



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

LOŽISKA PRO VŘETENA OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

BEARINGS FOR MACHINE SPINDLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ KNÁPEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. RADOVAN GALAS

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Knápek

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:

Ložiska pro vřetena obráběcích strojů

v anglickém jazyce:

Bearings for machine spindles

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je podat přehled ložisek používaných pro vřetena obráběcích strojů. Práce bude obsahovat rozdělení, způsoby uložení a mazání ložisek.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Analýza problému a cíl práce
3. Přehled současného stavu poznání
4. Diskuze
5. Závěr
6. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva

Typ práce: rešeršní; Účel práce: vzdělávání

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2015.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. Konstruování strojních součástí: materials, mechanisms and practice. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTUM, 2010, 1159 s. Tribology in practice series. ISBN 978-80-214-2629-0.

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů: materials, mechanisms and practice. Vyd. 2, přeprac., rozš. Editor R Lewis, Ulf Olofsson. Praha: MM publishing, 2010, 420 s. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Radovan Galas

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

V Brně, dne 16.11.2014

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce obsahuje přehled o ložiscích používaných pro uložení vřeten obráběcích strojů. Práce je zaměřena především na kluzná, vzduchová, magnetická a valivá ložiska. Při popisu jednotlivých druhů ložisek je kladen důraz na jejich konstrukci, mazání a způsoby uložení. V závěru této bakalářské práce jsou jednotlivé druhy ložisek vzájemně srovnány.

ABSTRACT

This bachelor's thesis contains the survey of bearings for machine spindles. Thesis is especially focused on slide, air, magnetic and rolling bearings. Bearings are described with emphasis on their construction, lubrication and arrangements. In the end of this thesis there is a comparison of mentioned kinds of bearings for machine spindles.

KLÍČOVÁ SLOVA

magnetická ložiska, vzduchová ložiska, valivá ložiska, kluzná ložiska, mazání ložisek, ložiska pro uložení vřeten obráběcích strojů

KEYWORDS

magnetic bearings, air bearings, slide bearings, rolling bearings, bearings lubrication, bearings for machine spindles

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KNÁPEK, J. *Ložiska pro vřetena obráběcích strojů*. Brno, VUT-FSI., 2015, 57 s.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem práci *Ložiska pro vřetena obráběcích strojů* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Radovana Galase a uvedl veškeré použité zdroje.

V Brně dne 15. května 2015

.....
Jiří Knápek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Radovanu Galasovi za odborné vedení a cenné rady při tvorbě této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

ÚVOD	12
1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	13
1.1 Analýza problému	13
1.2 Cíl práce	15
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
2.1 Definice základních pojmů	16
2.2 Kluzná ložiska	17
2.2.1 Ložiska hydrodynamická	18
2.2.2 Ložiska hydrostatická	21
2.3 Vzduchová ložiska	23
2.3.1 Aerodynamická ložiska	23
2.3.2 Aerostatická ložiska	24
2.4 Magnetická ložiska	24
2.5 Valivá ložiska	25
2.5.1 Kuličková ložiska	26
2.5.2 Válečková ložiska	30
2.5.3 Kuželíková ložiska	32
2.6 Uložení vřetena do valivých ložisek	33
2.6.1 Uspořádání ložisek	33
2.6.2 Předpětí ložisek	35
2.6.3 Třída přesnosti ložiska	37
2.6.4 Vzdálenost ložisek	38
2.6.5 Příklady uložení vřetena	39
2.7 Mazání valivých ložisek	40
2.7.1 Mazání plastickým mazivem	41
2.7.2 Mazání olejem	41
2.8 Vývojové trendy	43
2.9 Srovnání ložisek	45
3 DISKUSE	49
4 ZÁVĚR	50
5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	51
6 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	54
7 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	55
8 SEZNAM TABULEK	57

ÚVOD

Požadavky na efektivnost výroby ve strojním průmyslu prudce rostou. Při dnešní velké konkurenci jsou právě rychlost, přesnost a cena rozhodujícími faktory pro získání zákazníka. Se zvyšujícími se požadavky na efektivnost výroby přichází i nové progresivní technologické postupy, materiály a nástroje. Aby bylo možné plně využít potenciálu těchto nových technologií, je taktéž nutné zlepšit technické parametry jednotlivých uzlů obráběcího stroje. Jelikož má vřeten přímý vliv na přesnost a kvalitu obrobku, řadí se k těm nejdůležitějším uzlům. Jeho úkolem je zajistit geometricky přesnou rotaci obrobku (v případě soustruhu) nebo nástroje (např. u brusky, frézky, vrtačky). Avšak podíváme-li se na konstrukci vřeten detailně, zjistíme, že jsou to hlavně ložiska, která mu poskytují kruhové vedení a navíc zachycují veškeré síly vznikající při samotném obrábění. Volba vhodného typu ložiska se následně promítne nejen na přesnosti a kvalitě výsledného produktu, ale i na celkové ekonomičnosti obrábění. V dnešní době existuje na trhu velmi široká nabídka nejrozličnějších typů ložisek. Ovšem ne každý typ je svými vlastnostmi vhodný pro danou aplikaci. Při jejich výběru by proto měl každý zvážit řadu proměnných, jako jsou např. tuhost, rychlost a cena.

Tato práce se zabývá právě problematikou ložisek pro uložení vřeten obráběcích strojů. Důraz je kladen na jejich uložení, mazání a konstrukci. Také je popsán vliv ložisek na celkový chod vřeten.

1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

1

1.1 Analýza problému

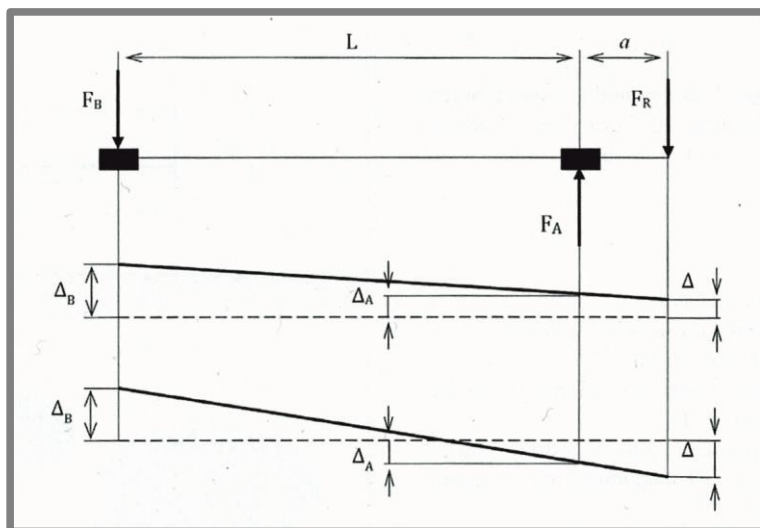
1.1

Vřeteno obráběcího stroje by mělo zajistit geometricky přesný rotační pohyb nástroje či obrobku. Z toho důvodu je jeho uložení jednou z nejdůležitějších konstrukčních otázek při návrhu celého vřeteníku. Vřeteno je ukládáno staticky určitě. Ložiska na jeho předním (pracovním) konci se nazývají hlavní a zajišťují vřeteno jak v radiálním, tak axiálním směru. Zadní (nepracovní) konec je kvůli tepelné roztažnosti axiálně volný a je zajištěn pouze v radiálním směru. [2]

Uložení vřeten obráběcích strojů by mělo obecně splňovat následující požadavky: [2]

- vysoká přesnost chodu – minimální házení
- dokonalé vedení – při změně velikosti a směru zatížení nesmí vřeteno měnit svoji polohu
- minimální ztráty v uložení vlivem zahřívání
- maximální tuhost
- možnost vymezení vůle vlivem opotřebení
- dlouhodobá životnost a spolehlivost

Přesnost chodu pracovního konce vřetena má stěžejní vliv na kvalitu obrobku. Je tedy nutné zajistit prostorovou stabilitu osy tak, aby házení na tomto konci bylo minimální. Závislost vzdálenosti ložisek a délky vyložení na házení pracovního konce vřetena znázorňuje následující obrázek.



Obr. 1-1 Házení na pracovním konci vřetena [3]

V případě, že ložiska hází stejným směrem, platí pro výsledné házení na čelním konci vztah: [3]

$$\frac{\Delta_A - \Delta}{\Delta_B - \Delta} = \frac{a}{L + a} \quad (1)$$

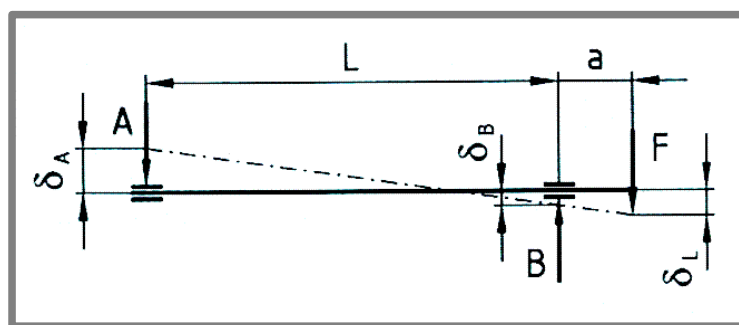
po úpravě:

$$\Delta = \frac{\Delta_A(a + L) - \Delta_B a}{L} = \Delta_A + \frac{a}{L}(\Delta_A - \Delta_B) \quad (2)$$

Pokud budou ložiska házet v jedné rovině opačným směrem, platí: [3]

$$\Delta = \Delta_A + \frac{a}{L}(\Delta_A + \Delta_B) \quad (3)$$

Je tedy patrné, že přední ložisko má být o něco přesnější než zadní a společně by měla být montována tak, aby házela v jedné rovině a ve stejném smyslu. Důležitou roli hraje také tuhost uložení, která by měla být co nejvyšší. S vyšší tuhostí ale klesá maximální dosažitelná rychlost vřeten, a tudíž jsou tyto dva faktory věci kompromisu. [2], [4]



Obr. 1-2 Odchylka na pracovním konci vřeten [2]

Za předpokladu dokonale tuhého vřeten lze odchylku na jeho předním konci vlivem deformace ložisek vyjádřit vztahem: [2]

$$\delta_L = \frac{F}{L^2} [a^2 C_A + (a + L)^2 C_B] \quad (4)$$

kde:

δ_L	mm	- odchylka na pracovním konci,
a	mm	- vzdálenost vyložení,
L	mm	- rozteč ložisek,
C_A, C_B	mmkN ⁻¹	- poddajnost ložisek,
F	kN	- zatížení pracovního konce.

Při rotaci vřeten se vnitřní kroužek ložiska zahřívá více než vnější kroužek a těleso vřeteníku kolem něj. V ložiskovém uzlu bez vnějšího zdroje tepla tím vznikne napříč ložiskem teplotní gradient. Při stejné teplotní roztažnosti se tedy vnitřní kroužek roztahuje více než vnější, což ovlivňuje velikost výsledné vůle nebo předpětí. Vysoká teplota nadměrně zatěžuje ložisko a může vést až k jeho poškození. Proto je nutné zvolit vhodný způsob mazání, který bude redukovat tření, a případně i odvádět generované teplo. [2], [3]

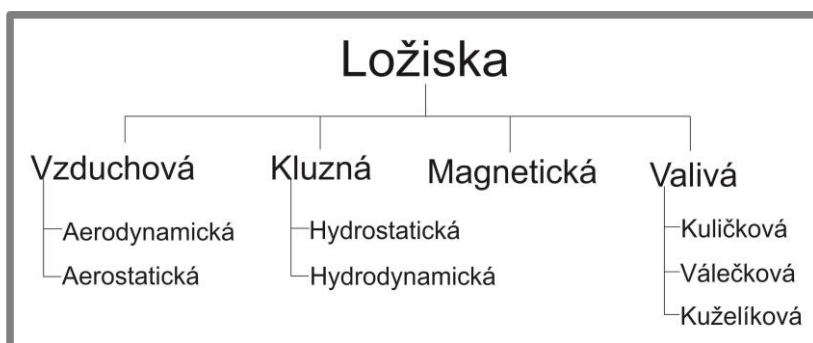
1.2 Cíl práce

1.2

Cílem bakalářské práce je podat přehled o ložiscích používaných pro uložení vřeten obráběcích strojů. Součástí práce je popis konstrukce ložisek, jejich uložení a způsoby mazání.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

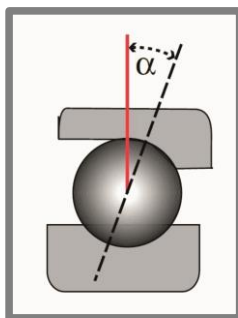
Vřetena obráběcích strojů jsou ve více jak 90 % všech případů ukládána do valivých ložisek.[3] Vzhledem k tomuto faktu je větší část práce zaměřena převážně na vřetenová ložiska valivá.



Obr. 2-1 Rozdělení ložisek pro uložení vřeten obráběcích strojů

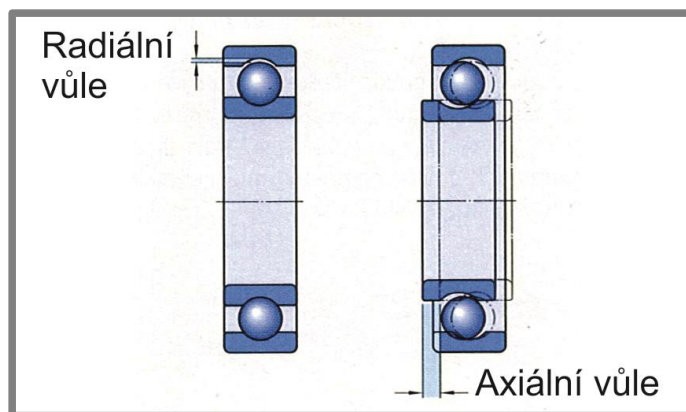
2.1 Definice základních pojmů

Kontaktní úhel ložiska s kosoúhlým stykem – „úhel, který svírá spojnice stykových bodů kuličky a oběžných drah v radiální rovině, ve které je přenášeno zatížení z jedné oběžné dráhy na druhou, a kolmice na osu ložiska.“ [5, s.406]



Obr. 2-2 Kontaktní úhel [21]

Ložisková vůle – „celková vzdálenost, o níž lze posunout jeden kroužek ložiska vůči druhému. Posunutí v radiálním směru se nazývá radiální vůle, posunutí v axiálním směru axiální vůle.“ [6, s.24]



Obr. 2-3 Ložisková vůle [5]

Předpětí – síla působící na ložisko před vyvozením pracovního zatížení, a to z důvodu vymezení ložiskové vůle.

Hybridní ložisko – ložisko osazené valivými elementy z keramiky.

Super přesná ložiska – ložiska vyráběná ve vyšších přesnostech a přísnějších geometrických tolerancích. Využívají se tam, kde jsou kladeny požadavky na vyšší rychlost, vysokou přesnost chodu, vysokou tuhost a klidný chod.

