



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# KONSTRUKCE TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ PRO POZOROVÁNÍ DISTRIBUCE MAZIVA VE VALIVÉM LOŽISKU

DESIGN OF THE TEST RIG FOR OBSERVATIONS OF THE LUBRICANT DISTRIBUTION IN THE  
ROLLING BEARING

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Okál

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2020





## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Michal Okál**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Konstrukční inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. David Košťál, Ph.D.**  
Akademický rok: 2019/20

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 diplomové práce:

### **Konstrukce testovacího zařízení pro pozorování distribuce maziva ve valivém ložisku**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Aktuálně nejčastěji využívané tribometry pro studium bodových kontaktů jsou v konfiguraci ball-on-disc. Tato konfigurace je svou jednoduchostí výhodná pro pochopení základního fungování bodových kontaktů. Pro komplexnější systémy, jako ty ve valivých ložiscích, již ale není postačující, jelikož zjednodušuje silové a geometrické poměry. Ty můžou hrát zásadní roli pro distribuci maziva a jeho tok v okolí kontaktu a tím ovlivnit celkové provozní podmínky.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: GAČR

**Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem je vyvinout zařízení, které vytvoří provozní podmínky bližší reálným valivým ložiskům. Základním rozdílem vůči zařízením typu ball-on-disc a současně požadavkem na zařízení je dodržení směru působení odstředivých sil a geometrie kontaktních těles ve vztahu k reálným ložiskům.

Dílčí cíle diplomové práce:

- volba konkrétní geometrie, zajištění výroby kontaktní dvojice,
- studium možností úprav zařízení či vývoj nového – koncept,
- konstrukční návrh testovací aparatury,
- výroba a testování zařízení, úvodní experimenty pro stanovení vlivu geometrie.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

**Seznam doporučené literatury:**

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, Ch.R., BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. Překlad 7. vydání, VUTIUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá návrhem a realizací zařízení, jehož účelem je vytvoření reálných podmínek v oblasti kontaktu valivého ložiska a následné přímé pozorování této oblasti. Úvodem je práce zaměřena na popis fungování valivého ložiska, procesy tření a opotřebení během provozu. Následně jsou v práci popsána zařízení, která jsou ve světě využívána pro studium procesu mazání uvnitř valivého ložiska. Poté následuje vlastní řešení autora, kde výsledkem je zařízení konfigurace Ball-on-ring vytvářející geometrické, rychlostní a tlakové podmínky, identické s podmínkami ve skutečném valivém ložisku. Distribuce maziva v okolí kontaktu je analyzována optickou metodou fluorescenční mikroskopie. Součástí práce je ověřovací experiment a kompletní výkresová dokumentace zařízení.

## KLÍČOVÁ SLOVA

EHD, optický tribometr, fluorescenční mikroskopie, distribuce maziva, valivé ložisko

## ABSTRACT

Given diploma thesis deals with the design and realization of a device whose purpose is to simulate real condition in the contact area of deep groove ball bearings. Direct observation of such area was then carried out. Initial part of the thesis addresses principles occurring in ball bearings, such as friction and lubrication and wear mechanisms. Several devices which are commonly used for bearing lubrication studies are then described at the work. Subsequently, author's solution was introduced with the output of Ball-on-ring device. Ball-on-ring configuration is key feature due to its geometry since it enables to create identical conditions as those which occur in ball bearings such as contact pressure and velocities. Lubricant distribution by the contact area is analysed with fluorescent microscopy. Part of this thesis is a validation experiment and drawing documentation of the device.

## KEYWORDS

EHD, optical tribometer, fluorescent microscopy, grease distribution, rolling bearing



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

OKÁL, Michal. *Konstrukce testovacího zařízení pro pozorování distribuce maziva ve valivém ložisku*. Brno, 2020, 89 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. David Košťál, Ph.D.



## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl upřímně poděkovat vedoucímu práce Ing. Davidu Košťálovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a ochotu během vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat přátelům a rodině za podporu během celého studia.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Košťála, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis auto





# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>15</b>
2.1	Valivé ložisko	15
2.1.1	Pohyb jednotlivých komponent radiálního ložiska	16
2.1.2	Kontaktní oblast	17
2.1.3	Režim mazání kuličkového ložiska	18
2.1.4	Tření v ložisku	19
2.2	Plastická maziva ve valivých ložiscích	19
2.3	Struktura plastických maziv	20
2.3.1	Základový olej	20
2.3.2	Zpevňovadla	20
2.3.3	Aditiva	21
2.4	Doplňování maziva do kontaktu ve valivém ložisku	21
2.4.1	Pohyb maziva ve valivém ložisku	21
2.4.2	Odstředivé síly	22
2.4.3	Dráha maziva	24
2.4.4	Spin kuličky	24
2.4.5	Vliv klece	25
2.4.6	Vliv tvaru kontaktní oblasti	26
2.5	Fluorescenční mikroskopie	26
2.6	Zařízení pro studium mazání v ložiscích	28
2.6.1	Optické simulátory pro studium EHD kontaktu	29
2.6.2	Zařízení na Ústavu konstruování	31
2.6.3	Zařízení ze zahraničí	33
2.6.4	Zařízení s konfigurací ball-on-ring	35
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>38</b>
3.1	Analýza problémů	38
3.2	Analýza a zhodnocení poznatků z rešerše	39
3.3	Podstata a cíle diplomové práce	40
<b>4</b>	<b>KONCEPT ŘEŠENÍ</b>	<b>41</b>

4.1	Postup řešení	41
4.2	Koncept zařízení	42
4.2.1	Volba konfigurace zařízení	43
4.3	Návrh geometrie kontaktní dvojice	44
4.3.1	Materiály vhodné pro kontaktní dvojici	45
4.4	Způsob zatížení kontaktu	46
4.5	Uložení skleněného prstence	46
4.6	Uložení valivého elementu	48
4.7	Rám zařízení	49
4.8	Volba kamery a objektivu	49
4.9	Volba motoru	50
<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>51</b>
5.1	Upevnění prstence	52
5.2	Pákový mechanismus	53
5.2.1	Uložení kuličky	54
5.2.2	Odtížení kontaktu	55
5.3	Nosný rám zařízení	56
5.4	Ověřovací výpočty	57
5.4.1	Modální analýza zařízení	58
5.4.2	Ověření odskoku páky	59
5.4.3	Výpočet pevnosti hřídelky pro kuličku	61
5.5	Sestavení zařízení a zkouška funkčnosti	61
5.5.1	Optická fluorescence	63
5.5.2	Popis experimentu	64
5.6	Provedení experimentů	65
5.7	Zhodnocení výsledků	69
5.8	Finanční zhodnocení	70
<b>6</b>	<b>DISKUSE</b>	<b>71</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>74</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>78</b>

<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>79</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>82</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>83</b>

# 1 ÚVOD

Při interakci dvou povrchů dochází ke tření a tím i k opotřebením. Pro snížení tření u strojních komponent se používá mazání. Vědní obor, zabývající se třením, opotřebením a mazáním se nazývá tribologie. Významná podoblast výzkumu tribologie je zaměřena na elasto-hydrodynamický režim mazání. Tento režim se vyskytuje u ložisek, ozubených převodů, vačkových mechanismů a dalších strojních součástí. Vzniká při kontaktu dvou nekomfortně zakřivených těles, která jsou v relativním pohybu. Je doprovázen vznikem tenkého mazacího filmu, který od sebe odděluje oba povrchy a nedochází tak k vzájemnému dotyku. Tloušťka mazacího filmu je přibližně stejně velká jako elastické deformace kontaktních těles [1]. Výzkum EHD režimu mazání přispěl ke snížení tření a tím k prodloužení životnosti a zvýšení spolehlivosti jednotlivých strojních součástí a tím i stroje jako celku. Pro experimentální studium se používají tribologické simulátory kontaktu, které jsou schopny režim vytvořit. Nejběžnější variantou simulátoru je konfigurace ball-on-disc. Pro vyhodnocování se používá řada metod založených na různých fyzikálních principech, jako například měření pomocí elektrického odporu, kapacitance, optické fluorescence, nebo optické interferometrie. Tloušťka mazacího filmu v kontaktu je zásadní pro tření a opotřebením. Pokud je film příliš tenký, dochází k jevům, které způsobují větší opotřebením. Naopak, pokud je film příliš silný, dochází ke zvýšenému tření. Tloušťku filmu v kontaktu ovlivňuje kromě provozních podmínek i množství maziva kolem kontaktu.

Cílem této diplomové práce je vyvinout zařízení, které vytvoří provozní podmínky bližší reálným valivým ložiskům. Běžně používané tribometry konfigurace ball-on-disc nejsou dostatečně přesné pro studium toku maziva okolo kontaktu, který vzniká ve valivém ložisku. Pro správné simulování podmínek je potřeba zachovat směr působení odstředivé síly a tvar kontaktu. Zařízení proto bude v konfiguraci ball-on-ring, kde skleněný prvek kontaktní dvojice (prsteneček) bude mít identické rozměry kroužku ložiska. Prsteneček také bude mít dráhu pro kuličku, aby kontaktní oblast byla silně eliptická, jako v reálných podmínkách. Zařízení umožní zkoumat distribuci a tok maziva v okolí kontaktu.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

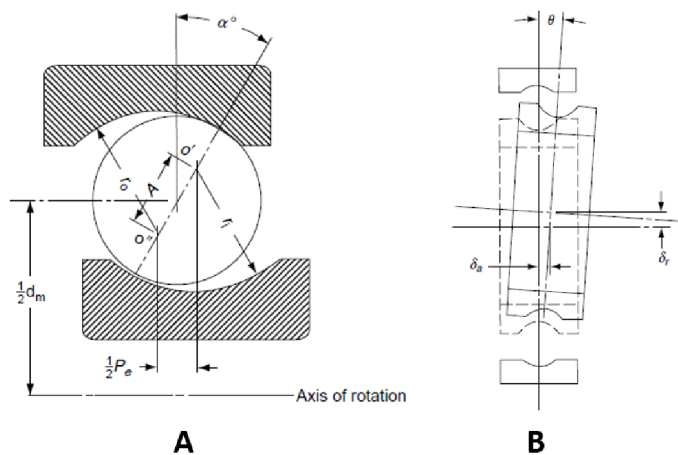
### 2.1 Valivé ložisko

Jedná se o strojní komponentu, primárně určenou k upevnění strojních dílů, u kterých je požadován rotační pohyb, jako je například hřídel. Ložisko, nejen že umožní rotační pohyb, ale také zdatně redukuje tření. Existuje celá řada druhů valivých ložisek, určených pro specifické aplikace. Nejběžněji používaným valivým ložiskem je jednořadé radiální kuličkové ložisko [2], které se skládá z vnějšího a vnitřního kroužku, kuliček, klece a popřípadě těsnění Obr. 2-1. Mezi vnějším a vnitřním kroužkem ložiska se pohybují kuličky, které jsou uchyceny v kleci tak, aby měly pravidelný rozestup mezi sebou. V každém kroužku je vytvořena drážka pro chod kuliček s konformitou pohybující se od 51.5 % až do 53 % průměru kuličky [2]. Pro správný chod je zapotřebí, aby ložisko bylo mazáno, přičemž převážná část valivých ložisek je mazána plastickým mazivem.



Obr. 2-1 Jednořadé kuličkové ložisko [3]

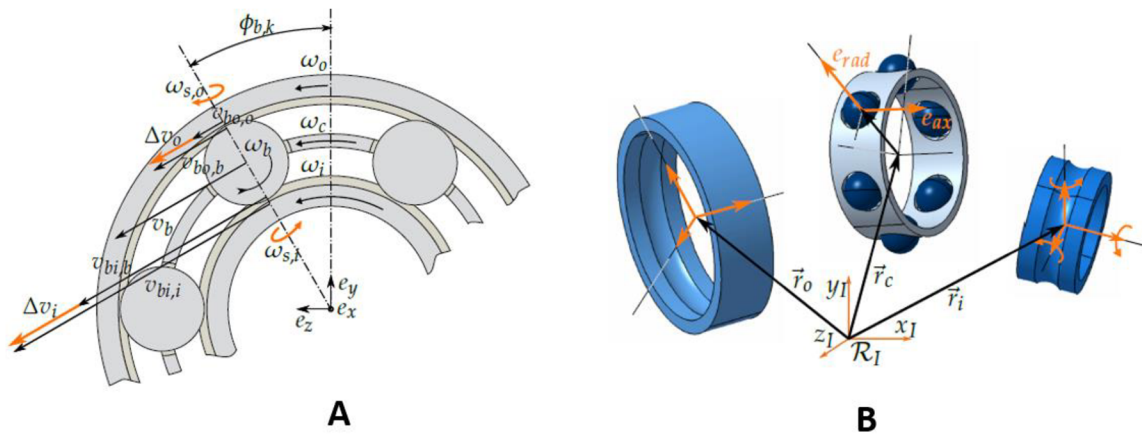
Radiální kuličková ložiska jsou převážně určena pro přenos radiálního zatížení, ale také umožňují přenos axiálního zatížení a při použití vhodné klece i momentového zatížení malé hodnoty. Taková kombinace zatížení má signifikantní vliv na funkci ložiska a promítne se na jeho životnosti. Ložiska jsou obecně navržena tak, aby při nezátíženém stavu vznikla radiální vůle mezi kuličkami a kroužky. Působením axiální síly dojde k posunu kuliček s jedním kroužkem vůči druhému a vzniká tak stykový úhel  $\alpha$ , viz. Obr. 2-2 (A). Vnější zatížení může také způsobit vychýlení kroužků vůči sobě, kdy osa vnitřního kroužku svírá s vnějším kroužkem úhel  $\theta$  (B) [4]. Oba tyto jevy mohou nastat simultánně, ale i odděleně a mají zásadní vliv na výsledný pohyb valivých elementů uvnitř ložiska.



Obr. 2-2 (A) stykový úhel, (B) naklopení vnitřního kroužku [4]

### 2.1.1 Pohyb jednotlivých komponent radiálního ložiska

Kinematická analýza je stěžejní pro vyhodnocení životnosti daného ložiska. Určuje rychlost, která je nutná pro výpočet tloušťky filmu v kontaktu, třecí ztráty a také teploty ložiska [5]. Ložisko upevněné na hnané hřídeli se otáčí stejnou rychlostí jako hřídel a valivé elementy uvnitř ložiska se odvalují v závislosti na této rychlosti s klecí, viz. Obr. 2-3 (A). Kromě odvalování kuliček, kdy je osa rotace rovnoběžná s osou ložiska, dochází k natáčení kolem jejich vlastní osy. Tento pohyb je nazýván spin kuličky a způsobuje prokluz v kontaktu, který je doprovázen vznikem patrných ztrát [2]. Spin kuličky je zapříčiněn stykovým úhlem, naklopením kroužku vůči sobě a samotným kontaktem klece s kuličkami. V případě, že je zvolen výpočet pohybu pomocí kinematických rovnic, je zapotřebí uvést řadu zjednodušení. Uvažujme, že ložisko pracuje v relativně nízkých otáčkách, kdy nenastává prokluz mezi kuličkou a kroužkem. Dále je zanedbán vliv gyroskopického momentu, odstředivých sil a kontaktu klece s kuličkami. Do výpočtu vstupují parametry jako radiální, axiální a momentové zatížení, geometrie ložiska, počet valivých elementů, stykový úhel, naklopení vnějšího kroužku vůči vnitřnímu [4].

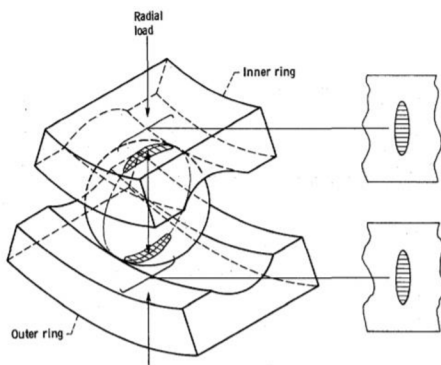


Obr. 2-3 (A) vektory rychlosti (B) stupně volnosti ložiska [6]

Při zahrnutí gyroskopického momentu a odstředivých sil je vhodné odstoupit od řešení kinematických rovnic a přistoupit k řešení dynamických (multibody) simulací. Tento přístup umožňuje zkoumat také interakci povrchů a veškeré dynamické chování ložiska, jako jsou i vibrace. Umožňuje zahrnout do výpočtu více stupňů volnosti, Obr. 2-3 (B), než v případě použití pouze kinematických rovnic. I zde jsou však zavedena zjednodušení, jako je například absence maziva [6].

## 2.1.2 Kontaktní oblast

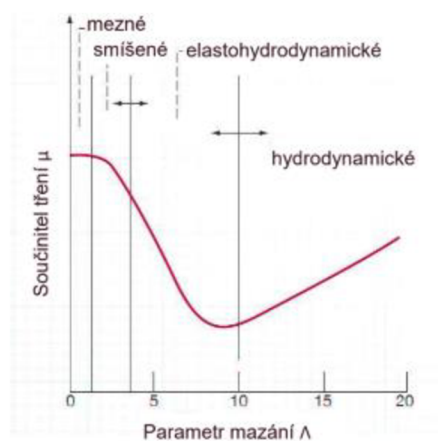
Při zatížení ložiska dojde k vytvoření kontaktních oblastí mezi kuličkami a kroužky ložiska. Velikost a tvar této oblasti závisí na velikosti aplikovaného zatížení a vnitřní geometrii ložiska. Obecně je tvar kontaktní oblasti silně eliptický, Obr. 2-4. Elipticita oblasti je podmíněna konformitou drážky. Ložiska, určená pro vyšší zatížení, mají kontaktní oblast s větší elipticitou, ložiska, určená pro vysoké provozní otáčky, mají malou elipticitu kontaktní oblasti [7].



Obr. 2-4 Kontaktní oblast kuličkového ložiska [7]

### 2.1.3 Režim mazání kuličkového ložiska

Pro snížení tření mezi valivými elementy a kroužky ložiska je použito mazivo, které brání přímému kontaktu mezi tělesy. Během provozu ložisko prochází řadou režimů mazání, které jsou definované provozními parametry, jako je například rychlost a zatížení. Jednotlivé režimy mazání jsou vyjádřeny pomocí Stribeckovy křivky, Obr. 2-5 [8]. Režimy jsou určeny pomocí parametru mazání  $\Lambda$ , který porovnává mezi sebou tloušťku mazacího filmu s redukovanou drsností třecích povrchů kontaktních těles.



Obr. 2-5 Stribeckova křivka [7]

$$\Lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{Rq_a^2 + Rq_b^2}}$$

$h_{min}$  minimální tloušťka mazacího filmu

$Rq_a$  průměrná kvadratická odchylka tělesa  $a$

$Rq_b$  průměrná kvadratická odchylka tělesa  $b$

#### Hydrodynamický režim mazání

Třecí povrchy těles jsou odděleny od sebe souvislou vrstvou maziva tak, že nedochází k přímému kontaktu [8]. Pomocí relativního pohybu těles je mazivo vtahováno do kontaktu a nedochází tak k opotřebování. Vyskytuje se u valivých ložisek při nízkých rychlostech. Parametr mazání se pohybuje v rozmezí ( $5 \leq \Lambda < 100$ ).

#### Elastohydrodynamický režim mazání

Třecí povrchy jsou odděleny souvislou vrstvou maziva přibližně stejně velkou, jako jsou elastické deformace kontaktních těles [8]. Režim nastává při odvalování nekomfortně zakřivených těles po sobě, tedy při vysokých kontaktních tlacích, které způsobí změnu viskozity maziva. Parametr mazání se pohybuje v rozmezí ( $3 \leq \Lambda < 10$ ).



## Mezné mazání

Povrchy kontaktních těles jsou v takové blízkosti, že dochází k vzájemné interakci povrchů [8]. Mazací film je velmi tenký a nedokáže povrchy od sebe oddělit. Parametr mazání se pohybuje v rozmezí ( $1 < \Lambda$ ). Mezné mazání se vyskytuje v ložiscích při nepříznivých podmínkách, jako je nízká rychlost a vysoké zatížení.

### 2.1.4 Tření v ložisku

Existuje hned několik zdrojů tření v ložisku. Je to například samotný valivý odpor, elastická hysterze, mikroprokluz nebo makroprokluz, které se vyskytují při specifických provozních podmínkách ložiska, jako je vysoká rychlost a malé zatížení. Tření také vzniká na rozhraní valivých elementů a klece, popřípadě i s interakcí použitého těsnění [9].

Významnou složkou tření v ložisku je valivý odpor. Je způsoben především vnějším zatížením ložiska. Platí, že čím je větší zatížení, tím je větší i valivý odpor. Velikost valivého odporu ovlivňují také materiálové vlastnosti, rychlost valení či drsnost povrchu. Vliv má také konformita drážky [2].

Mikroprokluz neboli creep, je způsoben rozdílnými rychlostmi valivého elementu a drážky kroužku ložiska v kontaktní oblasti. Nejvyšší rychlost se nachází ve středu kontaktní oblasti. Mikroprokluz nastává při aplikacích, kde je vyžadována vysoká rychlost ložiska s velkou konformitou drážky. V kontaktní oblasti, kde mikroprokluz nastává, se generuje teplo, které napomáhá k degradaci mazacího filmu. Nedostatečný mazací film vede ke zvýšení tření v kontaktu a dalšímu zvýšení teploty [4].

Makroprokluz nastává obvykle při vysokých rychlostech a malých zatíženích. Jde o sloučený pohyb, kdy v kontaktu v tentýž okamžik dochází k valení a skluzu. V tribologii se tento děj nazývá slide-to-roll ratio (SSR) a je vyjádřen poměrem valivé složky ke skluzu [4]

## 2.2 Plastická maziva ve valivých ložiscích

Převážná část ložisek je mazána plastickým mazivem. Úkolem maziva je oddělit povrchy od sebe tenkým mazacím filmem a tím snížit tření. Výhodou plastického maziva před oleji je jeho schopnost zůstat uvnitř ložiska a nevytéct ven během jeho používání. Mazivo slouží jako ochrana před vniknutím nečistot a chrání ložisko proti korozi. Další výhodou plastického maziva před oleji je větší odolnost proti vlhkosti. Během počáteční fáze provozu ložiska dojde k vytlačení většiny maziva z kontaktu na okraj. Na mazání se podílí jen malé množství maziva kolem kontaktu kuličky a drážky. Vytlačené mazivo slouží jako zásoba a při zvýšení teploty se doplňuje do kontaktu. Zvýšená teplota způsobí vylučování základového oleje (bleeding), který zaplaví kontakt. Hlavní nevýhodou použití plastického

maziva je jeho omezená životnost. Při mechanickém zatížení a vysokých teplotách dochází k postupné oxidaci a degradaci maziva [10]. Zestárnuté mazivo vede k narušení mazacího filmu a tím k poškození ložiska. Z toho vyplývá, že životnost ložiska je převážně dána životností plastického maziva [11]. Správné pochopení mechanismů mazání je zásadní pro prodloužení životnosti ložisek. Jedná se o komplexní problém, kvůli nelineárním reologickým vlastnostem maziv.

## 2.3 Struktura plastických maziv

Plastické mazivo je definováno jako tuhý až polotekutý produkt s rozptýleným zpevňovadlem v kapalném mazivu [11]. Jedná se o koloidní soustavu, tvořenou základovým olejem, zpevňovadly a aditivy. Struktura plastického maziva je tvořena částicemi zpevňovadla, které tvoří vláknitou strukturu, kde je prostor mezi vlákny vyplněn olejem [12].

### 2.3.1 Základový olej

Základový olej je držen uvnitř struktury zahušťovadla pomocí kombinace Van der Waalsových a kapilárních sil [13]. Zastoupení oleje v plastickém mazivu se pohybuje od 70% do 90%, proto má zcela zásadní vliv na výsledné vlastnosti plastického maziva. Zpravidla se používají minerální rafinované oleje, nebo pro velmi namáhaná ložiska pak plastická maziva se syntetickým olejem. Použití plastických maziv při nižších teplotách závisí na teplotních vlastnostech oleje, které například dobře popisuje viskozitní index. Použití plastických maziv při vyšších teplotách je pak limitováno oxidační stabilitou a vypařováním oleje [14].

### 2.3.2 Zpevňovadla

Zpevňovadla tvoří přibližně 5-20 % objemu a mění konzistenci základového oleje, dále se také podílí na změně jeho vlastností. Plastická maziva se klasifikují primárně podle druhu použitého zpevňovadla. V ložiscích se běžně používají lithná mýdla. Dále existují komplexní mýdla, organická nebo anorganická zpevňovadla [15]. Jednotlivá zpevňovadla změní jak chemické, tak fyzikální vlastnosti. Projeví se rozdílným tempem uvolňování kapalných složek, rozdílnou reologií i mechanickou stabilitou [14]. Zpevňovadla také ovlivňují tření při smíšeném a mezním mazání, kde s delšími vlákny vykazují nižší koeficient tření, než ty s kratšími vlákny [16].

### 2.3.3 Aditiva

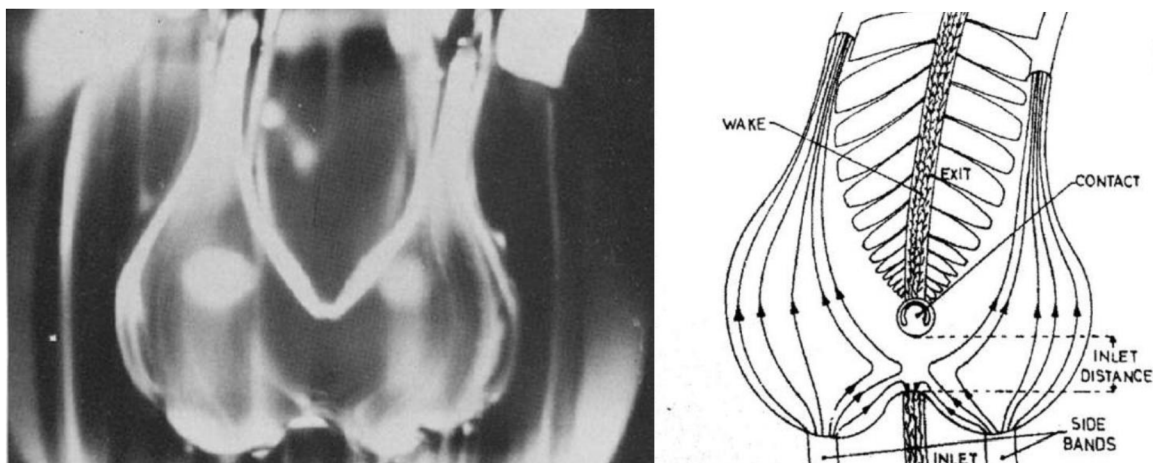
Aditiva jsou chemické látky přidávané do plastických maziv i do mazacích olejů, pro zlepšení původních, nebo pro přidání nových vlastností. Obsah aditiv v mazivu se obvykle pohybuje od 0 do 10 %. Minerální oleje potřebují pro aplikace při vyšších teplotách inhibitory oxidace, které prodlouží servisní život i dobu skladovatelnosti. Používané jsou inhibitory proti korozi, které ochrání ložiska ve vlhkých podmínkách. Proti tvorbě usazenin a usazování nečistot v mazivu se používají detergenty a disperzanty. Významnou skupinou aditiv jsou aditiva proti tlaku a opotřebení, označována EP, AW. Tato aditiva chrání ocelové části proti opotřebení při aplikacích, kde jsou namáhána vysokým tlakem. Aditiva vytvoří chemickou reakci na povrchu kovu odolnou vrstvu, která zamezí kontaktu kovu na kov. Důležitá jsou aditiva pro změnu viskózního indexu, nebo pro zpevnění struktury maziva a aditiva zlepšující adhezní schopnosti [14].

## 2.4 Doplnování maziva do kontaktu ve valivém ložisku

Pomocí relativního pohybu kuličky a kroužku je mazivo vtahováno přímo do kontaktu. Avšak zároveň je konstantně vytlačováno pryč z kontaktu vlivem tlaku těles, mezi kterými mazání probíhá. Pro oddělení povrchů je potřeba, aby mazivo bylo neustále dodáváno do kontaktu. Mezi kontakty ve valivém ložisku dochází k opětovnému vracení maziva do valivé dráhy, tento děj se nazývá doplňování maziva. Proces doplňování je způsoben mechanicky indukovaným tokem, tedy působením odstředivé a gravitační síly, a také povrchovým napětím. Pro správnou funkci ložisek je proces doplňování zcela zásadní. Pokud by mazivo nebylo doplňováno, došlo by k velice rychlému poškození ložisek [17].

