

Komputerowe projektowanie konstrukcji mechanicznych

2018/2019

dr inż. Michał Dolata
www.mdolata.zut.edu.pl

WIMiM

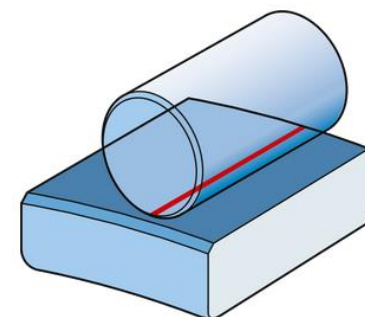
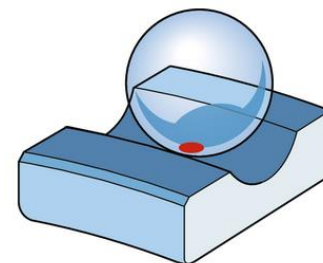


Łożyska

- Wykład przygotowany został na podstawie materiałów ze strony internetowej firmy SKF
- <http://www.skf.com/pl/products/bearings-units-housings/principles/general-bearing-knowledge/bearing-basics/index.html>

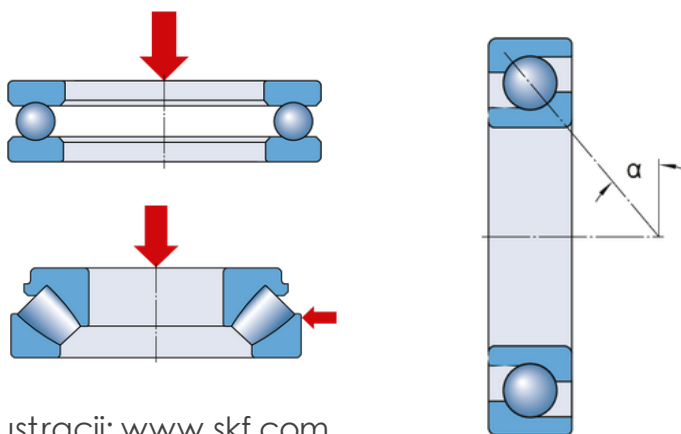
Typy łożysk

- Łożyska można podzielić ze względu na rodzaj elementów tocznych w nich stosowanych
- Kulka - łożysko kulkowe
- Wałeczek - łożysko wałeczkowe
- W przypadku kulek styk jest punktowy (większe prędkości, mniejsza nośność),
- W przypadku wałeczków styk liniowy (mniejsze prędkości, większa nośność)

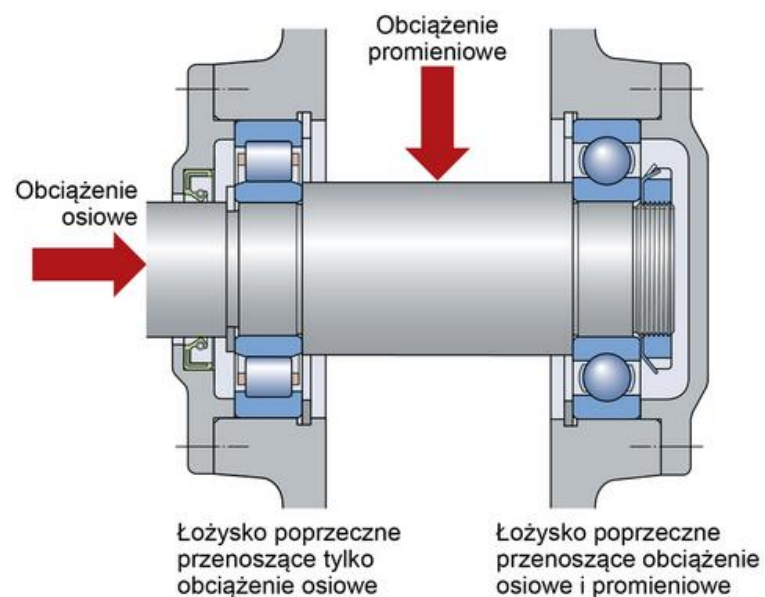


Typy łożysk

- łożyska można podzielić ze względu na rodzaj przenoszonego obciążenia
- łożyska poprzeczne (promieniowe)
- łożyska wzdłużne (osiowe)

