

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MODERNÍ TRENDY V KONSTRUKCI KLUZNÝCH LOŽISEK TURBODMYCHADEL

MODERN TRENDS IN CONSTRUCTION OF JOURNAL BEARING USED IN TURBOCHARGERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ONDŘEJ DOBROVOLNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ KNOTEK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ondřej Dobrovolný

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Moderní trendy v konstrukci kluzných ložisek turbodmychadel

v anglickém jazyce:

Modern Trends in Construction of Journal Bearing used in Turbochargers

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést úvod do problematiky turbodmychadel a kluzných ložisek a popsat specifické požadavky kladené na kluzná ložiska v konstrukci turbodmychadel. Dále se zaměřit na popsání konstrukce, materiálů a povrchových úprav používaných v konstrukci ložisek turbodmychadel, se zaměřením na současnost a blízkou budoucnost.

Cíle bakalářské práce:

- Základní pojmy z konstrukce turbodmychadel
- Princip kluzných ložisek, historický vývoj stavby a materiálů
- Specifické požadavky na kluzná ložiska v konstrukci turbodmychadel
- Popis konstrukce, materiálů a povrchových úprav ložisek používaných v turbodmychadlech (se zaměřením na moderní trendy a nejbližší budoucnost)

Seznam odborné literatury:

- [1] ŠIMEK, Jiří. Uložení a dynamika rotorů turbodmychadel. [online]. Dostupné z: <http://www.techlab.cz/>
- [2] CHEN, W. J., GUNTER, E. J. Dynamics of rotor-bearing systems, Trafford publishing, Canada, 2010, 469s, ISBN 978-1-4120-5190-3
- [3] ALSAEED, A. A. Dynamic stability evaluation of an automotive turbocharger rotor-bearing system, 2005, Diploma thesis, Virginia Polytechnic Institute.
- [4] SCHAFER-NGUYEN H. Rotordynamics of automotive turbocharger, Springer publishing, New York Dortrecht London, 2012, ISBN 978-3-642-27518-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Knotek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 22.11.2013

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je odbornou rešerší zabývající se moderními trendy v konstrukci ložisek u turbodmychadel. Práce je rozdělena do tří částí. První část popisuje historii, základní princip a konstrukci turbodmychadel. Druhá část je věnována teorii kluzných ložisek a jejich funkci. Třetí část se věnuje ložiskům používaných u turbodmychadel.

KLÍČOVÁ SLOVA

Turbodmychadla, hydrodynamické mazání, kluzná ložiska, kuličková ložiska

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the theme the modern trends in the design of bearings for turbochargers. The work is divided into three chapters. The first chapter describes the history, principles and construction of turbochargers. The second chapter attends to the theory of sliding bearings and their function. The third chapter deals with bearings used in turbochargers.

KEYWORDS

Turbocharger, hydrodynamic lubrication, journal bearing, ball bearings



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOBROVOLNÝ, O. *Moderní trendy v konstrukci kluzných ložisek turbodmychadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Knotek.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jiřího Knotka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 30. května 2014

.....

Ondřej Dobrovolný



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Knotkovi za jeho odborné vedení a cenné rady, které mi byly během tvorby bakalářské práce velice užitečné.



OBSAH

Úvod	10
1 Teorie turbodmychadel	11
1.1 Historie turbodmychadel	11
1.2 Popis funkce turbodmychadla	12
1.3 Části turbodmychadla	14
1.3.1 Turbínové kolo	15
1.3.2 Kompresor	15
1.3.3 Ložiska	16
1.3.4 Turbínová skříň	16
1.3.5 Kompresorová skříň	17
1.3.6 Ložisková skříň	17
2 Kluzná ložiska	18
2.1 Historie kluzných ložisek	18
2.2 Hydrodynamické mazání	19
2.2.1 Princip hydrodynamického mazání	19
2.2.2 Přívod maziva	21
2.3 Typy hydrodynamických ložisek	22
2.4 Požadavky kladené na kluzná ložiska	23
2.5 Poruchy kluzných ložisek	24
2.6 Materiály kluzných ložisek	25
3 Ložiska u turbodmychadel	26
3.1 Kluzná ložiska radiální	26
3.2 Kluzná ložiska axiální	27
3.3 Kuličková ložiska	28
3.4 Porovnání kluzných a kuličkových ložisek	29
3.5 Montáž ložisek	31
3.5.1 Montáž kluzných ložisek	31
3.5.2 Montáž kuličkového ložiska	31
3.6 Silové působení na ložiska turbodmychadel	32
3.7 Dynamika turbodmychadla	33
3.8 Požadavky na ložiska turbodmychadel	34
3.9 Materiály pro ložiska u turbodmychadel	34
3.10 Vývoj ložisek pro turbodmychadla	35
3.10.1 Vzduchová ložiska	35
3.10.2 Fólio-plynová ložiska	36



3.10.3 Magnetická ložiska	37
Závěr	38
Použité informační zdroje	39
Seznam použitých obrázků	41
Seznam tabulek	41



ÚVOD

Turbodmychadla jsou vysoko otáčkové stroje, které využívají energii výfukových plynů na stlačení vzduchu. Pro správnou funkci turbodmychadla jsou důležitá ložiska, která oddělují rotor turbodmychadla od rámu. Použitím turbodmychadla dochází ke zvýšení výkonu a úspoře paliva u automobilových motorů.

Nejčastěji používaná ložiska u automobilových turbodmychadel jsou kluzná. Kluzná ložiska mají vysokou únosnost, dlouhou životnost, technickou jednoduchost a snadnou vyrobiteľnost. Použitím kluzných ložisek dochází k minimalizaci ztrát třením a vzhledem k tlumicímu efektu olejového filmu je možné rotor turbodmychadel provozovat přes několik stupňů kritických otáček. Pro správnou funkci turbodmychadla je rozhodující funkčnost kluzných ložisek. Poškození kluzných ložisek je náhle a bez varování.

Dalším typem ložisek používaných u turbodmychadel jsou ložiska kuličková. Použití kuličkových ložisek dochází ke zvýšení mechanické účinnosti turbodmychadla a nedochází k tak velkým ztrátám při provozu.

V dnešní době s rozvojem výpočetní techniky se výzkum a vývoj turbodmychadel a jejich ložisek provádí mnohem jednodušeji. Jsou k dispozici komplexní nástroje pro vytváření virtuálních modelů turbodmychadel. Dokonalost softwarových programů umožňuje celý proces návrhu turbodmychadla zjednodušit a vyvíjet ve virtuálním prostředí. Do výroby poté vstupuje zcela odladěné a optimalizované turbodmychadlo, které splňuje při zátěžových testech prototypu náročné provozní podmínky.



1 TEORIE TURBODMYCHADEL

1.1 HISTORIE TURBODMYCHADEL

První zmínka o přeplňování byla na konci 19. století. V roce 1885 Gottlieb Daimler patentoval řízení vzduchového čerpadla pomocí ozubených kol a tím zvýšení přívodu vzduchu do spalovacího motoru. Turbodmychadlo bylo vynalezeno a patentováno v roce 1905 švýcarským inženýrem Alfred Büchi, vedoucím výzkumu motorů v Gebrüder Sulzer ve výrobní společnosti Winterthur. Za použití kompresoru poháněného výfukovými plyny, který tlačil vzduch do spalovacího motoru na zvýšení výkonu.[7]

V roce 1918 firma General Electric pod vedením inženýra Sanford Alexander Moss připojila turbodmychadlo k leteckému motoru Liberty V12. Tento motor byl testován na Pikes Peak v Coloradu ve výšce 4300 metrů, jako ukázka eliminace ztráty výkonu při sníženém tlaku vzduchu při vysoké nadmořské výšce. Firma General Electric přišla s názvem turbosupercharging.

V roce 1920 byla turbodmychadla poprvé použita v sériové výrobě leteckého motoru Napier Lioness, ale byla méně častá oproti odstředivým kompresorům. V tomto roce se také začaly objevovat vznětové motory s přeplňováním pro lodě a lokomotivy. Nejvíce se turbodmychadla používala v letectví ve Spojených státech, během druhé světové války na letadlech B-17 Flying Fortress, B-24 Liberator, P-38 Lightning, and P-47 Thunderbolt.[8]

V roce 1938 byl první přeplňovaný motor pro nákladní automobily vyroben firmou Swiss Machine Works Saurer. První přeplňovaná auta byla Chevrolet Corvair Monza a Oldsmobile Jetfire vyrobena ve Spojených státech v roce 1962/63.

Po první ropné krizi v roce 1973 se přeplňování stalo přijatelným pro vznětové motory. Do této doby bylo přeplňování náročnou investicí s minimální úsporou nákladů a paliva.

V 70. letech se turbodmychadlo dostalo do motoristického sportu, a také do závodů formule. V této době každá automobilka nabídla alespoň jeden model s přeplňovaným zážehovým motorem. Po pár letech tento trend zmizel, protože přeplňovaný zážehový motor nebyl ekonomický a turbodmychadla měla zpožděné reakce.

