



# Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Praca Przejściowa Inżynierska



Analiza rozwiązań konstrukcyjnych  
łożyskowania w silnikach turbinowych

**Maciej Stępień**

Numer albumu 304299

Promotor

dr hab. inż. Jan Kindracki, prof. uczelni

WARSZAWA 8 maja 2023

# Spis treści

<b>1. Wstęp</b>	3
<b>2. Rodzaje łożysk</b>	3
2.1. Budowa łożyska tocznego	4
2.2. Łożyska kulkowe skośne jednorzędowe	5
2.2.1. Łożyska jednokierunkowe	5
2.2.2. Łożyska dwukierunkowe	5
2.3. Łożyska wałeczkowe	6
2.4. Łożyska stożkowe	7
2.5. Łożyska powietrzne foliowe	8
2.6. Łożyska magnetyczne	9
2.6.1. Zasada działania	10
2.6.2. Wady i zalety	10
<b>3. Konfiguracje łożysk i przykłady zastosowań</b>	13
3.1. RR Trent 1000	14
3.2. PW 1000	14
3.3. CFM56	15
<b>4. Technologia materiałowa</b>	16
4.1. Stale hartowane	19
4.1.1. Stale hartowane wtórnie	19
4.1.2. Stale o podwyższonej wytrzymałości	19
4.1.3. Stale hartowane metodą „Duplex”	20
4.2. Stale proszkowe	20
4.3. Wytapianie stali	21
4.3.1. Stale wytapiane próżniowo (pojedynczo)	21
4.3.2. Stale podwójnie wytapiane próżniowo	22
4.3.3. Stale potrójnie wytapiane próżniowo	22
<b>5. Zintegrowanie konstrukcji</b>	22
<b>6. Tłumienie drgań</b>	24
6.1. Tłumiki olejowe	24
6.2. Tłumiki mechaniczne	25
<b>Bibliografia</b>	27

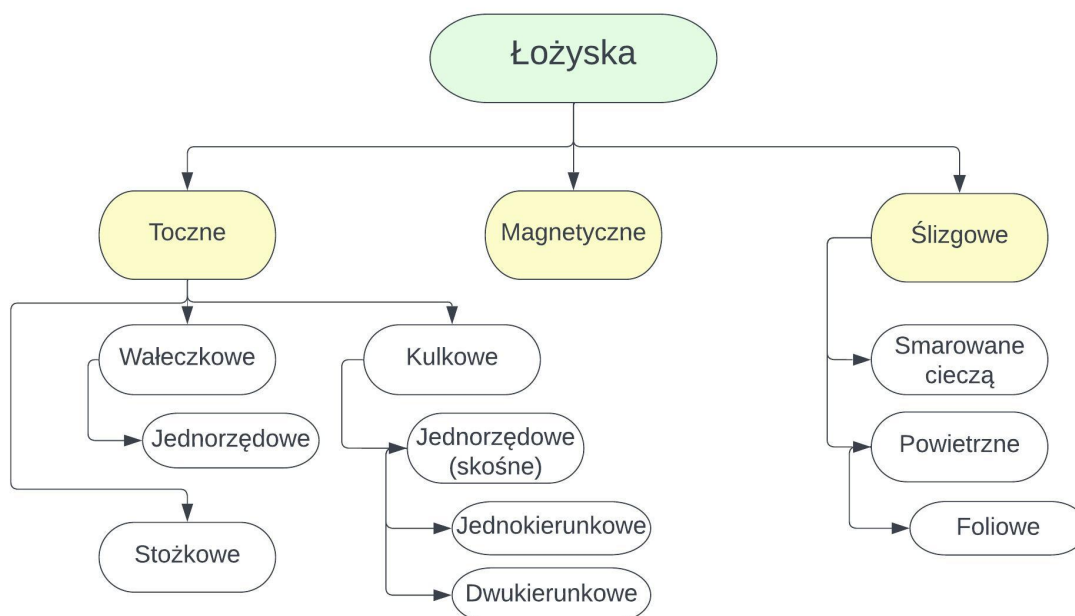
# 1. Wstęp

Łożyskowanie jest fundamentalnym elementem konstrukcji silników turbinowych. Kluczowe elementy silnika takie jak wirnik i przymocowane do niego łopatki muszą być stabilnie utrzymywane na swoich pozycjach, zapewniając precyzję rzędu dziesiątych części milimetra, jednocześnie umożliwiając ich swobodne obracanie się z minimalnym tarcie. Bez odpowiedniego łożyskowania, wibracje i tarcie między elementami mogą prowadzić do nieprawidłowej pracy silnika, a w konsekwencji nawet i do jego zniszczenia.

W silnikach turbinowych stosuje się różne rozwiązania łożyskowania, w zależności od wymagań dotyczących obciążeń, prędkości obrotowych czy temperatury użytkowania. Dlatego analiza rozwiązań konstrukcyjnych łożyskowania w silnikach turbinowych jest kluczowa dla zapewnienia niezawodności i wydajności silnika. Niniejsza praca skupi się na przeprowadzeniu analizy rozwiązań konstrukcyjnych łożyskowania w silnikach turbinowych, w celu określenia ich wad i zalet oraz wpływu na parametry pracy silnika.

## 2. Rodzaje łożysk

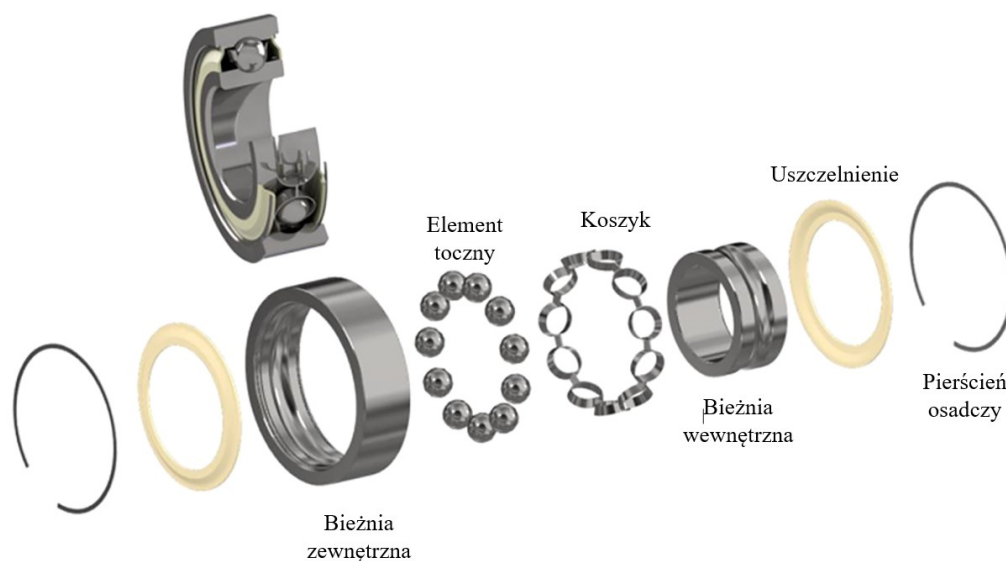
Na rysunku poniżej przedstawiona została klasyfikacja łożysk najczęściej stosowanych w silnikach turbinowych lub rozwijanych pod kątem takich właśnie zastosowań. Zdecydowana większość aktualnie stosowanych rozwiązań wykorzystuje łożyska toczne.



**Rysunek 2.1.** Klasyfikacja łożysk używanych w turbinowych silnikach lotniczych

### 2.1. Budowa łożyska tocznego

- (a) **Pierścień zewnętrzny:** Jest to większy spośród dwóch koncentrycznych pierścieni i w większości zastosowań jest przymocowany do nieruchomego elementu (obudowy) układu mechanicznego. Jest on wyposażony w bieżnię (rowek), który jest zasadniczo obrobiony w średnicy wewnętrznej w celu prowadzenia elementów tocznych.
- (b) **Pierścień wewnętrzny:** Jest mniejszym wśród dwóch pierścieni koncentrycznych i w większości zastosowań jest przymocowany do elementu obrotowego (wału). Podobnie jak w przypadku bieżni zewnętrznej, jest on również wyposażony w bieżnię na średnicy zewnętrznej.
- (c) **Element toczny:** Zestaw kulek lub rolek jest umieszczony pomiędzy dwiema bieżniami łożyska i każda kulka/rolka obraca się na własnej osi podczas obrotu wokół osi łożyska. Te elementy toczne stanowią drogę przenoszenia obciążeń pomiędzy dwoma pierścieniami i są najbardziej krytycznymi elementami w łożysku tocznym.
- (d) **Koszyk:** Główną funkcją koszyka jest zapewnienie równomiernego kąтового rozstawu elementów tocznych, tak aby nastąpił właściwy rozkład obciążenia między nimi. Innym ważnym aspektem jest to, że koszyk zapobiega ocieraniu się o siebie dwóch sąsiednich kulek, co w przeciwnym razie może skutkować większym tarcieniem i zużyciem. Kosze łożysk wirników głównych wykonywane są z mosiądzu, stopu aluminium lub stali łożyskowej z pokryciem zmniejszającym współczynnik tarcia np. warstwą srebra i centrowane są na bieżni wewnętrznej lub zewnętrznej.
- (e) **Uszczelnienia/osłony:** Uniemożliwiają przedostanie się zanieczyszczeń zewnętrznych do łożyska podczas pracy, a także pomagają w zatrzymaniu środka smarnego w łożysku. Oba te aspekty mają kluczowe znaczenie dla żywotności łożyska.[1]



**Rysunek 2.2.** Budowa łożyska

## 2.2. Łożyska kulkowe skośne jednorzędowe

Łożyska kulkowe skośne mają bieżnie w pierścieniu wewnętrznym i zewnętrznym przemieszczone względem siebie w kierunku osi łożyska. Oznacza to, że są zaprojektowane do przenoszenia obciążeń złożonych, tj. jednocześnie działających obciążeń promieniowych i osiowych.

