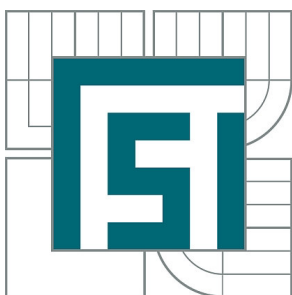


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

REŠERŠNÍ STUDIE ZAMĚŘENÁ NA VZDUCHOVÁ LOŽISKA

RESEARCH STUDY OF AIR BEARINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR DOLNÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ CHROMEK

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Dolníček

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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:

Rešeršní studie zaměřená na vzduchová ložiska

v anglickém jazyce:

Research study of air bearings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aerodynamická i aerostatická ložiska se v poslední době s úspěchem používají pro vysokootáčkové stroje v mnoha odvětvích průmyslu. Náplní této bakalářské práce je tak rešeršní studie dosavadních poznatků v oboru plynových ložisek.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je shrnout dosavadní poznatky v oboru vzduchových ložisek.

Seznam odborné literatury:

VINŠ, Jindřich : Kluzná ložiska, 2. přeprac. vyd, 1971, SNTL Nakladatelství technické literatury, 1971

WHITLEY, S.: The design of spiral groove thrust bearing, April 1967, Gas bearing symposium

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Chromek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 29.10.2014

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Hlavním cílem této bakalářské práce je rešeršní studie a shrnutí dosavadních poznatků v oboru plynových ložisek. Tato ložiska se v poslední době používají stále častěji a své uplatnění nalézají především u vysokootáčkových strojů, u kterých není možné použití běžných ložisek.

ABSTRACT

The main objective of the bachelor thesis is to write a research study and summarize existing knowledge in the field of air bearings. These bearings are being used more often recently, especially in high speed machines, because conventional bearings are not suitable for these machines.

KLÍČOVÁ SLOVA

Plynová ložiska, rychloběžné stroje, výpočet axiálního vzduchového ložiska

KEYWORDS

Air bearings, fast running machines, thrust air bearing calculation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOLNÍČEK, P. *Rešeršní studie zaměřená na vzduchová ložiska*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Chromek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Rešeršní studie zaměřená na vzduchová ložiska“ tvořil samostatně po konzultacích a s využitím odborné literatury.

V Brně dne 25. 5. 2015

.....
Petr Dolníček

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl velice poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Lukáši Chromkovi za jeho ochotu, pomoc a cenné rady a připomínky, které mi během psaní této práce byly poskytnuty. Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům, kteří mi během studia byli oporou.

OBSAH

1	Úvod	15
2	Formulace problému	15
2.1	Rozdělení ložisek	15
2.1.1	Kluzná ložiska.....	16
2.1.2	Valivá ložiska	17
2.2	Vývoj kluzných ložisek v ČR.....	18
2.2.1	SVÚSS Běchovice	18
2.2.2	Techlab s.r.o.....	18
2.2.3	PBS	18
3	Vzduchová ložiska	19
4	Tuhost vzduchových ložisek.....	20
4.1	Způsoby zvýšení tuhosti.....	20
4.1.1	Zvýšením hmotnosti	20
4.1.2	Vakuové předpětí.....	20
4.1.3	Pomocí magnetů	20
4.1.4	Použitím dvou ložisek.....	21
5	Aerostatická ložiska.....	22
5.1	Princip činnosti.....	22
5.2	Aerostatická radiální ložiska.....	24
5.2.1	S diskrétními otvory.....	24
5.2.2	S plnicí spárou	24
5.2.3	S pórovitou kluznou plochou	25
5.3	Aerostatická axiální ložiska.....	26
5.3.1	S diskrétními otvory.....	26
6	Aerodynamická ložiska	27
6.1	Princip činnosti.....	27
6.2	Aerodynamická radiální ložiska	27
6.2.1	Ložiska s kapsami	28
6.2.2	Ložiska se spirálními drážkami	28
6.2.3	Stupňovitá ložiska.....	29
6.2.4	Fóliová ložiska radiální.....	29
6.2.5	Ložiska s naklápěcími segmenty	32
6.3	Aerodynamická axiální ložiska	35
6.3.1	Ložiska se spirálními drážkami	35
6.3.2	Fóliová ložiska axiální	36
6.3.3	Další možné konstrukce.....	38
6.3.4	Porovnání jednotlivých konstrukcí	39
7	Výpočet.....	40
7.1	Zadání.....	40
7.2	Vlastní výpočet	40
7.2.1	Únosnost ložiska	41

7.2.2	Tuhost filmu.....	43
7.2.3	Ztráty.....	44
7.2.4	Tlakový gradient.....	45
7.2.5	Hmotnostní průtok.....	46
7.2.6	Oteplení.....	47
7.2.7	Minimální a maximální hloubka drážky.....	48
7.3	Vyhodnocení výsledků.....	49
8	Závěr.....	50
	Seznam použitých symbolů.....	51
	Seznam obrázků.....	52
	Seznam tabulek.....	52
	Použitá literatura.....	53

1 Úvod

Ložiska jsou základní komponenty všech točivých strojů, která slouží k vymezení vzájemné polohy dvou částí mechanismu při jejich relativním pohybu. Především ale slouží ke snížení tření při tomto pohybu a tím tedy snížení ztrát a vznikajícího tepla, které je ve většině případů nežádoucí. [13]

2 Formulace problému

„Snaha použít vzduchu jako maziva v kluzném ložisku, tj. aby vzduchová vrstva mezi kluznými plochami byla dostatečně silná a schopná přenášet zatížení, je poměrně již dlouho známa. První uveřejněná práce je z roku 1854 (Hirn). Systematické teoretické i experimentální práce se však prováděly teprve v druhém desetiletí 20. století (Harrison, Ausman, Ford, Kato a Soda). Výsledky těchto prací se však používaly jen pro zvláštní případy kluzných uložení, většinou u laboratorních přístrojů a zařízení. Později se však výzkum plynem mazaných ložisek prováděl velmi intenzivně ve všech technicky vyspělých státech a jeho pozoruhodné výsledky způsobily, že se tato ložiska stále více používají nejen u měřicích a navigačních přístrojů v raketové technice a v kybernetických zařízeních, ale také u moderních rotačních strojů (v jaderných elektrárnách), textilních strojů a u chemických zařízení¹.”

V dnešní době nachází tato ložiska uplatnění mimo jiné u cirkulačních dmychadel (např. pro plynem chlazené reaktory) či u gyroskopů pro letectví a kosmonautiku v případě aerodynamických ložisek, dále pak ložiska pro brousící vřetena, ložiska zubních vrtaček atd. v případě aerostatických ložisek. [2]

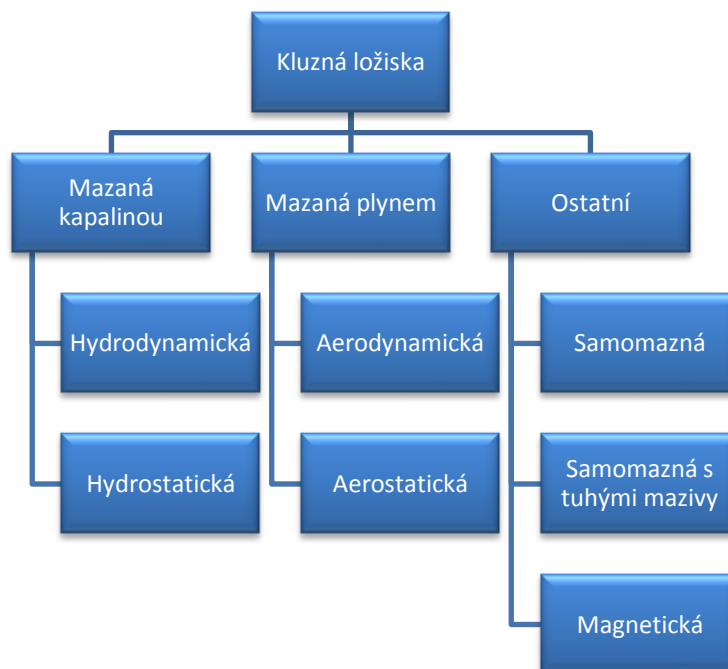
2.1 Rozdělení ložisek

Ložiska se dělí dle několika kritérií. Základní rozdělení podle tření mezi vzájemně se pohybujícími částmi je na valivá a kluzná. Další dělení ložisek je dle směru zatížení a to na axiální, radiální nebo kombinované.

¹ VINŠ, Jindřich. *Kluzná ložiska*. 2. přep.vyd. Praha: SNTL, 1971, 373 s.

2.1.1 Kluzná ložiska

Kluzná ložiska se dělí dle následujícího diagramu:



Obr. 1 Rozdělení kluzných ložisek

U ložisek mazaných kapalinou se k mazání nejčastěji používá olej, který je přiváděn mezi kluzné plochy a vytváří nosný olejový film. V případě ložisek mazaných plynem je princip obdobný s tím rozdílem, že nosným médiem je plyn. Dále se můžeme setkat s ložisky samomaznými, které jsou vyrobeny práškovou metalurgií z porézního materiálu ve kterém je přítomno mazivo. Při chodu toto mazivo vystupuje na povrch a zajišťuje mazání. Dalším typem jsou ložiska samomazná a tuhými mazivy, kde se mazivo nachází přímo ve struktuře ložiska. Speciálním případem jsou magnetická ložiska, která využívají magnetické levitace. Tato ložiska mají téměř nulové ztráty třením, ale jsou drahá na výrobu. Využití se našlo především u rychlovlaku Maglev (Magnetic Levitation) provozovaného například v Japonsku či Německu. Další dělení je podle tvaru kluzných ploch, např. válcové, kuželové, kulové atd. [12],[13]

2.1.2 Valivá ložiska

Valivá ložiska se dělí podle tvaru valivého tělesa:



Obr. 2 Rozdělení valivých ložisek

Valivá ložiska jsou konstrukčně podstatně složitější než ložiska kluzná. Skládají se většinou ze dvou kroužků, valivých těles a klece. Tato klec slouží k vedení valivých těles a jejich rovnoměrnému rozložení po celém obvodu ložiska. Vnitřní a vnější kroužky jsou vyrobeny z kvalitní legované oceli stejně jako valivá tělesa. Valivá ložiska se vyrábí buď otevřená, která se musí za provozu mazat, nebo jako uzavřená, která jsou při výrobě naplněna tuhým mazivem a jejich provoz je tak bezúdržbový.

Valivá ložiska se podle zatížení mohou vyrábět i jako víceřadé, kdy jsou valivá tělesa uspořádána vedle sebe do dvou i více řad, což zvyšuje jejich únosnost. [12],[13]

2.2 Vývoj kluzných ložisek v ČR

Plynová ložiska mají v České republice svoji historii, ta bude v krátkosti popsána v několika následujících odstavcích.

2.2.1 SVÚSS Běchovice

Jako první se začal vývojem zabývat Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů (SVÚSS) Běchovice a již od roku 1968. Na konci 70. let vznikl samostatný odbor Mechanika strojů a jejich částí, jehož zakladatelem byl Ing. Jindřich Vinš. Ústav se zabýval především výzkumem a vývojem hydrodynamických ložisek, ale probíhal také výzkum hydrostatických a plynem mazaných ložisek. Právě v oblasti plynových ložisek bylo dosaženo významného úspěchu. Za zmínku stojí především vývoj aerodynamického uložení rotoru expanzní turbíny pro zkapalňování helia, která prokázala výbornou trvanlivost a spolehlivost. Tato turbína pracovala při otáčkách až $300\,000\text{ min}^{-1}$. Dalším úspěchem byl vývoj zubní vrtačky, jejíž rotor byl umístěn v aerostatických ložiscích a dosahoval otáček až $750\,000\text{ min}^{-1}$. Firma se rozpadla po roce 1989 z finančních důvodů. [14]

2.2.2 Techlab s.r.o.

Druhou firmou zabývající se vzduchovými ložisky je Techlab. Tato firma vznikla kolem roku 1994. Byla založena bývalými pracovníky SVÚSS Běchovice, kteří se po rozpadu rozhodli ve vývoji pokračovat a založili si vlastní firmu. Firma se zabývá návrhem a výpočtem uložení rotorů pro rychloběžné stroje, dynamickou analýzou rotorů nebo také speciální měřicí technikou. Firma funguje dodnes a má za sebou již několik úspěšných projektů. Některé z nich byly i pro výzkumné středisko v CERNU. Konkrétně se jednalo o návrh aerodynamického uložení cirkulátoru argonu. [15]

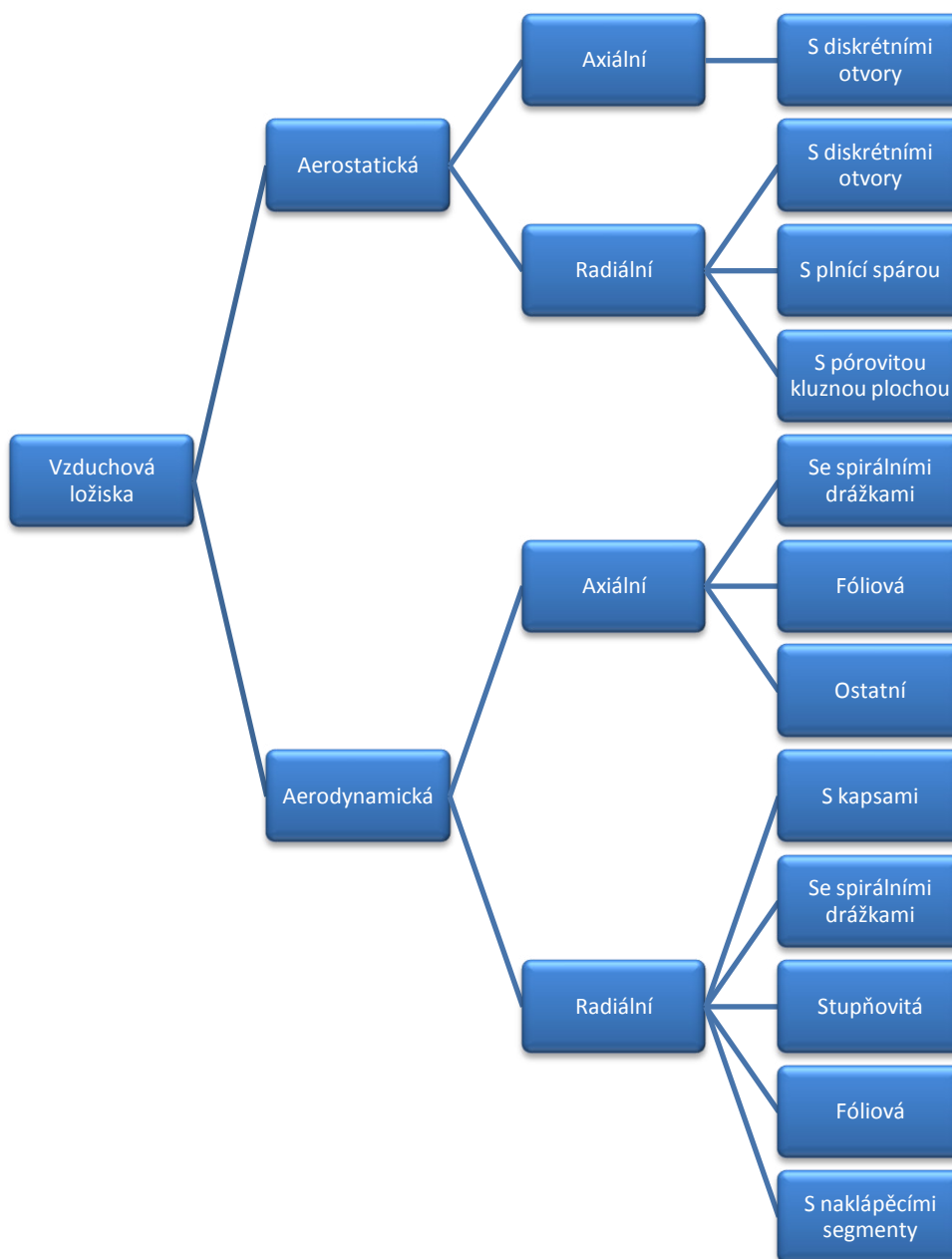
2.2.3 PBS

Další firmou, která stojí za zmínku, je PBS (První brněnská strojírna). Firma byla založena roku 1814. Zajímavostí je, že součástí firmy byla i Waniekova strojírna, která však byla přestavena a dnes je známá jako obchodní centrum Vaňkovka. Po druhé světové válce se PBS rozšířila a postavila nové závody v Tlmačích, Třebíči, Velké Bíteši, Oslavanech a Mikulově. V oboru plynových ložisek je pro nás zajímavá především PBS Velká Bíteš, která se roku 1991 osamostatnila a tvoří tak samostatný podnik, který se zabývá mimo jiné letectvím a leteckými motory. Využití plynových ložisek našla u heliové expanzní turbíny, jejíž rotor je umístěn na plynových dynamických ložiscích. Tato turbína slouží ke zkapalňování helia. V současné době je v PBS Velká Bíteš vyvíjeno aerodynamické uložení rotorů klimatizačních jednotek pro vojenské letouny. [16],[17]

3 Vzduchová ložiska

Vzduchová ložiska jsou ložiska, která využívají tenké vrstvy stlačeného vzduchu, která poskytuje mimořádně nízké tření mezi dvěma vzájemně se pohybujícími povrchy. Tyto povrchy nejsou za provozu v kontaktu. To umožňuje odstranění problémů klasických ložisek, jako jsou ztráty třením, opotřebením, hlučností, nutností mazání a s tím spojené náklady na údržbu, které jsou u vzduchových ložisek téměř nulové.