### 2.4.1 Pohyb maziva ve valivém ložisku

Jedna z prvních prací, která se zabývala procesem doplňování maziva do kontaktu, byla vydána v roce 1974 [18]. Autor v článku zkoumá vliv doplňování maziva do kontaktu na proces hladovění. Podle autora článku je pro doplňování maziva klíčové povrchové napětí, které způsobí znovuvytvoření rovnoměrné vrstvy maziva po projetí kontaktem. Pokračování problematiky doplňování maziva lze nalézt v článku z roku 1976 [19]. Autoři článku se primárně zabývají vznikem postranních pásů maziva, které se přímo podílejí na zásobování kontaktu. Experiment byl proveden na simulátoru ball-on-disc a pro vizualizaci toku kolem kontaktu se využilo promíchání maziva se vzduchem, kde bublinky vzduchu ukázaly danou trajektorii, Obr. 2-6. Bylo zjištěno, že poloha vstupní oblasti je řízena rovnováhou mezi množstvím oleje ztraceného u kontaktních hran a množstvím strženého z postranních rezervoárů. Podle autorů je u řídce mazaných ložisek dodávání maziva z bočních rezervoárů do kontaktu primárním zdrojem maziva.

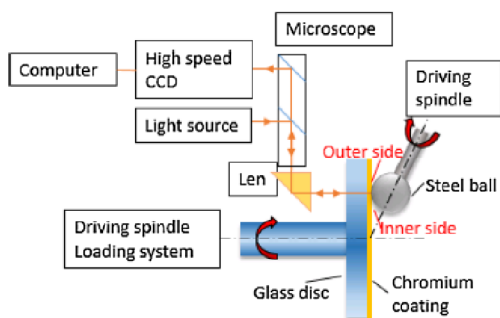


Obr. 2-6 Tok maziva kolem kontaktu [19]

Chováním plastického maziva v kontaktu a oblasti kolem kontaktu se zabýval Hurley [20]. Zpozoroval, že mazání plastickým mazivem se dá rozdělit na dva režimy, kdy první fáze je zcela zaplavený kontakt, kdy je plastické mazivo tlačeno zpátky do dráhy kuličky. Na lubrikaci kontaktu se tak podílí všechny tři složky plastického maziva a tloušťka maziva v kontaktu je vyšší, než ukazují predikční modely se základovým olejem. Druhá fáze je hladovění, kdy dochází k vytlačování většiny plastického maziva mimo dráhu kuličky a neopětovnému toku zpět do dráhy. Na mazání kontaktu se podílí velmi malé množství použitého maziva a vyloučeného základového oleje o vysoké viskozitě. Základový olej je doplňován z postranních oblastí v blízkosti kontaktu. V tomto případě je tloušťka filmu v kontaktu mnohem menší než v první fázi.

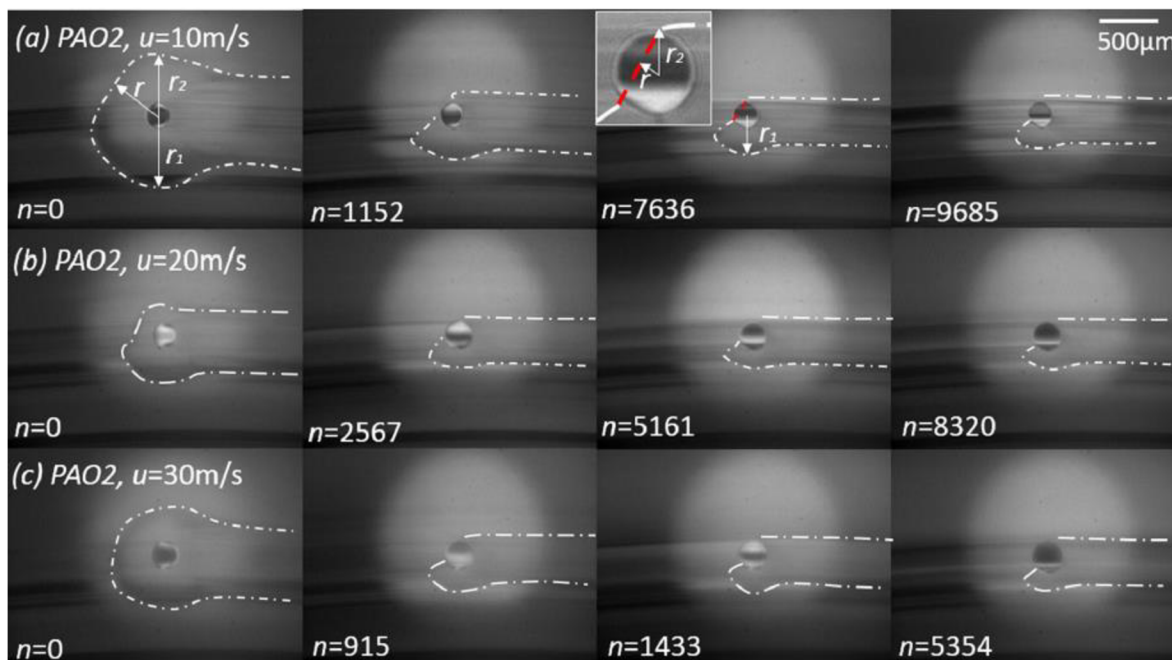
#### 2.4.2 Odstředivé síly

Množství maziva kolem kontaktu je ovlivňováno odstředivou silou. Vliv odstředivé síly a geometrie povrchu zkoumal Van Zoelen [21]. Ten zkoumal pohyb volné vrstvy maziva na povrchu kontaktních ploch. Tvar ploch způsobí pohyb maziva po volném povrchu působením odstředivých sil. Pohyb maziv byl teoreticky odhadnut a potom i experimentálně ověřen. Vliv odstředivé síly se zřetelně projeví při vysokých rychlostech. Vliv vysoké rychlosti na doplňování maziva je řešen v článku od autorů Liang a kol. [22]. Experiment byl proveden na tribometru ball-on-disc, kde byla osa rotace disku horizontálně orientována a kontakt byl vytvořen nad osou disku, Obr. 2-7.



Obr. 2-7 Schéma uspořádání tribometru s horizontálně orientovanou osou disku

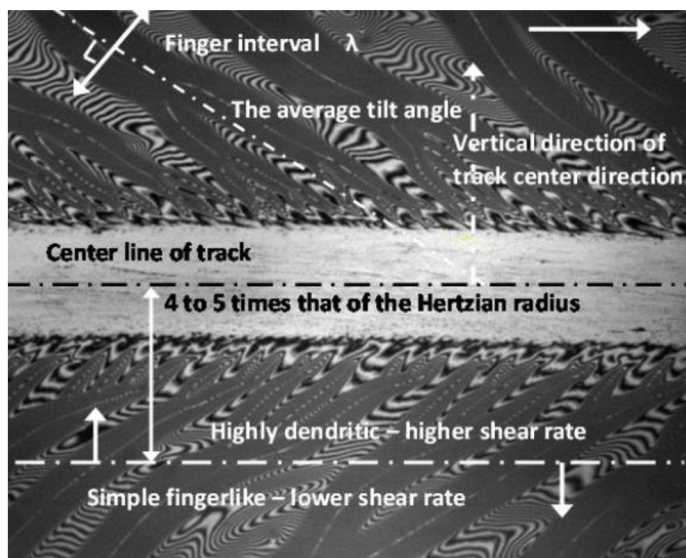
Autoři zjistili, že odstředivý efekt má zásadní vliv na formování bočních rezervoárů a tím způsobí ovlivnění zásobování kontaktu mazivem. Z interferogramů na Obr. 2-8 lze rozpoznat, že horní strana kontaktu není při vyšších rychlostech dostatečně zásobována mazivem, protože odstředivá síla narušuje proces doplňování.



Obr. 2-8 Rezervoáry maziva v závislosti na rychlosti otáčení disku [22]

### 2.4.3 Dráha maziva

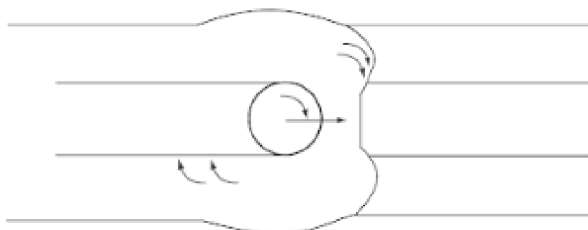
Při použití olejů má tok kolem kontaktu tvar připomínající motýlí křídla. Podobnou dráhu toku má i plastické mazivo, avšak vzor dráhy zůstane pozorovatelný výrazně delší dobu. Vzor dráhy plastického maziva je na Obr.2-9. Tvar a členění vzoru úzce souvisí s reologií použitého maziva a rychlostí valení. Vzor dráhy napomáhá toku maziva z bočních rezervoárů do kontaktu a napomáhá předejítí hladovění kontaktu [23]. Vliv rychlosti valení na vzor trati byl studován v článku z roku 2015 [24]. Bylo zjištěno, že interval mezi kavitačními oblastmi klesá s rostoucí rychlostí. Při vyšších rychlostech došlo k poškozování vzoru a nakonec k jeho zničení. Rychlost, u které došlo ke zničení vzoru, byla vyšší než rychlost, při které kontakt hladověl.



Obr.2-9 Vzor dráhy plastického maziva [24]

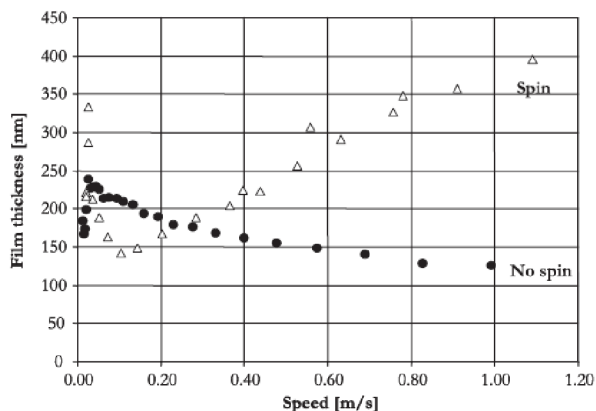
### 2.4.4 Spin kuličky

U kuličkových ložisek, vlivem působení axiální síly, dochází k tzv. spinu, kdy se kuličky nejenom odvalují ve směru otáčení kroužku ložiska, ale natáčejí se i kolem své osy, viz Obr. 2-10



Obr. 2-10 Spin kuličky [1]

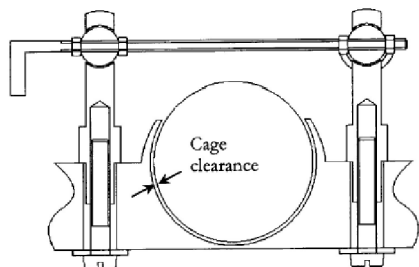
Efekt spinu kuličky není příliš prozkoumán, nicméně Cann a Lubrecht [25] ukázali vliv spinu na tloušťku maziva. Efekt spinu lze vidět na Obr. 2-11, na kterém jsou průběhy závislosti tloušťky maziva na rychlosti. Černé tečky naznačují absenci spinu a při navyšování rychlosti tloušťka maziva výrazně klesá, naopak u hodnot se spinem je průběh opačný, tedy tloušťka narůstá. Lze usuzovat, že efekt spinu způsobí tečení maziva z bočního rezervoáru do kontaktu a tím brání hladovění.



Obr. 2-11 Efekt spinu na tloušťku maziva [25]

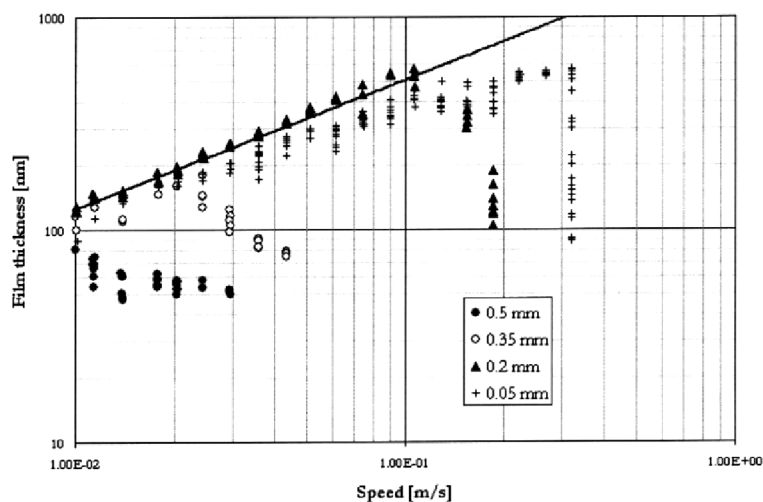
## 2.4.5 Vliv klece

Vliv klece na doplňování maziva pozoroval Damiens [26]. Experiment byl proveden na zařízení ball-on-disc, u kterého byla kulička umístěna ve standardní nylonové kleci. Klec, Obr. 2-12, byla upravena tak, aby vůle mezi kuličkou a klecí mohla být měněna.



Obr. 2-12 Klec pro úpravu vůle [26]

Při experimentech se měřila tloušťka filmu při zvyšující se rychlosti až do doby, kdy se vyskytlo hladovění kontaktu. Při mazání plastickým mazivem kuličky bez klece se hladovění dostavilo při nízké rychlosti, typicky 0,02 m/s. Přítomnost klece výrazně ovlivnila výskyt hladovění a navýšila rychlost, při které se hladovění dostaví. Bylo zjištěno, že se zmenšující se vůlí mezi klecí a kuličkou se rychlost, kdy se dostaví hladovění, zvýší, viz Obr. 2-13. Kladný vliv klece na mazání se přisuzuje lepší distribuci maziva směrem do valivé dráhy a také smykové degradaci maziva mezi kuličkou a klecí.



Obr. 2-13 Tloušťka filmu při navyšující se rychlosti a různých vřlů [26]

## 2.4.6 Vliv tvaru kontaktní oblasti

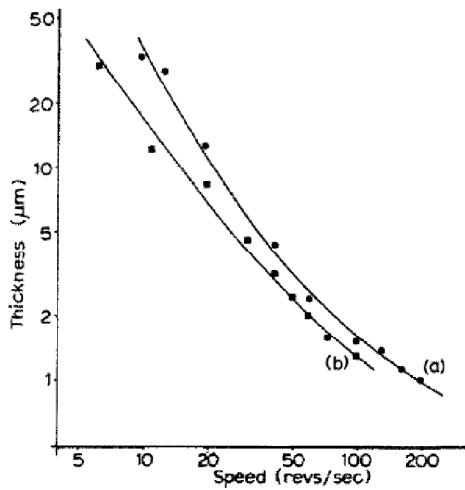
Mazivo nemá pouze tendenci být vtahováno do kontaktu vlivem relativního pohybu těles, ale má také tendenci kontakt obtékat. Tento pohyb maziva se označuje boční výtok. Čím je boční výtok větší, tím dochází k rychlejšímu přesunu maziva mimo kontakt, zato do oblasti kontaktu se nedostává dostatečné množství maziva a kontakt hladoví [27].

Boční výtok maziva je popsán parametrem  $\gamma$ , jedná se o odpor proti bočnímu výtoku a je závislý na kontaktní geometrii a provozních podmínkách [28]. Eliptická kontaktní oblast má širší dráhu než kruhová, tudíž má tendenci méně vytlačovat mazivo do boku kontaktu, tudíž má vyšší hodnotu parametru  $\gamma$  než kruhová kontaktní oblast. U liniového kontaktu se boční výtok zanedbává.

## 2.5 Fluorescenční mikroskopie

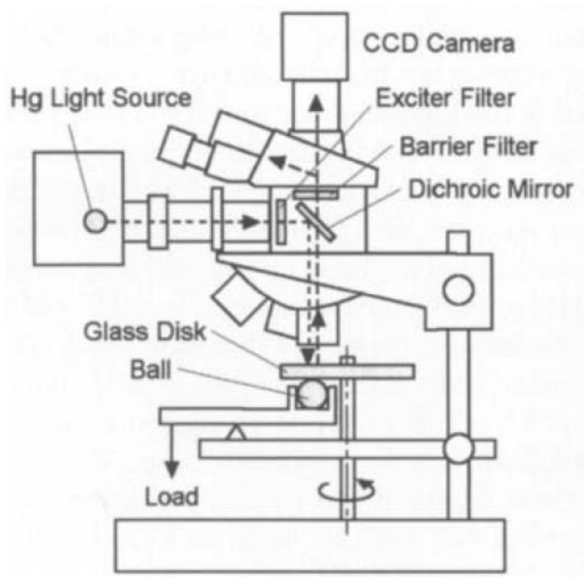
První použití fluorescenční mikroskopie pro měření tloušťky filmu představili v roce 1974 Smart a Ford [29]. Tloušťka filmu byla měřena na rotujícím válci, kde byl efekt fluorescence vytvořen rtuťovou lampou. Citlivost metody umožňovala měřit tloušťku filmu od 0,1  $\mu\text{m}$  do 1 mm, v závislosti na přesnosti kalibrace. Autoři naměřili tloušťku filmu od 800 nm do 35  $\mu\text{m}$ , v závislosti na rychlosti rotace válce viz, Obr. 2-14.





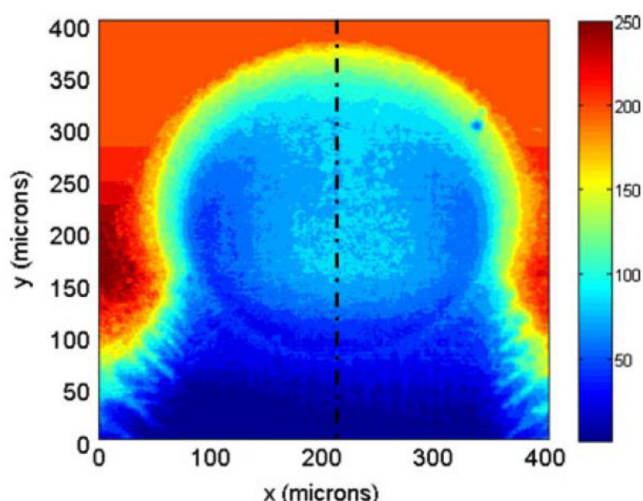
Obr. 2-14 Závislost tloušťky filmu na rychlosti [29]

V roce 1978 použil Ford místo rtuťové lampy UV paprsek s vlnovou délkou 325 nm a modrý laser s vlnovou délkou 441.6 nm [30]. Použití laseru místo lampy přispělo ke zjednodušení návrhu testovacího zařízení. Laser umožňoval ozařování z větší vzdálenosti a lépe se zaměřoval do kontaktu. Modrý laser způsoboval silnou fluorescenci, na rozdíl od UV paprsků a umožňoval zkoumání širší škály vzorku, než UV.



Obr. 2-15 Tribometr používající fluorescenci [31]

První použití fluorescenční metody pro měření tloušťky maziva na zařízení konfigurace ball-on-disc, viz. Obr. 2-15, představil Sugimura v roce 2000 [31]. Disk byl vyroben z křemičitého skla s drsností 25 nm  $R_{max}$  a kulička o průměru 19.05 mm z materiálu AISI 52100, s drsností 80 nm  $R_{max}$ . Pro měření tloušťky filmu byly použity minerální oleje H60 a P500. Tyto oleje přirozeně vytváří fluorescenci po excitaci UV světlem, ale fluorescence je značně slabá, proto byl přimíchán pyren a fluorescenční činidlo do olejů s koncentrací 2 % celkové hmotnosti. Tloušťka filmu, kterou Sugimura dokázal naměřit, byla 30 nm. Vyskytly se však problémy, a to interference na rozhraní kontaktu skla a kovu, která ztížila proces kalibrace metody. Dále výrazný efekt šumu z pozadí, který ztěžoval měření tenkých filmů. Fluorescenční metodu v roce 2010 použil pro zkoumání toku maziva v EHD kontaktu Reddyhoff [32]. Kontakt byl vytvořen mezi ocelovou kuličkou a skleněným diskem. Pro test byl použit optický tribometr od firmy PCS Instruments. Zařízení bylo opatřeno fluorescenčním mikroskopem a laserem o vlnové délce 532 nm. Jako mazivo byl použit glycerol, do kterého byl přimíchán Eosin v koncentraci 0.04 %. Experiment byl proveden za čistého valení při zatížení 20 N. Do kontaktu bylo přidáváno obarvené mazivo a pomocí mikroskopu se pozoroval jeho průchod kontaktem Obr. 2-16. Bylo zjištěno, že průchod maziva kontaktem probíhá za konstantní rychlosti a trvá 5.5 ms.



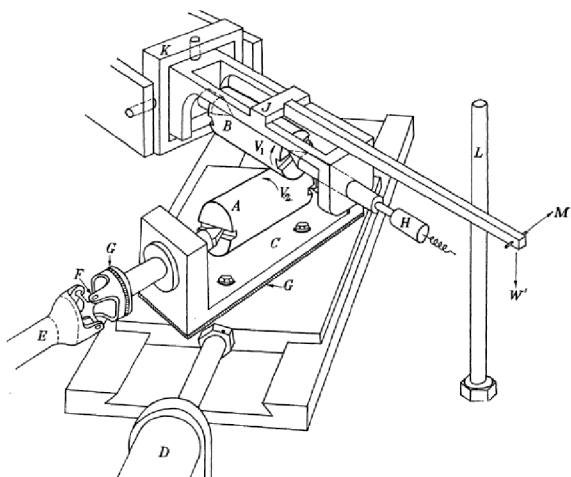
Obr. 2-16 Fluorescenční mapa kontaktu za čistého valení 0.075 m/s [32]

## 2.6 Zařízení pro studium mazání v ložiscích

Výzkum EHD režimu je numerický, analytický i experimentální. Vzhledem ke komplexnosti problematiky je experimentální přístup nedílnou součástí výzkumu. EHD režim bývá vytvořen na simulátorech kontaktu a zkoumán pomocí různých metod. Zprvu to byly metody elektrické, následovaly metody optické, které se staly velice silným nástrojem, poskytujícím přesnou informaci o tloušťce filmu [33].

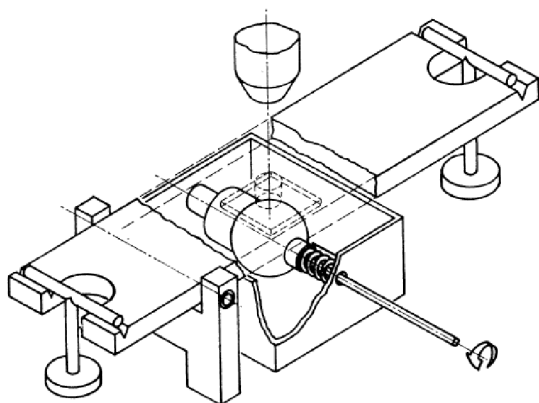
## 2.6.1 Optické simulátory pro studium EHD kontaktu

Zařízení, na kterém byla provedena první experimentální studie EHD režimu mazání, vytvořili Archard a Kirk v roce 1961 [34]. Pro vytvoření EHD režimu se použily dva mimoběžné válce, Obr. 2-17. Zpočátku se kontakt analyzoval pomocí elektrické metody, ale v roce 1962 Kirk použil optickou interferenční metodu a získal tak informaci o tvaru mazacího filmu. Kontakt byl pozorován pomocí mikroskopu [35].



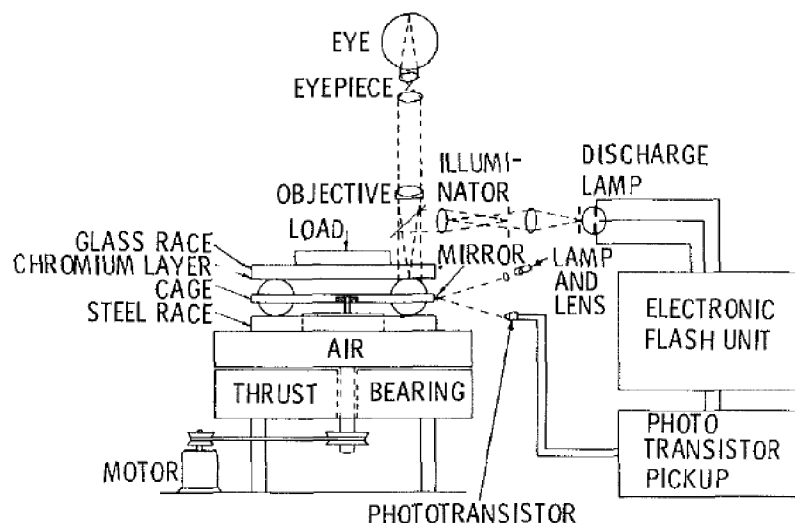
Obr. 2-17 Zařízení se dvěma válci [34]

Pokročilejší koncept simulátoru byl navržen až Goharem v roce 1963 [36]. Místo dvou mimoběžných válců použil kuličku a skleněnou desku, Obr. 2-18. Tato změna způsobila nárůst kontaktního tlaku a možnost přímo pozorovat kontakt přes skleněný disk. Konfigurace, která byla poprvé použita Goharem, se stala nejrozšířenější konfigurací. Většina dalších vytvořených optických simulátorů kontaktu vycházela z konceptu přitlačované kuličky na skleněný disk.



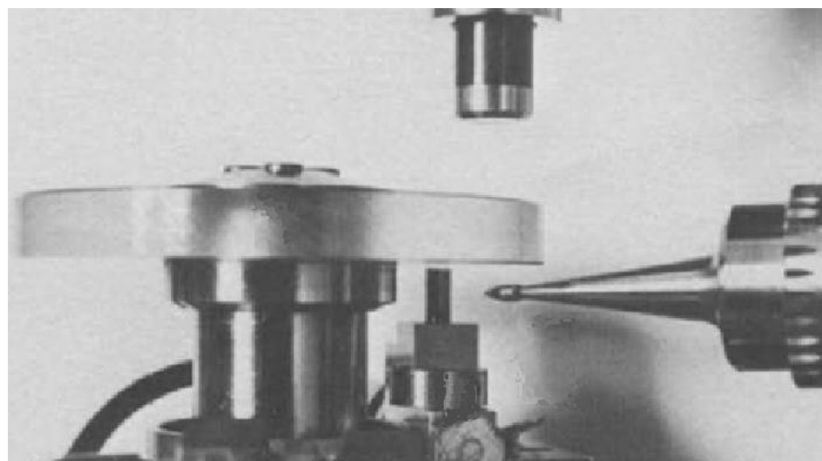
Obr. 2-18 Schéma konfigurace použité Goharem [37]

Pro experimentální studium hladového kontaktu byl vytvořen nový typ zařízení [38]. Autoři upravili stávající koncept ball-on-disc tím, že přichytili tři kuličky mezi dva disky. Kuličky byly chycené v kleci, která byla stacionární a způsobila rotaci kuliček kolem své osy, ale jen na jednom místě, Obr. 2-19. Vytvořili tak zařízení, které bylo schopné věrohodněji popsat mazání u axiálních ložisek. Spodní ocelový disk byl poháněn, horní skleněný disk přitlačoval ocelové kuličky. Nad skleněným diskem byl umístěn mikroskop. Nadsklápnutím skleněného disku byl umístěn mikroskop.



Obr. 2-19 Schéma simulátor axiálního ložiska ze stacionární kleci [38]

Možnou modifikací simulátoru je použití rotačního disku místo skleněné desky a místo kuličky soudeček, Obr. 2-20. Hertzova oblast je v tomto případě značně eliptická. Takovéto uspořádání použil Dalmaz pro studium mazání v ložiscích s kosoúhlým stykem [39].



Obr. 2-20 Konfigurace použita Dalmazem [39]

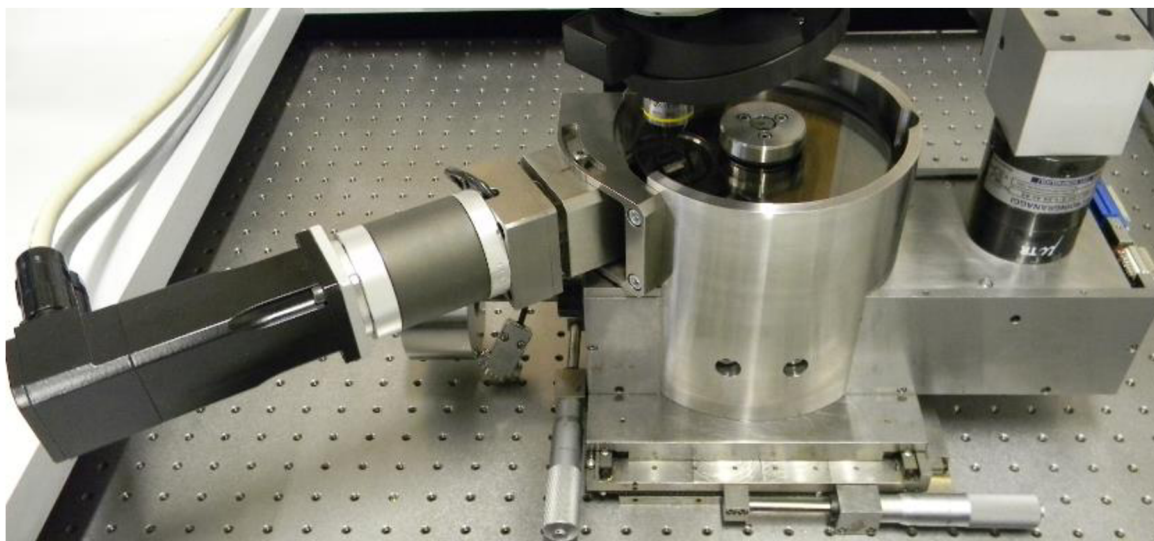
## 2.6.2 Zařízení na Ústavu konstruování

Jeden z prvních simulátorů vytvořených na Ústavu konstruování, Obr. 2-21, byl navržen podle konceptu Goharova simulátoru. Mazací film je vytvořen mezi skleněným diskem a kovovou kuličkou. Kulička má průměr jeden palec a je vyrobená z ložiskové oceli. Skleněný disk je vyroben z křemičitého skla BK 7 a má průměr 150 mm a výšku 12,5 mm. Spodní strana disku je pokryta vrstvou chromu a horní strana antireflexní vrstvou.