Ke konci 80. let přísnější emisní normy vedly ke zvýšení počtu přeplňovaných motorů u nákladních automobilů. V dnešní době je skoro každý motor u nákladního automobilu přeplňován. Skutečný průlom u osobních automobilů přišel v roce 1978 se zavedením přeplňování vznětového motoru u automobilu Mercedes - Benz 300 SD.

V roce 1981 ho následoval automobil VW Golf Turbodiesel. Pomocí turbodmychadla se účinnost vznětového motoru zvýšila a byla srovnatelná s jízdními vlastnostmi zážehového motoru, také došlo k výraznému snížení emisí.[7]

V dnešní době se přeplňování motorů používá stále běžněji, z důvodů snížení spotřeby paliva a emisí oxidu uhličitého, využitím energie výfukových plynů.



1.2 POPIS FUNKCE TURBODMYCHADLA

Turbodmychadlo je příklad vysokootáčkového stroje, který se běžně využívá v automobilovém průmyslu. Turbodmychadla byla původně nazývána výrazem turbosuperchargers. Dnes se používá označení turbocharger, neboli turbodmychadlo.

Turbodmychadlo je zařízení, které stlačuje vzduch za pomoci energie výfukových plynů. Používá se u spalovacích motorů ke zvýšení efektivity a výkonu motoru tím, že zvyšuje množství vhaněného vzduchu do motoru. Přepřňované motory se tak stávají výkonnějšími než motory atmosférické, protože turbodmychadlo vžene větší množství vzduchu do spalovací komory. Turbodmychadlo stlačuje nasávaný vzduch s velkou účinností, ale je náchylné na turbo efekt (turbo lag). Turbo-efekt nastává při nízkých otáčkách motoru, při nichž turbodmychadlo nepracuje. Projevem tohoto jevu je např. trhavý rozjezd automobilu. Turbodmychadlo nabízí zvýšení výkonu motoru při minimálním zvětšení váhy. Rychlost otáčení rotoru turbodmychadla se u velkých turbodmychadel pohybuje okolo 150 000 otáček za minutu a u malých turbodmychadel okolo 300 000 otáček za minutu. Tato rychlost je několikanásobně větší než u jiných rotačních strojů.

Turbodmychadlo se skládá z rotoru, který je na jednom konci osazen turbínou a na druhém kompresorem. Turbína je poháněna energií výfukových plynů a pohání kompresor, který se nachází na stejné hřídeli.

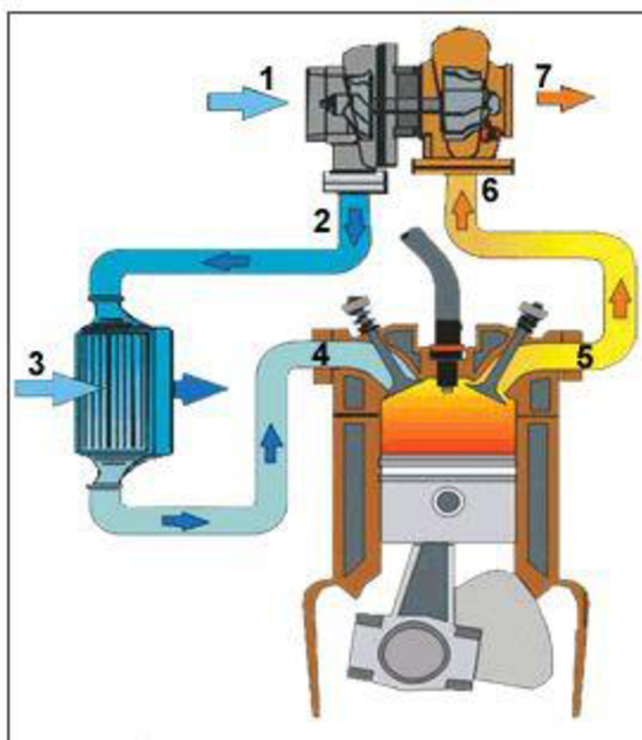
Kompresor zvyšuje tlak vzduchu vstupujícího do motoru. Dochází k nežádoucímu zvyšování teploty vzduchu vlivem zvýšení tlaku, proto se používá chladič plnicího vzduchu (intercooler). Více vzduchu ve spalovací komoře znamená, že musí být přivedeno i více paliva, aby směs spalovaná v motoru měla stejný poměr. Zvyšováním množství vzduchu a paliva dosáhneme vyšší objemové účinnosti a výkonu motoru. U turbíny se nachází výfukový ventil (waste-gate), který zabraňuje vysokým rychlostem otáčení rotoru turbodmychadla při kompenzaci vysokých tlaků ve válcích.

U turbodmychadel se nejčastěji používají kluzná ložiska s plně kluzným (plovoucím) kroužkem, nebo s částečně kluzným (plovoucím) kroužkem a stále častěji také kuličková ložiska. Kluzná ložiska mají lepší tlumící efekt, nízké hodnoty třecího součinitele a mají větší stabilitu při větších rychlostech rotoru. Vysoká rychlost rotoru turbodmychadla představuje širokou oblast nestability, která se pak přenáší ve formě vibrací na ložiska.

U automobilů se používají turbodmychadla zvyšující tlak o 0,6 až 0,8 barů. Nejčastěji používaná turbodmychadla začínou zvyšovat tlak od 1800 otáček za minutu. V dnešní době se začala používat dvoustupňová (twin, bi) turbodmychadla a turbodmychadla s VNT lopatkami. Použití turbodmychadel přináší snížení emisí oxidu uhličitého.[3][9][10][12]



Komponenty, které tvoří systém turbodmyhadla u automobilů podle Obr. 1:



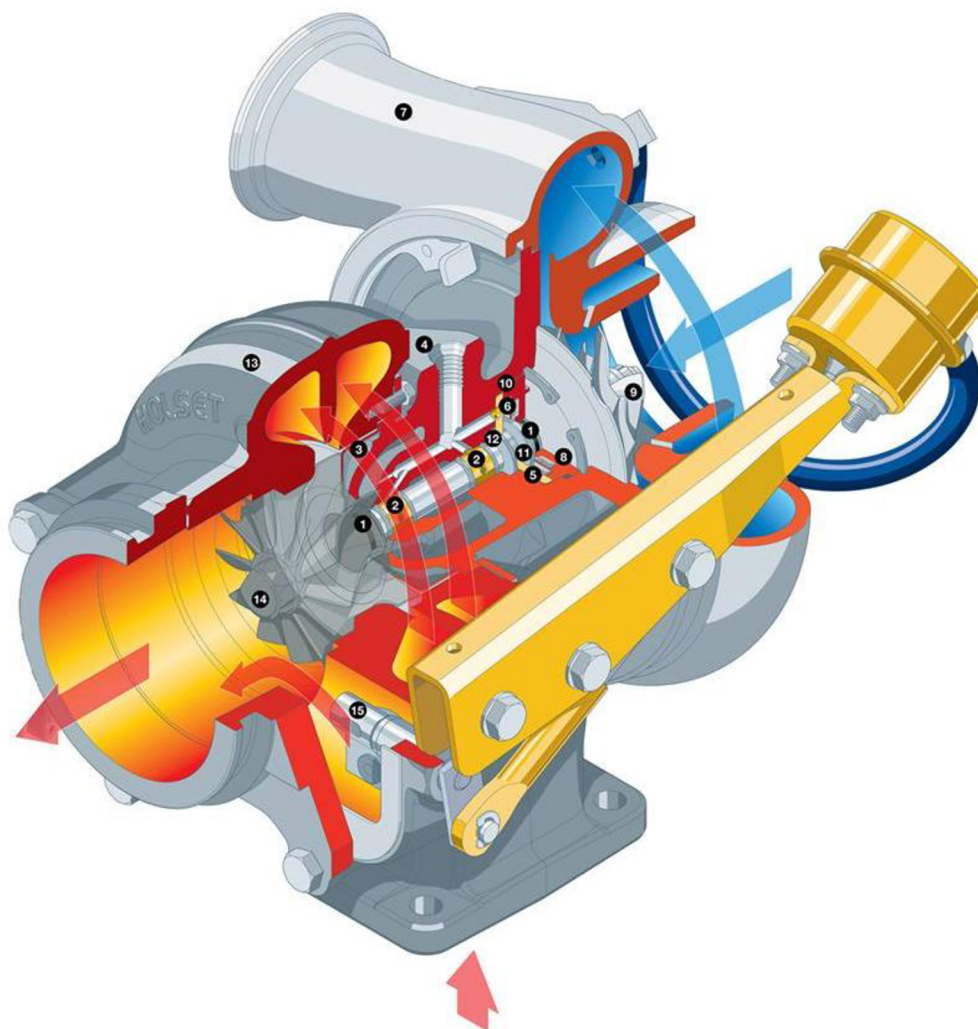
Obr. 1 Schéma komponent turbodmyhadla[5]