Zdolność łożysk kulkowych skośnych do przenoszenia obciążeń osiowych zwiększa się wraz ze wzrostem kąta działania łożyska. Kąt działania jest zdefiniowany jako kąt zawarty między linią przechodzącą przez punkty styku kulki z bieżniami w płaszczyźnie promieniowej, wzdłuż której obciążenie jest przenoszone pomiędzy bieżniami, a linią prostopadłą do osi łożyska.

### 2.2.1. Łożyska jednokierunkowe

Łożyska kulkowe skośne jednorzędowe mogą przenosić obciążenia osiowe tylko w jednym kierunku. Łożysko jednorzędowe zazwyczaj jest nastawiane w stosunku do drugiego łożyska. Łożyska te są nierozłączne, a ich pierścienie posiadają jedno wysokie i jedno niskie obrzeże. Dzięki niskiemu obrzeżu można zmieścić w łożysku wiele kulek, co pozwala uzyskać stosunkowo dużą zdolność przenoszenia obciążeń.

Zdolność do przenoszeń obciążeń osiowych tylko w jednym kierunku wiąże się z faktem, że do prawidłowej pracy łożyska konieczne jest jego „dociśnięcie”, aby zapewnić dobry styk między elementami tocznymi i bieżniami. Zazwyczaj łożyska te pracują w parach. W nowoczesnych silnikach turbowentylatorowych takie łożyska nie mają zastosowania. Przykładem zastosowania jest silnik TRS-18.



**Rysunek 2.3.** Łożysko kulkowe jednorzędowe jednokierunkowe skośne

### 2.2.2. Łożyska dwukierunkowe

Łożyska kulkowe skośne jednorzędowe dwukierunkowe (łożyska kulkowe o styku czteropunktowym) są poprzecznymi łożyskami kulkowymi skośnymi jednorzędowymi

z bieżniami zaprojektowanymi do przenoszenia obciążeń osiowych w obu kierunkach. Przy określonym obciążeniu osiowym może być przenoszone ograniczone obciążenie promieniowe. Łożyska te zajmują znacznie mniej miejsca w kierunku osiowym niż łożyska dwurzędowe. Pierścień wewnętrzny jest dzielony. Pozwala to na umieszczenie w łożysku dużej liczby kulek, dzięki czemu łożysko ma wysoką nośność. Łożyska są rozłączne, tj. pierścień zewnętrzny z zespołem koszyka z kulkami można zamontować niezależnie od obu połówek pierścienia wewnętrznego. Dodatkowo, konstrukcja oddzielna pozwala użytkownikowi na rozebranie łożyska w celu sprawdzenia jego komponentów przed i po eksploatacji, co jest standardową praktyką stosowaną w przypadku wielu krytycznych mechanizmów lotniczych podczas inspekcji naziemnej.

Inną zaletą jest to, że projekt łożysk skośnych pozwala na użycie jednoczęściowych koszyków (wytwarzanych z jednego kawałka materiału) co jest korzystne z dwóch powodów: pozwala to na wyższą prędkość pracy niż w przypadku koszyków nitowanych z dwóch części, a także pomaga minimalizować siły nie zrównoważenia koszyków zmniejszając zużycie w aplikacjach o długim okresie eksploatacji.

Obecnie są to najczęściej stosowane łożyska przenoszące siły osiowe w silnikach turbinowych.



**Rysunek 2.4.** Łożysko kulkowe jednorzędowe dwukierunkowe skośne

### 2.3. Łożyska wałeczkowe

Łożyska te mają szersze rowki w bieżniach niż łożyska kulkowe, aby pomieścić wałeczki. Mają one również większą nośność niż łożyska kulkowe, ponieważ wałeczki są elementami lepiej przenoszącymi obciążenie. Kontakt styku wałeczka z bieżnią to linia, w przeciwieństwie do punktu w przypadku łożysk kulkowych. Zdolność tych łożysk do osiągnięcia prędkości jest mniejsza niż łożysk kulkowych i są one stosowane w układach, w których muszą być przenoszone duże obciążenia promieniowe, przekraczające ograniczenia łożysk kulkowych. Projektanci powinni również wziąć pod uwagę fakt, że łożyska te są podatne na poślizg pomiędzy wałeczkami i bieżniami, a warunki eksploatacji nie mogą

wywoływać tego zjawiska, ponieważ może ono prowadzić do degradacji łożysk. Łożyska wałeczkowe mogą przenosić tylko obciążenia promieniowe i większość układów wałów, w których zastosowano te łożyska, będzie miała inne łożysko (najczęściej łożysko) do przenoszenia obciążeń osiowych. Kluczową zaletą tych łożysk jest to, że pozwalają na osiowe przesuwanie wałów, dzięki czemu rozszerzanie/skręcanie termiczne wałów nie powoduje naprężeń w łożyskach, co jest krytyczne w niektórych konstrukcjach turbopomp o większej długości wałów lub konstrukcji wałów silników turbinowych. Nie mogą one przyjąć niewspółosiowości wału. [1]



**Rysunek 2.5.** Łożysko wałeczkowe

### 2.4. Łożyska stożkowe

Łożyska stożkowe składają się z dwóch stożkowych bieżni: zewnętrznej i wewnętrznej, pomiędzy którymi mieszczą się stożkowe wałki. Łożyska te są w stanie przenosić obciążenia osiowe oraz promieniowe. W łożyskach stożkowych, podobnie jak w innych łożyskach tocznych, występują duże siły ściskające, które zapobiegają poślizgowi między bieżnią a wałkiem. Przenoszą obciążenia promieniowe gorzej niż łożyska wałeczkowe i podobnie jak one nie są odporne na niewspółosiowość wału.

Łożyska stożkowe znajdują szerokie zastosowanie w łożyskowaniu wałów napędów pomocniczych w silnikach turbinowych, rzadziej jako łożyska wałów głównych.



**Rysunek 2.6.** Łożysko stożkowe

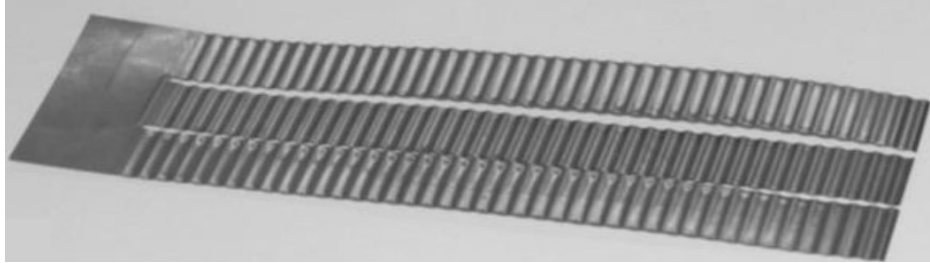
### 2.5. Łożyska powietrzne foliowe

Technologia gazowych łożysk foliowych opracowana została już w 1960 roku na potrzeby dużych wartości prędkości obrotowych w konstrukcjach turbosprężarek silników wysokoprężnych, pomocniczych jednostek mocy w statkach powietrznych (APU) oraz wybranych sekcji silników turbinowych. Łożyska gazowe mogą działać często tam, gdzie konwencjonalne łożyska smarowane olejem się nie sprawdzają. Wynika to najczęściej ze zbyt dużej sztywności, zbyt dużej prędkości obrotowej oraz wymagań termicznych. Ogólnie rzecz biorąc istnieje przekonanie wśród producentów wszelkiego rodzaju urządzeń technicznych takich jak turbosprężarki, turbogeneratory, silniki turbinowe, wrzeciona itp. że gazowe łożyska foliowe wiążą się ze zbyt dużym ryzykiem w przypadku podjęcia próby ich wdrożenia w nowych zastosowaniach. Tymczasem naukowcy przeprowadzili szereg bardzo rozległych badań, które miały na celu wykazanie ich przewagi w stosunku do konwencjonalnych łożysk na wielu płaszczyznach zastosowania, szczególnie do turbosprężarek bezolejowych i małych turbin gazowych. Poza tym istnieje wiele metod mających na celu przewidywanie czasu poprawnej pracy urządzeń – chociażby na podstawie monitorowanych parametrów diagnostycznych.

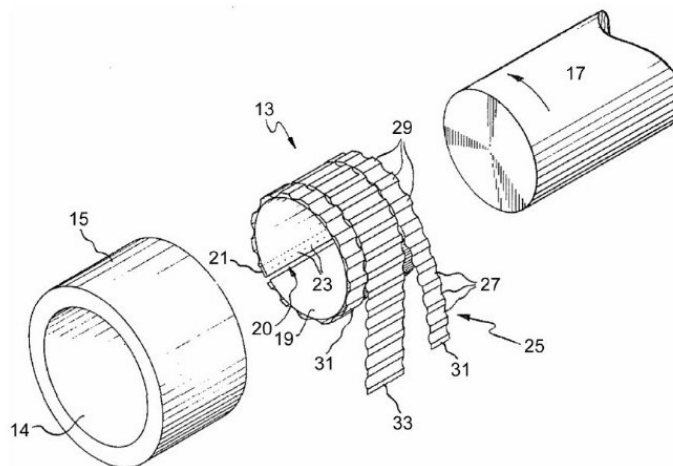
Śledząc dokonania naukowców w dziedzinie łożysk gazowych można stwierdzić, że do tej pory ukształtowały się trzy generacje gazowych łożysk foliowych. Projekty generacji I charakteryzują się stosunkowo prostymi elementami podatnymi takimi jak folie w panewkach łożysk. Charakteryzują się one zazwyczaj jednolitymi właściwościami sztywności. Niestety takie łożyska gazowe wykazują, w stosunku do sztywnych łożysk gazowych tej samej wielkości (bez elementów podatnych), podobną nośność. Łożyska foliowe II generacji wyposażone są w bardziej złożoną elastyczną podstawę (rysunek 2.7), w której sztywność jest dostosowana do jednego kierunku np. osiowego. Jest to działanie mające na celu do-



stosowanie panewki do środowiska, w którym pracuje. Dotyczy to w szczególności korekcji niewspółosiowości, bądź zapobiegania wycieku płynu na krawędziach folii. Generacja II łożysk foliowych wykazuje nośność około dwukrotnie większą niż rozwiązania I generacji. Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne zostało przedstawione na rysunku 2.8.