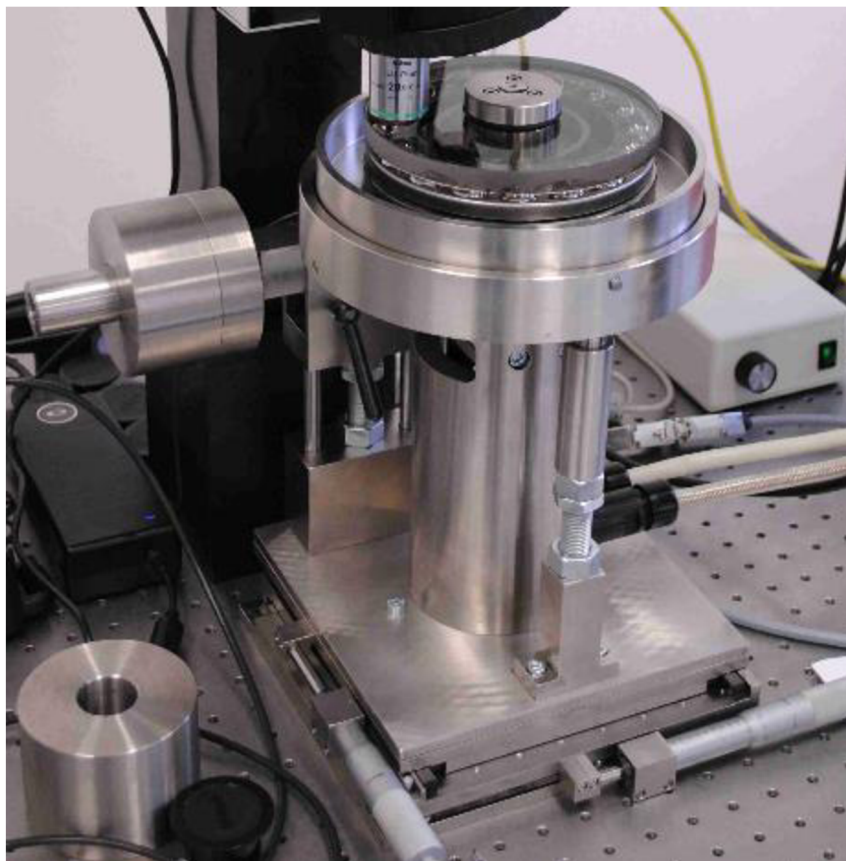
Obr. 2-21 Tribometr ball-on-disc na UK [40]

Disk a kulička jsou nezávisle na sobě poháněny servomotory a rychlost elementu se pohybuje v rozmezí od 0 m/s do 8 m/s. Zatížení je vytvořeno pomocí pákového mechanismu v rozmezí od 0 do 45 N. Kontakt je pozorován průmyslovým mikroskopem Nikon Optiphot 150 a vyhodnocován osobním počítačem [41]. Simulátor kontaktu je umístěn na polohovacím stole, který zajišťuje vhodnou polohu kontaktu pod mikroskopem.



Obr. 2-22 Tribometr ball-on-disc s různou orientací vektoru rychlosti [42]

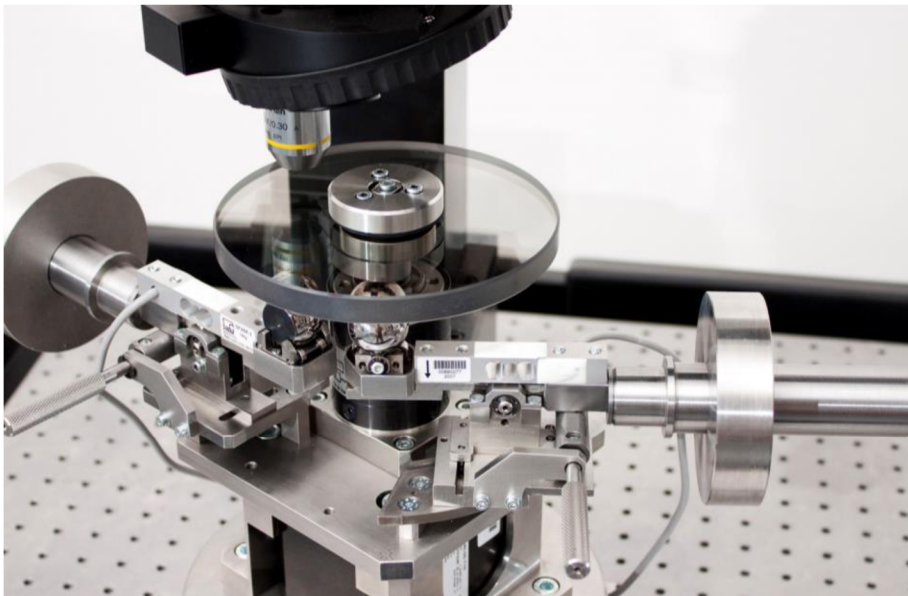
Další zařízení, Obr. 2-22, je podobné jako u předchozího případu, ale je upraveno tak, že umožňuje natačení osy soudečku kolem osy kontaktu. Natočením soudečku docílíme změny vektoru rychlosti soudečku vůči vektoru obvodové rychlosti disku. Použit je skleněný disk a ocelová kulička. Pro zvýšení Hertzova tlaku za stejného zatížení lze skleněný disk zaměnit za safírový. Kontakt je zatěžován přes pákový mechanismus pomocí závaží přes skleněný disk. Kulička(soudeček) a disk jsou nezávisle na sobě poháněny servomotory[42].



Obr. 2-23 Tribometr s vícenásobným kontaktem [43]

Unikátním zařízením, kterým Ústav konstruování disponuje, je tribometr s vícenásobným kontaktem, Obr. 2-23. Jedná se o tribometr, který slouží ke studiu utváření mazacího filmu ve axiálním valivém ložisku. Liší se od předchozího tribometru tím, že se skládá z několika kuliček, klece, spodního kroužku a horní kroužek je nahrazen skleněným (safírovým) diskem. Více valivých elementů dokáže simulovat reálnou situaci v axiálním valivém ložisku. Chování vícenásobného kontaktu je pozorováno mikroskopem a vysokorychlostní digitální kamerou. Vysokorychlostní kamera je nutná, protože kontakty se neustále pohybují. Zatížení kontaktu je jako u předchozího případu zajištěno pákovým mechanismem [44].



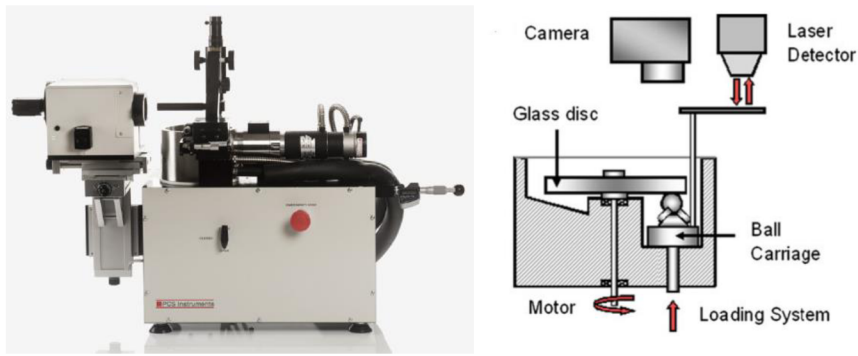


Obr. 2-24 Simulátor hladovějícího kontaktu [45]

Pro studium hladovění byl na Ústavu konstruování vytvořen simulátor hladovějícího kontaktu, Obr. 2-24. Tento simulátor vychází z konceptu ball-on-disc, avšak místo jednoho valivého elementu jsou zespodu disku přitlačovány dva valivé elementy. Elementy jsou ke skleněnému disku přitlačovány pákovým mechanismem, který umožňuje měnit sílu přitlaku pomocí změny hmotnosti závaží. K pákovým mechanismům jsou připojeny ohybové tenzometry pro měření síly. Oba pákové mechanismy jsou uloženy v drážkách, které umožňují změnu polohy vůči sobě a disku. Prvním elementem je soudeček a druhým je kulička. Valivé elementy jsou uloženy na vozíčku s ložisky tak, aby se mohly odvalovat po disku. Středky valivých elementů se nacházejí na stejném poloměru vůči ose disku. Druhý element je pozorován přes skleněný disk a pomocí optické interferometrie je vyhodnocována tloušťka maziva v kontaktu [46].

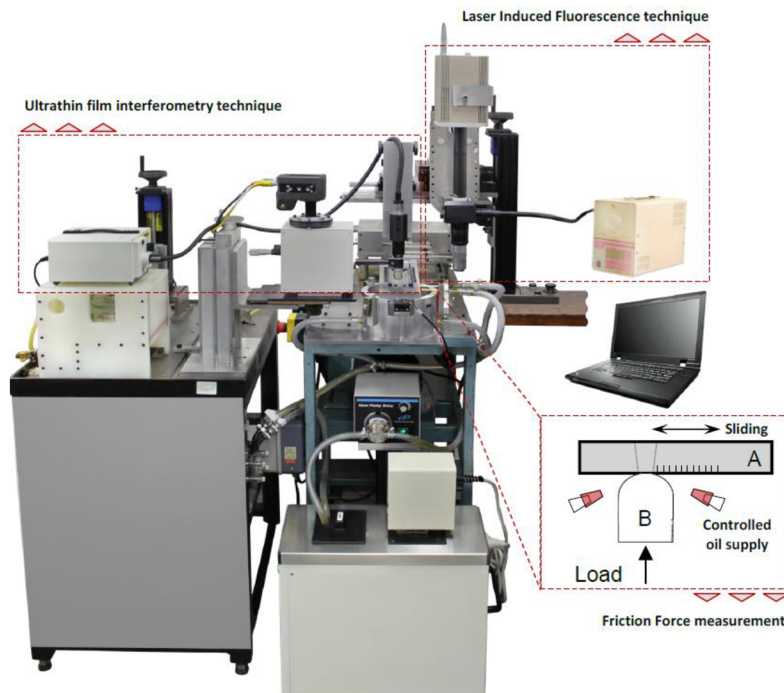
### 2.6.3 Zařízení ze zahraničí

Univerzita Imperial College v rámci výzkumu spolupracuje se společností PCS Instruments, která nabízí řadu zařízení. Pouze jenom jedno zařízení však využívá optické metody pro vyhodnocování tloušťky filmu, a to EHD2 tester, Obr.2-25. Tester pracuje v konfiguraci ball-on-disc, kde je skleněný(safírový) disk poháněn a kulička je buď unášena, nebo také poháněna. Tloušťka filmu je vyhodnocována pomocí optické interferometrie. Nejvyšší možné zatížení, které dokáže zařízení vyvinout, je 50 N. Toto zatížení odpovídá 0,7 GPa kontaktního tlaku při použití skleněného disku a ocelové kuličky. Kulička má průměr 19,05 mm a je přitlačována hydraulicky k disku zespodu, přičemž je uložena na třech ložiscích.



Obr.2-25 Tribometr a schéma zařízení od PCS Instruments [42, 44]

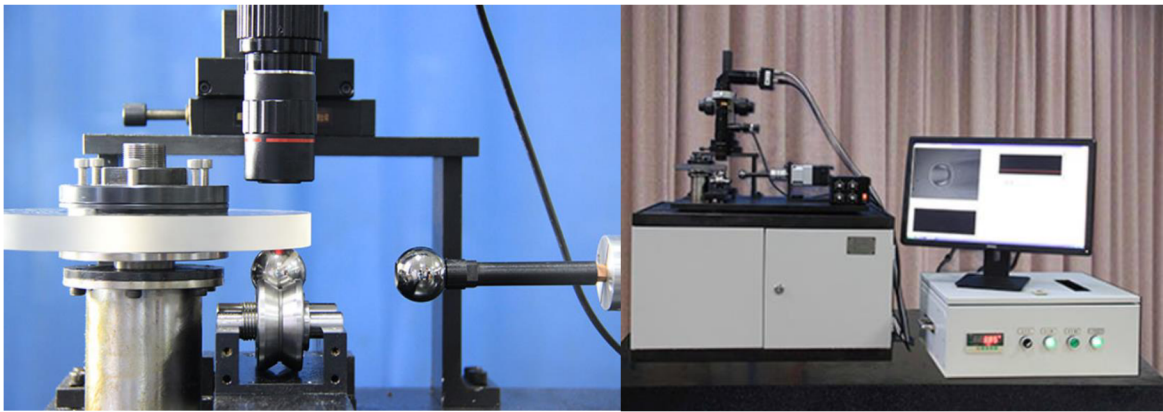
Pro výzkum tření pístního kroužku v motoru se používá na Imperial College specifické zařízení, Obr.2-26. Zřízení umožňuje měření tloušťky filmu i velikost tření. Tribometr pracuje v konfiguraci pin-on-disc, kde je použit disk z taveného křemene, který provádí reciproční pohyb. Do kontaktu je vstříkováno mazivo pomocí trysek. Zařízení umožňuje regulaci teploty maziva v rozmezí 10 až 150 °C. Pohyb zajišťuje elektromotor a zdvih křemenné desky je 28,6 mm. Zatížení kontaktu se pohybuje od 10 do 120 N.



Obr.2-26 Reciproční tribometr [49]

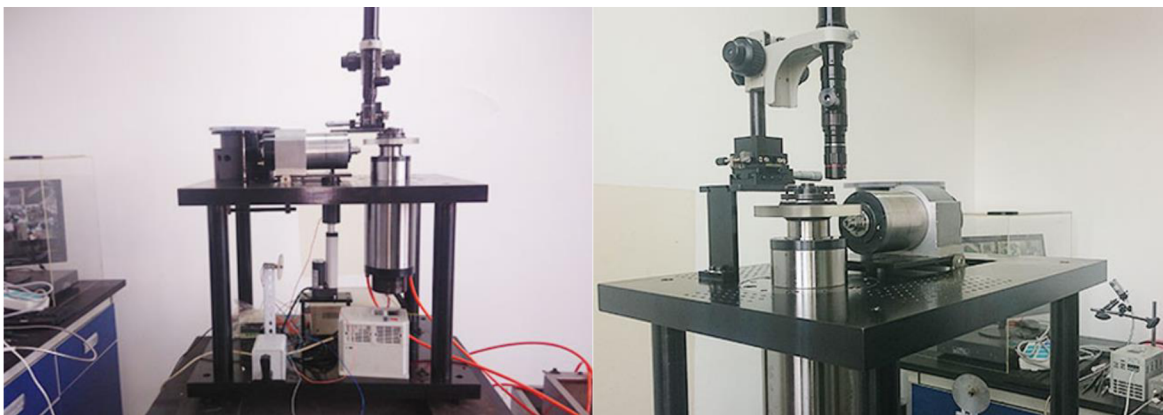
Univerzita Quingdao v Číně má hned několik zařízení pro výzkum tribologických dějů, ale jen dvě pro pozorování kontaktu s mazivem. První zařízení je simulátor kontaktu konfigurace ball-on-disc, Obr. 2-27, který umožňuje čisté valení, prokluz otáčení i reciproční pohyb[50]. Rychlost v kontaktu je od 0 do 50 m/s a zatížení do 300 N. Velikost koule je jeden palec.





Obr. 2-27 Zřízení pro studium Ehd režimu

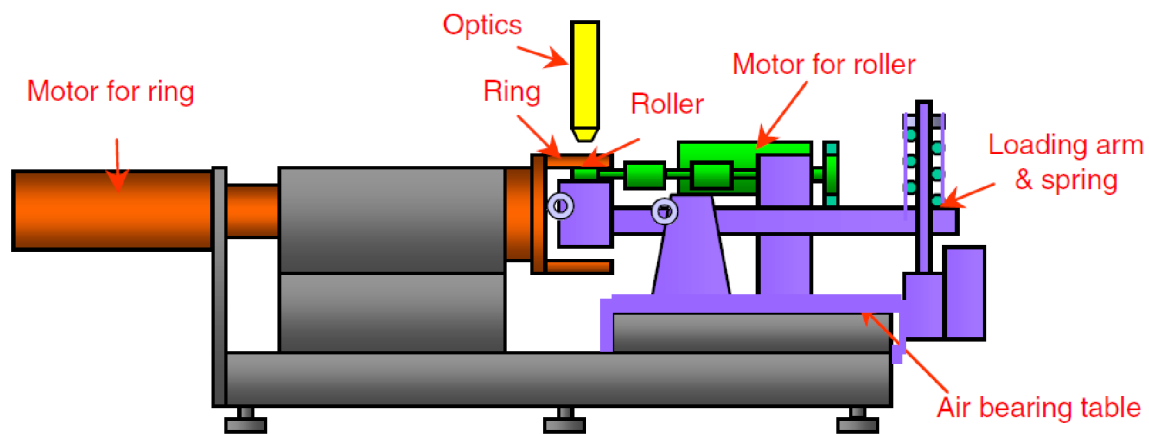
Druhé zařízení je také konfigurace ball-on-disc, Obr. 2-28. Poháněný je skleněný disk i kulička pomocí elektromotorů [51]. Zatížení je zprostředkováno pomocí pružiny, která je stlačována pomocí lineárního aktuátoru. Zatížení kontaktu je kontrolováno pomocí senzorů. Rychlost v kontaktu je 0-52 m/s, rozah zatížení 0-100 N. V zařízení je použita koule s průměrem 1 palec a s drsnosti Ra 11 nm.



Obr. 2-28 Zařízení pro studium EHD režimu za vysoké rychlosti

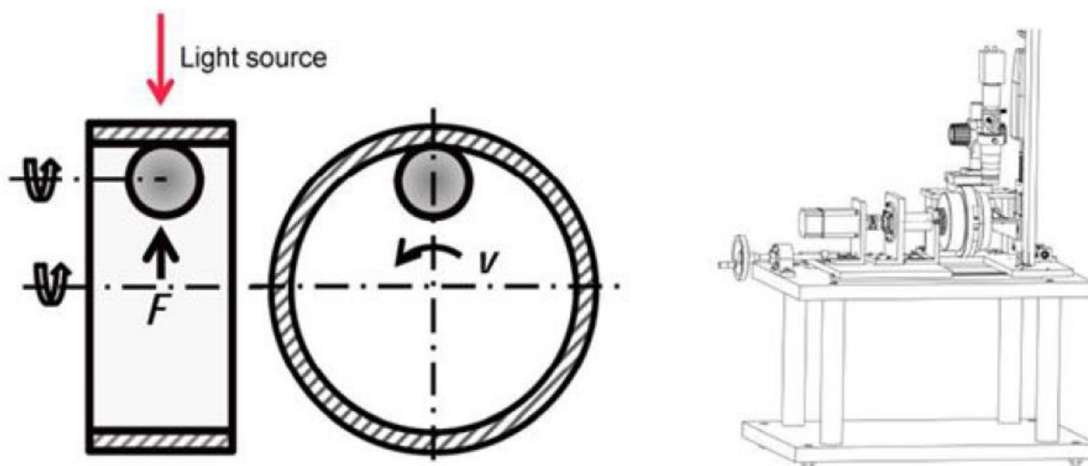
#### 2.6.4 Zařízení s konfigurací ball-on-ring

Zařízení, která používají skleněný kroužek místo skleněného disku, jsou daleko méně používána. Jedno takové bylo navrženo pro studium liniových kontaktů [52]. Kontakt je vytvořen mezi safírovým kroužkem a ocelovým válečkem. Oba dva prvky jsou poháněny nezávisle na sobě. Váleček je přitlačován ke kroužku pomocí pružiny a krokového motoru. Zatěžovací systém i s válečkem je umístěn na vzduchovém ložisku. Kontakt je vyhodnocován pomocí optické interferometrie. Zařízení dokáže vyvinout kontaktní tlak odpovídající 3,5 GPa. Rychlost v kontaktu dosahuje 10 m/s i s možností stoprocentního prokluzu. Schéma zařízení je na Obr. 2-29.



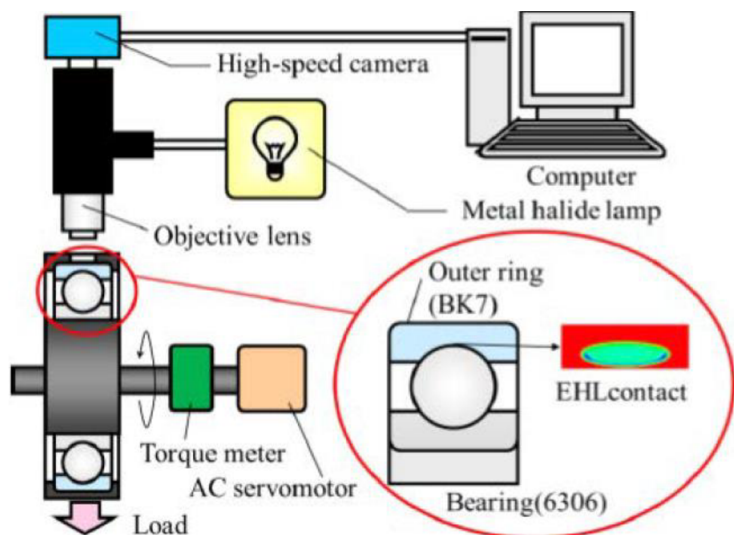
Obr. 2-29 Schéma zařízení pro vytvoření liniového kontaktu

Použití kroužku má řadu výhod oproti disku. Umožňuje navýšení testovací rychlosti, aniž by docházelo k úniku maziva ze zkoumané oblasti vlivem odstředivých sil. Pro studium EHD režimu za vysokých rychlostí bylo vytvořeno takovéto zařízení na univerzitě Beijing [53]. Kontakt je vytvořen mezi skleněným kroužkem a ocelovou koulí. Tloušťka filmu je měřena pomocí optické interferometrie, tudíž je skleněný kroužek pokryt tenkou vrstvou chromu. Kulička je podepřena na vozíčkách z ložisek, tudíž zařízení neumožňuje studium filmu při prokluzu. Poháněn je kroužek, a to servomotorem s maximálními otáčkami 10 000 ot/min. Rychlost v kontaktu dosahuje 52 m/s. Největší aplikované zatížení bylo 40 N, které vytvořilo kontaktní tlak ve velikosti 542 MPa. Skleněný kroužek byl po experimentech značně opotřebovaný. Jednak byla poškozena chromová vrstva, ale také byl problém s odlupováním částí skla. Schéma zařízení je na Obr. 2-30.



Obr. 2-30 Tribometr s konfigurací ball-on-ring [53]

Předchozí zařízení ovšem nedodržovalo geometrii kontaktu skutečného ložiska. Pro napodobení skutečných podmínek v ložisku bylo vytvořeno zařízení, které používá v kroužku i drážku pro kuličky. Jedná se o ložisko s vnějším skleněným kroužkem [54], vnitřní kroužek ložiska byl upevněn na hřídel, která byla poháněna. Pro dané zařízení byla použita optická interferometrie. V ložisku bylo osm kuliček a plastová klec. Zatížení ložiska bylo pouze radiální a to silou 29,4 N. Kvůli kuličkám bylo zapotřebí použití vysokorychlostní kamery. Schéma zařízení je na Obr. 2-31.



Obr. 2-31 Zařízení umožňující pohled do kontaktu ložiska [54].

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problémů

Přestože je v dnešní době většina valivých ložisek mazána plastickým mazivem, stále existují mezery v pochopení chování plastického maziva uvnitř ložiska. Porozumění problematice mazání je velmi komplexní problém, komplikovaný složitými reologickými vlastnostmi plastických maziv. Tyto vlastnosti mají za následek nevyzpytatelné až chaotické chování, které se obtížně predikuje. Porozumění je komplikováno geometrií valivých ložisek a pohybem jednotlivých komponent ložiska. V současné době jsou predikční modely pro výpočet trvanlivosti ložisek založené na únavě materiálů. Životnost ložisek jako takových je ale dána především životností plastického maziva [55]. Pokud už není mazivo dále schopné dostatečně zásobovat kontakt, dochází k rychlému nárustu opotřebení a tím i k selhání ložiska. Správně zásobený kontakt je podmíněn dostatečným množstvím maziva v bezprostřední blízkosti kolem něj. Při projetí valivého elementu v drážce kroužku ložiska dochází ke kontinuálnímu vytlačování maziva mimo dráhu valivých elementů. Mazivo musí být schopno se vrátit zpět do dráhy než projede následující valivý element. Současný experimentální výzkum mazání ložisek je založen na optických tribometrech konfigurace ball-on-disc. Tato konfigurace je vhodná především pro studium tenkých mazacích filmů v oblasti kontaktu. Pro studium distribuce maziva kolem kontaktu však už není vhodná, protože geometrie kontaktní dvojice této konfigurace se znatelně liší od geometrie skutečného valivého kuličkového ložiska. Geometrie vnějšího kroužku ložiska způsobí, že při otáčení odstředivá síla vytvoří indukovaný tok maziva směrem na dno drážky. U vnitřního kroužku má tok opačný směr, tedy ven z drážky. U tribometrů s konfigurací ball-on-disc způsobí odstředivá síla tok maziva směrem od středu skleněného disku. Rozdílné geometrické poměry také způsobí výrazně jiný tvar kontaktní oblasti. U tribometrů je kontaktní oblast kruhová, přitom v reálném ložisku je silně eliptická. Projetím valivého elementu širší kontaktní oblastí způsobí větší vytlačení maziva do strany, tedy delší čas k opětovnému zaplavení dráhy.

## 3.2 Analýza a zhodnocení poznatků z rešerše

První část rešerše je zaměřena na popis kuličkového ložiska a pohyb jednotlivých částí. Ložisko se skládá z vnějšího a vnitřního kroužku, valivých elementů a klece. Jeden z kroužků je statický, druhý kroužek s valivými elementy se vůči prvnímu pohybuje a umožňuje tak rotaci. Valivé elementy se pouze jen neodvalují, ale také se natáčejí kolem vlastní osy. Kromě valivého pohybu v ložisku dochází i k prokluzu, který vytváří značné tření. Bývá to prokluz valivých elementů vůči kroužku ložiska, nebo prokluz s použitou klecí. Dále bylo v rešerši rozebráno mazání ložisek plastickými mazivy, složení plastických maziv a chování maziva uvnitř ložiska. Složitost chování je způsobena složitou reologií maziva a geometrií ložiska. Pro oddělení povrchu je zapotřebí, aby mazivo bylo nepřetržitě dodáváno do kontaktu. Dodávání maziva je zprostředkováno relativním pohybem těles, působením povrchového napětí a u vhodné konfigurace působením odstředivých a gravitačních sil. K doplňování maziva přispívá i spin kulička a použitá klec. Spin způsobí lepší tečení maziva z bočního rezervoáru do kontaktu [25] a klec způsobí lepší distribuci maziva uvnitř ložiska [26].

V druhé části se rešerše soustředila na optické metody využívané v tribologii. Jednou z nejrozšířenějších optických metod pro vyhodnocování mazání v oblasti kontaktu je optická interferometrie. Metoda je silným nástrojem pro měření tloušťky přímo v kontaktní oblasti díky vysoké rozlišitelnosti, ale je limitována rozsahem měřitelných tloušťek. Pomocí interferometrie jsme schopni zjistit pouze mezeru mezi kontaktními tělesy, proto není možné měření mimo kontakt [33]. Distribuci maziva je vhodnější vyhodnocovat pomocí fluorescenční mikroskopie, pomocí které jsme schopni měřit velký rozsah tloušťek filmu. Metoda je schopna vyhodnocovat přímo množství maziva a ne pouze mezeru mezi povrchy jako v případě interferometrie. Při přidání obarveného maziva lze snadno demonstrovat tok kontaktem [32]. Tato metoda navíc nevyžaduje použití kovové vrstvy na disku, která se časem opotřebuje.