Vzduch je nasáván do turbodmyhadla přes vzduchový filtr do kompresorové skříně (1). Při výstupu z kompresoru je vzduch stlačený, tím se zvýšila jeho teplota (2). Většina přeplňovaných motorů má chladič plnicího vzduchu (intercooler), který ochlazuje stlačený vzduch a tím snižuje jeho hustotu (3). Po průchodu sacím potrubím vzduch vstupuje do válce motoru (4). Směs vzduchu a paliva je zapálena a následně vytlačena výfukovým ventilem do výfukového potrubí (5). Výfukový plyn má vysokou teplotu a pokračuje do turbíny, které předá energii (6). Poté výfukový plyn vystupuje do výfukového potrubí vozidla (7).[5]



1.3 ČÁSTI TURBODMYCHADLA

Části turbodmychadla podle Obr. 2:



Obr. 2 Části turbodmychadla[6]

- | | | |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1. těsnící kroužek | 6. olejová přepážka | 11. rozstřikovač oleje |
| 2. kluzná ložiska | 7. kompresorová skříň | 12. axiální kroužek |
| 3. tepelný kryt turbíny | 8. deska těsnící olej | 13. turbínová skříň |
| 4. ložisková skříň | 9. kompresor | 14. turbínové kolo |
| 5. axiální ložisko | 10. těsnící kroužek | 15. waste-gate ventil |



1.3.1 TURBÍNOVÉ KOLO

Turbínové kolo přeměňuje kinetickou energii výfukových plynů na mechanickou práci. Tento proces probíhá na principu poklesu tlaku mezi vstupem a výstupem a je převeden turbínou na kinetickou energii pro pohon. Jsou dva základní typy turbínového kola radiální a axiální. V automobilovém průmyslu se používají radiální turbínová kola. U radiálního turbínového kola spaliny vstupují v dostředivém a radiálním směru a vystupují přes turbínové kolo směrem axiálním. Turbínové kolo se vyrábí ze speciálních slitin.[7]



Obr. 3 Turbínové kolo[6]

1.3.2 KOMPRESOR

Kompresor se používá na zvýšení plnicího tlaku vzduchu do motoru. Používají se odstředivé kompresory. Kompresor axiálně nasává vzduch z okolí, urychluje ho na maximální rychlost a směřuje ho v radiálním směru na difuzor. Nejčastěji se vyrábí z hliníkových slitin.[11]



Obr. 4 Kompresorové kolo[6]



1.3.3 LOŽISKA

Ložiska jsou důležitou částí turbodmychadla. Nejčastěji používaná ložiska jsou kluzného typu, ale můžeme se setkat i s ložisky valivými. Ložiska jsou uložena v ložiskové skříni. Funkcí ložisek je tlumit axiální a radiální síly vzniklé za provozu. Ložiska jsou vyrobena z bronzových, nebo hliníkových slitin.[7]



Obr. 5 Kluzná ložiska[6]

1.3.4 TURBÍNOVÁ SKŘÍŇ

Turbínová skříň obsahuje lopatkové, nebo bezlopatkové rozváděcí ústrojí. Nejčastěji má tvar spirály, jejíž průměr se zmenšuje směrem do středu. Tvar skříně je odlišný u každého výrobce. Součástí skříně bývá často waste-gate ventil, který při vysokém tlaku upustí přebytečné množství spalin do výfukového potrubí. Turbínová skříň musí vydržet teploty vyšší než 760°C. Materiály používané na výrobu jsou litiny pro vyšší provozní teploty a vysokoteplotní materiály.[11]



Obr. 6 Turbinová skříň[5]



1.3.5 KOMPRESOROVÁ SKŘÍŇ

Funkcí skříně je stlačování a správné směřování vzduchu na kolo kompresoru. Skříně má tvar spirály, která se do středu rozšiřuje. Uvnitř skříně se nachází difuzor, který zpomaluje rychlost vzduchu beze ztrát, takže dojde ke zvýšení tlaku a teploty vzduchu. Materiály na výrobu jsou nejčastěji hliníkové slitiny nebo tvárná litina.[7][12]



Obr. 7 Kompresorová skříň[6]

1.3.6 LOŽISKOVÁ SKŘÍŇ

Ložisková skříň je velmi důležitou součástí turbodmychadla, jsou k ní připojena turbínová a kompresorová skříň. Obsahuje uložení radiálních a axiálních ložisek a mazací systém. Skříně mohou být chlazené olejem, nebo vodou. Důležité je, aby byl rotor turbodmychadla dobře vyvážen. Materiál používaný na výrobu je tvárná litina, která se poté obrábí.[11]



Obr. 8 Ložisková skříň[6]



2 KLUZNÁ LOŽISKA

2.1 HISTORIE KLUZNÝCH LOŽISEK

Kluzná ložiska se vyvíjela po staletí, umožňovala pohyb jednoduchých zařízení. Koncem 17. století se začala používat ložiska ve tvaru pouzder. Během průmyslové revoluce došlo ke zpřesnění výroby a využití nových materiálů.

V roce 1883 Beauchamp Tower pozoroval vytváření tlaku v olejovém filmu. V tomto roce také publikoval Petroff první analytické řešení ztrát v hydrodynamickém ložisku. O tři roky později Osborne Reynolds vysvětlil vytváření tlaku působením viskózních sil v konvergentní mezeře. Reynoldsova rovnice má jednoduchý fyzikální základ a platí pro změny tlaku v olejovém filmu jen u stabilního laminárního proudění. Použití Reynoldsovy teorie vedlo k revolučnímu vývoji axiálních ložisek. Vývoj rotačních strojů od roku 1880 vedl k požadavkům na zvýšení obvodové rychlosti a zatížení radiálních ložisek.

Kolem roku 1950 teorie poskytovala rozumné výsledky ve shodě s provozními charakteristikami radiálních ložisek. Základy dynamického výpočtu provedl v roce 1964 J.W Lund zavedením koeficientů tuhosti a útlumu, které se používají dodnes. V současnosti vývoj směřuje k ložiskům mazaným procesními médiiem.[1]