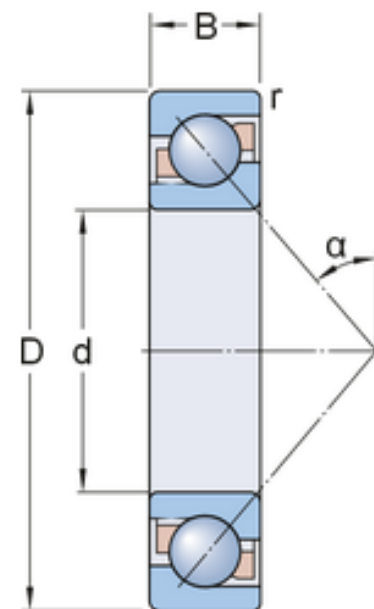
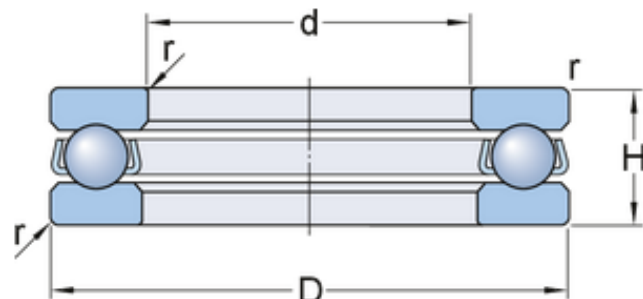


Źródło ilustracji: www.skf.com



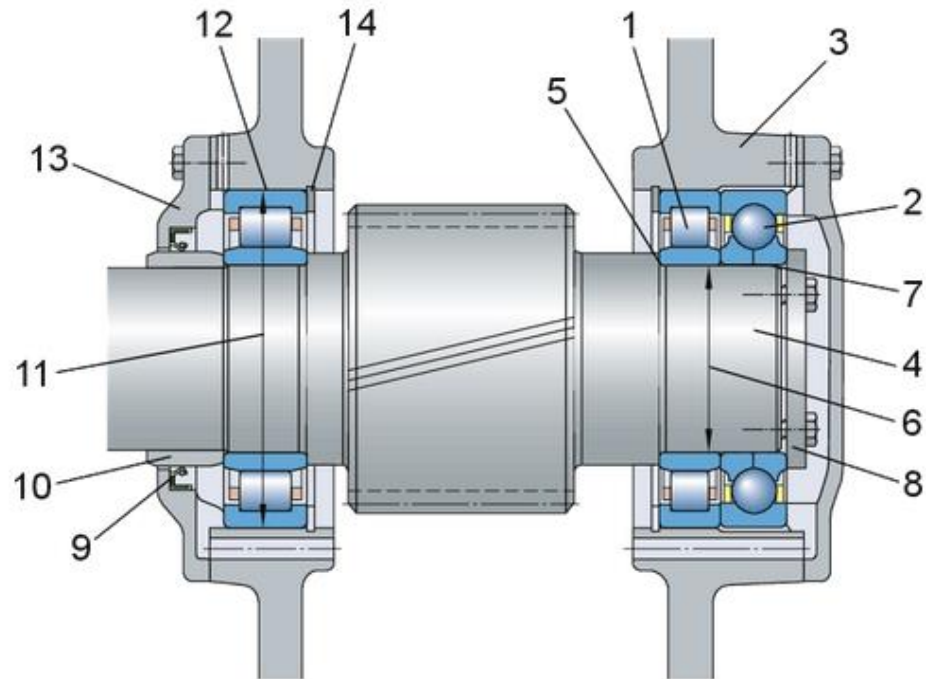
Terminologia

- Terminy określające nazwy elementów łożysk opisane są w normie ISO 5593
- Podstawowe symbole to:
- d – średnica wewnętrzna,
- D – średnica zewnętrzna,
- B – szerokość łożyska,
- H – wysokość łożyska,
- r – wymiar ścięcia montażowego
- α – kąt działania

