



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# KONSTRUKCE RÁZOVÉHO MIKROVISKOZIMETRU

DESIGN OF IMPACT MICROVISCOMETER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

RADOVAN NEPOVÍM

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. MARTIN HARTL, Ph.D.

BRNO 2010



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Radovan Nepovím

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

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

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

### **Konstrukce rázového mikroviskozimetru**

v anglickém jazyce:

### **Design of impact microviscometer**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je konstrukční návrh (a praktická realizace) experimentálního zařízení sloužícího k stanovení tokových vlastností maziv nacházejících se mezi dvěma tělesy při jejich rázu.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat:

- 1.Úvod
- 2.Přehled současného stavu poznání
- 3.Formulaci řešeného problému a jeho technickou a vývojovou analýzu
- 4.Vymezení cílů práce
- 5.Návrh metodického přístupu k řešení
- 6.Návrh variant řešení a výběr optimální varianty
- 7.Konstrukční řešení
- 8.Závěr (Konstrukční, technologický a ekonomický rozbor řešení)

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva, technická dokumentace

Typ práce: konstrukční

Účel práce:pro V-V a tvůrčí činnost ÚK.

Seznam odborné literatury:

Larsson, R; Lundberg, J. Study of lubricated impact using optical interferometry. WEAR, 1995, vol. 190, pp. 184-189.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 23.11. 2010

L.S.

---

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

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

---

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem mechanické části rázového mikroviskozimetru. Rázový mikroviskozimetr je určen k výuce jako pomůcka pro zkoumání reologických vlastností maziva v laboratoři VUT v Brně. Práce obsahuje stručný přehled dosud zkonstruovaných zařízení a užitých metod měření, omezení při konstruování zařízení, návrhy konstrukčních variant a popis částí navrhovaného zařízení.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Rázový mikroviskozimetr, optická interferometrie, elastohydrodynamické mazání, tloušťka mazacího filmu.

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with engineering design of mechanical parts of impact microviscometer. Impact microviscometer is intended for educational tool for the study of rheological properties of lubricants in the laboratory in VUT Brno. The bachelor contains a brief summary has designed equipment and measuring methods used, restrictions of engineered apparatus, designs of constructional variation and description of constructional parts of the apparatus.

## **KEY WORDS**

Impact microviscometer, optical interferometry, elastohydrodynamic lubrication, thickness of lubricated film

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

NEPOVÍM, R. Konstrukce rázového mikroviskozimetru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 44 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

---



---

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci *Konstrukce rázového mikroviskozimetru* jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce prof. Ing. Martinem Hartlem, Ph.D. a uvedl v seznamu všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 19. května 2010

---

Vlastnoruční podpis autora

---





---

## **PODĚKOVANÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat prof. Ing. Martinu Hartlovi, Ph.D. za ochotu a vedení práce, Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. za seznámení s laboratorním pracovištěm a rady při tvorbě konstrukčního řešení, Ing. Milanu Klapkovi, Ph.D. a doc. Ing. Ivanu Mazůrkovi, Ph.D. CSc. za rady při tvorbě konstrukčního řešení, a rodině za podporu.

---



**OBSAH**

<b>OBSAH</b> .....	<b>11</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b> .....	<b>13</b>
1.1 Experimentální zařízení .....	13
1.1.1 Mikroviskozimetr podle Camerona a Paula .....	13
1.1.2 Mikroviskozimetr podle Lundberga .....	14
1.1.3 Mikroviskozimetr podle Larssona a Lundberga .....	15
1.1.4 Rotační mikroviskozimetr podle Wonga, Lingarda a Camerona .....	16
1.1.5 Kyvadlový mikroviskozimetr podle Wonga, Lingarda a Camerona .....	17
1.1.6 Mikroviskozimetr podle O'Neill a Stachowiaka .....	18
1.2 Měřicí metody používané v těchto experimentálních zařízeních .....	19
1.2.1 Měření pomocí elektrického odporu .....	19
1.2.2 Optická interferometrie .....	20
<b>2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA</b> .....	<b>23</b>
2.1 Mechanická část zařízení .....	23
2.2 Optická část zařízení .....	24
2.3 Vyhodnocení snímků .....	25
<b>3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE</b> .....	<b>26</b>
<b>4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ</b> .....	<b>27</b>
<b>5 NÁVRH VARIANT A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY</b> .....	<b>28</b>
5.1 Varianta č. 1 .....	28
5.2 Varianta č. 2 .....	28
5.3 Varianta č. 3 .....	29
5.4 Výběr optimální varianty .....	30
<b>6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b> .....	<b>31</b>
6.1 Kontaktní tělesa .....	31
6.1.1 Mechanické charakteristiky materiálu kontaktních těles .....	31
6.1.2 Uložení kontaktních těles .....	32
6.2 Pohon .....	34
6.3 Zatěžování .....	34
6.3.1 Výpočet hmotnosti závaží .....	35
6.4 Mechanismus k odjištění a nastavení výchylky páky .....	37
6.5 Synchronizace .....	37
<b>7 ZÁVĚR</b> .....	<b>39</b>
<b>8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>40</b>
<b>9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN</b> .....	<b>42</b>
<b>10 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK</b> .....	<b>43</b>
10.1 Seznam obrázků .....	43
10.2 Seznam tabulek .....	43
<b>11 SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>44</b>
11.1 Výkresová dokumentace .....	44

---

## ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem zařízení, které slouží ke zkoumání reologických vlastností maziva během rázu dvou těles při elasto-hydrodynamickém mazání, které je obvyklé u styku nekomfortních povrchů. S tímto jevem se můžeme setkat v praxi velmi často (styk boků ozubených kol, styk kuličky s vnitřním a vnějším ložiskovým kroužkem, vačka, zdvihátko atp.). Při velkém zatížení, které je obvyklé pro elasto-hydrodynamické mazání, vzniká vlivem malé stykové plochy značný tlak, který výrazně ovlivňuje viskozitu maziva. Reologické vlastnosti maziva se zkoumají na základě průběhu tloušťky maziva v kontaktu.

V první kapitole bakalářské práce je pojednáno o současném přehledu zkonstruovaných rázových mikroviskozimetrů a měřicích metod v nich používaných. Jako první zkonstruovali v roce 1972 rázový viskozimetr G. R. Paul a A. Cameron na Imperial College v Londýně. Toto zařízení inspirovalo i některé další vědce v této oblasti. Například v roce 1992 vědci z Imperial College v Londýně zkonstruovali kyvadlové zařízení, které pomocí laseru zkoumalo reologické vlastnosti maziva na základě tloušťky mazacího filmu. O tři roky později zkonstruovali rotační viskozimetr, kde docházelo v kontaktu ke kombinaci dvou pohybů. V roce 1993 Lundberg z Technické Univerzity ve Švédsku zkonstruoval zařízení, na kterém zkoumal, při jaké rychlosti těsně před rázem kontaktních těles dojde k prolomení mazacího filmu, na jehož základě se vyhodnotily reologické vlastnosti maziva. O dva roky později Lundberg s Larssonem zkonstruovali zařízení, které umožňovalo zkoumání reologických vlastností maziva na základě tloušťky mazacího filmu v kontaktu. V roce 1996 byl vyvinut O'Neillem a Stachowiakem ze Západoaustralské Univerzity rázový mikroviskozimetr, který umožňuje sledovat reologické vlastnosti maziva při vysokém tlaku a smykovém spádu. Tato zařízení prošla od té doby řadou úprav. Jedním z důvodů je zdokonalení počítačové techniky.

Druhá kapitola seznamuje s technickou a vývojovou analýzou. Vychází ze získaných poznatků z literatury a popisuje mechanickou část zařízení, optickou část zařízení a vyhodnocování snímků. V třetí kapitole jsou shrnuty omezení při řešení problému, které jsou základem pro tvorbu návrhu zařízení. Čtvrtá kapitola seznamuje s přístupem, který byl použit při řešení práce. Pátá kapitola obsahuje tři návrhy variant, z nichž je dle ekonomického a technologického hlediska vybrána jedna varianta řešení. V šesté kapitole je popis konstrukce navrhovaného zařízení.

Cílem práce je navrhnout mechanickou část zařízení, která se po realizaci umístí pod mikroskop v laboratoři na Ústavu konstruování VUT v Brně.

# 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1

## 1.1 Experimentální zařízení

1.1

### 1.1.1 Mikroviskozimetr podle Camerona a Paula

1.1.1

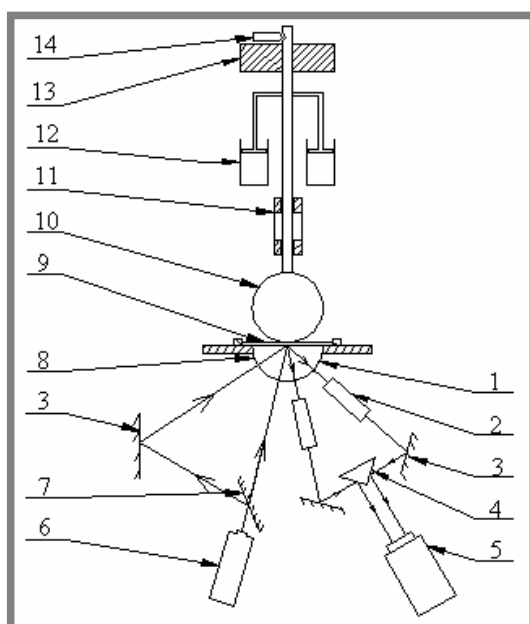
[1] PAUL, G.R.; CAMERON, A. Absolute high-pressure microviscometer based on refractive-index. *Royal Soc. London*. 1972, vol. 331, no. 1585, p. 171-184. ISSN 1364-5021.

*Imperial College of London, London, England*

Konstrukce je velmi jednoduchá a je znázorněna na obr. 1-1. Skleněná kulička 10 o průměru 25,4 mm je připevněna k tyči, která je pomocí vodiček 11 vedena tak, aby byla souosá s dopadovou polokoulí. Na tyči je zavěšeno závaží 13 umožňující vyvinout sílu 10 až 30 N. Ke spuštění skleněné kuličky dojde uvolněním čepu 14. Náráz je tlumen pomocí tlumiče 12.

Jako měřicí metoda je zde použita monochromatická interferometrie, kde je zdrojem světla laser 6. Dva dopadající paprsky jsou vytvořeny polopropustným zrcadlem 7. Protože se intenzita odražených paprsků zvyšuje s úhlem, je polopropustné zrcadlo nastaveno tak, aby při  $8^\circ$  propustilo 90% světla. Úhly dopadu  $\theta_1$  a  $\theta_2$  se získaly pomocí zrcadla, které nahradilo skleněnou polokouli 8. Tímto se získal úhel rozevření mezi paprskem 1 a 2 s přesností  $\pm 10'$ . Povrch polokoule je opatřen antireflexní vrstvou 1 (nanesená vrstva chrómu).

Při některých testech prováděných vysokorychlostní kamerou 5 bylo zapotřebí více světla. V takových případech byly použity dva lasery. Jeden o výkonu 3 mW a druhý o výkonu 13 mW. Vzniklé paprsky byly zaměřeny dvěma totožnými objektivy s pětinásobným zvětšením a přivedeny společně do kamery pomocí zobrazujícího systému. Optická dráha byla stejná a zajištěné zvětšení bylo také stejné. Ke snímání byl použit motorizovaný Nikon F, který snímal tři snímky za sekundu. Později byla použita vysokorychlostní 16 mm kamera Miliken, která zaznamenávala až 400 snímků za sekundu.



- 1 - antireflexní vrstva,
- 2 - objektiv,
- 3 - zrcadlo,
- 4 - optický hranol,
- 5 - kamera,
- 6 - laser,
- 7 - polopropustné zrcadlo,
- 8 - skleněná polokoule,
- 9 - zkoumaná kapalina,
- 10 - skleněná kulička,
- 11 - vodičko, snímač
- 12 - tlumič,
- 13 - závaží,
- 14 - uvolňovací mechanismus.

Obr. 1-1 Experimentální zařízení podle Paula a Camerona.

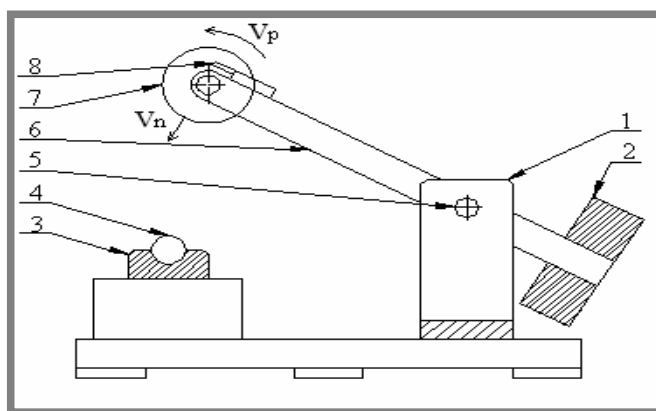
### 1.1.2 Mikroviskozimetr podle Lundberga

[2] LUNDBERG, J. Lubrication of machina elements duriny combined squeeze and sliding motion. *Wear*. 1993 , vol. 169 , no. 2, p. 161-166. ISSN 0043-1648.