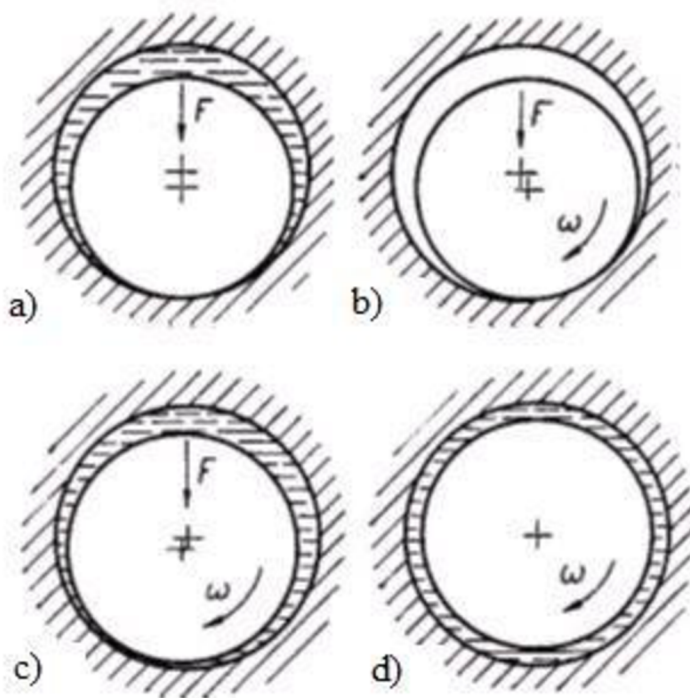


2.2 HYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ

2.2.1 PRINCIP HYDRODYNAMICKÉHO MAZÁNÍ

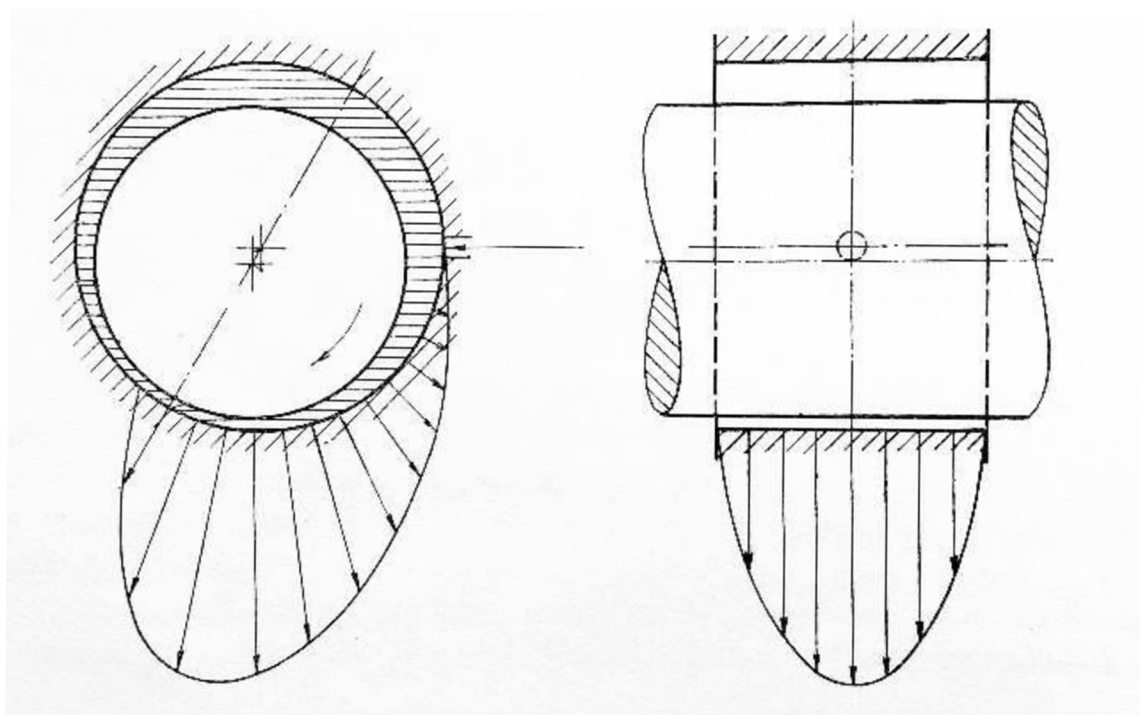
Při hydrodynamickém mazání jsou třecí povrchy odděleny mazacím filmem, takže nedochází k jejich vzájemnému styku. Hydrodynamické mazání nevyžaduje přívod maziva pod tlakem, ale musí být zajištěna jeho nepřetržitá dodávka. Tlak v mazacím filmu je vytvořen v důsledku relativního pohybu třecích povrchů.

Na Obr. 9a čep zaujímá výstřednou polohu vůči ložisku a vytváří tak v ložisku podlé svislé osy (osy zátěžné síly), dva symetricky zakřivené klínové prostory ($\omega=0$). Je-li tento prostor vyplněn olejem a je-li počet otáček čepu malý ($\omega=\text{malé}$), nabíhá čep na kluznou plochu ložiska proti směru otáčení Obr. 9b. Pokud se počet otáček dostatečně zvýší, vzniká v zatížené dolní části prostoru ložisková vůle účinkem rotace čepu, viskozity oleje a klínovitého tvaru prostoru ve vrstvě oleje (mazací vrstvě) hydrodynamický tlak, který oddělí kluzné plochy čepu a ložiska a čep se vychýlí ve směru rotace čepu Obr. 9c. Čep by mohl zaujmout přesně soustřednou polohu v ložisku pouze při nekonečně velkém počtu otáček ($\omega=\infty$) Obr. 9d.[14]



Obr. 9 Poloha čepu v ložisku[14]

Z Obr. 10 je patrný průběh hydrodynamického tlaku. Tento tlak zabraňuje přímému dotyku součástí. Únosnost ložiska je závislá na velikosti a průběhu hydrodynamického tlaku v mazací vrstvě. Hlavně však závisí na velikosti ložiskové vůle, kluzné rychlosti a viskozitě maziva.[14]

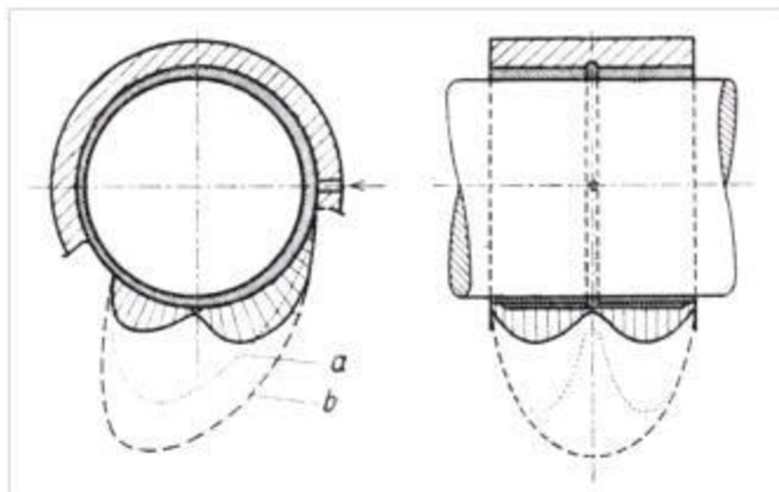


Obr. 10 Průběh hydrodynamického tlaku[14]



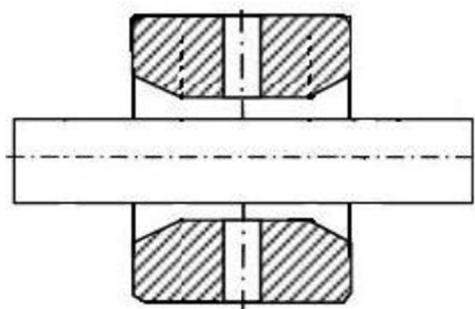
2.2.2 PŘÍVOD MAZIVA

Mazivo je přiváděno do nezatížené části ložiska. Přívod maziva by neměl snižovat hodnotu únosnosti ložiska, také nesmí docházet k úniku maziva. Před přívodem oleje mezi kluzné plochy nesmí dojít k jeho ohřevu. Rozvod oleje je zajištěn mazacími drážkami, jejichž tvar napomáhá čerpacímu účinku. Drážky by neměly mít ostré hrany a neměly by být příliš hluboké. Při vysokých zatíženích a nízkých rychlostech se drážky umísťují blíže k místu zatížení. Na Obr. 11 vidíme průběh hydrodynamického tlaku v mazací drážce.[14]



Obr. 11 Hydrodynamický tlak v drážce a)radiální drážka b)bez drážek[14]

Tvar mazacích drážek je důležitý pro přívod dostatečného množství maziva mezi kluzné plochy a pro jeho stejnoměrné rozdělení. Mazací drážka nesmí být v zatížené části kluzné plochy. Většinou jsou tyto drážky rozděleny po obvodu ložiska. Nejčastěji čtyři otvory po obvodu. Na Obr. 12 je jeden z možných tvarů mazací drážky.[14]



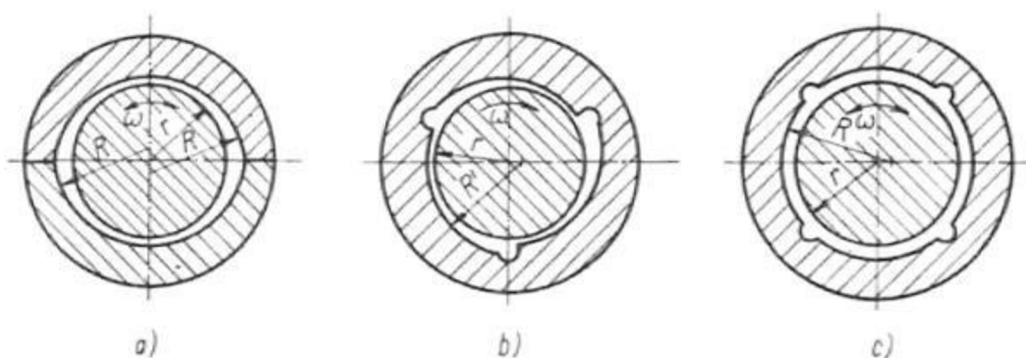
Obr. 12 Tvar mazací drážky[2]



2.3 TYPY HYDRODYNAMICKÝCH LOŽISEK

Se vzrůstající kluznou rychlostí (vzrůstajícími otáčkami) vzrůstá hydrodynamická nosnost ložiska a výkon ztracený třením, což vede ke zvýšení teploty ložiska. Ložiska kruhového průřezu nahrazujeme ložisky s více plochami tzv. víceplochými, jejichž kluzná plocha je vytvořena ze dvou nebo více ploch. Tyto ložiska mají značný vliv na stabilitu čepu v ložisku a na dobrý odvod tepla. Vznik nosné hydrodynamické síly probíhá na každé kluzné ploše zvlášť. Na Obr. 13 můžeme vidět jednotlivé typy hydrodynamických ložisek.

U turbodmychadel se většinou používají ložiska s víceplochou vnitřní geometrií pro stabilitu rotoru. Nejčastěji se používá tříplochá vnitřní geometrie, která se uplatňuje pouze u nedělených ložiskových pouzder. [1][14]



Obr. 13 Typy ložisek: a) citronové b) tříploché c) čtyřploché [14]



2.4 POŽADAVKY KLADENÉ NA KLUZNÁ LOŽISKA

FUNKČNÍ POŽADAVKY

Únosnost ložiska závisí na charakteru zátěžné síly, zda je statická nebo dynamická. Kluzná ložiska s hydrodynamickým mazáním vyžadují určitou minimální rychlost otáčení. Velikost této rychlosti závisí na viskozitě maziva a velikosti vůle. Při velkých rychlostech se únosnost kluzného ložiska zvyšuje.

OBVODOVÁ RYCHLOST ČEPU

Nejdůležitější při volbě druhu ložiska. Kluzná ložiska s hydrodynamickým mazáním jsou vhodná pro střední a velké rychlosti. Omezení rychlosti u kluzného ložiska je dáno vznikem turbulentního proudění v mazací vrstvě a maximální přípustné teploty maziva.