2.2 Kluzná ložiska

2.2

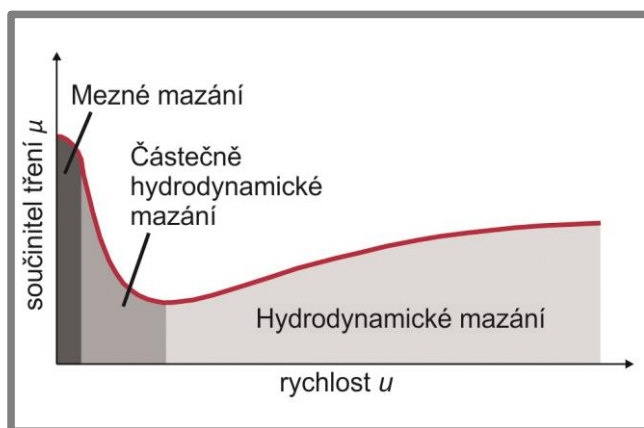
Způsob pohybu u kluzných ložisek, jak už název napovídá, je uskutečněn vzájemným klouzáním dvou povrchů základních částí ložiska. U radiálního kluzného ložiska se jedná zejména o kluz čepu v ložiskové pánvi. Při tomto relativním pohybu dvou povrchů vzniká v místě styku tření, s čímž souvisí i tvorba velkého množství tepla. Z toho důvodu je nezbytně nutné pro tento typ ložiska aplikovat mazání. Mazivo odděluje třecí plochy ať už zcela nebo částečně, čímž snižuje tření, produkci tepla a zvyšuje životnost nejen samotného ložiska, ale i přilehlých částí či celého stroje. [1], [4]

Abychom u kluzných ložisek vřeten obráběcích strojů předešli předčasnému opotřebení, v horších případech i zadření, je důležité, aby styk čepu a pánve probíhal výhradně prostřednictvím nosného prostředí, které je tvořeno vrstvou maziva určité tloušťky. Tato vrstva vzniká při vtažování maziva do klínové mezery mezi čepem a pánví během jejich relativního pohybu. Pokud je nosné prostředí v ložisku vytvořeno až po rozběhnutí čepu, jedná se o tzv. ložisko hydrodynamické. V případě, že má nosné prostředí externí původ (např. je vytvořeno čerpadlem situovaným mimo ložisko) a je zajištěno ještě před zahájením relativního pohybu čepu vůči pánvi, mluvíme o ložisku hydrostatickém. Při dosažení velkého počtu otáček se u hydrostatických ložisek projevuje hydrodynamický účinek vyvolaný rotujícím čepem. [1], [4]

2.2.1 Ložiska hydrodynamická

Hydrodynamická ložiska nevyžadují dodávku maziva pod tlakem, ale je důležité zajistit jeho konstantní dodávku. K úplnému oddělení třecích povrchů relativně tlustým mazacím filmem dochází až po rozběhnutí čepu. Toto chování popisuje Stribeckova křivka, kterou lze pozorovat na obrázku 2-4. Při nízkých rychlostech se ložisko nachází v oblasti mezního mazání. V této oblasti dochází k nedostatečnému oddělení třecích povrchů a jejich přímému kontaktu, což způsobuje nadměrné opotřebení čepu a pánve ložiska. Při následném zvyšování rychlosti prochází ložisko přes oblast částečně hydrodynamického mazání. V této oblasti je zatížení částečně přenášeno nosným olejovým filmem a částečně přímou interakcí povrchů. Bude-li navýšena rychlost čepu ještě více, přejde hydrodynamické ložisko do oblasti hydrodynamického mazání. Tato oblast se vyznačuje vytvořením olejového filmu dostatečné tloušťky a úplným oddělením třecích povrchů. V oblastech hydrodynamického a částečně hydrodynamického mazání dochází navíc k tzv. elastohydrodynamickému mazání, kdy při odvalování těles pod vysokým tlakem dochází v místě kontaktu prostřednictvím olejového filmu nebo přímého kontaktu k pružným mikrodeformacím. Je tedy zřejmé, že než dojde k vytvoření dostatečně silného olejového filmu, musí hydrodynamické ložisko překonat oblast mezního i částečně hydrodynamického mazání. Z toho důvodu jej není vhodné zatěžovat při nízkých otáčkách a během rozbíhání vřetena. [6]

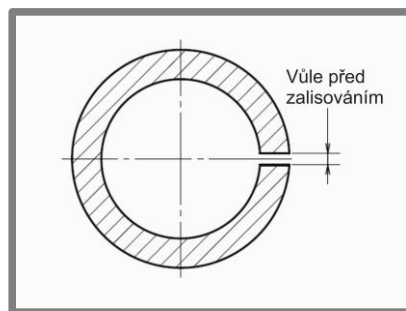
Podstata mechanismu hydrodynamického ložiska spočívá ve vtahování maziva do tenké klínové mezery mezi čepem a pánví. Při dostatečně velké rotaci čepu je vytvořen protitlak, který umožní mazacímu filmu přenášet zatížení. [1], [4]



Obr. 2-4 Stribeckova křivka [33]

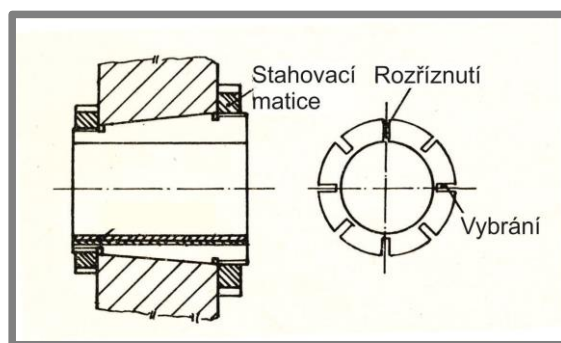
Dle způsobu provedení lze rozlišit následující druhy hydrodynamických ložisek: [1]

- Pevné kluzné pouzdro, které představuje nejjednodušší a nejlevnější typ hydrodynamického ložiska vhodný pro ty nejméně náročné aplikace.
- Pružné kluzné pouzdro s podélným rozříznutím. Vůle v tomto rozříznutí je vymezena následně po zalisování.



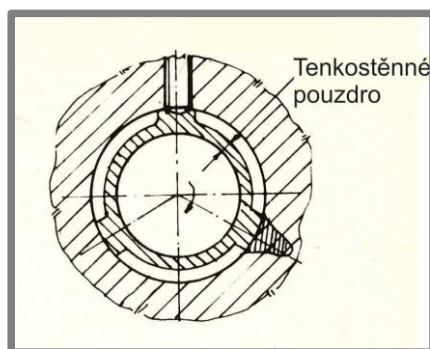
Obr. 2-5 Pružné kluzné pouzdro [1]

- Stavitelná kuželová pánev s podélným rozříznutím a několika podélnými naříznutími, které zajišťují vyšší poddajnost ložiska při montáži. Vůle je v tomto případě jednoduše vymezena zatlačením pánve do kuželové díry. V dnešní době se u vřeten obráběcích strojů využívá jen zřídka.



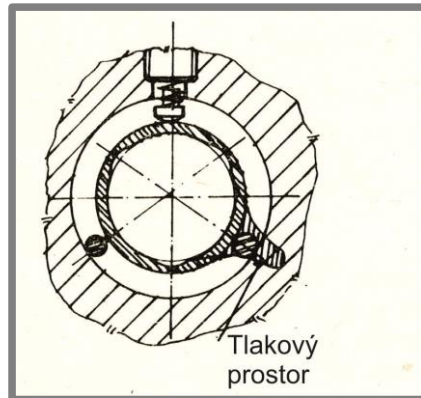
Obr. 2-6 Stavitelná kuželová pánev [1]

- Mackensonovo ložisko obsahuje pánev, která je úmyslně deformována tak, aby mezi čepem a pánví ložiska vzniklo několik klínových mezer, na kterých se tvoří nosné prostředí. Obvykle se jedná o 3 nebo 5 klínových mezer. Tato ložiska se využívají u rychloběžných vřeten (např. brusek).



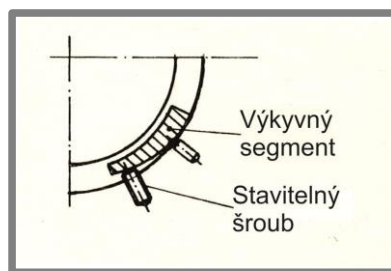
Obr. 2-7 Mackensonovo ložisko [1]

- Ložisko Hostar, které obsahuje pružný prvek, jenž automaticky vymezuje vůli. Má podobnou konstrukci jako Mackensonovo ložisko, avšak menší tuhost.



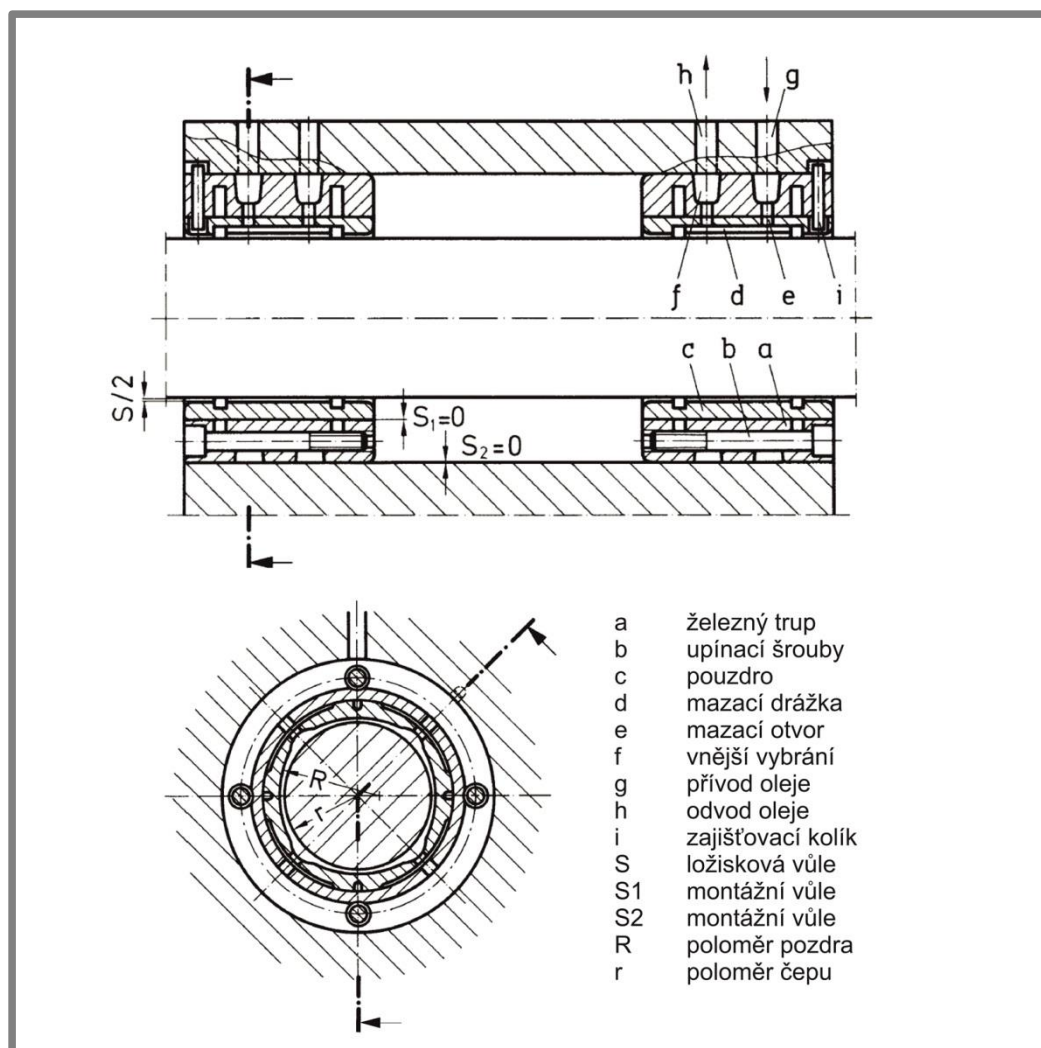
Obr. 2-8 Ložisko Hostar [1]

- Ložisko Filmatic nemá celistvou pánev, ale složenou z pěti naklopitelných segmentů. Nosné prostředí čepu je vytvořeno pěti olejovými klíny na těchto segmentech. Tyto segmenty svým naklápěním zajišťují stálou polohu čepu v ložiskové pánvi i při změně rychlosti otáčení. Využívají se např. k uložení vřeten brusek.



Obr. 2-9 Ložisko Filmatic [1]

- Ložisko obsahující na své pánvi několik mazacích drážek. Nosné prostředí vzniká v klínových prostorech mezi čepem a drážkou. Na rozdíl od Mackensonova ložiska, kde je vznik těchto prostorů podmíněn až následnou deformací ložiskové pánve, jsou drážky tohoto ložiska zajištěny již od výroby. V dnešní době je tento typ hydrodynamického ložiska velmi často využíván. Lze se s ním setkat např. u soustruhů, brusek nebo vřeten pro přesné vyvrtávání. Jako názorná ukázka konstrukce tohoto typu ložiska bylo vybráno radiální hydrodynamické ložisko značky SPIETH ze série GLM. Nosné prostředí je v tomto případě tvořeno čtyřmi drážkami rozmístěnými po obvodu jeho pánve. [27]



Obr. 2-10 Hydrodynamické ložisko SPIETH [27]

Při rozběhu čepu dochází ke tření s pánví, kvůli čemuž nejsou hydrodynamická ložiska vhodná pro velká těžká vřetena. Dokáží tlumit rázy i vibrace, a tudíž s nimi lze dosáhnout extrémně hladkých povrchů. Z průzkumu trhu vyplývá, že jsou zpravidla využívána pro vřetena brusek.

2.2.2 Ložiska hydrostatická

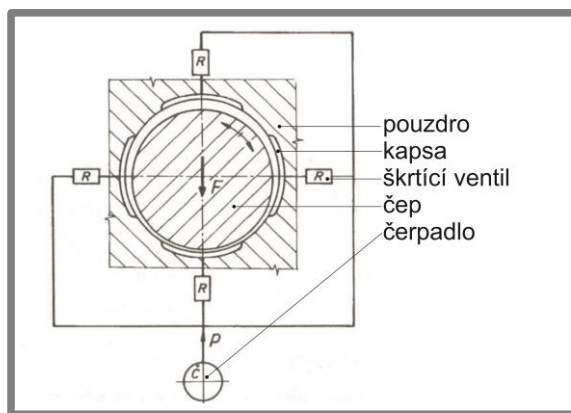
2.2.2

Pracují na podobném principu, kdy je čep od pánve oddělen relativně tlustou vrstvou mazacího filmu určitého tlaku, která přenáší dané zatížení. Ovšem na rozdíl od předchozího typu má tento tlak původ v externím čerpadle umístěném mimo ložisko. Požadovaný tlak je mazivu dodán ještě před samotným počátkem rotace, čímž je zabráněno kontaktu a opotřebení styčných ploch při rozběhu. Tato ložiska jsou složitější a výrobně náročnější. Kvůli absenci počátečního tření při rozběhu jsou hydrostatická ložiska často upřednostňována před hydrodynamickými. [1]

Existují tři základní provedení hydrostatických ložisek:

- Provedení s jedním čerpadlem, které dodává olej pod tlakem pomocí škrťacích ventilů pro všechny kapsy ložiska. Každá z kapes je škrcena konstantě a dle

excentricity čepu vůči pánvi se mění množství dodávaného oleje k dané kapse. [1]



Obr. 2-11 Hydrostatické ložisko s jedním čerpádlem [17]

- Varianta s více čerpadly osahuje jedno čerpadlo před každou kapsou, které dodává konstantní množství oleje. Navíc tato varianta obsahuje jedno hlavní plnicí čerpadlo, které zásobuje jednotlivá dílčí čerpadla. Tento typ provedení vykazuje zhruba dvojnásobnou tuhost na úkor vyšší ceny. [1]
- Systém se škrcením závislým na zatížení, jenž má jeden škrťací ventil předřazený každé kapse ložiska. Pracuje tak, že při vychýlení čepu vlivem vnějšího zatížení se zvýší tlak v kapse, který následně zdeformuje membránu ventilu a umožní vyšší průtok kapaliny. Ačkoliv má tento systém vyšší tuhost než ostatní a využívá pouze jedno čerpadlo, je výrobně složitější a náchylnější na poruchy. [20]

Protože je nosné prostředí u hydrostatických ložisek vytvořeno ještě před zahájením rotace, dochází téměř k nulovému opotřebení čepu a pánve. Externí čerpadlo zajišťuje vysokou tuhost uložení nezávislou na otáčkách a díky stálé cirkulaci oleje ložiskem i jeho teplotní stálost. Samotné ložisko se taktéž vyznačuje tichým chodem. Oproti valivým ložiskům nejsou tak citlivá na výrobní nepřesnosti, dokáží tlumit rázy a díky olejovému filmu skvěle tlumí i vibrace. Toho se využívá u vřeten brusek při tvorbě extrémně jemných povrchů a vysoce přesného obrábění. Navíc díky redukci vibrací zůstanou brusné kotouče déle ostré. Vysoká viskozita a nestlačitelnost kapaliny zajišťuje při provozních tlacích dostatečnou tuhost. Aplikují se tam, kde je požadavek nižších otáček a vyšší tuhosti, zejména u vřeten velkých obráběcích strojů. [1], [3], [20], [29]

Jako názornou ukázkou použití hydrostatických ložisek lze zmínit vertikální 4-osý soustruh Mikrotorn 1000 V4 značky HEMBURG využívající hydrostatických ložisek pro vřeteno o nosnosti až 2000 kg obrobku a maximální rychlostí 300 rpm. [15]



Obr. 2-12 Vertikální soustruh Mikroturn [15]

2.3 Vzduchová ložiska

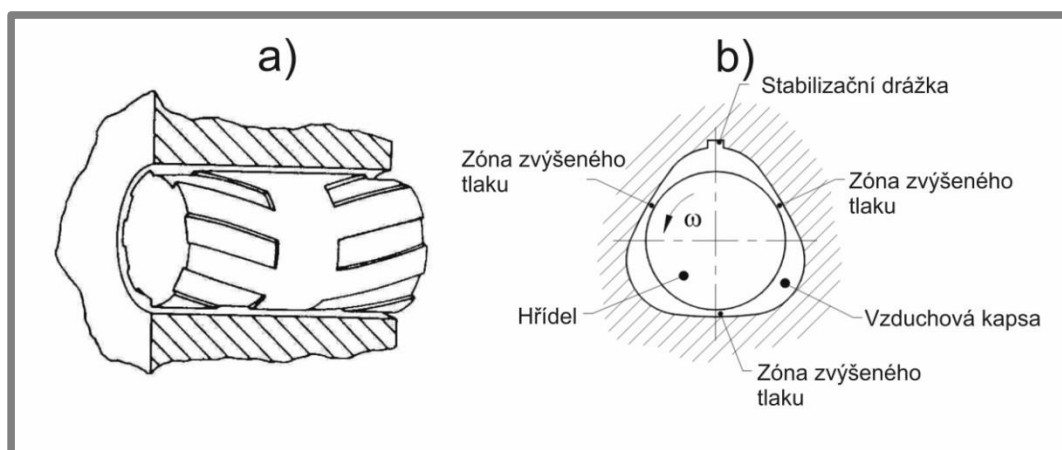
2.3

Vzduchová ložiska jsou zvláštním typem ložisek, která se řadí také k ložiskům kluzným. Jako nosné prostředí využívají plyn (nejčastěji vzduch). Podobně jako v předchozím případě je lze rozdělit na aerodynamická a aerostatická.