Vzduchová ložiska se dělí na aerodynamická, kde se vrstva vzduchu vytvoří vzájemným pohybem kluzných ploch a aerostatická, kde je stlačený vzduch externě přiváděn přímo mezi kluzné plochy. [1]



Obr. 3 Rozdělení vzduchových ložisek

4 Tuhost vzduchových ložisek

Jednou z nejdůležitějších vlastností všech ložisek je tuhost nosného filmu. Zvýšení tuhosti se dosahuje například pomocí předpětí ložiska. V případě valivých ložisek jsou valivé elementy předepjaty vůči dráze ve vnitřním i vnějším kroužku. Důsledkem předpětí je ovšem také vyšší tření a tím pádem i opotřebení, velikost předpětí tak musí být dobře zvážena. V případě vzduchového ložiska jsou faktory určující jeho tuhost: tlak ve vzduchové mezeře, tloušťka vzduchové mezery a průmět plochy ložiska.

Předpětí lze dosáhnout v podstatě čtyřmi způsoby – přidáním hmotnosti, pomocí vakua, magnetů, nebo montáží dvou ložisek s opačnou orientací.[3]

4.1 Způsoby zvýšení tuhosti

4.1.1 Zvýšením hmotnosti

Nejjednodušší způsob je přidání hmoty rotoru. To způsobí, že se ložisko pohybuje po menší, avšak tužší vzduchové mezeře a je tedy méně náchylné na změny velikosti vzduchové mezery. Nevýhodou je právě přidání hmoty, ale v systémech, které již hmotné jsou, je tato metoda spíše výhodná. Přidaná hmota má za následek to, že snižuje jinak vysokou akceleraci ložiska a rychlou regulační odezvu. Metodu lze aplikovat pouze na ložiska pracující ve vodorovné poloze. [4]

4.1.2 Vakuové předpětí

Další metodou je použití vakuového předpětí. Vakuum se používá k vytvoření předpětí místo přidávání hmotnosti, popsanému v předchozím případě. Vzhledem k tomu, že vakuum je tvořeno podtlakem, který je asi 5÷6 krát menší než tlak vytvářený běžnými vzduchovými ložisky, je výsledný efekt stále zdvihací. Stlačený vzduch je rozváděn po vnějším obvodu ložiska, zatímco vnitřní oblast je tvořena částečným vakuem. Vakuové předpětí zvyšuje tuhost a pomáhá udržovat konstantní vzduchovou mezeru, bez přidání hmoty. Nevýhodou této metody je potřeba větší ložné plochy ložiska, aby bylo možno úspěšně vytvořit vakuum. Tato metoda se úspěšně používá v mnoha aplikacích, zejména pro ploché podložky a rovinné systémy. [4]

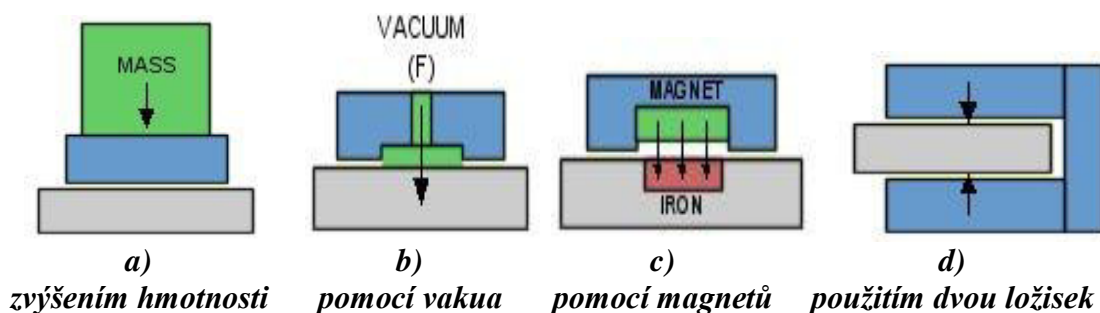
4.1.3 Pomocí magnetů

Třetí metodou je použití elektromagnetů. Magnetická síla mezi magnetem na pohyblivé části ložiska a feromagnetickým materiálem na stacionární (nepohyblivé) části zvětšuje velikost předpětí v ložisku a tím zvyšuje jeho tuhost. Tato metoda je vhodná zejména pro lineární ložiska a může být velmi efektivní z hlediska nákladů, protože snižuje výrobní tolerance jednotlivých komponent vzduchového ložiska. Jelikož se většina vzduchových ložisek vyrábí z nemagnetických materiálů, je potřeba do nich přidat materiál (například železo), který je magnetický, což zvyšuje složitost výrobního

procesu. Další nevýhodou je, že při vysokých rychlostech vznikají v magnetických materiálech tzv. vířivé proudy, které kladou odpor při pohybu. [4]

4.1.4 Použitím dvou ložisek

Poslední metodou k vytvoření předpětí je použití dvou vzduchových ložisek umístěných proti sobě. Díky této metodě získáme dvojnásobnou tuhost, než je tuhost jednoho ložiska, únosnost ale klesne téměř o polovinu. Jelikož pracují současně dvě ložiska, výsledná nepřesnost se zmenšuje a to má za následek přesnost chodu vyšší než u jakékoliv předchozí metody. Kromě toho lze tuto metodu provozovat v jakémkoliv směru. Pro použití tohoto způsobu je potřeba mít dva rovnoběžné povrchy s vysokou jakostí. Použitím této metody se dvojnásobně zvyšuje hmotnost a prostorová dispozice celého ložiskového systému. Tato metoda je nejpoužívanější, protože poskytuje nejvyšší tuhost, přesnost chodu a univerzálnost. [4]



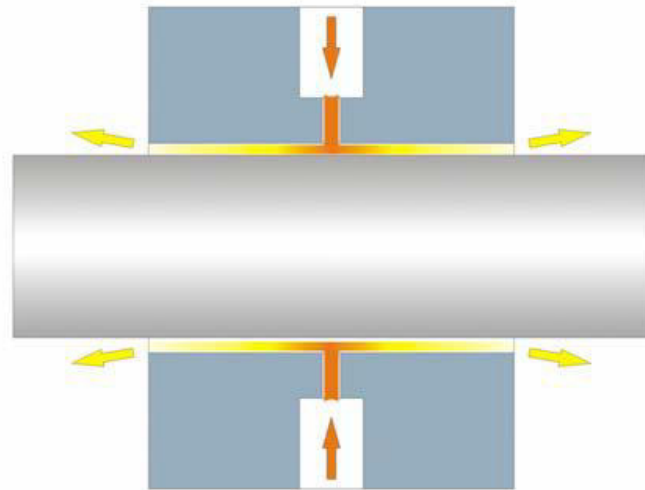
Obr. 4 Metody zvýšení tuhosti vzduchového ložiska [4]

5 Aerostatická ložiska

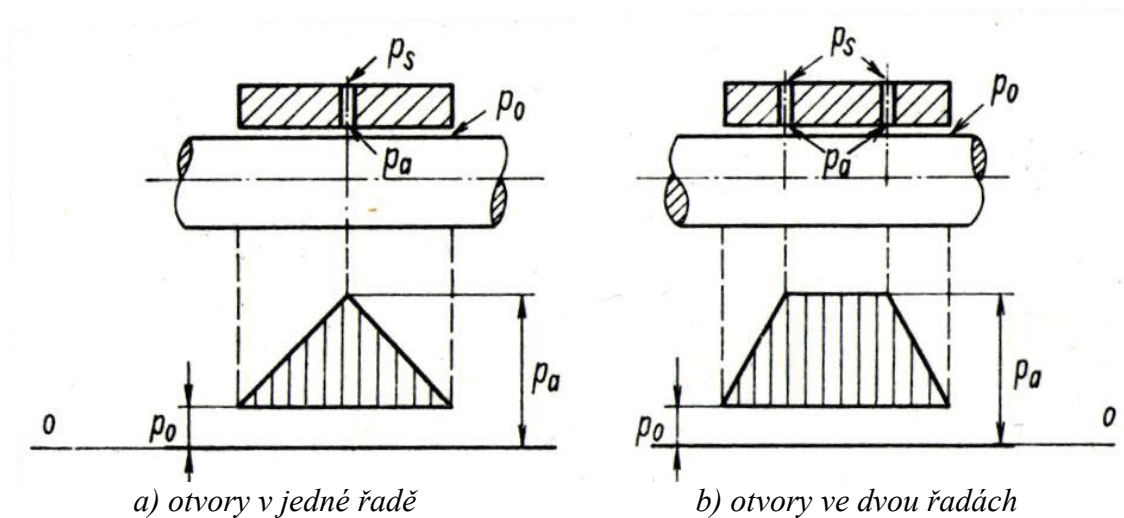
Pro činnost těchto ložisek je nezbytný zdroj stlačeného vzduchu, který se vhání z vnějšku a vytváří plynový film. Tento film má poměrně velkou tuhost a zcela odděluje kluzné plochy, čímž také vyrovnává jejich nerovnosti. Díky tomu je přesnost běhu vysoká. Jejich výhodou je především to, že mají jistou únosnost i za klidu, což u aerodynamických ložisek není možné. Další výhodou je i velmi malé tření, zahřívání je tedy minimální. [2]

5.1 Princip činnosti

Mezi pouzdro a hřídel se vhání stlačený plyn pomocí několika kanálků, které jsou rozmístěny po obvodu ložiska. Tento plyn vytváří tenký film mezi oběma povrchy a odchází bokem ložiska ven. [3]



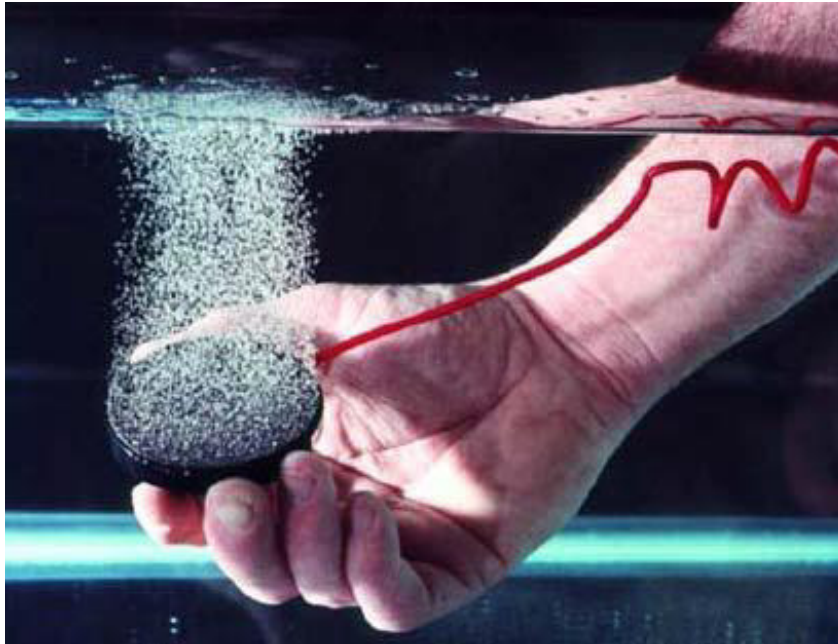
Obr. 5 Princip činnosti vzduchového ložiska [3]



Obr. 6 Průběh tlaku plynu v ložiscích [5]

Jelikož má stlačený plyn velice nízkou viskozitu, tloušťka vytvořeného filmu je velmi malá a pohybuje se od 5 do 50 mikrometrů. Novější ložiska jsou z porézního materiálu. Výhodou je, že nejsou potřeba žádné kanálky, ale plyn prochází skrz materiál. Plyn prochází po celém povrchu, což má za následek rovnoměrné rozložení tlaku. Tím vzrůstá tuhost a také únosnost ložiska.

Tato ložiska se vyrábějí i v segmentovém provedení, jak pro radiální, tak pro axiální směr. Přesnost aerostatických ložisek je až od dva řády vyšší, než u běžných kluzných ložisek. [3]

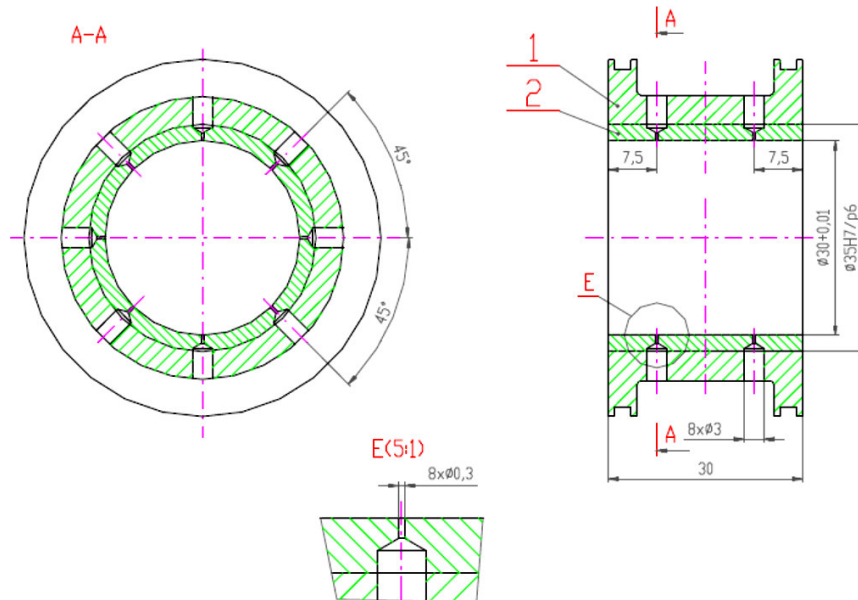


Obr. 7 Činnost aerostatického ložiska z pórovitého materiálu [3]

5.2 Aerostatická radiální ložiska

5.2.1 S diskrétními otvory

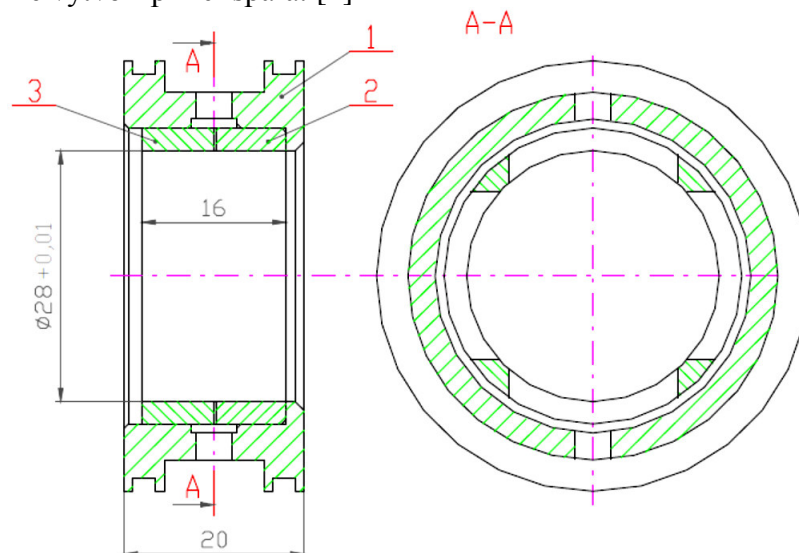
Konstrukčně jednoduchý a nejvíce používaný typ. Po obvodu ložiska se nachází několik otvorů, kterými je přiváděn stlačený plyn. Otvory mohou být i ve více řadách, čímž se zvyšuje únosnost ložiska. [2]