TŘECÍ ZTRÁTY

Na základě výzkumů bylo stanoveno v oblastech hydrodynamického a hydrostatického mazání, že kluzná ložiska v oblasti kapalinného tření mají třecí ztráty stejné nebo i menší než ložiska valivá. Velikost třecích ztrát závisí na mnoha činitelích, zejména na provozních podmínkách, ložiskovém materiálu, mazivu a kluzné rychlosti.

PROVOZNÍ TEPLOTA

Provozní teplota je důležitá při volbě druhu ložiska. Je-li teplota nízká, jsou vhodná valivá ložiska. U kluzných ložisek se musí mazivo předehtřívát, aby byl zajištěn bezpečný rozběh. Nejvyšší přípustná teplota u obou druhů ložisek je dána nejvyšší přípustnou teplotou použitého maziva.

TLUMENÍ VIBRACÍ

Kluzná ložiska s dostatečně silnou mazací vrstvou mají značný tlumicí účinek. Valivá ložiska mají minimální schopnost útlumu.

HLUČNOST

Hlučnost je rozhodující zejména při vyšších rychlostech. Valivá ložiska jsou hlučnější než kluzná ložiska.

TRVANLIVOST

Trvanlivost závisí na konstrukci, kvalitě výroby, montáži a provozních podmínkách. Kluzná ložiska s kapalinným třením mají teoreticky neomezenou životnost, neboť vrstva oleje odděluje kluzné plochy. Dalším rozhodujícím hlediskem je také cena.[14]



2.5 PORUCHY KLUZNÝCH LOŽISEK

Při styku dvou kluzných povrchů se vlivem vzájemného působení postupně oddělují částice z povrchů pohybujících se těles. Při opotřebení dochází k oddělování malých částic. Nejobtížnější je zabránit poruchám ložisek zaviněným náhlým mechanickým, tepelným přetížením, chvěním, vibrací a poruchou mazacího zařízení.

Podle způsobu opotřebení kluzných ploch rozlišujeme několik druhů opotřebení:

ADHEZIVNÍ OPOTŘEBENÍ

Adhezivní opotřebení je důsledkem tření dvou povrchů s malou drsností, částice oddělované z jednoho povrchu se přenáší na druhý povrch, kde dojde vlivem protržení mazací vrstvy k přímému dotyku. Toto opotřebení se může projevat jako tzv. zadírání, provázené nárůstem třecího odporu a vývinem tepla.

ABRAZIVNÍ OPOTŘEBENÍ

Dochází k odstraňování materiálu z relativně se pohybujícího povrchu tvrdými částicemi obsaženými na jednom povrchu, nebo částicemi volně se pohybujícími mezi kluznými povrchy např. nečistotami. Čím tvrdší jsou abrazivní částice tím je opotřebení ploch větší.

EROZIVNÍ OPOTŘEBENÍ

Projeví se jako nerovnoměrné zvlnění zpravidla za hranami, za nimiž proudící kapalné mazivo víří. Pokud mazivo obsahuje nečistoty je opotřebení rychlejší.

ÚNAVOVÉ OPOTŘEBENÍ

Vzniká nejčastěji při dynamickém cyklickém namáhání. Poruchy začínají v podpovrchové vrstvě materiálu, kde napětí mívá největší hodnoty. Projeví se to vznikem mikroskopických trhlin.

KAVITAČNÍ OPOTŘEBENÍ

Pokud se náhle změní průřez v prostoru ložiskové vůle, kterým proudí mazivo a následkem toho poklesne tlak v mazací vrstvě, vznikne bublina vyplněna párami. Mechanickým rázovým působením se vytvořené bubliny rozpadají. Při zanikání kavitačních bublin vznikají velmi vysoké tlaky i teploty, které rozrušují strukturu materiálu. Nejčastěji se vyskytuje u ložisek používaných při vysokých rychlostech a otáčkách.[14]



2.6 MATERIÁLY KLUZNÝCH LOŽISEK

Materiály, které se používají u hydrodynamických kluzných ložisek, musí vyhovovat různým požadavkům. Hydrodynamická ložiska pracují při stálém přívodu maziva, proto nejsou kluzné vlastnosti tak podstatné. Hlavní důraz je kladen na pevnostní a únavové vlastnosti. Volbou vhodného materiálu lze ovlivnit trvanlivost, funkci i cenu ložiska. Základními materiály pro ložiska jsou cín, olovo, měď a hliník. Z nichž nejlepší kluzné vlastnosti mají olovo a cín. Nejvíce se používají olověné kompozice, které mají nejlepší kluzné vlastnosti a nejmenší ztráty.

Dobrý kluzný materiál musí snést vysoké pracovní zatížení při pracovních teplotách, schopnost odolat korozním účinkům maziva a mít nízký součinitel tření.

CÍNOVÉ A OLOVĚNÉ KOMPOZICE

Dobré kluzné vlastnosti při nízkém součiniteli tření. Vhodné pro střední zatížení a pro největší kluzné rychlosti. Nízká mez únavy a pevnost. Se stoupajícím obsahem cínu se zvyšuje odolnost proti opotřebení.

CÍNOVÉ A OLOVĚNÉ BRONZY

Při dostatečném mazání dobré kluzné vlastnosti, nízký součinitel tření. Vysoká pevnost a mez únavy. Pro velké dynamické namáhání při vyšších teplotách provozu omezené maximální teplotou maziva. Velká odolnost proti zadírání a vysoká tvrdost.

HLINÍKOVÉ LOŽISKOVÉ SLITINY

Dobré kluzné vlastnosti a vysoká mez únavy. Vhodné pro velmi namáhaná ložiska. Vysoká odolnost proti korozi a tepelná vodivost. Pro velké dynamické zatížení při velkých rychlostech.[14]



3 LOŽISKA U TURBODMYCHADEL

3.1 KLUZNÁ LOŽISKA RADIÁLNÍ

U turbodmychadel se nejčastěji používají radiální kluzná ložiska. Tyto ložiska pracují na principu hydrodynamického mazání. Hřídel turbodmychadla je od ložiska oddělena extrémně tenkým filmem oleje, který se dodává do meziprostoru. Olej zabraňuje kontaktu kov na kov. Olejový film mezi ložiskem a rotorem přenáší vysoká zatížení a rychlosti. Kluzná ložiska jsou díky olejovému filmu mimořádně odolná a mají dlouhou výdrž. Olej tlumí rázy a vyplní vůli ložiska. Cirkulací oleje se chladí kovové nosné prvky turbodmychadla. Ložiska mají ideální vůle v oblasti setin až tisícín milimetru, a jsou ideálně kruhová. Otvory a drážky v každé pánvi slouží k přívodu a odvodu oleje. Ložiska musí odolávat vysokým zatížením a vysokým teplotám provozu.[5]



Obr. 14 Radiální kluzné ložisko[5]



3.2 KLUZNÁ LOŽISKA AXIÁLNÍ

Používají se pro zachycování axiálních sil rotoru. Tyto ložiska jsou plochá nebo kruhová. Ploché ložisko má nejčastěji úhel 270° . Kruhová ložiska mají úhel 360° a zvládnou větší axiální zatížení. Zachycování axiální sil způsobí nárůst teploty oleje, který se cirkulací musí ochlazovat.[13]



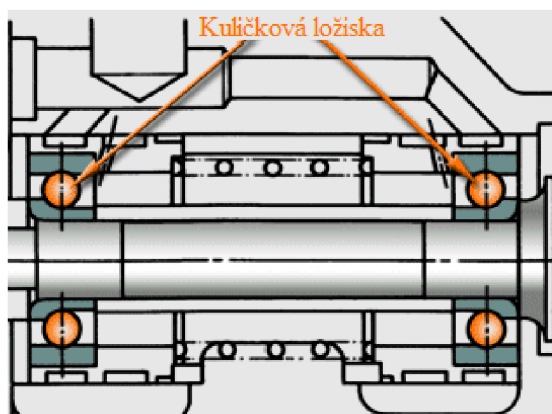
Obr. 15 Axiální kluzné ložisko[13]



3.3 KULIČKOVÁ LOŽISKA

Kuličková ložiska jsou poměrně nová technologie, která se začala používat v letectví, odkud se poté rozšířila do automobilového motorsportu. V roce 1990 Firma Garret Motorsports byla prvním výrobcem, který tento typ ložiska použil pro vozy WRC, později pro vozy Le Mans. Následovalo rozšíření do dalších závodních serií, poté také do osobních automobilů.