*Division of Machina Elements, Luleå University of Technology, SE-971 87 Luleå, Sweden*

Experimentální zařízení je zobrazeno na obr. 1-2. Na tomto zařízení dochází ke kombinaci dvou rotačních pohybů. K nárazu na upevněnou ocelovou kuličku 4 o průměru 25 mm dojde volným pádem vnějšího ložiskového kroužku 7, který je umístěn na konci kyvadla 6. Vnější ložiskový kroužek je uváděn do rotace pomocí vzduchové trysky 8. Dopadová rychlost (rychlost otáčení středu vnějšího ložiskového kroužku kolem čepu)  $v_n$  byla v rozmezí  $0,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  až  $0,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Eliptický parametr  $k$  je 1,22. Rychlost  $v_p$ , která vychází z úhlové rychlosti vnějšího ložiskového kroužku je v rozmezí  $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  až  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Střední rázová normálová síla  $F_n$  se mění pomocí proměnné polohy závaží 2 na kyvadle a hmotnosti závaží. Velikost této síly se měří pomocí piezokrystalického snímače umístěného pod kouličkou. Síla závisí na úhlové rychlosti kyvadla a pohybuje se v rozmezích 30 N až 6300 N.

Je zde použita měřicí metoda pomocí elektrického odporu, kde kulička a vnější ložiskový kroužek jsou od sebe elektricky izolované a připojené ke zdroji elektrického napětí o  $U = 0,1 \text{ V}$ . Jestliže tloušťka mazacího filmu poklesne pod kritickou hodnotu, dojde k vzájemnému styku dvou povrchů. Tím se uzavře elektrický obvod a na osciloskopu se naměří napětí  $U_c$ , na jehož základě se vypočítá doba vzájemného styku kuličky a vnějšího kroužku ložiska. Na jiném osciloskopu je též zaznamenán signál z piezokrystalického snímače. Rychlost dopadu  $v_n$  a úhlová rychlost vnějšího ložiskového kroužku je naměřena těsně před dopadem infračerveným detektorem. Během testované sekvence nebyla změněna hmotnost závaží ani jeho poloha vůči kyvadlu. Pro konstantní dopadovou rychlost se krok po kroku zvyšovala rychlost otáčení vnějšího ložiskového kroužku do doby, než došlo k první známce kontaktu. Rychlost zjištěnou při první známce kontaktu označil Lundberg za limitní rychlost otáčení vnějšího ložiskového kroužku. Dále považoval tuto rychlost za konstantní během doby nárazu.



- 1 - rám,
- 2 - závaží,
- 3 - držák kuličky,
- 4 - kulička,
- 5 - čep,
- 6 - kyvadlo,
- 7 - vnější ložiskový kroužek,
- 8 - vzduchová tryska.

Obr. 1-2 Experimentální zařízení podle Lundberga.

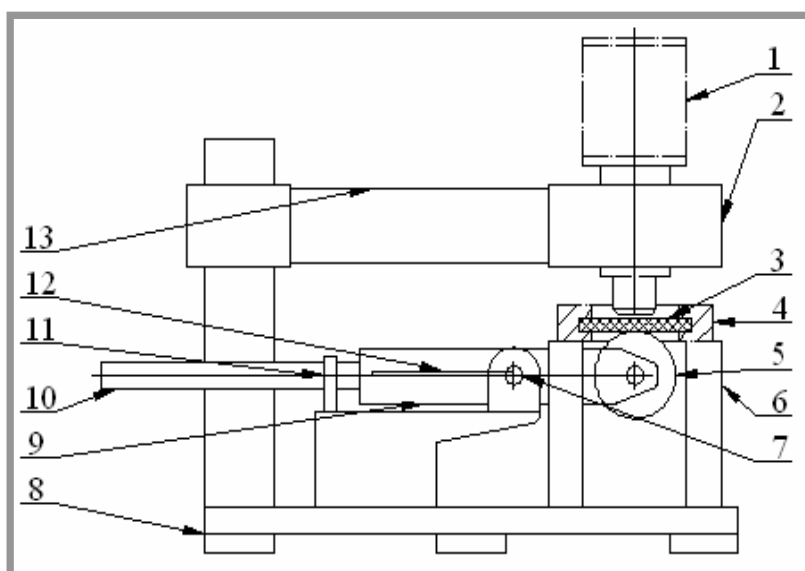
**1.1.3 Mikroviskozimetr podle Larssona a Lundberga**

[3] LARSSON, R; LUNDBERG, J. Study of lubricated impact using optical interferometry. *Wear*. 1995, vol. 190, no. 2, p. 184-189. ISSN 0043-1648.

*Division of Machina Elements, Luleå University of Technology, SE-971 87 Luleå, Sweden*

Toto experimentální zařízení je upravená verze mikroviskozimetru podle Lundberga. Zařízení je schematicky zobrazeno na obr. 1-3. Skládá se ze skleněného disku 3 o průměru 100 mm a tloušťce 10 mm. Skleněný disk je upevněn k základní desce 8. Ocelová kulička 5 o průměru 70 mm je připevněna ke kyvadlu 9, které se otáčí kolem čepu 7. Čep je připevněn k základní desce. Ke kontaktu mezi ocelovou kuličkou a skleněným diskem dojde spuštěním kyvadla. Vychýlením tyče 10 vzhledem k základní desce je možno měnit požadovanou rychlost rázu. Tyč je navržena tak, aby se zajistilo dostatečné množství obrazových snímků během rázu. Rázová rychlost je měřena před rázem pomocí infračerveného detektoru 11.

K měření je využito chromatické interferometrie a měření pomocí elektrického odporu. Spodní povrch skleněného disku je pokryt chromovou vrstvou tlustou přibližně 20 nm. Místo kontaktu je osvětleno světlem o šířce pásma 20 nm a vlnové délce 579 nm. Průběh rázu je snímán vysokorychlostní kamerou 1 pevně připojenou k základní desce. Zde je použit černobílý vysokorychlostní kamerový systém Kodak EktaPro Intensifier Imager system. Tento systém obsahuje zesilovač obrazu, který umožňuje používat expoziční časy až 10  $\mu$ s. Vysokorychlostní kamera snímá 1000 snímků za sekundu. Kulička a chromová vrstva skleněného disku jsou navzájem od sebe elektricky izolovány a připojeny ke zdroji elektrického napětí  $U = 0,1$ V. Pokud tloušťka mazacího filmu klesne pod kritickou hodnotu, dojde ke styku povrchů kuličky a chromové vrstvy. Tím se uzavře elektrický obvod a na osciloskopu se zjistí doba styku pomocí naměřeného napětí  $U_c$ .



- 1 - kamera,
- 2 - mikroskop,
- 3 - skleněný disk,
- 4 - držák skleněného disku,
- 5 - ocelová kulička,
- 6 - stojan,
- 7 - čep,
- 8 - základní deska,
- 9 - kyvadlo,
- 10 - tyč,
- 11 - infračervený detektor,
- 12 - rameno,
- 13 - rám mikroskopu.

Obr. 1-3 Experimentální zařízení podle Lundberga a Larssona.

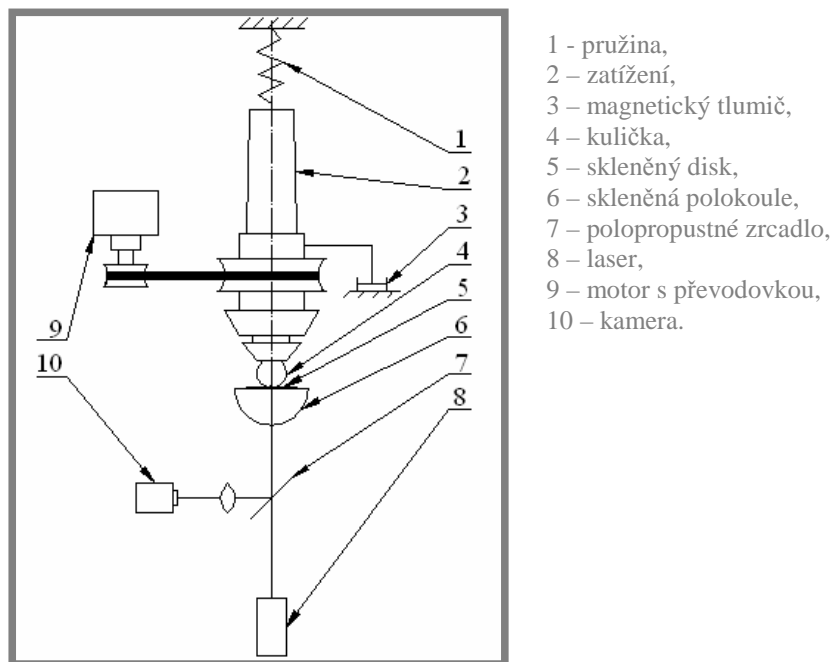
#### 1.1.4 Rotační mikroviskozimetr podle Wonga, Lingarda a Camerona

[4] WONG, PL ; LINGARD, S; CAMERON, A. *High pressure viscosity and shear response of oil using the rotating optical micro-viscometer*. In *Lubricants and Lubrication* B.V. Hong Kong: Elsevier Science B.V, 1995. p. 199-205. ISBN 04448-22631.

*City Polytechnic of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong, R.O.C. (P.L. WONG)*  
*University of Hong Kong, Victoria, Hong Kong, R.O.C. (S. LINGARD)*  
*Imperial College of London, London, England (A. CAMERON, G. R. PAUL)*

Experimentální zařízení je ve zjednodušené formě zobrazeno na obr. 1-4. Při rázu ocelové kuličky 4 a skleněného disku 5 dojde k vytvoření důlku v kuličce. Na skleněném disku je nanesen olejový film. Kulička je uvedena do rotace pomocí řemene, který je poháněn pomocí převodové skříně a motoru 9. Největším problémem tohoto zařízení je zajištění osy rotace tak, aby byla ve středu mazaného kontaktu. Ráz je vytvořen vlastním zatížením 2 a pružinou 1. Tlumení zpětného odrazu je provedeno pomocí magnetického tlumiče 3. Touto metodou autoři testovali minerální olej LVI 260 při pokojové teplotě (okolo 25°C) pěti různými úhlovými rychlostmi: 0,048, 0,221, 0,484, 2,31 a 4,78 rad · s<sup>-1</sup>.

Při kontaktu dochází k deformaci kuličky (vytvoření důlku), která je měřena optickým interferometrem (monochromatická interferometrie). Část dopadajícího světla z laseru je odražena od skleněného disku a část od zdeformované plochy ocelové kuličky. K zajištění dobrého odrazu paprsku je na skleněném disku nanášena vrstva chrómu o tloušťce 20 μm. Odražené paprsky jsou soustředěny pomocí čoček a zrcadlového systému na snímací videokameru. Všechny snímky jsou zaznamenávány na videokazetu pro pozdější analýzu. Vybrané snímky se digitalizují v rozlišení 512 x 512 pixelů a 256 odstínů šedi.



Obr. 1-4 Experimentální, rotační zařízení podle Wonga, Lingarda a Camerona.



**1.1.5 Kyvadlový mikroviskozimetr podle Wonga, Lingarda a Camerona**

[5] WONG, P.L., et al The high pressure impact microviscometer. *Tribology Transaction*. 1992 . vol. 35, no. 3, p. 500-508. ISSN 0569-8197.

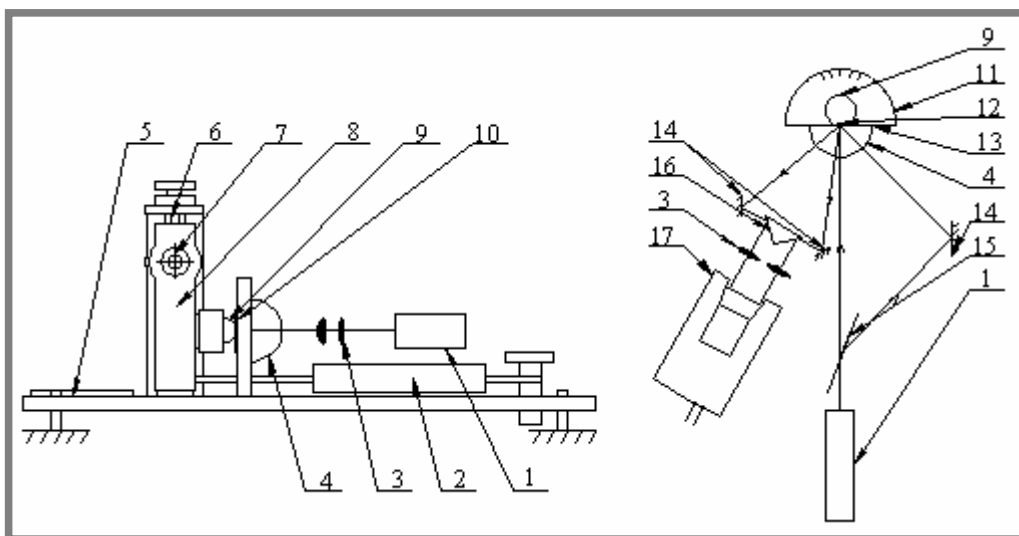
*City Polytechnic of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong, R.O.C. (P.L.WONG)*

*University of Hong Kong, Victoria, Hong Kong, R.O.C. ( S. LINGARD)*

*Imperial College of London, London, England (A. CAMERON, G. R. PAUL)*

Experimentální zařízení je schematicky zobrazeno na obr. 1-5. Kulička 9 je upevněna na konci kyvadla 8, které je zatíženo pružinou 9 s lineární charakteristikou. Příímý ráz kuličky může poškodit skleněnou plochu polokoule 4, a proto se na horní plochu polokoule upevňuje tenký skleněný disk 10 o tloušťce 2 mm s matnou mřížkou o velikosti dílku 0,5 mm x 0,25 mm. Mřížka je nutná k získání ostatních rozměrů důlku, ale ostrost proužků může být rozostřená odrazem světla od mřížky. Spára mezi skleněným diskem a polokoulí je vyplněna tenkou vrstvou smáčivého oleje o indexu lomu 1,5. Protože je index lomu minerálního oleje vždy stejný jako index lomu skla, nedochází k nežádoucímu odrazu na rozhraní mezi olejem a sklem. Skleněný disk a polokoule jsou upevněny k optické lavici, tak jako ostatní optické komponenty. Po rázu mezi skleněným diskem a kuličkou dochází ke zpětnému rázu, a proto je nutné zpětný ráz tlumit. Tlumení je docíleno dvěma připevněnými viskózními tlumiči 6. Tlumič má řadu výhod. Slouží jako vodičko kyvadlového ramene, a tím zabraňuje k příčnému vychýlení kuličky. Kuliček se může užit celá řada, ale pro tento experiment za působení vysokého tlaku se využila wolfram-karbidová kulička o průměru 25,4 mm, která snese tlak až 3 GPa. Při nižších tlacích byl experiment proveden plastovými a skleněnými čočkami s velkými poloměry zakřivení. Pro experimenty s minerálními oleji byly použity ocelové kuličky pokryté chromovou vrstvou.