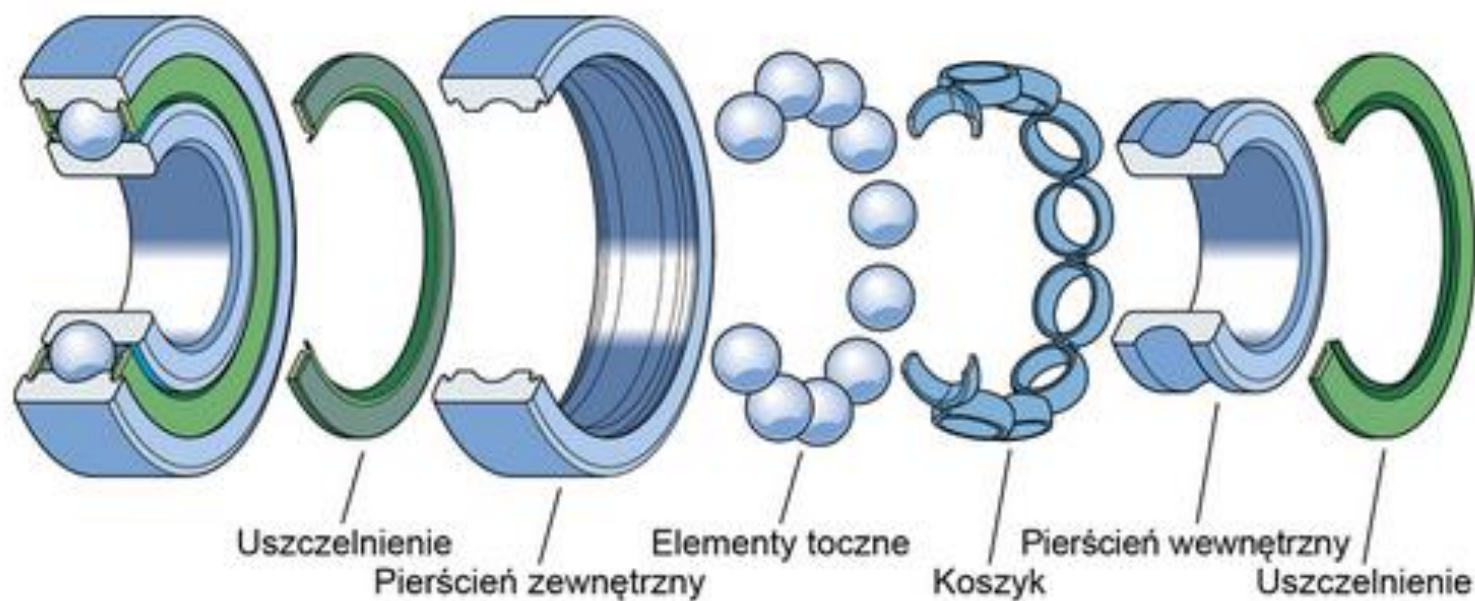


Wał-łożysko-oprawa

1. Łożysko walcowe
2. łożysko kulkowe dwukierunkowe
3. Oprawa
4. Wał
5. Występ oporowy na wale
6. Średnica wału
7. Miejsce osadzenia na wale
8. Płyta oporowa
9. Uszczelnienie promieniowe wału
10. Pierścień pod uszczelnienie
11. Średnica otworu w oprawie
12. Miejsce osadzenia w oprawie
13. Pokrywa oprawy
14. Pierścień osadczy sprężynujący



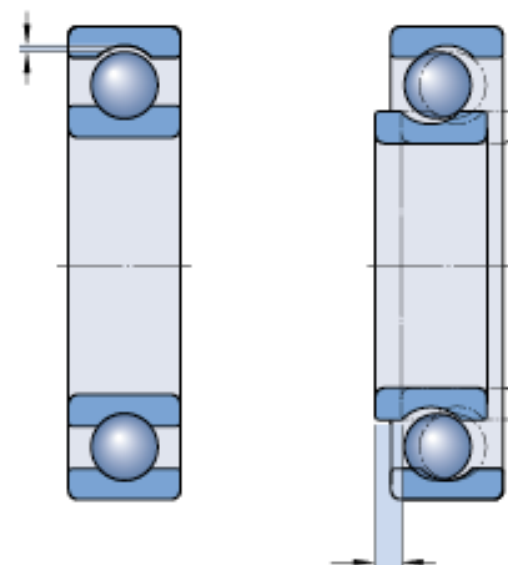
Budowa łożyska



Terminologia

- Terminy określające nazwy elementów łożysk opisane są w normie ISO 5593
- Podstawowe symbole to:
 - d – średnica wewnętrzna,
 - D – średnica zewnętrzna,
 - B – szerokość łożyska,
 - H – wysokość łożyska,
 - r – wymiar ścięcia montażowego
 - α – kąt działania