Poslední část rešerše se zabývá experimentálními zařízeními, která se používají pro studium mazání v ložisku. Jeden z prvních a dodnes nejpoužívanějších konceptů vyvinul Gohar [36]. Jedná se o konfiguraci ball-on disc, tedy kontakt je vytvořen mezi skleněným diskem a ocelovou kuličkou. Tato konfigurace umožňuje pohánět kuličku i disk zcela nezávisle a vytvářet tak různé úrovně prokluzu. Může být poháněn také jen disk a kulička je unášena trakční silou. Taková varianta vyžaduje uložení kuličky na ložiska, která umožní snadné otáčení. Nejběžnější varianta zatížení kontaktu je přes pákový mechanismus, který umožňuje polohováním zatížení snadno měnit velikost kontaktního tlaku. Další možností je použití hydraulického systému, jako u tribometrů od firmy PCS Instruments. Jiný způsob, jak vyvodit zatížení v kontaktu, je pomocí lineárního aktivátoru, nebo krokového motoru a pružiny. Během rešerše bylo nalezeno několik zařízení v konfiguraci ball-on-ring, které dokážou vytvořit podmínky bližší reálné situaci uvnitř ložiska. První bylo bez drážky v kroužku a sloužilo pro studium mazání kontaktů za vysokých rychlostí. Druhé zařízení

bylo stejné konfigurace, ale s drážkou, která umožňovala vytvoření věrohodnějších podmínek. Na zařízení byla provedena měření, která umožňují studium procesu doplňování maziva do kontaktu. Ústav konstruování nedisponuje podobným zařízením, proto je výzkum distribuce maziva v radiálním ložisku omezen pouze na použití tribometrů ball-on-dics.

### 3.3 Podstata a cíle diplomové práce

Hlavním cílem této práce je vyvinout zařízení, které vytvoří indukovaný tok maziva kolem kontaktu, jaký je v reálném valivém ložisku. Pro tento tok je zapotřebí, aby zařízení vytvořilo věrohodné podmínky vyskytující se v blízkosti kontaktu valivého ložiska. Tyto podmínky jsou především dány geometrií drážky kroužku ložiska a kuličky, relativním pohybem obou těles a patřičným zatížením vůči sobě. Dodržení těchto hlavních parametrů vytvoří kontaktní oblast totožnou s kontaktní oblastí ve skutečném kuličkovém ložisku a umožní tak experimentální studium chování maziva kolem vzniklého kontaktu. Studium povede k pochopení reologických vlastností plastických maziv a tak k lepší predikci životnosti ložiska.

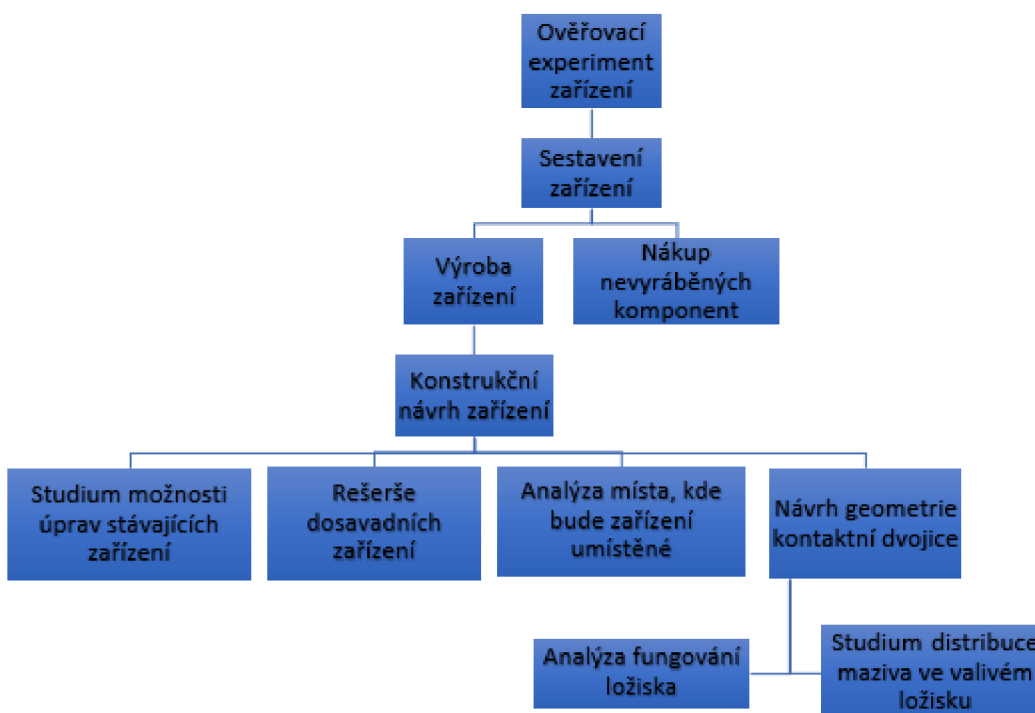
Mezi dílčí cíle práce patří:

- Volba konkrétní geometrie kontaktní dvojice a zajištění její výroby
- Koncepční návrh zařízení a studium možností úprav zařízení
- Konstrukční návrh testovací aparatury
- Výroba zařízení, úvodní experiment pro stanovení vlivu geometrie

## 4 KONCEPT ŘEŠENÍ

### 4.1 Postup řešení

K vytvoření zařízení a ověření jeho funkčnosti vedla celá řada kroků, téměř jdoucích po sobě, které jsou znázorněny na Obr. 4-1. První fáze řešení se zaměřovala na pochopení dějů uvnitř ložiska. Tato fáze byla nutná pro vytvoření návrhu kontaktní dvojice, která je jádrem vyvíjeného zařízení. Po návrhu byli hned kontaktováni možní dodavatelé, kteří by mohli kontaktní dvojici vyrobit. Důvod byl ten, že předpokládaná doba výroby skleněného prstence bude velice dlouhá. Od zhotovení výrobního výkresu až do doby dodání vyrobeného skleněného prstence uběhl téměř jeden rok. Dále byla provedena rešerše stávajících zařízení, určená k pochopení fungování konstrukčních uzlů optických tribometrů. Po provedení rešerše a analýzy místa, kde bude zařízení umístěné, byl proveden konstrukční návrh zařízení. Následně bylo zařízení vyrobeno a seskládáno dohromady. Na zhotoveném zařízení se provedl experiment na ověření jeho funkčnosti a posouzení vlivu geometrie na distribuci maziva v okolí kontaktu.



Obr. 4-1 Schéma postupu při řešení práce

Vstupními parametry pro tvorbu zařízení byly:

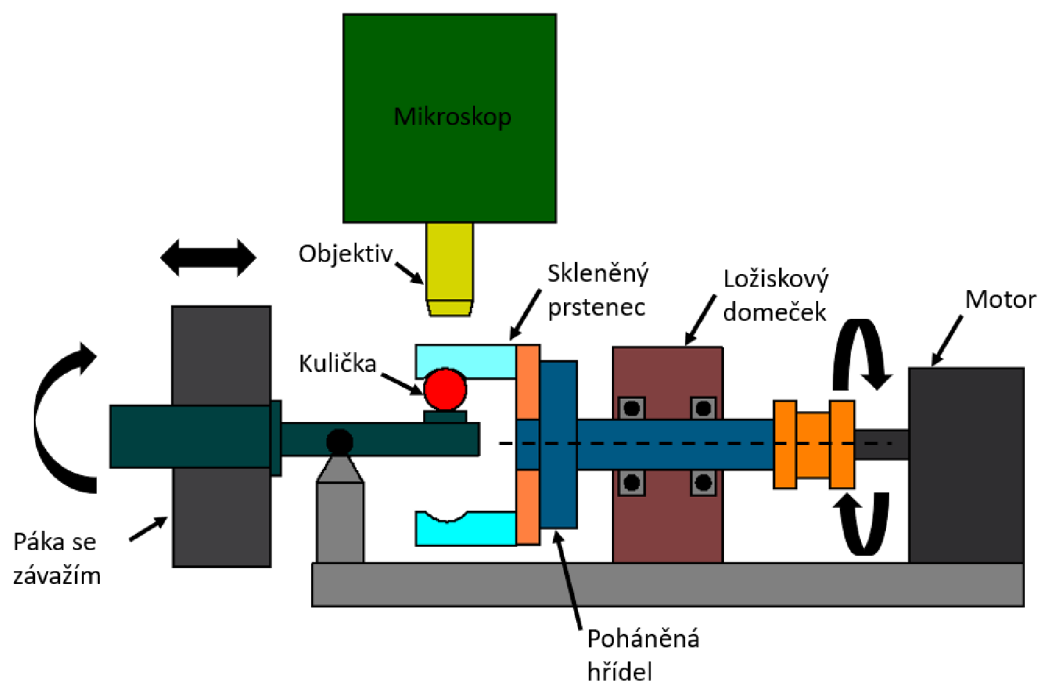
- Kontaktní tlak 0,5 GPa
- Rychlost v kontaktu 0-2 m/s
- Geometrie kontaktní dvojice odpovídající reálnému ložisku



## 4.2 Koncept zařízení

Vyvíjené zařízení má vytvořit indukovaný tok maziva kolem kontaktu, odpovídající toku v reálném valivém ložisku, proto je zapotřebí, aby byly dodrženy geometrické poměry reálného valivého ložiska. Koncept zařízení byl motivován reálnou situací, kdy se vytvoří kontakt mezi kroužkem ložiska s drážkou a kuličkou. Pro pozorování oblasti kolem kontaktu je zapotřebí, aby prsteneček byl z vhodného optického materiálu a kulička byla k němu přítičně přitlačována. Koncept zařízení je na Obr. 4-2. Je zde skleněný prsteneček upevněný na hřídeli, která je poháněna motorem. Kulička je pomocí pákového mechanismu přitlačována na dno drážky v prstenci. Kontakt je pozorován pomocí mikroskopu a data z pozorování budou následně zpracována v počítači.

Nabízí se použít jen jeden valivý element, nebo plný počet elementů. Druhá varianta má řadu nevýhod oproti první. První nevýhodou je problematické vytvoření vyššího kontaktního tlaku. Více valivých elementů způsobí lepší rozložení tlaku, tudíž by bylo zapotřebí použití většího zatížení, které ovšem vystavuje skleněný prsteneček většímu riziku poškození. Další nevýhodou je problematičtější pozorování kontaktu, kdy se valivé elementy neustále pohybují a pro pozorování kontaktu je zapotřebí použití vysokorychlostní kamery. U varianty s jedním elementem tyto problémy nenastávají. Valivý element je zapotřebí umístit tak, aby se mohl samovolně otáčet kolem vlastní osy trakční silou. Pokud by docházelo k výraznějšímu odporu při otáčení kuličky, způsobovalo by to prokluz v kontaktu a navyšovalo by se tak riziko poškození optiky hladkého povrchu drážky. V následující části práce bude používáno označení pro nové zařízení (Ring) a pro původní zařízení konfigurace ball-on-disc (Disc).

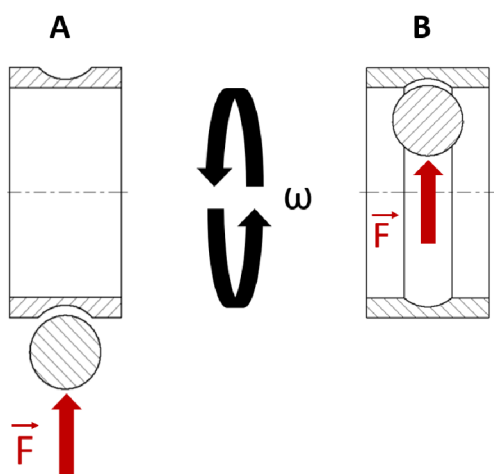


Obr. 4-2 Schéma zařízení



## 4.2.1 Volba konfigurace zařízení

Konfigurace kulička a prstenec umožňuje dvě konstrukční varianty. První je umístění kuličky zvenčí prstence, Obr. 4-3 varianta A, která simuluje kontakt s vnitřním kroužkem ložiska. Druhá varianta B, Obr. 4-3, je umístění kuličky zevnitř prstence, tedy situace vznikající na vnějším kroužku ložiska. Varianta B je z hlediska pozorování kontaktu lepší volbou, ovšem z hlediska výroby prstence je problematičtější. Varianta A znemožňuje přímo pozorovat kontakt, tudíž by bylo nutné zakřivit optickou cestu pomocí zrcadel. Z hlediska výroby je méně komplikované vyrobit prstenec s vnější drážkou. Rozdílná geometrie obou dvou variant má výrazný vliv na distribuci maziva. U varianty A, kde je drážka zvenku prstence, způsobí odstředivá síla tečení maziva směrem ven z kontaktu.

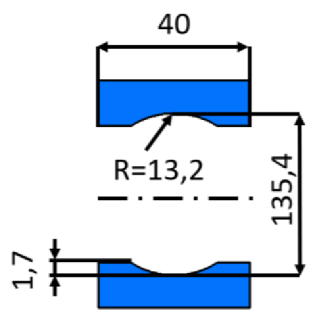


Obr. 4-3 Konfigurace zařízení

Při navyšujících se otáčkách prstence bude docházet k rychlejšímu hladovění kontaktu. U varianty B je ale situace opačná, s navyšujícími se otáčkami bude mazivo tlačeno odstředivou silou přímo do oblasti kontaktu. Výhodou prstence s vnitřní drážkou je možnost použití většího rozměru než u prstence s vnější drážkou, kde se valivý element umístí dovnitř prstence. Zvolená varianta B má hned několik možností volby poháněného prvku. Nabízí se pohánět jeden prvek z dvojice, nebo oba dva prvky. Pohon obou dvou prvků umožňuje nastavování různé úrovně prokluzu, ten je ale v případě studování vlivu geometrie zcela zbytečný. Pohon jednoho prvku umožňuje pohánět buď prstenec, nebo kuličku. Logičtější volbou je pohánět prstenec, protože kulička bude umístěná na páce, zato prstenec bude mít pevnou osu. Kromě toho má prstenec větší geometrii, než je kulička. Pokud by se poháněla kulička, musela by se pohánět vyššími otáčkami než prstenec. Průměr kuličky je přibližně 5x menší než průměr prstence, proto by motor musel pohánět kuličku s 5x většími otáčkami, nebo by se musela umístit za motor převodovka s převodovým poměrem 5.

### 4.3 Návrh geometrie kontaktní dvojice

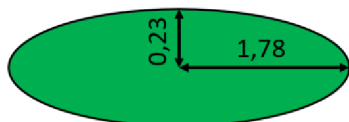
Inspirací při návrhu bylo reálné kuličkové ložisko 6314 s kuličkou o velikosti jednoho palce. Důvod použití tohoto ložiska je velikost kuliček a celková velikost ložiska. Protože je prostor pod mikroskopem značně omezen, je zapotřebí dbát na velikost zařízení, aby se vešlo do tohoto prostoru. Velikost kuličky byla zvolena podle velikosti kuliček v ostatních tribometrech, které používají převážně palcové kuličky. Protože se bude měření z vyvíjeného zařízení srovnávat s měřením na současně používaném tribometru (Disc), je vhodné mít stejný průměr valivého elementu.



Obr. 4-4 Geometrie prstence

Vybrána byla varianta s vnějším kroužkem ložiska, tudíž geometrie vyráběného prstence byla převzata z vnějšího kroužku ložiska 6314. Cad model ložiska má ovšem poloměr drážky stejně veliký jako poloměr kuličky, proto byl poloměr drážky dopočítán z průměru kuličky. Konformita dráhy pro chod kuličky v ložisku se pohybuje od 0,52 do 0,54 hodnoty průměru kuličky. Pro vytvoření co největšího rozdílu ve tvaru kontaktní oblasti mezi vyvíjeným zařízením a původním zařízením (Discs), byla zvolena spodní hodnota 0,52. Zvolená hodnota taktéž způsobí větší elipticitu kontaktní oblasti, která má taktéž vliv na distribuci maziva. Rádus drážky se tedy rovná 13,2 mm, přičemž průměr prstence v místě drážky je totožný s ložiskem na Obr. 4-4. Při zvolení hodnoty 0,54 by byl rádus drážky 13,7 mm. Hloubka drážky v reálném ložisku je 4,2 mm. Vyvíjené zařízení bude ale pracovat s nižším zatížením, tedy s nižším kontaktním tlakem, proto není zapotřebí dodržet původní hloubku. Hloubka drážky byla zvolena 1,7 mm. Toto zmenšení ulehčí zčásti výrobu prstence. Důležité je, aby kontaktní oblast byla v drážce a kolem byl přiměřený prostor pro distribuci plastického maziva. Podle Hertzovy teorie byla vypočítána kontaktní oblast pro kontaktní tlak 0,5 GPa. Takovému tlaku odpovídá zatížení 90 N při použití materiálu BK7

pro prstenc a ložiskovou ocel 100Cr6 pro kuličku. Délka hlavní poloosy byla 1,78 mm a vedlejší 0,23 mm, Obr. 4-5, přičemž délka drážky při hloubce 1,7 mm je 13 mm. Eliptičita Hertzovy oblasti je 7,74. Nejnižší bod drážky se nachází na průměru 135,4 a je umístěný 10 mm od čelní strany prstence. Celková výška prstence je 40 mm. Výška prstence je minimalizována na co nejmenší hodnotu, protože s narůstající výškou bude docházet k většímu zatížení v místě upevnění prstence. Výška ale musí být dostatečná, aby umožnila umístění valivého elementu, kterým je kulička o průměru jednoho palce.



Obr. 4-5 Hertzova oblast

### 4.3.1 Materiály vhodné pro kontaktní dvojici

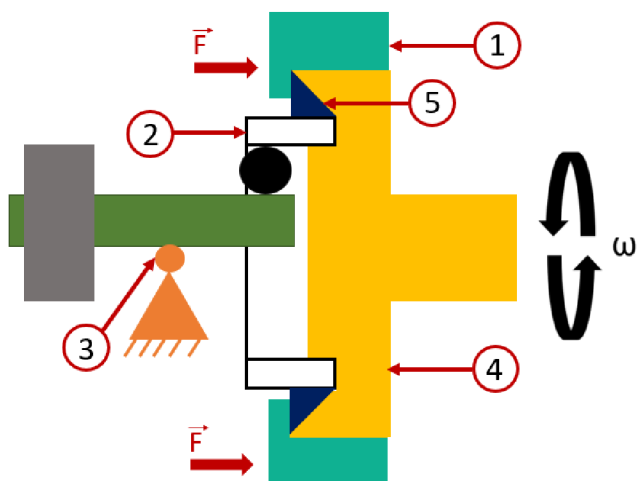
Materiály vhodné pro použití fluorescenční mikroskopie jsou borosilikátové sklo BK7 a syntetický safír ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ). Podmínkou použití materiálu je dobrá propustnost UV záření. Častěji používaným materiálem je BK7 sklo, protože má nižší pořizovací cenu než safír. Výhodou safíru je především jeho vyšší tvrdost. Dalším materiálem, který lze použít, je tavený syntetický křemen, který má ovšem pořizovací cenu ještě vyšší než safír. Nejlepší volbou pro zařízení je syntetický safír, který má kromě dobrých optických vlastností, i mechanické vlastnosti podobné ložiskové oceli. Pro nasimulování reálných podmínek je zapotřebí vytvořit patřičný kontaktní tlak (0,5 GPa). Drážka v prstenci způsobí zvětšení Hertzovy oblasti a tím snížení kontaktního tlaku. Vyšší Youngův modul safíru umožní použití menšího zatížení při zachování stejného kontaktního tlaku jako u materiálu BK7. Zásadní nevýhodou safíru je jeho anizotropní vlastnost, která komplikuje výrobu prstence s drážkou při zachování opticky hladkého povrchu, proto byla zvolena varianta s použitím BK7 skla. Pro kuličku je vhodné ponechat stejný materiál, který se používá ve skutečných ložiscích, tedy ložiskovou ocel 100Cr6. Zapotřebí je jen úprava povrchu kuličky pomocí lapování tak, aby její drsnost nebyla překážkou při měření. Dostačující drsnost kuličky je Ra 10 nm.

## 4.4 Způsob zatížení kontaktu

Z provedené rešerše vyplývá, že jedním z nejčastějších způsobů zatížení je pomocí pákového mechanismu. Nabízí se ještě použití pneumatického pístu, elektrického aktuátoru a pružiny. Jedním požadavkem pro konstrukci zařízení je umístění v laboratoři s fluorescenčním mikroskopem na UK. Prostor mezi mikroskopem a stolem je pouze 250 mm, přičemž nové zařízení bude umístěné na manipulačním stolíku, který je 41 mm vysoký. Tento prostor komplikuje zabudování pneumatiky, nebo lineárního aktuátoru, proto je vhodnější použití pákového mechanismu. Navíc použití pneumatického pístu přináší řadu negativ. Píst se obtížně řídí a má nerovnoměrný pohyb. Použití lineárního aktuátoru představuje zároveň dražší variantu než je použití páky a zahrnuje také použití pružiny, která vytvoří potřebnou sílu. Pružina sníží vlastní frekvenci celého přístroje a mohla by tak zapříčinit nefunkčnost přístroje v provozních otáčkách. Výhodou páky je její konstrukční jednoduchost, výšková nenáročnost a umožňuje snadné zatížení kuličky umístěné uvnitř prstence. Nabízí se dvě možnosti, jak zatížení prostřednictvím páky do zařízení implementovat. První je přitlačovat kuličku k prstenci nebo prstenec ke kuličce. Vzhledem k nárokům na přesnost uložení prstence je vhodnější přitlačovat kuličku k prstenci, protože pro uložení kuličky není zapotřebí tak vysoké přesnosti a z konstrukčního hlediska zjednodušuje celou konstrukci.

## 4.5 Uložení skleněného prstence

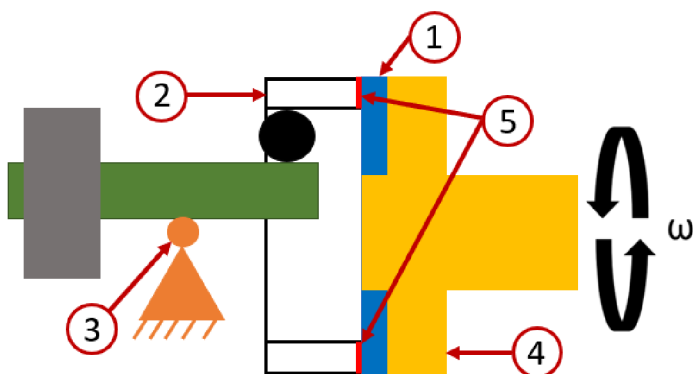
Uložení prstence musí minimalizovat obvodové házení a zároveň musí být velice šetrné. První možností upevnění prstence je na Obr. 4-6. Prstenec je vystředěn dosednutím na přesný průměr hřídele. Průměr hřídele by se musel vyrobit přesně podle prstence pro minimalizaci vůle, která by vedla k házení. Tato varianta vyžaduje výrobu nové hřídele pro každý další prstenec. Prstenec je přidržován pomocí třecí síly, kterou vytváří deformační člen (2), ten je pomocí přitlačného členu (1) přitlačován k hřídeli (5). Deformační člen by měl držet jak svůj tvar, tak rovnoměrně přitlačovat prstenec na hřídel. Jako možný materiál by šel použit teflonový kroužek, který by byl rozdělen. Toto upevnění prstence vyžaduje mírné zapuštění hřídele do prstence a omezuje tak prostor pro umístění valivého elementu do drážky. Upevňování prstence přímo na průměr hřídele nese s sebou větší riziko jeho poškození. Další nevýhodou této varianty je větší zástavbová výška, která by se měla co nejvíce minimalizovat, vzhledem k prostoru mezi stolem a mikroskopem. Další nevýhodou je absence možnosti polohování prstence, které by umožnilo kompenzování nepřesného uložení.



Obr. 4-6 Uložení prstence přes deformační člen (A)

(1) Přítlačný člen, (2) prsteneček, (3) páka, (4) hřídel, (5) deformační člen

Druhou možností (B) je upevnění prstence nalepením na podložku, Obr. 4-7. Prsteneček se dá nalepit na podložku už při výrobě, aby se zajistila sousost komponent mezi sebou. Prsteneček i s podložkou může být přišroubován na hřídel, aniž by došlo k jeho poškození. Problémem je umístění podložky na hřídel tak, aby vůči sobě naházely. Řešením je dosednutí podložky na hřídel přesným průměrem, tzn., že díra a část hřídele se udělají na míru vůči sobě. Tohle řešení sice vyřeší problém s nesousostí, ale vyžaduje při použití nového prstence vyrobit i novou hřídel. Výroba nové hřídele je ovšem ospravedlnitelná, protože cena prstence je mnohonásobně vyšší. Výhoda této varianty je utahování podložky k hřídeli a ne prstence. Tím, že se utahuje podložka a ne prsteneček, se výrazně snižuje riziko poškození prstence. Další výhodou této varianty je menší prostorová náročnost. Velkou výhodou varianty (B) je možnost naklápění desky s prstencečkem tím, že se mírně otláčí od hřídele pomocí šroubu. Otláčením jsme schopni mírně eliminovat nepřesné uložení, které by bylo z hlediska pozorování kontaktu nežádoucí.

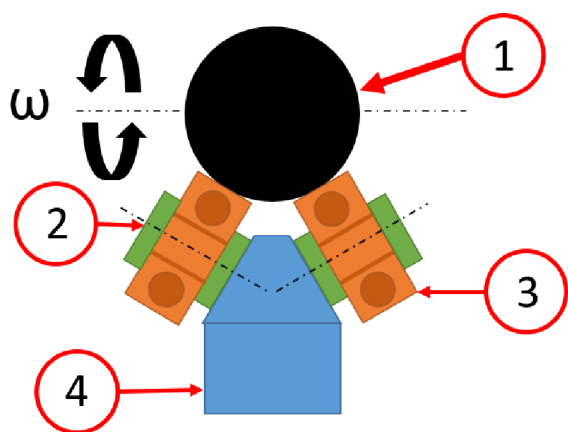


Obr. 4-7 Nalepení prstence na podložku (B)

(1) podložka, (2) prsteneček, (3) páka, (4) hřídel, (5) lepidlo

## 4.6 Uložení valivého elementu

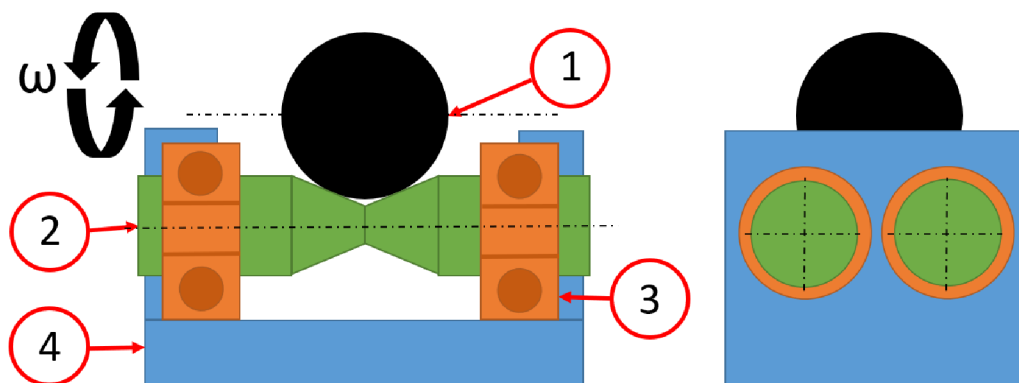
Pro uložení valivého elementu byly opět zvažovány dvě varianty. První možnost (A) je uložení kuličky přímo na ložiska, Obr. 4-8. Kuličková ložiska jsou zapotřebí, aby nedocházelo k výrazným ztrátám vlivem tření při odvalování kuličky. Pokud by zde nebyla ložiska, docházelo by k prokluzu kuličky v prstenci. Pro optimální podporu kuličky je dobré použít tři ložiska, protože opora ve třech bodech zabrání viklání kuličky. Ložiska (2) jsou upevněna k vozíčku (4) pomocí šroubů (2) tak, aby rovina uprostřed ložiska byla kolmá na osu a směřovala do středu kuličky.