Deformace profilů kuličky jsou měřeny optickým interferometrem. Zdrojem světla je helium-neonový laser 1 s vlnovou délkou 632,8 nm. Jak ukazuje obr. 1-5, polopropustné zrcadlo 15 dělí světlo na paprsek jedna a dva. Paprsek jedna je přibližně odchýlen 8° od kolmice a paprsek dva přibližně 50° od kolmice. Pomocí těchto dvou paprsků se naměřil index lomu. Absolutní tloušťka může být určena porovnáním počtu proužků a znalostí úhlů dopadu paprsků. Světlo procházející horní plochou polokoule je odraženo lesklým povrchem ocelové kuličky. Paprsky jsou spojeny zrcadlovým systémem a procházejí dvěma objektivy s pětinasobným zvětšením. Experimentální zařízení obsahuje běžně dostupnou videokameru 17, přehrávač, monitor, mikropočítač a videokartu, která umožňuje zachytit a digitalizovat obrazy z videosignálu. Užívaná videokamera a přehrávač má rychlost záznamu 50 snímků za sekundu. Všechny obrazy se uchovávaly na pásku k analyzování. Ke zkoumání dat se užilo rozlišení 512 x 512 pixelů. Rozměr pixelů na měřené ploše byl 0,9  $\mu\text{m}$  a celková plocha měla rozměr okolo 0,46 x 0,23 mm. Analogový signál z videokamery se digitalizoval a zaznamenané snímky byly uloženy do paměti počítače. Nelinearita videozáznamu vedla k výkyvům ve zvětšení celého zorného pole, a proto všechna měření byla opravena pomocí faktorů založených na přesné kalibraci obrazu pole.



Obr. 1-5 Experimentální, kyvadlové zařízení podle Wonga, Lingarda a Camerona.

1 - laser, 2 – tažná pružina, 3 – čočky, 4 – propustná polokoule, 5 – základna, 6 – tlumič, 7 – čep, 8 – kyvadlo, 9 – kulička (razník), 10 – skleněný disk, 11 – úhlová stupnice, 12 – kontakt, 13 – kapalina, 14 – zrcadlo, 15 – polopropustné zrcadlo, 16 – optický hranol, 17 – kamera.

### 1.1.6 Mikroviskozimetr podle O’Neilla a Stachowiaka

[6] O’NEILL, PL; STACHOWIAK, GW. A high shear rate, high pressure microviscometer. *Tribology International*. 1996, vol. 29, no. 7, p. 547-557. ISSN 0301-679X.

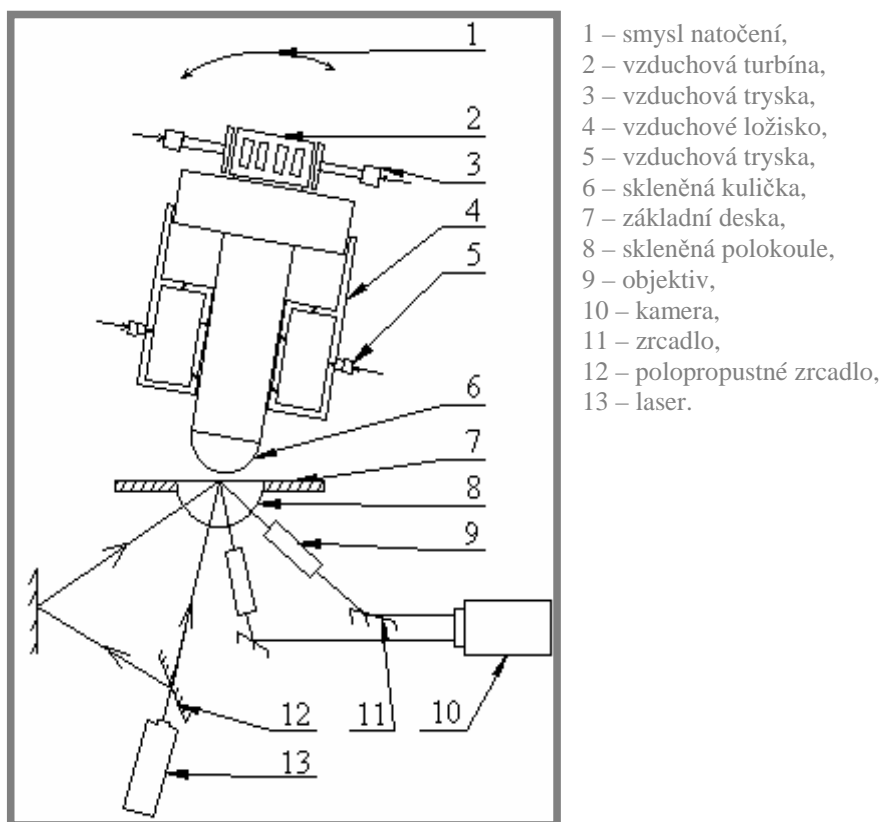
*Tribology Laboratory, Department of Mechanical and Materials Engineering, University of Western Australia, Nedlands 6907, Australia (G.W. STACHOWIAK, O’NEILL)*

Experimentální zařízení je schematicky zobrazeno na obr. 1-6. Rázový viskozimetr umožňuje vytvoření vysokého smykového rychlostního spádu a tlaku. Rychlostní spád dosahuje až  $100\,000\text{ s}^{-1}$ , který je obvyklý pro elasto-hydrodynamické mazání. Tento viskozimetr se skládá ze skleněné kuličky 6, která je připevněna na konci ocelové hřídele. Hřídel je poháněna vzduchovou turbínou 2 a je uložena v aerostatických ložiscích 4. Hřídel je zatížena objímkou. Hmotnost objímky závisí na požadovaném zatížení v kontaktu. Vzduch přiváděný do zařízení má tři funkce:

- 1) Snížení součinitele tření
- 2) Spuštění skleněné kuličky
- 3) Řízení vzduchové turbíny (výsledný rotační pohyb kuličky)

Na základní desce 7 je připevněna skleněná polokoule 8, na kterou je nanášena vrstva kapaliny. Při vhnání vzduchu se skleněná kulička zvedne z povrchu skleněné polokoule a hřídel začne rotovat. Úhlová rychlost skleněné kuličky upevněné na hřídeli je měřena pomocí optického snímače. Po dosažení požadované úhlové rychlosti kuličky se odjistí spouštěcí mechanismus a kulička narazí na skleněnou polokouli. Tím je zajištěno působení vysokého smykového napětí v kapalině. Nakloněním hřídele, jak ukazuje obr. 1-6, se zvýší úhlová rychlost kuličky v kontaktu, a tím je docíleno vyššího smykového napětí. Zrcadla 11 a čočky jsou uspořádány pod polokoulí tak, aby laserové světlo dopadlo do kontaktu mezi

kuličku a polokouli a aby se paprsky odrážely do kamery. Byl užit He – Ne laser o nominálním výkonu 35 mW. Vlnová délka světla tohoto laseru je 632,8 nm.



Obr. 1-6 Experimentální aparát podle O'Neilla a Stachowiaka.

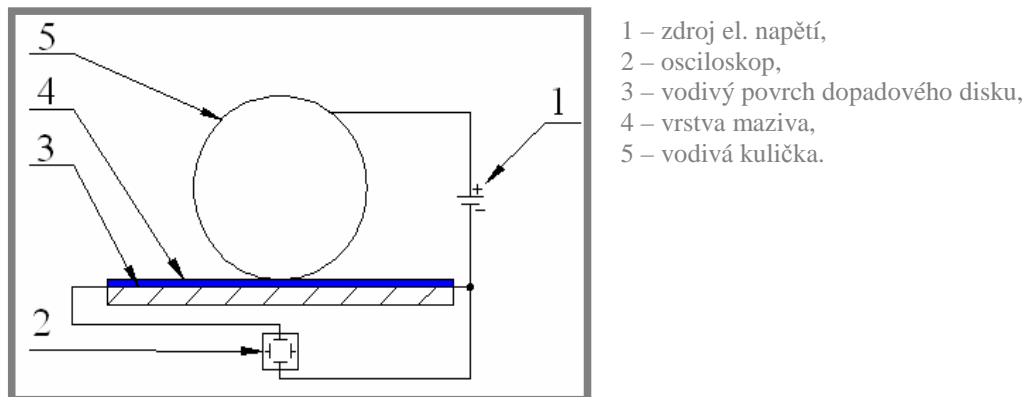
## 1.2 Měřicí metody používané v těchto experimentálních zařízeních

### 1.2.1 Měření pomocí elektrického odporu

Podstatou této metody je připojení vodivé kuličky a vodivého povrchu dopadového disku ke svorkám elektrického napětí. Při dostatečném přiblížení těchto povrchů dojde k průchodu elektrického proudu mezi vodivou kuličkou a vodivým povrchem disku. Na osciloskopu se odečte hodnota napětí. Z napětí se jednoduše vypočítá elektrický odpor, který je závislý na vzdálenosti vodivé kuličky a povrchu disku. Schematicky je tato metoda zobrazena na obr. 1-7.

Je zřejmé, že touto metodou se nezjistí rozložení mazacího filmu po ploše disku. Slouží prakticky jen k nalezení nejmenší vzdálenosti mezi kuličkou a diskem, kde krajním případem je bezprostřední styk kuličky s diskem. Tato metoda byla využita v [2].

1.2  
 1.2.1



Obr. 1-7 Schéma měření pomocí el. odporu.

### 1.2.2 Optická interferometrie

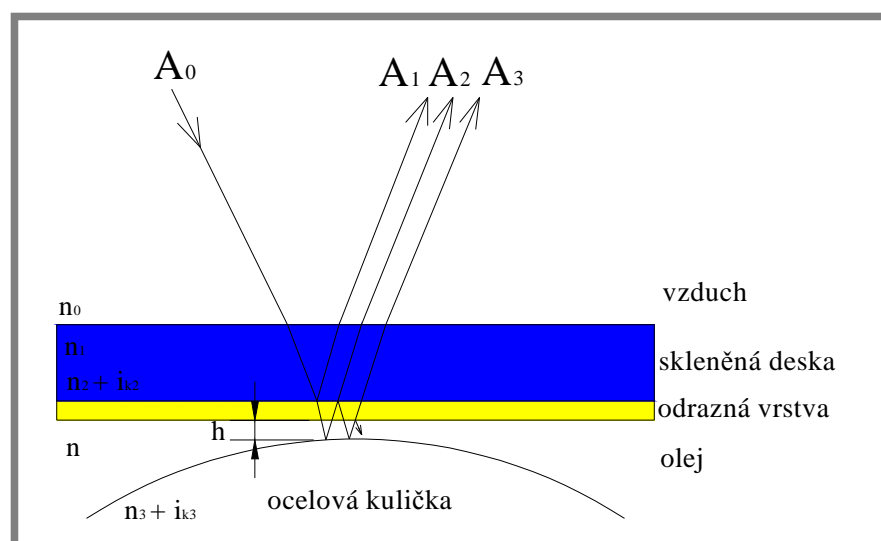
O optické interferometrii je pojednáno v mnoha publikacích, jako například [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Tento text vychází z publikace [7]. Tato metoda při získávání reologických vlastností maziva (tloušťka mazacího filmu) je založena na interferenčním jevu. Aby došlo k interferenčnímu jevu, musí být jedno z kontaktních těles průhledné. Mezi kontaktními tělesy je nanese vrstva zkoumaného maziva. Nejčastěji používaná kontaktní tělesa jsou skleněný disk a ocelová kulička, jako u [1], [3], [4], [5] a [6].