**Rysunek 2.7.** Przykładowa folia ukształtowana do gazowego łożyska foliowego generacji II



**Rysunek 2.8.** Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne łożyska foliowego

Gazowe łożyska foliowe trzeciej generacji, składają się z zaawansowanych, bardzo złożonych elastycznych podstaw foliowych, które posiadają sztywność dopasowaną w dwóch kierunkach (często osiowo i promieniowo). Ten poziom projektowania elastyczności folii nośnych łożyska umożliwia kontrolowanie efektów krawędziowych oraz zoptymalizowanie sztywności łożyska dla różnych obciążeń. Gazowe łożyska foliowe III generacji okazały się mieć nośność trzy do czterech razy większą niż łożyska I generacji.[2]

## 2.6. Łożyska magnetyczne

Aktywne łożysko magnetyczne to podpora wirnika, która wykorzystuje siłę magnetyczną do utrzymania wirnika w miejscu, w przeciwieństwie do sił działających w łożysku tocznym lub powietrznym. Podobnie jak inne rodzaje łożysk, łożysko magnetyczne można scharakteryzować pod względem sztywności, tłumienia i nośności, a zatem siły nadające te właściwości są w pewnym sensie analogiczne dla każdego łożyska.



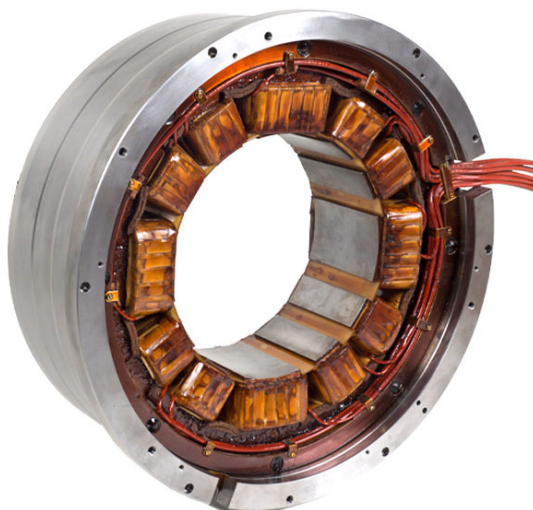
**Rysunek 2.9.** Zamontowane łożysko foliowe

### 2.6.1. Zasada działania

Jak pokazano na rysunku 2.11, łożysko magnetyczne składa się z wielu cewek elektromagnetycznych przymocowanych do ferromagnetycznego stojana. Cewki są tak rozmieszczone, że przeciwległe bieguny sąsiadują ze sobą, maksymalizując strumień magnetyczny przechodzący przez wirnik. Ferromagnetyczny, laminowany „stos” wirnika jest przymocowany do wału, aby zapewnić ścieżkę strumienia i przyciągające siły magnetyczne przy jednoczesnym zminimalizowaniu tworzenia się prądów wirowych. Owy „stos” to w istocie seria ułożonych na sobie blaszek, pomiędzy którymi umieszczone są cienkie warstwy izolacyjne. Czujniki położenia są zamocowane w pewnej odległości od wału. Napięcie wyjściowe z czujników położenia przekazuje informacje o położeniu do sterownika mikroprocesorowego, który wykorzystuje te informacje do wytworzenia sygnału sterującego. Sygnał sterujący jest konwertowany do pożądanego natężenia przez wzmacniacze i przekazywany do cewek magnetycznych, zapewniając przyciąganie siły magnetycznej do wirnika. Zazwyczaj algorytmy sterowania traktują system wspomagania wirnika jako interakcję masa/sprężystość/tłumik na dwóch osiach, zwykle pionowej i poziomej. Sterownik wysyła sygnały proporcjonalne do przemieszczenia wału od środka.

### 2.6.2. Wady i zalety

Zastosowanie łożyska magnetycznego w silnikach turbinowych daje trzy główne korzyści technologiczne: bezolejową pracę bez zapotrzebowania na powietrze, możliwość pracy w ekstremalnych temperaturach i aktywne sterowanie. Z tych zalet wynika piętrząca się lista poświadczonych ulepszeń silnika turbinowego. Obejmują one zmniejszony ciężar; brak kontaktu z łożyskami, brak zużycia i mniejsze wymagania konserwacyjne; pracę na dużych wysokościach; umieszczenie łożyska w gorącym sektorze silnika; krótsze, grubsze



**Rysunek 2.10.** Łożysko magnetyczne

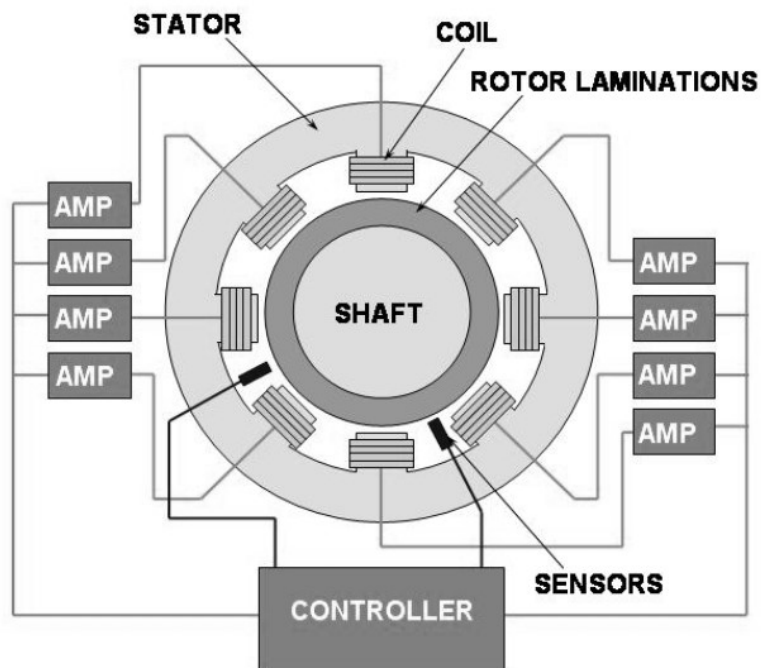
i wysoce tłumione wały; kontrolę luzu wierzchołka łopatki; kontrolę niewyważenia wału; oraz dynamiczną sztywność i tłumienie.

Łożysko magnetyczne umożliwia również zastosowanie technologii integralnego rozrusznika-generatora (ISG), która mogłaby zastąpić konwencjonalny generator napędzany poprzez przekładnię przez wał główny i co za tym idzie kolejne potrzeby smarowania i chłodzenia, nie wspominając o dodatkowym skomplikowanym układzie.

Rys. 2.12 przedstawia porównanie trzech typów łożysk pod względem określonych cech "czynnika ograniczającego". Łożyska toczne, powietrzne foliowe i magnetyczne mają realne zastosowanie w silnikach turbin gazowych w zależności od rozmiaru, prędkości i pożądanych inteligentnych możliwości.

Niekwestionowaną zaletą łożysk tocznych natomiast jest ich dogłębne zrozumienie, a także fakt, że oferują znacznie większą nośność w odniesieniu do powierzchni tulei łożyskowej. Niestety, łożyska toczne są w dniu dzisiejszym bardzo blisko swojego limitu technologicznego w zakresie temperatury i DN, lub już go osiągnęły i mają stosunkowo krótką żywotność przy większych obciążeniach. Niewykluczone jest, że aby silniki mogły pracować goręcej i szybciej z długą żywotnością, muszą ostatecznie zostać przeprojekowane wokół łożysk foliowych (powietrznych) lub łożysk magnetycznych.

Różne charakterystyki nośności łożysk foliowych i magnetycznych oferują możliwość zastosowania ich w odrębnych zakresach pracy silnika. Łożyska magnetyczne lepiej nadają się do dużych silników pracujących przy dużych obciążeniach i stosunkowo (w porównaniu z łożyskiem foliowym) niższych prędkościach obrotowych. Łożyska foliowe powietrzne z kolei nie wykazują dużej nośności przy niższych prędkościach obrotowych, a także, obecnie, nie zostały zademonstrowane w wielkości odpowiedniej dla dużych silników.