Obr. 8 Radiální ložisko s diskrétními plnicími otvory [2]

5.2.2 S plnicí spárou

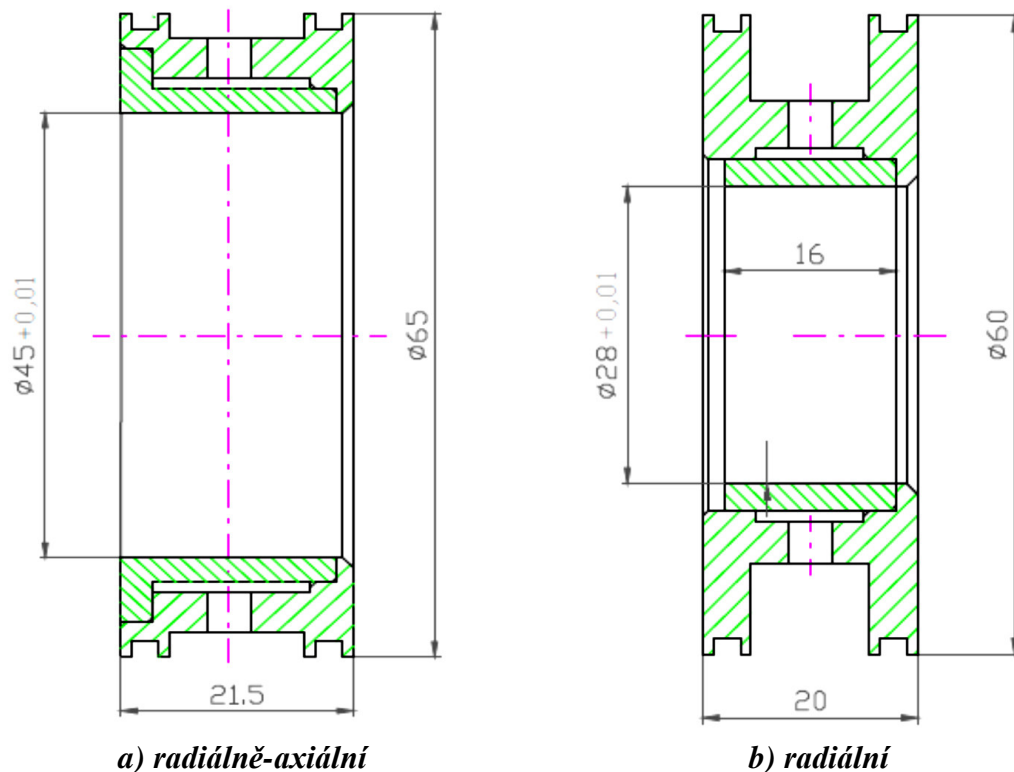
Po celém obvodu ložiska je vytvořena úzká spára. Její šířka je řádově v desítkách mikrometrů. Toho lze docílit pouze u axiálně dělené výstelky, ve které se v jedné polovině vytvoří plnicí spára. [2]



Obr. 9 Radiální ložisko s plnicí spárou [2]

5.2.3 S pórovitou kluznou plochou

Kluzná plocha je vyrobena z pórovitého materiálu, díky kterému je přiváděn plyn rozložen rovnoměrně po celé ploše. Ložisko má poté větší únosnost a lepší využití plynu, které má za následek snížení celkové spotřeby plynu. Kombinací pórovitého ložiska s ložiskem s vrtnými otvory je možné získat optimální vlastnosti. [2]



a) radiálně-axiální

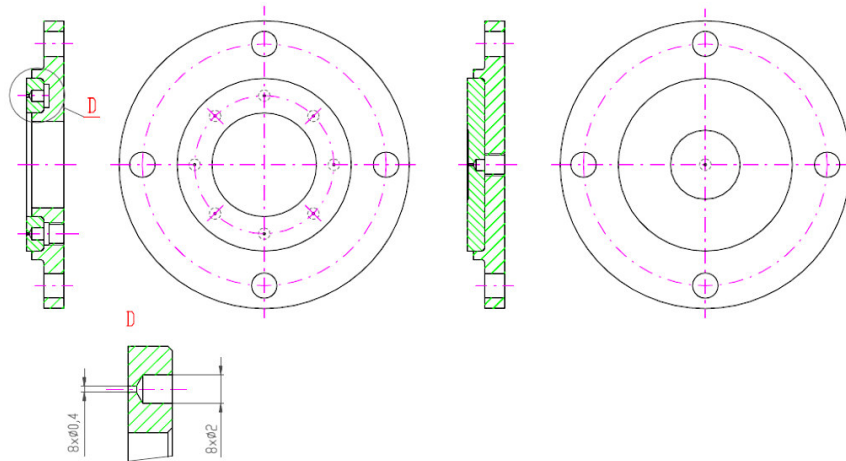
b) radiální

Obr. 10 Radiální ložisko s pórovitou kluznou plochou [2]

5.3 Aerostatická axiální ložiska

5.3.1 S diskretními otvory

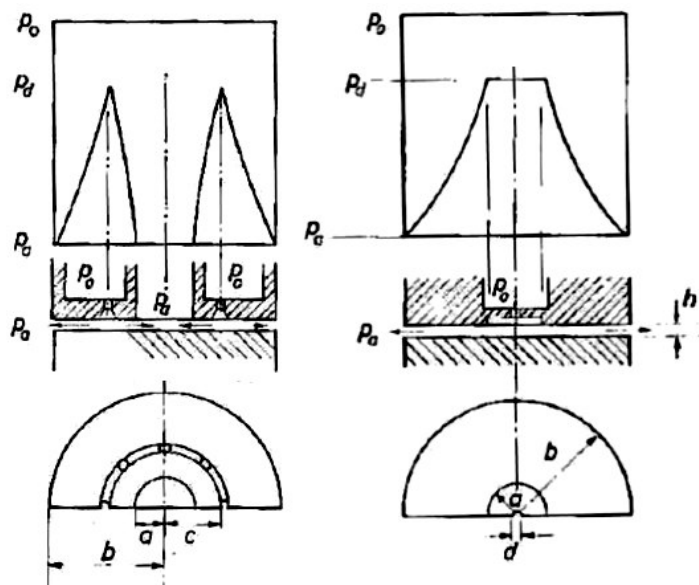
Princip funkce je velmi podobná radiálnímu ložisku. Konstrukce je řešena dvěma způsoby. Prvním je mezikruhové ložisko, kde je po obvodu několik otvorů, kterými se vhání stlačený plyn. Druhá možná konstrukce je pouze s jedním otvorem ve středu ložiska tzv. s centrální tryskou. [2]



a) mezikruhové s otvory po obvodu

b) s centrální tryskou

Obr. 11 Axiální ložisko s diskretními otvory [2]



a) s otvory po obvodu b) s centrální tryskou

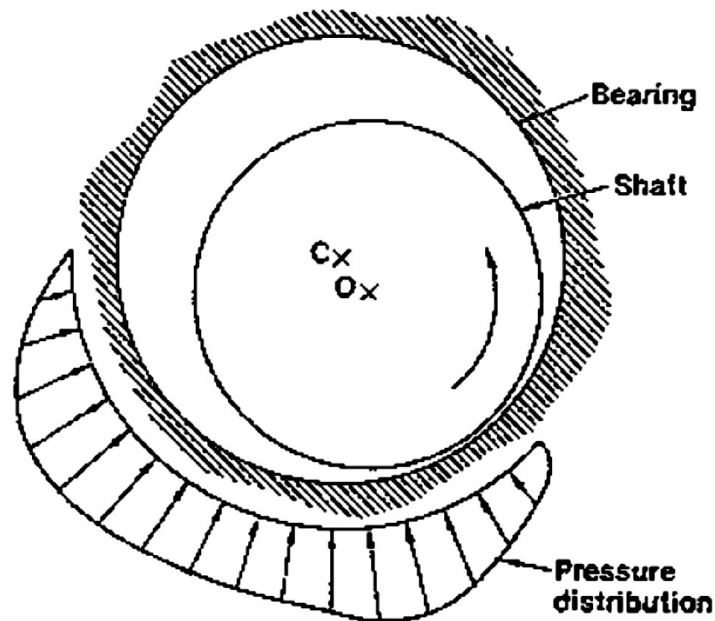
Obr. 12 Průběh tlaku u ložisek s diskretními otvory [8]

Únosnost ložiska s centrální tryskou je při stejné ploše vyšší, neboť ve středu ložiska je maximální tlak, zatímco u mezikruhového ložiska plyn uniká do okolí na vnějším i vnitřním průměru. [8]

6 Aerodynamická ložiska

6.1 Princip činnosti

Podstata funkce spočívá ve vzájemném pohybu dvou částí, resp. kluzných ploch, které vytvoří klínový tvar vzduchové mezery. Z důvodu nízké viskozity plynu musí být vzájemná rychlost povrchů vysoká a to desítky až stovky tisíc otáček za minutu. Z toho lze vyvodit, že aerodynamická ložiska se používají především u rotorů, které pracují při velmi vysokých otáčkách. Při vzájemném pohybu se v ložiskové mezeře vytváří tenký nosný film. Vzhledem k velmi malé tloušťce filmu je také důležité, aby byla velice vysoká kvalita povrchů. Abychom předcházeli nadměrnému opotřebování, je nezbytné, aby bylo zajištěno čisté pracovní prostředí, neboť nečistoty a další cizí částice by způsobovaly velké tření a následné zahřívání. Výhoda oproti aerostatickým ložiskům je ta, že není nutné mít zdroj stlačeného vzduchu. Na druhou stranu, nevýhoda těchto ložisek je především v téměř nulové únosnosti při nízkých otáčkách. [2],[3],[6]



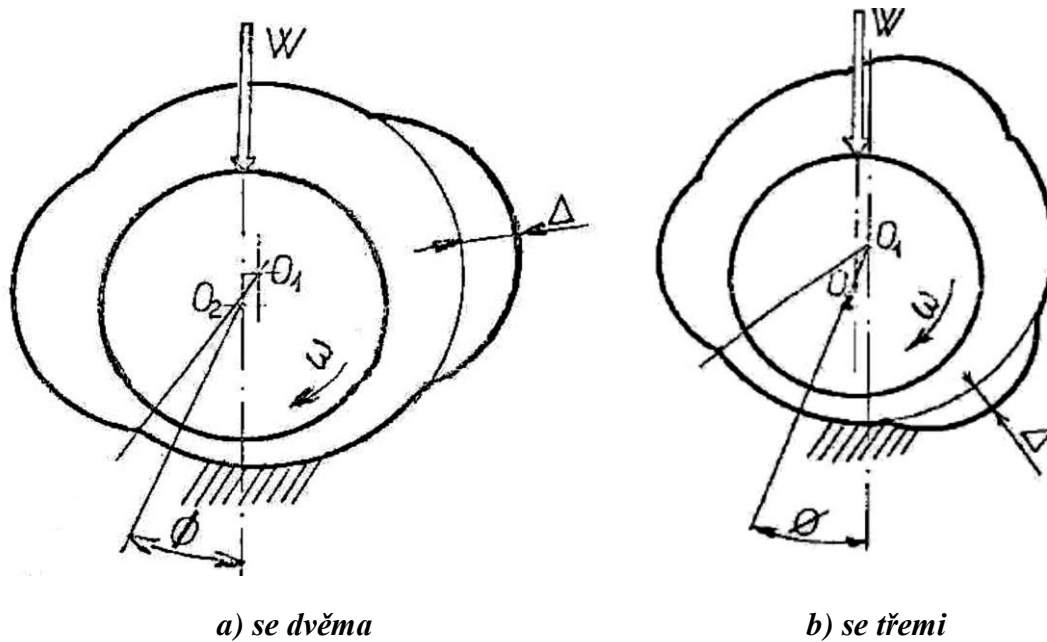
Obr. 13 Průběh tlaku v ložiskové mezeře [7]

6.2 Aerodynamická radiální ložiska

Aerodynamická ložiska pracují na stejném principu jako ložiska hydrodynamická. Rozdíl plynových a kapalinových ložisek je v tom, že plyn má oproti kapalině mnohem nižší dynamickou viskozitu. Není možné tedy použít kruhová či citronová ložiska, jelikož by měly velmi špatnou stabilitu chodu. Abychom zajistili dostatečnou stabilitu rotoru, je nutné použít složitější geometrii ložisek. Pro uložení, která jsou méně náročná, nám postačí například ložiska s kapsami nebo ložiska se spirálními drážkami, pro více náročná uložení je již nutné použít složitějších konstrukcí. [6]

6.2.1 Ložiska s kapsami

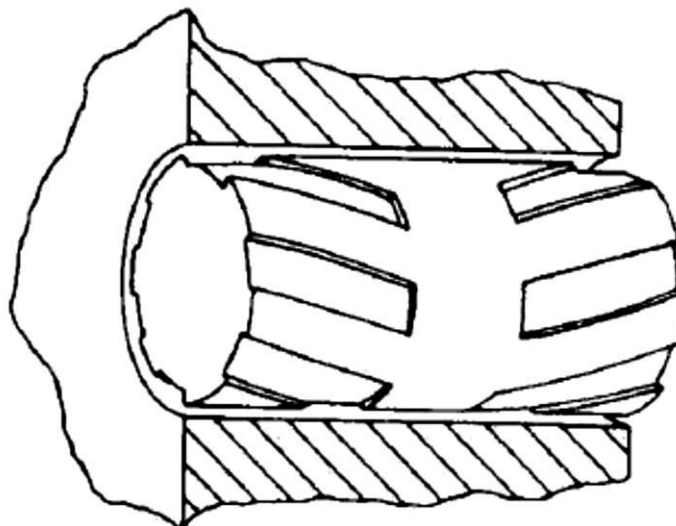
Tato ložiska jsou modifikací tříplochého nebo citronového ložiska. Podle konstrukce mohou být buď se dvěma kapsami, nebo se třemi kapsami. Dvě nebo tři tlakové špičky, které vznikají po obvodu vlivem kapes, zajišťují vrácení čepu do středu ložiska a tím zlepšují jeho stabilitu. [6]



Obr. 14 Ložisko s kapsami [6]

6.2.2 Ložiska se spirálními drážkami

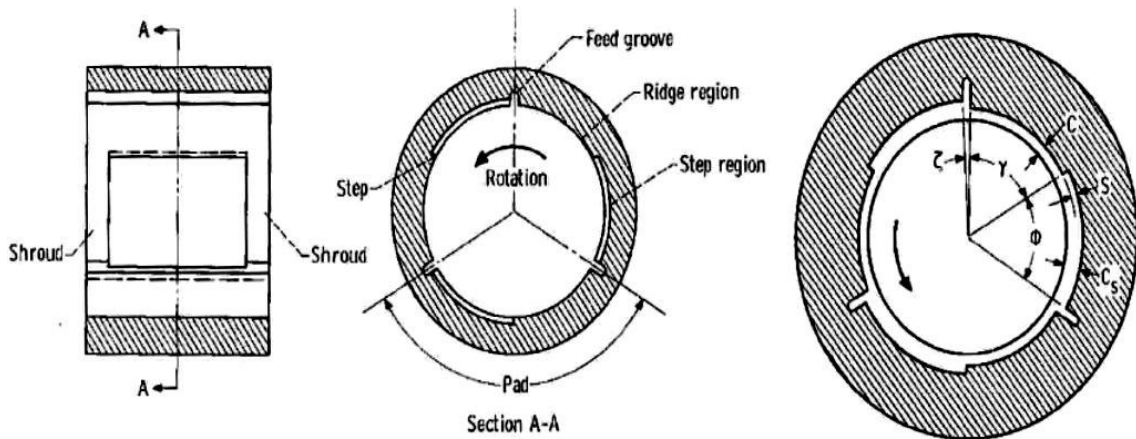
Tato ložiska mají po obvodu dvě řady drážek, které tvoří část spirály. Tyto drážky čerpají plyn a vhání ho do ložiska. Tím je zajištěna požadovaná únosnost a stabilita ložiska. [6]



Obr. 15 Ložisko se spirálními drážkami [6]

6.2.3 Stupňovitá ložiska

Tento typ je prakticky nepoužívaný z důvodu velmi obtížné technologie výroby



Obr. 16 Stupňovité ložisko [2]

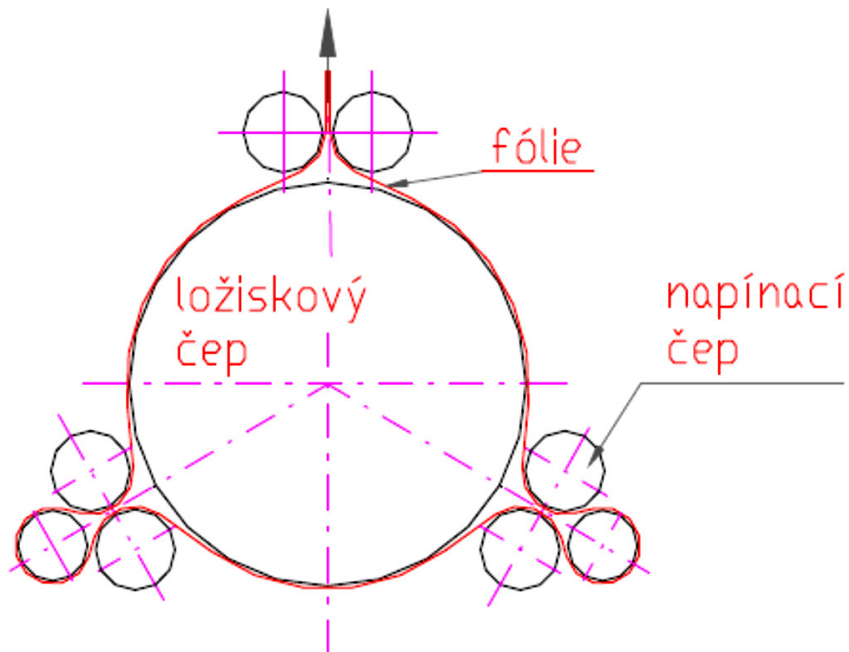
Výše zmíněné typy aerodynamických ložisek vykazují poměrně dobré dynamické vlastnosti, avšak nároky na přesnost výroby jsou velmi vysoké. Ložisková vůle musí být velice malá (jednotky mikrometrů) a provoz s takovou vůlí je problematický kvůli zahřívání ložiska za provozu a následným teplotním dilatacím, které mohou v krajním případě vést až k vymezení vůle a následnému zadření ložiska. Tento jev by samozřejmě vedl k destrukci ložiska a je proto nutné se mu vyhnout.