Jak je vidět na obr. 1-8, světelný paprsek o amplitudě  $A_0$  dopadá na rozhraní vzduch – skleněná deska. Jelikož odraz od tohoto rozhraní je nežádoucí, je opatřen povrch skleněné desky antireflexní vrstvou, která zabrání odrazu. Světlo dopadá na další rozhraní skleněná deska – mazivo. Na tomto rozhraní vzniká velice důležitý odraz, a proto se povrch opatřuje odraznou vrstvou (vrstva chrómu). Část paprsku o amplitudě  $A_1$  se od této vrstvy odrazí a část prostupuje mazivem až na rozhraní mazivo – ocelová kulička, kde se paprsek odrazí. Odražený paprsek znovu dopadá na rozhraní mazivo – odrazná vrstva, kde část světelného paprsku o amplitudě  $A_2$  projde a část o amplitudě  $A_3$  se opět odrazí na rozhraní mazivo – kulička. Tento děj se opakuje až do zániku paprsku.

Výsledný interferenční obraz je dán součtem jednotlivých amplitud světelných paprsků odražených od jednotlivých rozhraní.

$$A = A_1 + A_2 + A_3 \dots,$$

Výsledný obraz se zachytává na stínítku, kde se vytvářejí z odražených paprsků interferenční proužky. Proužky se dále mohou zpracovávat pomocí softwaru v počítači, kde každé barvě přiřadí tloušťku mazacího filmu. Podle dopadajícího světla můžeme interferometrii rozdělit na chromatickou a monochromatickou.



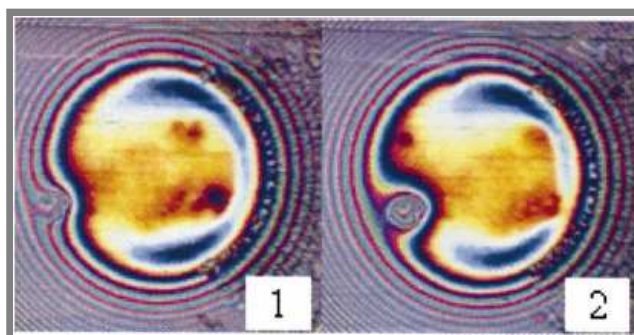
Obr. 1-8 Schematické zobrazení osvětlovacího svazku na jednotlivých rozhraních.

### 1) Chromatická interferometrie

Při konstantním úhlu dopadu světla lze v odraženém světle pozorovat spojitě se měnící barvy, které jsou výsledkem skládání monochromatických interferenčních struktur. Pro zjištění tloušťky velmi tenkých mazacích filmů se využívají dvě metody jejich vyhodnocování.

První metoda je založena na spektrálním rozkladu interferenčních barev, při které vznikají proužky stejného chromatického řádu, pro které je poměr tloušťky mazacího filmu ku vlnové délce konstantní.

Druhá metoda je založena na porovnávání barev mezi zkoumaným interferenčním obrazcem a interferenčním obrazcem získaným pomocí interferenční soustavy o známé geometrii. Tato metoda byla použita v experimentálním zařízení [3].

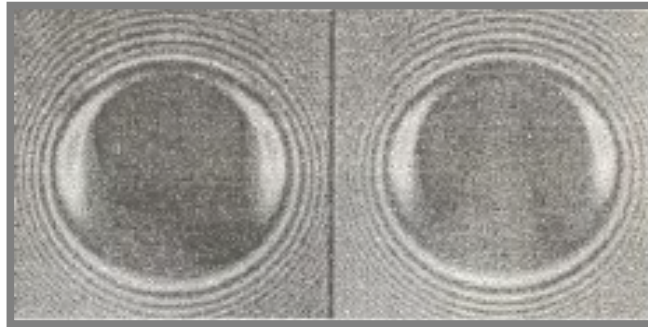


Obr. 1-9 Interferogram získaný chromatickou interferometrií [13].

### 2) Monochromatická interferometrie

Při monochromatické interferometrii se často užívá jako zdroj světla laser, který zprostředkovává oproti klasickým osvětlením (žárovky, výbojky, atd.) světlo konstantních vlnových délek. Vzniklé interferenční obrazce se skládají z tmavých a světlých pruhů. Tloušťka mazacího filmu se vyhodnotí na základě počtu

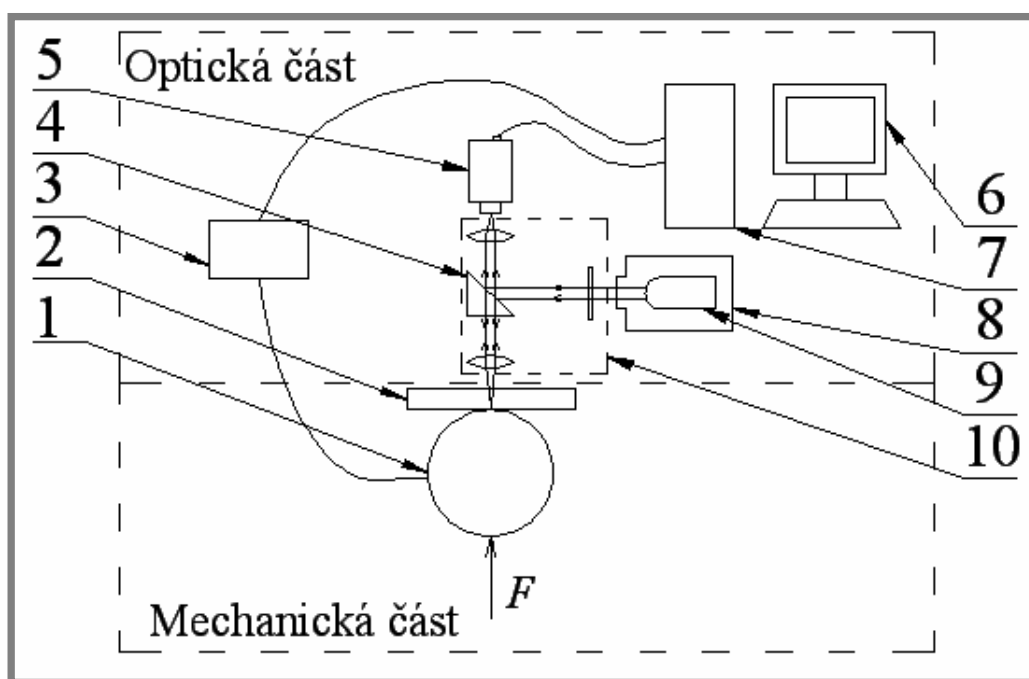
interferenčních proužků. Tato metoda byla použita u experimentálního zařízení [1], [4], [5] a [6].



**Obr. 1-10** Interferogram získaný monochromatickou interferometrií [11].

## 2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

Rázový viskozimetr je zařízení, které se skládá z mechanické a optické části. Mechanická část zařízení slouží k vyvození rázu dvou těles. Optickou částí se měří tloušťka mazacího filmu, z níž se vyvozují reologické vlastnosti maziva. Schéma rázového mikroviskozimetru je na obr. 2-1.



Obr. 2-1 Schéma rázového mikroviskozimetru.

1 – kulička, 2 – skleněná deska, 3 – synchronizace, 4 – dělič svazků, 5 – kamera, 6 – monitor, 7 – počítač, 8 – zdroj světla, 9 – xenonová výbojka, 10 – mikroskop.

### 2.1 Mechanická část zařízení

2.1

Tato část zařízení slouží k vyvození rázu kontaktních těles, mezi nimiž se nachází zkoumané mazivo. Mechanické části zařízení, které jsou popsány v kapitole 1, se odlišují především v užití kontaktních těles, ve způsobu zatěžování, v tlumení zpětného rázu, v pohonu kontaktních těles a v synchronizaci mechanické části s optickou částí.

#### 1) Kontaktní tělesa

Kontaktní tělesa jsou základními prvky mechanické části zařízení. Nejčastěji se používají: ocelová kulička, popřípadě skleněná kulička a skleněný disk, nebo skleněná polokoule. Tato konfigurace se použila u [1], [3], [4], [5] a [6]. U zařízení [2] se k simulaci rázu užilo vnějšího ložiskového kroužku a ocelové kuličky. Velikost kontaktních těles ovlivňuje chování maziva při zatěžování. V experimentálních zařízeních je užito různých průměrů kuliček, popřípadě průměrů ložiskových kroužků. Ve většině zařízení se dají měnit kuličky různých průměrů. Materiál kontaktních těles závisí na maximálním Hertzově tlaku. Při vyšších tlacích se použila ocelová kulička (nejčastěji ložisková ocel) a borosilikátové sklo (při



vyšším tlaku se použilo safíru). Při nižších tlacích se užila skleněná kulička místo ocelové kuličky.

### 2) Zatěžování

Vhodně zvoleným zatěžováním se vyvolá ráz mezi tělesy. Zatížení se může provést mechanicky, hydraulicky, pneumaticky, elektricky nebo kombinací předchozích způsobů. Mechanické zatížení je vyvozeno pákovým mechanismem, kde na jednom konci je kontaktní těleso a na druhém konci je závaží, pomocí něhož se zvyšuje, popřípadě snižuje velikost síly při rázu těles. Tento mechanismus je využit u [2] a [3]. Mimo pákového mechanismu se využívá pádu kuličky zatížené závažím, jako u [1] a [6], kyvadla s pružinou [5] nebo pádu kuličky zatížené závažím a pružinou [4], kde je síla při rázu určena hmotností celého držáku s kuličkou a závažím. Velikost této síly lze změnit hmotností závaží nebo upravením tlumení tlumiče při pádu.

### 3) Tlumení

Při rázu dvou těles dojde díky elasticitě obou materiálů k zpětnému odpružení. Po odpružení dochází vlivem závaží opět k rázu. Proces se opakuje, dokud nedojde k ustálení soustavy. Aby se předcházelo zmíněnému procesu, používají se tlumiče. V [4] se používá magnetický tlumič a v [6] se používá jako tlumič aerostatické ložisko. Tlumič nemusí sloužit jen pro tlumení, ale také k vedení pohybu jako tomu je u [4].

### 4) Pohon těles

V praxi často dochází při rázu dvou těles k relativnímu pohybu mezi kontaktními tělesy. Toto se vyskytuje např. u styku boků ozubených kol, styku ložiskové kuličky s vnitřním nebo vnějším kroužkem. Při těchto procesech dochází nejen k rázu těles, ale také k jejich tření. To může způsobit prolomení mazacího filmu, aniž by došlo k překročení přípustného tlaku. K simulaci takovýchto problémů je zapotřebí, aby se jedno nebo obě tělesa při rázu pohybovala. Pohyb se uskutečňuje rotací vnějšího ložiskového kroužku pomocí vzduchové trysky [2], rotací kuličky nebo skleněného disku pomocí klínového řemene a servomotoru [4], nebo rotací kuličky pomocí vzduchové turbíny [6].

### 5) Synchronizace

K zachycení potřebných snímků slouží synchronizace. Pomocí synchronizace začne kamera snímat pouze potřebný časový úsek při měření. Správným nastavením synchronizace se získá potřebný počet snímků a nepotřebné snímky tak nezaplňují paměť počítače. Synchronizace je proces, při kterém se zpracovává signál (například skokovým napětím ze snímače) ke kameře, která začne po určité době snímat.

## **2.2 Optická část zařízení**

Optická část zařízení slouží k vizualizaci kontaktu. Zkonstruovaná mechanická část viskozimetru se upevní pod optické zařízení v laboratoři na Ústavu konstruování v Brně. V laboratoři se užívá průmyslového mikroskopu s episkopickým osvětlovačem a s prodlouženou pracovní vzdáleností (10 mm – 15 mm). Součástí tohoto mikroskopu jsou objektivy se zvětšením 5x, 10x a 20x. K osvětlení se používá zdroj světla s xenonovou výbojkou (bílé světlo) o světelném výkonu 1 kW. Do kontaktu se dostane díky ztrátám jen 10% světla. Výbojka je vzhledem



k vysokému výkonu chlazena připojeným chladičem. Světlo ze zdroje prochází filtrem, který odstraní nežádoucí infračervené a ultrafialové světlo. Filtrované světlo dopadá kolmo na skleněný disk. Od jednotlivých rozhraní se odráží zpět do mikroskopu. Světlo je pak dále rozděleno polopropustným zrcadlem na dva svazky světla. První svazek směřuje do okuláru, kde můžeme průběh kontaktu sledovat okem a druhý svazek směřuje do videokamery, která zaznamenává snímky s vysokou frekvencí do paměti. Běžně používaná rychlost snímání je  $450 \text{ s}^{-1}$  v plném rozlišení. Pomocí digitalizační karty v počítači se převádí analogový obraz na digitální. Kamera je pomocí portu připojena k počítači, kde se uchované snímky analyzují pomocí softwaru. Pomocí softwaru lze nastavit rychlost snímání, rozlišení a délku závěrky. Závěrka slouží k nastavení doby, po kterou bude kamera snímat. To je velice důležité z důvodu odstranění nepotřebných snímků, které značně zaplňují paměť. Závěrku je možno spustit přímo z počítače před spuštěním akce nebo pomocí synchronizace, která aktivuje závěrku.

