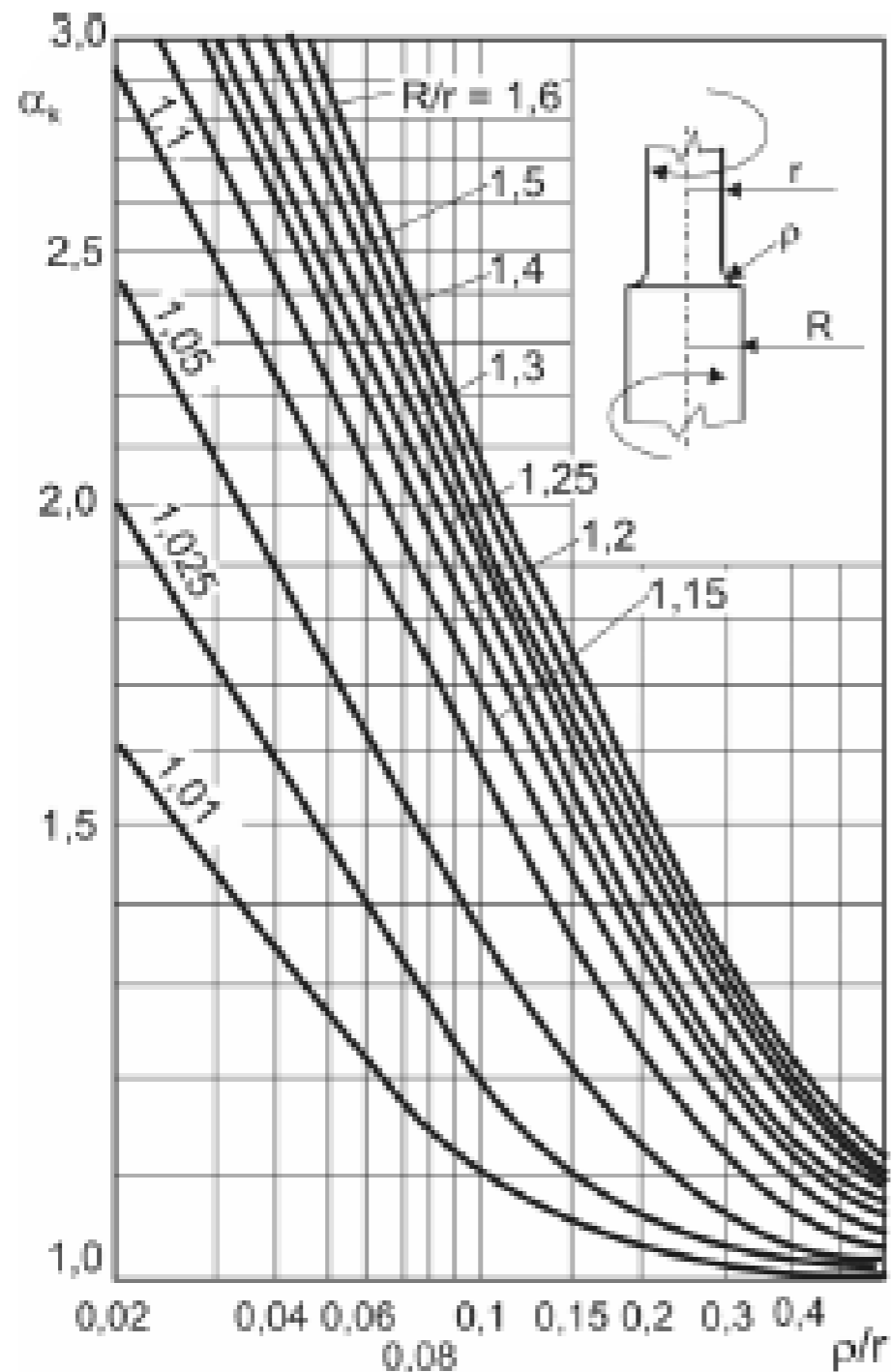
$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m}$$

Dla konkretnej geometrii karbu

$$\alpha_k = f\left(\frac{R}{r}, \frac{\rho}{r}, \omega\right)$$

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Kształt przedmiotu - KARB



ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Sumaryczny współczynnik spiętrzenia naprężeń

$$\beta = \beta_k + \beta_p - 1$$

**Współczynnik
działania
karbu**

$$\beta_k = \frac{Z_{gł}}{Z_K}$$

$Z_{gł}$ – granica zmęczenia próbki gładkiej

Z_K – granica zmęczenia próbki z karbem

**Współczynnik
wpływu
chropowatości**

$$\beta_p = \frac{Z_{pol}}{Z_{obr}}$$

Z_{pol} – granica zmęczenia próbki polerowanej

Z_{obr} – granica zmęczenia przy zadanej chropowatości

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Sumaryczny współczynnik spiętrzenia naprężeń

$$\beta = \beta_k \cdot \beta_{pz}$$

**Współczynnik
działania
karbu**

$$\beta_k = \frac{Z_{gł}}{Z_K}$$

$Z_{gł}$ – granica zmęczenia próbki gładkiej

Z_K – granica zmęczenia próbki z karbem

**Współczynnik
wpływu obróbki
powierzchni**

$$\beta_{pz} = \frac{Z}{Z_{pz}}$$

Z – granica zmęczenia próbki bez obróbki powierzchniowej

Z_{pz} – granica zmęczenia próbki po obróbce powierzchniowej

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Współczynnik działania karbu

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

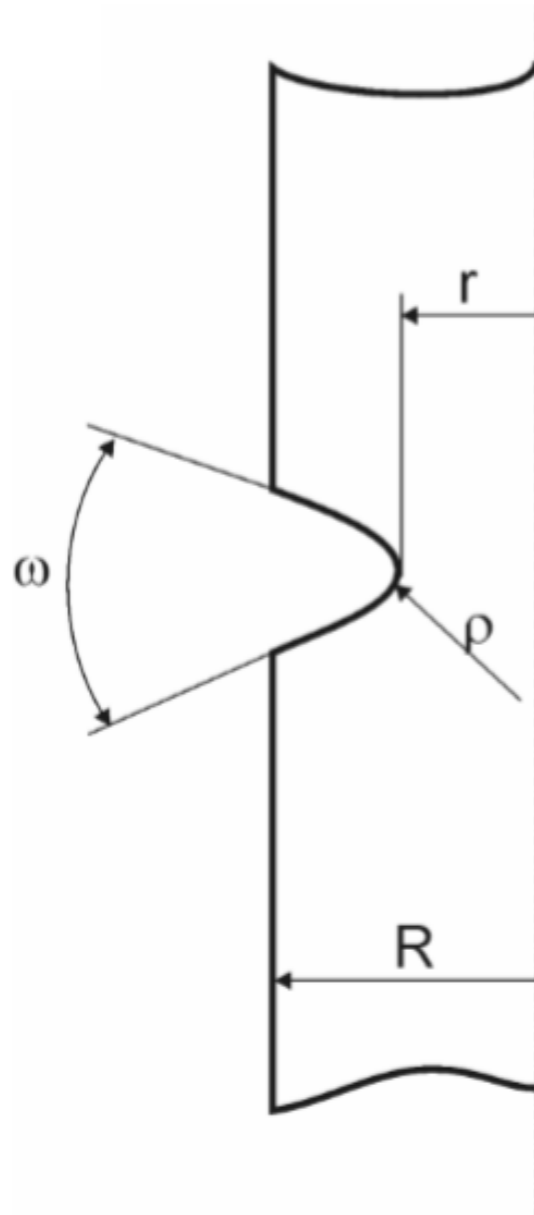
**Współczynnik kształtu
karbu**

**Współczynnik wrażliwości materiału na działanie
karbu**

(im wyższe Rm tym większa wrażliwość)

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Współczynnik kształtu karbu



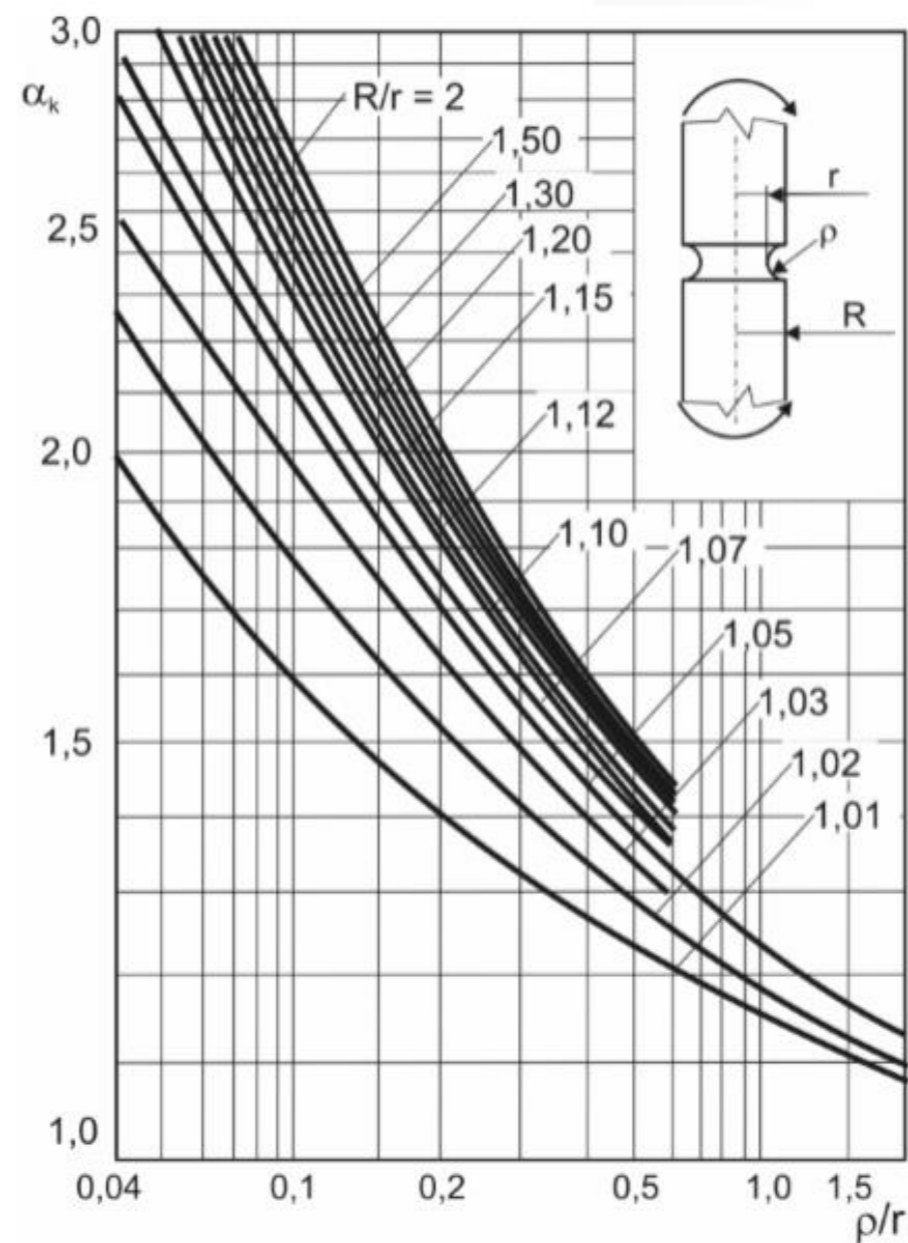
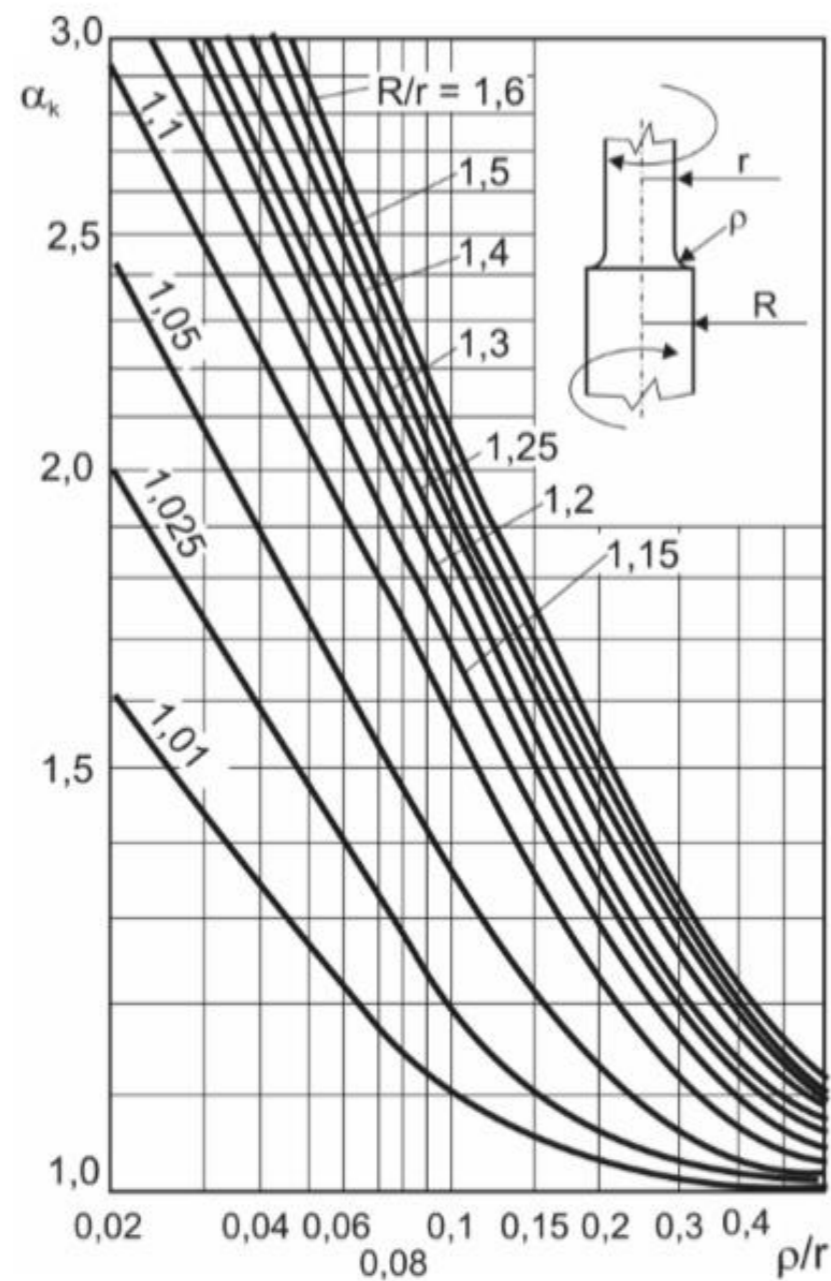
$$\alpha_k = f\left(\frac{R}{r}, \frac{\rho}{r}, \omega\right)$$

W przypadku karbów współdziałających (np. wałek z odsadzeniem i rowkiem) działania karbu się nakładają i wyraża się to we współczynniku jako:

$$\alpha_k = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_{k(i)} - n + 1$$