2.3.1 Aerodynamická ložiska

2.3.1

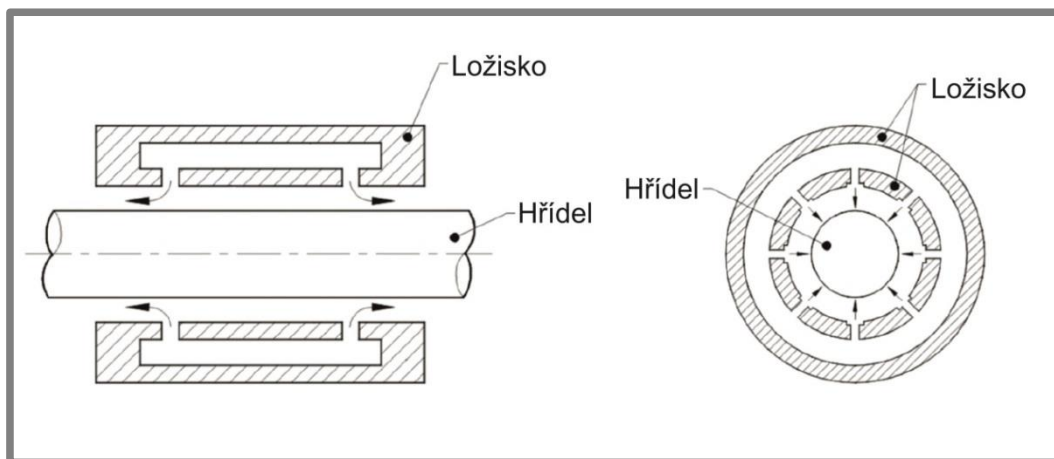
V tomto případě je nosné prostředí vytvořeno až při dostatečně rychlém relativním pohybu čepu vůči pánvi. Při rozběhu mezi nimi dochází ke tření, kvůli čemuž nejsou vhodná pro časté zapínání a vypínání nebo změnu směru rotace vřetena. Jelikož je viskozita plynu o hodně nižší než kapaliny, pracují tyto ložiska oproti hydrodynamickým při mnohem vyšších rychlostech. Vyrábí se v mnoha variantách. Lze uvést např. ložisko se spirálními drážkami, jenž čerpají vzduch dovnitř a zvyšují tím jak stabilitu, tak únosnost nebo také ložisko se třemi vzduchovými kapsami. [9],[13],[22]



Obr. 2-13 Aerodynamické ložisko se spirálními drážkami (a) [22] a se třemi kapsami (b) [13]

2.3.2 Aerostatická ložiska

Aerostatická ložiska jsou vybavena kompresorem, který zajišťuje stálý přívod tlakového vzduchu. Jsou tedy dražší, složitější, ale lze je plně zatížit již při nulových otáčkách. Vykazují téměř nulové tření, tichý chod a dlouhou životnost. Jejich princip spočívá v nepřetržitém vhánění konstantního množství vzduchu do úzké mezery mezi čepem a pánví. Při zatížení dochází na jedné straně ke zmenšení vůle a tudíž i nárůstu tlaku, naopak na druhé straně vznikne dutina větší a v ní pokles tlaku. Tento rozdíl tlaků tedy působí proti vnějšímu zatížení a má tendenci vystředit čep. Přiváděný vzduch musí být navíc zbaven pevných částic, vlhkosti a olejových výparů, které by mohly ucpat vzduchovou soustavu. [9]



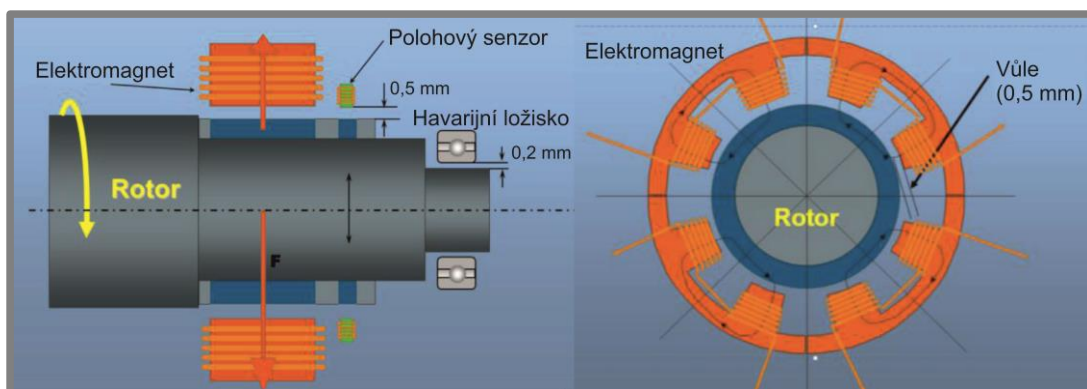
Obr. 2-14 Aerostatické ložisko [13]

Oproti hydrostatickým a hydrodynamickým ložiskům stejné velikosti mají tyto vzduchová ložiska mnohem nižší únosnost a tuhost. Využívají se zejména u vysoce přesného obrábění a mikroobrábění např. v optickém, elektronickém nebo zdravotním průmyslu. Jako konkrétní příklady použití lze zmínit vřetena pro broušení vnitřních otvorů nebo vysoce přesná vyvrtávací vřetena. [3], [9], [13], [31]

2.4 Magnetická ložiska

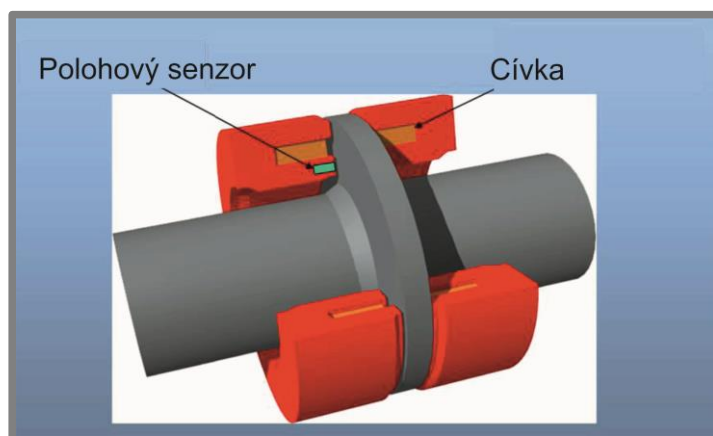
Aktivní magnetická ložiska využívají přitažlivých sil elektromagnetického pole k bezkontaktnímu uložení hřídele. Pracují bez tření a třecích ztrát. Z toho důvodu nepotřebují mazání, což se příznivě odrazí na ceně. Jejich součástí jsou i tzv. „havarijní“ valivá ložiska, která se pracovního procesu neúčastní, ale v případě náhlého výpadku proudu zajistí bezpečné zastavení rotoru. Obecně platí, že vřetena obráběcích strojů, která využívají právě magnetických ložisek, jsou schopna dosáhnout těch nejvyšších rychlostí. [14], [19]

Radiální ložisko obsahuje po obvodu svého statoru většinou 4 elektromagnety (dle velikosti vřetena i více), přičemž každý z elektromagnetů je řízen nezávisle. Tyto elektromagnety s využitím polohového čidla a řídicí jednotky usměrňují prostřednictvím přitažlivých sil polohu feromagnetického rotoru. Vůle mezi státorem a rotorem se zpravidla pohybuje mezi 0,5 až 2 mm. [14], [19]



Obr. 2-15 Radiální magnetické ložisko [14]

Na podobném principu pracuje i axiální ložisko, které je složeno z masivního ocelového kotouče spojeného s rotorem a prstencovým statorem po každé straně. [14], [19]



Obr. 2-16 Axiální magnetické ložisko [14]

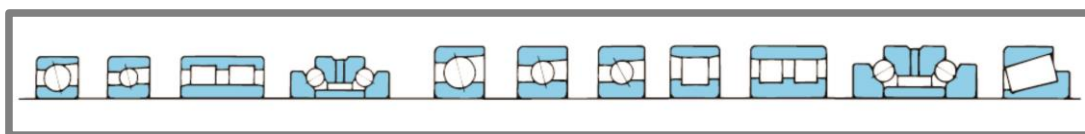
2.5 Valivá ložiska

2.5

Obecně lze říci, že se valivá ložiska skládají ze čtyř základních částí. Těmito částmi jsou vnitřní kroužek, vnější kroužek, valivé segmenty a ložisková klec, která zajišťuje jejich rovnoměrné rozložení a zamezuje jejich vzájemnému tření. Při pracovním procesu je poté zatížení přenášeno mezi ložiskovými kroužky právě pomocí těchto valivých segmentů. Valivá ložiska lze dle směru zatížení rozdělit na axiální a radiální, nebo dle tvaru styčné plochy valivého tělesa na ložiska s čárovým (válečková, kuželíková atd.) a bodovým stykem (např. kuličková). Pro větší zatížení jsou vhodnější ložiska s čárovým stykem. Styčnou plochu válečku a rovinné plochy tvoří v ideálním případě přímka a u kuličky popř. soudečku je to bod. V případě dvou ložisek se stejnými kroužky, kdy v jednom případě je ložisko osazeno válečky a v druhém kuličkami o stejném počtu a poloměru křivosti, je patrné, že válečky poskytují větší styčnou plochu pro přenos zatížení. Z toho důvodu bude při stejném zatížení vznikat v kuličkovém ložisku vyšší napětí. [6], [10]

Jak už bylo řečeno, valivá ložiska jsou díky svým výhodám hojně využívána v oblasti vřeten obráběcích strojů. Mezi jejich předností patří velká tuhost, schopnost úplného odstranění vůle, univerzálnost a relativně jednoduché mazání. Za chodu se v nich generuje méně tepla než v kluzných ložiscích. Nevyžadují zaběhnutí a lze je plně zatížit i při malých otáčkách. Valivá ložiska kladou při rozběhu malý odpor. Jelikož jsou normalizovaná a sériově vyráběná, lze je v relativně krátkém časovém intervalu snadno vyměnit. [1], [7]

Dle katalogů předních světových výrobců super přesných ložisek jako jsou např. FAG, SKF, Timken a další, je zřejmé, že se použití ložisek pro vřetena obráběcích strojů omezuje převážně na ložiska kuličková, válečková a kuželíková.



Obr. 2-17 Výrobní řada super přesných ložisek KOYO [18]

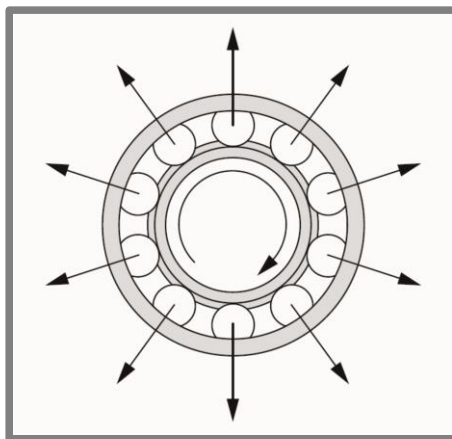
2.5.1 Kuličková ložiska

Jedná se o velmi univerzální ložiska vyznačující se jednoduchou konstrukcí. Valivým tělísky jsou v tomto případě kuličky. Mají bodový styk a nejsou tedy vhodná pro větší zatížení. Na druhou stranu jejich vhodnost spočívá ve vysokorychlostních aplikacích s minimálním oteplováním. Vyrábí se v mnoha variantách a nejrůznějších konstrukčních provedeních, tak aby vyhověly co největší škále využití. Se zvyšujícími se otáčkami vřetena roste i odstředivá síla působící na jednotlivé části ložiska. Její velikost na jednotlivé valivé elementy popisuje následující rovnice. [1], [3], [5], [7]

$$F_G = m \frac{d_m}{2} \omega^2 \quad (5)$$

kde:

F_G	N	- odstředivá síla
m	kg	- hmotnost valivého tělesa
d_m	m	- střední průměr ložiska
ω	rads^{-1}	- úhlová rychlost.



Obr. 2-18 Odstředivé síly působící na ložisko [30]

Tento jev nepříznivě přispívá k radiálnímu zatížení ložiska, většímu opotřebení a produkci tepla. Z tohoto důvodu jsou ložiska pro vysoké otáčky vybavena kuličkami menších průměrů, než je standardní, což snižuje jak jejich hmotnost, tak i střední a vnější průměr ložiska. [30]

Při vzájemném stlačování dvou těles se zakřivenými povrchy se vlivem elasticity mění styčný bod nebo přímka dotyku na plochu. Čím vyšší zatížení zprostředkujeme, tím větší bude styčná plocha v místě dotyku. S tím souvisí i rostoucí valivý odpor, větší tření a také již zmíněná zvýšená produkce tepla. Zmenšení velikosti valivých tělísek a zvýšení jejich počtu redukuje zástavbový prostor ložiskového uzlu a tím pádem snižuje i celkovou deformaci v tomto uzlu. Naopak únosnost ložiska roste s průměrem valivých tělísek. [4], [11]

Jako důkaz únosnosti nám poslouží rovnice Hertzova napětí pro kontakt dvou válců s rovnoběžnými osami. [4] V našem případě se jedná o kontakt ložiskového kroužku a válečku při daném zatížení F . Kontaktní oblast mezi nimi je pak tvořena obdelníkovým pásem o šířce $2b$ a délce válečku l .

$$p_{max} = \frac{2F}{\pi bl} \quad (6)$$

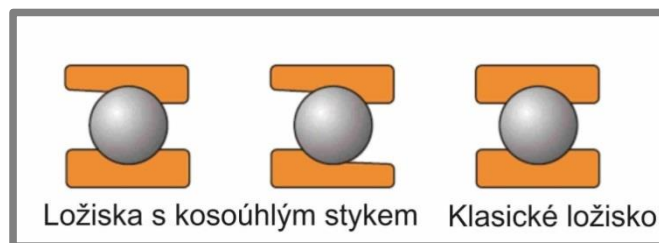
$$b = \sqrt{\frac{2F}{\pi l} \frac{\left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \mu_2^2)}{E_2} \right]}{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}}} \quad (7)$$

kde:

p_{max}	MPa	- maximální Hertzův tlak v oblasti kontaktu
b	mm	- polovina šířky kontaktního pásu
l	mm	- délka válečku
d_1	mm	- průměr válečku
d_2	mm	- průměr ložiskového kroužku
E_1	MPa	- modul pružnosti válečku
E_2	MPa	- modul pružnosti ložiskového kroužku

F	N	- zátěžná síla
μ_1		- Poissonovo číslo pro váleček
μ_2		- Poissonovo číslo pro ložiskový kroužek

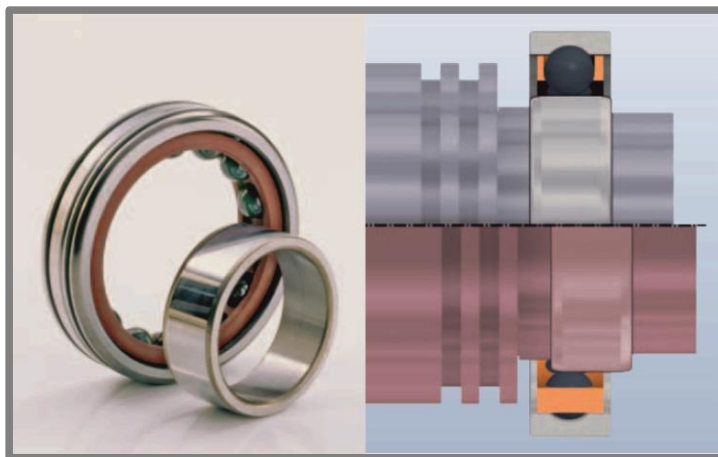
Z rovnic č. 6 a 7 je již patrné, že čím větší bude průměr válečku, tím širší bude kontaktní pás a nižší Hertzovo napětí v oblasti styku.