Ložiska, která pracují za velmi vysokých otáček nebo při náročných provozních podmínkách musí mít nejen dobré dynamické vlastnosti, ale musí být také schopny se přizpůsobit daným podmínkám. Tomu vyhovují dva typy ložisek, a to ložiska fóliová a ložiska s naklápěcími segmenty (LNS). [6]

6.2.4 Fóliová ložiska radiální

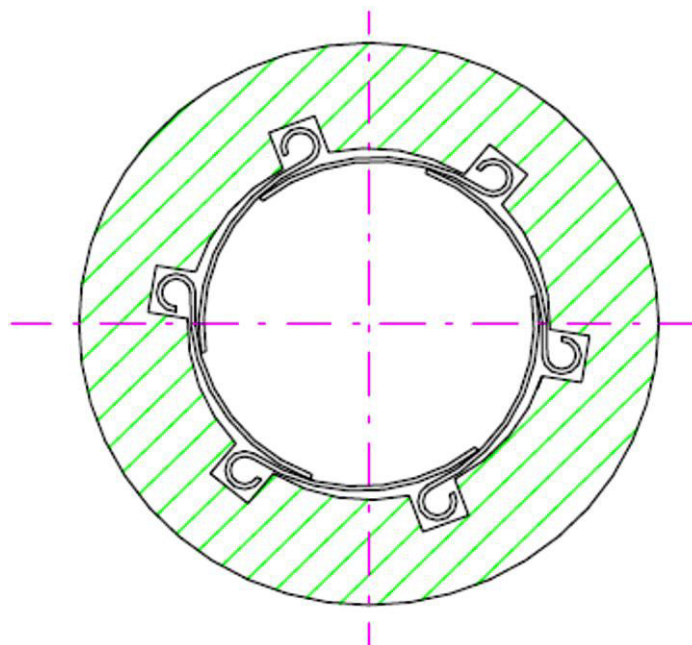
Kluzná plocha fóliových ložisek je tvořena jedním nebo více poddajnými elementy. Geometrie těchto elementů je schopna se měnit v závislosti na velikosti aerodynamického tlaku plynového filmu. Základní dva typy fóliových radiálních ložisek jsou ložiska s fólií taženou a fólií ohýbanou. V obou případech tvar pracovní mezery není zcela optimální, což zvláště při rozběhu rotoru způsobuje problémy vzniklé v důsledku tření fólií přitlačovaných k povrchu čepu. [6]

6.2.4.1 S taženou fólií



Obr. 17 Fóliové ložisko s taženou fólií [6]

6.2.4.2 S ohýbanou fólií

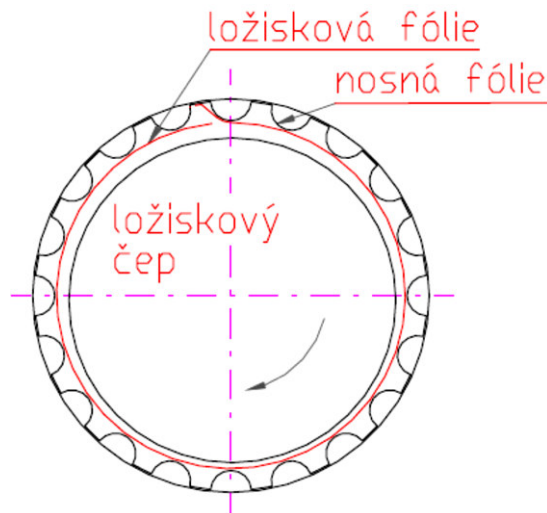


Obr. 18 Fóliové ložisko s ohýbanou fólií [6]

U těchto dvou typů fóliových ložisek je nevhodná geometrie plynové nosné vrstvy, která není schopna přizpůsobit se provozním podmínkám.

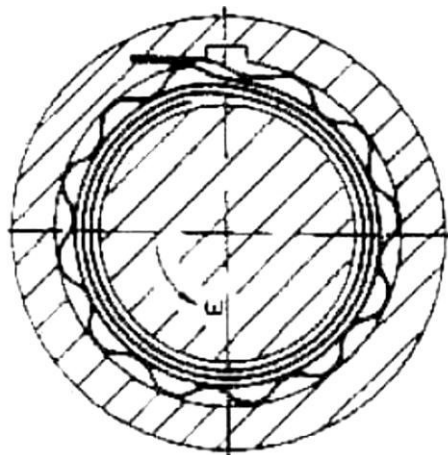
6.2.4.3 S podpěrnou fólií - Hydresil

Je složeno ze dvou fólií. První, silnější fólie je zvlněná a podpírá druhou, tenčí fólii, která tvoří kluznou plochu ložiska. První fólie se kvůli svému tvaru také nazývá tzv. bump foil. Obě tyto fólie jsou schopné se během provozu deformovat vzniklým aerodynamickým tlakem plynu, čímž se vytváří příznivá geometrie mezery mezi nábojem a ložiskem. Díky pružné zvlněné fólii je umožněn návrat obou fólií do původního tvaru. Tento typ ložiska je výrobně náročnější a může se snadno poškodit kvůli malé tloušťce fólie, která vytváří kluznou plochu. I přes tyto nevýhody je tento typ poměrně často používán díky svým dobrým dynamickým vlastnostem. [2],[6],[7]



Obr. 19 Fóliové ložisko typu Hydresil [2]

Vibrace rotoru způsobené jeho nevyvážeností mají za následek pohyb fólií, následkem čehož vzniká tření mezi podpěrnou fólií a tělesem ložiska, ale také mezi samotnými fóliemi. Toto tření však působí i jako dodatečné tlumení a společně s tlumením, které je poskytnuto prostřednictvím plynového filmu vytváří výborné dynamické vlastnosti a dokáže tlumit rázy způsobené vnějšími vlivy. Další přidavné tlumení je možné u jedné z variant ložiska Hydresil, kde je ložisková fólie vinutá několikrát kolem obvodu ložiska. Tato tenká fólie je slabinou ložisek Hydresil, jelikož se může snadno poškodit nejen v provozu, ale i při samotné montáži a poškodí se tak celé ložisko. [6]



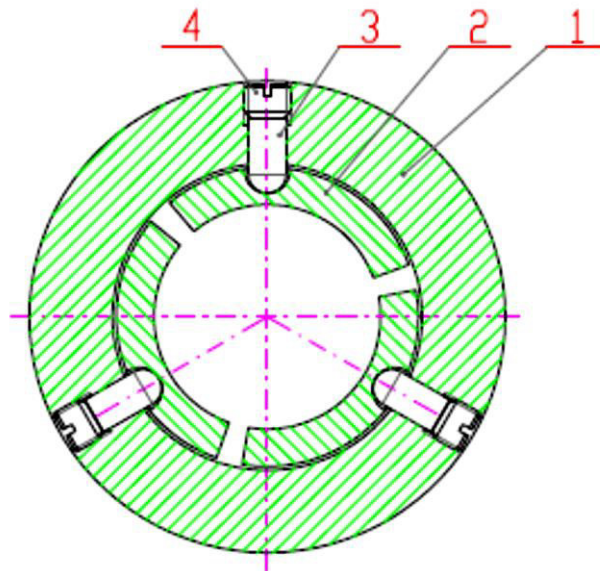
Obr. 20 Varianta ložiska Hydresil s více vrstvami fólie [6]

6.2.5 Ložiska s naklápěcími segmenty

Tato ložiska jsou svojí konstrukcí velmi podobná ložiskům hydrodynamickým. Rozdíl je v tom, že zatímco hydrodynamická ložiska mají většinou 4 až 5 naklápěcích segmentů, aerodynamická ložiska tohoto typu mají segmenty zpravidla 3. To je dáno tím, že viskozita plynů je mnohem menší než viskozita kapalin a je tedy nutné mít delší kluznou plochu, aby se vytvořil dostatečný tlak v plynovém filmu a ložisko tak získalo požadovanou únosnost. Nároky na výrobu těchto ložisek jsou velmi vysoké, neboť je nutné zajistit určitou velikost ložiskové vůle. I z tohoto důvodu ložisko obsahuje pouze 3 segmenty, které jsou většinou řešeny tak, aby bylo možné ložiskovou vůli nastavovat přímo při montáži, což by u vyššího počtu segmentů znamenalo značnou komplikaci a náročnost při nastavování vůle. [6]

6.2.5.1 Jednoduchá ložiska s naklápěcími segmenty

U tohoto provedení jsou segmenty (2) umístěny na koncích polokulových čepů (3). Pomocí dorazů (4) lze nastavit polohu těchto čepů a tím nastavovat nejen ložiskovou vůli, ale i polohu segmentů v ložisku což umožňuje posunutí středu ložiska.

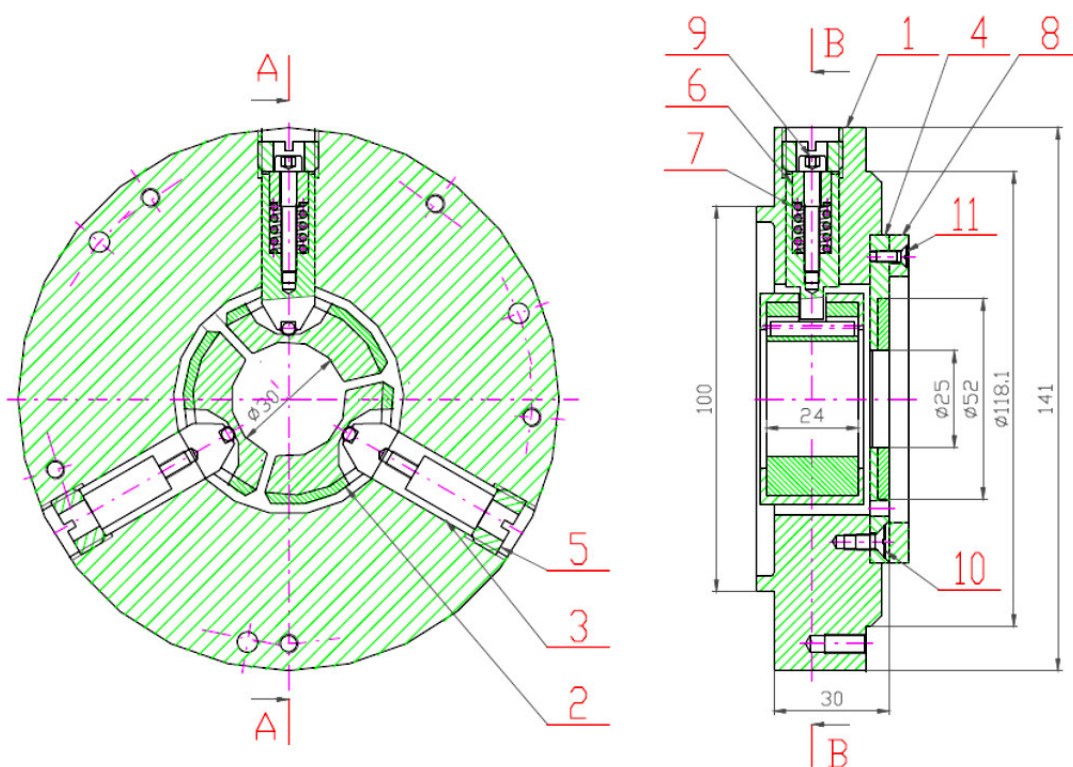


Obr. 21 Jednoduché ložisko s naklápěcími segmenty [6]

Vlivem zbytkové nevyváženosti rotoru dochází k pohybu segmentů. To vede k opotřebení kontaktních ploch a následkem toho se snižuje trvanlivost ložiska. Vlivem odlišných provozních teplot rotoru a ložiska se může výrazně měnit přednastavená ložisková vůle, protože ložisko nemá žádnou schopnost měnit své vlastnosti během provozu a přizpůsobit se tak provozním podmínkám. K odstranění tohoto problému slouží systém autokompensace ložiskové vůle používaný v propracovanějších systémech. [6]

6.2.5.2 Ložiska s naklápěcími segmenty a autokompenzací ložiskové vůle

Tato varianta ložiska umožňuje naklápění segmentu nejen v obvodovém, ale i v příčném směru bez většího opotřebení. Čep je uložený ve výřezu podpěry (3), která umožňuje jeho naklápění v příčném směru. Na čepu je umístěný segment (2), který se může naklápět v obvodovém směru. Segment se po čepu odvaluje, jelikož hlavní pohyb segmentu je v obvodovém směru. Díky tomu je tření a následné opotřebení minimální. Systémem autokompenzace je obvykle opatřen pouze jeden segment, zbylé dva mají pomocí dorazů (5) nastavenou pevnou polohu. V případě, že by se vůle zmenšila na hodnotu, která by mohla být nebezpečná, umožní tento systém posun segmentu v radiálním směru a zvětší tak vůli. Posun způsobí síla, která je nastavena pomocí předpětí pružiny (7). Tato síla musí být menší než je únosnost segmentu. Pomocí šroubu (9) a dorazu (6) je nastavena základní ložisková vůle a předpětí pružiny. [2]