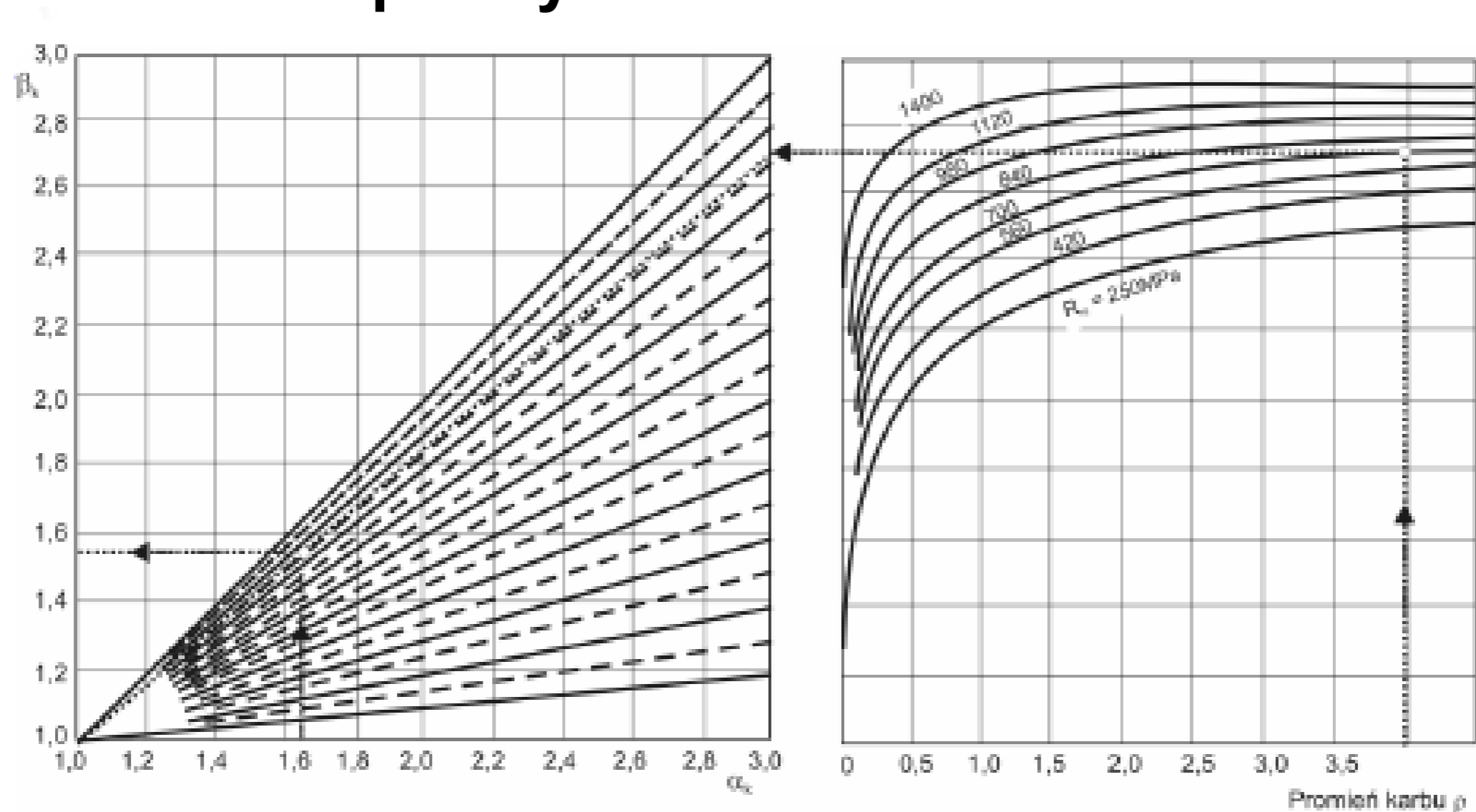
ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Współczynnik kształtu karbu



ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Współczynnik działania karbu

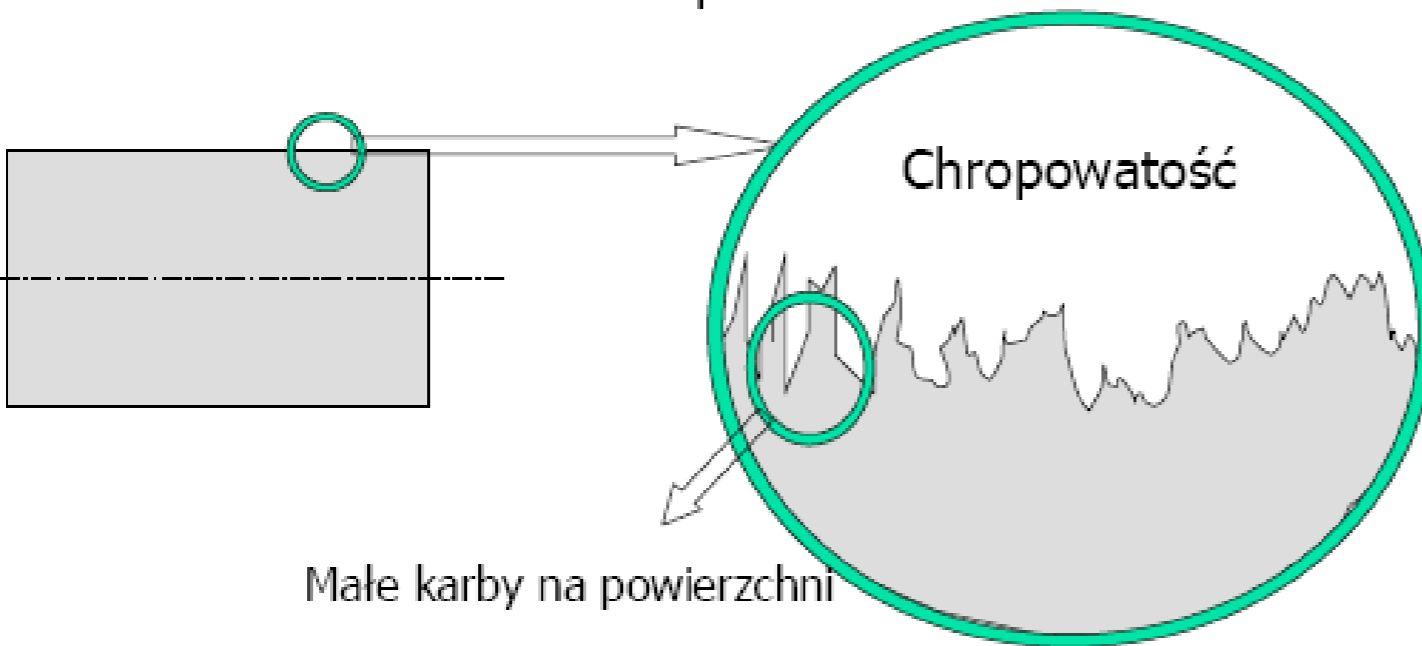


$$\beta_k = f(\alpha_k, \rho, R_m)$$

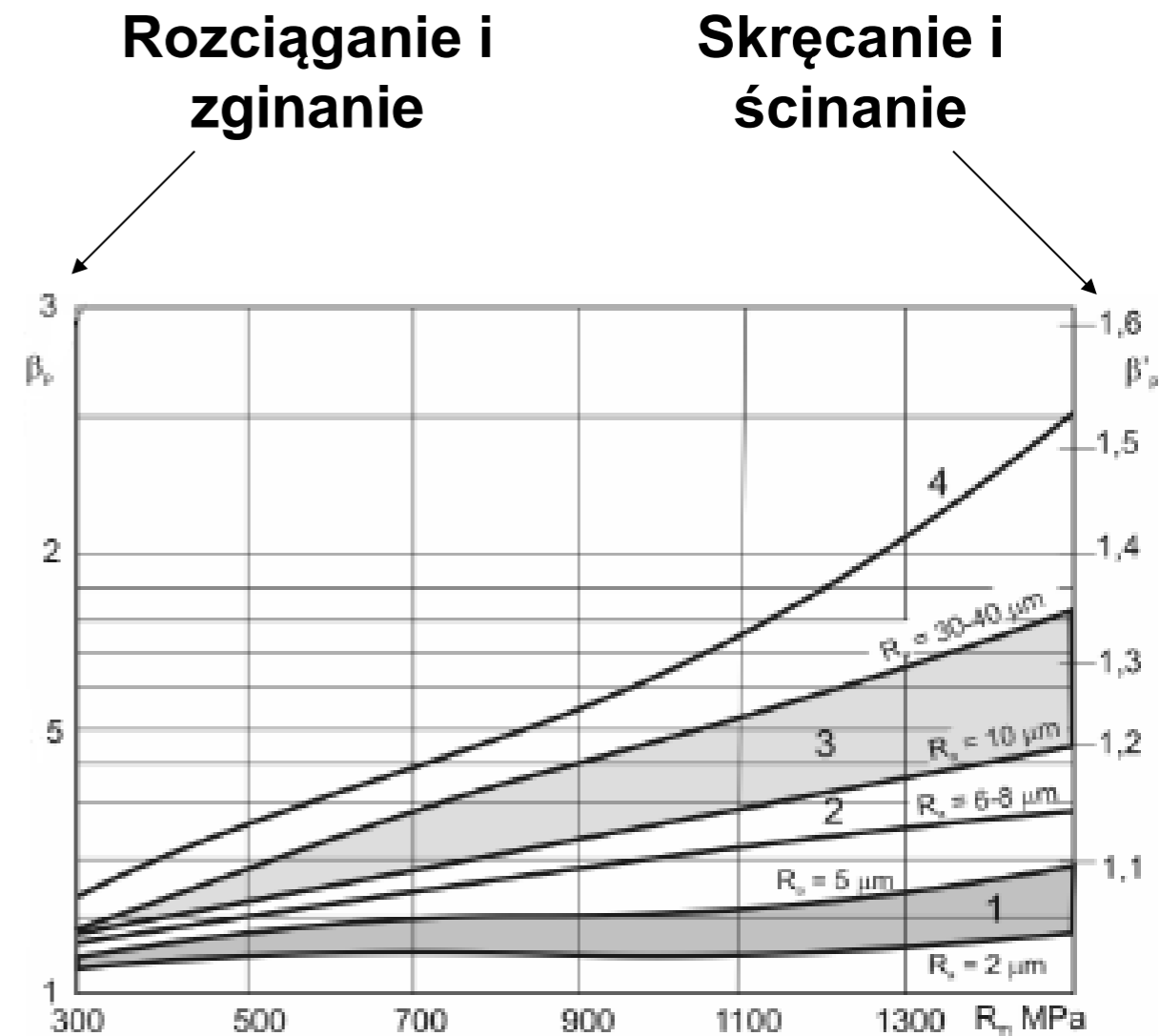
ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Współczynnik wpływu chropowatości

Geometria powierzchni



- 1 – szlifowanie
- 2 – toczenie, frezowanie dokładne
- 3 – toczenie, frezowanie zgrubne,
- 4 – odlewanie, kucie,



ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Wielkość elementu – współczynnik wielkości przekroju

Większe elementy to większe prawdopodobieństwo wad, pęknięć i uszkodzeń.

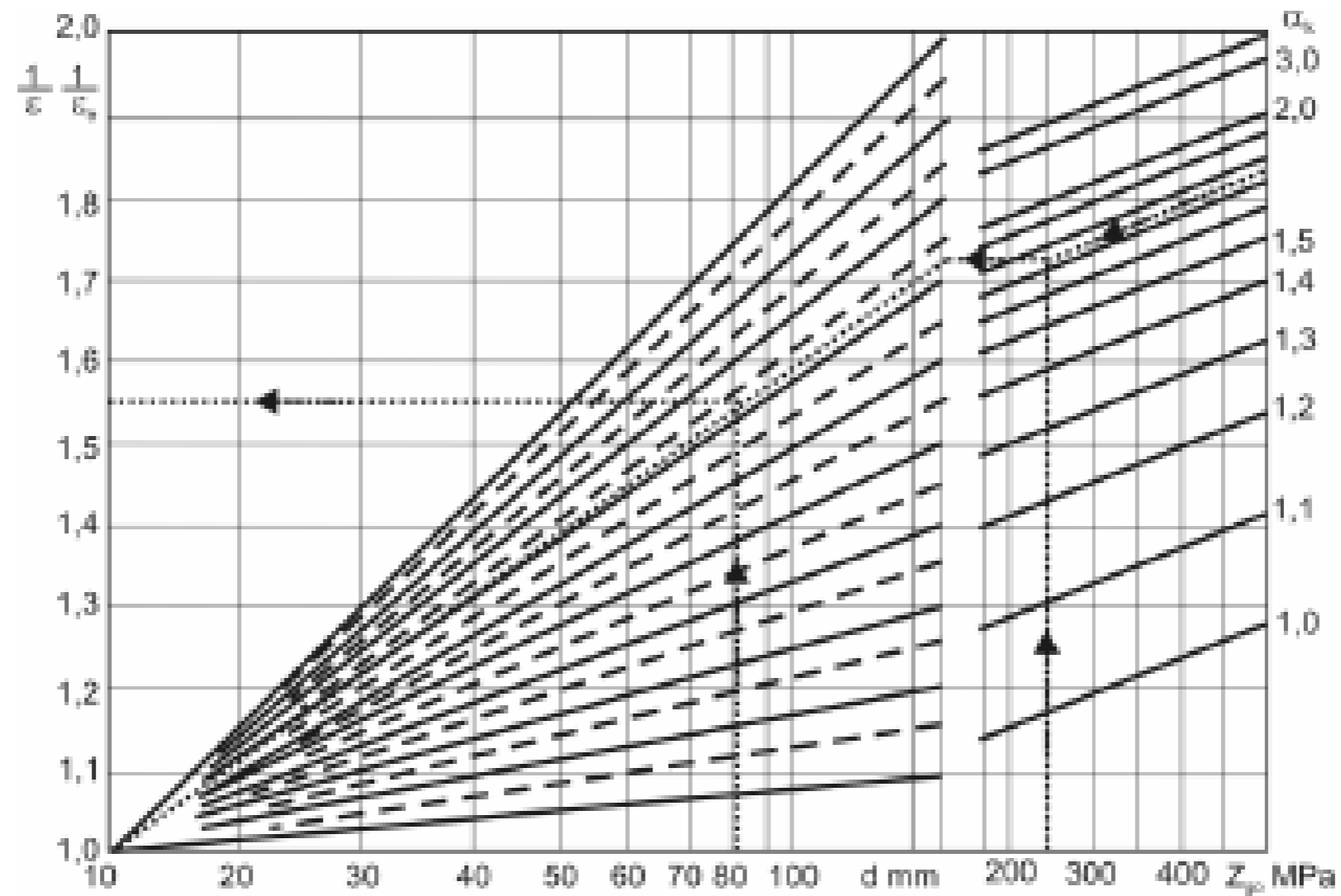
$$\varepsilon = \frac{Z_d}{Z}$$

granica zmęczenia dla próbki o dowolnym przekroju

granica zmęczenia dla próbki o przekroju wzorcowym (koło o średnicy 7mm)

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Wielkość elementu – współczynnik wielkości przekroju



ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Współczynnik bezpieczeństwa – wartość graniczna δ_g

Wartości δ_g :

1,3 – 1,5 : znany rozkład naprężeń, wysoka technologia wykonania i przy stosowaniu dobrych metod defektoskopowych

1,5 – 1,7 : zwykła dokładność obliczeń, dobra technologia wykonania i czynności kontrolne

1,7 – 2,0 : elementy o większych wymiarach, średnia dokładność obliczeń i wykonania

2,0 – 2,5 : przy orientacyjnym określeniu obciążeń i naprężeń, dla nieznanymi dokładnie warunków pracy

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Współczynnik bezpieczeństwa – określenie wartości rzeczywistej