Obr. 2-19 Druhy jednořadých kuličkových ložisek pro vřetena obráběcích strojů [30]

Klasická jednořadá kuličková ložiska se vyznačují dvěma plnými rameny obklopujícími kuličku na každé straně kroužku. Jsou schopné přenést jen velmi malé axiální zatížení, a tudíž jsou využívána primárně pro zatížení radiální. Rovněž jsou vhodná pro vysoké otáčky s minimálním zahříváním. Celkově se ovšem tyto ložiska pro uložení vřeten používají velmi málo a to převážně pro aplikace menších zatížení, kde jsou kladeny nižší požadavky na přesnost. Nejčastěji se s nimi lze setkat u uložení zadního konce vřetena, kde nejsou kladeny tak přísné požadavky na tuhost a přesnost jako na jeho pracovním konci. [1]

Jejich modifikací a nahrazením vnitřního kroužku kroužkem rovným vznikne tzv. *plovoucí ložisko*. Tato konfigurace umožňuje pohyb vnitřního kroužku vůči vnějšímu. Jedná se tedy o axiálně volné ložisko a tudíž je vhodné pro uložení zadního konce vřetena. Plovoucí kuličková ložiska se aplikují zejména tam, kde mají být dosaženy ty nejvyšší otáčky, a jejich nosnost je až na druhém místě. Z toho důvodu jsou často vybavována keramickými kuličkami. Např. firma FAG tyto ložiska pod označením FD (Floating Displacement) vybavuje keramickými kuličkami již standardně a to ve spojení s vnitřním kroužkem vyrobeným z vysoce výkonné oceli Cronidur 30, která je schopna přenést vyšší Hertzovy plošné tlaky než běžná ocel. Jejich oblast využití je především uložení motorových vřeten. [11]

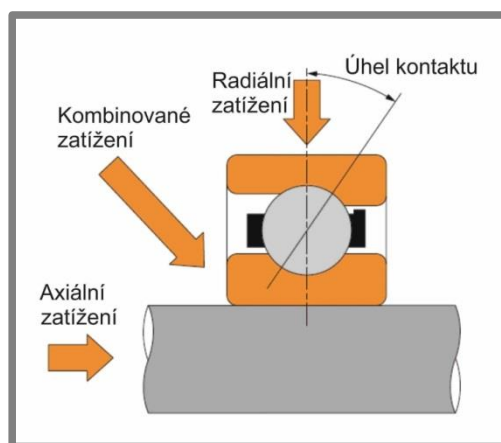


Obr. 2-20 Ložisko Floating Displacement [11]

Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem jsou díky svým vlastnostem velmi často využívána pro uložení vřeten obráběcích strojů. Přenášejí současně jak radiální, tak axiální zatížení. Lze u nich poměrně jednoduše vymezit vůli předpětím. S oblibou se používají tzv. párovaná ložiska v různém skupinovém uspořádání, které zajišťuje zvýšení dovoleného zatížení. Lícování je u těchto párovaných ložisek od výroby již zaručeno, a k vytvoření optimálního předpětí je k sobě stačí stlačit požadovanou silou. [1], [5]

Vhodnost těchto ložisek pro přenášení radiálního či axiálního zatížení je dána kontaktním úhlem. Platí, že čím větší kontaktní úhel, tím lepší schopnost přenášet axiální zatížení a naopak, čím menší úhel styku, tím lépe je přenášeno radiální zatížení. S rostoucím úhlem styku se axiální únosnost zvyšuje, avšak klesá dosažitelná rychlost. Nižší dosažitelná rychlost je spjata se zvýšenou generací tepla u ložisek s větším stykovým úhlem. [21], [30]

Přední výrobci, jako jsou NSK, SKF, Timken a další, vyrábí vřetenová ložiska s kosoúhlým stykem určená zejména pro přenos radiálního zatížení v základním provedení 15° , 18° , 20° nebo 25° . S vřetenovými ložisky s kosoúhlým stykem určenými pro přenos axiálního zatížení se lze setkat nejčastěji v provedení 30° , 40° nebo 60° . [21], [26], [30]



Obr. 2-21 Úhel kontaktu ložiska [30]

Kontaktní úhel 15° je vhodný primárně pro přenos radiálního zatížení. Použití spočívá zejména ve vysokorychlostních aplikacích, kde je dosaženo těch nejvyšších otáček např. u vysokorychlostních brusek. [21], [30]

Kontaktní úhel 25° je vhodný i pro přenos axiálního zatížení. Lze jej využít pro aplikace vyšších otáček. U motorových vřeten je vnitřní produkce tepla mnohem vyšší než u vřeten poháněných řemenem. Vlivem teplotní roztažnosti může dojít k rapidnímu zmenšení vnitřní vůle ložiska a při vysokých otáčkách i k jeho selhání. Z tohoto důvodu je v některých případech vhodné upřednostnit tyto ložiska před ložisky s kontaktním úhlem 18°, jelikož mají větší radiální vůli. [21], [30]

Kontaktní úhel 60° je vhodný výhradně pro přenos axiálního zatížení. Lze se s ním setkat jak u jednořadých kuličkových ložisek, tak u dvouřadých. Dvouřadá kuličková ložiska jsou navíc axiálně předepnuta již od výroby, a proto vykazují vysokou axiální zatížitelnost a tuhost. Většinou se montují společně s dvouřadými válečkovými ložisky, čemuž jsou přizpůsobeny i jejich rozměry. Jmenovité průměry vnějších kroužků jsou v obou případech totožné, avšak axiální dvouřadá kuličkové ložisko vykazuje v díře tělesa jistou vůli. Tato vůle zabraňuje radiálnímu působení na axiální ložisko. Používají se pro vysoce zatížitelná vřetena obráběcích strojů. [11], [18], [24]



Obr. 2-22 Dvouřadá kuličkové axiální ložisko s centrální mazací drážkou [11]

2.5.2 Válečková ložiska

Patří do skupiny ložisek s čárovým stykem, a tudíž jsou obecně schopna přenášet velká radiální zatížení. Využívají se u vřeten, kde je požadována vysoká tuhost, únosnost a přesnost. Stejně jako ložiska kuličková mohou být osazena keramickými válečky. Vyrábí se jako axiálně volná, a to v několika různých provedeních. [11]

Lze rozlišit 2 základní řady, kterými jsou:

- **Řada N10** označující ložiska jednořadá s válečky vedenými na vnitřním kroužku s vnějším kroužkem bez přírub. [24]
- **Řada NN30** označující dvouřadá válečková ložiska bez vodících přírub na vnějším kroužku a s třemi vodícími přírubami na kroužku vnitřním. [24]

Obě tyto základní řady a jejich modifikace jsou běžně k dostání i s kuželovou dírou o kuželovitosti 1:12 (přídavné označení K). Tato úprava slouží k snadnějšímu vymezení vůle či nastavení požadovaného předpětí axiálním posuvem ložiska na kuželovité části hřídele. Jedním z charakteristických rysů dvouřadých válečkových ložisek používaných pro vřetena obráběcích strojů je přesazení jedné řady vůči druhé, většinou o jednu polovinu rozteče válečků. Toto uspořádání poskytuje ložisku více stykových přímků po obvodu oběžných drah, čímž je dosažena vyšší radiální tuhost a lepší rozložení tlaků po obvodu kroužků. Vyšší tuhosti lze dosáhnout také volbou ložiska s menším průřezem, které se vyznačuje válečky menších rozměrů a jejich vyšším počtem. Mnoho výrobců (např. KOYO, SKF, FAG) v dnešní době již běžně nabízí tyto ložiska s drážkou na vnějším kroužku vybavenou otvory pro přívod mazacího oleje. [1], [11], [18], [24]



Obr. 2-23 Dvouřadé válečkové ložisko s centrální mazací drážkou [11]

Pro ta nejrychlejší vřetena jsou k dispozici i hybridní ložiska s polovičním počtem válečků vybavená válečky keramickými. Avšak snížení počtu valivých elementů se nepříznivě projeví snížením tuhosti a nosnosti ložiska. Pokud je ovšem toto ložisko správně použito a předepjato, je snížení tuhosti a nosnosti vykompenzováno menším nárůstem teploty a tření, což přináší vyšší otáčky a delší trvanlivost maziva u ložisek lubrikovaných plastickým mazivem. Nedílnou součástí těchto super rychlých ložisek jsou i klece vyrobené ze speciálních materiálů, jako je např. PEEK (Polyetereterketon), popřípadě ještě vyztužené skelnými vlákny, uhlíkovými vlákny atd. Těchto ložisek se využívá na nepracovním konci elektrovřetena, kde je dosažitelná rychlost upřednostňována před tuhostí. [11], [24]

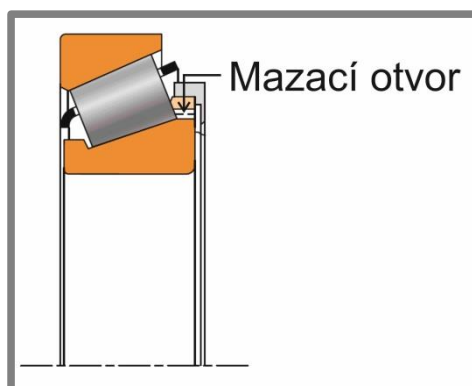


Obr. 2-24 Hybridní válečkové ložisko s polovičním počtem válečků [11]

2.5.3 Kuželíková ložiska

Jak je z názvu již patrné, jde o ložiska osazená valivými segmenty ve tvaru komolého kužele, které se pohybují po kuželových oběžných drahách. Vyznačují se schopností současně přenášet vysoká radiální a axiální zatížení. Jsou výrobně náročnější a pouze někteří výrobci je dokáží vyrobít v přesnostech vhodných pro uložení vřeten obráběcích strojů (např. Timken), což se také projevuje i v jejich ceně. Za chodu generují více tepla než ložiska kuličková či válečková. Z toho důvodu je v rámci vymezení vlivu teplotních dilatací doporučeno volit takové uspořádání ložisek na hřídeli, při kterém se osy rotace kuželíků obou ložisek protínají v jednom bodě na ose rotace této hřídele. [1], [4]

Ačkoliv svými otáčkami daleko převyšují běžná kuželíková ložiska, nedosahují v tomto směru kvalit kuličkových ložisek. Vzhledem k vysokým otáčkám vřeten a ke zvýšené tvorbě tepla mohou tato ložiska obsahovat axiálně vyvrtané otvory na vnitřním kroužku, které zajišťují přívod maziva do kritických míst styku čela válečku a nákržku vnitřního kroužku. Těchto ložisek se využívá hlavně pro hrubovací vřetena nebo u velkých soustruhů a obráběcích center. [1], [2], [8]



Obr. 2-25 Kuželíkové ložisko s mazacími otvory [30]

2.6 Uložení vřetena do valivých ložisek

2.6

V praxi se můžeme setkat s mnoha typy uložení vřetena. Každé vřeteno ať už pro soustružení, frézování nebo broušení vyžaduje individuální přístup a nastavení odvíjející se od konkrétních provozních podmínek. Mezi faktory, které musí konstruktér při dimenzování uložení vřetena zohlednit, patří: [2], [11]

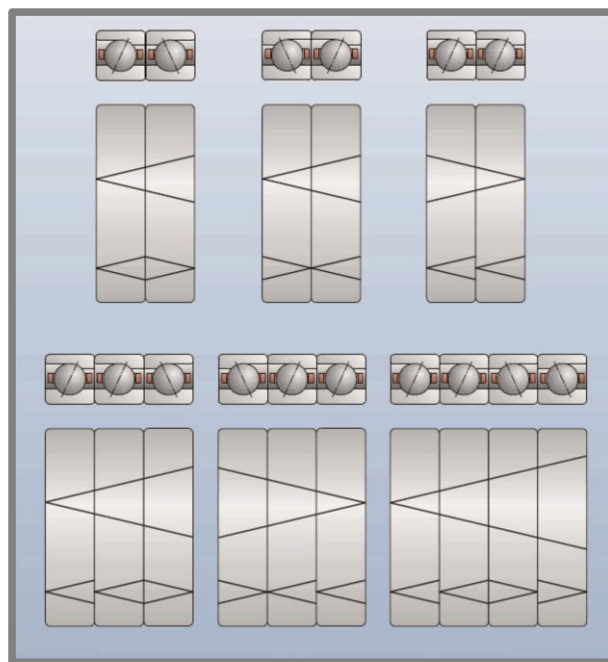
- tuhost uložení
- předpětí
- druh a rozměry ložisek
- materiál ložiska
- vhodný stykový úhel ložiska
- otáčky vřetena
- způsob mazání
- vzdálenost ložisek
- požadovaná přesnost chodu

2.6.1 Uspořádání ložisek

2.6.1

Obecně lze říct, že ložiska kuličková jsou nejvhodnějšími kandidáty pro vysokorychlostní aplikace. Na druhou stranu, z výše uvedených typů ložisek jsou to právě kuličková, která vykazují nejmenší tuhost (nejvyšší mají kuželíková). Spojení rychlosti a tuhosti je možno docílit skupinovým uspořádáním ložisek s kosoúhlým stykem. Nejčastěji se jedná o uspořádání do skupin po dvou, třech nebo po čtyřech těchto ložiscích, které pracují jako jeden celek. [1], [4]

Někteří výrobci přímo nabízejí ložiskové sady, které jsou připraveny k použití bez jakéhokoliv dalšího dolícování. U těchto sad je zaručeno rozměrové a toleranční sladění vnitřních a vnějších průměrů ložisek, popř. jejich vůle. Tyto sady existují i v několika různých výrobních třídách, přičemž každá třída je vhodná pro jiný stupeň předpětí dané sady. Každé ložisko v této sadě má přesně určenou pozici, která je znázorněna šipkou rozprostírající se přes všechny vnější kroužky. Ložiska vyrobená za účelem seskupení do těchto sestav se nazývají párovatelná. [4], [11], [26]



Obr. 2-26 Ložiskové sady [11]

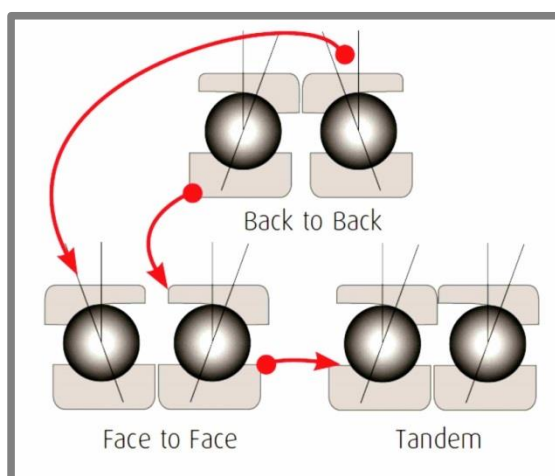
Existují tři základní uspořádání dvojice ložisek. Jedná se o uspořádání do „X“, do „O“ a do „T“.

Sestava do „X“ (tzv. face to face), neboli čely k sobě, přenáší axiální zatížení oběma směry, avšak vždy jen jedním ložiskem.