**Rysunek 2.11.** Budowa łożyska magnetycznego

Istnieją trzy często wymieniane wady obecnej technologii łożysk magnetycznych, które są określane jako podstawowe:

1. Brak realnej technologii łożysk rezerwowych – jak zaprojektować system odporny na awarię łożyska magnetycznego
2. Niewystarczające odprowadzanie ciepła z łożyska
3. Braki w zakresie nośności i sztywności dynamicznej

Sposoby na przeciwdziałanie owym wadom są obecnie rozwijane i niewykluczone, że w najbliższej przyszłości zastosowanie łożysk magnetycznych rozszerzy się o sektor lotniczy.[3]

	Rolling Element	Foil Bearings	Magnetic Bearings
<b>Max Operating Temp.</b>	350–500 °F (180–260 °C)	1200 °F (650 °C) *Ref (2)	1000 °F (540 °C) *Ref (4)
<b>Documented Operating Speed (DN) (Speed*ID)</b>	Less than 2 million DN (RPM*mm)	2 million DN (2" dia.) *Ref (2) *theoretically limit is unknown	2.25 million DN (3" dia.) *Ref (5) *theoretically limit is unknown
<b>Documented Load Capacity</b>	Varies: wear, heating, lube breakdown Highest load capacity per square inch (~300 psi)	Proportional to rotation speed 0 to ~1000 lbs (4" dia.) max range for largest bearing size (~100 psi) *Ref (2,3)	For entire speed and temperature range 1000 lb/axis (116 psi) (3" dia.) *Ref (4,5)
<b>Energy/Power Consumption</b>	6-8 kW @12krpm 7-11 kW @ 17krpm (4.7" dia) *Ref (7)	No data	2.1 kW @ 1000 °F, all speeds *Ref (4,6)

**Rysunek 2.12.** Porównanie właściwości łożysk konwencjonalnych, foliowych i magnetycznych

### 3. Konfiguracje łożysk i przykłady zastosowań

W większości silników lotniczych turbinowych, każdy wał jest podparty na dwóch lub trzech łożyskach. Jedna z tych podpór musi być podporą nieprzesuwną osiowo – czyli łożyskiem (lub parą łożysk) przenoszącym siły osiowe.

Zastosowanie pojedynczych kulkowych łożysk wzdłużnych wału głównego zamiast par tandemowych poprawia łatwość konserwacji, zmniejsza złożoność silnika, koszty i częstotliwość uszkodzeń spowodowanych poślizgiem. Pojedyncze łożysko pozwala na zastosowanie systemu równoważenia oporu, który obniża minimalne obciążenie potrzebne do zapobiegania poślizgowi łożyska. Pozwala to na odpowiednie zmniejszenie maksymalnego obciążenia przenoszonego przez łożysko. W niektórych konstrukcjach, takich jak silnik JT9D, redukcja ta może być tak duża, że trwałość zmęczeniowa jest większa niż w przypadku pary łożysk. [4]

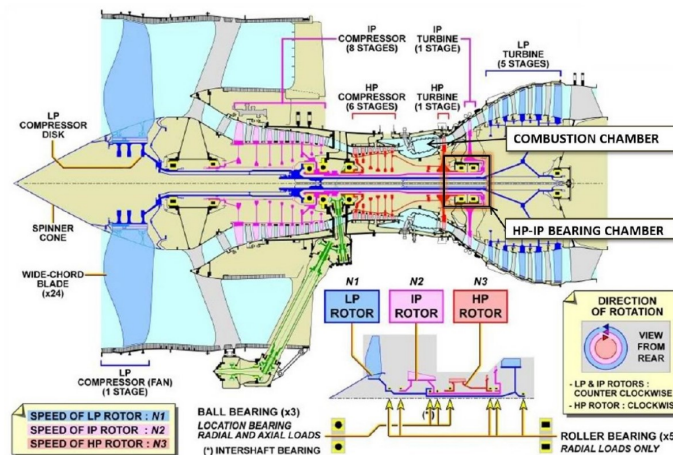
Z tych względów, najczęściej stosowanymi łożyskami odbierającymi siłę osiową w nowoczesnych silnikach jest łożysko kulkowe skośne dwustronne (najczęściej z dzieloną dolną bieżnią). Niekiedy stosowane są również łożyska stożkowe.

Ze względu na rozszerzalność termiczną komponentów silnika podczas pracy, wał nie może być umieszczony na dwóch podporach nieprzesuwnych. Konsekwentnie, reszta podpór to łożyska wałeczkowe, zapewniające swobodę ruchu osiowego.

Poniżej przedstawione zostały konfiguracje łożyskowe niektórych silników turbowentylatorowych.

#### 3.1. RR Trent 1000

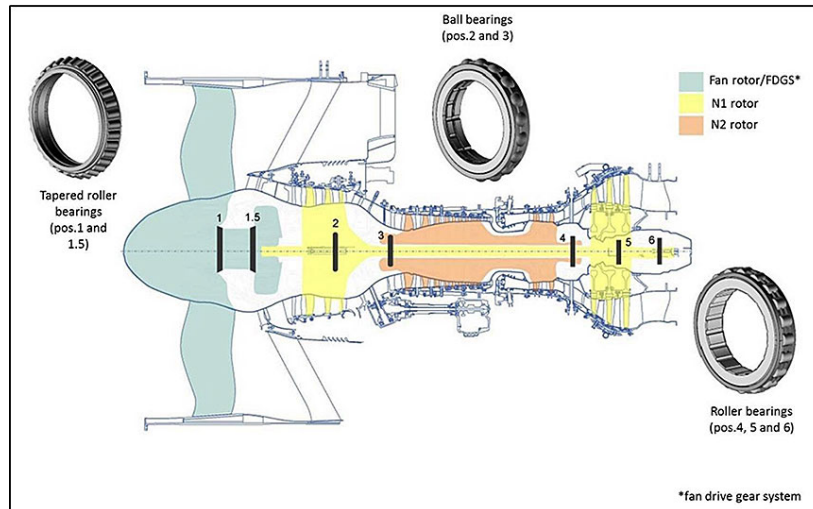
Konfiguracja silnika Trent 1000 jest nietypowa w stosunku do swoich konkurentów ze względu na fakt posiadania trzech wałów. Z tego względu silnik ten posiada 3 łożyska kulkowe (po jednym na każdy wał). Dodatkowo wał wysokiego ciśnienia wspierany jest na jednym łożysku wałeczkowym, a wał średniego i niskiego ciśnienia na dwóch łożyskach wałeczkowych.[5]



**Rysunek 3.1.** Konfiguracja łożyskowania silnika Rolls Royce Trent 1000

#### 3.2. PW 1000

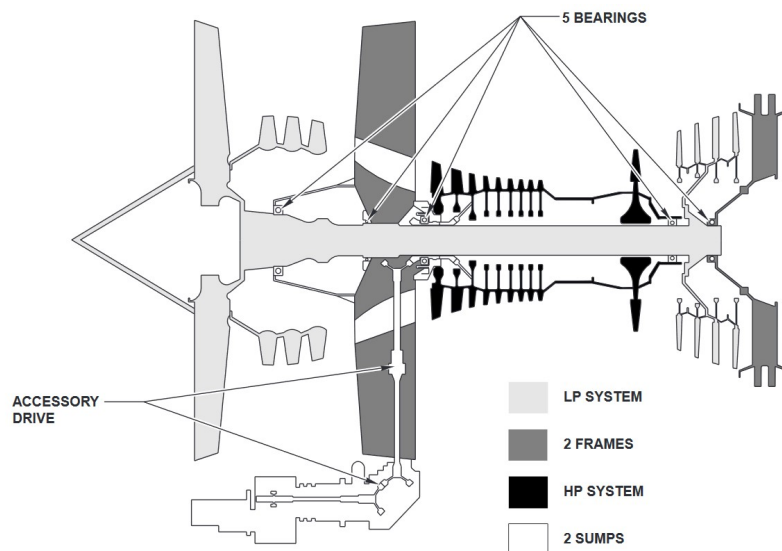
Przykładem silnika, w którym użyto łożysk stożkowych jest rodzina silników PW1000. Silnik dwuwałowy z przekładnią korzysta z dwóch łożysk kulkowych (po jednym na wał) oraz z jednego łożyska wałeczkowego użytego do podtrzymania wału wysokiego ciśnienia, dwóch łożysk wałeczkowych podtrzymujących wał niskiego ciśnienia, a także łożyska stożkowego do podtrzymania wału wentylatora (na który przekazywany jest moment z wału niskiego ciśnienia poprzez przekładnię planetarną).[6]



**Rysunek 3.2.** Konfiguracja łożyskowania silnika Pratt & Whitney PW 1000

#### 3.3. CFM56

Silnik CFM56 bez wątpienia można nazwać najbardziej „klasycznym” silnikiem spośród do tej pory wymienionych pod względem łożyskowania. Dwuwałowa konstrukcja, której wał wysokiego ciśnienia wspierany jest na łożysku kulkowym oraz wałeczkowym, wał niskiego ciśnienia wspierany jest na jednym łożysku kulkowym i na dwóch wałeczkowych. [7]

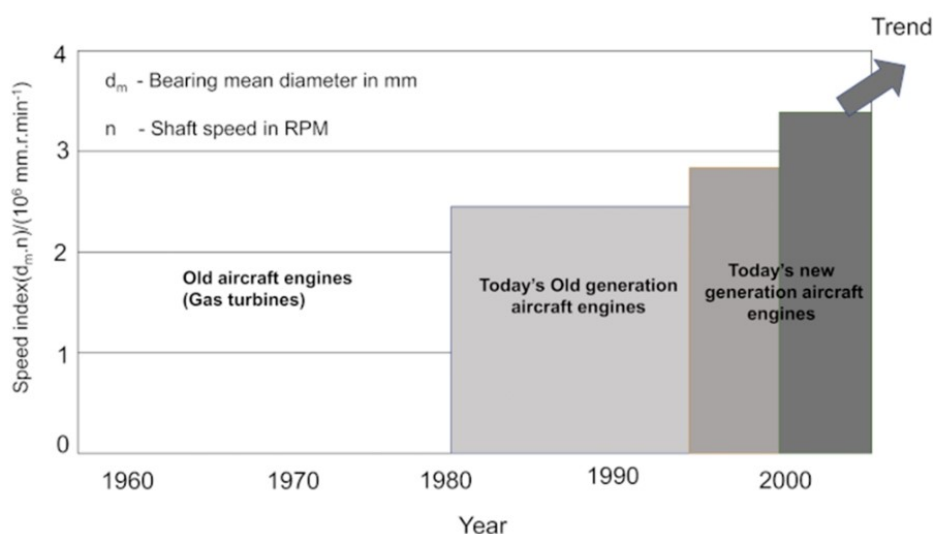


**Rysunek 3.3.** Konfiguracja łożyskowania silnika CFM56-5A



## 4. Technologia materiałowa

Łożyska wałów głównych silników lotniczych reprezentują najnowocześniejsze rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe, ale wymagania związane z tymi łożyskami mają bezpośrednie znaczenie również dla innych krytycznych zastosowań łożysk. Jak widać na rys. 4.1, prędkości obrotowe wałów silników lotniczych (charakteryzowane przez wskaźnik prędkości łożyska ( $d_m \cdot n$ ), który jest średnią średnicą łożyska  $d_m$  w [mm] pomnożoną przez prędkość obrotową wału  $n$  w [r/min]) stale rosły wraz z upływem czasu i nie ma powodu, by sądzić, że tendencja ta nie utrzyma się w przyszłości, aby jeszcze bardziej poprawić osiągi, niezawodność i ekonomię przyszłych silników lotniczych.