Wewnętrzny luz promieniowy



Wewnętrzny luz osiowy

Rodzaje łożysk

Przydatność łożysk tocznych do zastosowań przemysłowych

Symbol	Nośność		Niewspółosiowość		Łożyskowanie				Odpowiednie do					Cechy konstrukcyjne					
	obciążenie promiennowe	obciążenie osiowe	obciążenie momentem	statyczna (spoczynkowa)	dynamiczna (kila doczesnych części stopnia)	ustalające	wolne	nastawne	plynające	duża trwałość smar	wysoka prędkość	małe białe	wysoka sztywność	robie tanie	uszczelnienie zintegrowane	niezależny montaż pierścieni	chwyt szczytowy	osiągnięto standardowych oporów i akcesoriów	
Łożyska kulkowe zwykłe		+	+↔	A-, B+	-	--	↔	□	X	✓	A+++ B++	A+++ B+	A+++ B++	+	+++	A✓	X	X	X
Łożyska kulkowe samonastawne		+	+↔	--	++	--	↔	↔	X	X	+++	++	A, B+ C++	+	++	✓	X	X	✓
Łożyska kulkowe skośne, jednorzędowe		+1)	+↔	--	--	--	X	X	✓	X	++	++	+++	++	++	✓	X	X	X
dopasowane jednorzędowe		A, B++ C++1)	A, B+++ C++↔	A+++, B+ C--	A, C-- B-	--	A, B↔ C-	A, B□ C, X	X	X	++	++	+++	++	++	X	X	X	X
dwurzędowe		++	+↔	++	--	--	↔	□	X	X	++	++	++	++	++	A✓	B✓	X	X
jednorzędowe dwukierunkowe		+1)	+↔	--	--	--	↔1)	--	--	--	+	+++	++	++	++	X	✓	X	X
Łożyska kulkowe wahliwe		+	-	--	+++	+2)	↔	□	X	✓	+++	++	++	+	+++	✓	X	✓	✓
Łożyska walcowe, z koszykiem		++	--	--	-	--	X	■	X	X	++	+++	+++	++	+++	X	✓	X	X
z pełną liczbą elementów tocznych, jednorzędowe		++	A, B+↔ C, D+↔	--	-	--	A, B- C, D↔	A, B- C, D, X	X	✓	A, B, C, D, X	+++3)	+++	++	+++	X	✓	X	X
z pełną liczbą elementów tocznych, dwurzędowe		+++	+↔	--	-	--	↔	A, B- C, D↔	X	X	-	+	+	+++	-	X	A, B✓	X	X
Łożyska igielkowe, z pierścieniami stalowymi		++	--	--	-	--	X	■	X	X	++	++	+	++	+	A✓	✓	X	X
złożenia igielkowe / łożyska cienkościennie		++	A, B- C-	--	-	--	A, B, X C-	A, B=	X	X	++	++	+	++	+	B, C✓	✓	X	X
łożyska zespolone		++	A-, B+ C++	--	--	--	↔	X	✓	X	+	+	++	+	X	✓	✓	X	X
Łożyska stożkowe, jednorzędowe		+++1)	+↔	--	-	--	↔	X	✓	X	+	++	+++	++	+	X	✓	X	X
dopasowane jednorzędowe		A, B+++ C+++1)	A, B+++ C++↔	A+, B+++ C--	A-, B, C--	--	A, B↔ C-	A, B□ C, X	X	X	+	+	+++	++	+	X	✓	X	X
dwurzędowe		+++	+↔	A+, B+++ C++	A-, B--	--	↔	□	X	X	+	+	+++	++	+	✓	✓	B✓	X
Łożyska barylowe		+++	+↔	--	+++	+2)	↔	□	X	✓	+	++	+++	++	+	✓	X	✓	✓
Łożyska toroidane CARB, z koszykiem		+++	--	-	++	-	X	■	X	X	+	++	+++	++	+	X	X	✓	✓
z pełną liczbą elementów tocznych		+++	--	-	++	-	X	■	X	X	-	+	+++	++	-	✓	X	✓	✓
Łożyska kulkowe wzdłużne		--	A+↔ B+↔	--	--	--	A- B↔	X	X	X	+	-	++	+	+	X	✓	X	X
z kulistym pierścieniem zewnętrznym		--	A+↔ B+↔	--	++	--	A- B↔	X	X	X	+	-	+	+	+	X	✓	X	X
Łożyska walcowe wzdłużne		--	+↔	--	--	--	↔	X	X	X	-	-	+	+++	+	X	✓	X	X
Łożyska igielkowe wzdłużne		--	++↔	--	--	--	↔	X	X	X	-	-	+	+++	+	X	✓	X	X
Łożyska barylowe wzdłużne		+1)	+++↔	--	+++	+2)	↔	X	✓	X	-	+	+	+++	+	X	✓	X	X