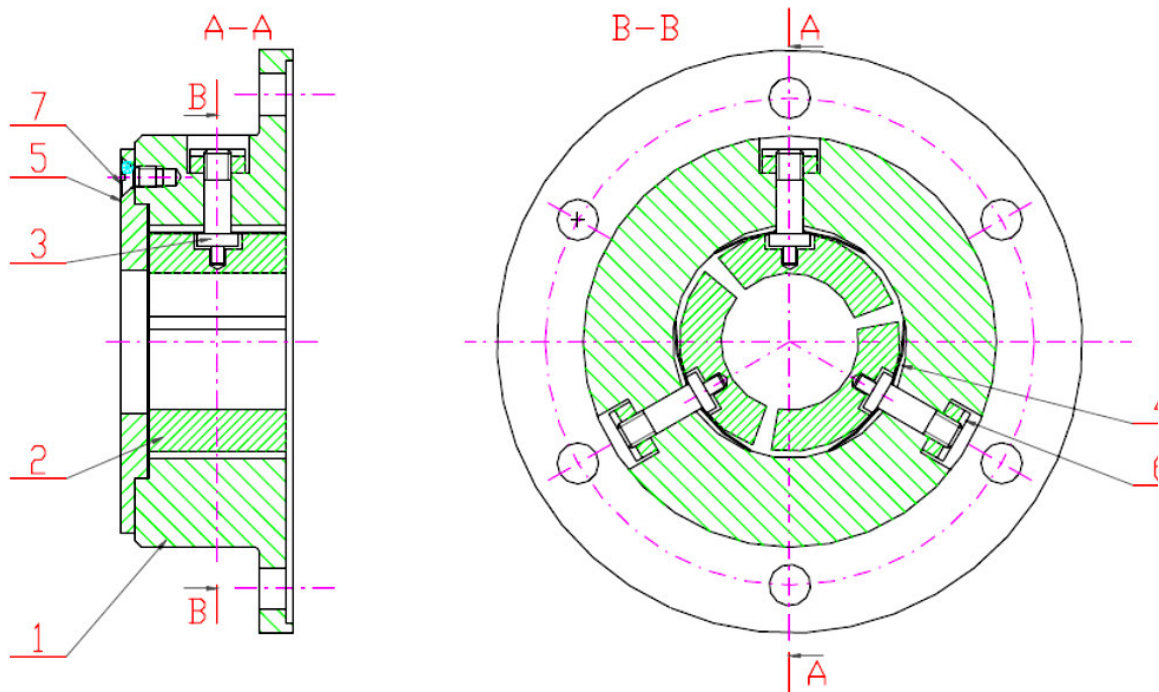


Obr. 22 Ložisko s naklápěcími segmenty a autokompenzací ložiskové vůle [2]

Tato ložiska mají výborné vlastnosti jako například vysoká spolehlivost, dlouhá trvanlivost a dobré provozní podmínky. Jeho výroba je však velmi drahá z důvodu složité konstrukce. [6]

6.2.5.3 Ložiska s naklápěcími segmenty podepřenými pružnými elementy

Cílem tohoto řešení bylo spojení jednoduché konstrukce a volného naklápění segmentu. To se povedlo kombinací fóliových ložisek a ložisek s naklápěcími segmenty. Ložisko tedy spojuje výhody obou typů a jeho vlastnosti jsou jednoduchá konstrukce, vysoká odolnost proti nestabilitě a dobré tlumící schopnosti. Konečné řešení má výborné dynamické vlastnosti a zároveň je konstrukčně nenáročné a tudíž relativně levné na výrobu. [2],[6]

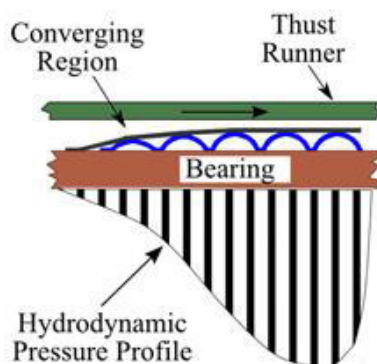


Obr. 23 Ložisko s naklápěcími segmenty podepřenými pružnými elementy [6]

Elastické elementy (4) jsou pomocí šroubů (3) a matic (6) zdeformovány do požadovaného tvaru. Na těchto elementech jsou uloženy segmenty (2). Rozdíl mezi vnitřním poloměrem ložiskového tělesa (1) a vnějším poloměrem segmentu zajišťuje, že se segment může volně odvalovat po vnitřním povrchu pružného elementu. Ten má předpětí takové, aby únosnost segmentu byla větší než síla potřebná pro deformaci pružné podpěry. Předpětí ložiska společně s výrobní vůlí stanoví rozmezí, ve kterém se čep může pohybovat. Maticemi (6) se poté nastaví základní vůle ložiska. Tvar ložiskové mezery může být nastaven dle potřeby, protože závisí pouze na rozdílu poloměrů čepu a segmentu, čímž se liší od běžných fóliových ložisek. Co mají ale společné je to, že k tlumení plynového filmu navíc přispívá i tření mezi pružnými podpěrami a ložiskovým tělesem. Celkový útlum dále zvyšuje také plyn vytlačovaný z mezery mezi pružným elementem a tělesem ložiska.[6]

6.3 Aerodynamická axiální ložiska

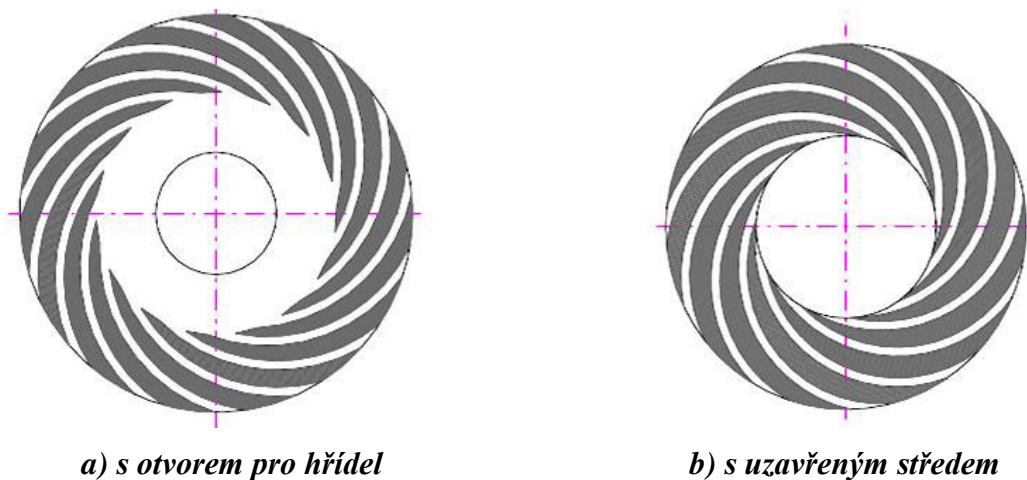
Pracují na stejném principu jako aerodynamická radiální ložiska. V obou případech vzniká vzduchová mezera klínového tvaru. U radiálních ložisek je příčinou jejího vzniku excentricita mezi středem ložiska a středem pohybující se hřídele, u axiálních ložisek je touto příčinou odklon vzájemně se pohybujících povrchů způsobený axiálním zatížením. [7]



Obr. 24 Průběh tlaku v aerodynamickém axiálním ložisku [10]

6.3.1 Ložiska se spirálními drážkami

Tento typ ložiska je mezi axiálními nejvíce rozšířený a nejvíce používaný. Konstrukce ložiska je relativně jednoduchá, tudíž i náklady na výrobu nejsou nijak vysoké ve srovnání s dalšími typy. Další jeho výhodou je vysoká únosnost, kterou má ze všech typů axiálních ložisek největší. Tloušťka plynového filmu i hloubka spirálních drážek se pohybuje v řádech jednotek až desítek mikrometrů. [2]



a) s otvorem pro hřídel

b) s uzavřeným středem

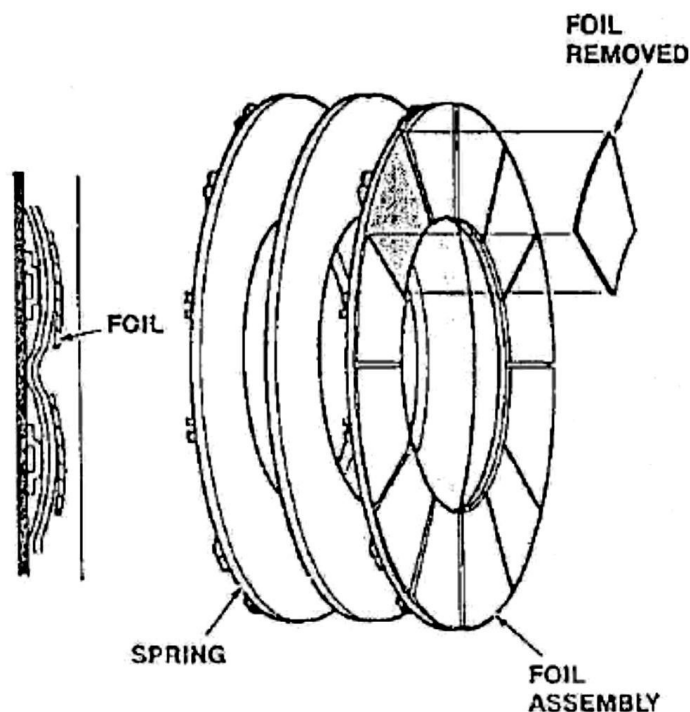
Obr. 25 Axiální ložisko se spirálními drážkami [6]

Velice dobrou únosnost zajišťuje především ložisko s uzavřeným středem. To je způsobeno tím, že plyn načerpaný do středu ložiska pomocí spirálních drážek nemá kudy unikát. Oproti druhému typu ložiska, tzn. s otvorem pro hřídel, má toto ložisko až 3x větší únosnost. Z důvodu neprůchozího středu je však obtížnější montáž ložiska. Jeho použití je tak velmi omezené a ložisko je většinou umístěno na konci rotoru. Další nevýhodou jsou vysoké teploty vznikající za jeho provozu, ohřátý vzduch totiž nemá kudy unikát. [2],[6]

6.3.2 Fóliová ložiska axiální

6.3.2.1 Originální fóliové ložisko

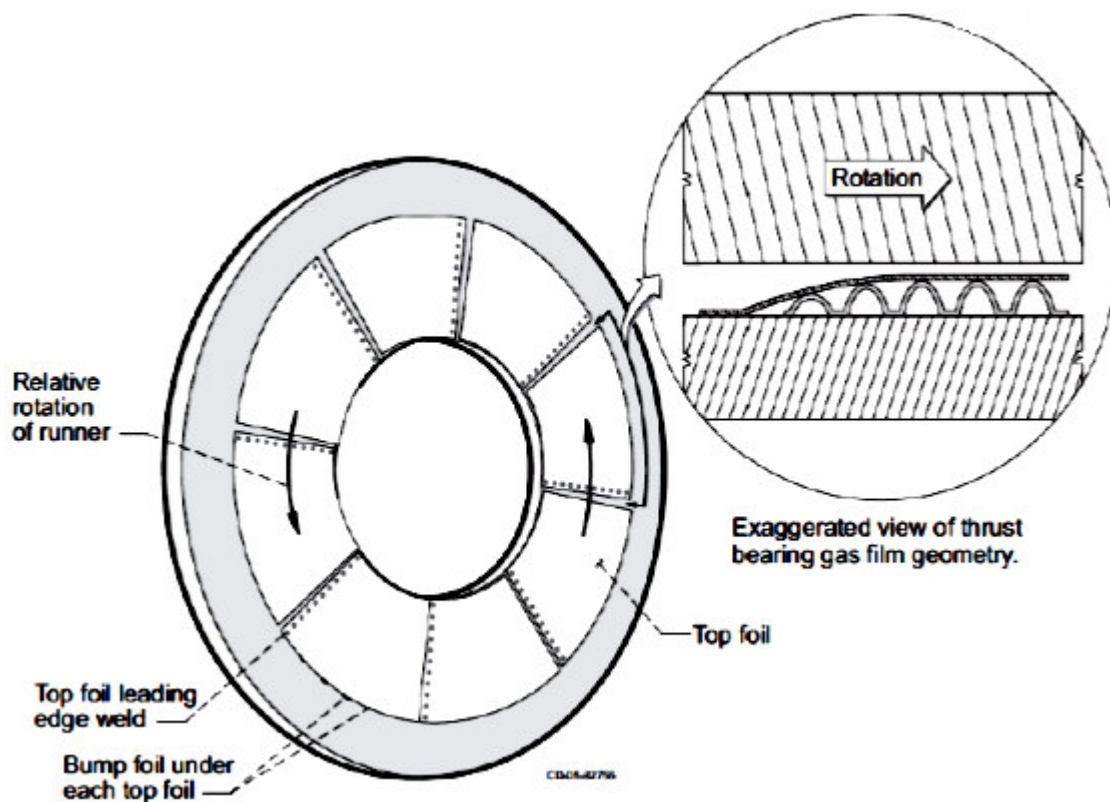
Tenká fólie je podepřena silnější fólií deformovanou tak, aby se vytvořilo několik ploch klínového tvaru. Původní aerodynamické fóliové ložisko se skládalo z tenkých fólií uchycených k pružné membráně. Tato membrána byla opatřena žebry, která sloužila k podepření fólie. Ložiska tohoto typu jsou schopné se z části přizpůsobit provozním podmínkám, jeho vlastnosti se však mohly dále zlepšovat. [2],[6]



Obr. 26 Originální axiální fóliové ložisko [6]

6.3.2.2 Fóliové ložisko typu Hydresil

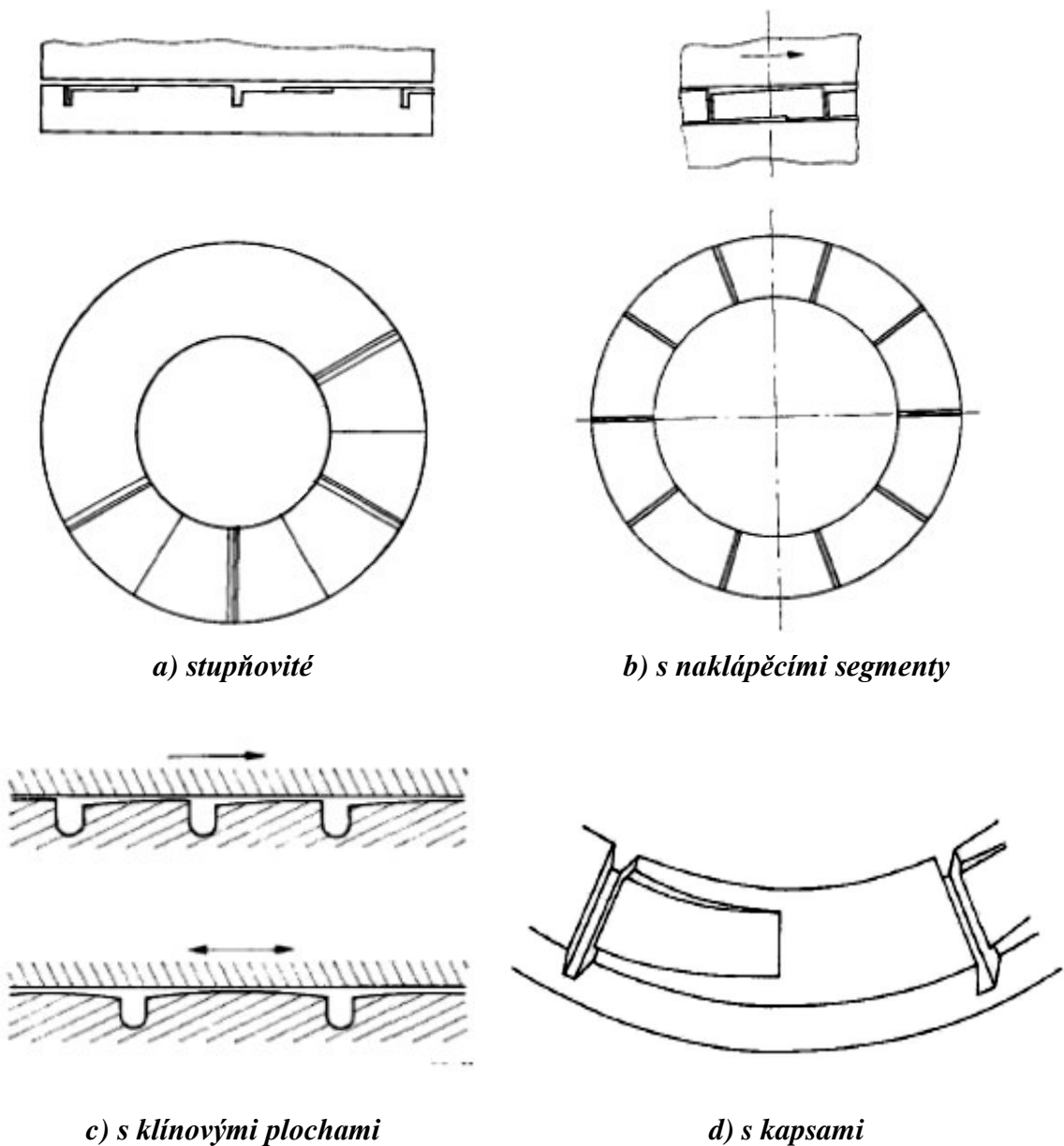
Fóliové axiální ložisko typu Hydresil vyvinuté v MIT (Massachusetts Institute of Technology) je postaveno na stejném principu jako radiální fóliové ložisko stejného názvu. Je tedy vyrobeno ze 2 fólií. Jedna tenká, která tvoří klznou plochu a druhá silnější, která je zvlněná a má funkci podpěrné fólie. Důvod tohoto uspořádání je také stejný, a sice ten, aby bylo možné měnit geometrii ložiskové mezery v závislosti na aerodynamickém tlaku vyvolaném provozními podmínkami, jako jsou otáčky či zatížení. Zvlněná podpěrná fólie dokáže také tlumit vibrace, které přichází z vnějšku. Tyto vlastnosti umožňují použití ložiska při obtížných provozních podmínkách. Jeho nevýhodou je však to, že v důsledku rozdělení klzné plochy je jeho únosnost poměrně nízká. Nejvyšší únosnost můžeme dosáhnout při volbě mezikruhového tvaru klzné plochy, nejnižší únosnost je totiž na okrajích klzné plochy, kde tlak plynu klesá až na hodnotu tlaku v okolí. [6]