**Rysunek 4.1.** DN w łożyskach silników turbinowych na przestrzeni lat

We wczesnych latach czterdziestych XX wieku łożyska samolotów były wykonywane ze stali wysokochromowej (SAE 52100), która była pierwszym gatunkiem stali opracowanym komercyjnie dla łożysk i nadal jest najczęściej stosowanym materiałem do produkcji łożysk. W tym okresie łożyska były często wymieniane w silnikach, aby uniknąć awarii i należy zauważyć, że warunki pracy łożysk, takie jak prędkość i temperatura, mieściły się w granicach właściwości materiału SAE 52100. W późniejszych etapach opracowano i wdrożono do zastosowań w łożyskach lotniczych również gatunki stali odporne na korozję, takie jak AISI 440C i BG42. Jednak wraz z rozwojem technologii silników lotniczych w kierunku silników o większym ciągu i lepszej wydajności, oprócz prędkości zaczęły wzrastać także temperatury pracy, a łożyska musiały sprostać tym wymaganiom. Aby tak się stało, w latach 60-tych wprowadzono rodzinę stali narzędziowych na bazie molibdenu, takich jak AISI M50 (AMS 6491), która mogła zachować wystarczającą twardość i wytrzymałość do 315 ° C, i dalej rozwijano je do zastosowań w łożyskach silników turbin lotniczych. Do dziś materiał M50, po obróbce hartowania, jest najczęściej stosowaną stalą do łożysk silników lotniczych.



Wyższe wartości współczynnika DN wskazują na siły odśrodkowe działające na elementy łożyska. Siły odśrodkowe zwiększają naprężenia obwodowe na pierścieniach łożysk, a obecność naprężeń rozciągających prowadzi do inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych, co z kolei prowadzi do przedwczesnych awarii. Aby rozwiązać ten problem, w latach 80, opracowano i wprowadzono stale nawęglane, takie jak M50NiL (AMS 6278). Skład materiału M50NiL oparty jest na stopie M50, ale ma obniżoną zawartość węgla (0,12%) i zmodyfikowaną zawartość niklu (3%, 5%). M50NiL jest gatunkiem do nawęglania, który charakteryzuje się twardą warstwą zewnętrzną odporną na zmęczenie i zużycie oraz ciągliwy (z ang. ductile) rdzeń. Przy odpowiednim nawęgleniu i obróbce cieplnej M50NiL tworzy szczątkowe naprężenia ściskające ( 400 MPa ) w obudowie co zwiększa prędkość i żywotność. Warstwy powierzchniowe pierścieni łożyska są krytycznymi strefami zmęczenia.

Dzięki nowym opracowaniom materiałowym możliwe stało się pokonanie barier wydajności i znaczne zwiększenie możliwości eksploatacyjnych łożysk tocznych w zastosowaniach lotniczych.

Korozja łożysk została zdiagnozowana jako jedna z głównych przyczyn przedwczesnych awarii łożysk w wielu zastosowaniach lotniczych, w szczególności w silnikach lotniczych. Co więcej, nowe oleje wysokotemperaturowe opracowywane właśnie dla przyszłych silników lotniczych powodowały korozję dominujących ówczesznie stali łożyskowych, takich jak 52100, M50 i M50NiL. Aby osiągnąć zwiększoną trwałość i niezawodność, a nawet cel projektu łożyska, które nie wymagałoby wymian ani napraw w czasie eksploatacji silnika, należało zminimalizować lub całkowicie wyeliminować wszystkie możliwe rodzaje awarii, czyli również korozję. Klasyczne „nierdzewne” stale łożyskowe, takie jak AISI 440C, BG42 oferują pewną odporność na korozję, ale ich możliwości zmęczeniowe są niewystarczające ze względu na niekorzystną mikrostrukturę z dużymi węglkami i rozwarstwieniami węglików na granicach ziaren. Dlatego materiały te są używane tylko w bardzo ograniczonej liczbie zastosowań w łożyskach lotniczych.

Najnowsze osiągnięcia koncentrują się na ulepszonych, odpornych na korozję stalach łożyskowych, oferujących zwiększoną trwałość zmęczeniową. Dużym sukcesem jest Cronidur 30 (AMS 5898), unikalna, azotowa, stopowa stal martenzytyczna. Cronidur 30 oferuje doskonałą odporność na korozję, dobrą twardość na gorąco i znacznie zwiększoną żywotność. Cronidur 30 może być zastąpiony konwencjonalnymi, hartowanymi „na wylot” (nie tylko powierzchniowo) stalami łożyskowymi, takimi jak 52100, M50, BG42, 440C itp. w celu praktycznego wyeliminowania problemów z korozją, zwiększenia trwałości i poprawy niezawodności łożyska, co skutkuje obniżeniem kosztów operacyjnych i serwisowych.

Dla uzupełnienia należy wspomnieć, że materiały ceramiczne, a konkretnie azotek krzemu, zostały przyjęte i znalazły szerokie zastosowanie w aplikacjach łożyskowych. Łożyska superprecyzyjne stosowane we wrzecionach obrabiarek są pierwszorzędnymi przykładami łożysk "hybrydowych" (tj. stalowe bieżnie połączone z kulkami ceramicz-

nymi), które są obecnie uważane za "standard"we wrzecionach o wysokiej wydajności. Istnieje również stale rosnąca liczba zastosowań w przemyśle lotniczym i kosmicznym - począwszy od śrub kulowych używanych do uruchamiania klap i listew w samolotach, poprzez zastosowania w turbinach rakiet kriogenicznych, aż po łożyska wałów głównych samolotów - gdzie kulki i wałeczki ceramiczne w połączeniu ze stalowymi bieżniami są z powodzeniem stosowane lub testowane, wykazując znaczną poprawę wydajności. Szczególne właściwości materiałów ceramicznych - wysoka wytrzymałość, wysoka twardość, wysoka odporność na korozję i niska gęstość - pozwalają na zwiększenie prędkości i temperatur pracy łożysk oraz zmniejszenie ich ciężaru. Jednocześnie można osiągnąć zwiększenie trwałości, ponieważ wytwarzanie ciepła, naprężenia materiału i zużycie łożyska są zmniejszone, a korozja może być całkowicie wykluczona (Rys.4.2).

	100Cr6	440C	M50	M50NiL	Cronidur 30	Silicon nitride* (Ceramic)
Microstructure	Basis	–	=	+	++	++
Fatigue life						
-Low temperature (<150 °C)	Basis	–	=	+	++	++
-Medium temperature (<180 °C)	Basis	–	+	++	+	++
-High-temperature (>180 °C)	Basis	–	++	+++	+	++
-Mixed fiction operation	Basis	=	+	++	++	+++
Corrosion resistance	Basis	+	=	=	++	+++
Contamination resistance	Basis	–	=	+	++	++
Hot hardness/strength	Basis	=	++	++	+	+++
High-speed capability	Basis	–	+	+++	++	+++

\* for rolling elements (used with steel races)

Definitions: "–" worse than "Basis"; "=" comparable with "Basis"; "+/++/+++" better to much better than "Basis"

**Rysunek 4.2.** Porównanie materiałów używanych do produkcji łożysk

Z tych powodów zastosowanie ceramicznych elementów tocznych, szczególnie w połączeniu z zaawansowaną stalą odporną na korozję, taką jak Cronidur 30, lub ze stalą utwardzaną powierzchniowo, taką jak M50NiL, będzie się coraz bardziej rozszerzać, natomiast łożyska w pełni ceramiczne znajdą w przewidywalnej przyszłości jedynie bardzo specyficzne, a zatem ograniczone zastosowania w przemyśle lotniczym. Staje się oczywiste, że kombinacje materiałów Cronidur 30 lub M50NiL z elementami tocznymi z ceramiki stanowią bardzo korzystne kombinacje materiałowe.[1][8][9][10][11]

Poniżej opisane zostały metody hartowania oraz przetapiania stali do produkcji łożysk do zastosowań lotniczych oraz jak wpływają one na dane stale.

#### 4.1. Stale hartowane

##### 4.1.1. Stale hartowane wtórnie

Stale łożyskowe muszą utrzymywać twardość powyżej 58 HRC w warunkach eksploatacyjnych, a wszelkie odstępstwa od tej wartości mogą prowadzić do tworzenia się pęcherzyków w bieżniach, a następnie do degradacji łożysk. Stale do hartowania wtórnego mogą zachować swoją twardość w podwyższonej temperaturze do 300 °C. Stale narzędziowe, takie jak M50, które zawierają elementy stopowe, takie jak molibden, należą do tej klasy stali i wśród stali do hartowania wtórnego M50 jest najczęściej stosowaną stalą do silników lotniczych. Zdolność tej stali do zachowania wysokiej wytrzymałości i twardości są przypisane tworzeniu się węglików molibdenu w wyższych temperaturach. Stal T1 (18-4-1) została opracowana dla łożysk stosowanych w turbinach gazowych i zawiera wolfram jako główny składnik stopowy i podobnie jak gatunek M50, stal T1 tworzy węgliki wolframu podczas odpuszczania w wyższych temperaturach.