Obr. 4-8 Uložení kuličky (A)

(1) kulička, (2) uchycení ložiska, (3) ložisko, (4) vozíček

Další možností uložení kuličky je použití rotačního prvku, který je uložený v ložiscích, Obr. 4-9. V tomto případě je kulička (1) položená na dvou hřídelkách (2), kde každá je usazena ve dvou ložiscích (3). Obě dvě hřídelky jsou uloženy i s ložisky do vozíčku (4). Do hřídelek je zapotřebí vytvořit zkosení, aby nedocházelo k dotyku v místě, kde ulpívá mazivo na kuličku, protože by docházelo k narušování dráhy. Výhodou varianty (B) od předchozí (A), je menší zástavbová výška, snadnější upevnění a lepší rozložení zatížení. Lepší rozložení je způsobeno použitím 4 ložisek místo 3 a menší zástavbová výška umožňuje použití větších ložisek při stejné výšce uložení. Dále uložení (B) dovoluje použití valivých elementů z různých průměrů při zachování vozíčku, kdy dojde pouze k úpravě stávajících hřídelek nebo výrobě nových.



Obr. 4-9 Uložení kuličky (B)

(1) kulička, (2) hřídelka, (3) ložisko, (4) voziček

## 4.7 Rám zařízení

Nabízí se použití jedné základové desky, ke které by byly hlavní prvky konstrukce připevněné, nebo použití hliníkových profilů. Požadavky na obě varianty jsou vysoká tuhost, nízká pořizovací cena, prostorová nenáročnost a snadná montáž rámu k manipulačnímu stolu pod fluorescenčním mikroskopem. Použití profilů má řadu výhod oproti základové desce. První výhodou je nižší cena oproti na míru vyrobené desce. Výhodou je snadné připevnění ostatních komponent k rámu, protože v profilech jsou vytvořené drážky pro matice. Drážky umožňují posun připevněných komponent, pokud by bylo potřeba. Profily se dají také zaměnit, proto může být v budoucnu celé zařízení snadněji upravované. Další výhodou je i nižší hmotnost při dodržení dostatečné tuhosti rámu zařízení.

## 4.8 Volba kamery a objektivu

Na Ústavu konstruování se pro fluorescenční mikroskopie používá kamera sCMOS [56], s označením Andor Neo. Rozlišení kamery je 2560x2160 pixelů. Pozorovací oblast při použití objektivu se zvětšením 10 x je přibližně čtverec o straně 1,4 mm a při zvětšení 5x je 2,8 mm. Velikost Hertzovy oblasti kontaktu je elipsa o delší poloose 1,78 mm, proto je pro pozorování okolí kontaktu vhodnější objektiv se zvětšením 5x, kdy se bude pozorovat půlka kontaktu. Lze usuzovat, že děje po bocích kontaktu budou totožné vlivem symetričnosti kontaktu.

## 4.9 Volba motoru

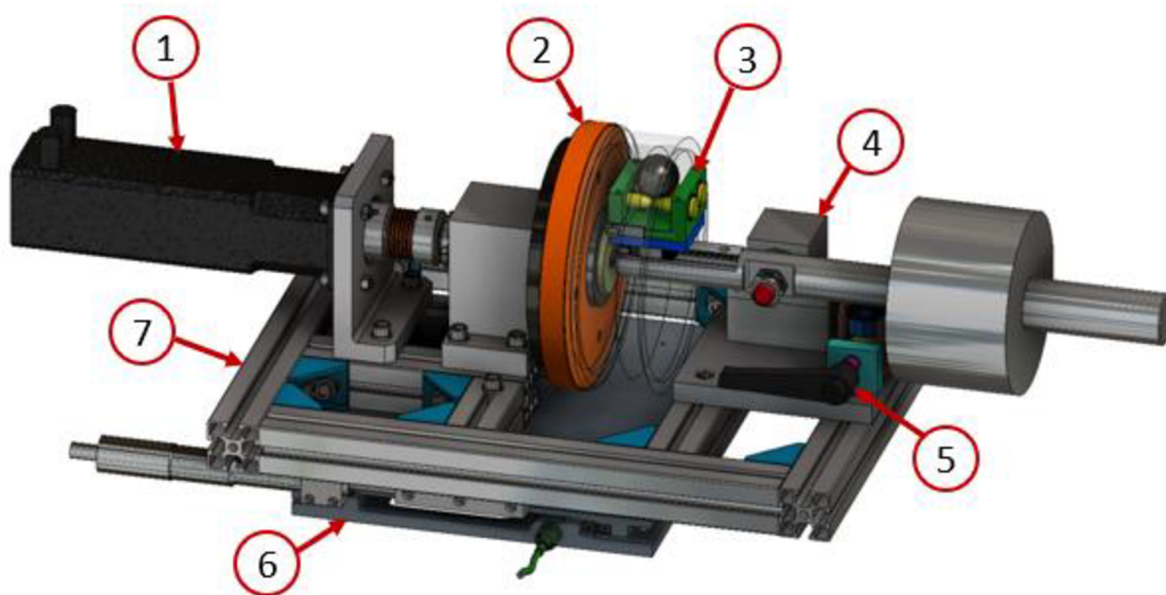
Zařízení bude vybaveno jen jedním motorem, který bude pohánět skleněný prstenec a kulička bude unášena prstencem trakční silou. Kulička je unášena na poloměru 67,7 mm a pro zvolený rozsah rychlostí (0,01 až 2 m/s) odpovídá horní hodnota 282 otáčkám za minutu. Jednou z možností je použít synchronní elektromotor od společnosti B&R se značením 8LVA22, který umožňuje použití do 3000 ot/min a má velice dobrou ovladatelnost i při nízkých otáčkách. Tento motor je k dispozici ve skladu UK.

Další možností je motor s označením M256-K. Jedná se o servomotor, který je také k dispozici na UK. Má mírně horší chod při nižších otáčkách, ale pro danou aplikaci je dostatečný. Jeho přední výhodou oproti 8LVA22 jsou nainstalované ovladače k tomuto motoru v laboratoři s fluorescenčním mikroskopem, proto byl zvolen druhý motor.



## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Konstrukce zařízení se skládá ze sedmi hlavních částí, Obr. 5-1. Nejpodstatnější je upevnění prstence, které umožňuje přenos momentu z motoru do něj. Nepřesné uložení prstence způsobí nemožnost pozorování kontaktu a tím pádem nefunkčnost celého zařízení. Proti prstenci je umístěný pákový mechanismus pro vyvození zatížení kontaktu. Na konci páky je umístěný voziček s kuličkou, která je přitlačována do drážky v prstenci. Vozíček je dále upevněn na lineárním vedení, které má kolejnici umístěnou na konci páky. Pro odtížení kontaktu je pod pákou umístěný excentr, který přes tenzometr páku nadzvedne. Všechny hlavní části jsou přišroubované k rámu z hliníkových profilů a ten je připevněn k manipulačnímu stolu. Celé zařízení je umístěné pod fluorescenčním mikroskopem.

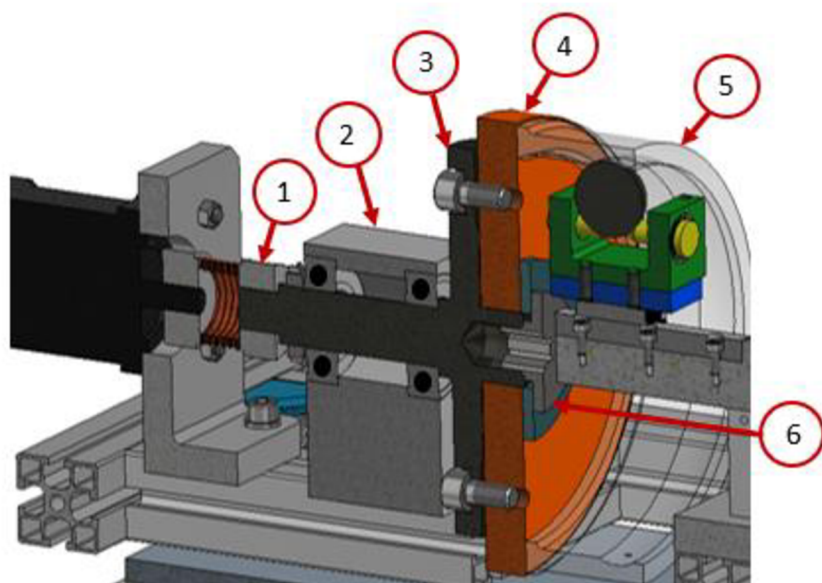


Obr. 5-1 Sestava zařízení

(1) motor zařízení, (2) upevnění prstence, (3) uložení kuličky, (4) pákový mechanismus, (5) excentr na odlehčení páky, (6) manipulační stůl, (7) nosný rám zařízení

## 5.1 Upevnění prstence

Pro správnou funkci zařízení je zcela zásadní, aby během otáčení prstence nedocházelo k výraznému házení, protože by docházelo k pohybu kontaktu pod mikroskopem a znemožnilo by se tak měření. Pro eliminaci jakéhokoliv pohybu prstence, kromě otáčení, je zapotřebí upevnit prsteneč přesně na hnanou hřídel, a přitom nesmí dojít během montáže k poškození prstence. Upevnění prstence je zprostředkováno pomocí podložky, Obr. 5-2 (4), na kterou je prsteneč přilepen epoxidovým lepidlem. Pevnost lepidla je 21 MPa. Vzhledem k malým zatížením, se kterými se bude zařízení používat, je pevnost dostatečná. V podložce jsou vytvořené 4 M8 díry na připevnění a jedna středová díra s průměrem 30 mm na dosednutí na hřídel. Podložka se přilepí na polotovaru před výrobou samotného prstence a upevní se přes vytvořené díry v desce. Obrábění takhle upevněného polotovaru nám zajistí dostatečnou souosost prstence a desky, která bude poté upevněna na hnanou hřídel (3). Podložku lze k hřídeli upevnit dvěma způsoby. První možností je využití děr se závitem v podložce, kdy se hřídel s podložkou k sobě přišroubují čtyřmi šrouby, druhou možností je připevnění ke středu hřídele jedním šroubem a podložkou (6).



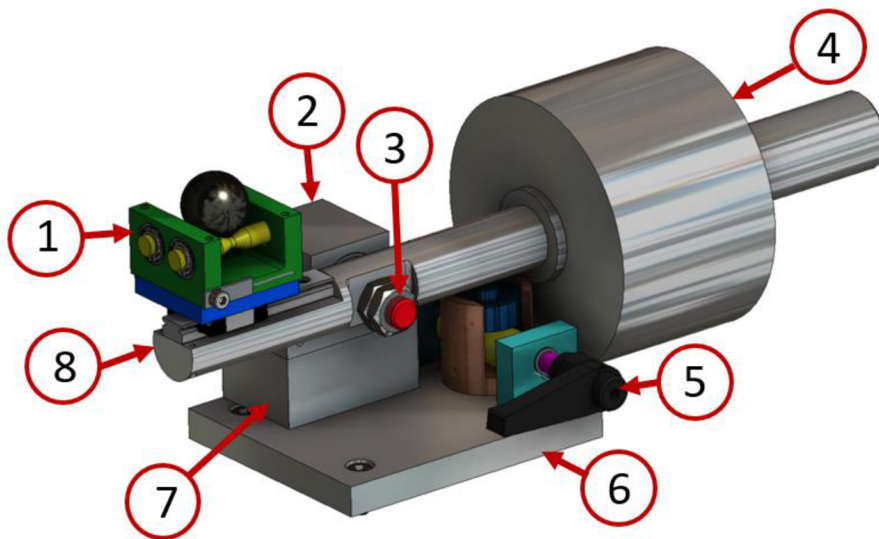
Obr. 5-2 Upevnění prstence

(1) hřídelová spojka, (2) ložiskový domeček, (3) hřídel, (4) podložka pod prsteneč, (5) skleněný prsteneč, (6) podložka pro upevnění

Hnaná hřídel je usazená v ložiskovém domečku, Obr. 5-2 (2) tak, aby byl prstenec upevněný co nejlíže, pro minimalizaci zatížení. Konec hřídele je přes hřídelovou spojku (1) připojený k motoru. Motor je připevněný na přírubě, která je přichycena k rámu. Zatížení kontaktu je přes komponenty upevňující prstenec převedeno do ložisek. Zatížení ložisek je větší než v kontaktu kvůli vzdálenosti uložení ložisek a místě použitého zatížení. Ložiska musí snést více jak dvakrát větší zatížení než je v kontaktu. Životnost ložisek vyšla 114 000 h a byla spočítána SKF kalkulačkou, viz. přílohy. Souosost mezi podložkou a prstencem je vyřešena způsobem výroby. Souosost mezi hřídelí a podložkou je vyřešena dosednutím na přesný průměr hřídele. Průměr hřídele, aby se přesně vešel do díry v podložce, se vyrobí s mírným přesahem a dolapuje se přesně na vyrobenou díru. Tím by se měl eliminovat vnik obvodového házení prstence. Pro eliminaci čelního házení jsou v hřídeli vytvořené další díry pro šrouby, kterými jsme po zašroubování šroubů schopni mírně podložku deformovat a vychýlit určitým způsobem, aby se tak případně vzniklé házení vyrovnalo.

## 5.2 Pákový mechanismus

Z provedené rešerše vyplynulo, že použití páky bude nejvhodnější variantou pro vyvození zatížení v kontaktu. Výhodou páky je její jednoduchost a s tím spojená i nízká cena. Pro minimalizaci ztrát vlivem tření, je hřídelka páky uložena v ložiscích, která jsou v ložiskovém domku, koupeném z Misumi, Obr. 5-3 (2). Střed páky (8) je přitážen v zúženém místě k osazení na hřídelce páky (3) dvěma maticemi M12. Ložiska jsou utažena k hřídelce pomocí MB matice a KM podložky z druhé strany. Průměr části páky, na které bude umístěné závaží (4), je vytvořené podle průměru závaží, která jsou k dispozici v laboratořích UK. Ložiskový domek je podložen hranolem (7) a ten je připevněný k desce (6). Páka je navržena tak, aby byla při přitlačování kuličky k prstenci ve vodorovné poloze. Mezi osazením pro závaží a středem otáčení páky je umístěný excentr (5) pro odlehčení páky. Pro vytvoření kontaktního tlaku 0,5 GPa je zapotřebí síla 90 N. Páka samotná bez závaží vyvozuje 14,7 N, pro zatížení 90 N je nutné přidat závaží 4,5 kg. Páka byla navržena tak, aby přidávané závaží bylo co nejlíže ke kuličce, na úkor většího přepákování. Závaží má totiž významný vliv na vlastní frekvence zařízení. Čím je závaží dál od zařízení, tím vlastní frekvence významně klesá.

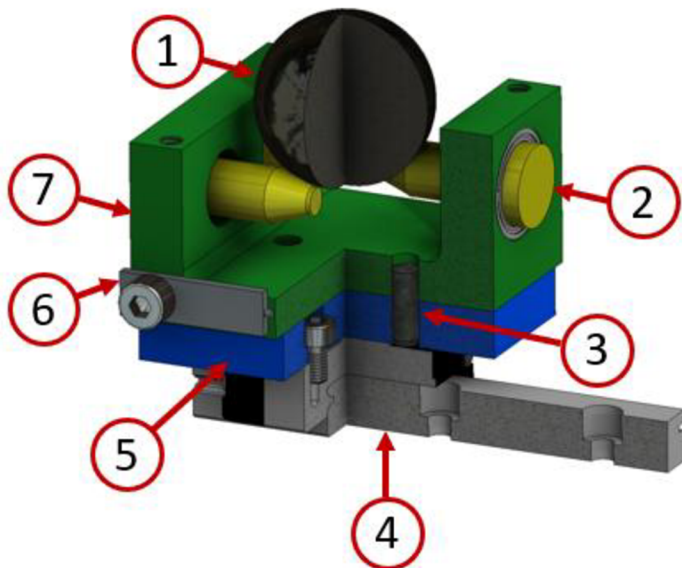


Obr. 5-3 Pákový mechanismus

(1) vozíček pro kuličku, (2) ložiskový domeček, (3) hřídelka pro páku, (4) závaží, (5) excentr, (6) deska pro upevnění, (7) hranol, (8) střed páky

### 5.2.1 Uložení kuličky

Zařízení je navrženo pro čisté valení v kontaktu, tudíž kulička, Obr. 5-4 (1), je unášena pouze trakční silou a není poháněna. Aby se kulička mohla odvalovat, je uložena na dvou hřídelkách (2), které jsou uloženy v ložiscích nalisovaných ve vozíčku (7). Hřídelky jsou zajištěny osazením z jedné strany, z druhé strany pojistným kroužkem. Na prostřední části hřídelky jsou vytvořena zkosení pod úhlem 20 stupňů proti sobě. Zkosení slouží k dosednutí kuličky ve dvou místech. Pokud by tam zkosení nebylo, kulička by se dotýkala hřídelky stejnou částí, jako se odvaluje po prstenci. Pokud by tomu tak bylo, ulpívalo by plastické mazivo na hřídelkách a rozrušovala by se dráha maziva na kuličce. Dosednutí kuličky je tak ve dvou místech vzdálených od sebe 8 mm. Zkosení hřídelky zužuje prostřední část hřídelky na průměr 4 mm. Vozíček s kuličkou je nasazený na mezipodložce (5), ve které jsou dva kolíky (3). Mezipodložka je déle upevněná na lineárním vedení (4), které je připevněné na páce. Použití vedení má dva hlavní důvody. Vozíček umístěný na páce se pohybuje po rádiusu. Pokud by byl vozíček upevněný napevno k páce, nedocházelo by s velikou pravděpodobností k přitlačování kuličky přímo na dno drážky v prstenci. Vedení umožní samovolné vystředění kuličky přesně na dno drážky, tedy nejvyšší místo drážky, kde jsou nejvhodnější podmínky pro pozorování oblasti kolem kontaktu. Dalším důvodem použití lineárního vedení je možnost vyjetí vozíčku mimo prsteneček a tak snadné vyndání vozíčku i s kuličkou.



Obr. 5-4 Vozíček pro kuličku

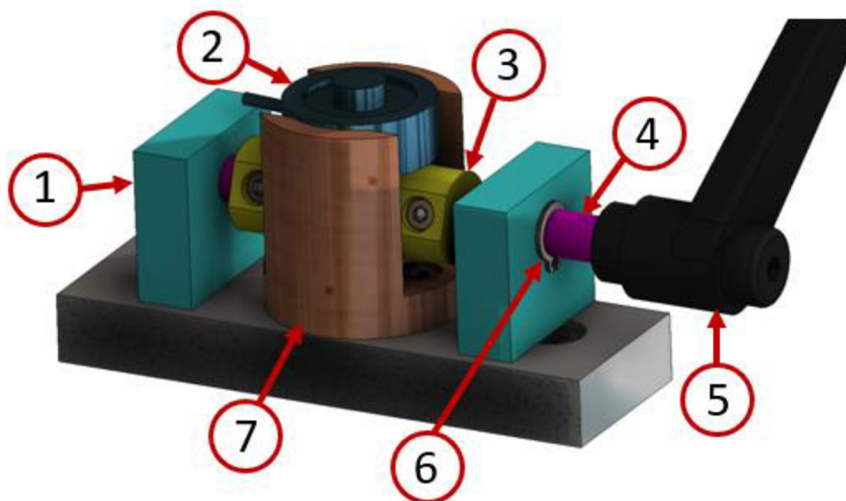
(1) kulička, (2) hřídelka pro kuličku, (3) kolík, (4) lineární vedení, (5) mezipodložka, (6) termočlánek, (7) vozíček

Jedná se o konstrukční uzel, ve kterém jsou kladeny nejvyšší nároky na životnost ložisek z celého zařízení. Z tohoto důvodu byl použit vozíček z jednoho kusu. Pokud by se vozíček skládal z více částí, pravděpodobně by vzniklo vyosení hřídelek. Vyosení by zbytečně zatěžovalo použitá ložiska a snížila jim tak jejich životnost. Pro výpočet životnosti ložisek byla použita SKF kalkulačka. Výsledná životnost se rovná 58 100 h, viz. přílohy.

### 5.2.2 Odtížení kontaktu

Pro odtížení kontaktu byla zvolena varianta s excentrem, Obr. 5-5 (3), na hřídelce (4). Excentr umožní pozvednutí páky o 4 mm, které stačí pro vyjetí vozíčku mimo prsteneček. Hřídel excentru je uložena ve dvou domečcích (1), připevněných k desce pod pákou. Hřídel i s excentrem je umístěna v bronzovém vedení (7). Na hřídelce pro excentr je namontována rukojeť zakoupená z Misumi (5). Polohu hřídelky zajišťují dva pojistné kroužky (6) a excentr je na hřídelce přichycen dvěma šrouby. Na excentru je položený snímač tlakové síly (2), přes který je páka nadzvedávána. Vedení usměrní pohyb snímače přímočaře nahoru nebo dolů. Místo snímače lze použít libovolné těleso, které bude velikostně odpovídat tenzometrickému snímači. Použití tlakového snímače je pro kalibraci zatížení, které páka vyvozuje v kontaktu.



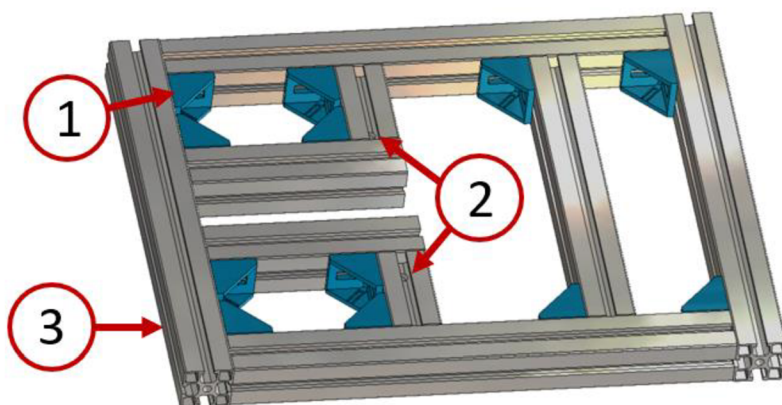


Obr. 5-5 Sestava excentru

(1) domeček excentru, (2) snímač tlakové síly, (3) excentr, (4) hřídel excentru, (5) rukojeť, (6) pojistný kroužek, (7) vedení tenzometru

### 5.3 Nosný rám zařízení

Hlavní části zařízení jsou připevněné k nosnému rámu, který je smontován z hliníkových profilů 30x30 mm, Obr. 5-6 (3). Jednotlivé profily jsou k sobě připevněny pomocí fixačních úhelníků (1) a šroubů M6. V profilech je drážka po každé straně, která umožňuje vsunutí matice, a tak je možné připevnění komponent k rámu. Rám i s komponentami bude připevněn na manipulační stůl pomocí dvou děr (2) v nejkratších profilech. Důvodem použití hliníkových profilů je jejich nižší cena oproti vyráběným komponentům. Další výhodou je jejich hmotnost a přitom relativně vysoká pevnost.

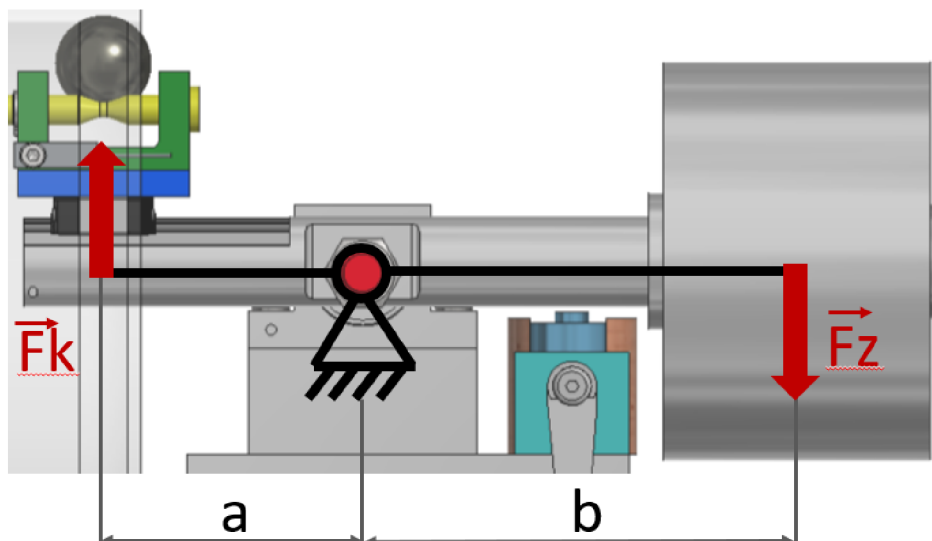


Obr. 5-6 Nosný rám zařízení

(1) fixační úhelník, (2) díry pro přišroubování ke stolu, (3) profil 30x30

## 5.4 Ověřovací výpočty

Pro vyvození zatížení v kontaktu je využito pákového mechanismu, kde střed otáčení páky tvoří hřídelka z nerezové oceli 17 240, umístěná v ložiskovém domečku, Obr. 5-7. V kapitole 4 bylo vypočítáno nutné zatížení pro vytvoření tlaku v kontaktu **0,5 GPa** s danou geometrií, a to se rovná  $F_k = 90 \text{ N}$ . Navržená páka samotná dokáže vytvořit zatížení v kontaktu **14,7 N** bez závaží. V následujícím výpočtu bude páka považována za bezhmotnou.



Obr. 5-7 Pevnostní výpočet páky

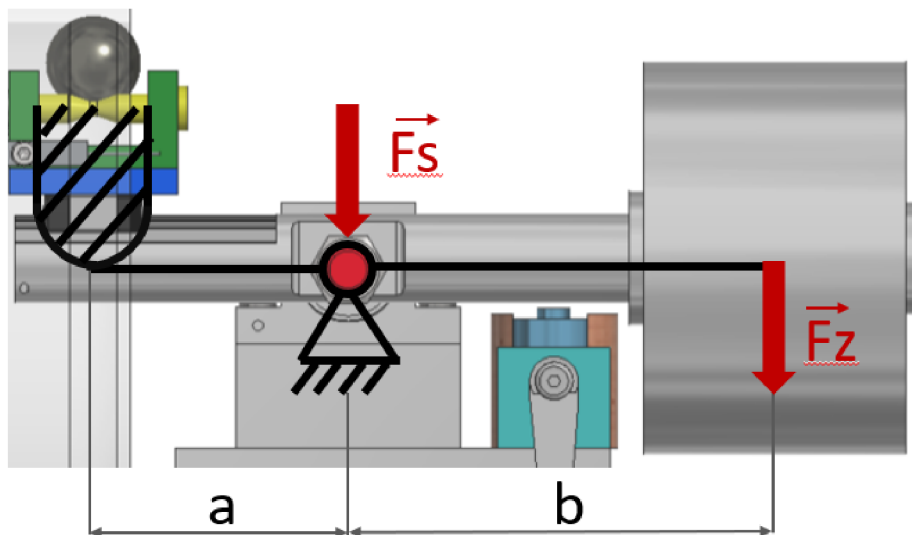
$$F_K * a = F_Z * b \quad (2)$$

$$F_Z = \frac{F_K * a}{b} = \frac{90 * 68}{114} = 54 \text{ N}$$

Síla vyvinutá závažím na páce se rovná 54 N. Od této hodnoty se odečte síla samotné páky tudíž váha výsledného závaží bude 4 kg. Při použití excentru pro odlehčení páky nedojde k výrazné změně zatížení mechanismu, protože je excentr umístěn ve vzdálenosti, která je téměř totožná se vzdáleností (a), tedy střed otáčení a umístění kuličky. Při přitlaku kuličky k prstenci požadovanou silou dochází k přenosu zatížení do středu páky, Obr. 5-8. Toto zatížení je ale výrazně větší než v kontaktu.

$$F_s * a = F_Z * (a + b) \quad (3)$$

$$F_s = \frac{F_Z * (a + b)}{a} = \frac{54 * (68 + 114)}{68} = 144,5 \text{ N}$$



Obr. 5-8 Zatížení středu páky

Tato hodnota bude sloužit pro pevnostní výpočet hřídele a životnosti ložisek v domečku. Hřídel páky byla pevnostně zkontrolována pomocí programu Autodesk Inventor Professional viz. Příloha 2. Okrajové podmínky byly vazba svorky omezující pohyb v radiálním směru na ploše, kde bude hřídel uložena v ložiscích. Dále pevná vazba na straně osazení omezující pohyb v axiálním směru. Na plochu, kde bude upevněna páka na hřídeli, je použito zatížení **150 N**. Tato hodnota je vyšší o váhu celého pákového mechanismu, než je výsledek předchozího výpočtu. Mez kluzu nerezové oceli lze uvažovat 180-220 MPa. Při analýze vyšla nevyšší hodnota v bližším rádiusu a byla necelých 35,7 MPa. Lze usuzovat, že daná hřídel je dostatečně předimenzována při použití v páce.