Ložisková kazeta se skládá ze dvou kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem, jak je možné vidět na Obr. 17. Kazeta je schopna přenášet jak axiální tak radiální zatížení. Ložisko obsahuje keramické kuličky a kazetu z vysoce odolné oceli. Kuličková ložiska mají velký vliv na mechanickou účinnost, tím dochází ke zvýšení účinnosti turbodmychadla. Nedochozí u nich k tak velkým ztrátám, protože nefungují na principu hydrodynamického mazání. Pomáhají zlepšit odezvu turbodmychadla při akceleraci, protože mají nižší třecí odpor. Velkou výhodou je provozování ložiska ve studeném stavu. Schopnost odolávat vysokým zatížením a nízkým ztrátám třením. Kuličková ložiska mají lepší schopnost reakce, než kluzná ložiska, u kterých hraje velkou roli viskozita oleje. Tento typ ložisek se používá stále častěji, protože dochází k úspoře paliva a plnění přísnějších emisních norem.[5][13]



Obr. 16 Kuličková kazeta v detailu[5]



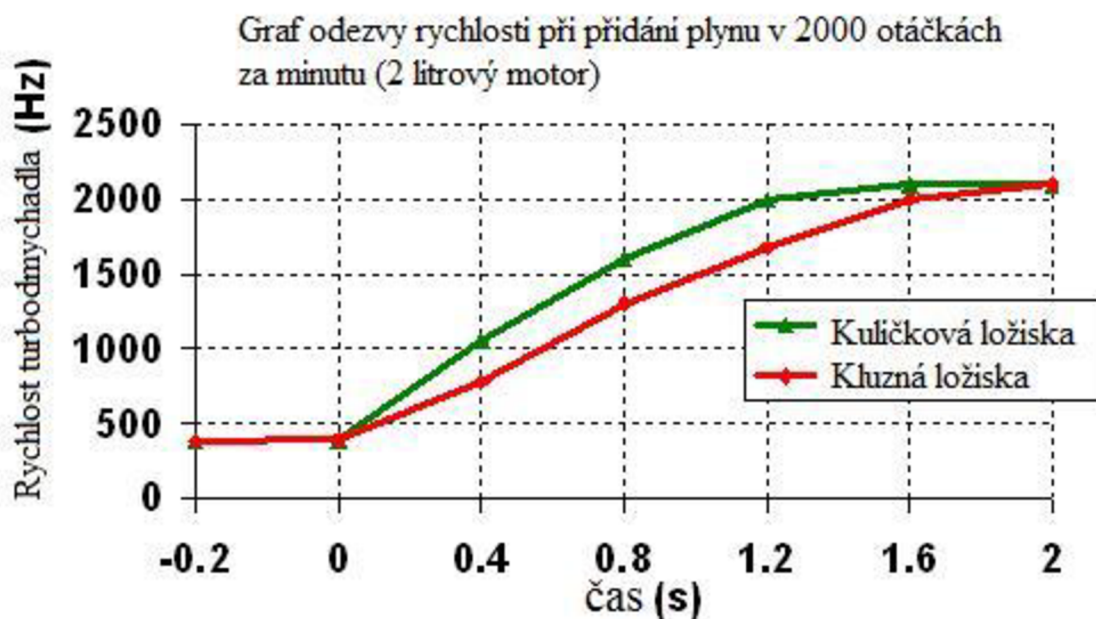
Obr. 17 Kuličková kazeta [13]



3.4 POROVNÁNÍ KLUZNÝCH A KULIČKOVÝCH LOŽISEK

Graf na Obr. 18 ukazuje porovnání rychlosti turbodmychadla v závislosti na čase pro kuličkové a kluzné ložisko. Ukazuje výhody kuličkového ložiska před ložiskem kluzným. Z toho plyne, proč se kuličková ložiska začala používat nejdříve v motosportu. [13]

V Tab. 1 vidíme porovnání různých funkčních charakteristik kluzného a kuličkového ložiska.[4]



Obr. 18 Graf rychlosti turbodmychadla v závislosti na čase[5]



Tab. 1 Porovnání kluzných a valivých ložisek [4]

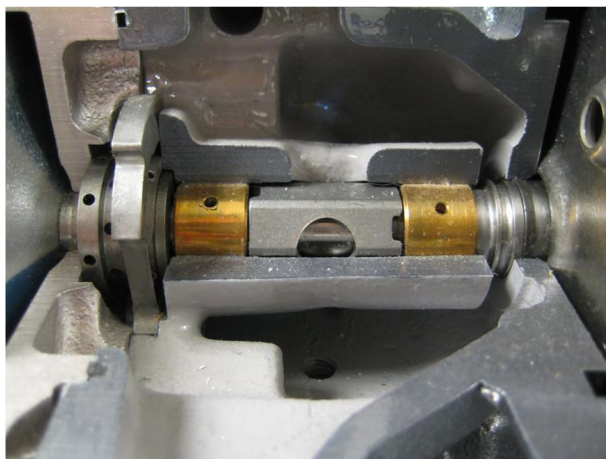
Charakteristika	Kluzná ložiska	Kuličková ložiska
Funkce	Radiální a axiální ložisko odděleně	Radiální a axiální ložisko kombinované
Směr zatížení	Radiální a axiální	Radiální a axiální
Koeficient tlumení (ložisko/rotor)	Dvojnásobně větší, dva olejové filmy: vnitřní vůle ($20\mu\text{m}$), vnější vůle ($70\mu\text{m}$)	Velmi malý, vůle mezi kuličkami a kroužkem ($<0,5\mu\text{m}$), jeden olejový film ($50-80\mu\text{m}$)
Hlučnost	Méně hlučná	Hlučnější
Průtok oleje	Malý	Dvakrát větší
Životnost	Bez limitu	Limitována vysoko cyklovou únavou
Možné poškození	Olejové házení (vlastní nevyváženosti), menší nebo žádné opotřebení	Možnost kontaktu kuliček při vysokých rychlostech, větší opotřebení
Cena	Nízká	Velmi vysoká



3.5 MONTÁŽ LOŽISEK

3.5.1 MONTÁŽ KLUZNÝCH LOŽISEK

Montáž kluzných ložisek je patrna z Obr. 19. Axiální kluzné ložisko se montuje na obě strany ložiskové skříně. Radiální ložiska odděluje do správné vzdálenosti distanční kroužek (spacer) s otvory pro olej. Dříve se používaly C-svorčky na každé straně radiálního ložiska. [13]



Obr. 19 Montáž kluzných ložisek[13]

3.5.2 MONTÁŽ KULIČKOVÉHO LOŽISKA

Montáž kuličkového ložiska na hřídeli je na Obr. 20. Vidíme dvě různé délky kuličkového ložiska, pro různé velikosti kompresorového a turbínového kola. Ložisko se přesně zajistí proti axiálnímu pohybu. [13]



Obr. 20 Montáž kuličkových ložisek[13]

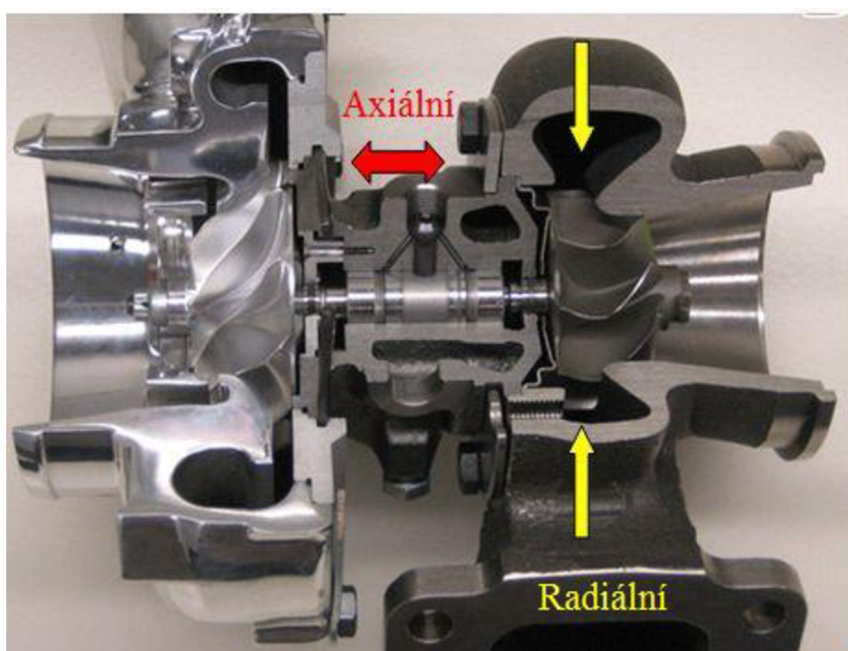


3.6 SILOVÉ PŮSOBENÍ NA LOŽISKA TURBODMYCHADEL

Nosný systém turbodmychadla musí odolávat radiálnímu a axiálnímu zatížení, které vytváří kompresor a turbínové kolo.

Radiální zatížení je zatížení kolmo na osu ložisek. Dochází k němu při kmitání hřídele (shaft motion). Při velkém radiálním zatížení si turbínové nebo kompresorové kolo může zavadit o skříň a může dojít k poškození turbodmychadla.