### 2.3 Vyhodnocení snímků

2.3

---

Získané interferogramy se dále upravují pomocí softwarů v počítači. V laboratoři na Ústavu konstruování VUT v Brně se používá k vyhodnocování software Achilles. Existuje mnoho vyhodnocování ke stanovení tloušťky a tvaru mazacího filmu [7], [8], [11], [12]. Jak už bylo řečeno v kapitole 2, pro zjištění tloušťky velmi tenkých mazacích filmů se využívají dvě metody jejich vyhodnocování. První metoda je založena na spektrálním rozkladu interferenčních barev, při které vznikají proužky stejného chromatického řádu, pro které je poměr tloušťky mazacího filmu ku vlnové délce konstantní. Druhá metoda je založena na porovnávání barev mezi zkoumaným interferenčním obrazcem a interferenčním obrazcem získaným pomocí interferenční soustavy o známé geometrii. V [11] jsou na získaných interferogramech prováděny tyto operace: zvýšení kontrastu interferogramů, odstranění nerovnoměrnosti osvětlení zorného pole, korekce zkreslení obrazu způsobenou necitlivostí snímání kamery, zprůměrnování interferogramů a číslicová filtrace interferogramů pomocí maticové konvoluce. Po těchto operacích software přiřadí každému odstínu v interferogramu hodnotu, která představuje tloušťku mazacího filmu. Hodnoty se často vynášejí do 3-D diagramů. Diagramy získané touto metodou vyhodnocování daleko lépe vystihují rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktu.

### 3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem je navrhnout rázový viskozimetr, který se bude moci upevnit pod mikroskop v laboratoři na Ústavu konstruování VUT v Brně. V laboratoři se užívá průmyslový mikroskop s episkopickým osvětlovačem a s prodlouženou délkou pracovní vzdálenosti. Z ekonomického hlediska, mikroskopu a prostoru kolem něj lze vyvodit tyto omezení:

#### 1) Rozměry zastavěné plochy

Výška rázového mikroviskozimetru vychází z výšky, ve které se nachází objektiv mikroskopu nad základní deskou. Výšku objektivu lze měnit v rozsahu 35 mm. Největší výška objektivu nad základní deskou je 179 mm. Výšku možného prostoru pro rázový mikroviskozimetr lze zvětšit vypodložením stojanu, na kterém je upevněn mikroskop. Jelikož je objektiv mikroskopu v dostatečné vzdálenosti od sloupu, tak šířka a délka mikroviskozimetru nejsou rozhodující.

#### 2) Snímání kontaktu

V laboratoři se využívá ke snímání kontaktu a jeho analýze episkopický mikroskop, kamera, software, monitor o vysokém rozlišení a popř. synchronizace. Kontakt je osvětlován shora bílým světlem o výkonu 1 kW. Po odražení světla od jednotlivých vrstev se vrací zpět do mikroskopu. Světelný svazek je v mikroskopu dělen na dva svazky. Jeden svazek je odražen do okuláru a druhý do vysokorychlostní kamery IDT X-Vision 3. Tato kamera je schopna pořídit až 630 snímků za sekundu. Vzhledem ke zvětšení mikroskopu a velikosti zorného pole je nutno vytvořit kontaktní plochu o velikosti minimálně 0,4 x 0,4 mm.

#### 3) Omezení rozpočtu

Je snahou vytvořit mechanickou část rázového mikroviskozimetru v cenovém rozmezí 20 000 Kč až 30 000 Kč. Toto cenové rozpětí dovoluje zkonstruovat pouze jednoduchou konstrukci rázového mikroviskozimetru s běžně vyráběnými komponenty (ložiska, kuličky, atp.).

## 4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

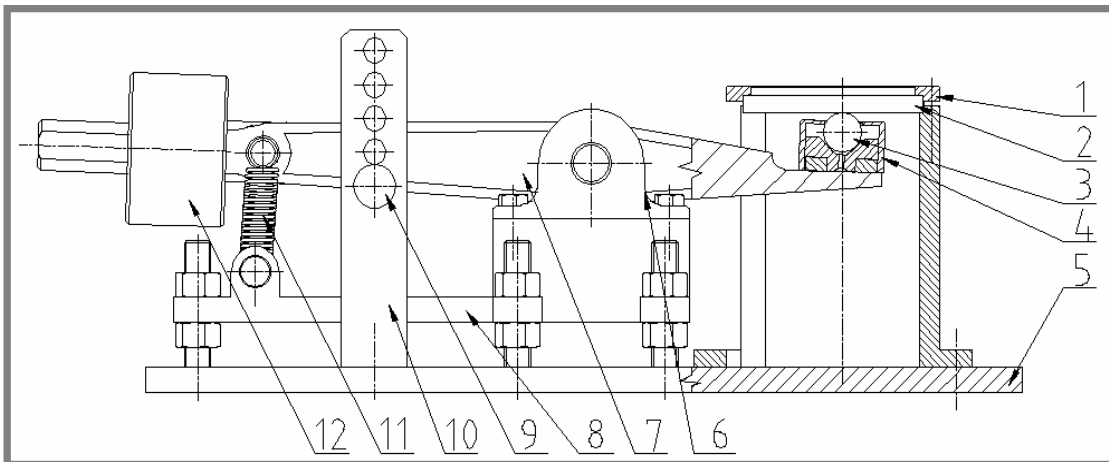
K řešení problému je přistupováno na základě získaných znalostí z bakalářského studia na VUT v Brně. Snahou je podat řešení, které respektuje cíle uvedené v kapitole 3. Především dodržení maximálních rozměrů zastavěné plochy dané prostorem pod mikroskopem. Zařízení musí být jednoduše ovladatelné a upevnitelné ke stolu pod mikroskop.

Konstrukce bude vycházet z doposud navrhnutých rázových mikroviskozimetrů v kapitole 1. Z důvodu používaných mikroskopů v laboratoři je nejbližší řešení zařízení [3]. Konstrukce bude navrhována v programu Autodesk Inventor Professional 2008. Výkres sestavy, výrobní výkresy a kusovník budou zpracovány v programu AutoCAD 2007.

## 5 NÁVRH VARIANT A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

### 5.1 Varianta č. 1

Varianta je schematicky nakreslena na obr. 5-1. Vychází z experimentálního zařízení [3]. Ráz mezi kuličkou 3 a skleněným diskem 2 je vyvozen zatížením na konci dvojzvrtné páky 7 pomocí závaží 12 a pružiny 11. Toto zařízení neumožňuje rotaci kontaktních těles. Na druhém konci páky je upevněna kulička. Kulička se nachází v pouzdře 4 kvůli možnému vypadnutí. Pouzdro se skládá z víka a vložky pro kuličku. Vložka je připevněna pomocí čtyř šroubů ke konci páky. Ve vložce je kuželová dutina s vrcholovým úhlem 90°. V páce je nalisovaný čep, který se otáčí v ložiscích uložených v ložiskových tělesech 6. Ložisková tělesa jsou připevněna k polohovatelné desce 8, která umožňuje nastavení výšky ramena při případné výměně kuličky o jiném průměru. Nastavení výšky polohovatelné desky se provádí pomocí čtyř šroubů. Pružiny jsou upevněny k čepům. Jeden čep je upevněn k rameni a druhý čep je upevněn k polohovatelné desce. Nastavení vychýlení páky je umožněno pomocí vysouvacího čepu 9, který je uložen ve stojanu 10. Ve stojanu je vyvrtáno pět děr pro nastavení vychýlení ramena. Stojan je připevněn k základní desce pomocí dvou šroubů. Skleněný disk je sevřen mezi válcem a přírubou pomocí šesti šroubů M6. Různým vychýlením ramena nebo změnou hmotnosti závaží se dá měnit požadovaná rychlost při dopadu kuličky na skleněný disk. Vychýlení ramena se provádí pouze ručně.



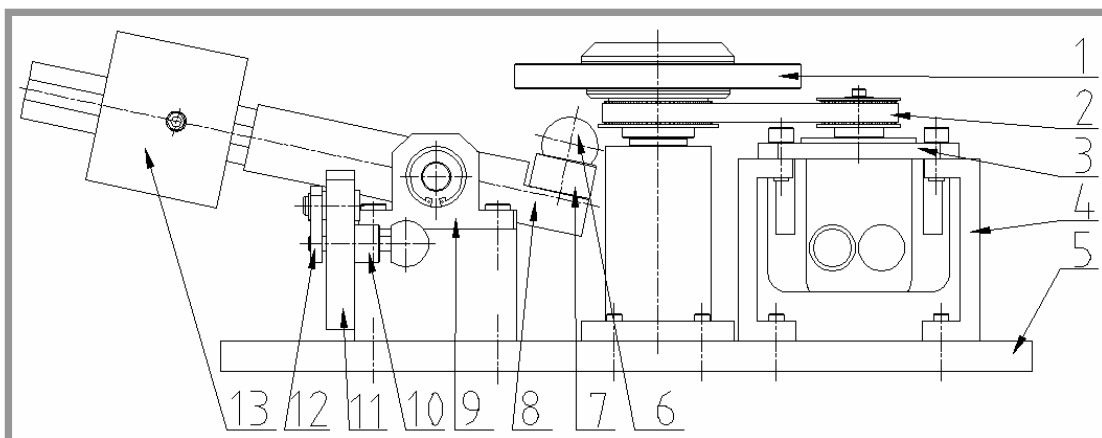
Obr. 5-1 Návrh varianty č. 1.

1 – příruba, 2 – skleněný disk, 3 – kulička, 4 – pouzdro pro kuličku, 5 – základní deska, 6 – ložiskové těleso, 7 – dvojzvrtná páka, 8 – polohovatelná deska, 9 – čep, 10 – stojan, 11 – pružina, 12 – závaží.

### 5.2 Varianta č. 2

Varianta je schematicky nakreslena na obr. 5-2. Vychází opět z experimentálního zařízení [3]. Ráz mezi kuličkou 6 a skleněným diskem 1 je vyvozen zatížením na konci dvojzvrtné páky 8 pomocí závaží 13. Na druhém konci páky je připevněna vložka 7 na kuličku. Z důvodu vypadnutí kuličky se kulička přilepí k vložce. V páce je nalisovaný čep, který se otáčí v ložiscích uložených v ložiskových tělesech 9. Skleněný disk je připevněn k hřídeli, na kterou je nalisovaná řemenice pro ozubený řemen 2. Hřídel je uložena ve dvou radiálních ložiscích a zajištěna pojistným kroužkem. K pohonu skleněného disku slouží ozubený řemen a servomotor 3.

Pomocí frekvenčního měniče se dají měnit otáčky servomotoru, a tím docílit potřebné otáčky skleněného disku. Kulička nedopadá v ose skleněného disku, a proto je skleněný disk při rázu velice namáhaný. Nastavení stejné výchylky páky pro opakovatelné měření je provedeno pomocí mechanismu složeného z výškově nastavitelné desky 11, pojistky 10 a páky 12. Po ručním uvolnění pojistky dojde k odjištění páky.

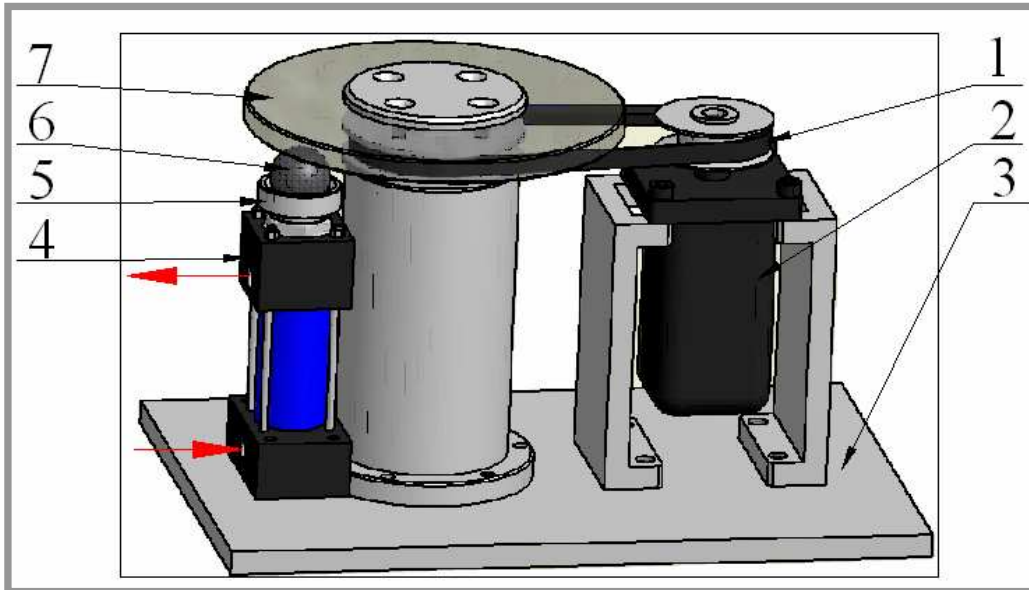


Obr. 5-2 Návrh varianty č. 2.

1 – skleněný disk, 2 – ozubený řemen, 3 – servomotor, 4 – stojan servomotoru, 5 – základní deska, 6 – kulička, 7 – vložka kuličky, 8 – dvojjzratná páka, 9 – ložiskové těleso, 10 – pojistka, 11 – nastavitelná deska, 12 – páka, 13 – závaží.

### 5.3 Varianta č. 3

Varianta je schematicky nakreslena na obr. 5-3. V tomto návrhu je ráz iniciován hydraulickým zařízením. K tomuto zatížení slouží hydraulický válec 4 ISO 6020/2 s uchycením patkou vpředu i vzadu od firmy VEGA [16]. Maximální tlak v hydraulickém válci může být 160 bar. Zdvih tohoto válce je 20 mm a maximální rychlost pístnice dosahuje až  $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Hydraulický píst obsahuje škrťací ventil, pomocí něhož se upravuje průtoková rychlost kapaliny, a tím se mění i rychlost pohybu pístnice. Na pístnici je připevněna vložka 5 s kuličkou 6. Pohon a konstrukční řešení uložení skleněného disku 7 je stejný jako u varianty číslo 2. Tento návrh je velice jednoduchý a kompaktní. Nevýhodou tohoto zařízení je nutnost tlakového čerpadla pro přívod kapaliny do hydraulického válce.