Obr. 27 Fóliové axiální ložisko Hydresil [9]

6.3.3 Další možné konstrukce

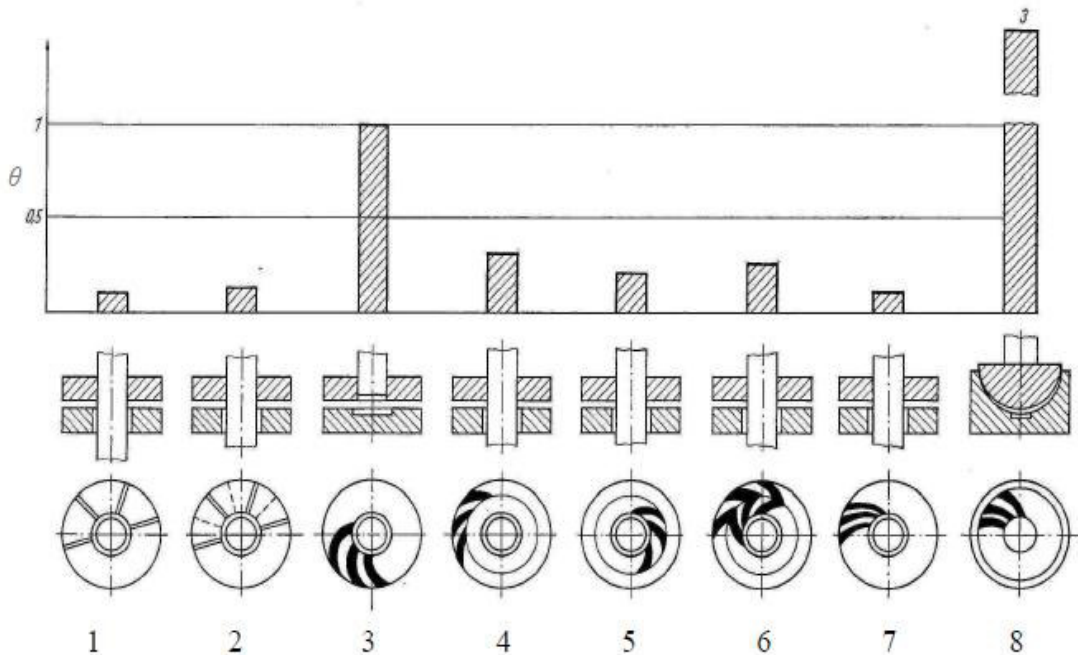
Následující konstrukční řešení nemají žádnou schopnost adaptace na provozní podmínky s výjimkou varianty a naklápěcími segmenty. Je tedy možné je použít tam, kde nejsou provozní podmínky příliš náročné a nedochází k jejich změně. Další jejich nevýhodou je poměrně nízká únosnost, která je pro určité aplikace nedostatečná, a proto jsou používána jen ojediněle. [6]



Obr. 28 Další možné konstrukce axiálních ložisek [6]

6.3.4 Porovnání jednotlivých konstrukcí

Jednotlivé konstrukční řešení aerodynamických axiálních ložisek lze porovnávat pomocí koeficientu únosnosti θ , který nám říká, jakou mají daná ložiska únosnost.



Obr. 29 Únosnost jednotlivých typů axiálních ložisek [6]

- 1 – ložisko s klínovými plochami, $\theta = 0,042$
- 2 – stupňovité ložisko, $\theta = 0,047$
- 3 – ložisko se spirálními drážkami (uzavřený střed), $\theta = 0,366$
- 4 – ložisko se spirálními drážkami čerpajícími dovnitř (s průchozím otvorem), $\theta = 0,125$
- 5 – ložisko se spirálními drážkami čerpajícími ven (s průchozím otvorem), $\theta = 0,085$
- 6 – ložisko s diagonálními drážkami, $\theta = 0,106$
- 7 – ložisko se spirálními drážkami čerpajícími dovnitř (bez těsnicího kruhu), $\theta = 0,045$
- 8 – polokulové ložisko se spirálními drážkami, $\theta = 1,106$

Jak je vidět, nejvyšší únosnost má ložisko polokulové se spirálními drážkami. Z důvodu velmi složité výroby se však moc nepoužívá. Druhou největší únosnost má pak ložisko se spirálními drážkami a uzavřeným středem, které lze použít pouze v několika specifických případech. Nejčastěji se tedy používá ložisko se spirálními drážkami a průchozím otvorem, které má třetí nejvyšší únosnost a jeho vlastnosti pro různé aplikace jsou vyhovující. [6]

7 Výpočet

Ze cvičných důvodů bude v rámci následující kapitoly proveden návrh aerodynamického axiálního ložiska s centripetálními spirálními drážkami. Dále budou spočteny všechny relevantní charakteristiky ložiska (únosnost, oteplení, tlakový spád, tuhost, průtok a ztrátový výkon) jako funkce provozních otáček a tloušťky nosného filmu. Imaginární stroj použitý v rámci následujícího výpočtu je turbochladič s rotorem uloženým horizontálně, na společné hřídeli je turbínové a dmyhadlové kolo, na disku axiálního ložiska jsou spirální drážky z obou stran (hlavní a pomocné axiální ložisko). Hřídel je dále uložena ve dvou aerodynamických ložiscích s naklápěcími segmenty (LNS), které nebudou v této kapitole řešeny, jelikož rovnice popisující jejich charakteristiky nelze řešit v uzavřeném tvaru a získání charakteristik ložisek je tak značně komplikované.

7.1 Zadání

Z konstrukčního uspořádání stroje vyplývají některá omezení, co se návrhu aerodynamického ložiska týče, jedná se o následující podmínky:

Maximální průměr axiálního ložiska D_2	60 mm
Průměr hřídele D_1	20 mm
Hloubka spirální drážky h_g	$20 \div 25 \mu\text{m}$
Přípustná tloušťka filmu h	$7 \div 10 \mu\text{m}$
Dále předpokládané provozní podmínky:	
Provozní otáčky	$60\,000 \text{ min}^{-1}$
Dynamická viskozita	$1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (vzduch 20°C)
Axiální síla (při provozních otáčkách)	100 N

7.2 Vlastní výpočet

Pomocným výpočtem bylo navrženo aerodynamické axiální ložisko se spirálními drážkami o následující geometrii.

Tab. 1 Zadané a vypočítané hodnoty

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Zadané hodnoty			
Vnitřní průměr	D_1	22	mm
Vnější průměr	D_2	50	mm
	α	0,73	l
Hloubka drážky	h_g	20	μm
Výška filmu	h	8	μm
Úhel drážky		71,2	$^\circ$
Otáčky	n	60 000	min^{-1}

Vypočtené hodnoty			
Škrtící průměr	D_t	29,56	mm
Vnější poloměr	R	25	mm
	N	2,27	-
	x	1,93	-
	y	3,5	-
	f_1	0,4695277	-
	f_2	5,4811131	-
	E	0,0837539	-
Minimální hloubka drážky	$h_{g,min}$	20,8	μm
Maximální hloubka drážky	$h_{g,max}$	29,6	μm
Kontrola únosnosti			
Nosnost ložiska	W	91,04	N

S tímto konkrétním ložiskem byly dále provedeny výpočty pro celý rozběh stroje a spektrum možných výšek filmu. Za předpokladu, že by byla známa závislost axiální síly na otáčkách, byly bychom schopni mapovat výšku filmu v celém spektru otáček.

7.2.1 Únosnost ložiska

Únosnost ložiska je spočtena pro zadané otáčky a tloušťku filmu. V případě, že nastane rovnost mezi zatížením a únosností ložiska, nastaví se „automaticky“ příslušná výška plynového filmu. Pokud je zatížení příliš velké nebo tloušťka filmu příliš malá, dojde k velkému ohřevu plynu, tento stav je pro dlouhodobý provoz nepřijatelný. Únosnost axiálního ložiska se spirálními drážkami je dána následujícím vztahem

$$W = \frac{3\pi\mu\omega R^4}{4h^2} \left(\frac{N^2 - 1}{N^2} \right)^2 E \quad 1$$

kde

$$E = \frac{2\alpha f_1}{f_2 + \frac{\alpha}{(1-\alpha)}} \quad N = \frac{D_2}{D_1} \quad R = \frac{D_2}{2} \quad x = \frac{b_g}{b_l} \quad y = \frac{h_g + h}{h} \quad 2, 3, 4, 5, 6$$

a dále

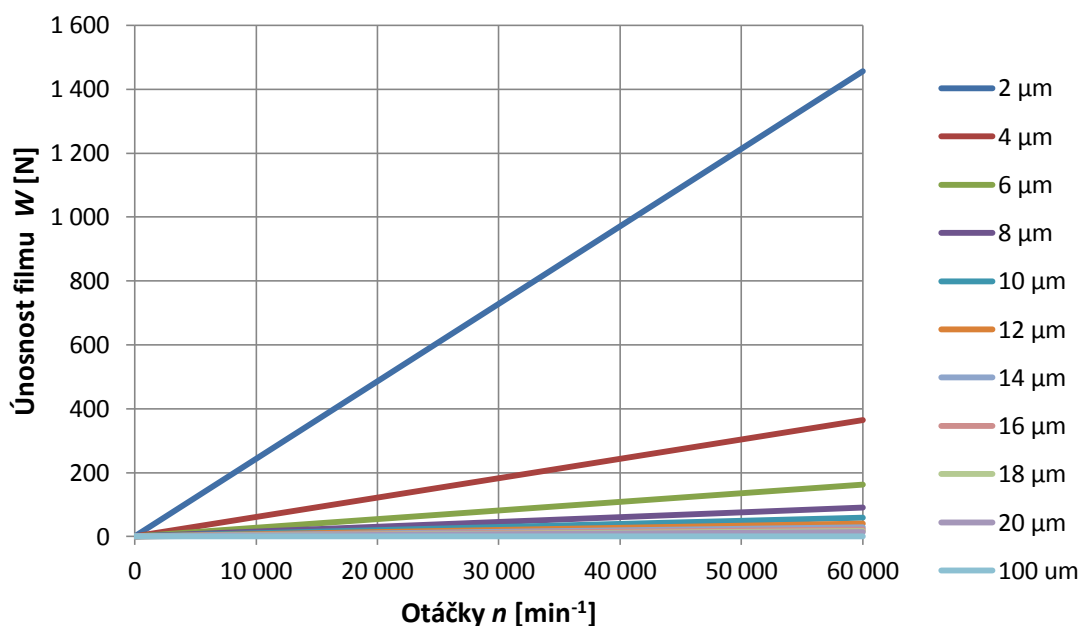
$$f_1 = \frac{(y^3 - 1)(y - 1) \sin 2v}{2(y^3 + x) \left(1 + \frac{1}{x}\right)} \quad f_2 = \frac{y^3 \left(x + 2 + \frac{1}{x}\right) + (y^3 - 1)^2 \cos^2 v}{(y^3 + x) \left(1 + \frac{1}{x}\right)} \quad 7, 8$$

Únosnost ložiska s parametry dle zadání je vypočítaná v následující tabulce pro několik hodnot otáček a různou výšku filmu. V grafu pak můžeme vidět, jak se mění únosnost v závislosti na otáčkách pro různé hodnoty výšek filmu. Požadované únosnosti 100 N bude při otáčkách $60\,000\text{ min}^{-1}$ dosaženo při výšce plynového filmu cca $8\ \mu\text{m}$, což je pro dlouhodobý provoz vyhovující hodnota.

Tab. 2 Únosnost plynového filmu W [N]

		Otáčky $\times 1000$ [min^{-1}]												
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Výška filmu [μm]	2	0	121,39	242,78	364,17	485,57	606,96	728,35	849,74	971,13	1092,52	1213,91	1335,30	1456,70
	4	0	30,35	60,70	91,04	121,39	151,74	182,09	212,43	242,78	273,13	303,48	333,83	364,17
	6	0	13,49	26,98	40,46	53,95	67,44	80,93	94,42	107,90	121,39	134,88	148,37	161,86
	8	0	7,59	15,17	22,76	30,35	37,93	45,52	53,11	60,70	68,28	75,87	83,46	91,04
	10	0	4,86	9,71	14,57	19,42	24,28	29,13	33,99	38,85	43,70	48,56	53,41	58,27
	12	0	3,37	6,74	10,12	13,49	16,86	20,23	23,60	26,98	30,35	33,72	37,09	40,46
	14	0	2,48	4,95	7,43	9,91	12,39	14,86	17,34	19,82	22,30	24,77	27,25	29,73
	16	0	1,90	3,79	5,69	7,59	9,48	11,38	13,28	15,17	17,07	18,97	20,86	22,76
	18	0	1,50	3,00	4,50	5,99	7,49	8,99	10,49	11,99	13,49	14,99	16,49	17,98
	20	0	1,21	2,43	3,64	4,86	6,07	7,28	8,50	9,71	10,93	12,14	13,35	14,57
	100	0	0,05	0,10	0,15	0,19	0,24	0,29	0,34	0,39	0,44	0,49	0,53	0,58

Únosnost plynového filmu



Obr. 30 Závislost únosnosti plynového filmu na otáčkách

7.2.2 Tuhost filmu

Tuhost filmu axiálního aerodynamického ložiska se spirálními drážkami lze spočítat pomocí následujícího vztahu

$$K = \frac{3\pi\mu\omega R^4}{4h^3} \left(\frac{N^2 - 1}{N^2} \right)^2 F \tag{9}$$

kde

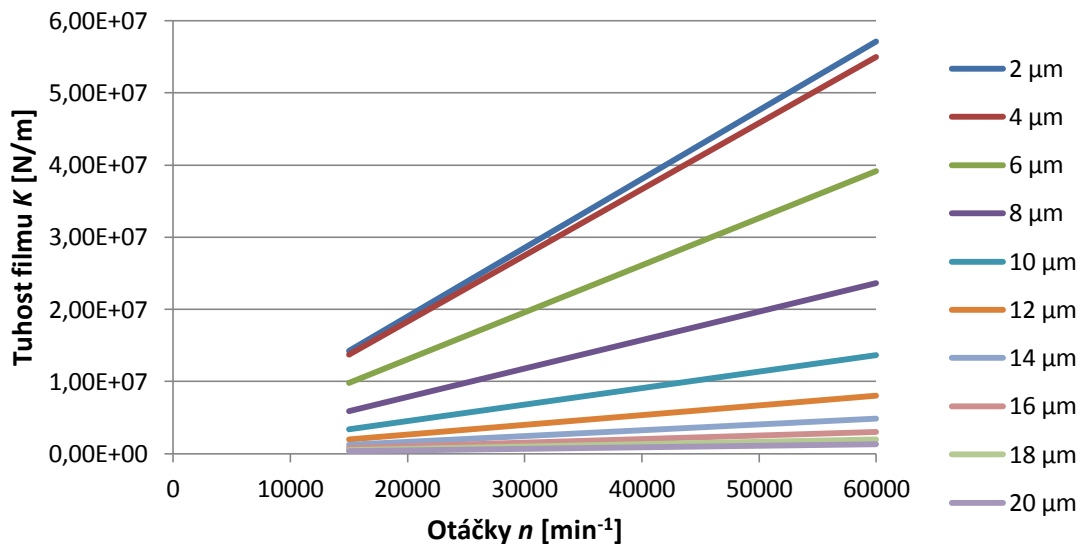
$$F = E \left(2 + f_4 - \frac{f_2 f_3}{f_2 + \frac{\alpha}{1 - \alpha}} \right) \quad f_3 = -\frac{h}{f_2} \frac{df_2}{dh} \quad f_4 = -\frac{h}{f_1} \frac{df_1}{dh} \tag{10, 11, 12}$$

Následující tabulka a graf udávají závislost tuhosti filmu na otáčkách a výšce filmu. Pro otáčky 60 000 min⁻¹ a předpokládanou tloušťku filmu 8 μm dosahuje tuhost filmu velikosti 2,37.10⁷ N.m⁻¹.