Przeprowadzono obszerne badania nad ewolucją mikrostruktury w stali M50 w odpowiedzi na obróbkę cieplną, zachowaną zawartością austenitu oraz korelacją pomiędzy mikrostrukturą a trwałością zmęczeniową. Dla tego gatunku stali opracowano również nowe procesy obróbki cieplnej inne niż tradycyjna sekwencja hartowania odpuszczania (Q-T). Chociaż tradycyjnie w łożyskach stosuje się stal M50 o strukturze martenzytycznej, to struktura bainityczna dla tych stali może być również osiągnięta. Podwójne hartowanie stali M50 poprzez azotowanie plazmowe zostało zbadane i stwierdzono, że proces azotowania wprowadza dalsze wtórne hartowanie poprzez wytrącanie drobnych węglików wtórnych. Innym ważnym aspektem jest stabilność wymiarowa M50 w warunkach eksploatacji ponieważ zmiana dopasowania pierścieni łożyska do wału może wpłynąć na pracę łożyska, a nawet zmniejszyć jego trwałość. Stosunkowo nowsza klasa stali łożyskowych o wysokiej zawartości azotu, takich jak cronidur-30, również wykazuje efekt wtórnego hartowania podczas odpuszczania w temperaturze 475 °C i staje się preferowanym kandydatem do zastosowania w wysokowydajnych systemach lotniczych.[1]

##### 4.1.2. Stale o podwyższonej wytrzymałości

Stale hartowane, takie jak M50 lub AISI 440C nie nadają się do zastosowań, w których łożyska są narażone na obciążenia udarowe podczas pracy. Stale te charakteryzują się odpornością na pękanie rzędu 20-30 MPa. Innym zastosowaniem, w którym stale te nie mogą być użyte, są aplikacje wymagające wciskania pierścieni łożyska na wał, co powoduje naprężenia rozciągające na pierścieniach. W celu rozwiązania tych problemów opracowano stale o podwyższonej wytrzymałości. Wyżej wspomniana stal M50NiL, pochodna M50 o niższej zawartości węgla i wyższej zawartości Ni, została opracowana w celu produkcji stali do nawęglania. Stale te mogą być utwardzane powierzchniowo, przy czym zewnętrzna warstwa może być nawęglana (zakres temperatur od 840 do 950 °C) w celu osiągnięcia wysokiej twardości, podczas gdy rdzeń pozostaje miękki i plastyczny. Ta cecha sprawia, że

łożyska są w stanie wytrzymać obciążenia uderowe dzięki większej twardości materiału, a twarda obudowa minimalizuje tarcie i zużycie w miejscach rzeczywistego kontaktu. Dalsze hartowanie obudowy wprowadza szcztątkowe naprężenia ściskające na powierzchni, co poprawia trwałość zmęczeniową, a także pomaga złagodzić szkodliwy wpływ naprężeń obwodowych na pierścienie wewnętrzne przy bardzo wysokich prędkościach obrotowych. [1]

##### 4.1.3. Stale hartowane metodą „Duplex”

Hartowanie duplex jest procesem, który jest stosowany w celu uzyskania wyjątkowych właściwości stali łożyskowych stosowanych w przemyśle lotniczym, w którym po konwencjonalnych metodach obróbki cieplnej, takich jak hartowanie wtórne lub powierzchniowe, następuje proces azotowania powierzchniowego w celu uzyskania lepszych właściwości. Podczas tego procesu azot dyfunduje do warstw zewnętrznych na głębokość 0,2 mm i dodatkowo zwiększa twardość warstwy wierzchniej. M50NiL zawiera znaczną ilość pierwiastków stopowych takich jak Mo, V i Cr, które podczas obróbki nawęglania tworzą węgliki, a podczas azotowania powierzchniowego węgliki te rozpuszczają się w osnowie, a następnie tworzą się azotki tych pierwiastków stopowych.

Dwie kluczowe korzyści w porównaniu ze stalami nawęglanymi to wyższa twardość warstwy azotowanej i większa wielkość szcztątkowych naprężeń ściskających na powierzchni, które powodują, że te stale mają lepsze właściwości niż stale nawęglane, jeśli chodzi o pracę łożysk w wymagających warunkach, takich jak niedobór środka smarnego i zanieczyszczone środowisko. Poprawiona trwałość łożysk wykonanych ze stali hartowanych metodą duplex w porównaniu do stali hartowanych tylko metodą konwencjonalną lub hartowanych tylko powierzchniowo została dobrze udokumentowana. [1]

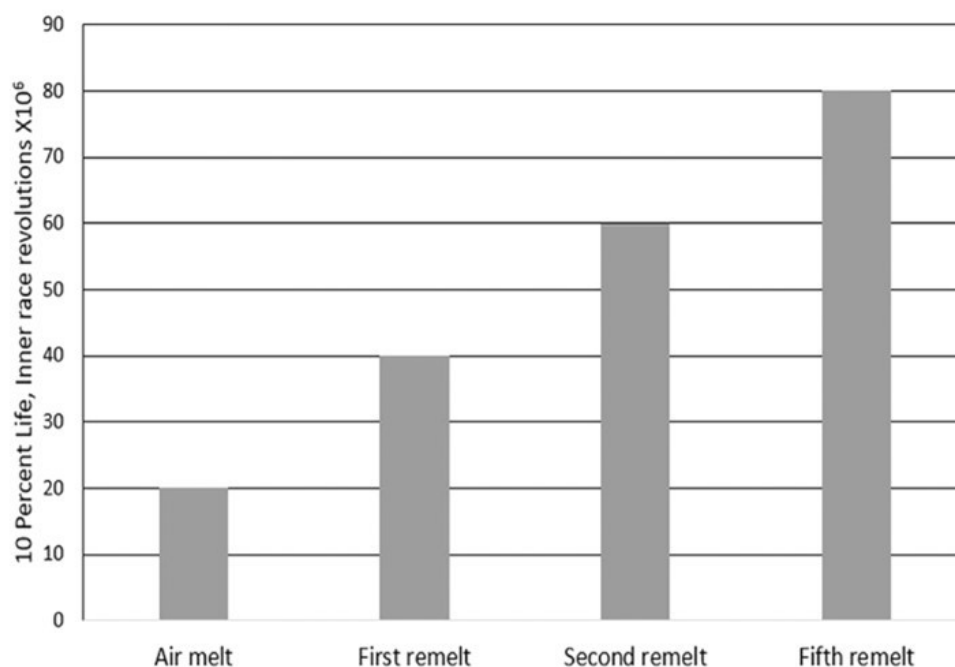
##### 4.2. Stale proszkowe

Koncentracja pierwiastków stopowych w stalach łożyskowych określa procent objętościowy wytrąceń tworzących się podczas hartowania, a zatem granica właściwości mechanicznych jest określona przez koncentrację pierwiastków stopowych. Innym aspektem, na który należy zwrócić uwagę jest to, że jeśli stężenie pierwiastków stopowych zostanie zwiększone powyżej pewnego progu, spowoduje to mikrosegregację podczas krzepnięcia, co spowoduje gradienty składu w przetopionych elementach, prowadzące do gorszych właściwości mechanicznych. Dlatego też, w przypadku konwencjonalnych stali stopowych do łożysk, maksymalna osiągalna twardość była ograniczona do zakresu 62-64 HRC. Wraz z pojawieniem się łożysbrydowych, stal stała się słabszym elementem styku łożyska i podjęto intensywne wysiłki w celu dalszego zwiększenia wytrzymałości mechanicznej stali łożyskowych. Wysiłki te zakończyły się opracowaniem stali metalurgicznych o większej zawartości pierwiastków stopowych i w tych stalach segregacja chemiczna nie może przekroczyć skali długości przekraczającej rozmiar proszku i REX20, CRU80 i CRU20 są jednymi z powszechnie stosowanych gatunków stali proszkowej. CRU20 osiąga

twardość 66-67 HRC (granica plastyczności 4000 MPa), co w przypadku zastosowania w łożyskach hybrydowych może zwiększyć trwałość zmęczeniową nawet sześciokrotnie w porównaniu do stali SAE 52100. [1]

### 4.3. Wytapianie stali

Dobrze wiadomo, że wtrącenia (zanieczyszczenia) stopowe negatywnie wpływają na trwałość zmęczeniową stali łożyskowych, dlatego też są stosowane zaawansowane praktyki wytapiania stali w przypadku stali łożyskowych w systemach lotniczych w celu zwiększenia niezawodności i trwałości tych łożysk. Stale łożyskowe można podzielić na trzy szerokie klasy w zależności od kolejności wytopu. Krytyczna rola poziomów czystości stali w trwałości zmęczeniowej łożysk jest dobrze ugruntowana, Rys. 4.3 wyraźnie wskazuje na poprawę trwałości łożysk dzięki wielu poziomom rafinacji próżniowej stali.