Obr. 5-3 Návrh varianty č. 3.

1 – ozubený řemen, 2 – servomotor, 3 – základní deska, 4 – hydraulický válec, 5 – vložka, 6 – kulička, 7 – skleněný disk.

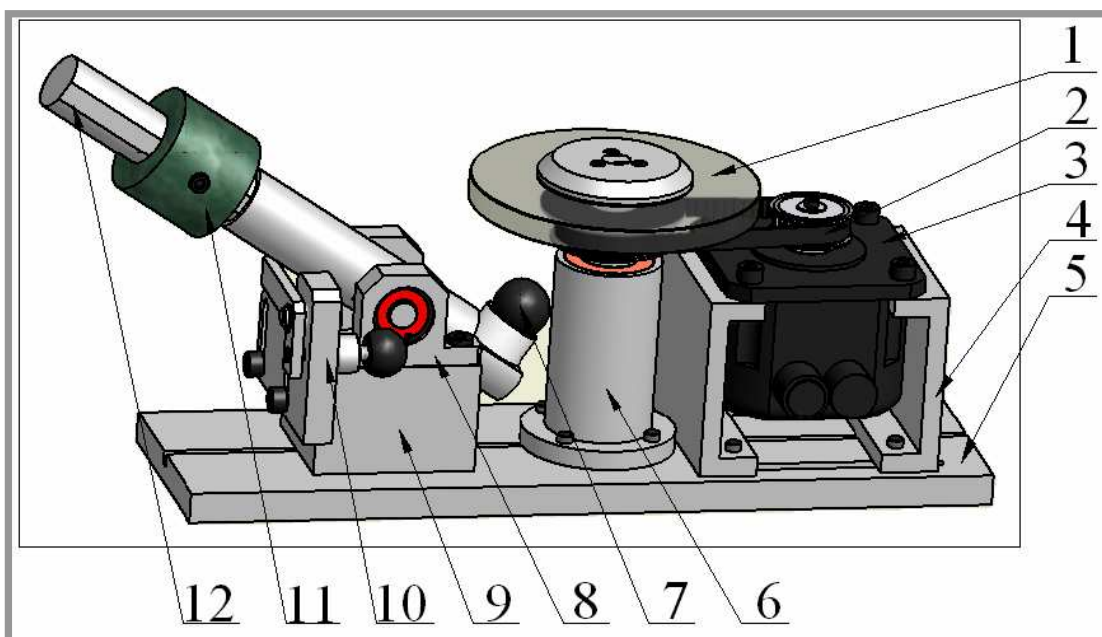
#### 5.4 Výběr optimální varianty

Varianta č. 1 je konstrukčně jednoduchá a kulička dopadá v ose skleněného disku. Nevýhodou je nepohyblivost disku. Ze všech tří variant je tato konstrukce nejméně nákladná. U varianty č. 2 je umožněna rotace disku pomocí servomotoru. Tím je toto experimentální zařízení univerzálnější. Díky pohonu disku kulička nedopadá v ose skleněného disku, a proto je skleněný disk daleko více namáhán. Varianta č. 3 je konstrukčně nejjednodušší, ale také nejdražší. Také umožňuje rotaci skleněného disku. Největší výhodou tohoto zařízení je univerzálnost a řízení rychlosti dopadu kuličky na skleněný disk pomocí škrtících ventilů a tlakového agregátu. Na druhou stranu tlakový agregát je velice finančně nákladný.

Jelikož v laboratoři není tlakový agregát, byla by tato varianta několikanásobně dražší. Proto i z důvodu univerzálnosti je zvolena varianta č. 2.

## 6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Hlavními částmi viskozimetru jsou kontaktní tělesa (kulička 7 a disk 1), pohon disku, zatěžování a mechanismus pro odjištění a nastavení výchylky páky 10. Ráz mezi kontaktními tělesy je vyvozen závažím 11 na konci dvojzvrtné páky 12. V páce je nalisován čep uložený ve vnitřním kroužku ložiska. Vnější kroužek ložiska se nachází v ložiskovém tělese 8 upevněném k polohovatelné desce 9. Polohovatelná deska je připevněna k základní desce 5. Kulička je přilepena k vložce. Vložka je upevněna pomocí dvou šroubů na konci dvojzvrtné páky. Skleněný disk je uložen na hřídeli a zajištěn proti axiálnímu posuvu a prokluzu ocelovými disky. Hřídel je uložena ve vnitřních kroužcích ložisek, jejichž vnější kroužky jsou uloženy ve válci 6, který je připevněn k základní desce. Skleněný disk je poháněn servomotorem 3 pomocí ozubeného řemene 2. Rychlost pádu kuličky je možno nastavit posunutím závaží na páce, zvětšením hmotnosti závaží nebo změnou výchylky páky. V základní desce je vyfrézovaná drážka pro zajištění přesné polohy jednotlivých komponentů. Komponenty jsou připevněny k základní desce pomocí šroubů s válcovou hlavou. Základní deska poslouží k upnutí na stůl pod mikroskop v laboratoři.



Obr. 6-1 Model rázového viskozimetru.

1 – disk, 2 – ozubený řemen, 3 – servomotor, 4 – stojan servomotoru, 5 – základní deska, 6 – válec, 7 – kulička, 8 – ložiskové těleso, 9 – polohovatelná deska, 10 - mechanismus pro odjištění a nastavení výchylky páky, 11 – závaží, 12 – páka.

### 6.1 Kontaktní tělesa

#### 6.1.1 Mechanické charakteristiky materiálu kontaktních těles

##### 1) Kulička

Při experimentech se užije ložisková kulička. Ložiskové kuličky jsou dostupné jak v palcových mírách, tak i v metrických mírách. Materiály používané pro výrobu



ložiskových kuliček jsou ložisková ocel, tvrzená a netvrzená nerezová ocel, keramika ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ), karbid wolframu a nástrojové oceli. Nejpoužívanějším materiálem je ložisková ocel ČSN 14 109 (chromová ocel AISI 52100), která má vynikající povrchové vlastnosti, vysokou tvrdost a pevnost díky povrchovému kalení. Kuličky z netvrzených nerezových ocelí ČSN 17 240 a ČSN 17 352 vykazují dobré korozivzdorné vlastnosti. Zvýšení korozivzdornosti se často provádí popouštěním. Kuličky z tvrzených nerezových ocelí ČSN 17 024 a ČSN 17 042 vykazují vysokou tvrdost kombinovanou s korozivzdorností. Kuličky ze standardního 99,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vykazují vynikající odolnost proti otěru, korozi a zároveň vykazují rozměrovou stabilitu až do teplot  $1400^\circ\text{C}$ . Kuličky z  $\text{ZrO}_2$  mají vysokou životnost a snižují opotřebení komponentů. Užívají se v korozním a erozním prostředí. Kuličky z  $\text{Si}_3\text{N}_4$  mají vynikající mechanické vlastnosti. Používají se ve vysokootáčkových ložiscích. Kuličky WC vykazují dobrou šokovou odolnost. Mají vysokou pevnost a otěruvzdornost. Přehled mechanických vlastností kuliček z nejpoužívanějších materiálů je uveden v tab. 6-1.

Tab. 6-1 Mechanické vlastnosti ložiskových kuliček [14].

Materiál	Youngův modul pružnosti (GPa)	Poissonova konstanta (1)	Hustota ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Tvrdost
Ložisková ocel (AISI 52100)	207	0,3	7830	60-66 HRC
Nitrid křemíku ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )	310	0,24	3220	1400-1700 HV
Karbid wolframu (WC)	641	0,26	14950	1500-1750 HV

## 2) Disk

Disk se opatřuje z vrchní strany antireflexní vrstvou a spodní strana polopropustnou vrstvou, nejčastěji naprašováním vrstvy chrómu. Disky se vyrábějí z borosilikátového skla BK7 a safíru. Borosilikátové sklo vykazuje o mnoho horší mechanické vlastnosti než safír, ale je podstatně levnější. V navrhnutém viskozimetru se užije borosilikátového skla BK7. Mechanické vlastnosti používaných materiálů jsou v tab. 6-2. Přípustný tlak v kontaktu dle Hertzovy teorie závisí na materiálu kontaktních těles, poloměru zakřivení a velikosti zatížení.

Tab. 6-2 Mechanické vlastnosti optických disků [15].

Materiál	Youngův modul pružnosti (GPa)	Poissonova konstanta (1)
Borosilikátové sklo	81	0,208
Safír	465	0,3

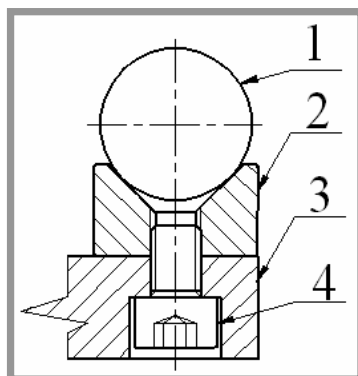
## 6.1.2 Uložení kontaktních těles

### 1) Kulička

Kulička 1 je uložena ve vložce 2, která je připevněna pomocí šroubu s válcovou hlavou 4 ke konci dvojzvrtné páky 3 (obr. 6-2). Ve vložce je vytvořena kuželová



dutina s vrcholovým úhlem  $90^\circ$ . Vložku je možno použít pro kuličky o průměru 15 mm až 30 mm. Pro jiný rozsah průměrů kuliček je nutno vyrobit jinou vložku. Kulička je připevněna k vložce pomocí lepidla, které je možno rozpustit například v acetonu.

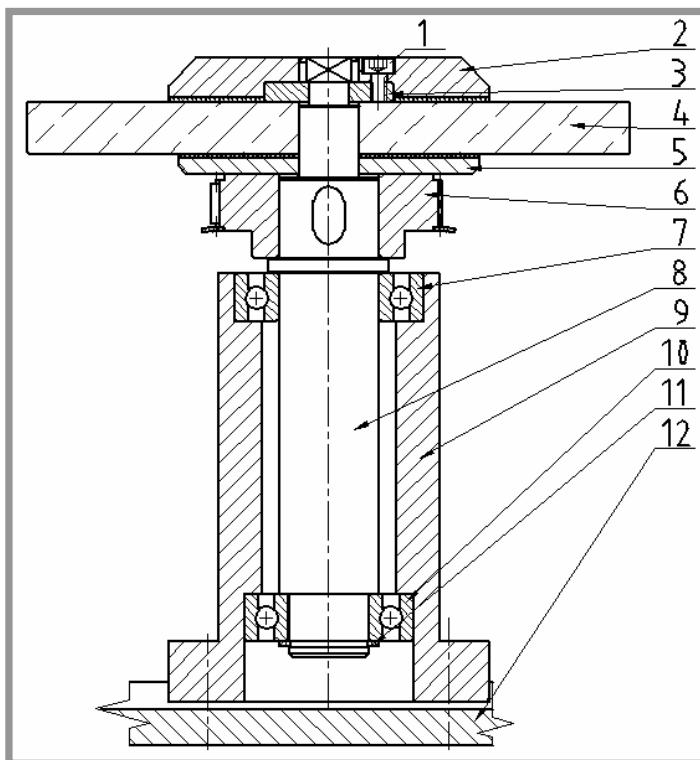


- 1 – kulička,
- 2 – vložka,
- 3 – konec páky,
- 4 – šroub s válcovou hlavou.

Obr. 6-2 Uložení kuličky.

## 2) Disk

Skleněný disk 4 je sevřený mezi ocelovými disky 2 a 5 nasazenými na hřídeli 8. Mezi ocelovým diskem a skleněným diskem je z důvodu prokluzu a poškození skleněného disku pryžový kroužek. Sevření je docíleno třemi šrouby s válcovou hlavou 1, které přitahují horní disk s pryžovým kroužkem ke skleněnému disku. Na hřídeli je uložena ozubená řemenice 6, která přenáší kroučící moment pomocí pera z ozubeného řemene hnaným servomotorem na hřídel, který se otáčí se skleněným diskem. Hřídel je uložena ve dvou radiální kuličkových ložiscích 7 a 10 a zajištěna pojistným kroužkem 11. Hřídel a radiální kuličková ložiska jsou uložena ve válci 9, který je vymezen drážkou a připevněn pomocí čtyř šroubů s válcovou hlavou k základní desce 12.