1 Cykle symetryczne

$$\delta = \frac{Z}{\sigma_{\max}} \geq \delta_{\infty}$$

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

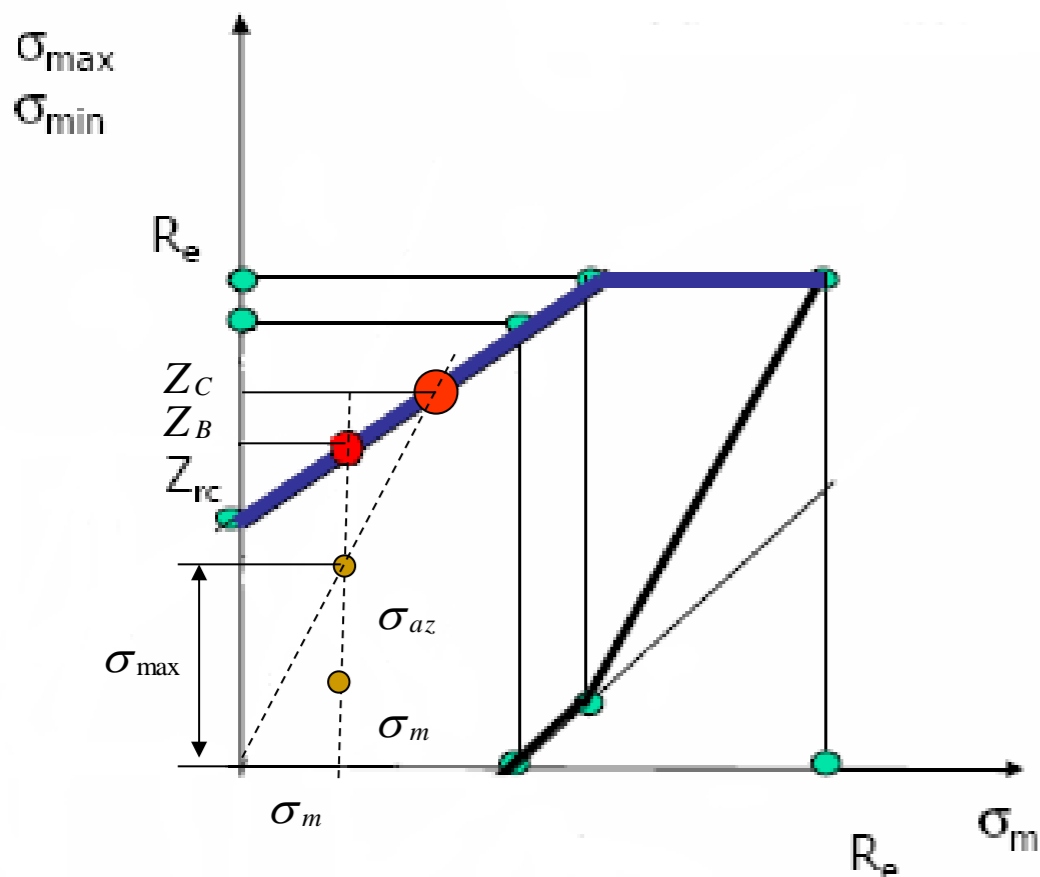
Współczynnik bezpieczeństwa – określenie wartości rzeczywistej

2 Cykle niesymetryczne dla $R=\text{const}$

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

$$\sigma_{az} = \frac{\beta \sigma_a}{\varepsilon}$$

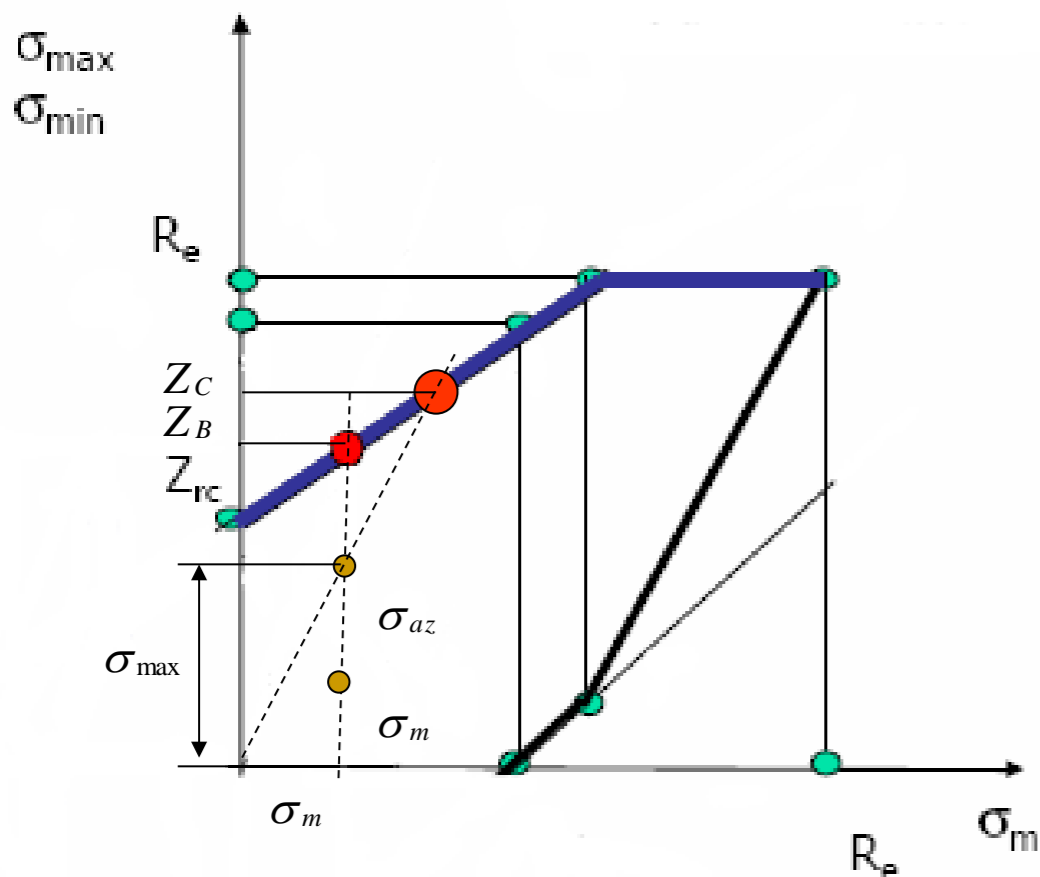
$$\delta = \frac{Z_c}{\sigma_{\max}} \geq \delta_g$$



ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Współczynnik bezpieczeństwa – określenie wartości rzeczywistej

3 Cykle niesymetryczne – przyrost obciążenia ze stałym σ_m



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

$$\sigma_{az} = \frac{\beta \sigma_a}{\varepsilon}$$

$$\delta = \frac{Z_B}{\sigma_{az}} \geq \delta_g$$

ETAP IV – obliczenia zmęczeniowe

Współczynnik bezpieczeństwa – określenie wartości rzeczywistej

4 Naprężenia złożone

$$\delta = \frac{k \delta_{\sigma} \delta_{\tau}}{\sqrt{\delta_{\sigma}^2 + \delta_{\tau}^2}}$$

Ustalenie wału w podporach - łożyskowanie

Podział łożysk

Łożyska dzieli się na dwa podstawowe rodzaje:

- ślizgowe,
- toczne

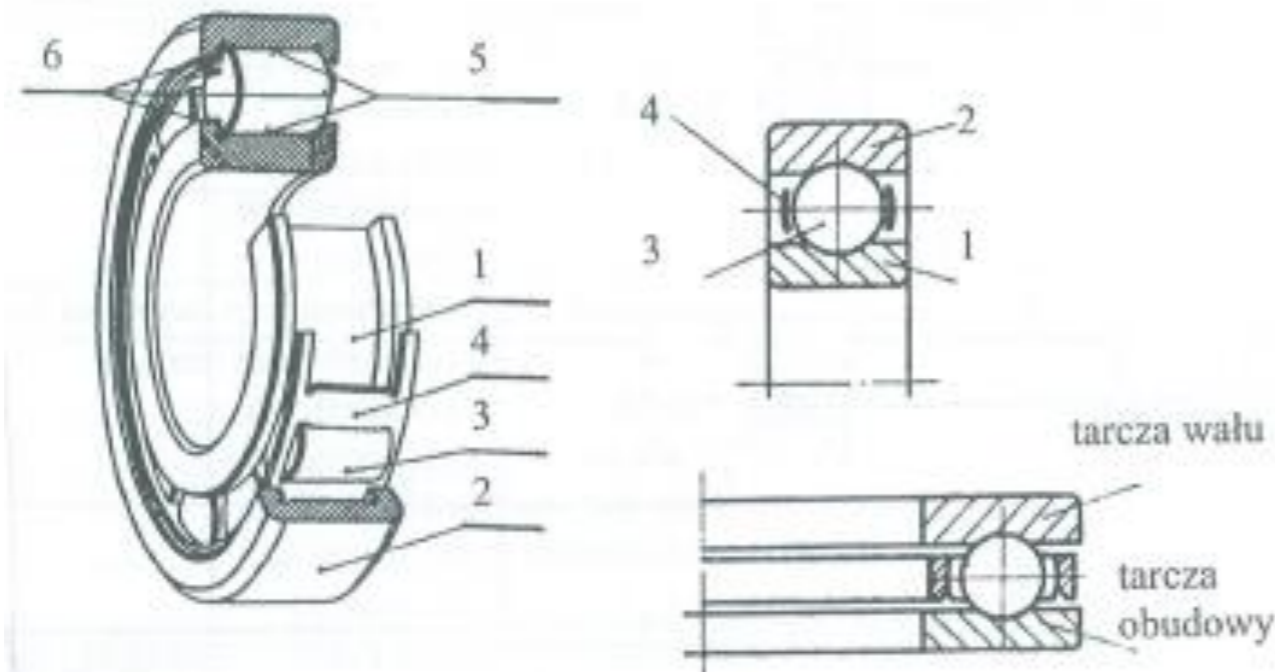
Ze względu na kierunek siły obciążającej łożysko:

- poprzeczne, przejmujące obciążenia prostopadłe do osi łożyskowanego elementu,
- poprzeczno-wzdłużne, przejmujące obciążenia zarówno prostopadłe jak i zgodne z kierunkiem ruchu,
- wzdłużne, przenoszące obciążenia zgodne z kierunkiem ruchu osi.

Łożyska toczne

Funkcją łożyska jest:

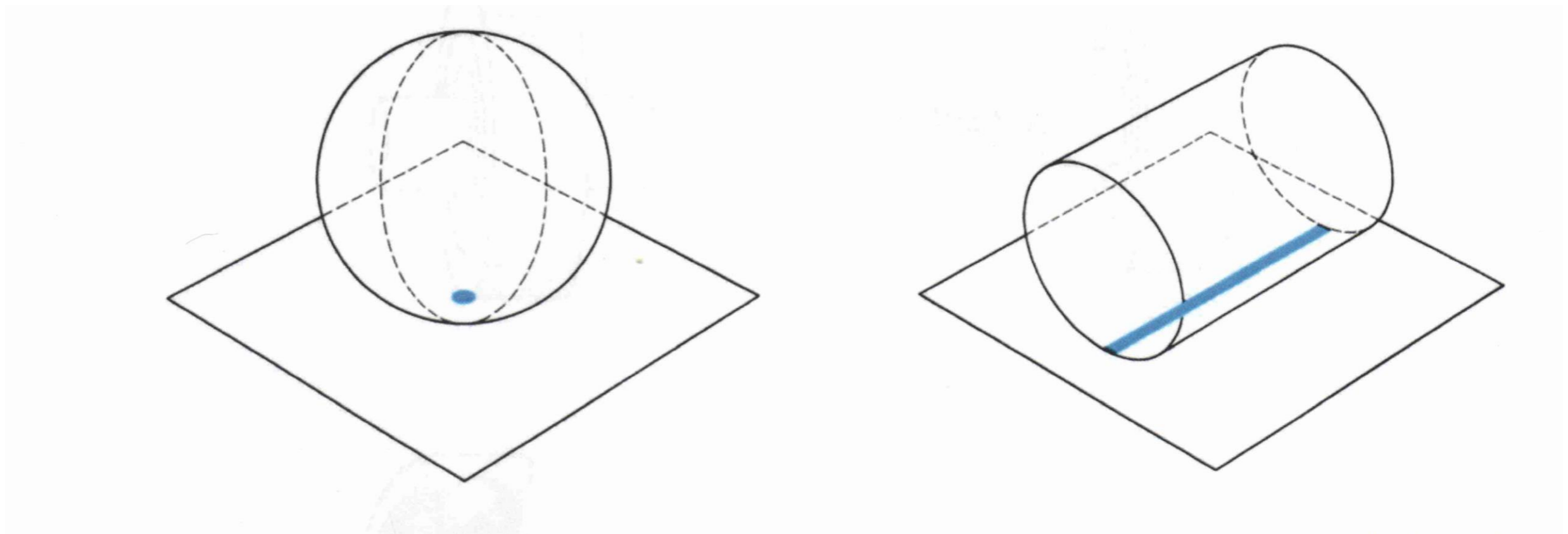
- Ustalić wzdłużnie i/lub poprzecznie wał.
- Przenieść obciążenia z elementów osadzonych na wale poprzez korpus do fundamentu.



Podstawowe elementy budowy łożyska tocznego: 1 – pierścień wewnętrzny, 2 – pierścień zewnętrzny, 3 – części toczne, 4 – koszyk, 5 – bieżnie główne, 6 – bieżnie pomocnicze

Rodzaje łożysk tocznych

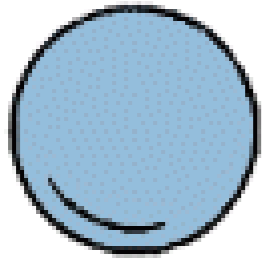
Łożyska można podzielić na dwie grupy w zależności od kształtu elementów tocznych:



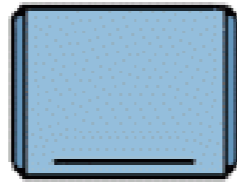
- Styk punktowy
Kula elementem tocznym

- Styk liniowy
Walec elementem tocznym

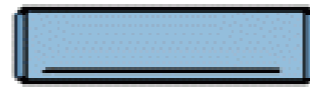
Typy elementów tocznych



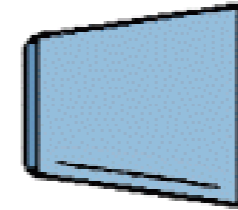
kulka



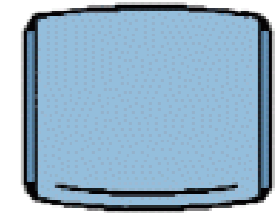
wałeczek



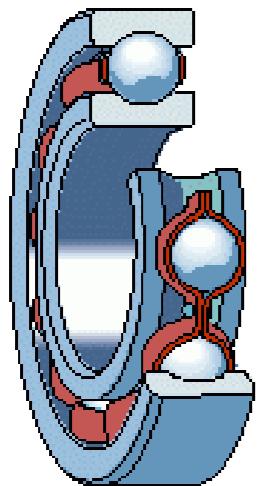
igiełka



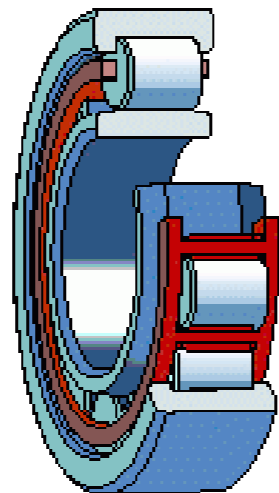
wałeczek stożkowy



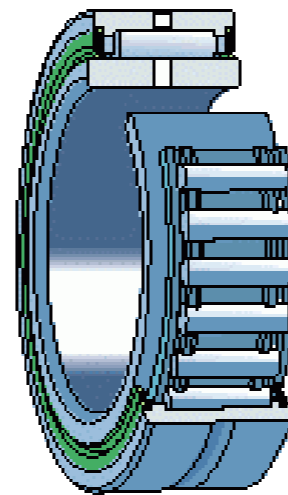
baryłka



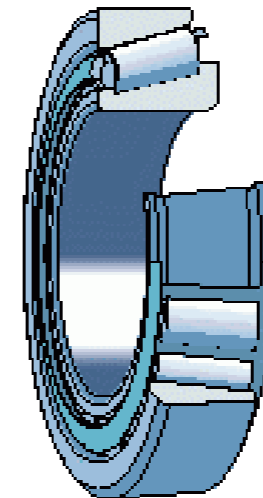
kulkowe



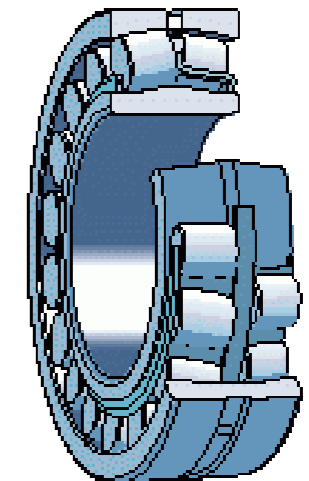
walcowe



igiełkowe



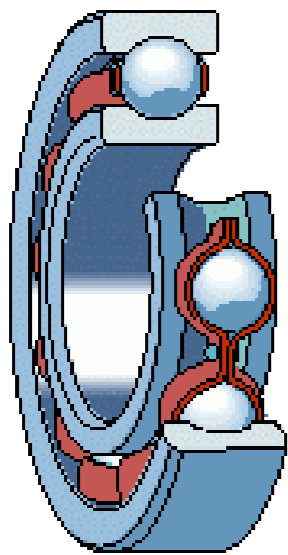
stożkowe



baryłkowe

Podział łożysk tocznych

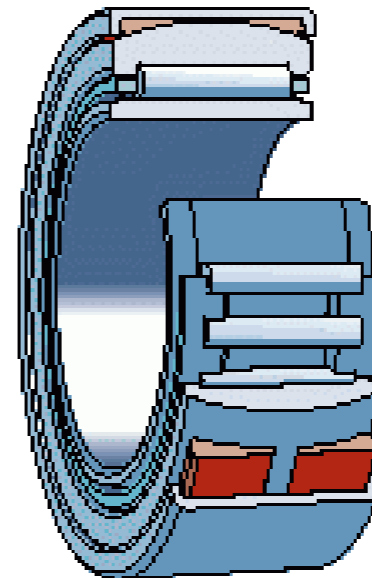
Ze względu na możliwość wzajemnego wychylenia się pierścieni można podzielić na:



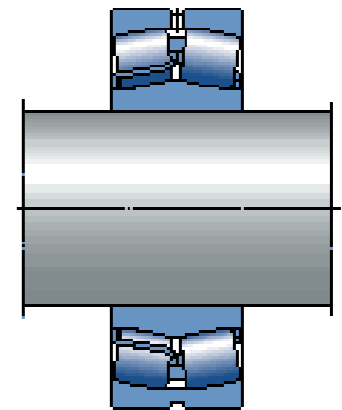
zwykłe



wahliwe

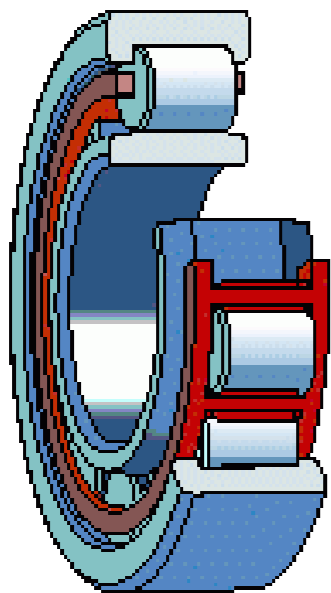


samonastawne

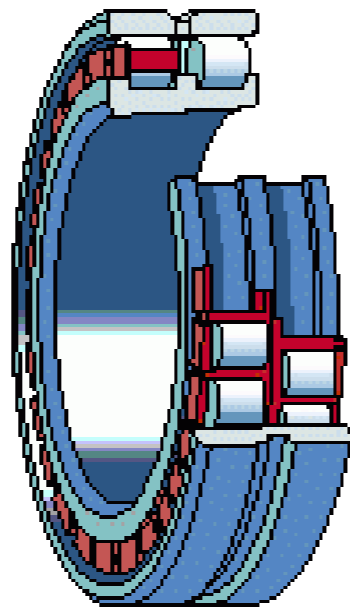


Podział łożysk tocznych

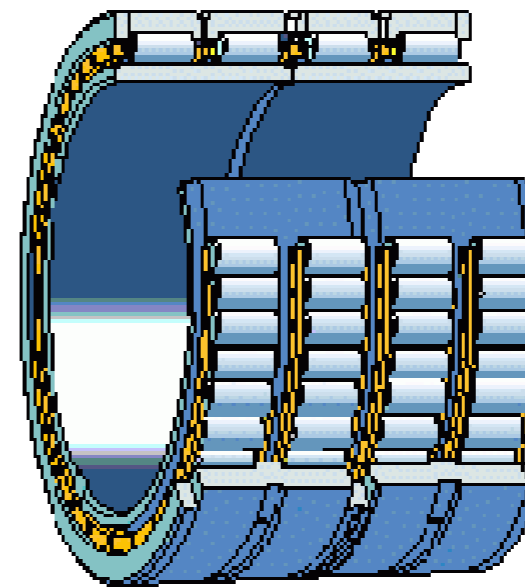
Ze względu na ilość rzędów części tocznych można podzielić na:



jednorzędowe



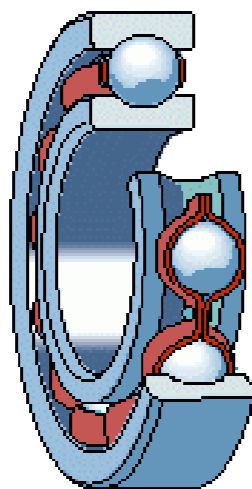
dwurzędowe



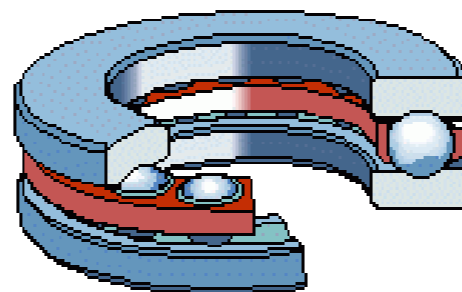
wielorzędowe

Podział łożysk ze względu na nominalny kąt działania

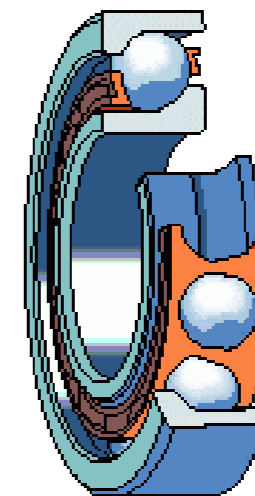
- promieniowe (poprzeczne) o kącie działania $0^\circ \leq \alpha < 45^\circ$
- osiowe (wzdłużne) o kącie działania $45^\circ \leq \alpha < 90^\circ$
- skośne, są to łożyska promieniowe, które do poprawnej pracy wymagają osiowego podparcia pierścieni.



promieniowe
(poprzeczne)

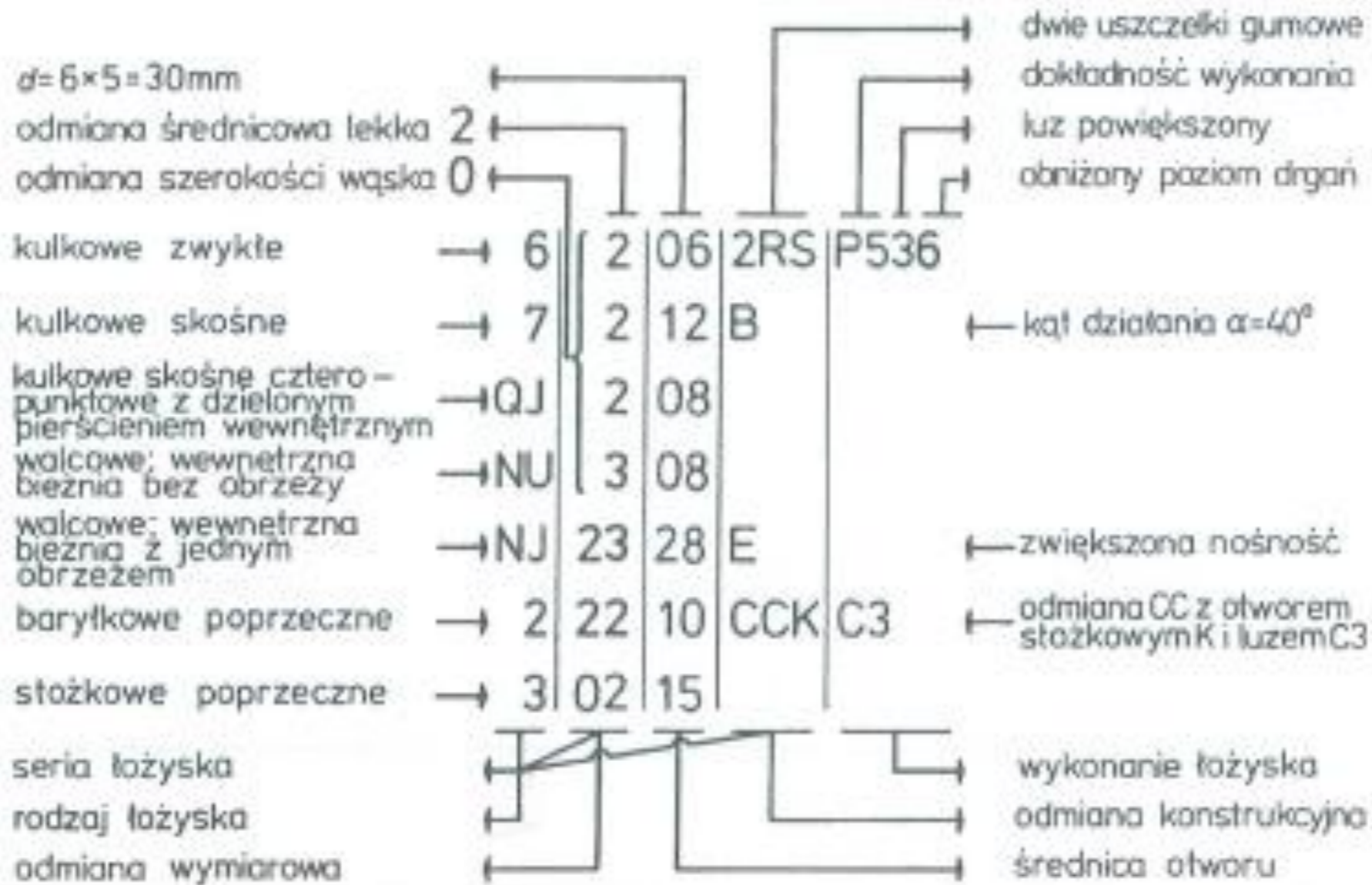


Osiowe (wzdłużne)



skośne

Oznaczenie łożysk



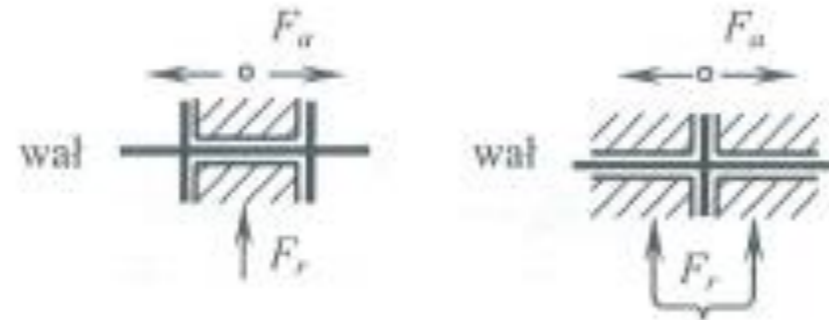
Wybór łożyska

Tabela 7.5. Charakterystyka łożysk – wybór rodzaju łożyska tocznego

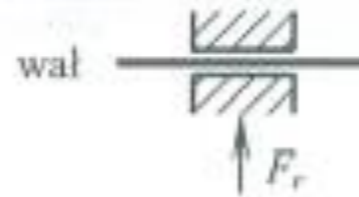
Rodzaj łożyska	Obciążalność promieniowa	Obciążalność osiowa	Prędkość graniczna	Sztywność promieniowa	Sztywność osiowa
Kulkowe zwykłe	umiarkowana	umiarkowana w dwóch kierunkach	duża	umiarkowana	mała
Kulkowe o podwyższonej nośności	umiarkowana (plus)	umiarkowana w jednym kierunku	duża	umiarkowana (plus)	mała (plus)
Kulkowe skośne	umiarkowana	umiarkowana (plus) – jeden kierunek	duża (minus)	umiarkowana	umiarkowana
Walcowe	duża	żadna	umiarkowana (plus) [Bez tytułu]	duża	żadna
Baryłkowe	duża	umiarkowana – dwa kierunki	umiarkowana	duża (minus)	umiarkowana
Igietkowe	umiarkowana do wysokiej	żadna	umiarkowana do bardzo wysokiej	umiarkowana do wysokiej	żadna
Stożkowe jednorzędowe	duża (minus)	umiarkowana (plus) – jeden kierunek	umiarkowana	duża (minus)	umiarkowana
Stożkowe dwurzędowe	duża	umiarkowana – dwa kierunki	umiarkowana	duża	umiarkowana
Kulkowe wzdłużne	żadna	duża – jeden kierunek	umiarkowana – minus	żadna	duża
Walcowe wzdłużne	żadna	duża (plus) – jeden kierunek	mała	żadna	duża (plus)
Baryłkowe wzdłużne	ograniczona	duża (plus) – jeden kierunek	mała	żadna	duża (plus)

Funkcja łożyska

- łożyska **ustalające**, przenoszące siły poprzeczne i wzdłużne w obydwu kierunkach:



- łożyska **swobodne**, przenoszące jedynie siły poprzeczne i przesuwne (wraz z wałem lub w obudowie):



- łożyska **podpierające** lub kombinacje poprzecznych i jednostronnych łożysk wzdłużnych, przenoszące siły promieniowe i osiowe w jednym kierunku; przy dwóch oddzielnych łożyskach podpierających łożyska na wale lub obudowie muszą zapewniać osiową przesuwność wału na kierunku obciążenia:



Trwałość łożysk tocznych

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad L_n = \frac{L10^6}{60n} = \frac{16666}{n} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

gdzie:

C [N] - nośność dynamiczna (ruchowa) łożyska,

L [mln obr] - trwałość łożyska wyrażona w milionach obrotów,

P [N] - zastępcze obciążenie ruchowe (dynamiczne) łożyska,

p - wykładnik potęgowy dla łożysk:

- kulkowych $p = 3$,

- wałeczkowych i igiełkowych $p = 10/3$.