Axiální zatížení působí ve směru osy hřídele a je tvořeno tlakovými rozdíly mezi kompresorem a turbínovým kolem. Toto zatížení tlačí rotující sestavu zleva doprava a naopak. Silové působení je patrné z Obr. 21. [13]



Obr. 21 Zatížení nosného systému turbodmychadla[13]

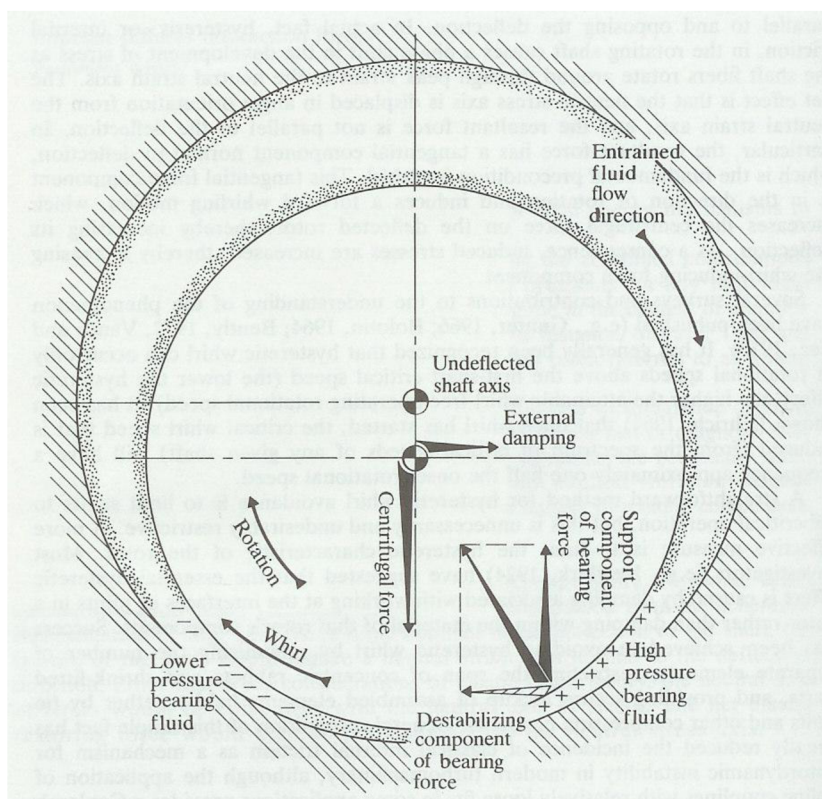


3.7 DYNAMIKA TURBODMYCHADLA

Popis dynamiky turbodmychadla je složitý, ale hraje při návrhu turbodmychadla a uložení ložisek důležitou roli. Hlavním hlediskem při návrhu turbodmychadla je minimalizace reakcí na vynucené kmitání a nevyváženosti rotoru. Existuje více druhů vibrací např. nestabilita rotoru, vlastní kmitání.

Téměř u všech rotorů automobilových turbodmychadel existují silné subsynchronní (subsynchronous) vibrace. Tyto vibrace jsou nežádoucí, způsobují hluk a jejich velká amplituda může způsobit zadření rotoru. Mechanismus subsynchronních vibrací se označuje jako házení (whipping) a kroužení (whirling). Házení a kroužení vzniká u turbodmychadel v olejovém filmu ložiska. Olej cirkuluje v ložisku s průměrnou rychlostí o jednu polovinu větší, než je obvodová rychlost rotoru. Obr. 22 ukazuje tangenciální sílu, kterou vyvine vysoký tlak kapaliny na ložiska. Tato síla vyvolává dopředné kroužení rotoru. Nestabilita nastává, když síla překročí tlumící síly. Nestabilní chování olejového filmu, stejně jako nelineární zatížení ložisek, značně ztěžuje analýzu dynamických vlastností rotorových soustav.

Existuje mnoho přístupů jak zlepšit stabilitu automobilových turbodmychadel. Jednou z možností je upravit charakteristiky ložiska např. typ, tvar. Použitím výpočetních metod se proces výpočtu usnadňuje.[3]



Obr. 22 Tangenciální síla[3]



3.8 POŽADAVKY NA LOŽISKA TURBODMYCHADEL

Při návrhu kluzných ložisek pro turbodmychadla se berou v úvahu různá hlediska.:

- Funkce radiálního ložiska. Radiální ložisko musí držet rotor ve stabilní poloze při různých provozních podmínkách.
- Rotor musí být vyvážen i při vysokých rychlostech otáčení. Proto musí mít kluzná ložiska dostatečný tlumící účinek, aby udržela rotor v rovnováze a potlačila vibrace vyvolané při nevyváženosti. Dosahuje se toho vhodnou geometrií ložiska a ložiskovou vůlí.
- Tření v kluzných ložiscích. Tření musí být minimální, tak aby snížilo přechodovou oblast turbodmychadla a snížilo emise CO₂ i při nízkých hodnotách točivého momentu.
- Kluzné ložisko musí mít dlouhou životnost s minimálním opotřebením.
- Zohlednění ceny v závislosti na kvalitě a požadované funkci.

Řešením je kompromis mezi jednotlivými požadavky v závislosti na použití.

3.9 MATERIÁLY PRO LOŽISKA U TURBODMYCHADEL

KLUZNÁ LOŽISKA

Pro kluzná ložiska se nejčastěji používají slitiny hliníku a cínu, mědi a olova, olova a bronzů.

Slitiny musí být odolné proti velkému zatížení, vysoké teplotě při provozu a vysokým rychlostem otáčení.

KULIČKOVÁ LOŽISKA

U kuličkových ložisek se nejčastěji používají keramické a ocelové kuličky. Keramické kuličky jsou lehčí, tvrdší a mají větší životnost než kuličky ocelové.

Ložiskové kroužky se vyrábějí z vysokoteplotních ocelí, které mají vysokou teplotní odolnost a velkou životnost.

Klece jsou vyrobeny z tepelně odolných plastů, které mají nízké ztráty třením.



3.10 VÝVOJ LOŽISEK PRO TURBODMYCHADLA

Některé společnosti se podílí na vývoji bezolejových ložisek (oil free bearings) pro turbodmychadla. Olej mezi ložiskem a hřídelí se nahradí vzduchem, fólií a plynem nebo elektromagnetickou silou.

3.10.1 VZDUCHOVÁ LOŽISKA

Turbodmychadla osazena těmito ložisky nabídla lepší odezvu, nižší spotřebu paliva a snížení emisí výfukových plynů. Kapacita zatížení axiálního ložiska je větší než u radiálního. Při návrhu se využívalo 3D výpočetního programu na analýzu tloušťky filmu mezi ložiskem a oběžnými plochami.

Turbodmychadlo osazeno těmito ložisky bylo schopno dosáhnout 200 000 otáček za minutu.[15]

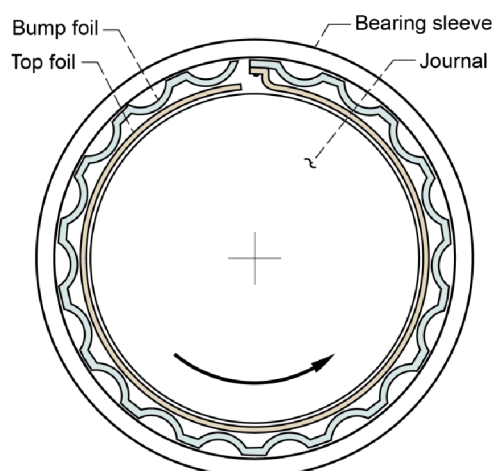
Nedošlo k jejich rozšíření do sériové výroby. Jednalo se pouze o vývojovou studii výrobce.



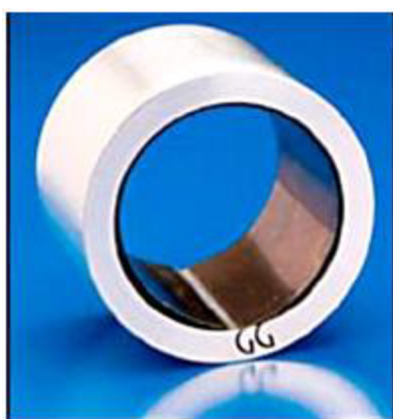
3.10.2 FÓLIOVO-PLYNOVÁ LOŽISKA

Tato ložiska využívají okolního plynu jako pracovního média, nevyžadují žádný speciální způsob mazání. Plynový film je vytvořený mezi povrchem pohybujícího se hřídele a dosedací plochou ložiska tvořenou několika vrstvami plechových folií jak je patrné z Obr. 23. Tato ložiska se používají jak pro radiální tak axiální zatížení. Ložiska však mají malou nosnost, tuhost a schopnost tlumení vibrací. Při rozběhu se nestačí vytvořit mazací film, proto se používá pevné mazivo, které sníží opotřebení folií při rozběhu. Fólie se opatřují různými povlaky chromu, oxidu hlinitého, keramiky pro zvýšení odolnosti.[16]

Jednalo se výzkumnou práci, která byla patentována, ale nedošlo k dalšímu rozšíření.