Sestava do „O“ (tzv. back to back), neboli zády k sobě, přenáší taktéž axiální zatížení v obou směrech, ale vždy jen jedním ložiskem. Vyznačuje se velkou tuhostí uložení a schopností zachycovat i klopné momenty.

Sestava do „T“, neboli do tandemu, vykazuje velkou tuhost a je schopna přenášet velká axiální zatížení, ovšem jen v jednom směru. Zatížení se v tomto případě rozdělí na obě ložiska.

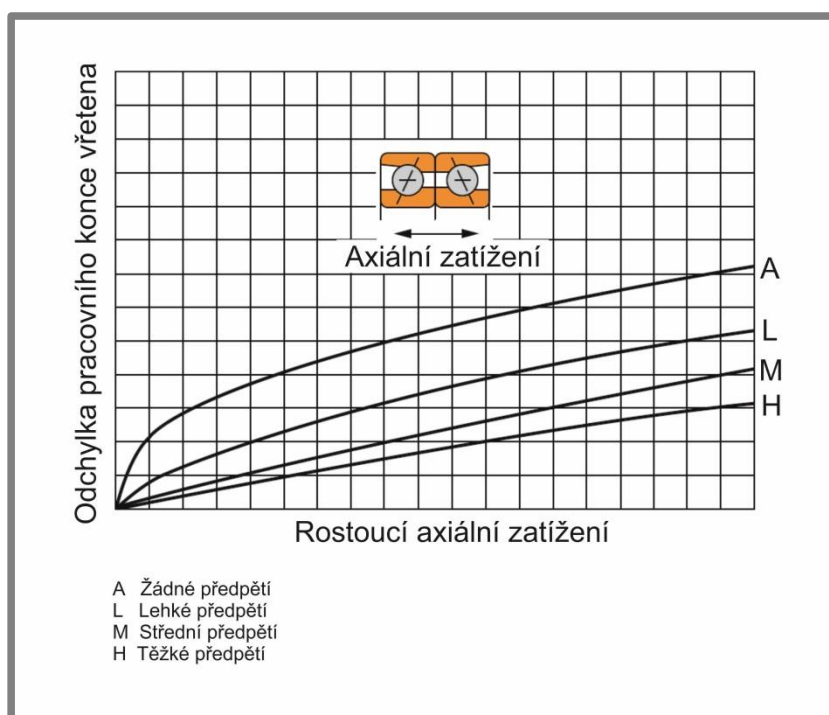
Kromě klasických sad existují i univerzální párovatelná ložiska a univerzální ložiskové sady, ve kterých lze ložiska montovat v libovolném pořadí. [4], [11]



Obr. 2-27 Uspořádání ložisek [21]

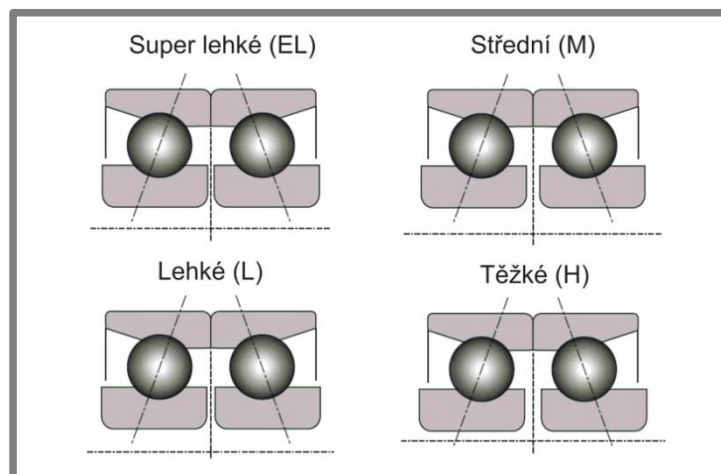
2.6.2 Předpětí ložisek

Vzhledem k tomu, že má ložisková vůle přímý vliv na přesnost chodu vřetena, patří její vymezení k nezbytným úkonům při ukládání vřetena. Správné předpětí má také pozitivní vliv na zvýšení tuhosti uložení, prodloužení životnosti ložiska a redukcii hluku způsobeného vibracemi ložiska. Kromě toho předpětí ovlivňuje i jiné parametry, jako je tvorba tepla, s čímž souvisí i maximální dosažitelná rychlost. [4], [18]



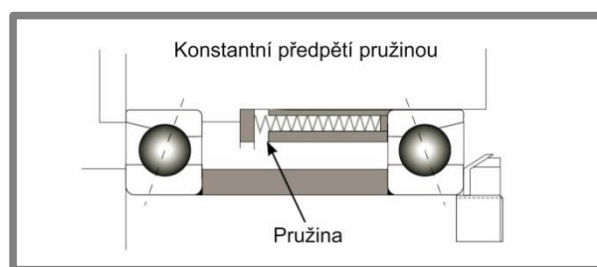
Obr. 2-28 Vliv předpětí na odchylku pracovního konce vřetena [30]

U párovaných dvojic jsou ložiska s kosoúhlým stykem při montáži předepjata vůči sobě vzájemným axiálním posuvem. Pro tato ložiska udávají výrobci velikost předpětí většinou ve třech stupních: **L** (light) – lehké, **M** (medium) – střední, **H** (heavy) – těžké. Někteří uvádí i čtvrtý stupeň **EL** (extra light) – super lehké předpětí. EL se využívá u těch nejrychlejších vřeten a poskytuje nejnižší tuhost, oproti tomu H odpovídá nejvyššímu stupni tuhosti, ale na úkor nižší rychlosti. Velikost stanoveného předpětí v ložiskových sadách lze pozorovat na obr. 2-29. Je důležité si všimnout rozdílných vzdáleností ložiskových kroužků v nezátíženém stavu. [21]



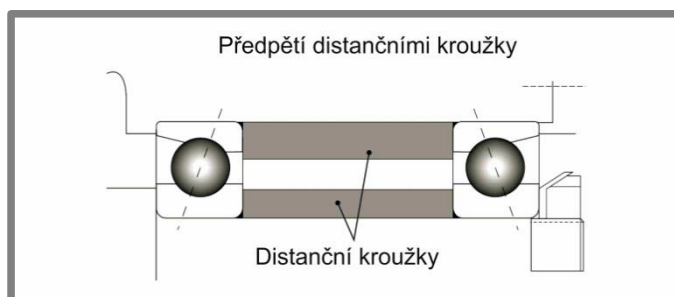
Obr. 2-29 Velikosti předpětí [21]

Jako další ze základních způsobů předpětí je třeba zmínit **předpětí pružinou**, někdy také předpětí konstantní silou, které se uplatňuje u velmi rychlých vřeten, zejména u brusných aplikací. [21]



Obr. 2-30 Předpětí pružinou [21]

Nejběžnější způsob předpětí je pomocí **distančních kroužků**. Jejich výhodou oproti pružině je jednoduchost a vyšší tuhost. Poskytují také možnost individuálního nastavení či přenastavení předpětí přebroušením jednoho z distančních kroužků. Vytváří větší prostor pro mazivo mezi ložisky a také vhodný prostor pro trysky při mazání typu olej-vzduch. [26]



Obr. 2-31 Předpětí distančními kroužky [21]

Jak už bylo řečeno, párovatelná ložiska jsou již od výroby předurčena k použití při předem stanoveném předpětí. To znamená, že při dodržení montážních pokynů výrobce bude vzájemným axiálním posuvem kroužků vůči sobě vyvozeno předpětí

konkrétní dané velikosti. Po montáži ložiskové sady se může ovšem skutečné předpětí značně lišit od toho teoretického, které je stanoveno výrobcem. Tento fakt je způsoben rozměrovými a geometrickými tolerancemi úložných ploch hřídele a tělesa jako např. kruhovitostí, souosostí atd. Dalším proměnným faktorem je odstředivá síla, která zvyšuje předpětí a v limitních případech může způsobit až oddělení vnitřního kroužku od plochy hřídele. Z tohoto důvodu je nutné montovat vnitřní kroužek s přesahem, což také ovlivní výslednou velikost předpětí. [24]

Konkrétní předepínací sílu pro určitý typ ložiska lze zjistit z podkladů daného výrobce. Např. výrobce SKF uvádí pro ložiska montovaná s nulovým přesahem na hřídeli v silnostěnných ocelových či litinových tělesech velikost síly předpětí v následujícím tvaru (hodnoty součinitelů jsou uvedeny v podkladech SKF). [23]

$$G_m = f f_1 f_2 f_{HC} G_{A,B,C,D} \quad (8)$$

kde:

- f - součinitel ložiska, který závisí na řadě a velikosti ložiska
- f_1 - opravný součinitel, který závisí na stykovém úhlu ložiska
- f_2 - opravný součinitel, který závisí na třídě předpětí
- f_{HC} - opravný součinitel hybridních ložisek
- $G_{A,B,C,D}$ N - předem stanovené teoretické předpětí v ložiskové sadě před montáží
- G_m N - předpětí v namontované sadě ložisek.

Indexy u $G_{A,B,C,D}$ označují jednotlivé třídy předpětí (A-velmi malé, B-malé, C-střední, D-velké). Uvedený vztah platí pro dvě spárovaná ložiska v uspořádání čely nebo zády k sobě. V případě sestavy o třech, čtyřech a více ložiscích bude tato síla větší a je nutno ji vynásobit koeficientem stanoveným výrobcem. [23]

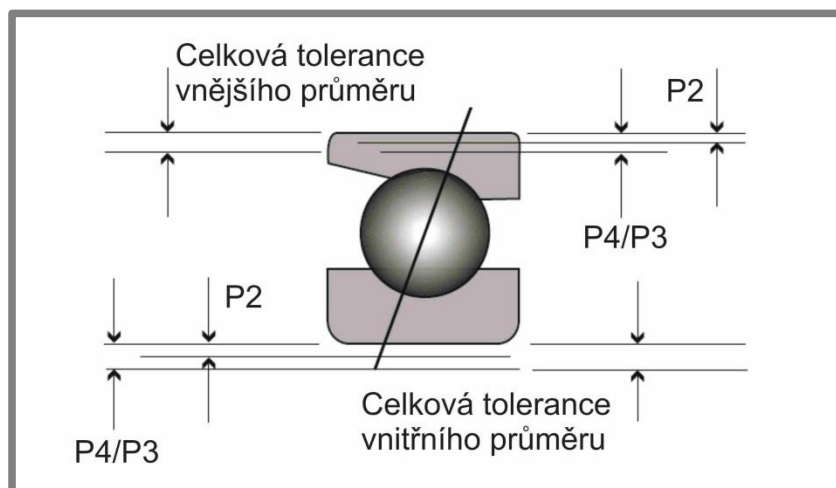
2.6.3 Třída přesnosti ložiska

Přesnost chodu vřetena je přímo ovlivňována přesností chodu ložiska. Vysoce přesná kuličková ložiska se vyrábí hned v několika tolerančních třídách. Při výběru ložiska o dané toleranční třídě by měl konstruktér zvážit maximální dovolené házení (zejména radiální) a také jeho cenu. V tabulce níže jsou uvedeny jednotlivé třídy přesnosti dle daných norem, ve kterých lze získat tato vysocí přesná ložiska. Jedná se o normy AFBMA (Anti-Friction Bearing Manufacturers Association), ISO 492 (International standard association) a DIN (Deutsche Industrie Norm). Nejpresnější z uvedených tolerančních tříd dle normy DIN je třída P2, nejméně přesná pak P5. [3],[12],[21]

Tab. 2-1 Toleranční třídy přesnosti [3], [12], [21]

Norma	Třída přesnosti		
	ABEC5	ABEC7	ABEC9
AFBMA			
ISO	5	4	2
492			
DIN	P5	P4	P2

Většina výrobců uvádí svá ložiska v těchto uvedených tolerančních třídách přesnosti, ale např. výrobce jako je NSK, představil navíc toleranční třídu P3, která je kompromisem mezi P4 a P2. Ložiska této třídy se vyznačují vnějšími rozměry o toleranci P4 a vnitřními o toleranci P2. S tolerancemi P2 resp. P3 vnitřních rozměrů pak ložisko dosahuje těch nejlepších výsledků házivosti. [21]



Obr. 2-32 Velikosti tolerančních tříd [21]

2.6.4 Vzdálenost ložisek

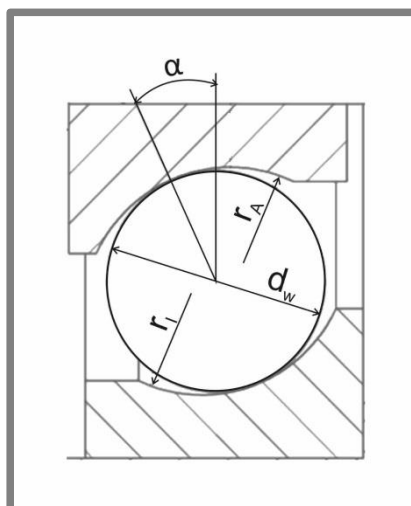
Jak již bylo řečeno, vlivem teplotního spádu napříč ložiskem se vnitřní kroužek roztahuje více než vnější. Tím dochází k vzájemnému posuvu kroužků v ložiskových sestavách a změně vůle či předpětí. V sestavách do „X“ se vlivem teplotního gradientu vůle vždy zmenšuje. U sdružení do „O“ záleží na jejich střední vzdálenosti B_m a středním průměru D_m . Pokud je $D_m > B_m$, napětí v uzlu poroste a pokud $D_m < B_m$, bude napětí vlivem teploty klesat. Optimální vzdálenost kuličkových ložisek v sestavě je dána níže uvedeným vztahem. [3],[28]

$$B_{mopt} = D_m \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} - \frac{l_0(t_I + t_A - 2t_0)}{t_I - t_A} \left(\frac{1}{\sin \alpha} \right) \quad (9)$$

$$l_0 = r_A + r_I - d_w \quad (10)$$

kde:

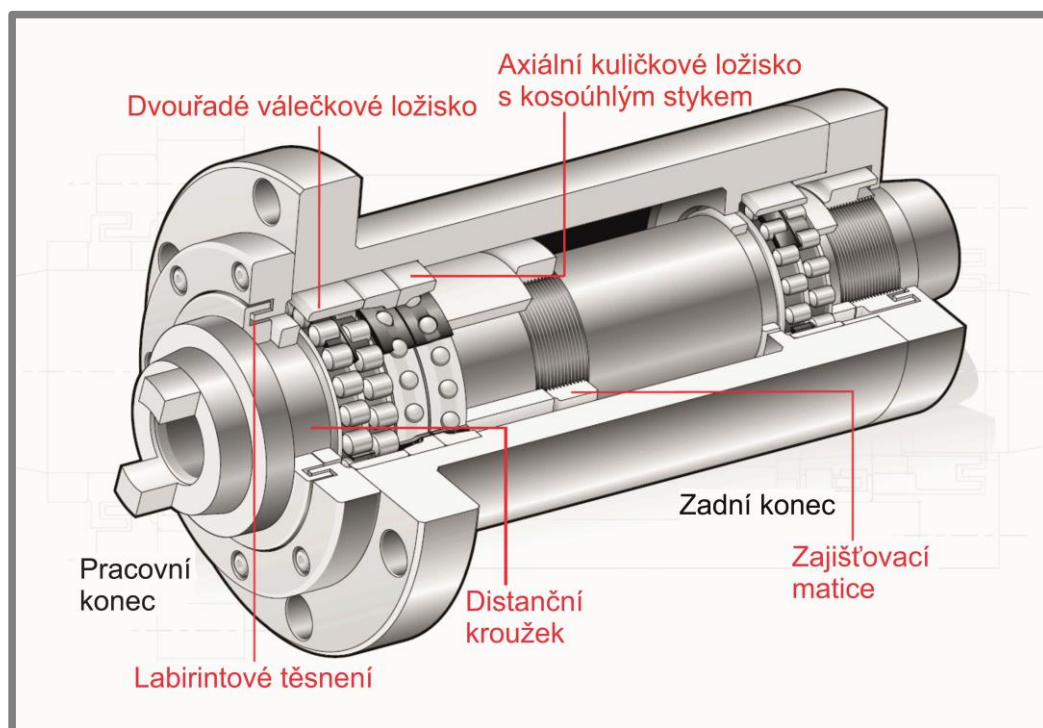
B_{mopt}	m	– optimální vzdálenost ložisek
D_m	m	- střední průměr ložiska
l_0	m	- vzdálenost stykových bodů při nulovém teplotním spádu
t_I	°C	- teplota vnitřního kroužku
t_A	°C	- teplota vnějšího kroužku
t_0	°C	- původní teplota v ložisku před teplotním gradientem
α	°	- stykový úhel v ložisku
r_A	m	- poloměr zaoblení ramena vnějšího kroužku
r_I	m	- poloměr zaoblení ramena vnitřního kroužku
d_w	m	- průměr kuličky