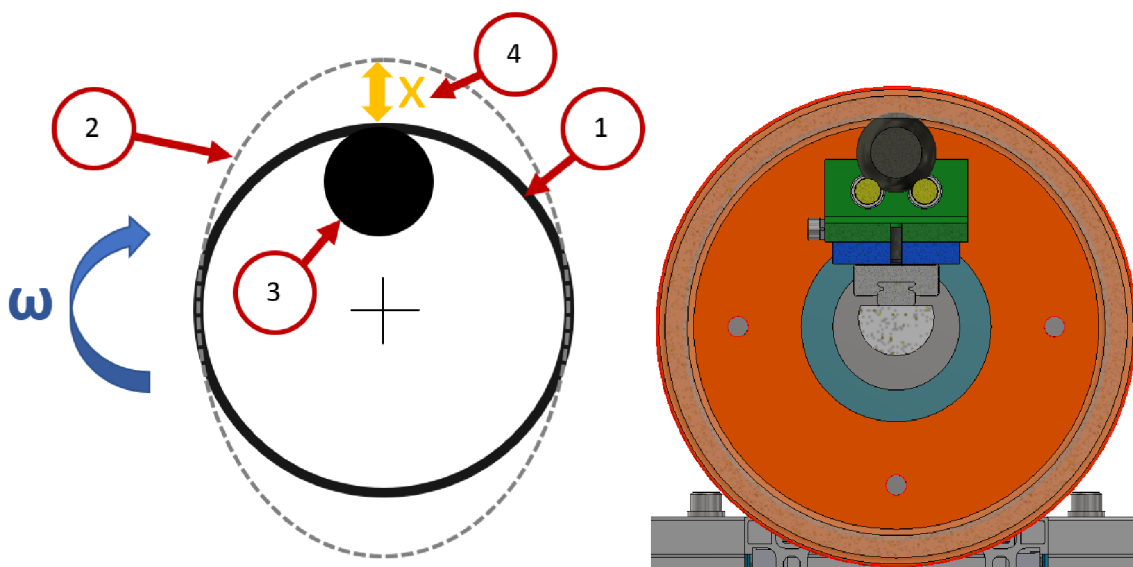
#### 5.4.1 Modální analýza zařízení

Pro měření na zařízení je zapotřebí, aby provozní otáčky zařízení byly mimo vlastní frekvence. Pokud by tomu tak nebylo, docházelo by k vibracím, které by znemožnily měření a způsobily by poškození skleněného prstence. Právě z tohoto důvodu byla provedena modální analýza zařízení, viz. Příloha 2. Okrajové podmínky byly „fixed support“ na dva profily z rámu, kterými bude celé zařízení přišroubované k manipulačnímu stolku. Ve skutečnosti se bude rám opírat o všechny profily, od prstence směrem dozadu k motoru, tedy reálné uložení způsobí nárůst vlastní frekvence. První vlastní frekvence zařízení je **87 Hz**. Maximální provozní otáčky prstence jsou 287 Ot/min, které odpovídají **4,7 Hz**. Maximální otáčky kuličky jsou vyšším, tedy 1530 Ot/min, které odpovídají **25 Hz**. Lze soudit, že první vlastní frekvence se pohybuje dostatečně daleko od provozní, tudíž by k vibracím nemělo docházet.



## 5.4.2 Ověření odskoku páky

Aby se dala vyhodnocovat oblast kolem kontaktu je zapotřebí, aby byla kulička neustále přitlačována k prstenci a nedocházelo tak k odlehčování. Odlehčování, nebo až rozpojení kontaktu, může být způsobeno vibracemi, proto byla provedena modální analýza popsaná v předchozí kapitole. Dále může být způsobena nepřesně vyrobeným prstencem, Obr. 5-9 (2). Pokud se bude prsteneц výrazně odchylovat od ideálního kulatého tvaru (1), bude docházet při jeho otáčení ke stlačování kuličky (3), nebo naopak k odlehčování (4).



Obr. 5-9 Ideální a nepřesný tvar prstence

- (1) ideální tvar prstence, (2) nepřesný tvar prstence, (3) kulička,  
 (4) posun kuličky vlivem nepřesnosti

Rozpojování kontaktu závisí jak na nepřesnosti prstence, která je dána výrobními možnostmi, tak i na setrvačnosti celé páky. Pokud bude setrvačnost páky schopna rychleji přitáčet kuličku, než že ji bude prsteneц odtáčet, tak k rozpojení nedojde. K ověření, jestli je páka schopná přitáčet kuličku i při maximálních provozních otáčkách, poslouží druhý Newtonův zákon pro rotační pohyb:

$$M = I_o * \varepsilon \quad (4)$$

M [N/m]	moment síly
$I_o$ [kg*m <sup>2</sup> ]	tenzor setrvačnosti
$\varepsilon$ [rad/s <sup>2</sup> ]	úhlové zrychlení

Pro určení momentu i tenzoru setrvačnosti byl použit program Autodesk Inventor Professional.

$$\varepsilon = \frac{M}{I_o} = \frac{7,82}{0,0334} = 234 \frac{rad}{s^2} = 13400 \text{ stupňů/s}$$

Když známe úhlové zrychlení páky, jsme schopni dopočítat, za jak dlouho se páka vrátí na stejné místo po drobném vychýlení. Tolerance drážky, ve které se bude kulička odvalovat je, předepsána na 0,01 mm. Jedná se o toleranci tvarů, kterou je výrobce prstence schopný dosáhnout při výrobě. Lze usuzovat, že při dodržení výrobní tolerance, bude kulička stlačena o tuhle hodnotu během čtvrt otáčky prstence. Jedná se o přísnější tvrzení, protože reálnější je, že situace, kdy kulička bude stlačena spíše při půl otáčce prstence. Vzdálenost od bodu kontaktu a středu páky je 67,7 mm. Pomocí goniometrické funkce tangens byl dopočítán úhle náklonu páky  $8,459 \cdot 10^{-3}$ . Pokud známe úhel a úhlové zrychlení, jsme schopni dopočítat časy, za jak dlouho je páka schopna překonat vzdálenost 0,01 mm.

$$\varphi = \frac{1}{2} * \varepsilon * t^2 \quad (5)$$

$$t = \sqrt{\frac{2 * \varphi}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{2 * 8,459 * 10^{-3}}{13400}} = 1,12 * 10^{-3} s$$

Tenhle čas je nutné porovnat s časem stlačení kuličky při maximálních otáčkách prstence. Maximální rychlost v kontaktu je 2 m/s a poloměr drážky v prstenci 67,7 mm.

$$v_0 = 2\pi * r * f$$

$$f = \frac{v_0}{2\pi * r} = \frac{2}{2\pi * 0,0677} = 4,7 Hz$$

Při frekvenci 4,7 Hz, čtvrt otáčky trvá 0,05 s. Tedy reálný čas stlačování koule je o jeden řád větší než čas, za který je páka schopná vzdálenost překonat, tedy by nemělo dojít k rozpojování kontaktu.

Stejný problém může nastat otáčením hřídelek pod kuličkou. Hřídelky se otáčí mnohem rychleji než prstencem, ale mají přísnější výrobní toleranci. Umístění hřídelek a zkosení na dosedacích plochách způsobí, že vlivem otáčení hřídelek nebude kulička zvedána o hodnotu předepsané tolerance na dosedacích plochách. Ve skutečnosti bude svislý posun koule menší, ale pro zjednodušení výpočtu bude tak ale uvažováno. Tolerance na dosedacích plochách je 0,006 mm, tedy svislý posun koule bude právě tato hodnota. Použitím goniometrické funkce tangens a uvažováním středu otáčení páky vzdáleného 67,7 mm vypočítáme hodnotu náklonu páky  $5,056 \cdot 10^{-3}$ . Čas, který páka potřebuje pro dorovnání této hodnoty náklonu vypočítáme obdobně, jak v předchozím případě s prstencem.

$$t = \sqrt{\frac{2 * \varphi}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{2 * 5,056 * 10^{-3}}{13400}} = 8,687 * 10^{-4} s$$

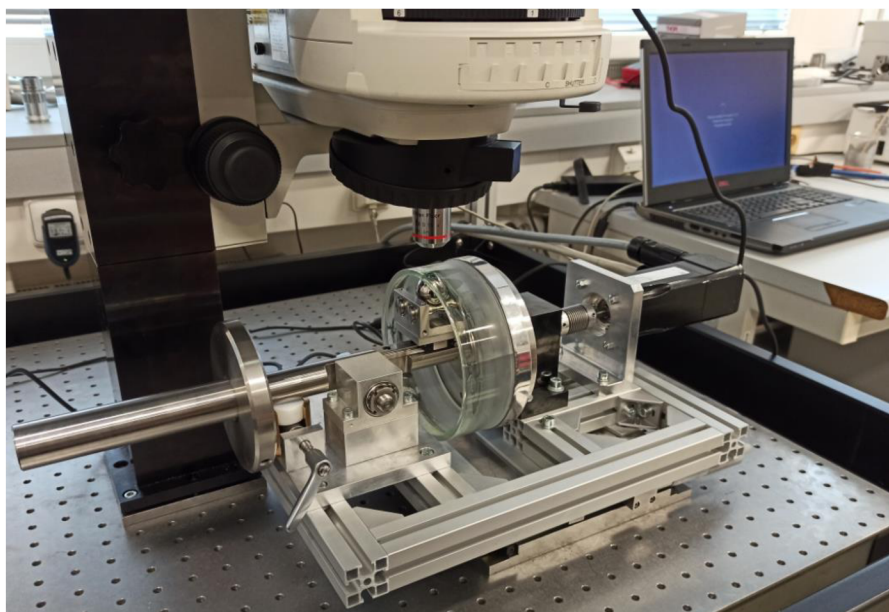
Frekvence otáček hřídelek je mnohem vyšší než prstence. Je to dáno jejich menším průměrem a je rovna 106 Hz. Při této frekvenci otáček nastane vychýlení o hodnotu tolerance během čtvrt otáčky  $2,36 \cdot 10^{-3}$  s. Tato hodnota je sice blíže k hraničnímu času než v případě s prstencem, ale jedná se o více než přísný výpočet.

### 5.4.3 Výpočet pevnosti hřídelky pro kuličku

Hřídelky pod kuličkou jsou v nejužším místě 4 mm široké. Bylo zapotřebí při návrhu zkontrolovat, zda navržené hřídelky vydrží provozní zatížení a nezdeformují se. Na jednu hřídelku byla aplikována síla 45 N, tedy polovina zatížení. Okrajové podmínky byly vazba „svorky“ použité na plochy, kde bude hřídelka usazená v ložiscích zabraňující radiální pohyb. Dále pevná vazba na osazení zabraňující axiální pohyb. V nejkritičtějších místech (zúžení, rádiusy) bylo nastavené zjemnění sítě. Síly byly aplikovány na zkosení, kde bude dosednutá kulička. Materiál použitý pro hřídelku je nerezová ocel 17 240. Pevnostní výpočet ukazuje, že použité zatížení není nebezpečné, viz. Příloha 2. Maximální napětí je 34 MPa. Při srovnání meze kluzu oceli 17 240, která je 180-220 MPa, lze usuzovat, že je návrh hřídelky bezpečný. Deformace hřídelky ve směru působené síly je minimální a činí 0,0018 mm.

## 5.5 Sestavení zařízení a zkouška funkčnosti

Montáž zařízení probíhala v prostorách laboratoří Ústavu konstruování v několika etapách. Nejprve byl smontován samotný rám z Bosch profilů, u kterého se nevyskytly žádné problémy. Následně byla na hřídele nalisována ložiska a po dodání skleněného prstence proběhlo jeho nalisování na hnanou hřídel. Hřídel byla mírně zchlazena a prstencem s hliníkovou podložkou byl mírně zahřát. Výrobce skleněného prstence tvrdil, že je možné jej zahřát do 300 stupňů, pokud by bylo zapotřebí odlepit prstencem od hliníkové podložky. Po zahřátí však došlo k vytvoření praskliny napříč celým prstencem. K vytvoření praskliny přispěly koncentrátoři napětí, které zůstaly po obrábění a také jiná tepelná roztažnost hliníkové podložky a prstence. Prstencem po zatížení nadále držel původní tvar, proto bylo rozhodnuto pokračovat i přes vzniklou prasklinu. Následně byl smontován pákový mechanismus a vozíček pro kuličku. Jako poslední byl dodělán excentr pod pákový mechanismus, kde byl tlakový snímač nahrazen teflonovým válečkem se stejnými rozměry. Smontované zařízení je umístěné pod fluorescenčním mikroskopem a nachystané pro ověření jeho funkčnosti, viz Obr. 5-10.

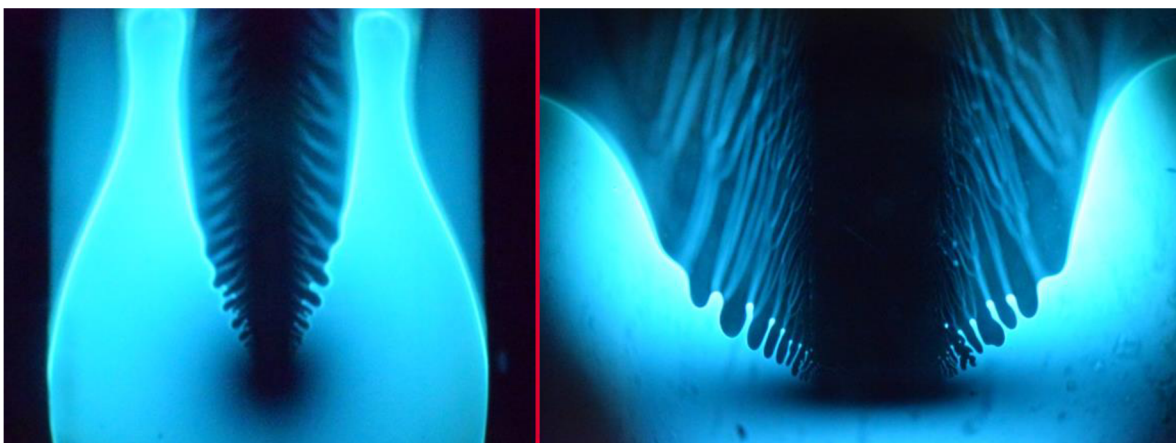


Obr. 5-10 Zkompletované zařízení pod mikroskopem.

Při spuštění motoru se však objevil problém v jeho řízení při nízkých otáčkách, kdy došlo k rezonanci hřídelové spojky. Zvolený servomotor upravuje vstupní parametry pro řízení, vzhledem k reálné výstupní rychlosti hřídele tak, aby reálná rychlost odpovídala co možná nejlépe zadané hodnotě. Právě zpětná vazba motoru způsobovala rozvibrování spojky a motor tak nebyl schopen získat relevantní zpětnou vazbu pro úpravu parametrů, tudíž nebyl schopen chodu. Řešením bylo použití výrazně tužší hřídelové spojky, nebo připojit před motor převodovku redukcující otáčky. Zvolena byla druhá možnost, tedy použití převodovky z toho důvodu, že Ústav konstruování disponuje řadou převodovek pasujících na zvolený motor. Pro použití převodovky bylo nutné pouze vyrobit přírubu s vhodnými připojovacími rozměry. Druhá varianta, tedy spojka s výrazně vyšší torzní tuhostí, by byla mnohem nákladnější než nová příruba, proto nebyla vybrána.

Po vyrobení nové příruby byla převodovka připojena před motor a přichycená k rámu zařízení. Při spuštění motoru se problém s hřídelovou spojkou už neobjevil. Pro testování a následné experimenty nebylo využito plánované zatížení, tedy 90 N v kontaktu, z důvodu vzniklé praskliny. Plné zatížení by mohlo způsobit zničení prstence a nemožnost provedení experimentů. Pro testování bylo použito menší zatížení, u kterého byla šance poškození výrazně menší. Po nanesení maziva bylo provedeno spuštění zařízení. Při velice pomalých rychlostech docházelo k malému pohybu kuličky s vozíčkem, přičemž při rychlosti nad 0,02 m/s pohyb téměř zanikl a kulička se ustálila na jednom místě.

Před samotným měřením byly provedeny snímky oblasti kolem kontaktu, ukazující vliv geometrie na distribuci maziva Obr. 5-11. Ve spodní části obrázku je vstup maziva do kontaktu a v horní části je výstup. Vlevo (Disc) je Hertzova oblast kruhová a vytváří užší dráhu po projetí (kavitační oblast), tím je i rozestup postranních pásů menší a postranní pásy mají podélnější tvar. Při srovnání se zařízením (Ring) vpravo, kde je Hertzova oblast silně eliptická a vytváří širší stopu po projetí. Postranní pásy jsou mnohem dále od sebe a mají širší tvar. Vzhledem k použití geometrie reálného ložiska, lze považovat takovou distribuci maziva za distribuci ve skutečném ložisku.



Obr. 5-11 Srovnání distribuce maziva kolem kontaktu (vlevo Ball-on-disc, napravo Ball-on-ring)

Na sestaveném zařízení bylo provedeno měření tloušťky filmu v kontaktu za zvyšující se rychlosti. Pro vyhodnocení tloušťky maziva v kontaktu byla použita fluorescenční mikroskopie. Srovnávací experiment byl proveden na původním tribometru (Disc) s palcovou kuličkou. Při obou měřeních bylo použito totožné mazivo a stejné provozní podmínky. Porovnáním výsledků z experimentů byl vyhodnocen vliv odstředivých sil na chování maziva. Výsledky jsou podrobněji rozebrány v podkapitole 5.6.

### 5.5.1 Optická fluorescence

Zvolenou metodou pro vyhodnocování tloušťky maziva kolem kontaktu je fluorescenční mikroskopie. Princip této metody spočívá v ozařování maziva světlem o určité vlnové délce. Mazivo vlivem záření začne samo emitovat světlo o vyšší vlnové délce. Fluorescence byla popsána ve třech krocích[57]:

- a) První fáze je excitace, kdy fluorofor pohlcuje záření od zdroje (laser, rtuťová lampa)
- b) Druhá fáze je excitovaný stav, kdy dochází k disipaci energie a zároveň k vyzařování fluorescence
- c) Třetí fáze je fluorescenční emisivita, kdy je vyzařováno záření o delší vlnové délce a nižší energii, kvůli předchozí disipaci energie

Tato metoda, oproti interferometrii, neporovnává fázový posun světla (mezeru mezi povrchy), nýbrž dává informaci o množství maziva v kontaktu prostřednictvím intenzity vyzařovaného světla. Intenzita světla je přímo úměrná tloušťce maziva[58]. Metoda dává informace o celém kontaktu a umožňuje vyhodnocovat větší rozsah tlouštěk. Kalibrace metody spočívá v přiřazení intenzity emitovaného světla k dané tloušťce maziva. Jednou možností je teoretický výpočet tloušťky filmu od středu kontaktu.

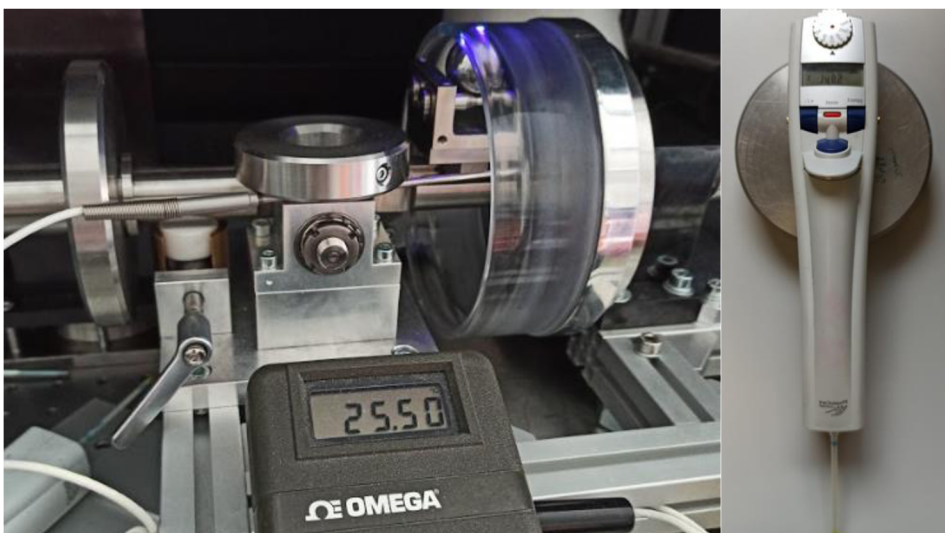
## 5.5.2 Popis experimentu

K vytvoření měření byl použit minerální olej R834/80. Jedná se o základový olej bez aditiv s viskozitou  $0,24 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  při  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  schopný autofluorescence. V základovém oleji bylo rozmícháno fluorescenční barvivo Coumarin 6, pro navýšení intenzity fluorescenčního záření. Coumarin 6 má excitační maximum na vlnové délce  $420 \text{ nm}$  a přitom emituje záření s maximem  $500 \text{ nm}$  [59]. Jedná se o fluorescenční barvivo, které má velice výrazný poměr mezi přijatým a vyzářeným světlem. Pro experiment bylo nutné si stanovit vstupní podmínky, které budou dodrženy pro měření na obou dvou zařízeních:

- Teplota
- Množství maziva
- Kontaktní tlak

Kontaktní tlak byl doložen podle velikosti Hertzovy oblasti kruhového kontaktu na zařízení ball-on-disc a následně použit pro určení zatížení nového zařízení. Pro měření teploty byl použit odporový teploměr, kde bylo čidlo umístěné v blízkosti kontaktu. Samotné měření spočívalo v provedení série několika desítek snímků v rozmezí zvolené rychlosti kamerou Andor Neo 5.5. Každý snímek je uložen ve formátu .asc, kde je obraz zapsán maticí. Následné snímky byly zpracovány v programu MatLab. Jednotlivé hodnoty v matici vyjadřují intenzitu fluorescenčního záření. Hladina intenzity proporcčně odpovídá tloušťce maziva a pro přesné vyjádření tloušťky je potřeba přiřadit k intenzitě známou tloušťku maziva. Propojení reálné tloušťky a intenzity nebylo provedeno, protože k vyjádření průběhu tloušťky v kontaktu v závislosti na rychlosti stačí použít intenzitu. Z každého snímku byla vybrána hodnota intenzity záření z prostřední části kontaktní oblasti. Před každým měření byla kontaktní oblast posunuta na střed pozorovací oblasti, aby se zajistilo stejné nasvícení. Přesné dávkování maziva bylo provedeno mikropipetou Obr. 5-12. Pro nové zařízení (Ring) bylo zvoleno vyzkoušet 4 různé množství maziva a to  $20, 30, 40, 50 \mu\text{l}$ . Dávkování maziva proběhlo při nízké rychlosti a aplikovalo se na dno drážky tak, aby bylo rovnoměrně rozneseno po celé dráze. Pro každé množství maziva byla provedena série 6 měření. Měření probíhalo ve dvou dnech, kdy po každém měření bylo zařízení očištěno a mazivo znovu nadávkováno.

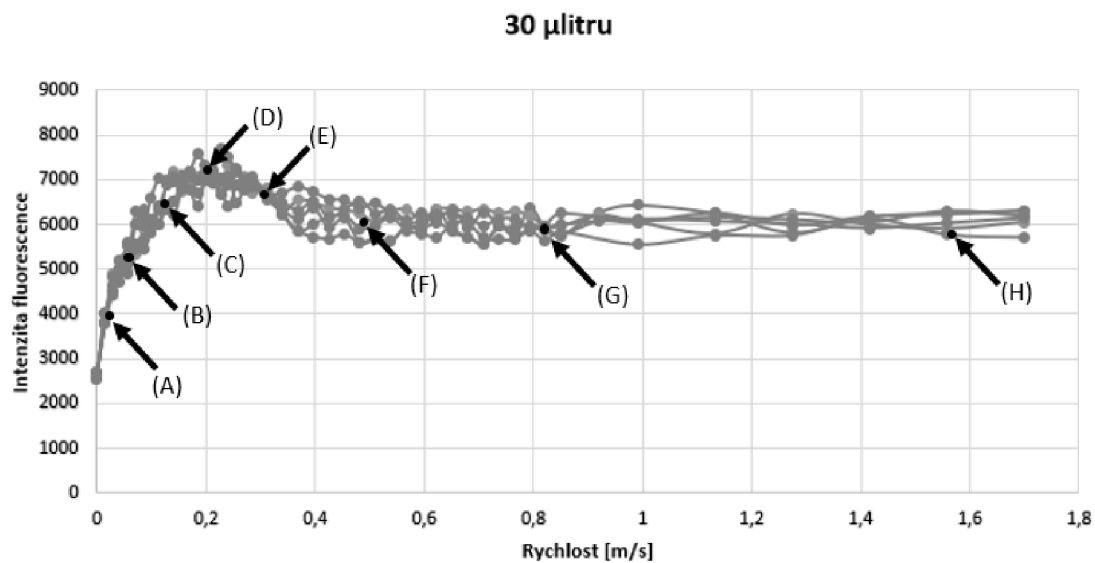




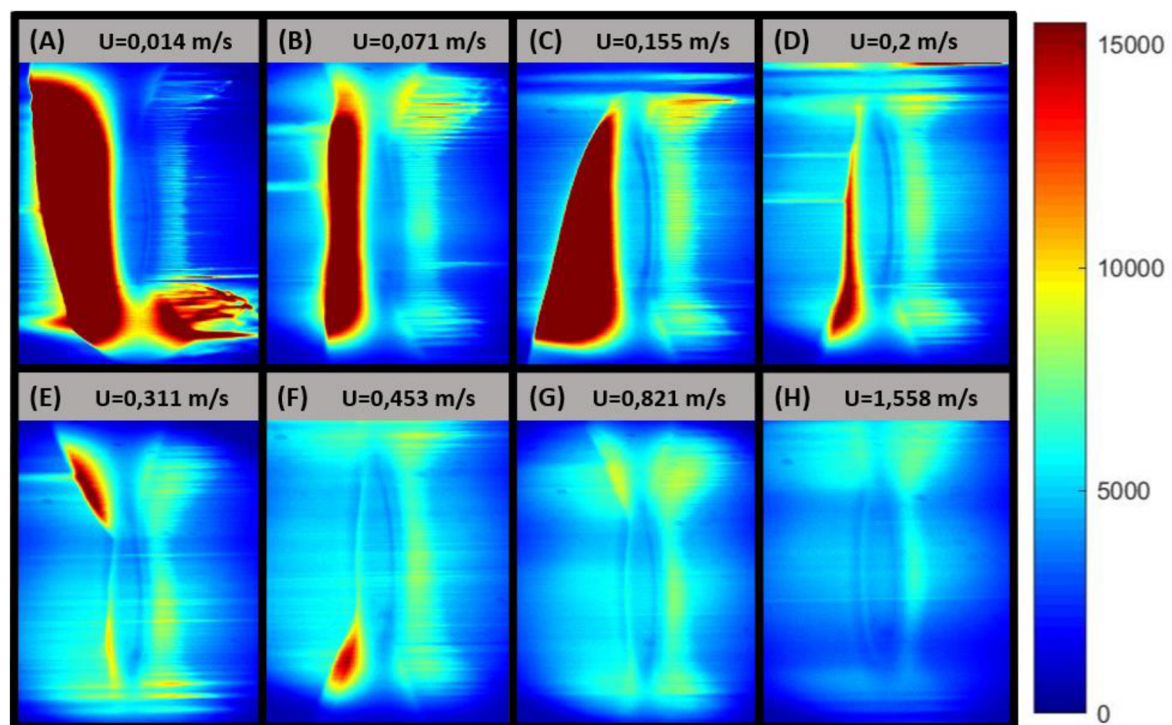
Obr. 5-12 Úvodní experiment a mikropipeta

## 5.6 Provedení experimentů

Nejprve bylo provedeno měření na zařízení (Ring) pro určení vhodného množství maziva. V prvním měření bylo použito množství 30  $\mu\text{l}$  maziva. Výsledky z měření jsou na Obr. 5-13., kde vodorovná osa vyjadřuje rychlost během měření a svislá osa intenzitu fluorescenčního záření maziva v kontaktní oblasti. Rozmezí zvolené rychlosti bylo 0-1,7 m/s při zatížení 40 N vytvářející maximální kontaktní tlak 0,4 GPa. Měření proběhlo šestkrát, při teplotě okolo 25,5 °C. Během počáteční fáze byla vyšší četnost snímků a s postupem měření byla snižována. Lze vidět, že v úvodní části měření došlo k rychlému nárůstu tloušťky maziva v kontaktu, které kulminovalo okolo rychlosti 0,2 m/s. Následuje mírný pokles v rozmezí 0,2 - 0,4 m/s a následné setrvávání na konstantní hodnotě. Naměřená data mají pozorovatelný rozptyl, i tak lze snadno pozorovat jednotlivé trendy. Rozptyl je s největší pravděpodobností způsoben chaotickým chováním maziva, především v oblasti, kde se křivka mění ze stoupajícího na klesající trend. V této oblasti nastává situace, že se proměnlivě střídají okamžiky s dostatečným a nedostatečným množstvím maziva před kontaktem. Průběh tloušťky v kontaktu je patrný ze snímků na Obr. 5-14. Snímky (A-C) jsou ve stoupající části grafu. Lze vidět vrstvu maziva před kontaktem, která se podílí na mazání. Při navyšování rychlosti dochází pomocí hydrodynamických sil k většímu vtahování maziva do kontaktu, a tak i k navyšování tloušťky. Okolo rychlosti 2 m/s přestává tloušťka filmu stoupat a maziva před kontaktem výrazně ubývá (D). Na dalších snímcích (E-F) dochází k poklesu tloušťky, které je patrné z nedostatku maziva před kontaktem. Snímky (G-H) jsou téměř identické, přestože je rozdíl v rychlosti velmi výrazný. Před kontaktem se už nenachází téměř žádné mazivo, i tak tloušťka v kontaktu dále neklesá. Vzhledem k ustálení tloušťky v kontaktu nebyla použita vyšší rychlost, která by mohla způsobit rychlejší poškození zařízení.