Obr. 23 Schéma fóliovo-plynového ložiska[16]



Radiální ložisko



Axiální ložisko

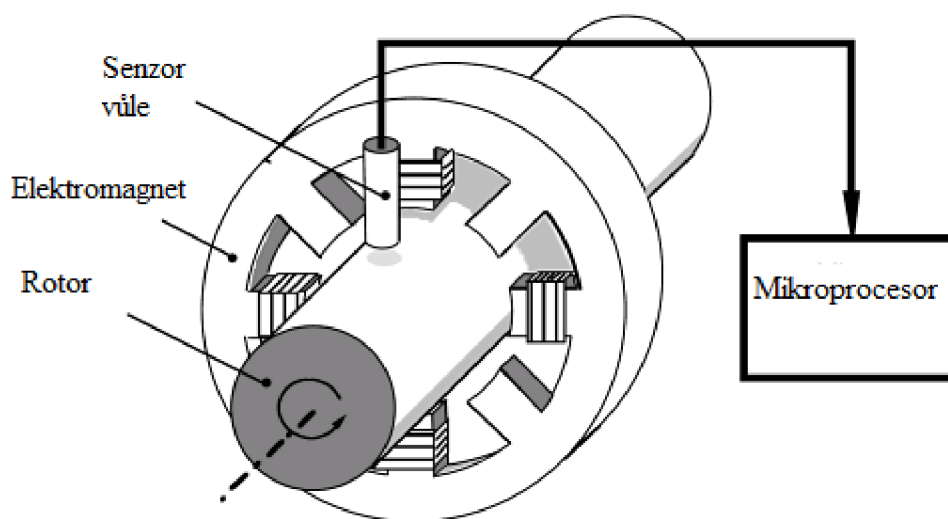
Obr. 24 Fóliovo-plynová ložiska[16]



3.10.3 MAGNETICKÁ LOŽISKA

U magnetického ložiska se využívá permanentní radiální magnetické síly k oddělení rotoru. Ložisko na Obr. 25 se skládá z několika elektromagnetů, umístěných kolem rotoru, senzoru vůle a mikroprocesoru. Kontrola polohy rotoru se provádí pomocí mikroprocesorů. Vibrace, které na tato ložiska přenáší motor a ostatní části musí být dodatečně tlumeny, aby byla zajištěna správná funkce. Rotor se při použití magneticko-fóliových ložisek nemusí vyvažovat. Magneticko-fóliová ložiska mají nízké tření a neopotřebovávají se.[17]

Magnetická ložiska se používají pro velké turbíny, ale nerozšířila do výroby turbodmychadel.



Obr. 25 Magnetické ložisko[17]



ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat přehled současně používaných a nových vývojových metod ložisek u turbodmychadel.

V první kapitole se práce zabývá historií, která je v práci řazena chronologicky od svého vzniku až po současnost. Dále principem funkce a základními částmi turbodmychadla.

Další částí práce je popis kluzných ložisek, princip hydrodynamického mazání, které je nejdůležitějším funkčním principem kluzných ložisek. Dále se věnuje jednotlivým typům hydrodynamických ložisek, volbě materiálů kluzných ložisek a jejich poruchami.

Nejdůležitější částí práce jsou ložiska u turbodmychadel. Na začátku této kapitoly jsou popsána jednotlivá ložiska používaná u turbodmychadel. V další části je jejich vzájemné porovnání, ze kterého je patrné, že kluzná ložiska jsou stále výhodnější variantou než kuličková ložiska. Poté jsou uvedeny základní druhy materiálů, které se používají, jak při výrobě kluzných, tak kuličkových ložisek. Poslední částí práce je vývoj ložisek pro turbodmychadla.

Přeplňování automobilových motorů turbodmychadlem se stalo moderním trendem zvýšení výkonu a úspory paliva. Pro správnou funkci turbodmychadla je důležitý olejový film mezi kluzným ložiskem a rotorem, který přenáší vysoké zatížení. Pro turbodmychadla s větší mechanickou účinností se stále častěji používají kuličková ložiska. Rozdíly mezi turbodmychadly s kluznými a kuličkovými ložisky se stále zmenšují.

Do budoucna lze vývoj ložisek používaných u turbodmychadel pouze odhadovat. Není jisté, zdali se změny budou odehrávat v používaných materiálech, nebo v konstrukčním provedení. Požadavky kladené na ochranu životního prostředí nutí výrobce vyvíjet nové, vylepšené materiály, které snížením tření a zvýšením životnosti ložisek dosáhnou nižší spotřeby paliva a nižších emisí CO₂.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ŠIMEK, Jiří. *Uložení a dynamika rotorů turbodmychadel*. [online]. Dostupné z: <http://www.techlab.cz/>
- [2] CHEN, W. J., GUNTER, E. J. *Dynamics of rotor-bearing systems*, Trafford publishing, Canada, 2010, 469s, ISBN 978-1-4120-5190-3
- [3] ALSAEED, A. A. *Dynamic stability evaluation of an automotive turbocharger rotor-bearing system*, 2005, Diploma thesis, Virginia Polytechnic Institute.
- [4] SHAFER-NGUYEN H. *Rotordynamics of automotive turbocharger*, Springer publishing, New York Dortrecht London, 2012, ISBN 978-3-642-27518-0.
- [5] Garrett by Honeywell, *GARRETT Turbochargers* [online]. 2014 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://turbobygarrett.com/turbobygarrett/>
- [6] Cummins Turbo Technologies. *Cummins Turbo Technologies* [online]. 2014 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.cumminsturbotechnologies.com>
- [7] BorgWarner. Inc. *BorgWarner Inc.* [online]. 2014 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.borgwarner.com/en/default.aspx>
- [8] Hill Climb. *Why General Electric put an airplane engine on a truck and drove it to the top of Pikes Peak*. [online]. 2001 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.airspacemag.com/history-of-flight/hill-climb-2023375/?c=y&page=1>
- [9] TIAN, L et al. *Effects of bearing outer clearance on the dynamic behaviours of the full floating ring bearing supported turbocharger rotor*. Brighton BN19QT, UK, 2012.
- [10] NICE, K. *How Turbochargers Work*. [online]. 2000, [cit. 2014-03-31]. Dostupné z: <http://auto.howstuffworks.com/turbo.htm>
- [11] KADLEČEK, J. *Návrh turbodmychadla s rekuperací energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 53 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída, Ph.D.
- [12] HOLÍK, P. *Turbodmychadla spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.
- [13] DINH, K. Turbo Bearings. *Turbo Tech: Turbo Bearings* [online]. 2011, [cit.2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.motoiq.com/MagazineArticles/ID/1978/Turbo-Tech-Turbo-Bearings.aspx>
- [14] VINŠ, Jindřich. *Kluzná ložiska*. 2. přepr.vyd. Praha: SNTL, 1971, 373 s.
- [15] ISHINO, M. *Air Bearing for automotive turbocharger*. [online]. 2006 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.tytlabs.com/english/review/rev413epdf/e413_053ishino.pdf



- [16] DELLACORTE, Ch. *Oil-Free Shaft Support System Rotordynamics: Past, Present, and Future Challenges and Opportunities*. [online]. 2011 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110011144.pdf>
- [17] SCHWEITZER, Gerhard a Eric H MASLEN. *Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery*. Berlin: Springer, 2009, xv, 535 s. ISBN 978-3-642-00496-4.



SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma komponent turbodmychadla[5].....	13
Obr. 2 Části turbodmychadla[6].....	14
Obr. 3 Turbínové kolo[6]	15
Obr. 4 Kompresorové kolo[6]	15
Obr. 5 Kluzná ložiska[6]	16
Obr. 6 Turbínová skříň[5].....	16
Obr. 7 Kompresorová skříň[6].....	17
Obr. 8 Ložisková skříň[6].....	17
Obr. 9 Poloha čepu v ložisku[14]	19
Obr. 10 Průběh hydrodynamického tlaku[14]	20
Obr. 11 Hydrodynamický tlak v drážce a)radiální drážka b)bez drážek[14]	21
Obr. 12 Tvar mazací drážky[2].....	21
Obr. 13 Typy ložisek: a)citronové b)tříploché c)čtyřploché[14].....	22
Obr. 14 Radiální kluzné ložisko[5]	26
Obr. 15 Axiální kluzné ložisko[13]	27
Obr. 16 Kuličková kazeta v detailu[5].....	28
Obr. 17 Kuličková kazeta [13]	28
Obr. 18 Graf rychlosti turbodmychadla v závislosti na čase[5]	29
Obr. 19 Montáž kluzných ložisek[13]	31
Obr. 20 Montáž kuličkových ložisek[13]	31
Obr. 21 Zatížení nosného systému turbodmychadla[13].....	32
Obr. 22 Tangenciální síla[3].....	33
Obr. 23 Schéma fóliovo-plynového ložiska[16].....	36
Obr. 24 Fóliovo-plynová ložiska[16]	36
Obr. 25 Magnetické ložisko[17].....	37

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání kluzných a valivých ložisek [4]	30
--	----