1) Pod warunkiem spełnienia wymogu dotyczącego stosunku F_2/F_1

2) Zredukowany kąt niewspółosiowości – skontaktuj się z SKF

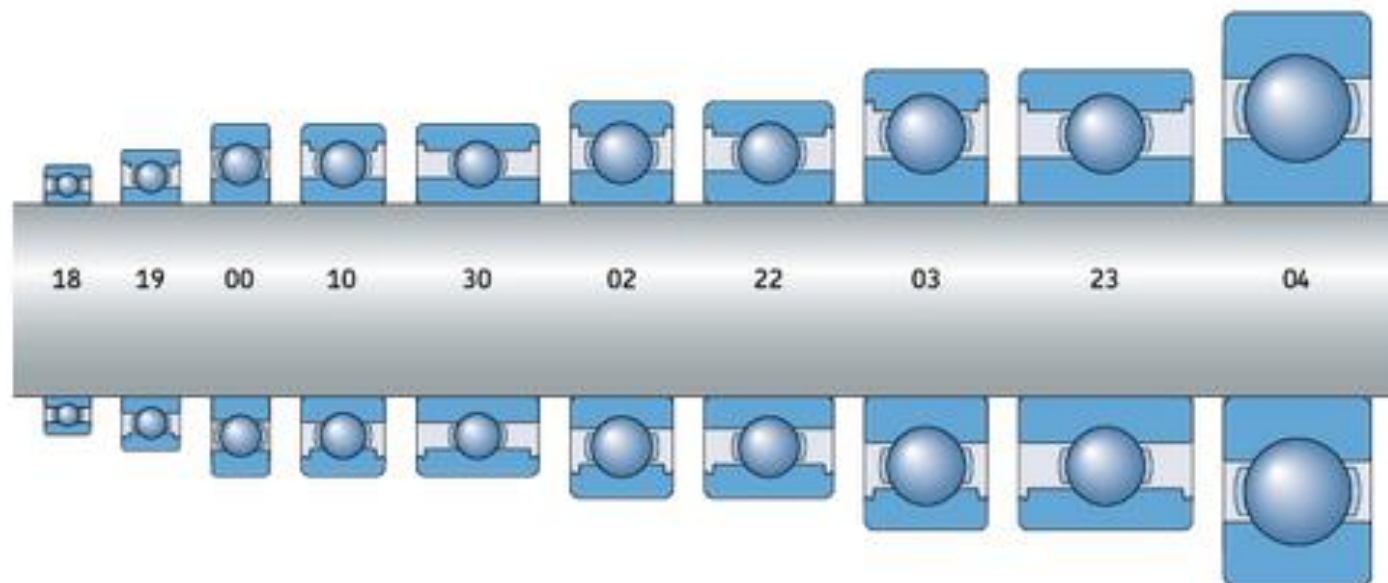
3) Zależnie od koszyka oraz poziomu obciążenia osiowego

Dobór

- ▶ Najważniejszymi parametrami pracy są:
 - ▶ obciążenie
 - ▶ prędkość
 - ▶ temperatura
 - ▶ środek smarny i jego czystość
- ▶ Zoptymalizowanie konstrukcji może wymagać kilkakrotnego powtórzenia sekwencji wybranych etapów procesu doboru łożysk.

Dobór

- ▶ Do wału o tej samej średnicy dobrać można łożysko o różnej średnicy zewnętrznej i szerokości



Dobór

- ▶ Doboru rozmiaru łożyska można dokonać na podstawie:
 - ▶ Trwałości nominalnej,
 - ▶ Obciążenia statycznego,
 - ▶ Wymaganego obciążenia minimalnego

Dobór rozmiaru na podstawie trwałości nominalnej

- ▶ Trwałość nominalna łożyska,
- ▶ Nominalna nośność dynamiczna, C
- ▶ Równoważne obciążenie dynamiczne łożyska, P
- ▶ Współczynnik modyfikacji trwałości, a_{SKF}
- ▶ Warunki smarowania – stosunek lepkości, κ
- ▶ Graniczne obciążenie zmęczeniowe, P_u
- ▶ Wskaźnik stopnia czystości, η_c

Definicja trwałości nominalnej

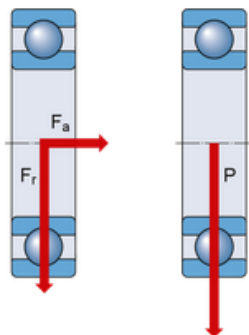
- ▶ Trwałość łożyska - liczba obrotów (lub czas pracy w godzinach) przy określonej prędkości obrotowej, którą łożysko może osiągnąć do momentu pojawienia się pierwszych śladów zużycia zmęczeniowego.
- ▶ Trwałość nominalna podstawowa L_{10} to trwałość zmęczeniowa, jakiej osiągnięcia lub przekroczenia można oczekiwać od 90% dostatecznie dużej grupy pozornie identycznych łożysk eksploatowanych w identycznych warunkach pracy.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^P$$

- ▶ C – nominalna nośność dynamiczna [kN]
- ▶ P – równoważne obciążenie dynamiczne łożyska [kN]
- ▶ N – prędkość obrotowa [obr/min]
- ▶ P – wykładnik równania trwałości (=3 dla kulkowych, =10/3 dla wałeczkowych)

Dobór rozmiaru na podstawie trwałości nominalnej

- ▶ Obciążenia działające na łożysko oblicza się zgodnie z zasadami mechaniki,
- ▶ Równoważne obciążenie dynamiczne łożyska definiuje się jako: hipotetyczne obciążenie, stałe pod względem wielkości i kierunku, które działa promieniowo na łożyska poprzeczne bądź osiowo i centrycznie na łożyska wzdłużne.
- ▶ Jeśli na łożysko działają jednocześnie obciążenie promieniowe F_r i obciążenie osiowe F_a stałe co do wielkości i kierunku, to równoważne obciążenie dynamiczne łożyska P można wyznaczyć z następującego ogólnego równania:



$$P = X F_r + Y F_a$$

Źródło ilustracji: www.skf.com

P	równoważne obciążenie dynamiczne łożyska [kN]
F_r	rzeczywiste obciążenie promieniowe łożyska [kN]
F_a	rzeczywiste obciążenie osiowe łożyska [kN]
X	współczynnik obciążenia promieniowego dla łożyska
Y	współczynnik obciążenia osiowego dla łożyska