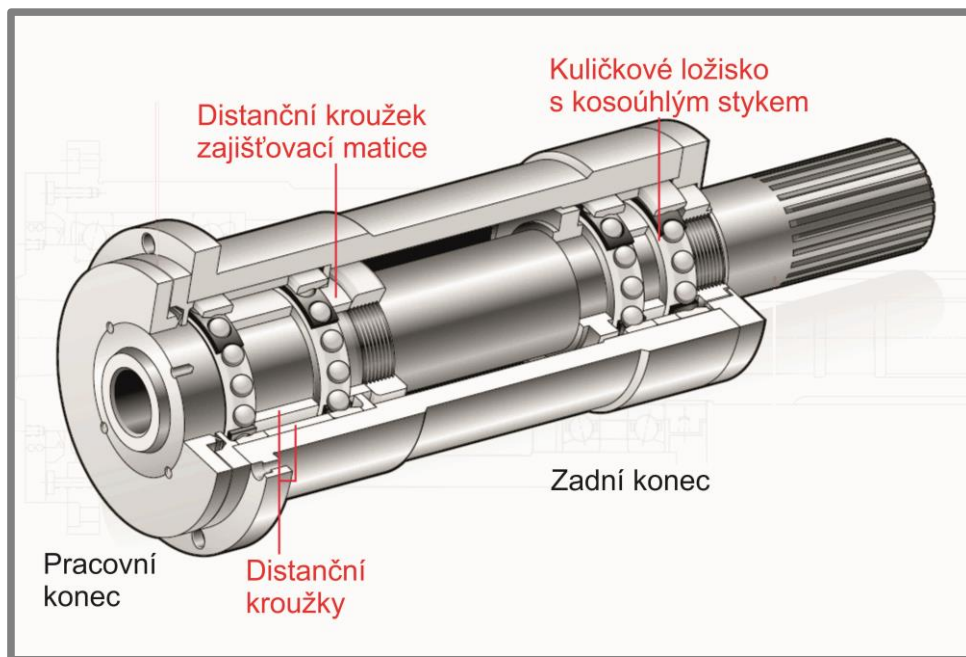
Obr. 2-33 Geometrie kuličkového ložiska [28]

2.6.5 Příklady uložení vřetena

2.6.5



Obr. 2-34 Vysoce zatížitelné vřeteno [21]



Obr. 2-35 Vysokorychlostní vřeteno [21]

Na obrázku 2-34 lze vidět vřeteno pro těžší obrábění. Předností tohoto vřetena je vysoká tuhost, ale na úkor nižších otáček. Radiální síly na pracovním konci jsou v tomto případě zachyceny dvouřadým válečkovým ložiskem. Kuličkové ložisko zde slouží pouze pro přenos axiálního zatížení. V druhém případě (obr. 2-35) se jedná o vysokorychlostní vřeteno, které je naopak schopno dosáhnout velmi vysokých rychlostí, avšak se sníženou tuhostí. Jak přední, tak zadní konec vřetena je uložen do párovaných kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem, která jsou vůči sobě vzájemně předeprnuta pomocí distančních kroužků.

2.7 Mazání valivých ložisek

Mazání tvoří nedílnou součást ložisek vřeten. Snižuje tření a zajišťuje ochranu před korozí. V závislosti na druhu mazání může být vzniklé teplo v ložisku také odváděno. Mazáním se redukuje opotřebení a prodlužuje životnost ložiska.

Podobně jako tomu bylo u hydrodynamických ložisek, i v tomto případě dochází během odvalování valivých elementů ložiska ke třem základním režimům mazání. Jedná se o mezní mazání při nízkých otáčkách, kdy dochází k přímé interakci třecích povrchů, částečně hydrodynamické mazání a hydrodynamické mazání při vyšších otáčkách, kdy jsou třecí povrchy odděleny dostatečně silnou vrstvou maziva. [6]

Mazání u kluzných ložisek je zajištěno již jejich samotnou funkcí pomocí nosného prostředí, a tudíž jsou následující odstavce věnovány ložiskům valivým.

2.7.1 Mazání plastickým mazivem

2.7.1

Jedná se o nejpoužívanější mazivo valivých ložisek vůbec. Plastická maziva se skládají z 90 % z minerálního či ropného oleje a z 10 % ze zahušťovadla. Dle druhu zahušťovadla (většinou se jedná o kovová mýdla) lze rozlišit lithná, sodná, vápenatá a syntetická maziva. [6]

Je velmi důležité na základě typu vřetena, druhu a velikosti ložiska, druhu těsnění, provozním otáčkám a provozní teplotě zvolit vhodné plastické mazivo. Při nízkých teplotách plastická maziva tuhnou, což může vést až ke ztrátě mazací schopnosti. Naopak při vysokých teplotách tato maziva měknou, v nejhorších případech ztrácí přilnavost a vytékají z ložiska. [6]

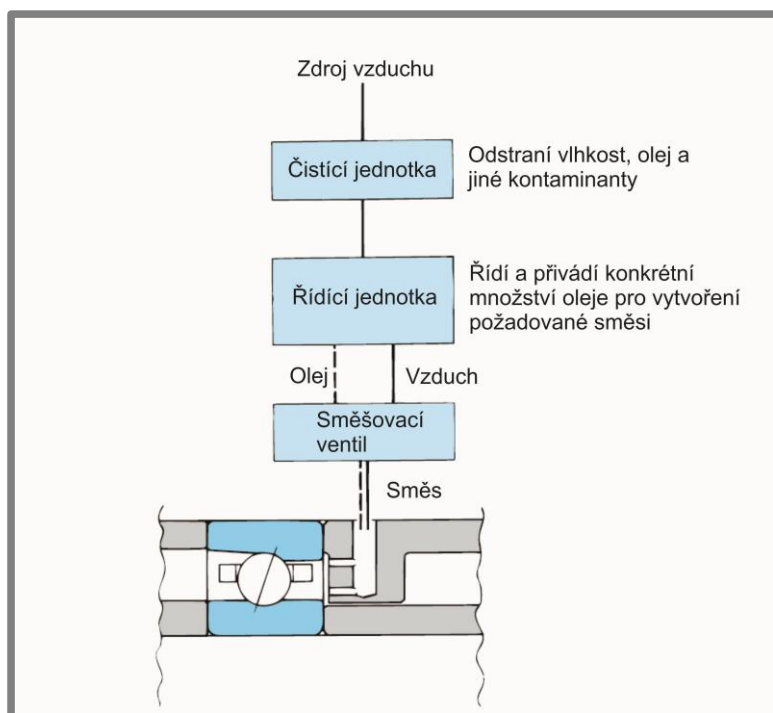
2.7.2 Mazání olejem

2.7.2

Olej se využívá v případech, kdy je nutné odvádět generované teplo vzniklé vlivem vysokých otáček, enormního zatížení nebo přímo chodem elektrovřetena. Mazání olejem se někdy také upřednostňuje, pokud jsou domazávací intervaly u mazání plastickým mazivem příliš krátké a ekonomicky nevýhodné. Existují dvě základní skupiny olejů, kterými jsou ropné (minerální) a syntetické oleje. Ropné oleje jsou pro mazání valivých ložisek většinou vhodnější, jelikož čisté neobsahují nestabilní látky (např. sloučeniny kyslíku, dusíku atd.), které v některých případech zkracují životnost ložisek. I přesto se pro mazání vřeten obráběcích strojů častěji využívá syntetických olejů, protože snesou teploty nad 90°C. [6]

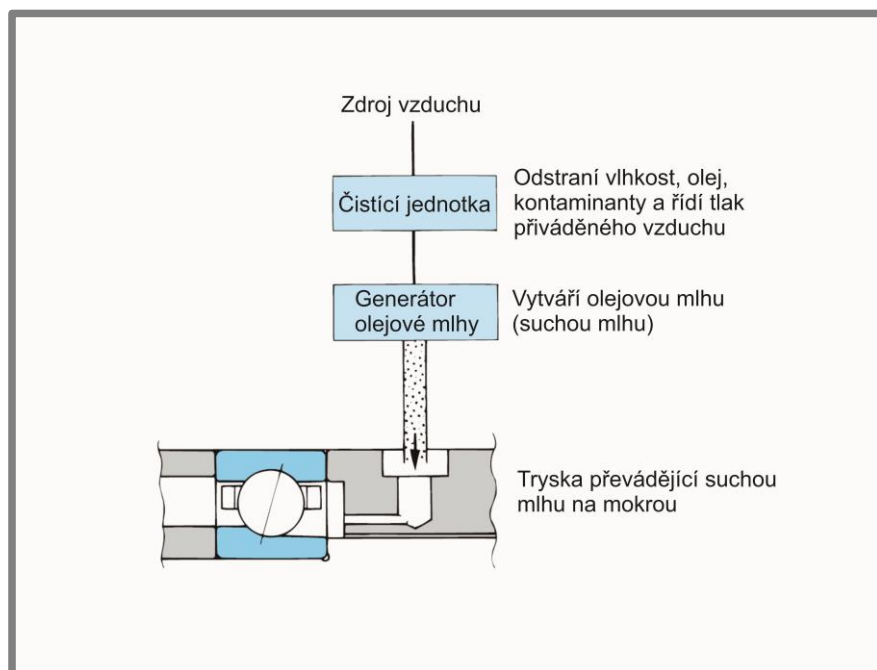
Lze rozlišit čtyři základní způsoby mazání olejem, kterými jsou mazání typu olej-vzduch, olej-tryska, mazání olejovou mlhou a mazání olejovou lázní.

Mazání typu olej-vzduch lze považovat za relativně novou metodu, která vznikla z důvodu zamezení kontaminace vzduchu olejem, což byl typický znak pro mazání olejovou mlhou. Během této metody je extrémně malé množství oleje tlakem vzduchu rozprášeno a neprodleně přiváděno přímo k ložisku. Rapidně snižuje teplotu v ložisku a tím mu umožňuje dosažení těch nejvyšších rychlostí. Vzhledem k tomu, že je nový olej k ložisku přiváděn konstantně v určitých intervalech, odpadají v tomto případě starosti s jeho servisní výměnou. Navíc díky stlačenému vzduchu vzniká ve vřetenu přetlak bránící vnikání prachu a nečistot z okolního prostředí. Na rozdíl od mazání olejovou mlhou umožňuje tento způsob dopravu maziva k ložisku v přesně stanoveném množství, což je velmi důležité zejména u velmi vysokých otáček, a také redukuje spotřebu oleje. [18]



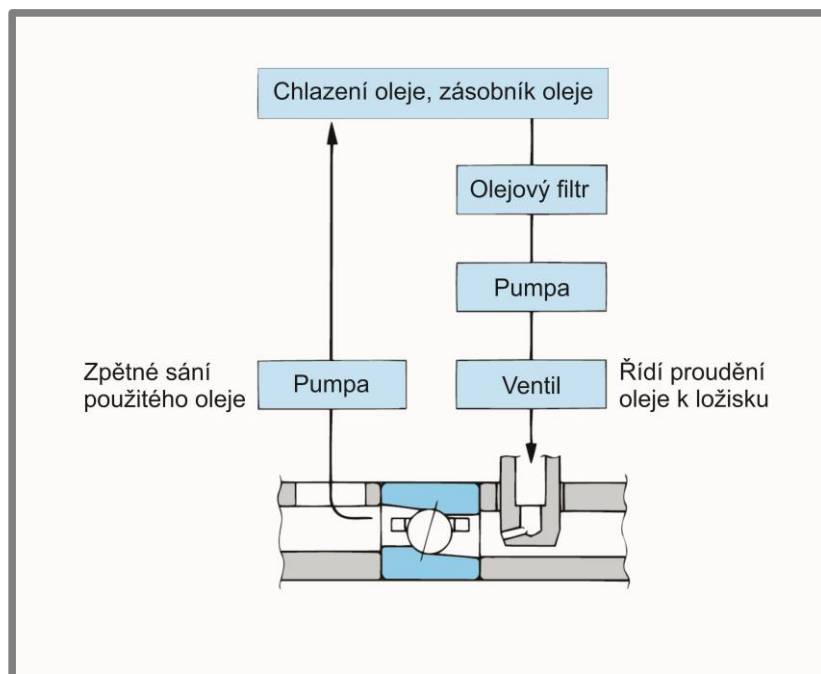
Obr. 2-36 Mazání typu olej vzduch [18]

Mazání olejovou mlhou, stejně jako typ olej-vzduch, přivádí malé množství rozprášeného oleje přímo k ložiskům pomocí stlačeného vzduchu. Kromě lubrikačního účinku poskytuje proud vzduchu i účinek chladicí. Ačkoliv nepřetržitý průchod olejové mlhy skrz ložisko a následně i skrz labyrintové těsnění brání průniku kontaminantů dovnitř ložiska, tak dochází k úniku olejové mlhy do okolního prostředí a jeho znečištění, což je velká nevýhoda tohoto způsobu mazání. [18], [30]



Obr. 2-37 Mazání olejovou mlhou [18]

Mazání typu olej-tryska je způsob lubrikace, při němž je velké množství oleje vstříknuto vysokou rychlostí skrz ložisko, což jej zároveň maže i ochlazuje. Protože je za ložiskem olej nasáván zpět k cirkulaci, je v tomto případě nezbytné instalovat i vhodný olejový filtr. Mezi nevýhody tohoto typu se řadí vysoký třecí moment a prosak oleje při vertikálních aplikacích. [2], [18]



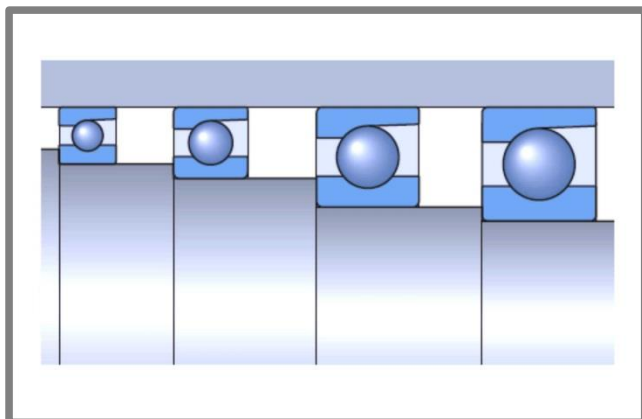
Obr. 2-38 Mazání typu olej-tryska [18]

Mazání olejovou lázní je velmi jednoduchý a levný způsob mazání, avšak nevhodný pro vysoké otáčky. Za klidu by hladina oleje měla dosahovat pod střed spodního valivého tělíska. Za rotace je mazivo následně roznášeno po celém ložisku. V případě vyšší provozní teploty lze použít modifikaci této metody s použitím čerpadla, chlazení a olejového filtru tzv. oběhové mazání, při kterém je zajištěna neustálá cirkulace maziva. [6]

2.8 Vývojové trendy

2.8

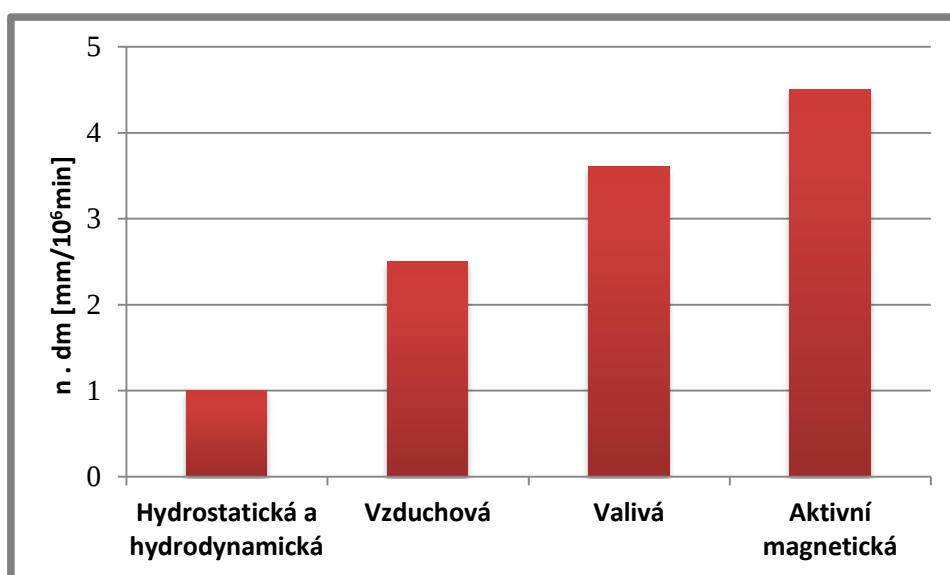
Vývoj vřetenových ložisek se dlouhodobě ubírá k navyšování rychlostní kapacity ložisek. U valivých ložisek to znamená zmenšování jejich průřezu (obr. 2-39) s využitím speciálních materiálů pro klece a valivá tělíska. Ti největší výrobci dnes již standardně nabízí vřetenová ložiska buď s valivými elementy z tvrdší keramiky (Si_3N_4) nebo klasické ocelové. Kromě vyšší tvrdosti se keramika vyznačuje i mnoha dalšími výhodami, jako jsou např. nízká teplotní vodivost, korozivzdornost, není magnetická a je elektricky nevodivá. Jedním z vývojových trendů jsou také ložiskové klece z PEEK (Polyeterketonu), který se vyznačuje odolností vůči vysokým teplotám, otáčkám a působení chemických látek. [3], [5], [11], [18], [21], [24], [26], [30]



Obr. 2-39 Vývoj průřezu ložiska [26]

2.9 Srovnání ložisek

Jedním z důležitých parametrů při výběru ložisek vřetena je jeho pracovní rychlost. Jelikož maximální dosažitelná rychlost ložisek (zejména valivých a aktivních magnetických) úzce souvisí s průměrem ložiska, byl z důvodu objektivního srovnání zaveden tzv. parametr rychloběžnosti. Tento parametr získáme vynásobením maximálních dosažitelných otáček n [min^{-1}] a středního průměru ložiska d_m [mm]. Srovnání rychlostních parametrů jednotlivých druhů ložisek lze pozorovat v následující tabulce (data uvedená u valivých ložisek byla získána pro ložiska hybridní s mazáním typu olej-vzduch).