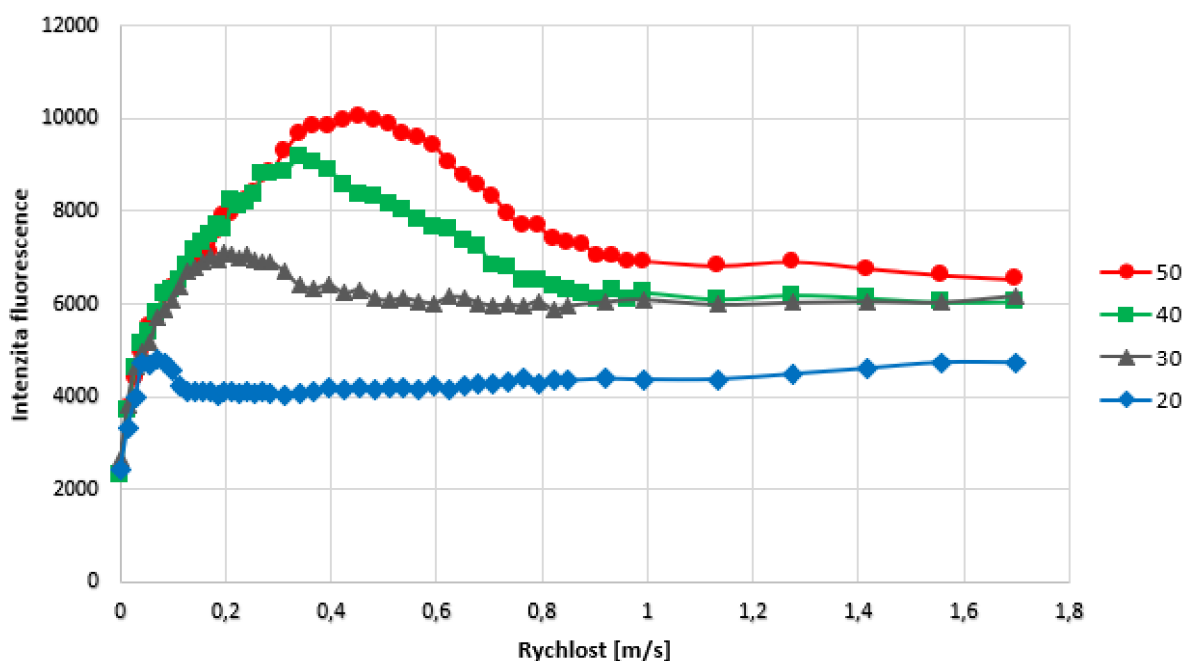
Obr. 5-13 Výstup z úvodního měření, (x-osa odpovídá rychlosti, y-osa odpovídá intenzitě fluorescence)



Obr. 5-14 Vývoj maziva kolem kontaktu

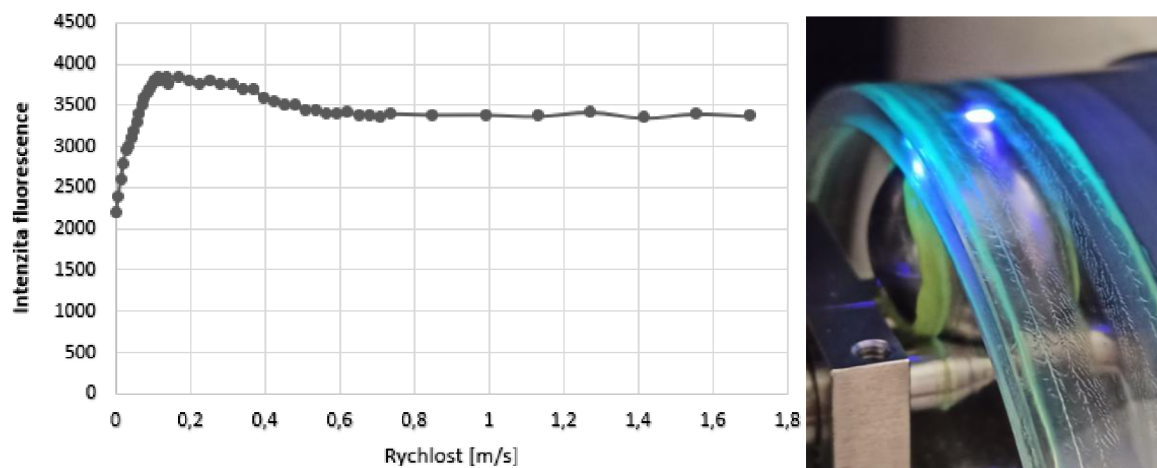


Dále byla provedena další měření s 20; 40 a 50  $\mu\text{l}$  maziva. S každým množstvím bylo provedeno 6 měření. Cílem bylo stanovit vliv množství maziva na průběh tloušťky v kontaktu. Z každého měření byl vypočten aritmetický průměr a vyneseno do grafu, viz. Obr. 5-15. Největší rozdíl od ostatních měření ukazuje 20  $\mu\text{l}$ . Při tomto množství byl nárůst tloušťky v kontaktu výrazně nejmenší a také došlo k velice rychlému poklesu. Došlo téměř k okamžitému ústupu maziva před kontaktem, tedy jediným mechanismem doplňování maziva do kontaktu byly odstředivé síly. Od rychlosti 0,2 m/s do měřené rychlosti 1,7 m/s lze vidět i viditelný a lineární nárůst tloušťky. Další množství (40 a 50) jsou podobné jako dávka 30  $\mu\text{l}$  s tím, že při použití většího množství maziva je větší i maximální hodnota. U 50  $\mu\text{l}$  maziva lze pozorovat mírný pokles v rozmezí rychlosti (1 – 1,7 m/s) oproti 30 a 40  $\mu\text{l}$ , u kterých byla tloušťka stále konstantní a pohybovala se okolo intenzity 6000 hladin. Z průběhu tloušťky lze usuzovat, že odstředivý účinek sil způsobí vytvoření určité tloušťky v kontaktu, která se s narůstající rychlostí nemění.



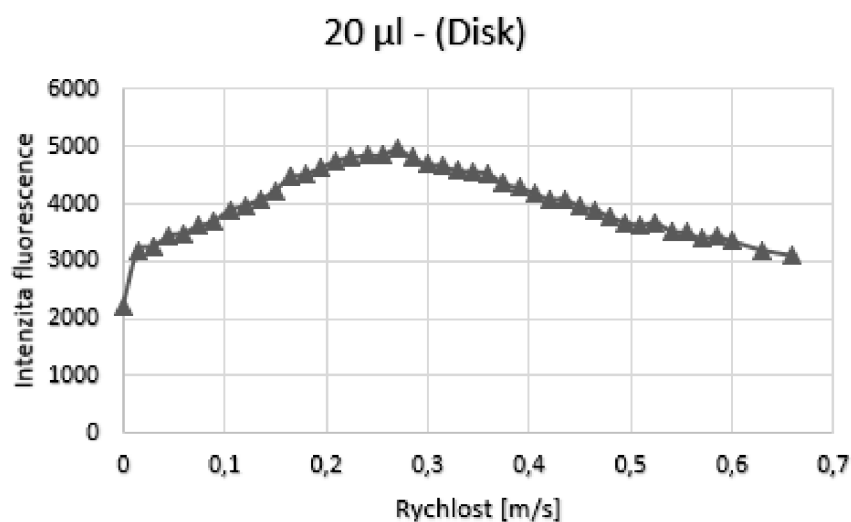
Obr. 5-15 Vliv množství nadávkovaného maziva

Na zařízení bylo také provedeno obdobné měření s plastickým mazivem LV 2-3. V mazivu bylo rozmícháno stejné fluorescenční barvivo Coumarin 6. Mazivo bylo nanášeno do drážky po obvodu celého prstence. Během první otáčky došlo k vytlačení většiny maziva mimo valivou dráhu a na mazání se podílelo jen nepatrné množství, Obr. 5-16. Měření bylo provedeno se stejným kontaktním tlakem, tedy 0,4 GPa. Během počáteční fáze došlo k nárůstu tloušťky v kontaktu, stejně jako v případě předchozích experimentů. Rozdíl je především ve velikosti nárůstu a velikosti poklesu. V případě plastického maziva je daleko méně výrazný. Od rychlosti 0,6 m/s následuje fáze, kdy se tloušťka nemění.



Obr. 5-16 Výsledky měření(vlevo), distribuce plastického maziva (vpravo)

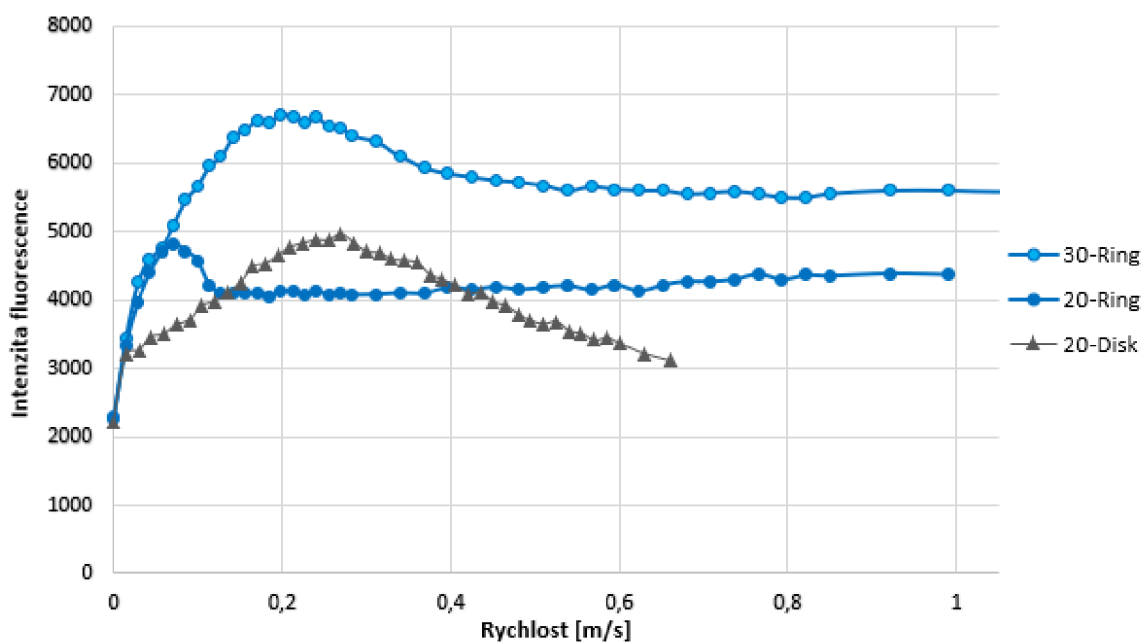
Pro stanovení vlivu geometrie kontaktních těles na vývoj tloušťky maziva v kontaktu bylo provedeno měření se stejným základovým olejem R834/80 na zařízení konfigurace (Disc). Měření bylo provedeno za stejné teploty a při stejném kontaktním tlaku 0,4 GPa. Bylo provedeno celkem 6 měření ve dvou etapách. Výsledná křivka byla vytvořena z aritmetického průměru ze všech měření a je zobrazena na Obr. 5-18. Měření bylo provedeno s 20  $\mu\text{l}$  maziva. Valivá dráha je na skleněném disku výrazně kratší než v případě prstence, proto bylo množství maziva přepočítáno z 30  $\mu\text{l}$  použitých na prstenci, tedy 20  $\mu\text{l}$  na disku. Průběh hodnot se dá rozdělit na dvě části, kdy v první docházelo ke konstantnímu nárůstu tloušťky v kontaktu a po překonání rychlosti 0,28 m/s k poklesu.



Obr. 5-17 Průběh tloušťky kontaktu (Disk)

## 5.7 Zhodnocení výsledků

Na Obr. 5-18 jsou zobrazena dohromady měření na obou dvou zařízeních. Data z měření na zařízení (Ring) jsou znázorněna modrou barvou a odpovídají množství maziva 20 a 30  $\mu\text{l}$ . Šedá křivka zobrazuje měření na zařízení (Disk) s 20  $\mu\text{l}$ . Při porovnání lze vidět, že u zařízení (Ring) došlo k rychlejšímu nárůstu na maximální hodnotu. V případě 20  $\mu\text{l}$  u zařízení (Ring) došlo k téměř stejné maximální hodnotě, jako v případě 20  $\mu\text{l}$  u zařízení (Disk), které mělo kratší valivou dráhu téměř o třetinu. V případě 30  $\mu\text{l}$  u zařízení (Ring), které se ekvivalentně rovná 20  $\mu\text{l}$  u zařízení (Disk), došlo k podstatnějišmu nárůstu a setrvání na hodnotě která přesahuje maximální hodnotu na zařízení (Disk). V obou případech, 20 i 30  $\mu\text{l}$  na zařízení (Ring), došlo k ustálení na hodnotě i po navyšování rychlosti. Oproti zařízení (Disk), u kterého došlo k poklesu téměř na původní hodnotu. Průběh z měření tloušťky na zařízení (Disk) je v případě stoupání lineární, tak i během poklesu oproti zařízení (Ring), kde nárůst i pokles není lineární. Rozdíl v průběhu je více než patrný a je zapříčiněn geometrií kontaktu a působením odstředivých sil. Rozdíl mezi základovým olejem a plastickým mazivem je jen nepatrný, kdy u plastického maziva docházelo k pozvolnějšmu nárůstu i poklesu.



Obr. 5-18 Porovnání obou dvou zařízení

## 5.8 Finanční zhodnocení

V Tab. 1 jsou uvedeny nakupované a vyráběné komponenty použité pro sestavení. Nejnákladnější položkou celého zařízení je skleněný prstenec. V ceně prstence je zahrnutý i samotný vývoj metodiky výroby. Druhou nejnákladnější položkou byly vyráběné komponenty z nerezové oceli. V zařízení bylo použito několik komponent ze skladu UK (motor, převodovka, hřídelová spojka, kulička), čímž výsledná cena ztelně poklesla. Celková cena zařízení je 112 795 Kč.

Tab. 1 Seznam položek

<b>Název položky</b>	<b>Cena (Kč)</b>
Skleněný prstenec	70 000
Vyráběné komponenty	32 980
Ložiskové domky	5330
Profily a příslušenství	3290
Ložiska	630
Lineární vedení	565
<b>Celkem</b>	<b>112795</b>

## 6 DISKUSE

Výsledkem této diplomové práce je funkční zařízení, které umožňuje vizualizovat distribuci maziva ve valivém ložisku. Vnější kroužek ložiska je nahrazen skleněným prstencem s drážkou, která má identickou geometrii jako drážka ve skutečném ložisku 6314. Je zde použit pouze jeden valivý element, uložený na dvou hřídelkách, kvůli samovolnému odvalování trakční silou. Element je přitlačován ke skleněnému prstenci pomocí páky a závaží. Zařízení je schopné zajistit rychlost v kontaktu v rozmezí 0–2 m/s s maximálním kontaktním tlakem (0,5 GPa).

Funkčnost zařízení byla zkontrolována úvodním experimentem, jak se základovým olejem, tak i s plastickým mazivem. Měření bylo provedeno s kontaktním tlakem 0,4 GPa a v rozmezí rychlostí 0–1,7 m/s. Zařízení bylo schopné vyvinout i vyšší rychlost, kdy nejvyšší odzkoušená rychlost byla 2,5 m/s. Při vyšších rychlostech však docházelo k navyšování intenzity nárazů, kdy kulička přejížděla přes prasklinu a hrozilo tak rychlejší zničení prstence. Při těchto rychlostech však nedocházelo ke změně tloušťky filmu v kontaktu, proto byla zvolena konečná rychlost pro měření 1,7 m/s. Výsledky z úvodního experimentu ukazují znatelný vliv odstředivých sil a geometrie kontaktních těles na průběh tloušťky v kontaktu během zvoleného rychlostního intervalu. Při srovnání se stávajícím zařízením konfigurace (Disc), na kterém bylo provedeno totožné měření, odstředivé síly dokážou zajistit konstantní tloušťku maziva v kontaktu i po protržení menisku před kontaktem. V případě původního zařízení (Disc) tomu tak není a po protržení menisku před kontaktem došlo k poklesu tloušťky maziva na minimum.

Jedním z nedostatků zařízení bylo připojení motoru přes spojku k poháněné hřídeli. Ukázalo se, že zařízení takhle sestavené, nedokáže plynule pohánět prstencem. Docházelo k rozkmitání hřídelové spojky do takové míry, že došlo k jejímu poškození. Torzní tuhost spojky způsobovala, že motor nedokázal patřičně upravovat vstupní parametry vzhledem k výstupní rychlosti hřídele. Řešením tohoto problému bylo připojení redukcující převodovky před motor. Dalším problémem byl pohybující se kontakt v pozorované oblasti při nízkých otáčkách. Valivý element je přes vozíček uložen na lineárním vedení tak, aby došlo k samovolnému vystředění na dno drážky. K posunu kontaktní oblasti docházelo do rychlosti cca 0,02 m/s. Jedná se ovšem o velice malý rychlostní interval, přibližně 1 % použitelné rychlosti. Při vyšších rychlostech k posunu kontaktní oblasti nedošlo. Posun kuličky může být způsoben vychýlením celé páky vůči prstenci. Domeček páky je přichycen pouze 4 šrouby a není kolíkován, tudíž je možné jej nepatrně úhlovat. Vychýlení páky způsobí mírný prokluz kuličky, který je doprovázen vznikem třecí síly, která může způsobit posun celého vozíčku na lineárním vedení.

Největší problém zařízení se vyskytl během montáže zařízení, kdy došlo k naprasknutí skleněného prstence. Výrobce doporučoval ohřátí prstence do teploty 300 °C, pokud by bylo potřeba ho oddělit od hliníkové podložky, ke které byl přilepen lepidlem na bázi epoxidu. Při montáži byl prstenec i s podložkou ohřát a hřídel, na kterou se měl prstenec nalisovat, byla ochlazena. Rozdílná tepelná roztažnost podložky a skleněného prstence způsobila prasklinu napříč prstencem. Při přejetí valivého elementu lze slyšet malý náraz. Zařízení je i přes prasklinu funkční a umožňuje provádět experimenty. Při vyšších rychlostech ovšem dochází k navyšování hluku vlivem přejetí přes prasklinu a také k mírnému prosakování maziva. Okraje praskliny se dále neporušují. Navrženým řešením pro budoucí výrobu je opustit tepelné lisování a nahradit ho vytvořením přesného průměru díry a hřídele. Hřídel je potřeba vyrobit s mírným přesahem a dolapovat ji přesně na díru. Další úpravou je výměna materiálu podložky pod prstenec za materiál s velice podobnou tepelnou roztažností, jako v případě skla BK7.

## 7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací experimentálního zařízení pro studium distribuce maziva ve valivém ložisku. Zařízení disponuje kontaktními tělesy s geometrií reálného ložiska, čímž umožňuje vytvořit tlakové a geometrické poměry, jaké jsou ve skutečném valivém ložisku. Zařízení umožňuje zkoumat mazací film pomocí fluorescenční mikroskopie. V teoretické části práce jsou rozebrány základní vlastnosti valivých ložisek, kinematika jednotlivých komponent a interakce těles navzájem mezi sebou. Dále bylo rozebráno mazání ložisek plastickými mazivy, složení plastických maziv a chování maziva uvnitř ložiska. Hlavními mechanismy pohybující s mazivem uvnitř ložiska jsou pohyby jednotlivých komponent a odstředivé síly. Dále byly rozebrány optické metody využívající se v oblasti tribologie pro analýzu mazacích filmů. Nejvhodnější metodou pro studium distribuce maziva na vyvíjeném zařízení je fluorescenční mikroskopie. Poslední část rešerše se zabývala optickými tribometry využívajícími se v současnosti pro studium mazacích filmů v ložiscích. Následující kapitola byla zaměřena na volbu konfigurace zařízení. Zařízení mohlo simulovat kontakt valivého elementu s vnějším nebo vnitřním kroužkem ložiska. Vybrána byla varianta s vnějším kroužkem, kde je více patrný vliv odstředivých sil, a také umožňuje přímé pozorování kontaktní oblasti. Dále bylo zvoleno použití jednoho valivého elementu, oproti plnému počtu, kvůli snazšímu vytvoření kontaktního tlaku. Vzhledem ke konstrukční jednoduchosti byly různé koncepční varianty zaměřeny pouze na jednotlivé uzly, jako například upevnění skleněného prstence nebo valivého elementu. Dále se práce zaměřuje na konstrukční návrh zvolených variant z předchozí kapitoly. Při návrhu bylo kladeno úsilí především na jednoduchost zařízení se snadnou možností obsluhy. Nejprve byla zvolena geometrie kontaktní dvojice a navržena část zařízení upevňující skleněný prstenc, aby došlo k co nejrychlejšímu zadání výroby prstence. Následovala konstrukce pákového mechanismu a rámu zařízení. Po sestavení zařízení následovaly úvodní experimenty. Měření proběhlo jak se základovým olejem, tak i s plastickým mazivem. Měření ukazují znatelný vliv odstředivých sil, které dokázaly udržet tloušťku filmu v kontaktu při navyšující se rychlosti oproti měření na zařízení Ball-on-disc, kdy naopak došlo k poklesu tloušťky filmu v kontaktu v důsledku hladovění. Zařízení umožní experimentální výzkum v oblasti distribuce maziva v ložisku. Výstupem práce je funkční zařízení, které poslouží k dalšímu studiu mazání ložisek. Zařízení je umístěné v laboratoři Ústavu konstruování na Fakultě strojního inženýrství v Brně a je evidováno v databázi VUT jako funkční vzorek [60].



## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LUGT, P. M. *Grease Lubrication in Rolling Bearings*. 1. vyd. 2013. ISBN 978-1-118-35391-2.
- [2] HARRIS, T., A., KOTZALAS, M., N. *Essential Concepts of Bearing Technology*. FIFTH. 2006. ISBN 9780849371837.
- [3] SKF. *Deep groove ball bearings*. Dostupné z: <https://www.skf.com/africa/en/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings>
- [4] HARRIS, T., A., KOTZALAS, M., N. *Advanced Concepts of Bearing Technology*. FIFTH. 2006. ISBN 9780849371820.
- [5] RICCI, M. Ball 's motion , sliding friction , and internal load distribution in a high-speed ball bearing subjected to a combined radial , thrust , and moment load , applied to the inner ring ' s center of mass : Mathematical model Ball ' s motion , sliding fricti. *Journal of Physics Conference Series*. 2015.
- [6] WAGNER, Christian, Andreas KRINNER, Thomas THÜMMEL a Daniel RIXEN. Full Dynamic Ball Bearing Model with Elastic Outer Ring for High Speed Applications. *Lubricants*. 2017, roč. 5, č. 17, s. 1–14.
- [7] HAMROCK, B., J. a D. DOWSON. *Ball Bearing Mechanics*. 1981. Dostupné z: doi:
- [8] VUT v Brně, Ústav Konstruování. Prezentace předmětu Tribologie, přednáška 2. <https://moodle.vutbr.cz/>. nedatováno.
- [9] DE VICENTE, J. – STOKES, J. R. - SPIKES, H. A. Rolling and sliding friction in compliant , lubricated contact. *Journal of Engineering Tribology*. 2006, roč. 220, č. 2, s. 55–63.
- [10] KAWAMURA, T, M MINAMI a M HIRATA. Grease Life Prediction for Sealed Ball Bearings Grease Life Prediction for Sealed Ball. *Tribology Transactions*. 2001, roč. 44, č. 2, s. 256–262.
- [11] LUGT, Piet M. A Review on Grease Lubrication in Rolling Bearings. *Tribology Transactions*. 2009, roč. 52, č. 4, s. 470–480.
- [12] BLAŽEK J., Rábl V. *Ropy, Základy zpracování a využití*. 2. vyd. B.m.: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN ISBN 80-7080-619-2.
- [13] BAUER, Walter H, Alfred P FINKELSTEIN a Stephen E WIBERLEY. Flow Properties of Lithium Stearate-Oil Model Greases as Functions of Soap Concentration and Temperature. *A S L E Transactions*. 1960, roč. 3, č. 2, s. 215–224.
- [14] LUGT, P M a D M PALLISTER. *Grease Lubrication in Rolling Bearings*. 1. vyd. B.m.: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [15] DRESEL, Wilfried a Rolf-peter HECKLER. 16 Lubricating Greases. In: Wilfried Dresel THEO MANG, ed. *Lubricants and Lubrication*. 3. vyd. 2017, s. 781–842. ISBN ISBN: 978-3-527-32670-9.
- [16] YOKOUCHI, A., HOKAO, M., SUGIMURA, J. Effects of Soap Fiber Structure on Boundary Lubrication of Lithium Soap Greases. *Tribology Online*. 2011, roč. 6, č. 5, s. 219–225.



- [17] ÅSTRÖM, H., ÖSTENSEN, J. O., HÖGLUND, E. Lubricating Grease Replenishment in an Elastohydrodynamic Point Contact. *Journal of Tribology*. 1993, roč. 115, č. 3, s. 501–506.
- [18] CHIU, Y. P. An Analysis and Prediction of Lubricant Film Starvation in Rolling Contact Systems. *Tribology Transactions*. 1974, roč. 17, č. 1, s. 22–35.
- [19] PEMBERTON, J a A CAMERON. A mechanism of fluid replenishment elastohydrodynamic contacts in. 1976, roč. 37, č. 1, s. 185–190.
- [20] HURLEY, S. a M CANN, P. IR Spectroscopic Analysis of Grease Lubricant Films in Rolling Contacts. *Tribology Series*. 1999, roč. 36, s. 589–600.
- [21] ZOELLEN, M T., C. H. VENNER a P. M. LUGT. Free Surface Thin Layer Flow on Bearing Raceways. *Journal of Tribology*. 2008, roč. 130, č. 2.
- [22] LIANG, H, D GUO, Li MA a J LUO. Experimental Investigation of Centrifugal Effects on Lubricant Replenishment in the Starved Regime at High Speeds. *Tribology Letters*. 2015, roč. 59, č. 1, s. 1–9. ISSN 1573-2711.
- [23] HUANG, H., GUO, D., WEN, S., WAN, G.T.Y. Effects of Slide / Roll Ratio on the Behaviours of Grease Reservoir and Film Thickness of Point Contact. *Tribology Letters*. 2014, roč. 54, č. 3, s. 263–271.
- [24] CHEN, J., TANAKA, H., SUGIMURA, J. Experimental Study of Starvation and Flow Behavior in Grease-Lubricated EHD Contact. *Tribology Online*. 2015, roč. 10, č. 1, s. 48–55.
- [25] CANN, P., LUBRECHT, T. Bearing performance limits with grease lubrication : the interaction of bearing design , operating conditions and grease. *Journal of Physics D Applied Physics*. 2007, roč. 40, č. 18, s. 5446–5451.
- [26] DAMIENS, B., A. A. LUBRECHT a P. M. CANN. Influence of Cage Clearance on Bearing Lubrication. *Tribology Transactions*. 2004, roč. 47, č. 1, s. 2–6.
- [27] KOŠTÁL, D. *Experimentální studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem*. B.m., 2015. VUT FSI.
- [28] DAMIENS, B., C.H. VENNER, P.M.E. CANN a A.A. LUBRECHT. Starved Lubrication of Elliptical EHD Contacts. *Journal of Tribology*. 2004, roč. 126, č. 1, s. 105–111.
- [29] SMART, A., E., FORD, R., A., J. Measurement technique of thin liquid films by a fluorescence. *Wear*. 1974, roč. 29, č. 1, s. 41–47.
- [30] FORD, R., A., J. a A. FORD, C. Laser-based fluorescence thin liquid films. *Wear*. 1978, roč. 51, č. 2, s. 289–297. ISSN 0022-1767.
- [31] SUGIMURA, J., HASHIMOTO, M., YAMAMOTO, Y. Study of elastohydrodynamic contacts with fluorescence microscope. *Tribology and Interface Engineering Series*. 2000, roč. 38, č. 2000, s. 609–617. ISSN 01678922.
- [32] REDDYHOFF, T., CHOO, J., H. SPIKES, H., A., GLOVNEA, R., P. Lubricant Flow in an Elastohydrodynamic Contact Using Fluorescence. *Tribology Letters*. 2010, roč. 38, č. 3, s. 207–215.
- [33] ALBAHRANI, S., M., B., PHILIPPON, D., VERGNE, P., BLUET, J. M. A review of in situ methodologies for studying elastohydrodynamic lubrication. *Engineering Tribology*. 2015, roč. 230, č. 1, s. 86–110.