**Rysunek 4.3.** Zależność między żywotnością łożyska a rodzajem wytapiania stali

#### 4.3.1. Stale wytapiane próżniowo (pojedynczo)

Stale te są produkowane metodą wytapiania próżniowego (VIM – vacuum induction melting) i jak sama nazwa wskazuje, są one wytapiane w próżni w tyglu ogrzewanym indukcyjnie. Wytapianie próżniowe jest zaawansowanym sposobem wytapiania, w którym możliwe jest osiągnięcie składu chemicznego zbliżonego do składu docelowego. Proces ten pomaga wyeliminować porowatość obserwowaną w konwencjonalnych stalach wytapianych w powietrzu i zapewnia znaczne obniżenie poziomu tlenu i azotu. Atmosfera próżniowa pomaga również wyeliminować większość śladowych zanieczyszczeń, takich jak arsen, antymon, selen, bizmut i miedź. Ponadto, brak tlenu eliminuje tworzenie się

tlenków przez elementy zanieczyszczające, takie jak aluminium i wapń. Jest to najszerzej przyjęta metoda rafinacji stali stosowanych w łożyskach lotniczych.[1]

#### **4.3.2. Stale podwójnie wytapiane próżniowo**

Stale te są wytwarzane w procesie VIM (metoda wytapiania próżniowego), a następnie w procesie VAR (Vacuum Arc Remelting – Przetapianie próżniowe łukiem). Proces VIM jest wykorzystywany do produkcji elektrody topliwej, a w procesie VAR elektroda topliwa jest topiona poprzez wytworzenie łuku elektrycznego pomiędzy elektrodą a stopionym metalem znajdującym się w chłodzonym wodą tyglu miedzianym. Krople metalu są przenoszone przez łuk, który jest generowany w komorze próżniowej. W związku z tym, metal przechodzi dodatkową rafinację. Ze względu na skomplikowanie procesu, a co za tym idzie wysoki koszt, proces ten jest wykorzystywany tylko w krytycznych zastosowaniach łożysk o długiej żywotności, takich jak łożyska statków kosmicznych.[1]

#### **4.3.3. Stale potrójnie wytapiane próżniowo**

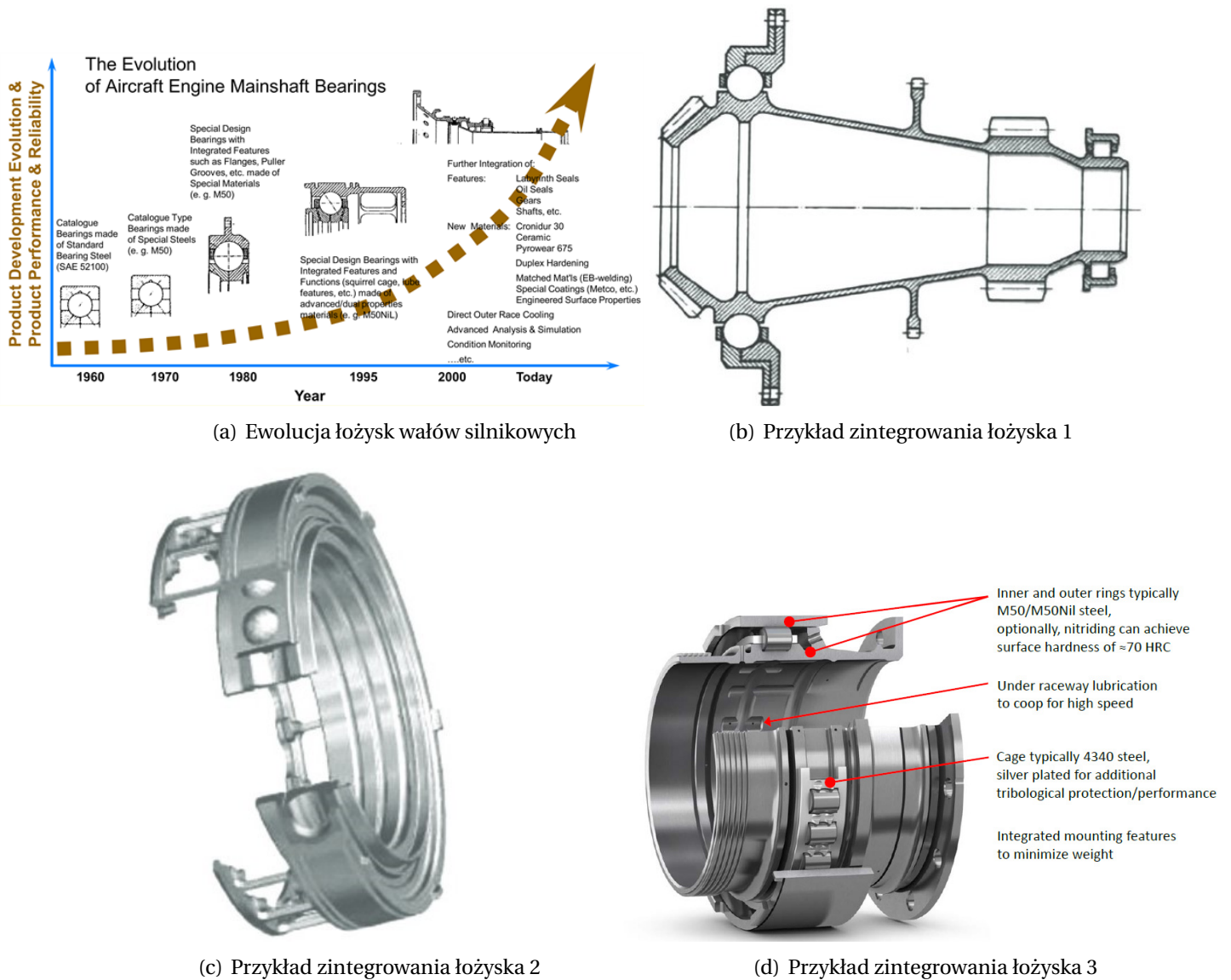
W procesie tym uzyskuje się stale o najniższej zawartości domieszek i jak sama nazwa wskazuje stale poddawane są trzem poziomom wytapiania próżniowego (VIM) + przetapianie elektrożuźlowe (ESR) + VAR. Stale te posiadają najbardziej jednorodną i czystą mikrostrukturę. W procesie ESR prąd zmienny przepuszczany jest przez elektrodę stalową, której jeden koniec pozostaje w kontakcie z żużlem ogniotrwałym. Stopiony metal przechodzi przez żużel i jest pod nim zbierany, a chemicznie aktywny żużel usuwa tlenki niemetaliczne, wolny tlen i siarkę. Jest to najdroższy gatunek stali łożyskowej, stosowany wyłącznie w krytycznych zastosowaniach przy dużych prędkościach.[1]

## **5. Zintegrowanie konstrukcji**

Inną koncepcją projektową stosowaną obecnie w łożyskach lotniczych jest podejście oparte na projekcie zintegrowanym, w którym jeden z pierścieni lub bieżni łożyska jest zintegrowany z układem mechanicznym. Redukcja wagi równa się redukcji kosztów. Zasada ta ma szczególne zastosowanie w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Zintegrowane konstrukcje łożysk oferują w tym względzie znaczne korzyści. Techniczne zalety zintegrowanej konstrukcji łożyska są oczywiste: zredukowana liczba komponentów, mniejsze spiętrzenie tolerancji, mniejsza i bardziej zwarta konstrukcja oraz ogólna oszczędność masy systemu. Wynikające z tego korzyści dla użytkownika to: mniejsza ilość ścisłych tolerancji do wytworzenia i kontroli, łatwość instalacji, zwiększona wydajność i niezawodność, a także zmniejszony koszt systemu. Przykłady takich zaawansowanych, zintegrowanych koncepcji konstrukcji łożysk pokazano na rys. 5.1.

Staje się oczywiste, że taka zintegrowana konstrukcja obejmująca bieżnię łożysk, koła zębate, wały i części konstrukcyjne wymaga połączenia różnych właściwości materiału w ramach pojedynczego komponentu, tj. twardych powierzchni funkcjonalnych dla dobrej

odporności na zmęczenie i zużycie oraz większej plastyczności w obszarach konstrukcyjnych.[8]



Rysunek 5.1

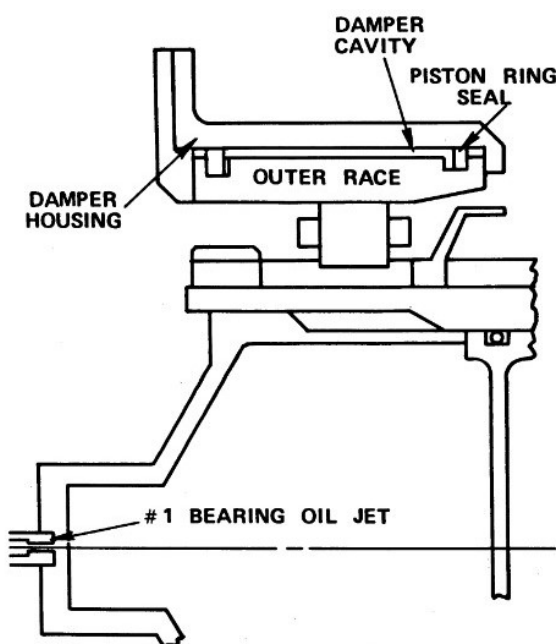
## 6. Tłumienie drgań

Dłuższe okresy pracy pomiędzy remontami, wymagane przez linie lotnicze, stały się impulsem do wprowadzenia amortyzatorów w celu zmniejszenia naprężeń wibracyjnych wywołanych niewyważeniem wirnika. Zmniejszenie poziomu wibracji daje możliwość zwiększenia żywotności wirników, łożysk oraz wielu innych komponentów, aby sprostać wymaganiom dłuższych okresów między remontami. Poza możliwym wzbudzeniem samego wirnika, przenoszone przez łożyska obciążenia niewyważenia powodują drgania obudowy silnika i konstrukcji nośnej. Te niewyważone obciążenia są przenoszone głównie przez łożyska wałeczkowe. Aby przeciwdziałać tym niepożądanym zjawiskom opracowano tłumiki drgań.