Trwałość łożyska jest to okres pracy w godzinach lub milionach obrotów, do momentu kiedy w 90% badanych łożysk pojawią się pierwsze oznaki zmęczenia materiału powierzchni tocznych.

Nośność dynamiczna jest to wyrażona w jednostkach siły wartość obciążenia łożyska, przy której jego trwałość równa się 1 milionowi obrotów.

Trwałość łożysk w warunkach ekstremalnych

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C}{P} \right)^q$$

a_1 — współczynnik niezawodności

a_2 — współczynnik materiału,

a_3 — współczynnik warunków pracy.

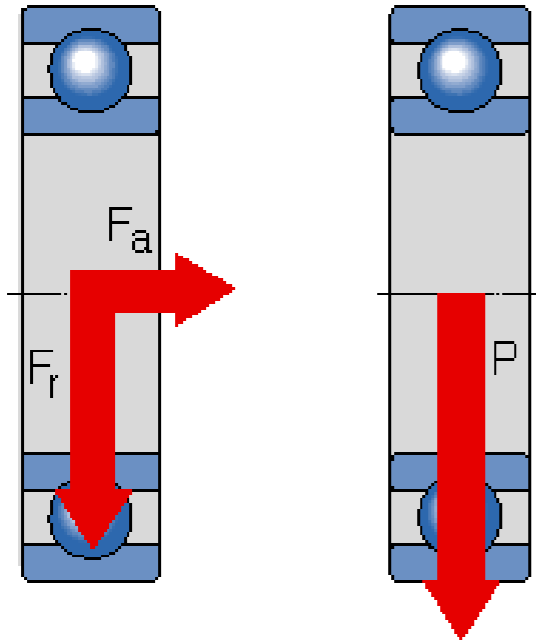
Współczynnik niezawodności a_1

Niezawodność φ , %	90	95	96	97	98	99	100
a_1	1,0	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21	0,05

Orientacyjny dobór trwałości

Rodzaj maszyny	L_h [h]
Maszyny o krótkich okresach pracy, pracujące nie stale (przerwy w pracy nie mają większego znaczenia): narzędzia ręczne, przenośniki w fabrykach, maszyny o napędzie ręcznym, dźwigi montażowe, urządzenia dźwigowe w odlewniach, maszyny gospodarstwa domowego i biurowego, małe wentylatory, maszyny rolnicze	4000 ÷ 8000
Maszyny pracujące nie stale (konieczna duża niezawodność pracy), maszyny pomocnicze w siłowniach, maszyny poruszające transportery w produkcji ciągłej, podnośniki, dźwigi, obrabiarki rzadziej używane, walce robocze w walcarkach	8000 ÷ 12 500
Maszyny do pracy 8 godzin na dobę, nie w pełni wykorzystane: silniki elektryczne stałe, silniki spalinowe stałe, przekładnie zębate	12 500 ÷ 20 000
Maszyny do pracy 8 godzin na dobę, w pełni wykorzystane: obrabiarki do metali, dźwignice pracujące nieprzerwanie, dmuchawy	20 000 ÷ 32 000
Maszyny do pracy ciągłej (24 godziny na dobę), sprężarki, pompy, główne wały pędziane, taśmowe urządzenia przeladunkowe, wyciągi kopalniane, duże silniki elektryczne, maszyny pracujące nieprzerwanie, wirówki	50 000 ÷ 63 000
Maszyny do pracy ciągłej (24 godziny na dobę) o wymaganym wielkim stopniu pewności pracy: maszyny do przeróbki celulozy i maszyny papiernicze, siłownie, pompy kopalniane, miejskie stacje pomp, maszyny o nieprzerwanej pracy na statkach handlowych	100 000 ÷ 200 000

Obciążenie zastępcze



$$P = X V F_r + Y F_a$$

gdzie:

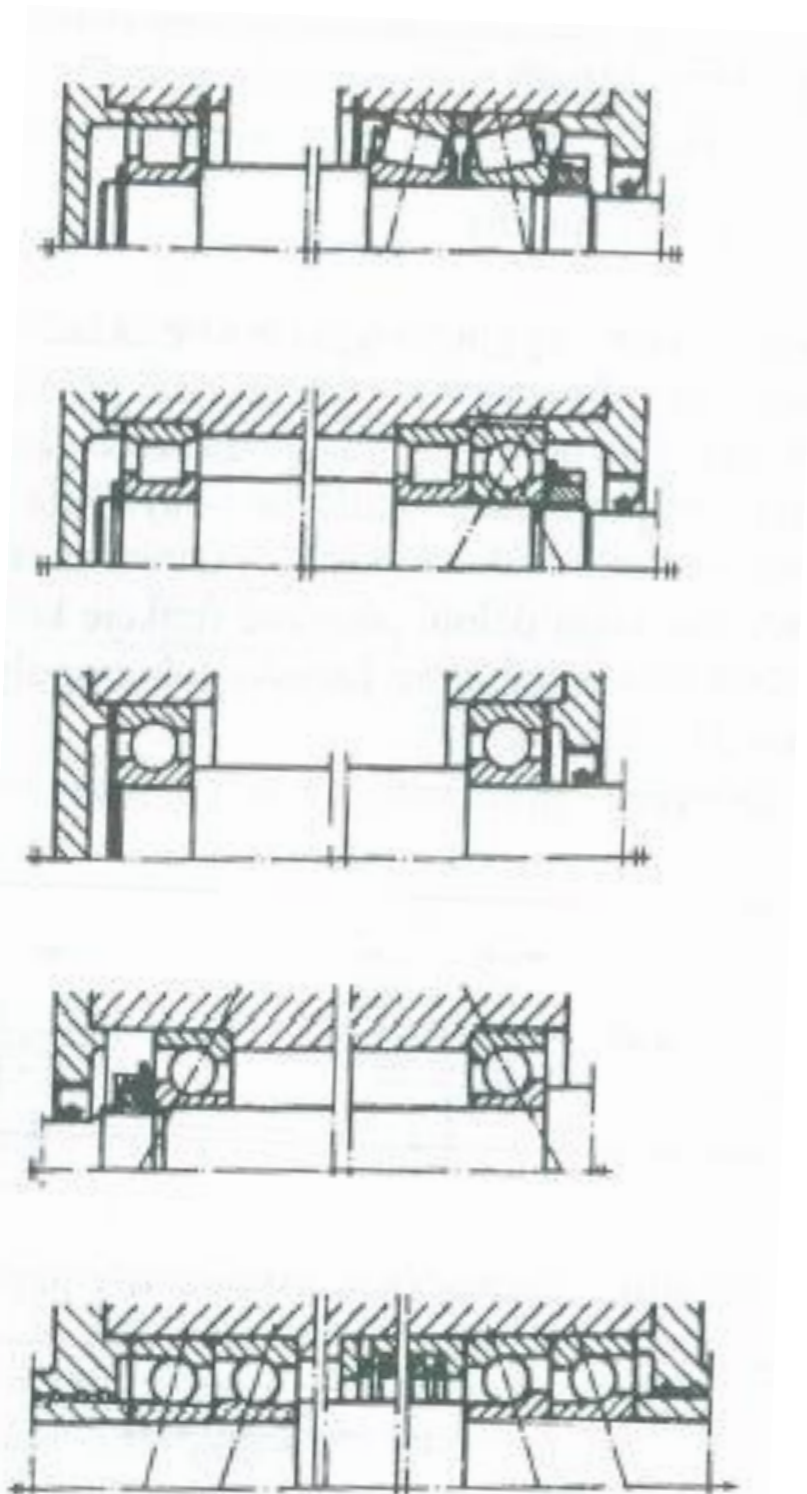
F_r, F_a [N] - obciążenia łożyska poprzeczne (promieniowe) i wzdłużne (osiowe),

V - współczynnik przypadku obciążenia,

X, Y - współczynniki obciążenia ruchowego poprzecznego i wzdłużnego.

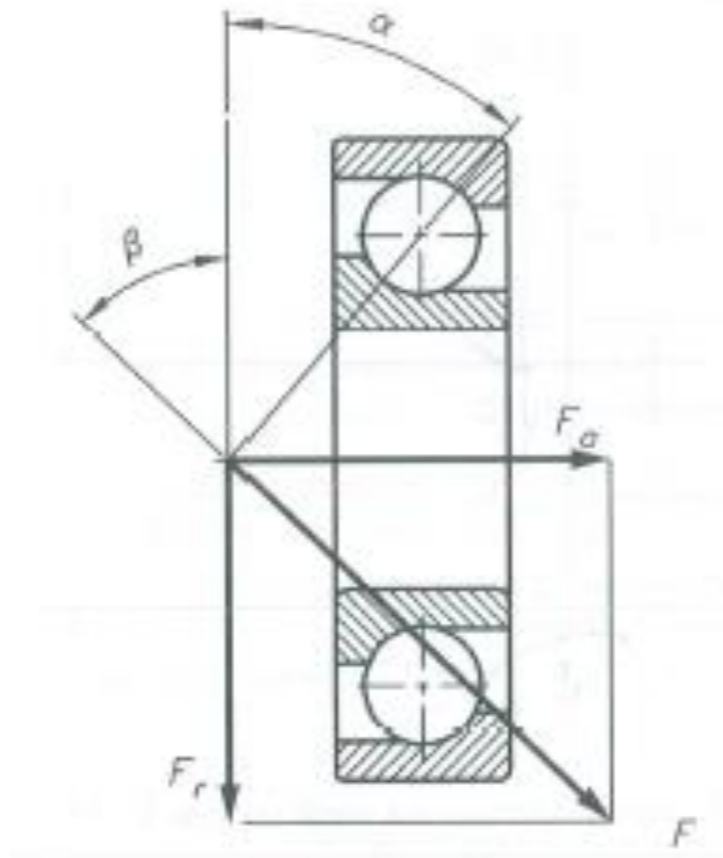
Obciążenie zastępcze jest to obciążenie tylko poprzeczne dla łożysk poprzecznych lub tylko wzdłużne dla łożysk wzdłużnych, pod działaniem którego łożysko z obracającym się pierścieniem oprawy osiągnie taką samą trwałość, jak w rzeczywistych warunkach obciążenia i przy rzeczywiście obracających się względem kierunku siły pierścieniach.

Układy łożyskowania



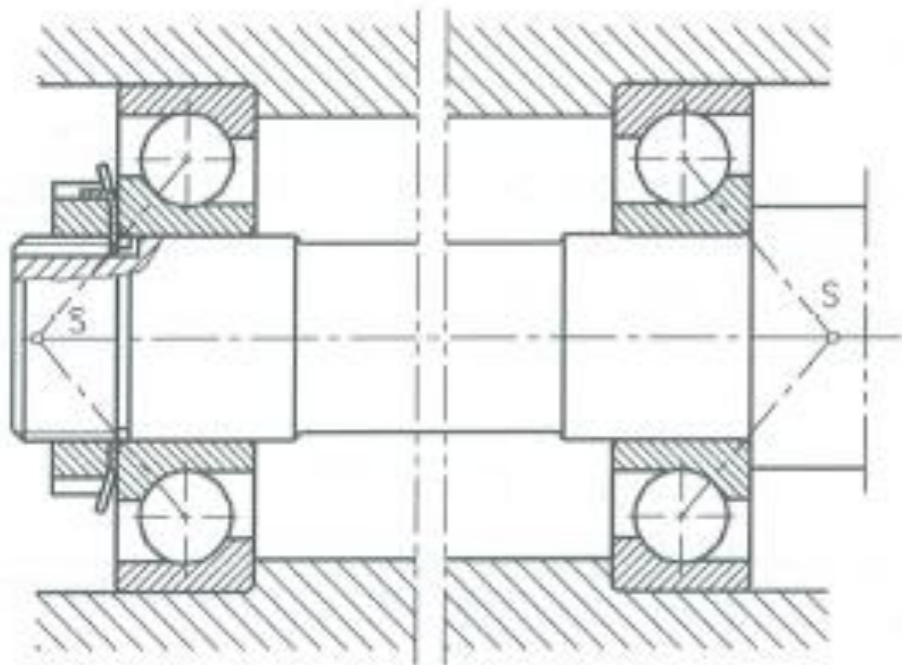
Struktura układu	Schemat układu	Liczba i rodzaj podpór (łożysk)	Zalety	Wady
Ustalająco-swobodne łożyskowanie	a)	jedno łożysko ustalające i jedno łożysko swobodne	jednoznaczność, statyczna wyznaczalność, wydłużenie możliwe przy standardowych łożyskach	-
	b)	jedno dwustronne łożysko wzdłużne i dwa łożyska poprzeczne	jednoznaczność, statyczna wyznaczalność, wydłużenie możliwe także dla dużych sił osiowych	wymaga trzech łożysk
Podpierające łożyskowanie	c)	dwa podpierające łożyska (wał ma luz osiowy s)	prosta konstrukcja i montaż bez szczególnych wymagań co do tolerancji osiowych	niedokładne prowadzenie osiowe przez duży luz osiowy, tylko dla niedużych odległości łożysk, szczególne niebezpieczeństwo uderzeń
	d)	dwa łożyska podpierające (łożyska są wzajemnie nastawione z luzem $s=0$)	bezluzowość, sztywność, statyczna wyznaczalność, przenoszenie dużych obciążeń	wyższe nakłady na nastawianie w montażu łożysk, przeciążenie przy wydłużeniach cieplnych wału
	e)	dwa łożyska podpierające, wzajemnie napięte sprężystie	zasadniczo bezluzowość, przenoszenie dużych sił osiowych w jednym kierunku	wzrost tarcia łożyska przez osiowe napięcie wstępne, brak przenoszenia obciążenia w kierunku sprężyny

Obciążenie łożysk skośnych

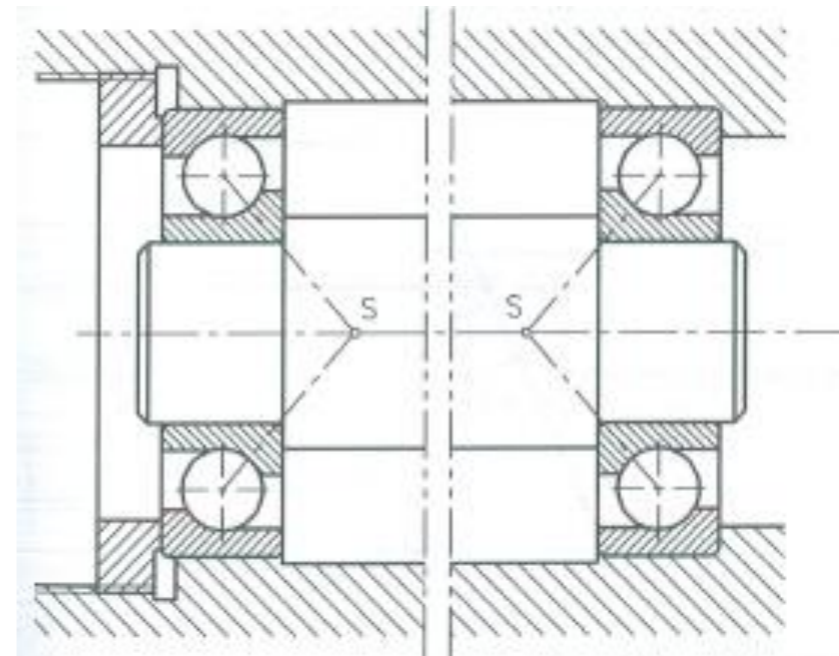


$$\operatorname{tg} \beta = \frac{F_a}{F_r}$$

Układy łożyskowania łożysk skośnych

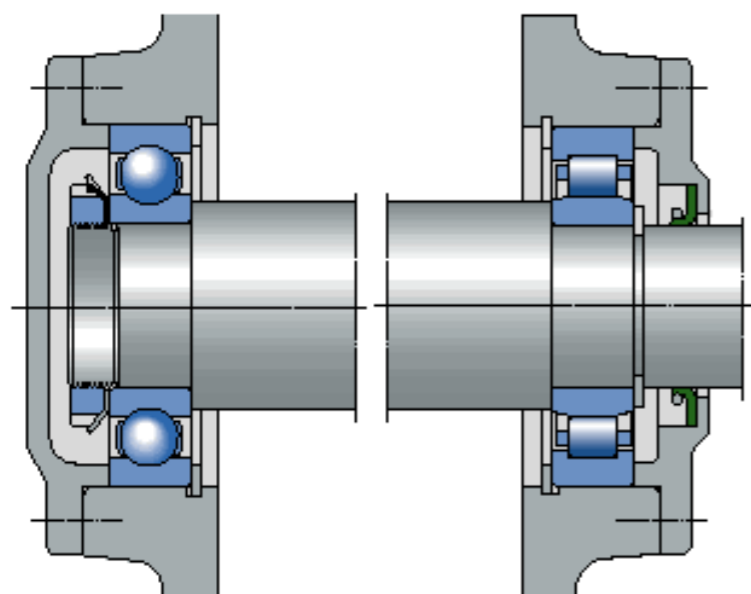


Układ „O”