Dobór rozmiaru na podstawie trwałości nominalnej

- ▶ Dla przekładni zębatych należy brać pod uwagę dodatkowe siły dynamiczne. Dodatkowe siły dynamiczne w przekładni mogą być powodowane odchyłkami podziałki lub kształtu zazębienia oraz niewyważeniem wirujących elementów.
 - ▶ dla błędów podziałki lub kształtu poniżej 0,02 mm: od 1,05 do 1,1
 - ▶ dla błędów podziałki lub kształtu od 0,02 do 0,1 mm: od 1,1 do 1,3
- ▶ W przypadku urządzeń z napędem pasowym obliczenie obciążenia łożysk wymaga uwzględnienia naciągu pasa. pasy zębate = od 1,1 do 1,3
 - ▶ pasy klinowe = od 1,2 do 2,5
 - ▶ pasy płaskie = od 1,5 do 4,5

Dobór rozmiaru na podstawie wymaganego obciążenia minimalnego

- ▶ W zastosowaniach, gdzie o właściwym rozmiarze łożyska decydują czynniki inne niż obciążenie – na przykład średnica wału ograniczona przez krytyczny poziom prędkości – łożysko może być obciążane tylko nieznacznie w stosunku do jego rozmiaru i nośności. Gdy obciążenia są bardzo niskie, przeważają często mechanizmy powstawania uszkodzeń inne niż zmęczenie, a mianowicie takie jak poślizg, zatarcie bieżni czy uszkodzenie koszyka. Dla zapewnienia prawidłowej pracy, łożyska toczne muszą być zawsze poddawane pewnemu obciążeniu minimalnemu. Ogólna reguła praktyczna mówi, że do łożysk kulkowych przykładac należy obciążenia minimalne odpowiadające wartości 0,01 C, a do łożysk wałeczkowych – 0,02 C.

Dobór rozmiaru na podstawie obciążenia statycznego

- ▶ Warunki doboru rozmiaru łożyska na podstawie obciążenia statycznego:
 - ▶ łożysko nie kręci się i jest poddawane wysokiemu obciążeniu ciągłemu lub przerywanym obciążeniom szczytowym.
 - ▶ łożysko wykonuje powolne ruchy oscylacyjne pod obciążeniem.
 - ▶ łożysko kręci się i oprócz normalnych obciążeń roboczych odpowiadających wyznaczonej trwałości zmęczeniowej musi wytrzymać chwilowe wysokie obciążenia szczytowe.
 - ▶ łożysko kręci się pod obciążeniem z niską prędkością ($n < 10$ obr/min) i wymagana jest tylko jego ograniczona trwałość.

Równoważne obciążenie statyczne

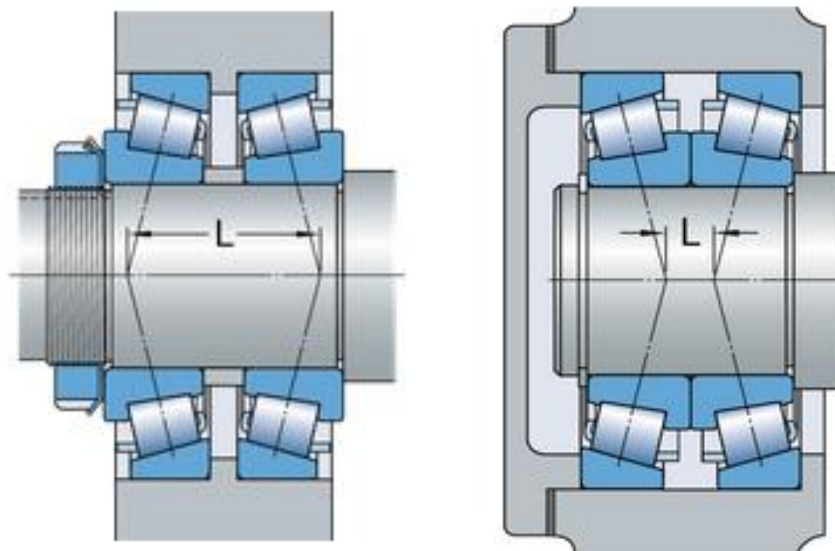
- ▶ Obciążenia złożone ze składowych promieniowej i osiowej, których wartość trzeba ocenić w odniesieniu do nominalnej nośności statycznej C_0 , muszą być przeliczane na równoważne obciążenie statyczne łożyska.
- ▶ Równoważne obciążenie statyczne łożyska wyznacza się z następującego równania ogólnego:

$$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a$$

P_0	równoważne obciążenie statyczne łożyska [kN]
F_r	faktyczne obciążenie promieniowe łożyska (zob. niżej) [kN]
F_a	faktyczne obciążenie osiowe łożyska (zob. niżej) [kN]
X_0	współczynnik obciążenia promieniowego dla łożyska
Y_0	współczynnik obciążenia osiowego dla łożyska