Tab. 3 Tuhost plynového filmu K [N/m]

		Otáčky x1000 [min ⁻¹]									
		15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Výška filmu [μm]	2	1,43E+07	1,90E+07	2,38E+07	2,86E+07	3,33E+07	3,81E+07	4,28E+07	4,76E+07	5,23E+07	5,71E+07
	4	1,37E+07	1,83E+07	2,29E+07	2,75E+07	3,21E+07	3,66E+07	4,12E+07	4,58E+07	5,04E+07	5,50E+07
	6	9,79E+06	1,31E+07	1,63E+07	1,96E+07	2,28E+07	2,61E+07	2,94E+07	3,26E+07	3,59E+07	3,91E+07
	8	5,91E+06	7,88E+06	9,85E+06	1,18E+07	1,38E+07	1,58E+07	1,77E+07	1,97E+07	2,17E+07	2,37E+07
	10	3,42E+06	4,56E+06	5,70E+06	6,84E+06	7,98E+06	9,12E+06	1,03E+07	1,14E+07	1,25E+07	1,37E+07
	12	2,00E+06	2,67E+06	3,34E+06	4,01E+06	4,68E+06	5,34E+06	6,01E+06	6,68E+06	7,35E+06	8,01E+06
	14	1,21E+06	1,62E+06	2,02E+06	2,43E+06	2,83E+06	3,23E+06	3,64E+06	4,04E+06	4,45E+06	4,85E+06
	16	7,62E+05	1,02E+06	1,27E+06	1,52E+06	1,78E+06	2,03E+06	2,28E+06	2,54E+06	2,79E+06	3,05E+06
	18	4,95E+05	6,60E+05	8,26E+05	9,91E+05	1,16E+06	1,32E+06	1,49E+06	1,65E+06	1,82E+06	1,98E+06
	20	3,33E+05	4,44E+05	5,54E+05	6,65E+05	7,76E+05	8,87E+05	9,98E+05	1,11E+06	1,22E+06	1,33E+06

Tuhost plynového filmu



Obr. 31 Závislost tuhosti plynového filmu na otáčkách

7.2.3 Ztráty

Ztráty vznikají třením mezi molekulami vzduchu mezi sebou navzájem i s běhounem ložiska a statorem. Tyto ztráty jsou dány ztrátovým výkonem, který je spočítán vztahem

$$P_t = \frac{\pi\mu\omega^2 R^4}{2h} \frac{(N^2 - 1)(N + 1)^2}{N^4} \left[\frac{1 - \alpha}{2} + \frac{\alpha(x + y)}{2y(x + 1)} \right] \quad 13$$

kde

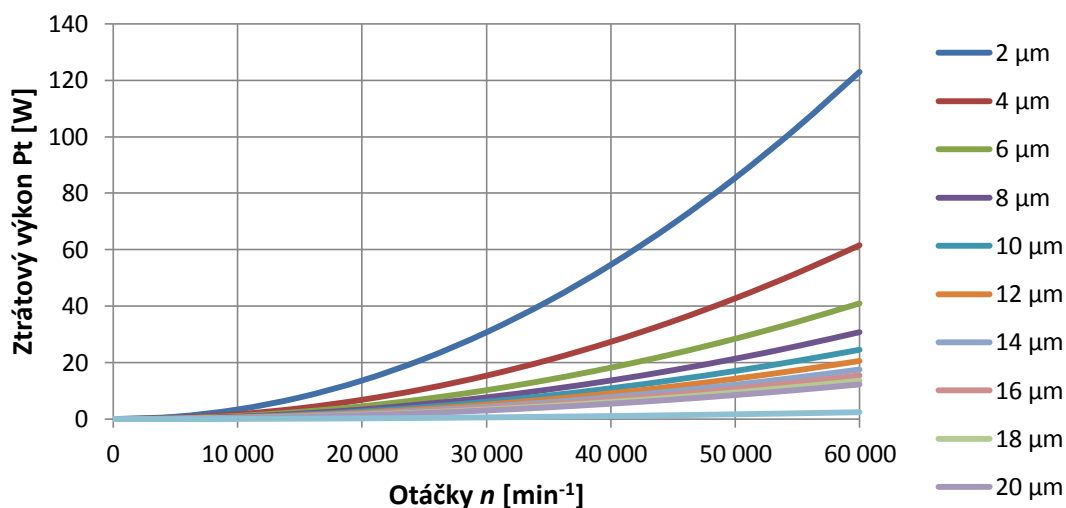
$$\alpha = \frac{D_2 - D_t}{D_2 - D_1} \quad 14$$

Tab. 4 Ztrátový výkon P_t [W]

		Otáčky x1000 [min ⁻¹]												
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Výška filmu [μm]	2	0	0,85	3,42	7,69	13,67	21,35	30,75	41,85	54,66	69,18	85,41	103,35	122,99
	4	0	0,43	1,71	3,84	6,83	10,68	15,37	20,93	27,33	34,59	42,71	51,67	61,50
	6	0	0,28	1,14	2,56	4,56	7,12	10,25	13,95	18,22	23,06	28,47	34,45	41,00
	8	0	0,21	0,85	1,92	3,42	5,34	7,69	10,46	13,67	17,30	21,35	25,84	30,75
	10	0	0,17	0,68	1,54	2,73	4,27	6,15	8,37	10,93	13,84	17,08	20,67	24,60
	12	0	0,14	0,57	1,28	2,28	3,56	5,12	6,98	9,11	11,53	14,24	17,22	20,50
	14	0	0,12	0,49	1,10	1,95	3,05	4,39	5,98	7,81	9,88	12,20	14,76	17,57
	16	0	0,11	0,43	0,96	1,71	2,67	3,84	5,23	6,83	8,65	10,68	12,92	15,37
	18	0	0,09	0,38	0,85	1,52	2,37	3,42	4,65	6,07	7,69	9,49	11,48	13,67
	20	0	0,09	0,34	0,77	1,37	2,14	3,07	4,19	5,47	6,92	8,54	10,33	12,30
	100	0	0,02	0,07	0,15	0,27	0,43	0,61	0,84	1,09	1,38	1,71	2,07	2,46

Z vypočtených hodnot je vidět, že ztráty rostou s otáčkami exponenciálně. Dále je zřetelná závislost mezi ztrátovým výkonem a tloušťkou filmu, kdy dle očekávání provoz s malými tloušťkami nosného filmu vykazuje vyšší ztráty. V tomto konkrétním případě při otáčkách 60 000 min⁻¹ a tloušťce filmu 8 μm dosahují ztráty cca 30 W.

Ztrátový výkon



Obr. 32 Závislost ztrátového výkonu na otáčkách

7.2.4 Tlakový gradient

Přírůstek tlaku media pro průchodu kanálem (tj. z průměru D_1 na průměr D_2). Tlakový gradient axiálního ložiska se spirálními drážkami je dán následujícím vztahem.

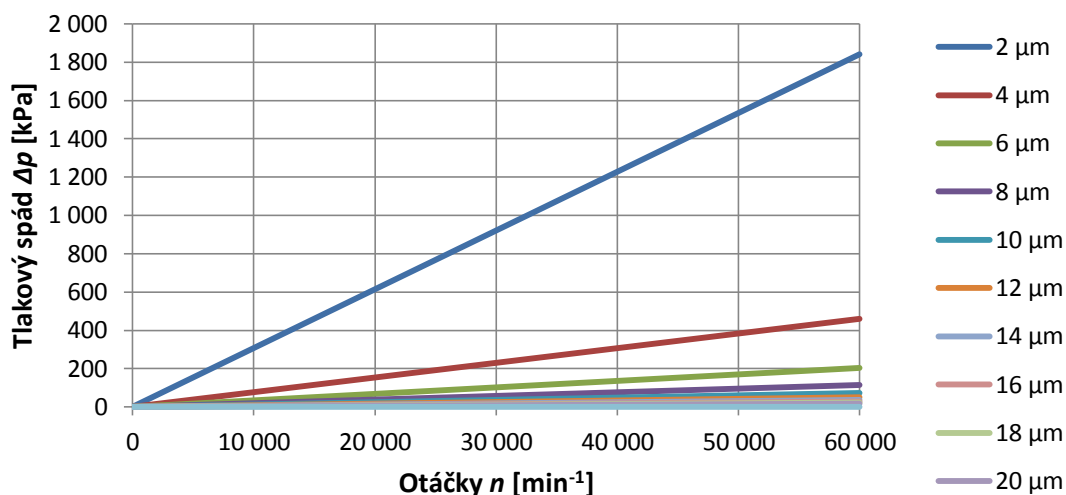
$$\Delta p = \frac{3\mu\omega R^2}{2h^2} \left(\frac{N^2 - 1}{N^2} \right) E \quad 15$$

Tab. 5 Gradient tlaku Δp [kPa]

Výška filmu [μm]	Otáčky x1000 [min ⁻¹]												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	0	153,33	306,67	460,00	613,33	766,67	920,00	1073,34	1226,67	1380,00	1533,34	1686,67	1840,00
4	0	38,33	76,67	115,00	153,33	191,67	230,00	268,33	306,67	345,00	383,33	421,67	460,00
6	0	17,04	34,07	51,11	68,15	85,19	102,22	119,26	136,30	153,33	170,37	187,41	204,44
8	0	9,58	19,17	28,75	38,33	47,92	57,50	67,08	76,67	86,25	95,83	105,42	115,00
10	0	6,13	12,27	18,40	24,53	30,67	36,80	42,93	49,07	55,20	61,33	67,47	73,60
12	0	4,26	8,52	12,78	17,04	21,30	25,56	29,81	34,07	38,33	42,59	46,85	51,11
14	0	3,13	6,26	9,39	12,52	15,65	18,78	21,90	25,03	28,16	31,29	34,42	37,55
16	0	2,40	4,79	7,19	9,58	11,98	14,38	16,77	19,17	21,56	23,96	26,35	28,75
18	0	1,89	3,79	5,68	7,57	9,47	11,36	13,25	15,14	17,04	18,93	20,82	22,72
20	0	1,53	3,07	4,60	6,13	7,67	9,20	10,73	12,27	13,80	15,33	16,87	18,40
100	0	0,06	0,12	0,18	0,25	0,31	0,37	0,43	0,49	0,55	0,61	0,67	0,74

Změna tlaku po průchodu ložiskem dosahuje hodnoty $1,15 \cdot 10^5$ Pa (při otáčkách $60\,000 \text{ min}^{-1}$ a výšce filmu $8 \mu\text{m}$), což je přibližně jedna atmosféra.

Gradient tlaku



Obr. 33 Závislost gradientu tlaku na otáčkách

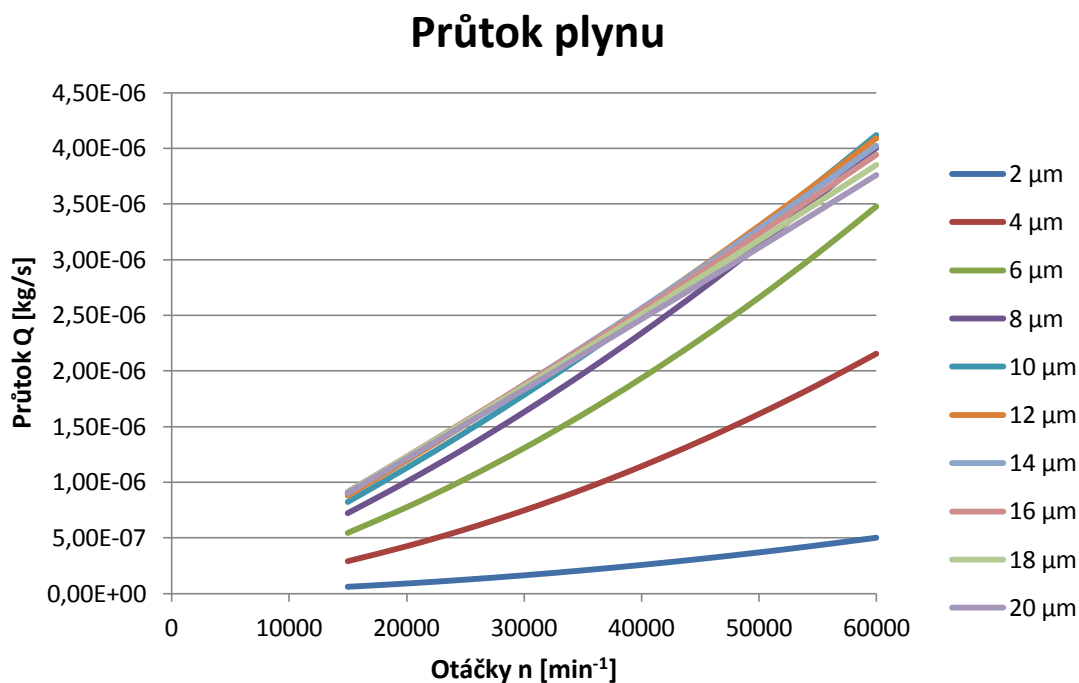
7.2.5 Hmotnostní průtok

Je dán hmotností plynu, která proteče ložiskem během jedné sekundy. Průtok nelze jednoduše určit analytickými vztahy a byl tak spočten pomocí speciálního výpočetního software Dynrot BR, který se v PBS VB používá pro návrh aerodynamických ložisek. Program vyvinula společnost Sobriety s.r.o. z Kuřimi ve spolupráci s firmou Techlab s.r.o. z Prahy.

Tab. 6 Průtok plynu Q [kg/s]

	Otáčky x1000 [min^{-1}]									
	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	5,99E-08	8,96E-08	1,24E-07	1,64E-07	2,08E-07	2,57E-07	3,11E-07	3,70E-07	4,34E-07	5,03E-07
4	2,91E-07	4,25E-07	5,77E-07	7,48E-07	9,37E-07	1,14E-06	1,37E-06	1,61E-06	1,88E-06	2,16E-06
6	5,45E-07	7,75E-07	1,03E-06	1,31E-06	1,61E-06	1,94E-06	2,29E-06	2,66E-06	3,06E-06	3,48E-06
8	7,20E-07	1,00E-06	1,30E-06	1,63E-06	1,97E-06	2,34E-06	2,72E-06	3,13E-06	3,56E-06	4,00E-06
10	8,22E-07	1,13E-06	1,45E-06	1,78E-06	2,13E-06	2,50E-06	2,88E-06	3,28E-06	3,69E-06	4,12E-06
12	8,77E-07	1,19E-06	1,52E-06	1,85E-06	2,20E-06	2,56E-06	2,92E-06	3,30E-06	3,69E-06	4,09E-06
14	9,05E-07	1,22E-06	1,55E-06	1,88E-06	2,22E-06	2,56E-06	2,92E-06	3,28E-06	3,65E-06	4,02E-06
16	9,14E-07	1,23E-06	1,55E-06	1,88E-06	2,21E-06	2,54E-06	2,89E-06	3,23E-06	3,58E-06	3,94E-06
18	9,13E-07	1,23E-06	1,54E-06	1,86E-06	2,18E-06	2,51E-06	2,84E-06	3,17E-06	3,51E-06	3,85E-06
20	9,04E-07	1,21E-06	1,52E-06	1,83E-06	2,15E-06	2,47E-06	2,79E-06	3,11E-06	3,44E-06	3,76E-06

Z tabulky je vidět, že průtok s otáčkami nelineárně roste, další zřejmá závislost je mezi tloušťkou filmu a průtokem. S větší mezerou (tedy tloušťkou filmu) průtok roste. Navrženým ložiskem proteče za jednu sekundu cca $4 \cdot 10^{-6}$ kg vzduchu.