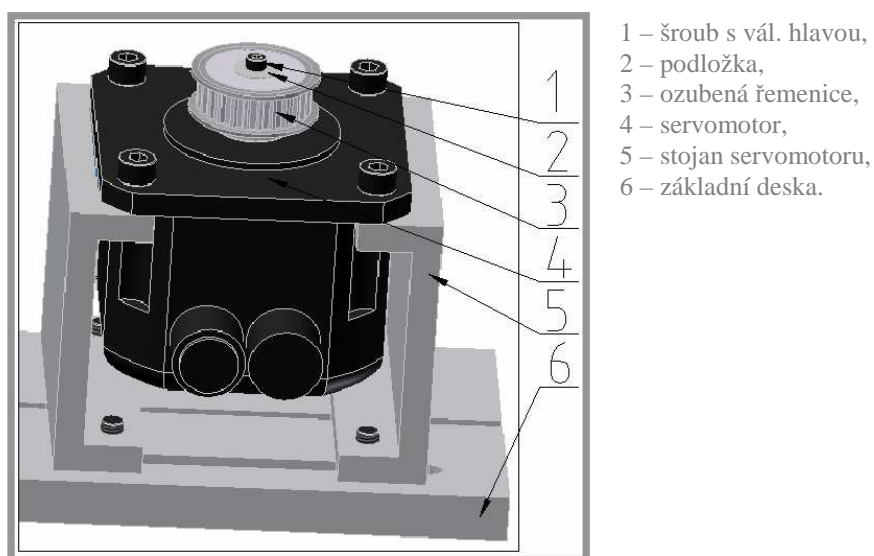


- 1 – šroub s vál. hlavou,
- 2 – ocelový disk,
- 3 – matice,
- 4 – skleněný disk,
- 5 – ocelový disk,
- 6 – ozubená řemenice,
- 7 – kuličkové ložisko,
- 8 – hřídel,
- 9 – válec,
- 10 – kuličkové ložisko,
- 11 – pojistný kroužek,
- 12 – základní deska.

Obr. 6-3 Uložení skleněného disku.

## 6.2 Pohon

K pohonu skleněného disku slouží servomotor F504 D 4 (výrobce Bautz), který má na výstupní hřídeli pro přenos kroutícího momentu pero. Na výstupní hřídeli servomotoru je nasazena řemenice 3 a zajištěna proti vysunutí podložkou 2 a šroubem s válcovou hlavou 1. Rotace skleněného disku je uskutečněna synchronním převodem do pomala mezi řemenicí servomotoru a řemenicí na hřídeli pohánějící skleněný disk. Převodový poměr vychází z průměrů řemenic a je  $i_{12} = 1,45$ . Ozubené řemenice a ozubený řemen jsou od firmy TYMA CZ s.r.o [17]. Řemenice jsou dodávány s předvrtanou dírou, a proto je nutné upravit díru a vytvořit drážku pro pero. Napínání ozubeného řemene je mechanické. Slouží k tomu drážky pro šrouby s válcovou hlavou v základní desce 6. Při napínání jsou šrouby povoleny a stojan servomotoru 5 je ručně odtažen od válce skleněného disku. Otáčky servomotoru se pak řídí pomocí frekvenčního měniče.



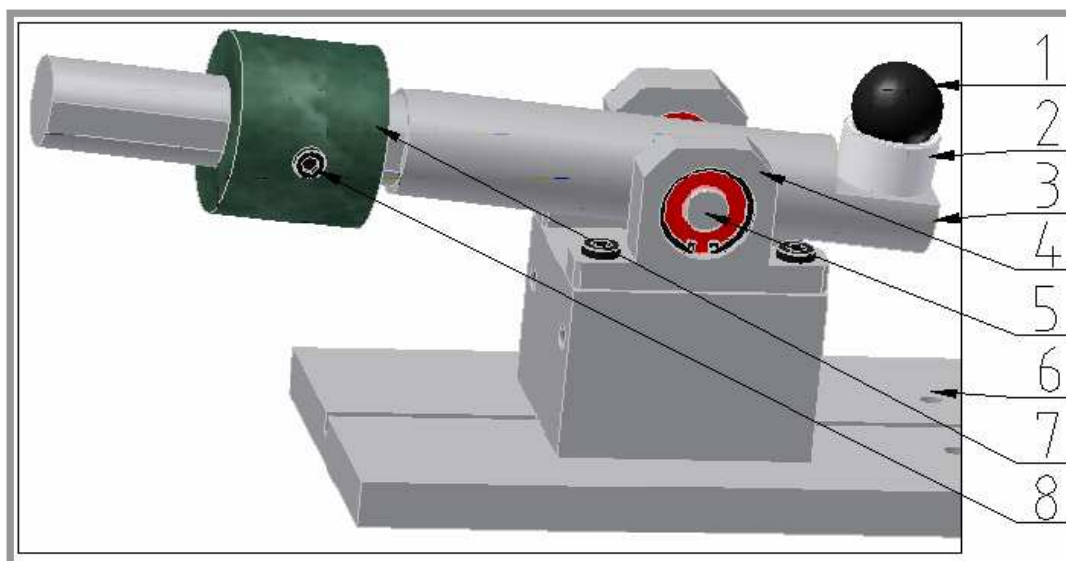
Obr. 6-4 Pohon.

Tab. 6-3 Parametry servomotoru F 504 D [17].

Veličina	Značka	Jednotka	Hodnota
Jmenovitý moment	$M_n$	N · m	0,8
Jmenovitý výkon	$P_N$	W	528
Jmenovité otáčky	$n_N$	min <sup>-1</sup>	6300
Hmotnost	$m$	kg	2,5

## 6.3 Zatěžování

K vyvození rázu slouží dvojjzvrtná páka 3, na jejímž jednom konci je připevněná vložka 2 s kuličkou 1 a na druhé straně závaží 7 (obr. 6-5). Do závaží je vyvrtaná díra se závitem pro šroub s válcovou hlavou 8, pomocí něhož se ustanoví poloha závaží na rameni. V páce je nalisován čep 5, který je uložen ve vnitřních ložiskových kroužcích a je zajištěn pojistným kroužkem. Vnější ložiskové kroužky jsou uloženy v ložiskových tělesech 4. Ložisková tělesa jsou připevněna pomocí šroubů s válcovou hlavou k polohovatelné desce, která je vymezena drážkou v základní desce 6 a připevněna čtyřmi šrouby s válcovou hlavou.



Obr. 6-5 Závaží na páce.

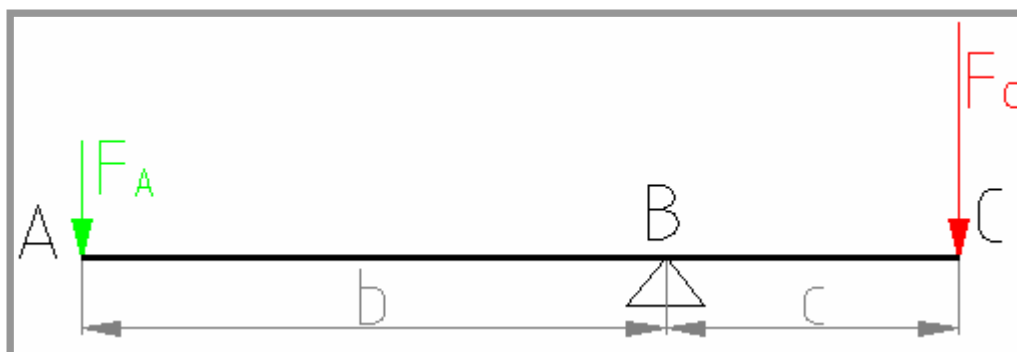
1 – kulička, 2 – vložka, 3 – páka, 4 – ložiskové těleso, 5 – čep, 6 – základní deska, 7 – závaží, 8 – šroub s válcovou hlavou.

### 6.3.1 Výpočet hmotnosti závaží

6.3.1

Jedná se o zjednodušený výpočet daný statickým zatížením od závaží (obr. 6-6). Skutečná síla, která vznikne při rázu je mnohonásobně větší než statická síla. Tudíž hmotnost získaná výpočtem vyjadřuje minimální hmotnost, kterou je potřeba zatížit konec ramena, aby se vytvořila minimální plocha kontaktu styku kuličky a skleněného disku při snímání.

Síla  $F_A$  vyjadřuje tíhu od závaží. Síla  $F_C$  vyjadřuje sílu, kterou na sebe působí kulička a disk při statickém zatížení. Výpočet této síly vychází z Hertzovy teorie kontaktu uvedené v [19]. Pro zjednodušení je výpočet proveden jen pro borosilikátovou skleněnou desku a ocelovou kuličku. Minimální poloměr kontaktní plochy pro snímání vychází z cílů práce a je  $a_{\min} = 0,2 \text{ mm}$ .



Obr. 6-6 Síly působící na koncích páky.

Síla  $F_C$  je dána vztahem

$$F_C = \frac{4 \cdot E' \cdot a_{\min}^3}{3 \cdot R^x} \quad (\text{N}),$$

kde:

- $E'$  (MPa) je redukovaný modul pružnosti,  
 $a_{\min}$  (mm) - minimální poloměr kontaktní oblasti,  
 $R^x$  (mm) - ekvivalentní poloměr křivosti.

Ekvivalentní poloměr křivosti se vypočítá z rovnice

$$\frac{1}{R^x} = \frac{1}{R_{1x}} + \frac{1}{R_{2x}}$$

kde

- $R_1$  (mm) je poloměr křivosti ložiskové kuličky,  
 $R_2$  (mm) - poloměr křivosti skleněné desky.

Redukovaný modul pružnosti je dán vztahem

$$E' = \frac{E_1 E_2}{E_1 (1 - \mu_2^2) + E_2 (1 - \mu_1^2)}$$

kde

- $E_1$  (MPa) je Youngův modul pružnosti ložiskové kuličky,  
 $E_2$  (MPa) - Youngův modul pružnosti skleněné desky,  
 $\mu_1$  (1) - Poissonovo číslo ložiskové kuličky,  
 $\mu_2$  (1) - Poissonovo číslo skleněné desky.

Síla  $F_A$  je určena z podmínky momentové rovnováhy kolem bodu  $B$  a je dána vztahem

$$F_A = \frac{F_C \cdot c}{b} \quad (\text{N}),$$

kde

- $c$  (mm) je vzdálenost středu ocelové kuličky od čepu,  
 $b$  (mm) - vzdálenost těžiště závaží od čepu.

Hmotnost závaží je dána vztahem

$$m = \frac{F_A}{g} \quad (\text{kg}),$$

kde

- $g$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) je gravitační zrychlení.

Minimální hmotnost závaží v závislosti na průměru kuličky  $D_1 = \frac{R_1}{2}$  a vzdálenosti těžiště závaží od čepu je v tab. 6-4.

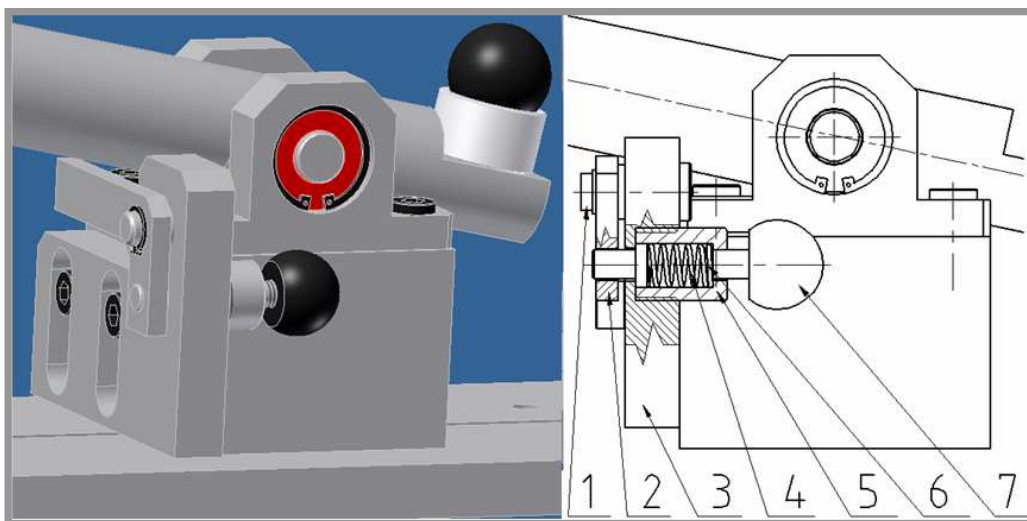
Tab. 6-4 Minimální hmotnost závaží

$D_I$ (mm)	$a$ (mm)		
	140	160	180
15,081 (19/32'')	4,808 kg	4,207 kg	3,739 kg
17,463 (11/16'')	4,152 kg	3,633 kg	3,229 kg
22,226 (1 7/8'')	3,262 kg	2,855 kg	2,537 kg
25,4 (1'')	2,854 kg	2,498 kg	2,220 kg
31,75 (1 1/4'')	2,284 kg	1,998 kg	1,776 kg

## 6.4 Mechanismus k odjištění a nastavení výchylky páky

6.4

Konstrukce mechanismu k odjištění a nastavení výchylky páky je na obr. 6-7. Tímto mechanismem se zajistí opakovatelnost měření. Výchylka páky se nastavuje zvednutím, popř. snížením desky 3 upevněné dvěma šrouby s válcovou hlavou k polohovatelné desce. V desce jsou drážky pro libovolné nastavení výchylky. Po odjištění se spustí páka 2. Páka je uložena na čepu 1 zalisovaném na desce a zajištěna pojistným kroužkem. Na desce je připevněna pojistka 5. V pojistce je pružina 4 pro vrácení tyče 6 do zpětné polohy. K lepšímu uchycení je konec tyče opatřen silonovou kuličkou 7.



Obr. 6-6 Mechanismus k odjištění a nastavení výchylky páky.