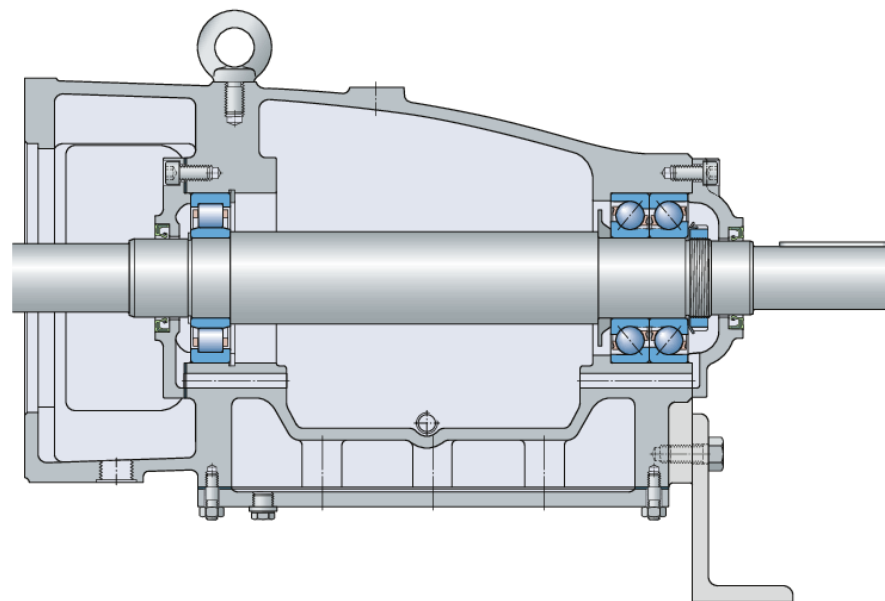
Napięcie wstępne

- ▶ Jednorzędowe łożyska stożkowe oraz łożyska kulkowe skośne montuje się zwykle razem z drugim łożyskiem tego samego typu i rozmiaru, w układzie rozbieżnym lub zbieżnym. Ta sama zasada odnosi się do jednorzędowych łożysk kulkowych skośnych.



Przykład - pompa odśrodkowa

- ▶ prędkość obrotowa: $n = 3\ 000$ obr/min
- ▶ do węzła swobodnego – łożysko walcowe NU 311 ECP:
 - ▶ maks. obciążenie promieniowe: $F_r = 3,29$ kN
 - ▶ szacowana temperatura pracy: $T = +70^\circ\text{C}$ ($+160^\circ\text{F}$)
- ▶ do węzła ustalającego – para łożysk kulkowych skośnych do uniwersalnej zabudowy 7312 BECBP w układzie rozbieżnym:
 - ▶ maks. obciążenie promieniowe: $F_r = 1,45$ kN
 - ▶ maks. obciążenie osiowe: $F_a = 11,5$ kN
 - ▶ szacowana temperatura pracy: $T = +85^\circ\text{C}$ ($+185^\circ\text{F}$)
 - ▶ Zgodnie z normami przemysłowymi dla pomp, trwałość nominalna podstawowa L_{10h} powinna wynosić co najmniej 16 000 godzin w warunkach obciążenia maksymalnego.



Przykład - pompa odśrodkowa

- ▶ Dane warunki pracy oraz wpływ zmęczenia powierzchni styku tocznego nakazują wyznaczyć rozmiar łożyska z zastosowaniem trwałości nominalnej podstawowej i trwałości nominalnej według SKF.

- ▶ **Trwałość nominalna podstawowa**

$$L_{10h} = \left(\frac{10^6}{60 n} \right) \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

- ▶ $P = F_r$. A zatem stosunek obciążeń $C/P = 156/3,29 = 47$

$$L_{10h} = \left(\frac{10^6}{60 \times 3\,000} \right) \left(\frac{156}{3,29} \right)^{3,33} > 1\,000\,000 \text{ h}$$

- ▶ Łożysko jest więc przewymiarowane.