Obr. 34 Závislost průtoku plynu na otáčkách

7.2.6 Oteplení

Oteplení plynu procházejícího ložiskem. Jedná se tedy o rozdíl teplot plynu mezi vstupem na průměru D_1 a výstupem z ložiska na průměru D_2 .

$$\Delta T = \frac{P_t}{cQ} \delta \quad 16$$

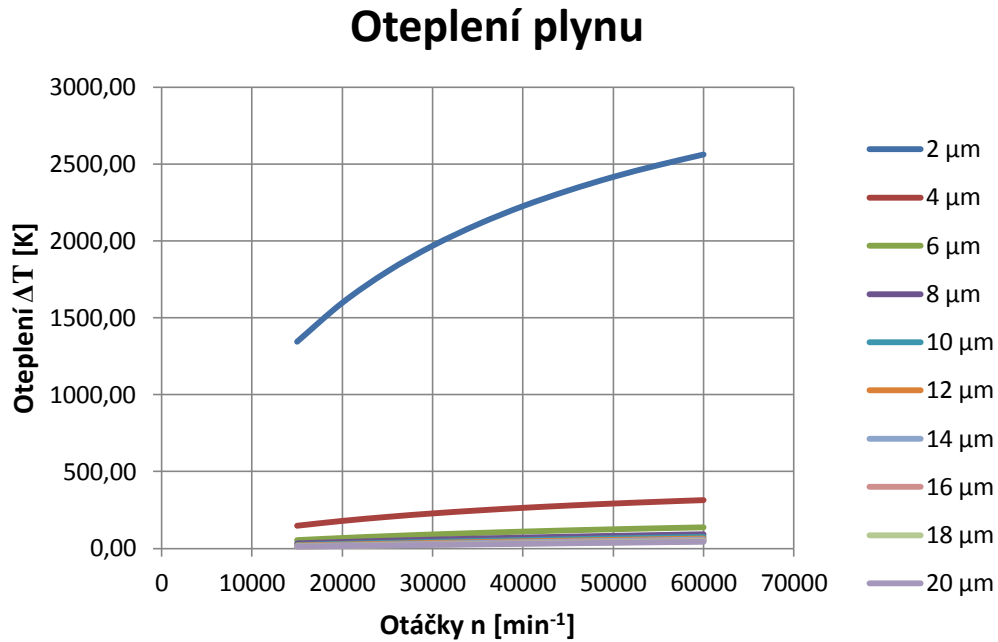
Poznámka:

Proměnná δ představuje procento tepla, odvedeného třením. Implicitní hodnota je $\delta = 0.01$, tedy 1%. Tato hodnota má přímý vliv na výpočet oteplení plynu po průchodu ložiskem.

Tab. 7 Oteplení plynu ΔT [K]

	Otáčky x1000 [min^{-1}]									
	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	1346,00	1599,00	1803,00	1970,00	2109,00	2228,00	2329,00	2418,00	2495,00	2564,00
4	146,10	178,00	204,70	227,60	247,20	264,40	279,40	292,80	304,70	315,40
6	54,37	67,99	80,03	90,74	100,30	109,00	116,80	123,90	130,40	136,30
8	32,06	40,97	49,17	56,74	63,75	70,27	76,33	81,99	87,28	92,25
10	23,20	30,09	36,62	42,80	48,68	54,26	59,58	64,64	69,48	74,09
12	18,63	24,39	29,94	35,30	40,48	45,48	50,31	54,99	59,52	63,90
14	15,87	20,90	25,81	30,60	35,28	39,84	44,30	48,66	52,92	57,09
16	14,04	18,56	23,00	27,37	31,66	35,89	40,04	44,13	48,15	52,11
18	12,74	16,88	20,97	25,02	29,01	32,96	36,86	40,71	44,52	48,28
20	11,77	15,63	19,45	23,23	26,98	30,70	34,39	38,05	41,67	45,26

Plyn se dle očekávání průchodem ložiskem zahřívá, se zmenšující se tloušťkou filmu oteplení roste. V tomto konkrétním případě (otáčky $60\,000\text{ min}^{-1}$ a tloušťka filmu $8\text{ }\mu\text{m}$) by se plyn „ohřál“ o 92 K .



Obr. 35 Závislost oteplení plynu na otáčkách

7.2.7 Minimální a maximální hloubka drážky

Minimální hloubka je dána vztahem

$$h_{g,min} = 3,6 \cdot h - h \quad 17$$

kde $h_{g,min}$ je minimální hloubka drážky a h je výška nosného filmu. Konstanta 3,6 vychází z literatury [18].

Maximální hloubka drážky vychází ze vztahu

$$h_{g,max} = 4,7 \cdot h - h \quad 18$$

kde $h_{g,max}$ je maximální hloubka drážky a h je výška nosného filmu. Rovnováha mezi zatížením a únosností ložiska nastane pro určitou výšku nosného filmu h , pokud hloubka drážky h_g leží v intervalu $h_{g,min}$ až $h_{g,max}$ pro tuto výšku nosného filmu, je hloubka drážky zvolena optimálně. Pokud tomu tak není, výpočet by se měl opakovat s jinou hloubkou drážky. Konstanta 4,7 vychází z literatury [18].

Tab. 8 Maximální a minimální hloubka drážky

Výška filmu h [μm]	Maximální a minimální hloubka drážky	
	$h_{g,\text{min}}$ [μm]	$h_{g,\text{max}}$ [μm]
2	5,2	7,4
4	10,4	14,8
6	15,6	22,2
8	20,8	29,6
10	26	37
12	31,2	44,4
14	36,4	51,8
16	41,6	59,2
18	46,8	66,6
20	52	74
100	260	370

7.3 Vyhodnocení výsledků

Cílem výpočtu bylo navrhnout rozměry ložiska, které by zajistily jisté provozní vlastnosti tak, aby vyhovovaly zadaným požadavkům. V první řadě bylo potřeba zvolit vhodný vnitřní průměr ložiska, který musel být v rozsahu 20 mm (průměr hřídele) až 60 mm (maximální průměr ložiska). Tento průměr byl zvolen 22 mm. Dále byla vypočítána únosnost ložiska pro několik hodnot tloušťky filmu a otáček, abychom mohli najít vyhovující tloušťku filmu pro dané zatížení 100 N a zároveň byl splněn požadavkům zadání 7-10 μm . Poté byla z tloušťky filmu spočtena minimální a maximální hloubka drážky, a v tomto rozmezí navrhována hloubka drážky, která musela také vyhovovat zadaným 20-25 μm . Podle výpočtů byly navrženy tyto rozměry ložiska:

Vnitřní průměr ložiska:	$D_1 = 22 \text{ mm}$
Vnější průměr ložiska:	$D_2 = 60 \text{ mm}$
Tloušťka filmu:	$h = 8 \mu\text{m}$
Hloubka drážky:	$h_g = 20 \mu\text{m}$

Toto ložisko mělo poté tyto parametry:

Únosnost	$W = 91 \text{ N}$
Tuhost filmu	$K = 2,37 \cdot 10^7 \text{ N/m}$
Ztrátový výkon	$P_i = 30,75 \text{ W}$
Gradient tlaku	$\Delta p = 115 \text{ kPa}$
Průtok plynu	$Q = 4 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$
Oteplení plynu	$\Delta T = 92,25 \text{ K}$

8 Závěr

Cílem této bakalářské práce byla rešeršní studie zaměřená na plynová ložiska, která jsou v poslední době stále více rozšířená a nalézají uplatnění v mnoha aplikacích.

Kladné vlastnosti těchto ložisek jsou:

- velmi vysoké obvodové rychlosti - až $750\,000\text{ min}^{-1}$
- minimální tření
- minimální opotřebenění - Platí hlavně pro aerostatická ložiska, která jsou při rozběhu i doběhu stále na plynovém filmu, nedochází tedy ke styku pohybujících se částí. To neplatí u ložisek aerodynamických, které při rozběhu i doběhu nevytváří nosný plyn a při nízkých otáčkách dochází ke styku pohybujících se částí a tím k jejich opotřebenění.
- velká přesnost uložení
- není potřeba mazání, chod je tedy bezúdržbový
- spolehlivost
- možnost provozu za velmi nízkých i velmi vysokých teplot

Záporné vlastnosti plynových ložisek:

- v případě aerostatických ložisek je nutný zdroj stlačeného vzduchu, jehož pořizovací cena, provoz a údržba může velice ovlivnit ekonomiku provozu těchto ložisek
- již zmíněné tření při rozběhu a doběhu aerodynamických ložisek
- vysoké nároky na přesnost ložisek a s tím spojená i jejich obtížná a nákladná výroba
- špatná odolnost proti vibracím

Z vlastností plynových ložisek vyplývá i jejich použití. V první řadě se jedná o uložení, kde se požaduje vysoká přesnost chodu, která je velmi důležitá například u měřicích zařízeních, nebo polohovacích zařízení velmi přesných obráběcích strojů, dále jsou to stroje pracující při vysokých otáčkách.

Konkrétní použití aerostatických ložisek jsou například brousicí vřetena, spřádací vřetena, vrtací vřetena pro tištěné spoje nebo také uložení vřetena zubní vrtačky. Aerodynamická ložiska našla uplatnění především v cirkulačních dmychadlech a v gyroskopech pro letectví a kosmonautiku. Mezi konkrétní aplikace patří cirkulátory zajišťující oběh chladícího plynu v reaktorech. V těch se jako provozní plyn používá helium nebo CO_2 . Další velké využití těchto ložisek jsou expanzní turbíny pro zkapaňování helia. Tyto turbíny mají otáčky až $350\,000\text{ min}^{-1}$ a pracují při teplotách dosahujících $-268\text{ }^\circ\text{C}$. Při těchto podmínkách by žádná jiná ložiska pracovat nemohla.

Seznam použitých symbolů

Značka	Rozměr	Název
D_1	[m]	Vnitřní poloměr ložiska
D_2	[m]	Vnější poloměr ložiska
h	[m]	Tloušťka filmu
h_g	[m]	Hloubka spirální drážky
K	[N/m]	Tuhost filmu
n	[s ⁻¹]	Otáčky
P_t	[W]	Ztrátový výkon
W	[N]	Únosnost ložiska
Δp	[Pa]	Tlakový gradient
ΔT	[K]	Oteplení
μ	[Pa.s]	Dynamická viskozita
ν	[°]	Úhel drážky
ω	[rad.s ⁻¹]	Úhlová rychlost
Q	[kg/s]	Průtok
c	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita

Seznam obrázků

<i>Obr. 1</i> Rozdělení kluzných ložisek	16
<i>Obr. 2</i> Rozdělení valivých ložisek	17
<i>Obr. 3</i> Rozdělení vzduchových ložisek	19
<i>Obr. 4</i> Metody zvýšení tuhosti vzduchového ložiska [4]	21
<i>Obr. 5</i> Princip činnosti vzduchového ložiska [3]	22
<i>Obr. 6</i> Průběh tlaku plynu v ložiscích [5]	22
<i>Obr. 7</i> Činnost aerostatického ložiska z pórovitého materiálu [3]	23
<i>Obr. 8</i> Radiální ložisko s diskrétními plnicími otvory [2]	24
<i>Obr. 9</i> Radiální ložisko s plnicí spárkou [2]	24
<i>Obr. 10</i> Radiální ložisko s pórovitou kluznou plochou [2]	25
<i>Obr. 11</i> Axiální ložisko s diskrétními otvory [2]	26
<i>Obr. 12</i> Průběh tlaku u ložisek s diskrétními otvory [8]	26
<i>Obr. 13</i> Průběh tlaku v ložiskové mezeře [7]	27
<i>Obr. 14</i> Ložisko s kapsami [6]	28
<i>Obr. 15</i> Ložisko se spirálními drážkami [6]	28
<i>Obr. 16</i> Stupňovité ložisko [2]	29
<i>Obr. 17</i> Fóliové ložisko s taženou fólií [6]	30
<i>Obr. 18</i> Fóliové ložisko s ohýbanou fólií [6]	30
<i>Obr. 19</i> Fóliové ložisko typu Hydresil [2]	31
<i>Obr. 20</i> Varianta ložiska Hydresil s více vrstvami fólie [6]	31
<i>Obr. 21</i> Jednoduché ložisko s naklápěcími segmenty [6]	32
<i>Obr. 22</i> Ložisko s naklápěcími segmenty a autokompensací ložiskové vůle [2]	33
<i>Obr. 23</i> Ložisko s naklápěcími segmenty podepřenými pružnými elementy [6]	34
<i>Obr. 24</i> Průběh tlaku v aerodynamickém axiálním ložisku [10]	35
<i>Obr. 25</i> Axiální ložisko se spirálními drážkami [6]	35
<i>Obr. 26</i> Originální axiální fóliové ložisko [6]	36
<i>Obr. 27</i> Fóliové axiální ložisko Hydresil [9]	37
<i>Obr. 28</i> Další možné konstrukce axiálních ložisek [6]	38
<i>Obr. 29</i> Únosnost jednotlivých typů axiálních ložisek [6]	39
<i>Obr. 30</i> Závislost únosnosti plynového filmu na otáčkách	42
<i>Obr. 31</i> Závislost tuhosti plynového filmu na otáčkách	43
<i>Obr. 32</i> Závislost ztrátového výkonu na otáčkách	45
<i>Obr. 33</i> Závislost gradientu tlaku na otáčkách	46
<i>Obr. 34</i> Závislost průtoku plynu na otáčkách	47
<i>Obr. 35</i> Závislost oteplení plynu na otáčkách	48

Seznam tabulek

<i>Tab. 1</i> Zadané a vypočítané hodnoty	40
<i>Tab. 2</i> Únosnost plynového filmu W [N]	42
<i>Tab. 3</i> Tuhost plynového filmu K [N/m]	43
<i>Tab. 4</i> Ztrátový výkon P_t [W]	44
<i>Tab. 5</i> Gradient tlaku Δp [kPa]	45
<i>Tab. 6</i> Průtok plynu Q [kg/s]	46
<i>Tab. 7</i> Oteplení plynu ΔT [K]	47
<i>Tab. 8</i> Maximální a minimální hloubka drážky	49

Použitá literatura

- [1] Air bearing. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Air_bearing
- [2] Speciální typy ložisek. *Techlab s.r.o* [online]. 2012 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: www.techlab.cz
- [3] Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska. *Peslar-Vzduchova_a_magneticka_loziska.pdf* [online]. 2008 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=647
- [4] Air Bearing Basics. *Nelson air* [online]. 2014 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: http://www.nelsonair.com/NA_primer.htm
- [6] Vlastnosti aerodynamických ložisek. *Techlab s.r.o* [online]. 2012 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.techlab.cz/>
- [7] AGRAWAL, Giri L. Foil Air/Gas Bearing Technology — An Overview. *Volume 1: Aircraft Engine; Marine; Turbomachinery; Microturbines and Small Turbomachinery* [online]. 1997 [cit. 2015-04-06]. DOI: 10.1115/97-gt-347. Dostupné z: <http://www.rddynamics.com/foil-97-gt-347.pdf>
- [8] Návrh aerostatických ložisek. *Techlab s.r.o* [online]. 2012 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.techlab.cz/>
- [9] *Aerodynamic Analysis of Compliant Thrust Foil Bearings* [online]. Rourkela, Odisha, 2009 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://ethesis.nitrkl.ac.in/4652/1/109ME0378.pdf>. Bachelor thesis. National Institute of Technology Rourkela.
- [10] Foil Bearings. *Xdot Engineering and Analysis* [online]. 2006 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: http://www.xdotea.com/services.foil_bearings.html
- [11] Properties os Air. *Efunda* [online]. 2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: http://www.efunda.com/materials/common_matl/show_gas.cfm?MatlName=Air0C
- [12] Ložisko. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Lo%C5%BEisko>
- [13] *Ložiska*. Fakulta strojní VŠB-TU Ostrava, 2013. Dostupné z: <http://www.347.vsb.cz/staff/kunzova/zs-kunzova-prednaska10.pdf>
- [14] Historie výzkumu kluzných ložisek. *Techlab s.r.o* [online]. 2012 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.techlab.cz/>
- [15] Kluzná ložiska a uložení rotorů. *Techlab s.r.o* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.techlab.cz/>

- [16] PBS Brno. *Novinky* [online]. 2010 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.pbs.cz/cz/novinky/proudovy-motor-tj100c>
- [17] PBS Velká Bíteš. *Kryogenní technika* [online]. 2012 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.pbsvb.cz/zakaznicka-odvetvi/letectvi/vyvoj-a-inovace/kryogeni-technika>
- [18] WHITLEY, S. *The design of spiral groove thrust bearing*. Gas bearing symposium, 1967.