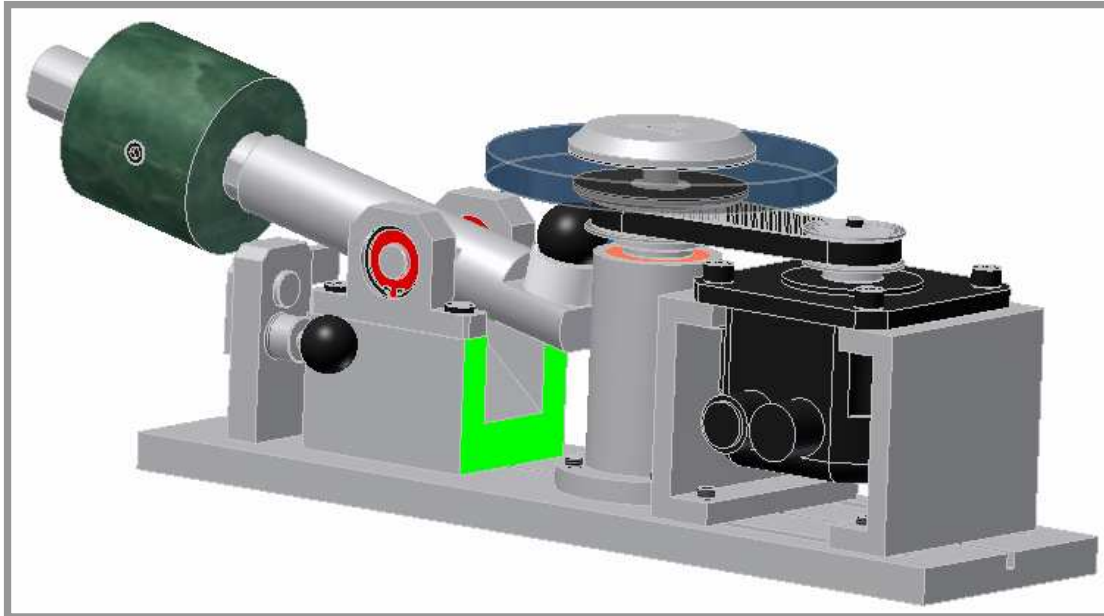
1 – čep, 2 – páka, 3 – deska, 4 – pružina, 5 – čep, 6 – tyč, 7 – kulička.

## 6.5 Synchronizace

6.5

Pro zaznamenávání potřebných snímků v okamžiku, kdy ocelová kulička narazí do skleněného disku, je nutno zajistit synchronizaci mezi pádem kuličky a okamžikem spuštění kamery. Synchronizace se zajistí pomocí snímače, který se umístí na bok polohovatelné desky (vyznačená zelená plocha na obr. 6-8). Způsob připevnění a typ snímače se navrhne až po vyrobení zařízení. Může se zde použít kapacitní snímač,

optický snímač atd. Snímač nemusí sloužit jen ke spuštění kamery, ale také ke stanovení rychlosti kuličky před dopadem.



Obr. 6-8 Umístění snímače.

Základním cílem práce bylo navrhnout takové zařízení, které bude možno umístit pod jeden z mikroskopů v laboratoři na Ústavu konstruování VUT v Brně. Tento cíl je splněn i přes malý prostor pod mikroskopem. Dalším cílem bylo snímání kontaktu během rázu. Protože se zařízení umístí pod jeden z dostupných mikroskopů v laboratoři, je i tento cíl splněn. Posledním cílem je cena zařízení, která se má pohybovat v rozmezí 20 000 až 30 000 Kč. Nejnákladnější částí zařízení je pohon skleněného disku, který cenu podstatně navýšil. Jelikož je většina částí zařízení snadno vyrobitelná nebo jsou běžně k dostání, je tento cíl splněn.

Základními prvky celého experimentálního zařízení je mechanická a optická část zařízení. Optická část slouží k vizualizaci kontaktu, tvoří ji mikroskop, kamera a počítač. V laboratoři se užívá k experimentálním účelům průmyslový mikroskop s episkopickým osvětlovačem a prodlouženou pracovní vzdáleností. K osvětlení kontaktu slouží xenonová výbojka o světelném výkonu 1 kW. Kamera slouží ke snímání kontaktu a je pomocí portů propojená s počítačem, kam se ukládají snímky. Kamera používaná pro snímání kontaktu není běžně dostupnou komerční kamerou, ale jedná se o kameru s vysokou frekvencí snímání. Běžnou frekvenci snímání kontaktu užívanou v laboratoři je  $450 \text{ s}^{-1}$ . Pomocí softwaru v počítači se nastavují parametry kamery (frekvence snímání, rozlišení, atd.). Nedílnou součástí experimentu je vyhodnocování snímků. V laboratoři se užívá softwaru Achilles. Popisu mechanické části zařízení je věnována kapitola 6. Konstrukční návrh vychází z [3]. K získání potřebných snímků slouží synchronizace mezi optickou a mechanickou částí. Synchronizace je zajištěna pomocí snímače. Umístění a druh snímače se vyřeší až po výrobě mechanické části zařízení.

Zařízení slouží k simulaci rázu mezi kuličkou a rotujícím skleněným diskem. Může posloužit nejen k výukovým účelům, ale i experimentálním účelům. Z ekonomického hlediska je mechanická část viskozimetru ovládána pouze ručně. Jelikož zařízení bude sloužit primárně pro výukové účely, je ruční ovládání dostačující. Po výrobě zařízení je nutné provést mnoho testů ke kalibraci měření a k odstranění konstrukčních nedostatků. Jedním z nedostatků konstrukce může být absence tlumiče k utlumení zpětného rázu při odskoku kuličky. Po odborné diskuzi se od použití tlumiče ustoupilo z důvodu složitosti konstrukce a nedostatečného utlumení vlivem vůle celé soustavy (vůle v ložiscích). S ohledem na bezpečnost při měření je nutné provést zakrytí pohonné části. To bude řešeno až po výrobě experimentálního zařízení s ohledem na umístění v laboratoři. Součástí práce je výkresová dokumentace, která je základem pro výrobu zařízení.



## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PAUL, G.R.; CAMERON, A. Absolute high-pressure microviscometer based on refractive-index. *Royal Soc. London.* 1972 ,vol. 331, no. 1585, p. 171-184. ISSN 1364-5021.
- [2] LUNDBERG, J. Lubrication of machina elements duriny combined squeeze and sliding motion. *Wear.* 1993 , vol. 169 , no. 2, p. 161-166. ISSN 0043-1648.
- [3] LARSSON, R; LUNDBERG, J. Study of lubricated impact using optical interferometry. *Wear.* 1995 , vol. 190, no. 2, p. 184-189. ISSN 0043-1648.
- [4] WONG, PL ; LINGARD, S; CAMERON, A. *High pressure viscosity and shear response of oil using the rotating optical micro-viscometer.* In Lubricants and Lubrication B.V. Hong Kong: Elsevier Science B.V, 1995. p. 199-205. ISBN 04448-22631.
- [5] WONG, P.L, et al The high pressure impact microviscometer. *Tribology Transaction.* 1992 . vol. 35, no. 3, p. 500-508. ISSN 0569-8197.
- [6] O'NEILL, PL; STACHOWIAK, GW. A high shear rate, high pressure microviscometer. *Tribology International.* 1996, vol. 29, no. 7, p. 547-557. ISSN 0301-679X.
- [7] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-ČERMÁK, J.: Stanovení tloušťky a tvaru elastohydrodynamického mazacího filmu optickou interferenční metodou. *Inženýrská mechanika.* 1994, roč. 1, č.5/6, s. 299-312.
- [8] HARTL, M.: *Měření a studium velmi tenkých mazacích filmů.* Brno, 2001, Habilitační práce, 104s., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- [9] POLIŠČUK, R. *Aplikace barevného vidění při studiu elastohydrodynamického mazání.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství 2004, 63 s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
- [10] SVOBODA, P. *Experimentální studium utváření mazacích filmů při reverzaci a rozběhu třecích povrchů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 85s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.
- [11] HARTL, M; KŘUPKA, I; LIŠKA, M. Vytvoření 3-D obrazu elastohydrodynamického mazacího filmu numerickým zpracováním interferogramů. *Jemná mechanika a optika.* 1994, roč. 11, č. 12/94, p. 304-308.
- [12] HARTL, M; KŘUPKA, I; LIŠKA, M. Užití počítačové diferenční kalorimetrie pro vyhodnocování chromatických interferogramů elastohydrodynamického mazacího filmu. *Jemná mechanika a optika.* 1997, roč. 3, č. 97, p. 66-70.
- [13] LARSSON, P.- LARSSON, R.- JOLKIN, A.- MARLUND, O. Pressure fluctuations as grease soaps pass through an EHL contact. *Tribology international.* 2000, vol. 33, no. 3-4, p. 211-216. ISSN 0301-679X.
- [14] REDHILL [online]. [cit. 2010-03-22]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.redhill-balls.cz>>
- [15] KŘUPKA, I.- HARTL, M.- POLIŠČUK, R.- LIŠKA, M. Experimentaly study of central and minimum elastohydrodynamic film thickness by colorimetric interferometry technique. *Tribology Transactions.* 2000, vol. 43, no. 4, p. 611-618. ISSN 1040-2004



- [16] WWW.JANSVOBODA.CZ [online]. 2007 [cit. 2010-04-01]. Katalog hydraulických a pneumatických válců. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.jansvoboda.cz/files/V160cat-CZ01-07.pdf>>
- [17] Tyma.cz [online]. 2010 [cit. 2010-04-28]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.tyma.cz/>>.
- [18] Ebibus.sk [online]. [cit. 2010-04-21].: Dostupné na World Wide Web: <[http://www.ebibus.sk/content/products/automatizacia/danaher\\_motion/catalogs/servomotor/f-kat.pdf](http://www.ebibus.sk/content/products/automatizacia/danaher_motion/catalogs/servomotor/f-kat.pdf)>
- [19] SHIMA, M., et al. New apparatus for measuring elastic modulus based on Hertzian contact. *Journal of Japanese Society of Tribologists*. 2001, vol. 47, no. 8, p. 663-670. ISSN 0915-1168

**9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN**

$A$	m	amplituda světelného paprsku
$E$	MPa	Youngův modul pružnosti
$E'$	MPa	redukovaný modul pružnosti
$F_A$	N	tíhová síla od závaží
$F_C$	N	síla, kterou působí ocelová kulička na skleněnou desku (minimální síla)
$M_N$	Nm	jmenovitý moment
$P_N$	W	jmenovitý výkon
$R^x$	MPa	ekvivalentní poloměr křivosti
$R$	mm	poloměr křivosti
$U$	V	napětí
$a$	mm	vzdálenost těžiště závaží od čepu
$b$	mm	vzdálenost ocelové kuličky od čepu
$g$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	gravitační zrychlení
$i$	1	převodový poměr
$m$	kg	hmotnost
$n$	1	index lomu
$n_N$	$\text{min}^{-1}$	jmenovité otáčky
$s_{\min}$	mm	poloměr kontaktní oblasti
$\lambda$	m	vlnová délka
$\mu$	1	Poissonovo číslo
$\rho$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota

**10 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK****10****10.1 Seznam obrázků**

10.1

- Obr. 1-1** Experimentální zařízení podle Paula a Camerona  
**Obr. 1-2** Experimentální zařízení podle Lundberga  
**Obr. 1-3** Experimentální zařízení podle Lundberga a Larssona  
**Obr. 1-4** Experimentální, rotační zařízení podle Wonga, Lingarda a Camerona  
**Obr. 1-5** Experimentální, kyvadlové zařízení podle Wonga, Lingarda a Camerona  
**Obr. 1-6** Experimentální zařízení podle O'Neill a Stachowiaka  
**Obr. 1-7** Schéma měření pomocí el. odporu  
**Obr. 1-8** Schematické zobrazení osvětlovacího svazku na jednotlivých rozhraní  
**Obr. 1-9** Interferogram získaný chromatickou interferometrií [13]  
**Obr. 1-10** Interferogram získaný monochromatickou interferometrií [11]  
**Obr. 2-1** Schéma rázového mikroviskozimetru  
**Obr. 5-1** Návrh varianty č. 1  
**Obr. 5-2** Návrh varianty č. 2  
**Obr. 5-3** Návrh varianty č. 3  
**Obr. 6-1** Model rázového viskozimetru  
**Obr. 6-2** Uložení kuličky  
**Obr. 6-3** Uložení skleněného disku  
**Obr. 6-4** Pohon  
**Obr. 6-5** Závaží na páce  
**Obr. 6-6** Síly působící na koncích páky  
**Obr. 6-7** Mechanismus k odjištění a nastavení výchylky páky  
**Obr. 6-8** Umístění snímače

**10.2 Seznam tabulek**

10.2

- Tab. 6-1** Mechanické vlastnosti ložiskových kuliček  
**Tab. 6-2** Mechanické vlastnosti optických disků  
**Tab. 6-3** Parametry servomotoru F 504 D  
**Tab. 6-4** Minimální hmotnost závaží

## 11 SEZNAM PŘÍLOH

---

### 11.1 Výkresová dokumentace

---

1-B14-32/00  
K-4-B14-32/01  
K-4-B14-32/02  
K-4-B14-32/03  
K-4-B14-32/04  
2-B14-32/05  
3-B14-32/06  
3-B14-32/07  
3-B14-32/08  
3-B14-32/09  
3-B14-32/10  
3-B14-32/11  
4-B14-32/12  
4-B14-32/13  
4-B14-32/14  
4-B14-32/15  
4-B14-32/16  
4-B14-32/17  
4-B14-32/18  
4-B14-32/19  
4-B14-32/20  
4-B14-32/21  
4-B14-32/22  
4-B14-32/23  
4-B14-32/24  
4-B14-32/25  
4-B14-32/26  
4-B14-32/27  
4-B14-32/28