Obr. 2-40 Srovnání rychlostí jednotlivých druhů ložisek [18], [30], [11], [26], [12], [32], [14], [16]

Tab. 2-2 Výhody a nevýhody jednotlivých druhů ložisek [13], [14], [16], [32]

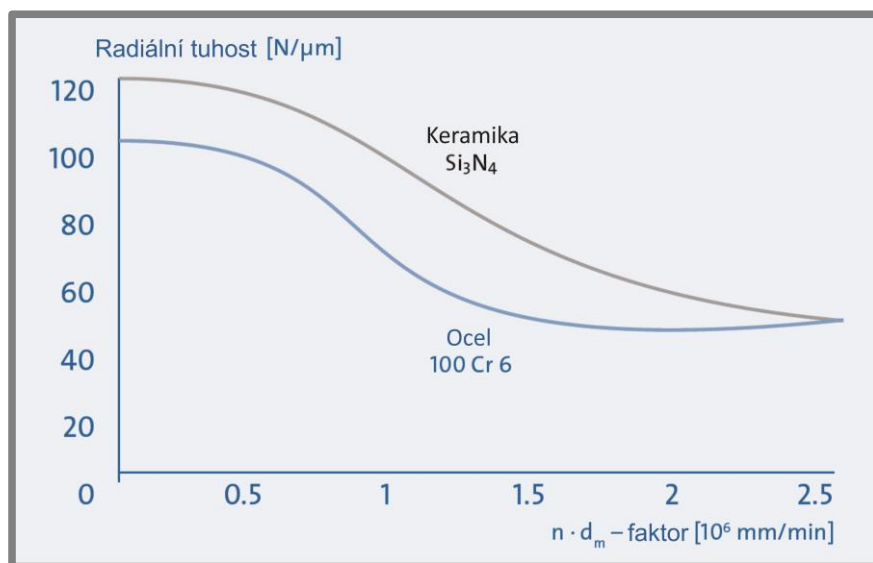
Druh ložiska	Výhody	Nevýhody
Vzduchová	Velmi vysoká přesnost Klidný chod bez vibrací	Nižší tuhost uložení Nižší únosnost Větší zástavbový prostor a vyšší cena (u aerostatických)
Hydrostatická, hydrodynamická	Klidný chod bez vibrací Tlumí rázy Velmi vysoká únosnost	Větší zástavbový prostor a vyšší cena (u hydrostatických) Rychlost je limitována teplotou kapaliny
Valivá	Malý zástavbový prostor Vysoká únosnost Jednoduchá a rychlá náhrada za nové ložisko	Netlumí rázy ani vibrace Kratší životnost
Magnetická	Vysoká únosnost Klidný chod bez vibrací	Vyšší cena

Jak již bylo řečeno, z použití keramiky u valivých ložisek plyne mnoho výhod, které jsou patrné z níže uvedené tabulky.

Tab. 2-3 Srovnání keramiky a oceli [3], [12], [18], [25]

Vlastnost	Keramika (Si ₃ N ₄)	Ocel
Hustota [g/cm ³]	3,2	7,9
Teplotní roztažnost [10 ⁻⁶ /K]	3,2	11,7
Modul pružnosti [GPa]	315	210
Poissonova konstanta μ	0,26	0,3
Tvrdost HV10	1600	700-800
Teplotní vodivost [W/m.K]	20-40	40-50
Elektrický odpor [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]	10 ¹⁷ -10 ¹⁸	0,1-1
Maximální teplota [°C]	1000	300

Je důležité si všimnout až 40% snížení velikosti odstředivých sil působících na keramické valivé elementy, které plyne z nižší hustoty keramiky. Také zhruba o 50 % vyšší modul pružnosti u keramiky se v konečném důsledku projeví 15-20% nárůstem její tuhosti. [32]



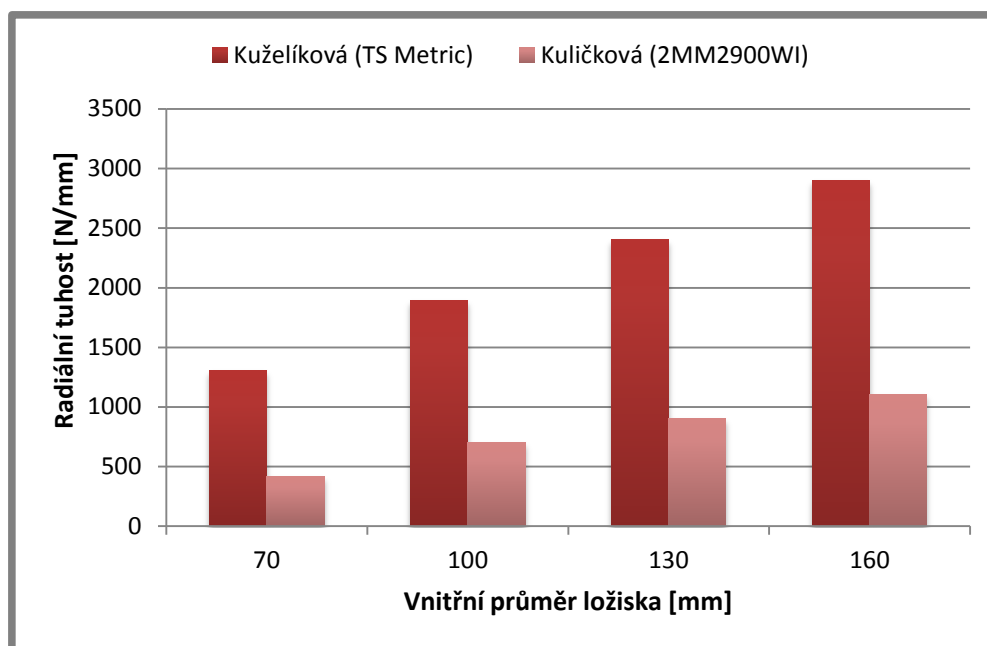
Obr. 2-41 Vliv materiálu valivého tělesa na radiální tuhost [12]

Jako názorná ukázka vlivu konstrukce ložiska na jeho základní vlastnosti bylo vybráno pět zástupců výrobce KOYO. Z důvodu objektivního srovnání jsou všechna uvedená ložiska podobných průřezů (vnitřního průměru 40 mm, vnějšího 68 mm a podobné šířky).

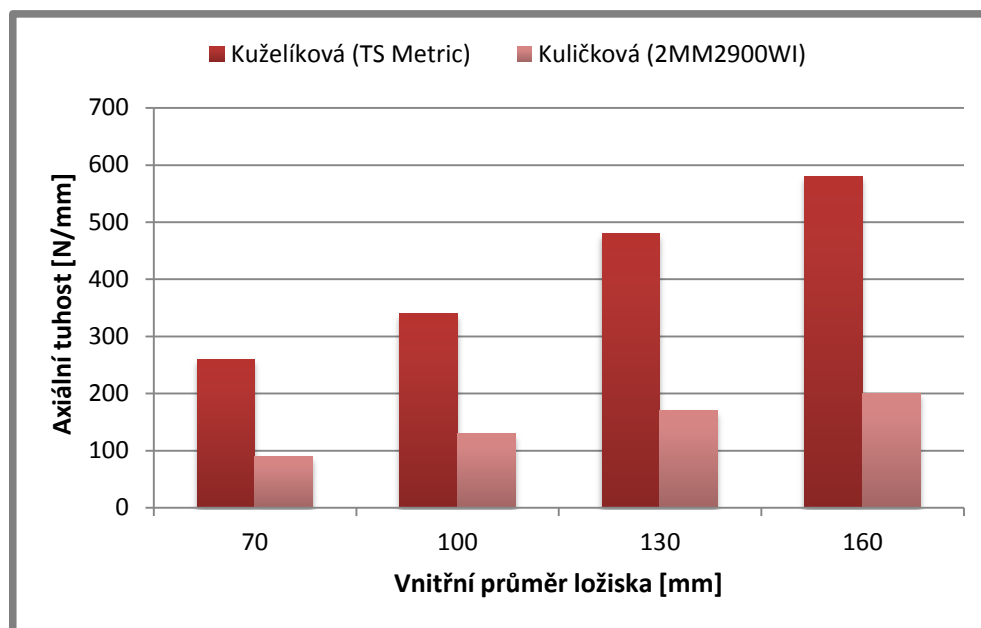
Tab. 2-4 Vliv konstrukce ložiska na jeho vlastnosti [18]

Druh ložiska	Označení	Materiál valivých elementů	Kontaktní úhel α [°]	Limitní rychlost [min ⁻¹]	Radiální dynamická únosnost C_r [kN]	Radiální statická únosnost C_{0r} [kN]
	HAR008C	ocel	15	31 000	9,7	6,2
	3NCHAR008C	keramika	15	46 000	9,7	6,2
	N1008	ocel	-	16 000	22,4	25,4
	3NCN1008	keramika	-	21 000	22,4	25,4
	32008JR	ocel	-	7 400	53,5	71,4

Pro srovnání axiální a radiální tuhosti ložisek s bodovým a čárovým stykem byly vybrány dvě série ložisek podobných parametrů značky TIMKEN. Jedná se o sérii kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem s označením 2MM9100WI a sérii kuželíkových ložisek „TS Metric“. Obě tyto série byly vybrány z důvodu schopnosti přenášet kombinované radiálně-axiální zatížení. Na obou z následujících grafů lze pozorovat rapidní nárůst tuhosti kuželíkových ložisek s čárovým stykem.

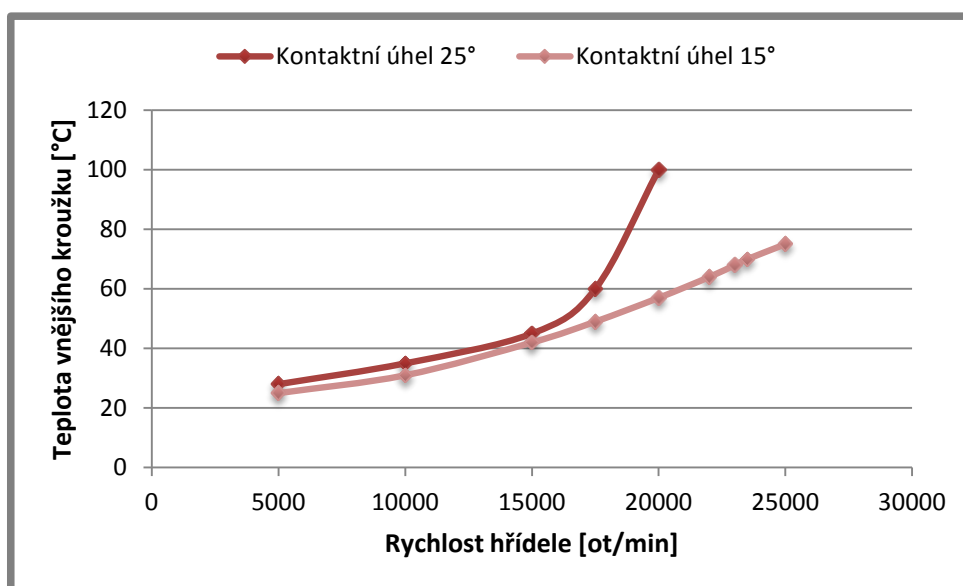


Obr. 2-42 Srovnání radiální tuhosti kuličkových a kuželíkových ložisek [30]



Obr. 2-43 Srovnání radiální tuhosti kuličkových a kuželíkových ložisek [30]

Nejen při výběru ložisek s čárovým stykem, ale i kuličkových s kosoúhlým stykem je nutno brát zřetel na zvýšenou generaci tepla, a to v závislosti na různém stykovém úhlu ložiska α . Jakožto názorná ukázka vlivu stykového úhlu na generaci tepla za chodu byli srovnáni dva zástupci výrobce TIMKEN. Konkrétně se jedná o zástupce 3MMVC9120HX CR SUL ($\alpha=25^\circ$) a 2MMVC9120HX CR SUL ($\alpha=15^\circ$).



Obr. 2-44 Vliv kontaktního úhlu na zahřívání ložiska [30]

3 DISKUSE

3

Ze současného stavu poznání vyplývá, že existuje celá řada nejrozumnějších druhů ložisek pro uložení vřeten obráběcích strojů. Každé ložisko se přitom vyznačuje svými charakteristickými vlastnostmi. Využití jakéhokoli z výše uvedených ložisek pro daný typ vřetena má proto své konkrétní opodstatnění.

V oblasti vysoce přesného obrábění, která se snaží dosáhnout těch nejvyšších kvalit povrchu a rozměrových přesností, je vyžadováno uložení, jenž tlumí vibrace a poskytuje vřetenu minimální házivost na jeho pracovním konci. Nejvhodnějšími kandidáty jsou v tomto případě vzduchová, kluzná, ale také magnetická ložiska, jelikož splňují všechny uvedené předpoklady. Valivá ložiska v tomto případě nejsou vhodná kvůli neschopnosti tlumit vibrace. U magnetických ložisek je navíc nutné zvážit jejich vyšší cenu. Při bližším pohledu na tato ložiska se nabízí volba mezi aerostatickými a aerodynamickými ložisky a mezi hydrostatickými a hydrodynamickými ložisky. Ze Stribeckovy křivky (obr. 2-4) je zřejmé, že při rozběhu vřetena dochází u hydrodynamických ložisek k výskytu zvýšeného koeficientu tření než za chodu. Totéž platí i pro aerodynamická ložiska. Z toho důvodu není vhodné používat aerodynamická a hydrodynamická ložiska tam, kde hrozí jejich zatěžování při nízkých rychlostech nebo častá změna směru rotace. Do oblasti vysoce přesného obrábění se řadí i mikroobrábění (např. v optickém nebo zdravotním průmyslu). Toto odvětví využívá k obrábění nástroje velmi malých průměrů, které ke své správné funkci vyžadují velmi vysoké rychlosti. Nejvhodnějšími kandidáty jsou v tomto případě opět vzduchová a magnetická ložiska. Nevhodnost kluzných ložisek pro vysokorychlostní mikroobrábění plyne z obrázku 2-40.