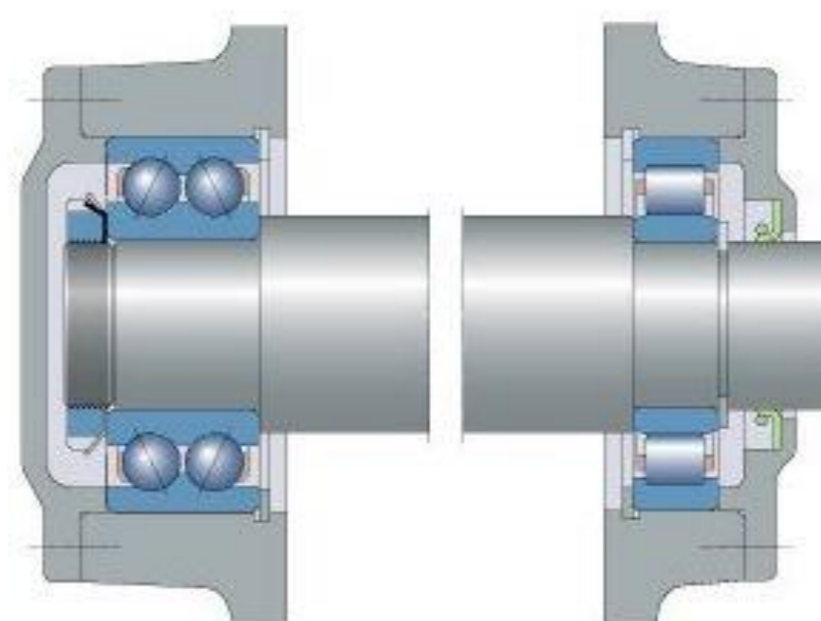
Układ „X”