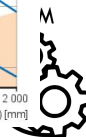
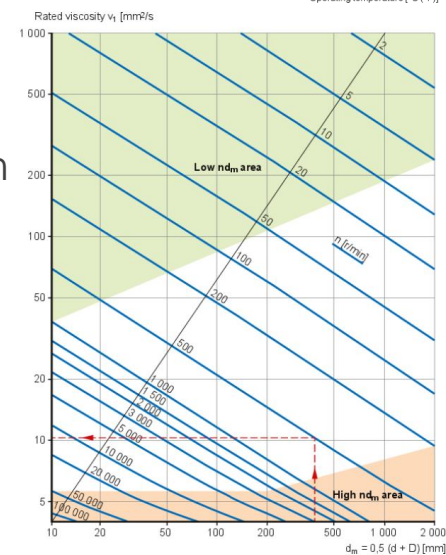
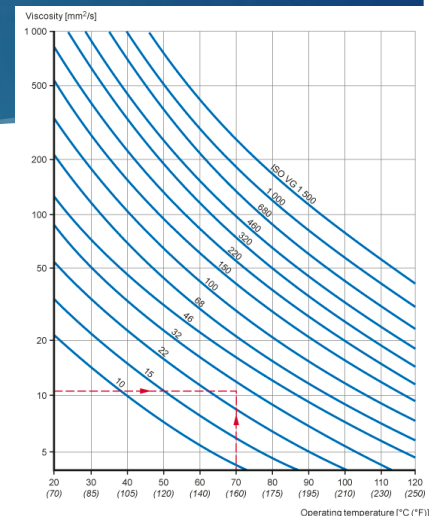
Przykład - pompa odśrodkkowa

1. Warunki smarowania – stosunek lepkości, $\kappa = \nu/\nu_1$

- ▶ Dane: klasa lepkości oleju = ISO VG 68,
 - ▶ temperatura pracy = +70°C (+160°F)
 - ▶ zatem, z wykresu 1, $\nu = 20 \text{ mm}^2/\text{s}$
- ▶ Dane: $n = 3\,000 \text{ obr}/\text{min}$, $d_m = 0,5 (55 + 120) = 87,5 \text{ mm}$
 - ▶ zatem, z wykresu 2, $\nu_1 = 7 \text{ mm}^2/\text{s}$
 - ▶ A zatem $\kappa = 20/7 = 2,8$

2. Wskaźnik stopnia czystości, η_c

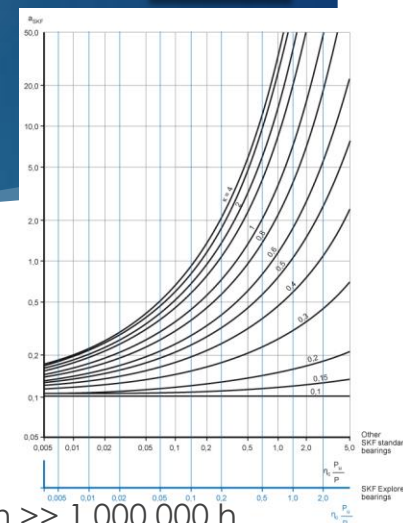
- ▶ Dane: warunki zanieczyszczenia są typowe, $d_m = 87,5 \text{ mm}$
 - ▶ zatem, z tabeli klasy czystości, $\eta_c = 0,2$
- ▶ Dane: $P_u = 18,6$
 - ▶ $P = Fr = 3,29$ (→ Obciążenia)
 - ▶ zatem $\eta_c P_u/P = 0,2 \times 18,6 / 3,29 = 1,13$



Przykład - pompa odśrodkowa

3. Współczynnik modyfikacji trwałości SKF, a_{SKF}

- ▶ Dane: $\kappa = 2,8$, $\eta_c P_u/P = 1,13$
 - ▶ NU 311 ECP jest łożyskiem klasy SKF Explorer, zatem, z wykresu 3, $a_{SKF} = 50$
- ▶ Dane:
 - ▶ dolna granica $10h > 1\ 000\ 000\ h$, zatem $L_{10mh} > 50 \times 1\ 000\ 000\ h$, zatem $L_{10mh} \gg 1\ 000\ 000\ h$
 - ▶ wskazuje, że łożysko jest przewymiarowane wobec przewidzianych warunków pracy.



Obciążenie minimalne

- ▶ Dane: $d_m = 87,5\ mm$, $kr = 0,15$ $n = 3\ 000$ $n_r = 6\ 000$
 - ▶ zatem: $F_{rm} = 0,94\ kN < F_r = 3,29\ kN$
 - ▶ Wniosek: łożysko jest przewymiarowane / nieznacznie obciążone. Wobec tego istnieją następujące opcje:
 - ▶ Można w dalszym ciągu użyć dotychczasowego łożyska. Nie ma ryzyka, że łożysko ulegnie uszkodzeniu z powodu niedostatecznego obciążenia.
 - ▶ Można użyć mniejszego łożyska i tym samym obniżyć ponoszone koszty
 - ▶ Zachowaj dotychczasową średnicę wału, ale użyj mniejszego łożyska serii NU 2.
 - ▶ Zmniejsz średnicę wału o jeden stopień, o ile pozwala na to konstrukcja wału.

Ciekawe maszyny

- <https://youtu.be/KQlhtOdSgWg>
- <https://youtu.be/W7kG6WAPQbl>
- <https://youtu.be/19duYMdiXi0>