Pro vřetena běžného obrábění je důležitý velký úběr materiálu za co nejkratší časový interval. Tuhost uložení v tomto případě tedy hraje významnou roli. Vhodnými zástupci pro uložení vřeten běžného obrábění jsou valivá a kluzná ložiska. Vzduchová ložiska mají pro tyto případy příliš nízkou tuhost. Magnetická ložiska zde také nejsou vhodná, a to z důvodu jejich rozšíření zejména v oblasti menších vřeten pro vysoce přesné obrábění a také z důvodu vyšší ceny. Valivá ložiska jsou sériově vyráběna v mnoha variantách a díky své jednoduchosti i ceně jsou nejčastěji používanými ložisky pro uložení běžných vřeten. Mezi jejich největší přednosti patří schopnost vymezení vůle při opotřebení a nastavení tuhosti pomocí předpětí. Při požadavku vyšší rychlosti lze aplikovat kuličková ložiska, naopak při požadavku nejvyšší tuhosti (např. u velkých hrubovacích vřeten) lze použít kuželíková ložiska. Jak kuličková, tak válečková ložiska existují běžně k dostání i v hybridní variantě, která se vyznačuje vyššími rychlostmi a vyšší tuhostí jak je patrné z obrázku 2-41. Ovšem bude-li se jednat o uložení velkých těžkých vřeten pro obrobky vysokých hmotností, nejsou valivá ložiska těmi nejvhodnějšími zástupci. Výroba ložisek takovýchto rozměrů a únosnosti by byla velmi nákladná. Z toho důvodu je přijatelnější použít kluzná ložiska, která se vyznačují vysokou únosností. Konkrétně se jedná o hydrostatická ložiska vzhledem k vysokým hmotnostem obrobku a nízkým rychlostem vřetena. Je jich využíváno např. u velkých horizontálních soustruhů o nosnosti několika tun.

4 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byl podán přehled současného stavu poznání v oblasti uložení vřeten obráběcích strojů. V závislosti na rozsahu práce byly obecně popsány jen ty nejfrekventovanější druhy ložisek pro vřetena obráběcích strojů (valivá, vzduchová, magnetická, hydrostatická/hydrodynamická) a způsoby jejich uložení. Ke každému druhu je uvedena stručná charakteristika jeho konstrukce a vyzdvíženy hlavní výhody popř. nevýhody. Taktéž byl u každého druhu popsán princip jeho funkce. Všechny z uvedených druhů ložisek prodělaly v posledních dvou dekáдах značný vývoj, a to hlavně vzduchová, hydrostatická a aktivní magnetická ložiska. V případě valivých ložisek se jedná hlavně o vývoj speciálních materiálů pro ložiskové kroužky, klece a valivá tělíska, které umožňují vyšší dosažitelné rychlosti. Nejrozšířenějšími jsou v dnešní době díky své ceně a jednoduchosti stále ložiska valivá. Ačkoliv se dnes vřetena obráběcích strojů ukládají do valivých ložisek v 90 % všech případů, stoupl v posledních letech razantně podíl zbylých druhů ložisek. Dříve méně používaná vzduchová ložiska dnes nacházejí uplatnění především v oblastech s vysokou přesností (např. broušení) a u mikroobrábění. Aktivní magnetická ložiska nejsou tak rozšířená jako vzduchová a používají se jen ve speciálních aplikacích. Ačkoliv jsou magnetická ložiska ze všech výše zmíněných druhů ložisek v dnešní době v oblasti uložení vřeten nejméně rozšířená, mají obrovský potenciál pro budoucí vývoj a to hned z několika důvodů. Jedná se o bezkontaktní uložení tzn. chod s nulovým třením. Vyznačují se možností aktivního řízení polohy hřídele a tuhosti v reálném čase. Dosahují nejvyššího parametru rychloběžnosti. Na rozdíl od vzduchových ložisek pracují i ve vakuu. Nevyžadují mazání a jsou vysoce přesná.

Z důvodu co nejvyšší aktuálnosti byla velká část informací čerpána přímo z katalogů výrobců, brožur, prospektů a oficiálních webových stránek.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**5****Tištěná literatura**

- [1] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. 2. vyd., přeprac. Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1991, 214s. ISBN 80-214-0361-6
- [2] MAREK, Jiří a kol. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. 2. vyd. Praha: MM publishing s. r. o, 2010, 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3
- [3] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. 1. vyd. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. ISBN 978-80-260-6780-1
- [4] SHIGLEY, Joseph E., MISCHKE, Charles R. a BUDYNAS, Richard G. *Konstruování strojních součástí*. 1.vyd. Brno: VUTIUUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0
- [5] SKF. *Hlavní katalog SKF*. SKF, 2007. 1130 s.
- [6] SKF. *Příručka SKF pro údržbu ložisek*. SKF, ©1991. 333s. Reg 70.3 000.1993-12
- [7] ŠUŠOLÍK, Oto. *Valivé ložiska*. 1.vyd. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1964, 279 s.
- [8] TIMKEN. *Kuželíková ložiska-Příručka pro uživatele*. France: TIMKEN, ©1999. 317 s.
- [9] VENKATESH, V., IZMAN, S. *Precision engineering*. 1.ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill Pub. Co., 2007, xvi, 418 p. ISBN 00-706-2090-3.
- [10] WILCOCK, Donald, et al. *Bearing design and application*. 1.vyd. London: McGraw-Hill, 1957, 464 s.

Elektronické zdroje

- [11] FAG. *Super přesná ložiska*. Germany: FAG, 2008 [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <http://www.loziska-bearings.sk/Data/1167/UserFiles/Vretenove%20loziska_cz.pdf>
- [12] GMN. *High precision ball bearings*. Germany: GMN, ©2010 [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <http://www.gmn.de/upload/99_Downloads/10_Ball_Bearings/PDFs/4000_e.pdf>
- [13] GSI WESTWIND®. *Air bearing technology*. UK: WESTWIND, 2007 [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <<http://www.westwind-airbearings.com/airBearing/documents/AirBearingTechnologybriefv2.pdf>>
- [14] GÖRNE, Jobst. Using active magnetic bearings for high speed machining – conditions and benefits. *Tehnomus journal* [online]. 2013. [cit. 2015-04-26] URL <http://www.fim.usv.ro/conf_1/tehnomusjournal/pagini/journal2013/files/1.pdf>

- [15] *Hembrug Machine Tools* [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <<http://www.hembrug.com/machines/mikroturn-1000-V4-hard-turning.html>>
- [16] *IHS GlobalSpec* [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <http://www.globalspec.com/learnmore/mechanical_components/bearings_bushings/hydrostatic_hydrodynamic_bearings>
- [17] KONVIČNÁ, Iveta. *Ložiska hydrostatická* [online]. [cit. 2015-04-26] URL <http://www.sossoukyjov.cz/data/file/Strojnictvi/VY_32_INOVACE_5c/VY_32_INOVACE_5c17.pdf>
- [18] KOYO. *Precision Ball & Roller Bearings for Machine Tools*. Japan: KOYO, 2009. [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <[http://www.jtekt-na.com/assets/ce/Documents/\(B2005E-2\)%20Precision%20Ball%20and%20Roller%20Bearings%20for%20Machine%20Tool%20Catalog.pdf](http://www.jtekt-na.com/assets/ce/Documents/(B2005E-2)%20Precision%20Ball%20and%20Roller%20Bearings%20for%20Machine%20Tool%20Catalog.pdf)>
- [19] MM Průmyslové spektrum. *Magnetická ložiska* [online]. 02.02.2005 ©2015 [cit. 2015-04-25]. URL <<http://www.mmspektrum.com/clanek/magneticka-loziska.html>>
- [20] MM Průmyslové spektrum. *Poznátky v oblasti hydrostatických ložisek* [online]. 13.11.2002 ©2015 [cit. 2015-04-25]. URL <<http://www.mmspektrum.com/clanek/poznatky-v-oblasti-hydrostatickych-lozisek.html>>
- [21] NSK. *Machine tool spindle bearing selection & mounting guide*. Germany: NSK, 2012 [online]. [cit. 2015-02-14]. URL <http://www.nskeurope.com/cps/rde/dtr/eu_en/literature_bearing/EN-MTM_Guide.pdf>
- [22] TECHLAB. *Provozní vlastnosti aerodynamických ložisek* [online]. [cit. 2015-04-26] URL <<http://www.techlab.cz/cs/VlastAerodLoz.pdf>>
- [23] SKF. *Předpětí v namontovaných sadách ložisek* [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <<http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/super-precision-bearings/angular-contact-ball-bearings/bearing-preload/preload-in-mounted-bearing-sets/index.html>>
- [24] SKF [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <<http://www.skf.com/cz/index.html>>
- [25] SKF. *Hybrid bearings – a solution for improved reliability under severe operating conditions*. SKF, 2012 [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <<http://www.skf.com/binary/151-48505/12507-EN-Hybrid-bearings.pdf>>
- [26] SKF. *Super-precision angular contact ball bearings: High-speed, E design*. SKF, 2012 [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <http://www.skf.com/binary/21-86089/SuPB-ACBB_High_speed_E-design_10112_6_EN.pdf>
- [27] SPIETH. *SPIETH Hydrodynamic Radial Slide Bearing* [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <http://www.spieth-maschinenelemente.de/fileadmin/user_upload/downloads/Catalogue/8_Radial_Plain_Bearing_Application_Documentation.pdf>

- [28] ŠOOŠ, Lubomír. *Radial ball bearings with angular contact in machine tools* [online]. ©2012 [cit. 2015-04-26]. URL <<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/39699.pdf>>
- [29] TAC Rockford [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <<http://www.tacrockford.com/product/hydrostatic-grinding-spindles-with-integral-motors/>>
- [30] TIMKEN®. *Super Precision Bearing for Machine Tool Applications* [online]. [cit. 2015-04-26]. URL< <http://www.timken.com/en-us/products/Documents/Super-Precision-Bearings-for-Machine-Tool-Applications-Catalog.pdf>>
- [31] UPM [online]. [cit. 2015-05-05]. URL< <http://www.upm.org.uk/UltraMill>>
- [32] XIE, Xiaofan. *Comparison of bearings* [online]. [cit. 2015-04-26]. URL <http://home.utah.edu/~u0324774/pdf/Comparison_of_Bearings.pdf>
- [33] Schaeffler Technologies AG & Co [online]. [cit. 2015-05-05]. URL< <http://nlp.ilsp.gr/soaplab2-results/d99fa0ed-3d93-4297-9ecf-cd33d87324f3/xml/734.html>>

6 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

F_G	[N]	- odstředivá síla
m	[kg]	- hmotnost valivého tělesa
d_m	[m]	- střední průměr ložiska
ω	[rads ⁻¹]	- úhlová rychlost
p_{max}	[MPa]	- maximální Hertzův tlak v oblasti kontaktu
b	[mm]	- polovina šířky kontaktního pásu
l	[mm]	- délka válečku ložiska
d_1	[mm]	- průměr válečku ložiska
d_2	[mm]	- průměr ložiskového kroužku
E_1	[MPa]	- modul pružnosti válečku
E_2	[MPa]	- modul pružnosti ložiskového kroužku
F	[N]	- zátěžná síla
μ_1		- Poissonovo číslo pro váleček ložiska
μ_2		- Poissonovo číslo pro ložiskový kroužek
f		- součinitel ložiska, který závisí na řadě a velikosti ložiska
f_1		- opravný součinitel, který závisí na stykovém úhlu
f_2		- opravný součinitel, který závisí na třídě předpětí
f_{HC}		- opravný součinitel hybridních ložisek
$G_{A,B,C,D}$	[N]	- předem stanovené předpětí v ložiskové sadě před montáží
G_m	[N]	- předpětí v namontované sadě ložisek.
B_{mopt}	[m]	- optimální vzdálenost ložisek
D_m	[m]	- střední průměr ložiska
l_0	[m]	- vzdálenost stykových bodů při nulovém teplotním spádu
t_1	[°C]	- teplota vnitřního kroužku ložiska
t_A	[°C]	- teplota vnějšího kroužku ložiska
t_0	[°C]	- původní teplota v ložisku před teplotním gradientem
α	[°]	- stykový úhel v ložisku
r_A	[m]	- poloměr zaoblení ramena vnějšího kroužku ložiska
r_I	[m]	- poloměr zaoblení ramena vnitřního kroužku ložiska
d_w	[m]	- průměr kuličky ložiska
C_r	[kN]	- radiální dynamická únosnost ložiska
C_{0r}	[kN]	- radiální statická únosnost ložiska

7 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**7**

Obr. 1-1 Házení na pracovním konci vřetena [3]	13
Obr. 1-2 Odchylka na pracovním konci vřetena [2]	14
Obr. 2-1 Rozdělení ložisek pro uložení vřeten obráběcích strojů	16
Obr. 2-2 Kontaktní úhel [21]	16
Obr. 2-3 Ložisková vůle [5]	17
Obr. 2-4 Stribeckova křivka [33]	18
Obr. 2-5 Pružné kluzné pouzdro [1]	19
Obr. 2-6 Stavitelná kuželová pánev [1]	19
Obr. 2-7 Mackensonovo ložisko [1]	19
Obr. 2-8 Ložisko Hostar [1]	20
Obr. 2-9 Ložisko Filmatic [1]	20
Obr. 2-10 Hydrodynamické ložisko SPIETH [27]	21
Obr. 2-11 Hydrostatické ložisko s jedním čerpadlem [17]	22
Obr. 2-12 Vertikální soustruh Mikroturn [15]	23
Obr. 2-13 Aerodynamické ložisko se spirálními drážkami (a) [22] a se třemi kapsami (b) [13]	23
Obr. 2-14 Aerostatické ložisko [13]	24
Obr. 2-15 Radiální magnetické ložisko [14]	25
Obr. 2-16 Axiální magnetické ložisko [14]	25
Obr. 2-17 Výrobní řada super přesných ložisek KOYO [18]	26
Obr. 2-18 Odstředivé síly působící na ložisko [30]	27
Obr. 2-19 Druhy jednořadých kuličkových ložisek pro vřetena obráběcích strojů [30]	28
Obr. 2-20 Ložisko Floating Displacement [11]	29
Obr. 2-21 Úhel kontaktu ložiska [30]	29
Obr. 2-22 Dvouřadé kuličkové axiální ložisko s centrální mazací drážkou [11]	30
Obr. 2-23 Dvouřadé válečkové ložisko s centrální mazací drážkou [11]	31
Obr. 2-24 Hybridní válečkové ložisko s polovičním počtem válečků [11]	32
Obr. 2-25 Kuželíkové ložisko s mazacími otvory [30]	32
Obr. 2-26 Ložiskové sady [11]	34
Obr. 2-27 Uspořádání ložisek [21]	34
Obr. 2-28 Vliv předpětí na odchylku pracovního konce vřetena [30]	35
Obr. 2-29 Velikosti předpětí [21]	36
Obr. 2-30 Předpětí pružinou [21]	36
Obr. 2-31 Předpětí distančními kroužky [21]	36
Obr. 2-32 Velikosti tolerančních tříd [21]	38
Obr. 2-33 Geometrie kuličkového ložiska [28]	39
Obr. 2-34 Vysoce zatížitelné vřeteno [21]	39
Obr. 2-35 Vysokorychlostní vřeteno [21]	40
Obr. 2-36 Mazání typu olej vzduch [18]	42
Obr. 2-37 Mazání olejovou mlhou [18]	42
Obr. 2-38 Mazání typu olej-tryska [18]	43
Obr. 2-39 Vývoj průřezu ložiska [26]	44
Obr. 2-40 Srovnání rychlostí jednotlivých druhů ložisek [18], [30], [11], [26], [12], [32],[14],[16]	45
Obr. 2-41 Vliv materiálu valivého tělesa na radiální tuhost [12]	46

Obr. 2-42 Srovnání radiální tuhosti kuličkových a kuželíkových ložisek [30]	47
Obr. 2-43 Srovnání radiální tuhosti kuličkových a kuželíkových ložisek [30]	48
Obr. 2-44 Vliv kontaktního úhlu na zahřívání ložiska [30]	48

8 SEZNAM TABULEK**8**

Tab. 2-1 Toleranční třídy přesnosti [3], [12], [21]	37
Tab. 2-2 Výhody a nevýhody jednotlivých druhů ložisek [13], [14], [16], [32]	45
Tab. 2-3 Srovnání keramiky a oceli [3], [12], [18], [25]	46
Tab. 2-4 Vliv konstrukce ložiska na jeho vlastnosti [18]	47