Konstrukcja węzłów łożyskowych



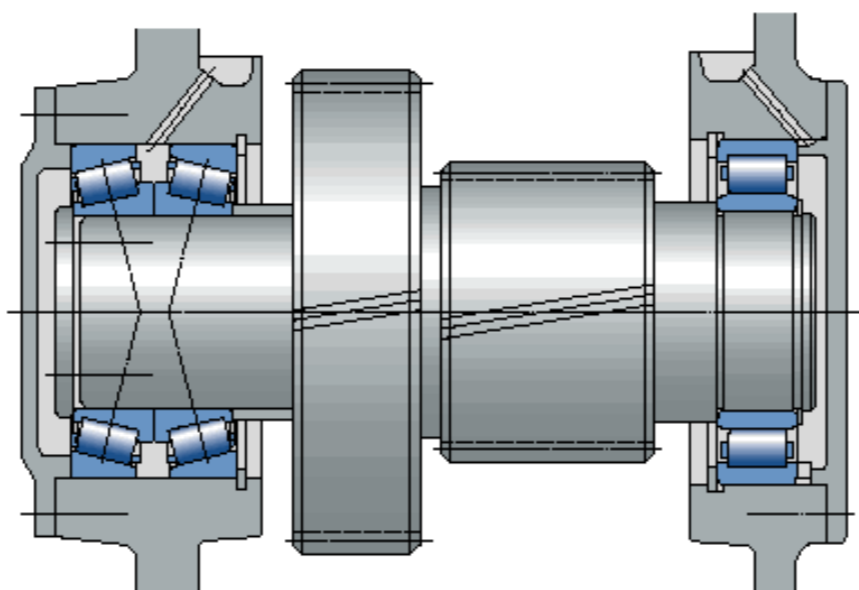
Łożysko ustalające

Łożysko swobodne



Łożysko ustalające

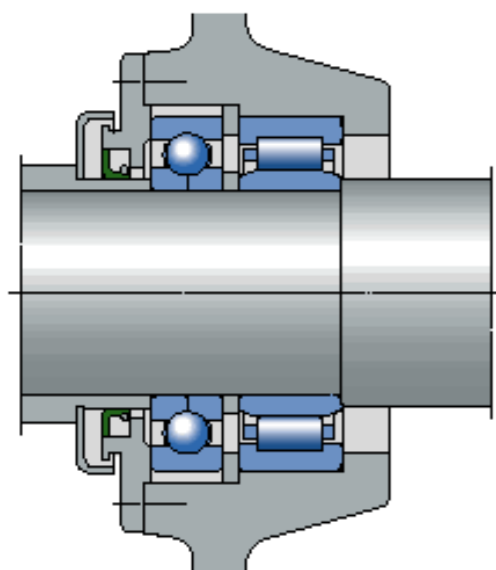
Łożysko swobodne



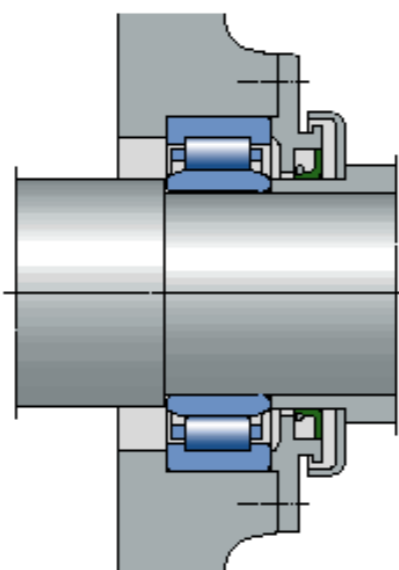
Łożysko ustalające

Łożysko swobodne

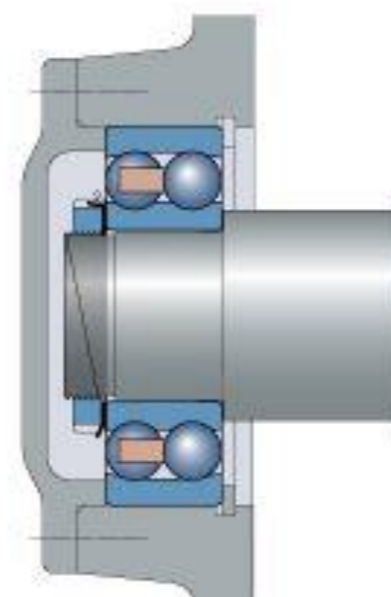
Konstrukcja węzłów łożyskowych



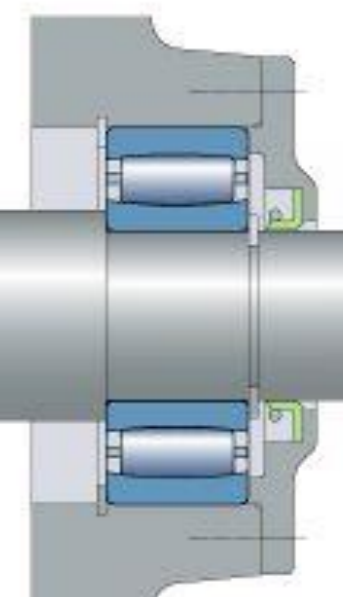
Łożysko ustalające



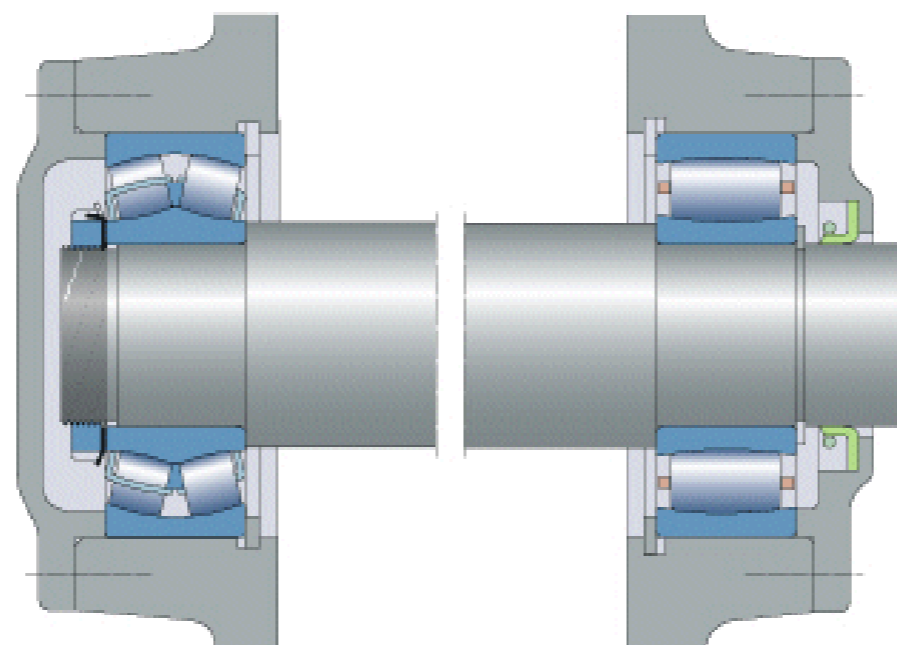
Łożysko swobodne



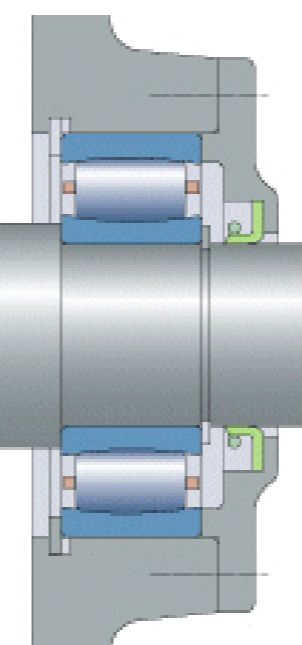
Łożysko ustalające



Łożysko swobodne

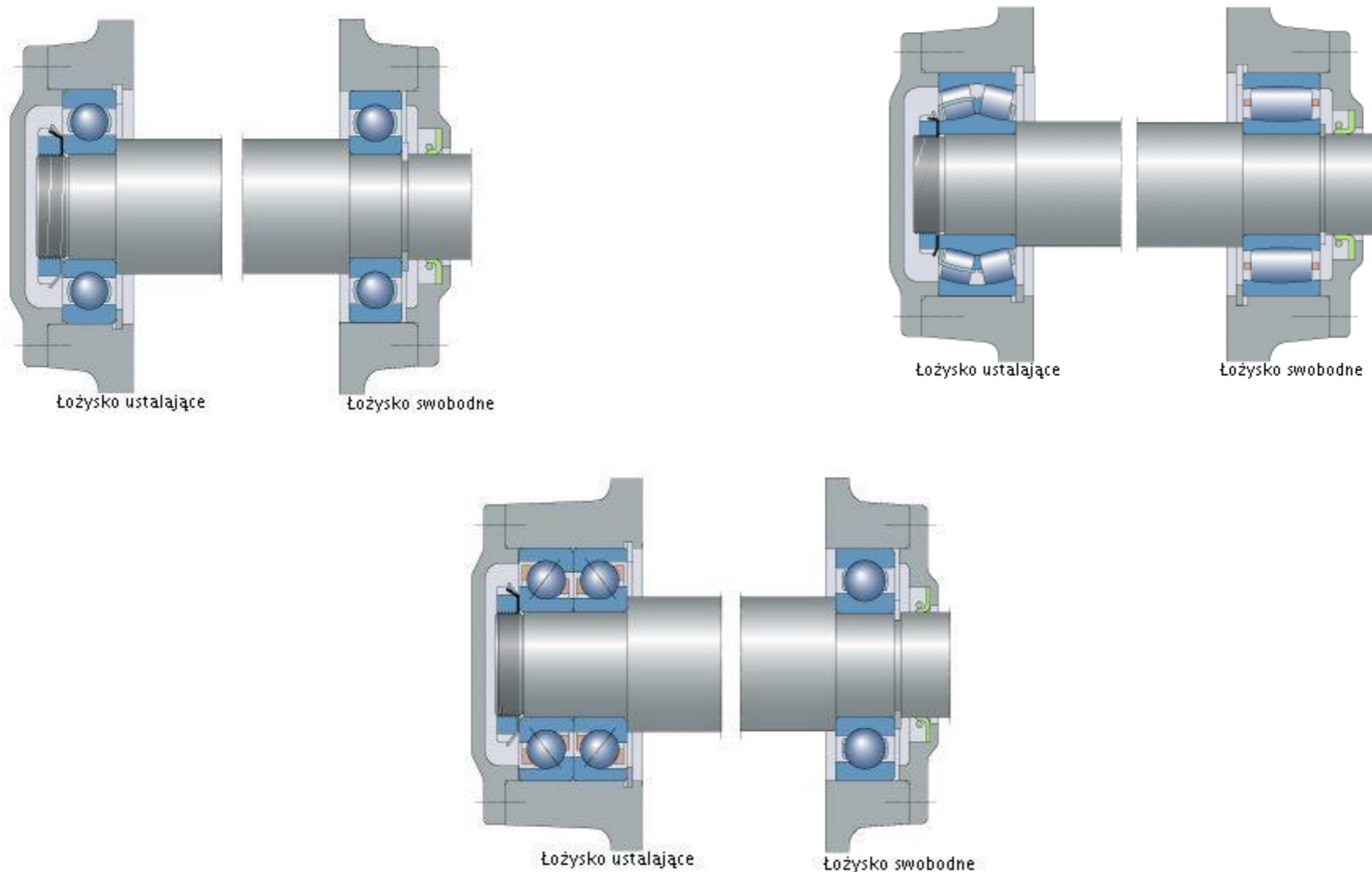


Łożysko ustalające

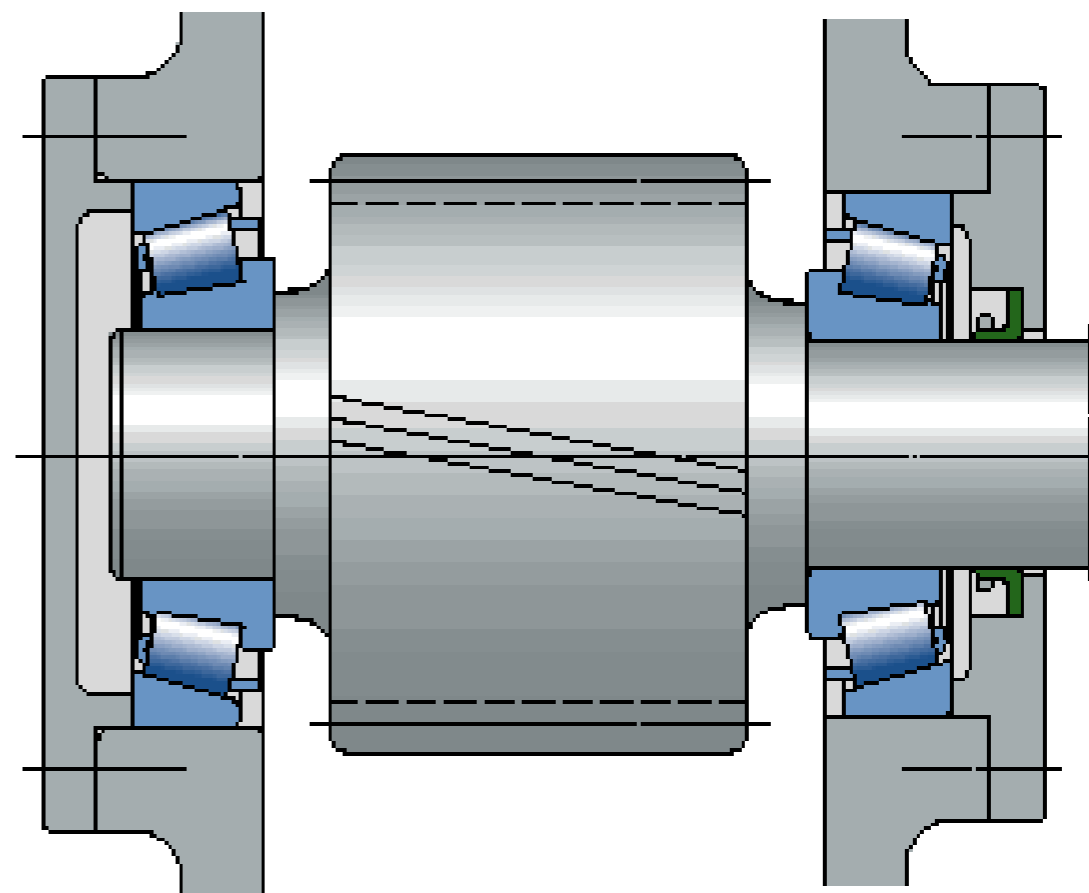
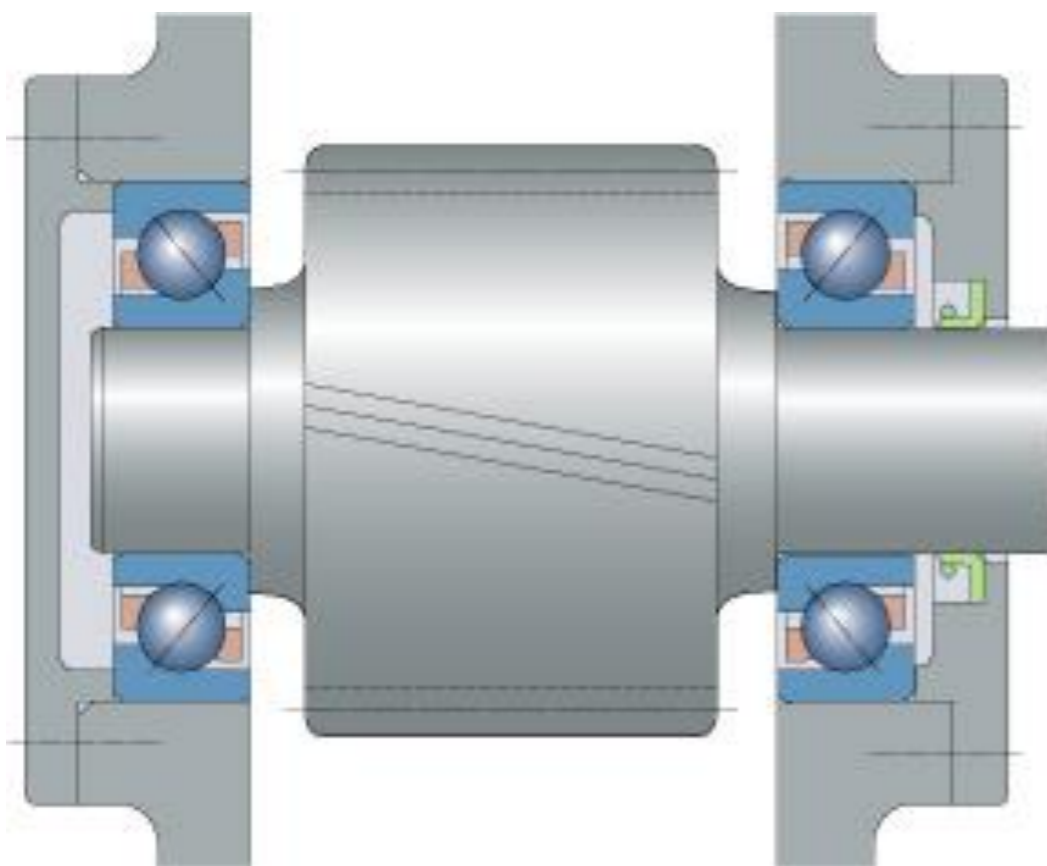


Łożysko swobodne

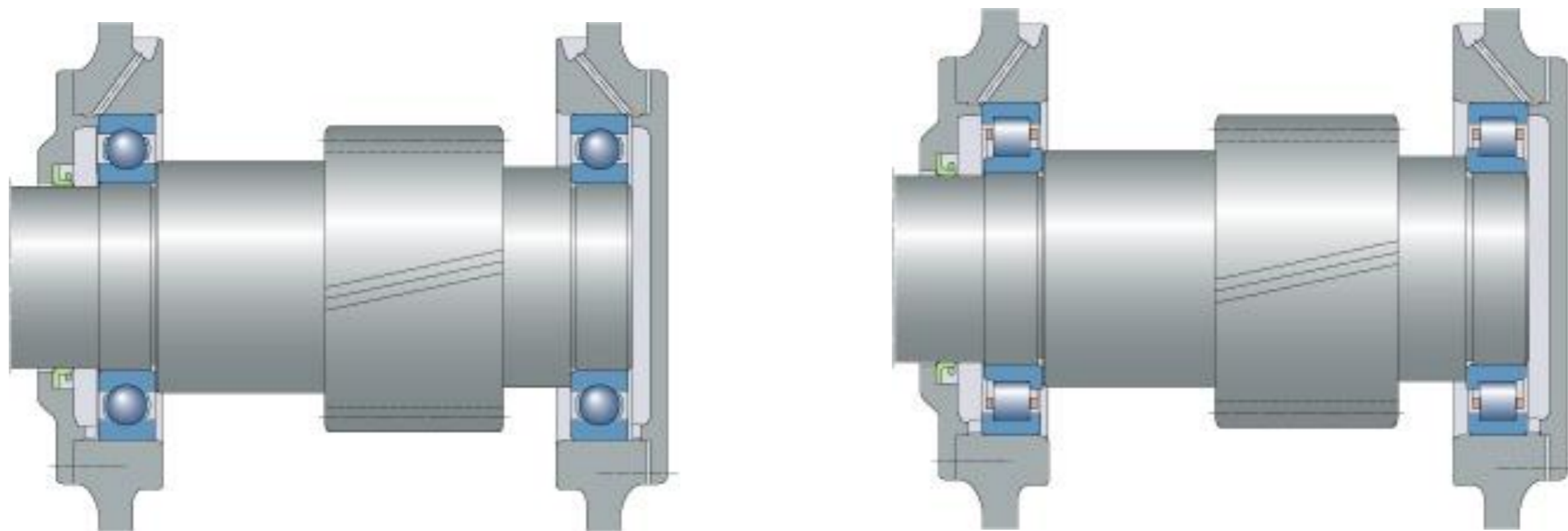
Konstrukcja węzłów łożyskowych



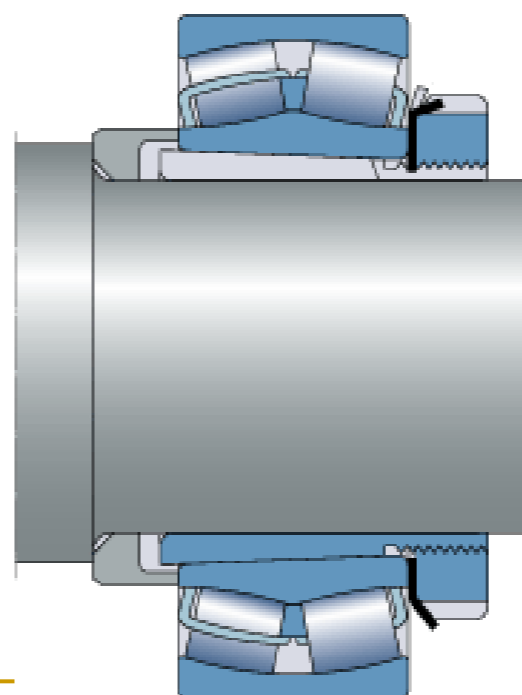
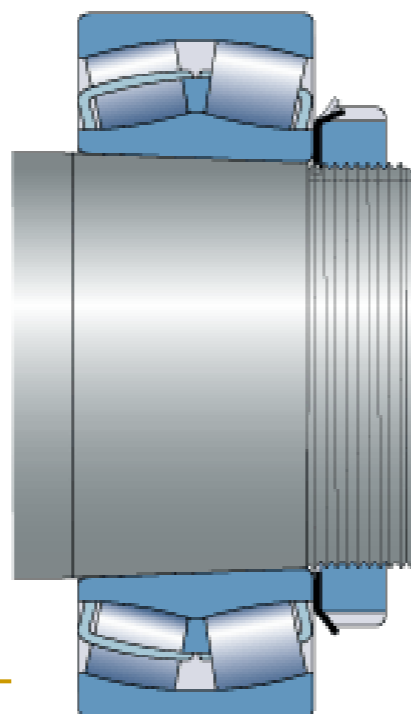
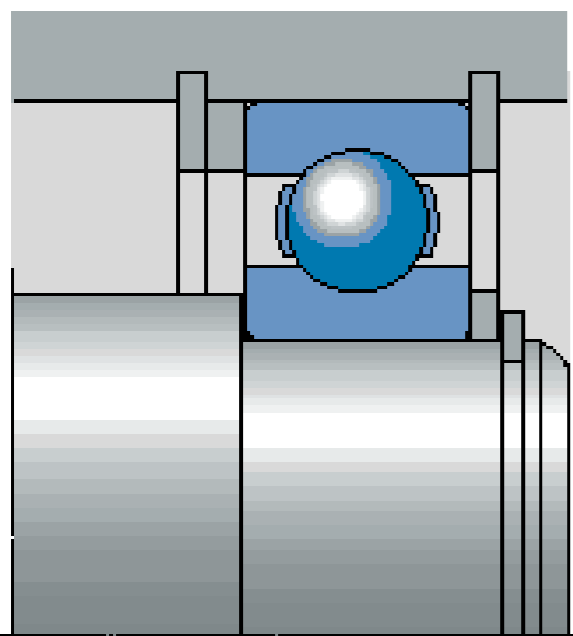
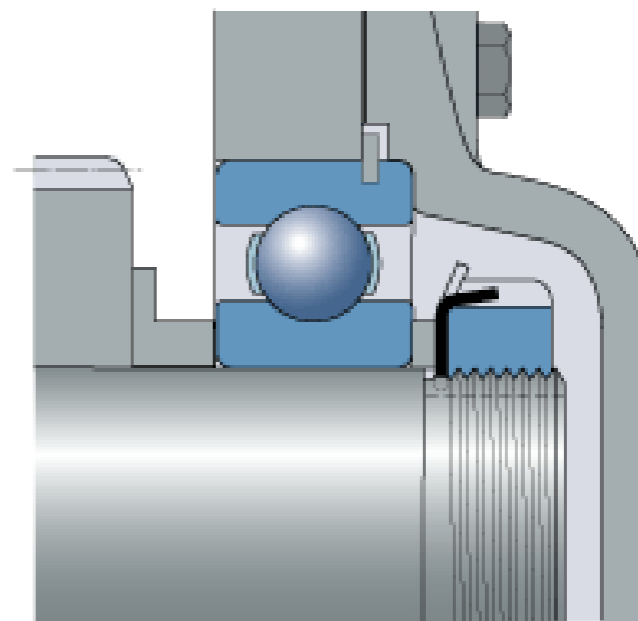
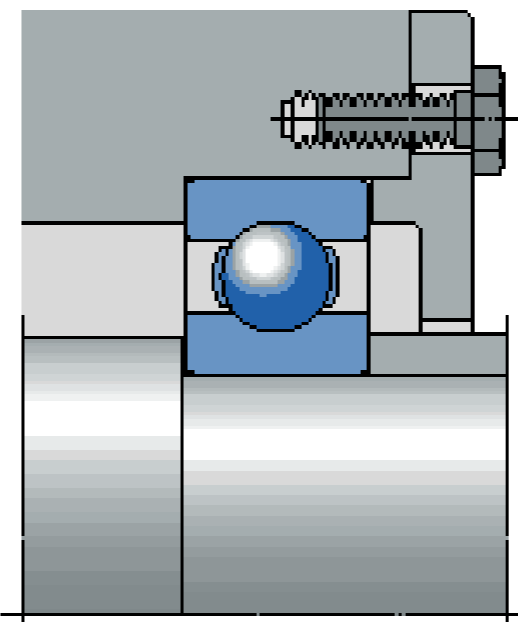
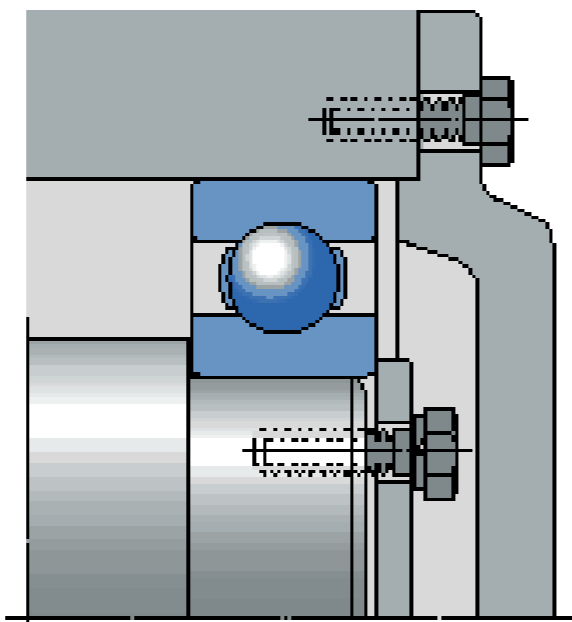
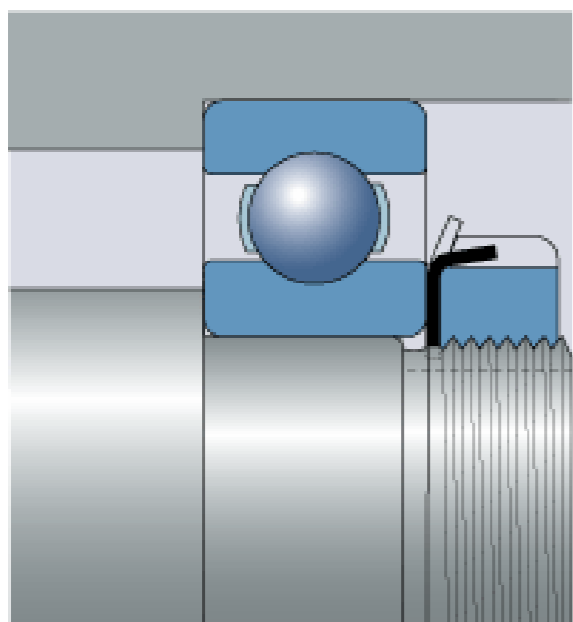
Konstrukcja węzłów łożyskowych