- [34] ARCHARD, J. F., KIRK, M. T. Lubrication at Point Contacts. *Proceedings of The Royal Society A*. 1961, roč. 261, č. 1307, s. 532–550.
- [35] KIRK, M. T. Hydrodynamic Lubrication of ‘Perspex’. *Nature*. 1962, roč. 194, č. 4832, s. 965–966.
- [36] GOHAR, R., CAMERON, A. Optical measurement of oil film thickness under elastohydrodynamic lubrication. *Nature*. 1963, roč. 200, č. 4905, s. 458–459.
- [37] CAMERON, A., GOHAR, R. Theoretical and Experimental Studies of the Oil Film in Lubricated Point Contact. *Proceedings of The Royal Society A*. 1966, roč. 291, č. 1472, s. 520–536.
- [38] WEDEVEN, L., D., EVANS, D., CAMERON, A. Optical Analysis of Ball Bearing Starvation. *Journal of Lubrication Technology*. 1971, roč. 93, č. 3, s. 349–361.
- [39] DALMAZ, G. Simulating angular ball bearing lubricated elliptical contacts. *Tribology International*. 1978, roč. 11, č. 2, s. 273–279.
- [40] MEDLÍK, J. Optický tribometr. 2008. Dostupné z: [http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz\\_soubor.php?id=1111](http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=1111)
- [41] HARTL, M., KŘUPKA, I., RADEK, P., LIŠKA, M. An Automatic System for Real-Time Evaluation of EHD Film Thickness and Shape Based on the Colorimetric Interferometry. *Tribology Transactions*. 1999, roč. 42, č. 2, s. 303–309.
- [42] OMASTA, M., MEDLÍK, J. Optický tribometr pro studium mazaného kontaktu s různou orientací vektorů rychlostí. 2010.
- [43] *Optický tribometr s vícenásobným valivým kontaktem (axiálním valivým ložiskem)*. Dostupné z: [http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz\\_soubor.php?id=1515](http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=1515)
- [44] ŠPERKA, P., SVOBODA, P., VRBKA, M., KOŠTÁL, D. Tribologický simulátor valivého ložiska. 25805. 2013.
- [45] *Laboratoře Odboru tribologie – výzkum využitelný v praxi*. Dostupné z: <http://netme.cz/cs/the-tribology-laboratories-research-applicable-in-practice/>
- [46] KOŠTÁL, D., SVOBODA, P., KŘUPKA, I. Simulátor tribologického kontaktu. 25667. 2013.
- [47] PCS INSTRUMENTS. *EHD Ultra Thin Film Measurement System*. Dostupné z: <https://pcs-instruments.com/product/ehd-elasto-hydrodynamic-lubrication-2/>
- [48] PUTIGNANO, C., REDDYHOFF, T., CARBONE, G., DINI, D. Experimental Investigation of Viscoelastic Rolling Contacts: A Comparison with Theory. *Tribology Letters*. 2013, roč. 51, č. 1, s. 105–113.
- [49] VLADESCU, S., C., MEDINA, S., OLVER, A., V., PEGG, I., G., REDDYHOFF, T. Lubricant film thickness and friction force measurements in a laser surface textured reciprocating line contact simulating the piston ring – liner pairing. *Tribology International*. 2016, roč. 98, s. 317–329.
- [50] *Optical Elastohydrodynamic Lubrication Test Rig*. Dostupné z: [http://www.qdtribology.com/en/equipment/equipment\\_134.html](http://www.qdtribology.com/en/equipment/equipment_134.html)
- [51] *High-speed EHL Rig*. Dostupné z: [http://www.qdtribology.com/en/equipment/equipment\\_129.html](http://www.qdtribology.com/en/equipment/equipment_129.html)

- [52] FANG, N., L. CHANG, G. J. JOHNSTON, M. N. WEBSTER a A. JACKSON. An Internal Line-Contact EHL and Traction Test Rig. *SAE International*. 1999, roč. 108, č. 3, s. 11.
- [53] ZHANG, Y., W. WANG, S. ZHANG a Zi. ZHAO. Optical analysis of ball-on-ring mode test rig for oil film thickness measurement. *Friction*. 2016, roč. 4, č. 4, s. 324–334. ISSN 22237704.
- [54] HOKAO. M., SONODA. K., SUGIMURA. J. Direct Observation of Replenishment of Lubricants at Contact Inlet in Ball Bearings. *NLGI SPOKESMAN*. 2018, roč. 82, č. 4, s. 6–13.
- [55] VENNER, C ., H., VAN. ZOELLEN, M T. a M. LUGT, P. Tribology International Thin layer flow and film decay modeling for grease lubricated rolling bearings. *Tribology International*. 2012, roč. 47, s. 175–187. ISSN 0301-679X.
- [56] NEČAS, D., ŠPERKA, P., VRBKA, M., KŘUPKA, I., HARTL, M. FILM THICKNESS MAPPING IN LUBRICATED CONTACTS USING FLUORESCENCE. *MM Science Journal*. 2015, roč. 4, s. 821–824.
- [57] HAUGLAND, R., P., SPENCE, M., T., JOHNSON, I., D. *Handbook of Fluorescent Probes & Research Chemicals*. 6th ed. Eu. OR, USA (4849 Pitchford Ave., Eugene 97402): Molecular Probes, 1996. ISBN 0965224007.
- [58] SPIKES, H., A. Thin films in elastohydrodynamic lubrication : the contribution of experiment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 1999, roč. 213, č. 2, s. 335–352.
- [59] SIGMA-ALDRICH. *Coumarin 6*. 2020. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/442631?lang=en&region=CZ>
- [60] OKÁL, M. KOŠŤÁL, D. KŘUPKA, I. *Optický simulátor valivého ložiska*. 2020. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/vav/vysledky/detail/164106>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

$\alpha$	stykový úhel
$\theta$	úhel vychýlení kroužků ložiska
$\Lambda$	parametr mazání
$h_{min}$	minimální tloušťka mazacího filmu
$Rq_a$	průměrná kvadratická odchylka tělesa $a$
$Rq_b$	průměrná kvadratická odchylka tělesa $b$
$UV$	ultrafialové záření
$R_{max}$	maximální hloubka drsnosti
$Ra$	průměrná aritmetický úchylka profilu drsnosti
$nm$	nanometr
$N$	jednotka síla newton
$MPa$	jednotka tlaku megapascal
$GPa$	jednotka tlaku gigapascal
$m/s$	jednotka rychlosti metr za sekundu
$F$	síla
$F_k$	síla v kontaktu
$F_z$	síla vytvořená závažím
$F_s$	síla ve středu páky
$f$	frekvence
$Hz$	jednotka frekvence Hertz
$M$	moment síly
$I_o$	tenzor setrvačnosti
$\varepsilon$	úhlové zrychlení
$\varphi$	úhel náklonu páky

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Jednořadé kuličkové ložisko [3].....	15
Obr. 2-2	(A) stykový úhel, (B) naklopení vnitřního kroužku [4] .....	16
Obr. 2-3	(A) vektory rychlosti (B) stupně volnosti ložiska [6] .....	17
Obr. 2-4	Kontaktní oblast kuličkového ložiska [7] .....	17
Obr. 2-5	Stribeckova křivka [7] .....	18
Obr. 2-6	Tok maziva kolem kontaktu [19] .....	22
Obr. 2-7	Schéma uspořádání tribometru s horizontálně orientovanou osou disku.....	23
Obr. 2-8	Rezervoáry maziva v závislosti na rychlosti otáčení disku [22].....	23
Obr. 2-9	Vzor dráhy plastického maziva [24].....	24
Obr. 2-10	Spin kuličky [1] .....	24
Obr. 2-11	Efekt spinu na tloušťku maziva [25] .....	25
Obr. 2-12	Klec pro úpravu vŕle [26] .....	25
Obr. 2-13	Tloušťka filmu při navyšující se rychlosti a různých vŕlích [26] .....	26
Obr. 2-14	Závislost tloušťky filmu na rychlosti [29] .....	27
Obr. 2-15	Tribometr používající fluorescenci [31] .....	27
Obr. 2-16	Fluorescenční mapa kontaktu za čistého valení 0.075 m/s [32] .....	28
Obr. 2-17	Zařzení se dvěma válci [34].....	29
Obr. 2-18	Schéma konfigurace použité Goharem [37].....	29
Obr. 2-19	Schéma simulátor axiálního ložiska ze stacionární kleci [38] .....	30
Obr. 2-20	Konfigurace použitá Dalmazem [39] .....	30
Obr. 2-21	Tribometr ball-on-disc na UK [40] .....	31
Obr. 2-22	Tribometr ball-on-disc s různou orientací vektoru rychlosti [42].....	31
Obr. 2-23	Tribometr s vícenásobným kontaktem [43] .....	32
Obr. 2-24	Simulátor hladovějícího kontaktu [45] .....	33
Obr.2-25	Tribometr a schéma zařízení od PCS Instruments [42, 44] .....	34
Obr.2-26	Reciproční tribometr [49].....	34
Obr. 2-27	Zřizení pro studium Ehd režimu.....	35
Obr. 2-28	Zařzení pro studium EHD režimu za vysoké rychlosti .....	35

Obr. 2-29	Schéma zařízení pro vytvoření liniového kontaktu .....	36
Obr. 2-30	Tribometr s konfigurací ball-on-ring [53] .....	36
Obr. 2-31	Zařízení umožňující pohled do kontaktu ložiska [54].....	37
Obr. 4-1	Schéma postupu při řešení práce .....	41
Obr. 4-2	Schéma zařízení .....	42
Obr. 4-3	Konfigurace zařízení .....	43
Obr. 4-4	Geometrie prstence .....	44
Obr. 4-5	Hertzova oblast .....	45
Obr. 4-6	Uložení prstence přes deformační člen (A) .....	47
Obr. 4-7	Nalepení prstence na podložku (B) .....	47
Obr. 4-8	Uložení kuličky (A) .....	48
Obr. 4-9	Uložení kuličky (B) .....	49
Obr. 5-1	Sestava zařízení .....	51
Obr. 5-2	Upevnění prstence .....	52
Obr. 5-3	Pákový mechanismus.....	54
Obr. 5-4	Vozíček pro kuličku.....	55
Obr. 5-5	Sestava excentru.....	56
Obr. 5-6	Nosný rám zařízení .....	56
Obr. 5-7	Pevnostní výpočet páky.....	57
Obr. 5-8	Zatížení středu páky.....	58
Obr. 5-9	Ideální a nepřesný tvar prstence .....	59
Obr. 5-10	Zkompletované zařízení pod mikroskopem. ....	62
Obr. 5-11	Srovnání distribuce maziva kolem kontaktu (vlevo Ball-on-disc, napravo Ball-on-ring) .....	63
Obr. 5-12	Úvodní experiment a mikropipeta .....	65
Obr. 5-13	Výstup z úvodního měření, (x-osa odpovídá rychlosti, y-osa odpovídá intenzitě fluorescence).....	66
Obr. 5-14	Vývoj maziva kolem kontaktu.....	66
Obr. 5-15	Vliv množství nadávkovaného maziva .....	67
Obr. 5-16	Výsledky měření(vlevo), distribuce plastického maziva (vpravo).....	68

Obr. 5-17	Průběh tloušťky kontaktu (Disk) .....	68
Obr. 5-18	Porovnání obou dvou zařízení.....	69
Obr. 12-1	Výpočet životnosti ložiska 628/8-2Z. ....	84
Obr. 12-2	Výpočet životnosti ložiska 6004-2Z. ....	84



## 11 SEZNAM TABULEK

Tab.1	Seznam položek.....	85
-------	---------------------	----

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Výpočet životnosti ložisek
- Příloha 2** Modální analýza zařízení
- Příloha 3** Deformační analýza hřídele pro páku
- Příloha 4** Deformační analýza hřídele pro kuličku
- Příloha 5** Seznam výkresové dokumentace

# Příloha 1

## Výpočet životnosti ložisek

Kontrolovány byly ložiska 628/8-2Z, která byla použita pro vozíček. Aplikované radiální zatížení bylo zvoleno 45 N, tedy polovinu maximálního zatížení. Maximální zatížení 90 N je rozloženo mezi 2 hřídelky, které jsou uloženy dohromady ve čtyřech ložiscích. Maximální provozní otáčky jsou 1530 ot/min. Základní statická únosnost ložiska je 455 N a dynamická únosnost 1210 N. Pro výpočet životnosti byl zvolen online SKF kalkulátor. Výsledek životnosti je 58100 h viz Obr.12-1.

Designation	Bearing rating life		SKF life modification factor	Contamination factor
	Basic	SKF	$a_{skf}$	$\eta_c$
$L_{10h}$	$L_{10mh}$			
$h$				
► <a href="#">628/8-2Z</a>	> 2x10 <sup>5</sup>	58100	0.27	0.12

Obr.12-1 Výpočet životnosti ložiska 628/8-2Z.

Obdobným způsobem byly zkontrolována i ložiska, která jsou nalisována na hřídeli pohánějící prsteneček, ložiska 6004-2Z. Radiální zatížení bylo zvoleno 500N a provozní otáčky 287, tedy maximální otáčky při rychlosti 2 m/s v kontaktu. Základní statická únosnost ložiska je 5000 N a dynamická únosnost je 10 KN. Výsledek životnosti je 114000 h viz. Obr.12-2.

Designation	Bearing rating life		SKF life modification factor	Contamination factor
	Basic	SKF	$a_{skf}$	$\eta_c$
$L_{10h}$	$L_{10mh}$			
$h$				
► <a href="#">6004-2Z</a>	> 2x10 <sup>5</sup>	114000	0.25	0.19

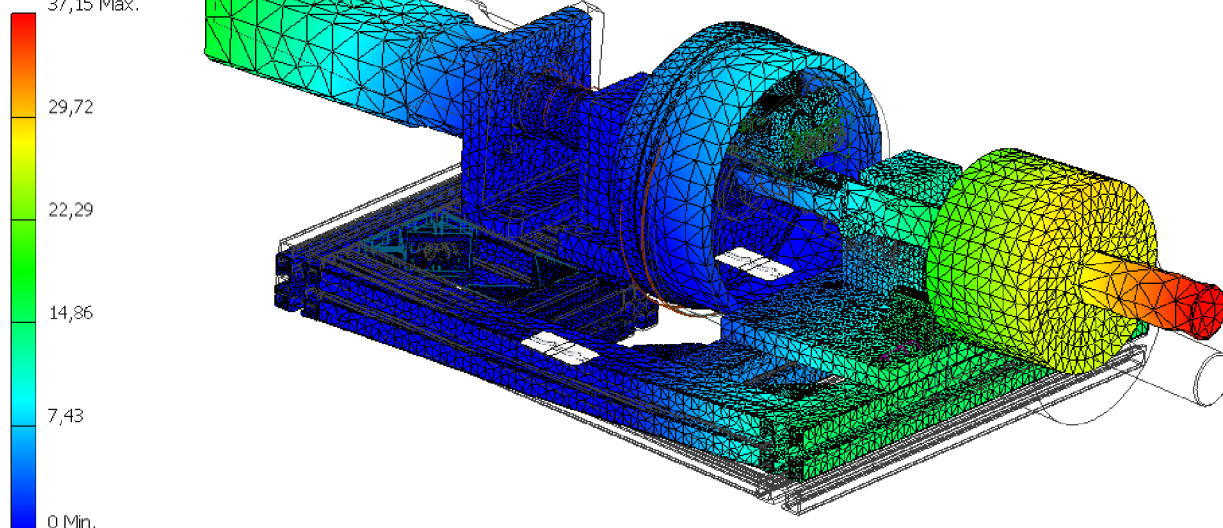
Obr.12-2 Výpočet životnosti ložiska 6004-2Z.

V obou dvou případech byla životnost ložisek požadována minimálně 10 000 h, v obou případech ložiska dostatečně vyhovují.

## Příloha 2

### Modální analýza zařízení – první vlastní tvar

Uzly: 1978188  
Prvky: 1156426  
Typ: Posunutí  
Jednotka: mm  
09.12.2019, 13:44:28  
37,15 Max.



Provozní otáčky prstence 4,7 Hz < První vlastní frekvence 87 Hz

**Tuhost zařízení je dostatečná**

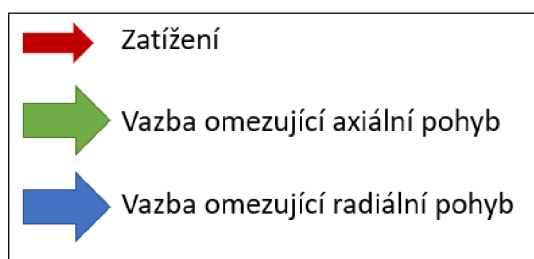
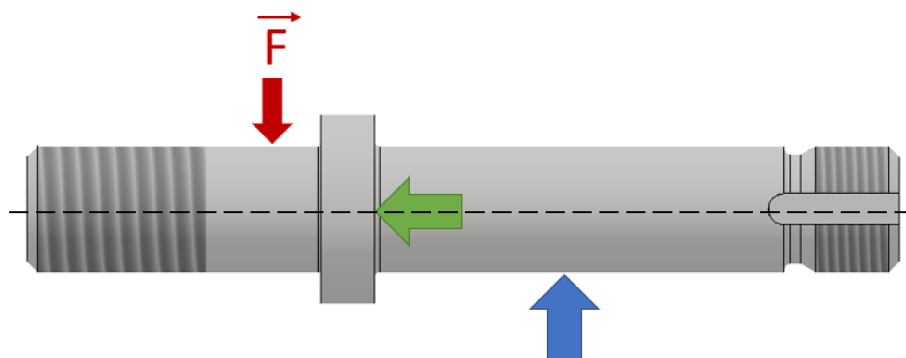
### Vlastní frekvence

Mód	Frekvence
1.	87
2.	95
3.	142
4.	153
5.	270
6.	372

## Příloha 3

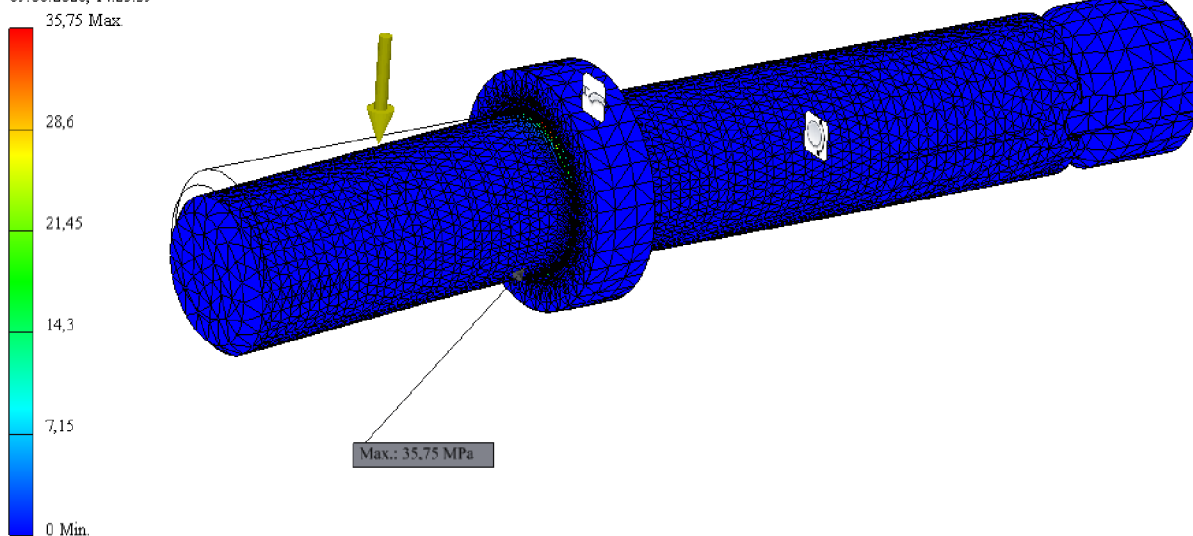
### Deformační analýza hřídele pro páku

Okrajové podmínky:



MKP výpočet napětí hřídele páky.

Uzly: 523782  
Prvky: 373848  
Typ: Napětí Von Mises  
Jednotka: MPa  
09.06.2020, 14:25:39

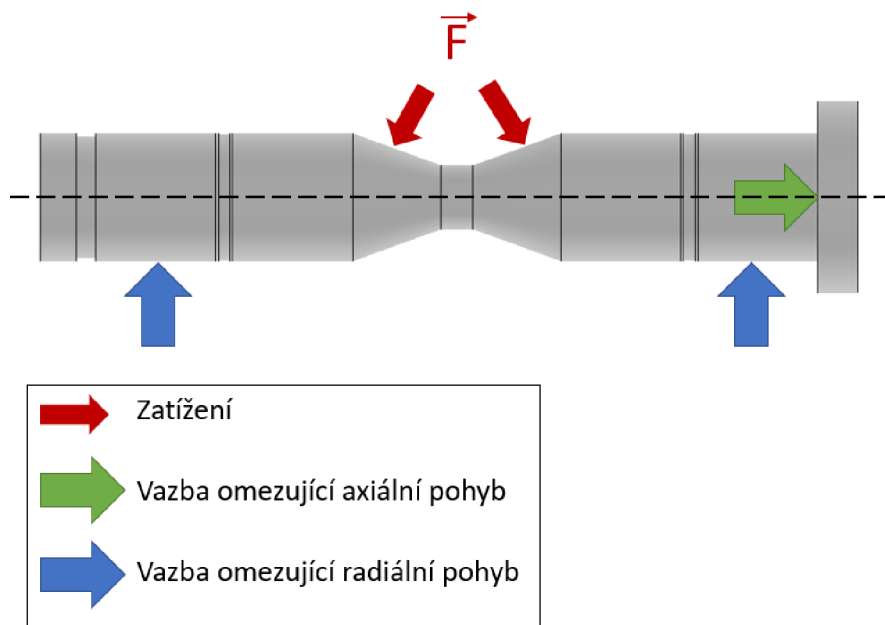


Součinitel bezpečnosti je 6,9 => **Hřídel pro páku vyhovuje.**

## Příloha 4

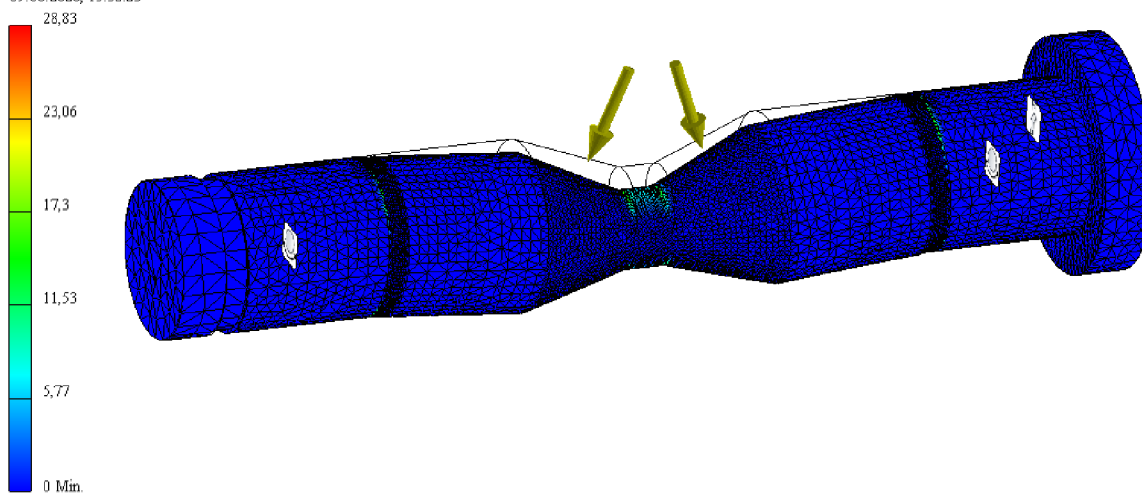
### Deformační analýza hřídele pro kuličku

Okrajové podmínky:



MKP výpočet napětí u hřídele pro kuličku.

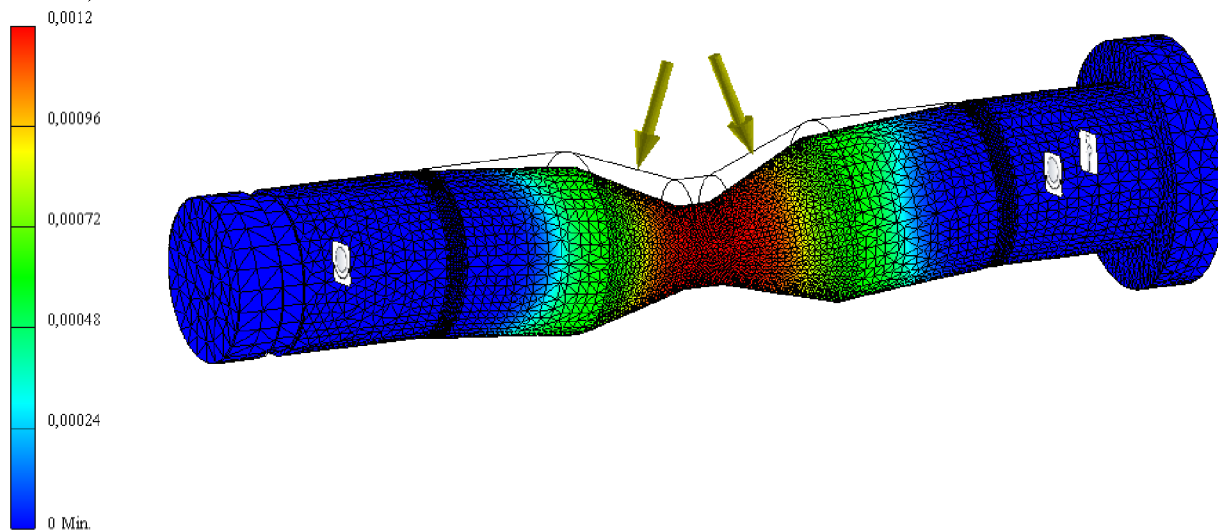
Uzly:265315  
Prvky:181253  
Typ: Napětí Von Mises  
Jednotka: MPa  
09.06.2020, 15:32:23



Součinitel bezpečnosti je 8,6 => **Hřídel pro kuličku vyhovuje.**

MKP výpočet deformace u hřídele pro kuličku

Uzly:265315  
Prvky:181253  
Typ: Posunutí  
Jednotka: mm  
09.06.2020, 15:30:41



Průhyb hřídele pro kuličku je  $0,0012 <$  předepsaná výrobní tolerance.

**Hřídel pro kuličku vyhovuje.**



## Příloha 5

### Seznam výkresové dokumentace

<b>Název:</b>	<b>Číslo dokumentu</b>
1. Výkres sestavení	01-00-A0-00
2. Kusovník 1	01-00-A0-00
3. Kusovník 2	01-00-A0-00
4. Kusovník 3	01-00-A0-00
5. Kusovník 4	01-00-A0-00
6. Příruba motor-větší	01-2-A3-01
7. Hřídel	01-2-A3-02
8. Imbus zátka šestihran	01-2-A4-03
9. Vozíček	01-2-A4-04
10. Hřídel pro kuličku	01-2-A3-05
11. Redukce na vozíček	01-2-A4-06
12. Páka	01-2-A3-07
13. Hranol pod páku	01-2-A4-08
14. Vedení pro tlakový snímač	01-2-A4-09
15. Domeček pro excentr	01-2-A4-10
16. Excentr	01-2-A4-11
17. Hřídel pro excentr	01-2-A3-12
18. Deska pod páku	01-2-A3-13
19. Podložka	01-2-A4-14
20. Prstenec	01-2-A4-15
21. Podložka pod prstenec	01-2-A4-16
22. Hřídel pro páku	01-2-A4-17