### 6.1. Tłumiki olejowe

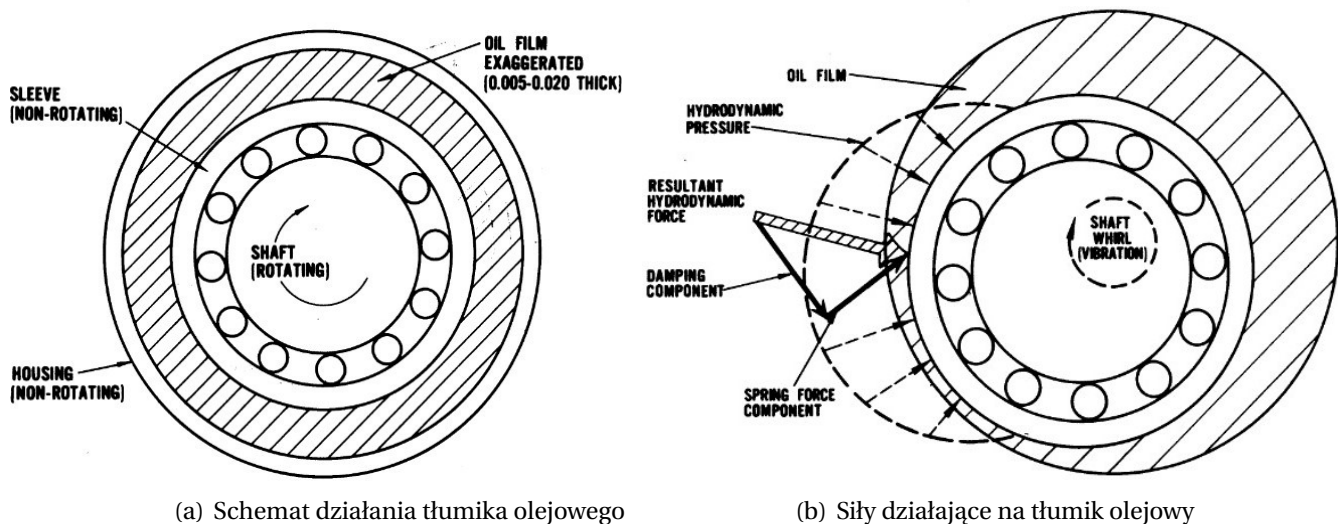
Z względu na fakt, że większość wibracji przenoszona jest przez łożyska wałeczkowe, logicznym rozwiązaniem było zamontowanie amortyzatora szeregowo z tym właśnie łożyskiem i jego podporą w sposób przedstawiony na rys. 6.1. Dobrym rozwiązaniem okazały się tłumiki hydrauliczne, w których energia wibracji zostaje rozproszona w lepkim filmie olejowym.

Podstawowy amortyzator wiskotyczny działa jako nieobrotowe łożysko hydrodynamiczne i jest pokazany na rys. 6.2. W wyniku wirowania wału przenoszonego przez łożysko wałeczkowe w warstwie oleju w pierścieniu tłumika występuje hydrodynamiczne działanie ściskające. Następujące po tym ścinanie lepkie powoduje tłumienie, które zmniejsza przenoszone amplitudy i siły.[4]



Rysunek 6.1. Schemat konstrukcji tłumika olejowego





(a) Schemat działania tłumika olejowego

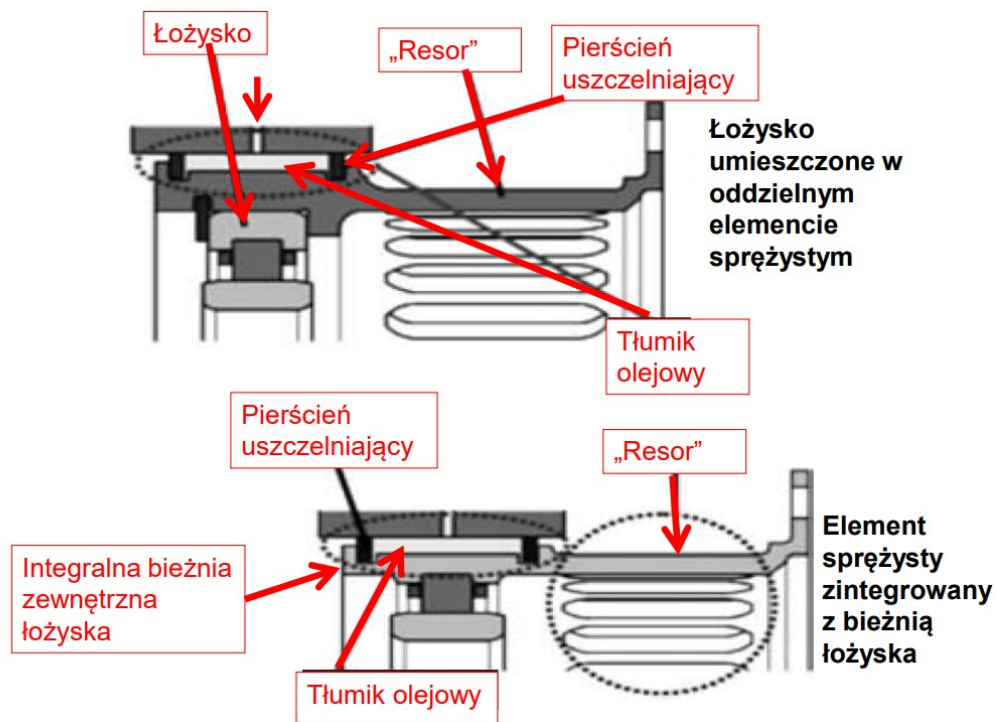
(b) Siły działające na tłumik olejowy

Rysunek 6.2

## 6.2. Tłumiki mechaniczne

Innym sposobem tłumienia drgań jest tłumienie mechaniczne. Budowa owych tłumików (resorów) przypomina budowę klatki (stąd angielska nazwa – klatka na wiewiórkę „squirrel cage”). Jest to cienkościenny cylinder z wyfrezowanymi otworami po obwodzie, co powoduje, że staje się on na tyle podatny, że poddaje się odkształceniu elastycznemu i tym samym rozprasza energię drgań przekazywaną mu z wirnika poprzez łożysko. Z reguły rozwiązania tego typu są używane przy łożyskowaniu sprężarek wysokiego ciśnienia.

Tłumik tego typu trzeba dostroić do danego silnika, ponieważ aby był on efektywny siły występujące w silniku muszą być wystarczające do jego odkształcenia. Przed montażem łożyska w silniku przeprowadza się kalibrację przy pomocy tensometrów zamocowanych na środkach resoru. W urządzeniu przykładu się obciążenie osiowe odpowiadające maksymalnemu naciskowi wywieranemu przez silnik i mierzy się odpowiednie wartości odkształcenia.[12][11]



**Rysunek 6.3.** Opis elementów mechanicznego tłumika drgań



**Rysunek 6.4.** Przykład mechanicznego tłumika drgań

## Bibliografia

- [1] R. Rejith, D. Kesavan, P. Chakravarthy i S. V. N. Murty, "Bearings for aerospace applications", *Tribology International*, t. 181, mar. 2023, ISSN: 0301679X. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108312.
- [2] Z. Czyż i P. Magryta, "Analysis of the operating load of foil-air bearings in the GAS generator of the turbine engine during the acceleration and deceleration manoeuvre", *Eksploatacja i Niezawodność*, t. 18, s. 507–516, 4 2016, ISSN: 15072711. DOI: 10.17531/ein.2016.4.5.
- [3] D. J. Clark, M. J. Jansen, G. T. Montague i U. S. Army, "An Overview of Magnetic Bearing Technology for Gas Turbine Engines", 2004. adr.: <http://www.sti.nasa.gov>.
- [4] P. F. Brown, "Bearings and Dampers for Advanced Jet Engines", t. 79, s. 998–1009, 1970. adr.: <https://www.jstor.org/stable/44644473>.
- [5] D. Scholz, "Jet Engines – Bearings, Seals and Oil Consumption", 2018. adr.: <http://AERO.ProfScholz.de>.
- [6] T. S. B. of Canada, "Aviation Investigation Report A14Q0068 Uncontained Turbine Rotor Failure Bombardier Inc. BD-500-1A10 (C Series CS100), C-FBCS Montreal International (MIRABEL) Airport, QUEBEC 29 MAY 2014", 2014. adr.: [www.tsb.gc.ca](http://www.tsb.gc.ca).
- [7] CFM, "CFM56 Training manual", 2000.
- [8] E. Franz-Josef, "An overview of performance characteristics, experiences and trends of aerospace engine bearings technologies", *Chinese Journal of Aeronautics*, t. 20, s. 378–384, 4 2007, ISSN: 10009361. DOI: 10.1016/S1000-9361(07)60058-2.
- [9] E. V. Z. with Discussions by YP Chiu i T. Tallian, "Ceramic Bearings for Use in Gas Turbine Engines", 1989, s. 146–157.
- [10] F. J. Ebert, "Fundamentals of Design and Technology of Rolling Element Bearings", *Chinese Journal of Aeronautics*, t. 23, s. 123–136, 1 lut. 2010, ISSN: 10009361. DOI: 10.1016/S1000-9361(09)60196-5.
- [11] P. Gloeckner i C. Rodway, "The Evolution of Reliability and Efficiency of Aerospace Bearing Systems", *Engineering*, t. 09, s. 962–991, 11 2017, ISSN: 1947-3931. DOI: 10.4236/eng.2017.911058.
- [12] B. George i N. S. Prasad, "Finite Element Analysis of Squirrel Cage Ball Bearings for Gas Turbine Engines", 2007, s. 165–171.