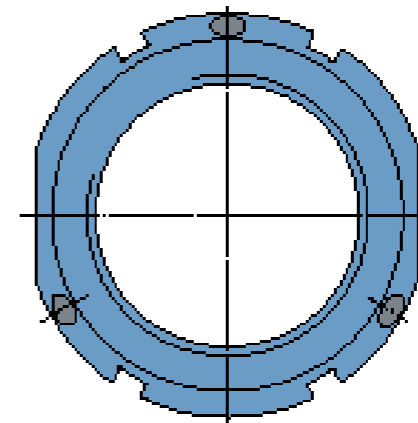
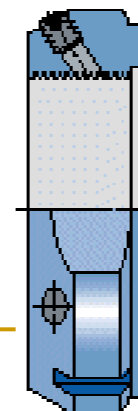
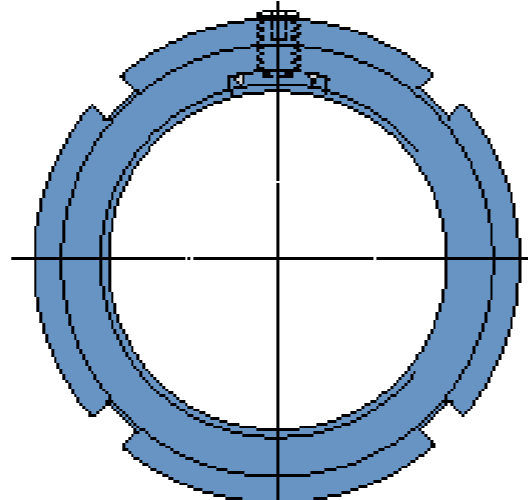
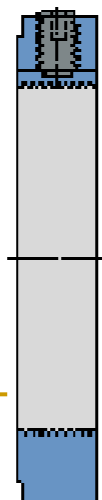
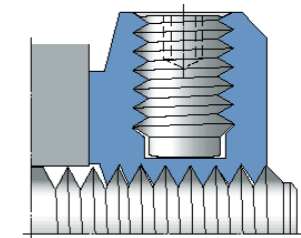
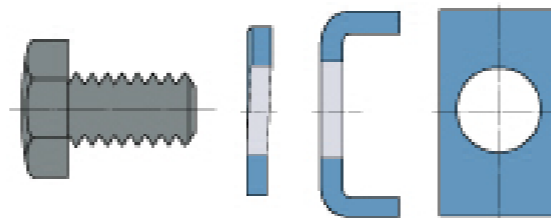
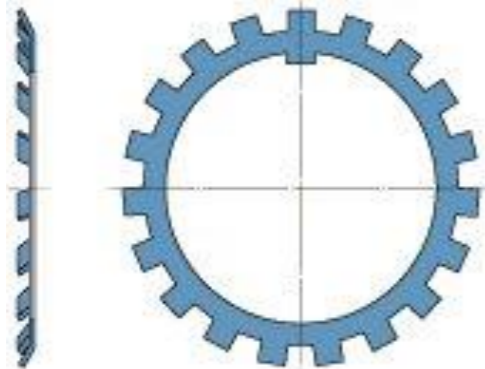
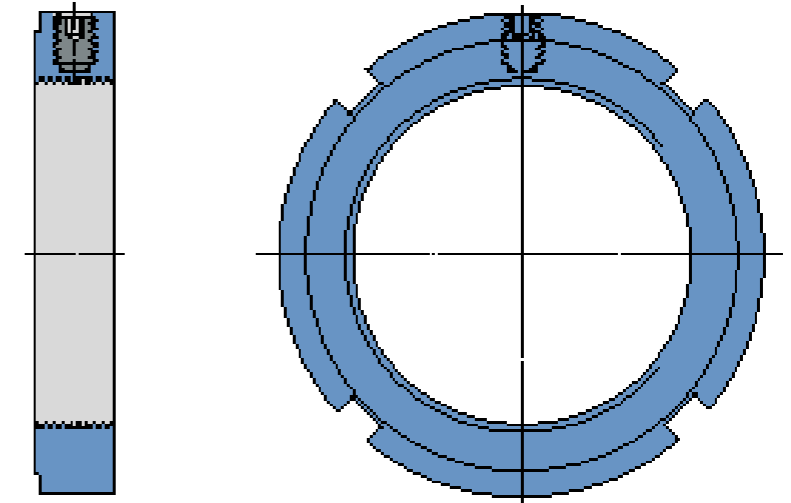
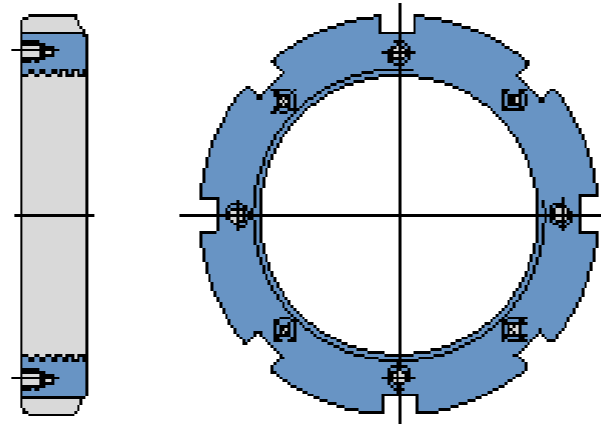
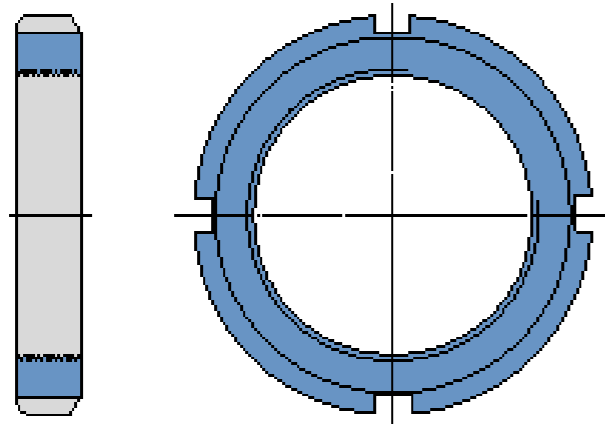
Konstrukcja węzłów łożyskowych



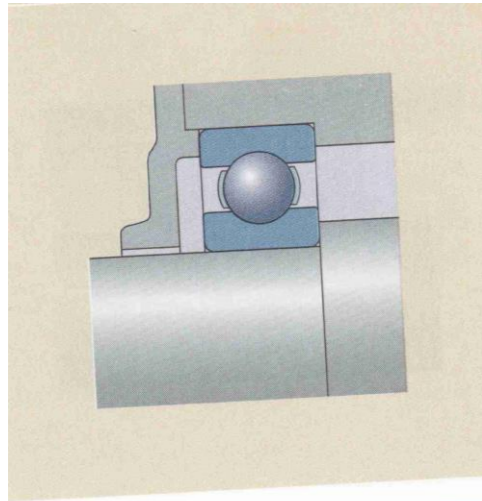
Ustalenie łożyska



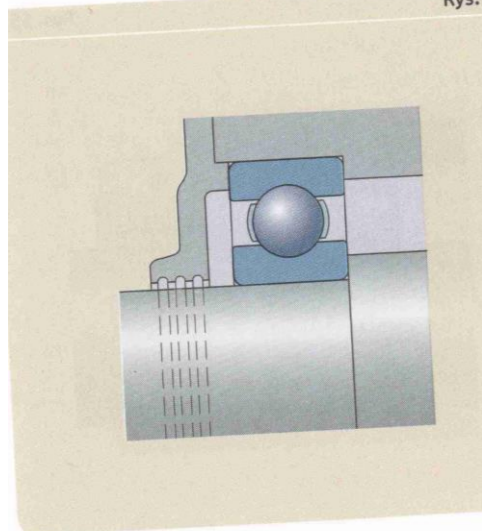
Elementy ustalające



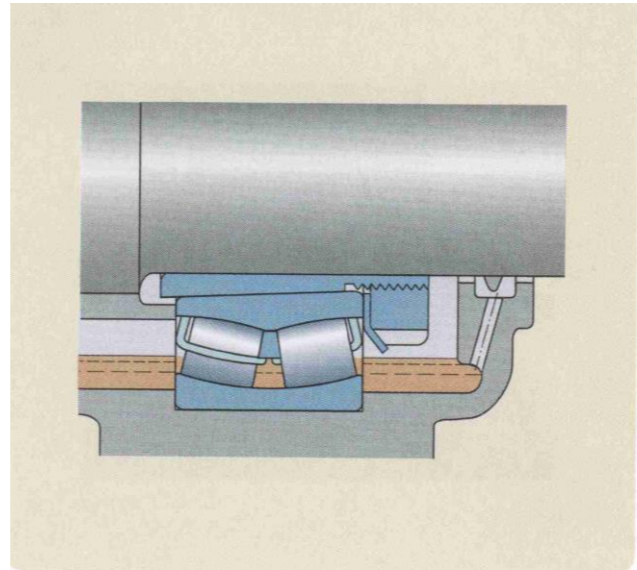
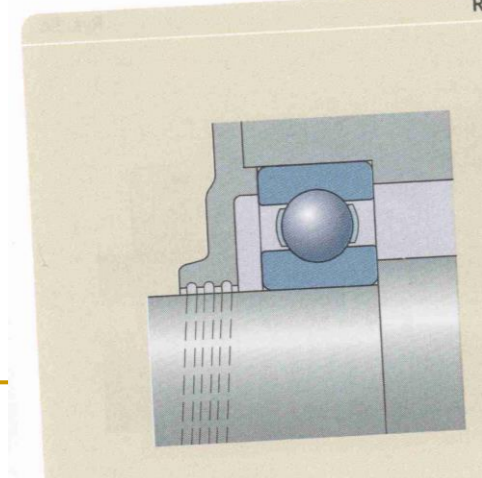
uszczelnienia



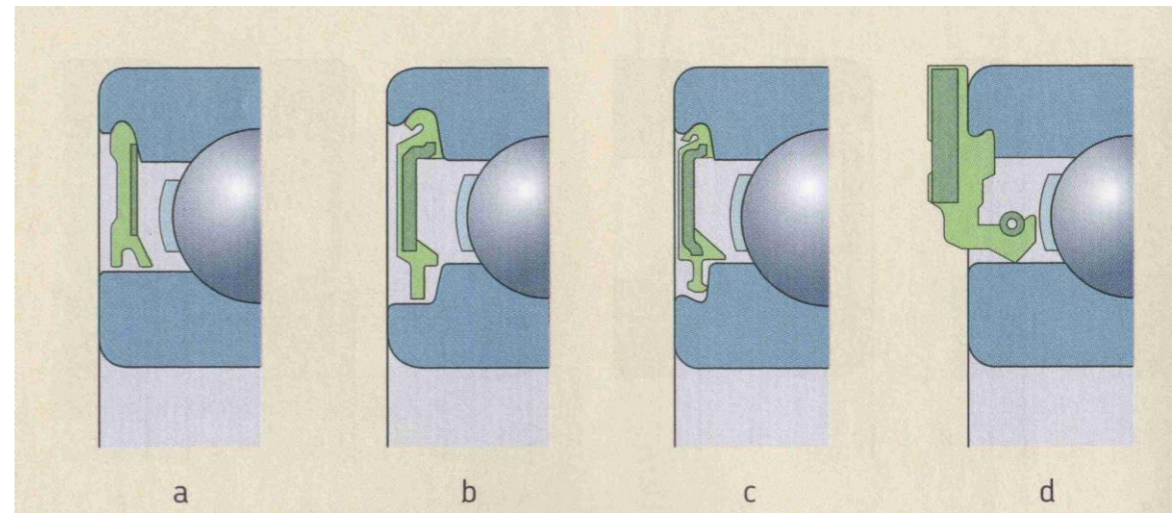
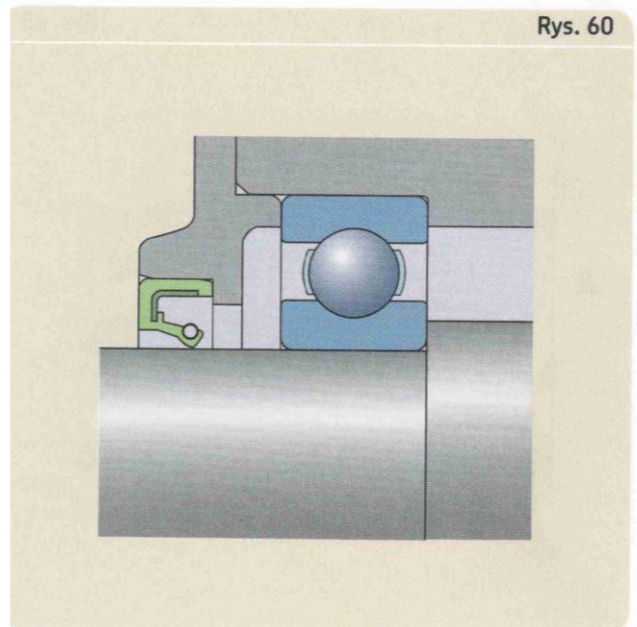
Rys.



R



Rys. 60



a

b

c

d

Pasowania łożysk tocznych

Przypadki ruchu obciążenia względem pierścieni	Pasowania	Uwagi
(1) Ruchomy wałek – pierścień wewnętrzny wiruje względem obciążenia, pierścień zewnętrzny w spoczynku	$KB/(j5 - n6)$ $(H6 - J7)/hB$	wcisk na wale luz w oprawie
(2) Ruchoma oprawa – pierścień zewnętrzny wiruje względem obciążenia, pierścień wewnętrzny w spoczynku	$KB/(g6 - j6)$ $(K6 - N7)/hB$	wcisk w oprawie luz na wale
(3) Przypadek obciążenia złożonego – gdy obydwa pierścienie wirują i oscylują względem obciążenia lub ich ruch jest niepewny	$KB/(h5 - m6)$ $(K7 - M7)/hB$	wcisk na wale luz w oprawie
Uwaga: Pole tolerancji otworu w łożysku jest oznaczone KB (bliskie polu K5 wg ISO), pole tolerancji średnicy zewnętrznej jest oznaczone hB (bliskie polu h5 wg ISO)		

Dopuszczalne kąty wychyleń

Łożysko	Dopuszczalny kąt wychylenia
Kulkowe zwykłe serii 62, 63, 64	$5 \div 10^\circ$
Kulkowe zwykłe serii 62, 63, 64 ze zwiększonym luzem C3	$7 \div 15^\circ$
Walcowe N i Nu	$2 \div 3^\circ$
Wahliwe kulkowe	$1,5 \div 3^\circ$
Wahliwe baryłkowe jednorzędowe	4°
Wahliwe baryłkowe dwurzędowe	$1,5 \div 2,5^\circ$

Dziękuję za uwagę
