

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na konstrukční návrh tribometru pro simulaci opotřebení reálných těles a současně pro studium vlivu tohoto opotřebení na mazací film pomocí optické interferenční metody. V práci jsou představeny v současnosti nejpoužívanější konstrukce experimentálních zařízení a na jejich základě jsou vytvořeny různé konstrukční varianty, z nichž je následně zvolena optimální varianta. Výstupem je výrobní výkresová dokumentace.

Klíčová slova: ball-on-disk tribometr, elastohydrodynamické mazání, friction, opotřebení, optická interferometrie

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on design of tribometer to simulate wear real bodies and simultaneously to study the effect of wear on the lubricating film by using an optical interference method. In thesis are introduced the most widely used design of experimental equipments and on the basis of them are developed various design options. From them is subsequently selected the optimal variant. The output of this thesis are the production drawings.

Key words: ball-on-disk tribometer, elastohydrodynamic lubrication, friction, wear, optical interferometry

Bibliografická citace: TATÍČEK, J. *Konstrukce tribometru pro studium vlivu opotřebení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Omasta.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval a napsal samostatně pod vedením Ing. Milana Omasty a veškerou použitou odbornou literaturu jsem uvedl v seznamu použitých zdrojů.

V Brně, dne 16. 5. 2013

.....
Jiří Tatíček

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mě během vypracování této práce podporovali. Především bych chtěl poděkovat panu Ing. Milanu Omastovi za velmi vstřícný přístup, odborné vedení a cenné rady.

OBSAH

1 Úvod	9
2 Přehled současného stavu poznání	10
2.1 Tribologie	10
2.2 Tribometr	10
2.2.1 Rozdělení tribometrů	11
2.2.2 Tribometry s různými typy kontaktních těles	11
Falex	12
Timken	13
Four-ball	13
Pin-on-slab	14
Pin-on-ring, ring-on-ring	15
Pin-on-disk	15
Ball-on-disk	16
2.2.3 Optické tribometry typu ball-on-disk	17
3 Analýza problému a cíl práce	19
4 Varianty konstrukčního řešení	20
4.1 Varianty z pohledu funkce.....	20
4.1.1 Varianta 1	20
4.1.2 Varianta 2	21
4.1.3 Varianta 3	22
4.2 Varianty z pohledu výroby	22
5 Optimální konstrukční řešení	23
5.1 Vybrané součásti	24
5.2 Určení zátěžných sil.....	28
6 Diskuse	31
6.1 Příprava experimentu.....	31
7 Závěr	32
8 Seznam použitých zdrojů	33
9 Seznam použitých symbolů a veličin	35
10 Seznam obrázků	37
11 Seznam příloh	38

1 ÚVOD

1

V dnešní době, kdy se zmenšováním zásob nerostných surovin a fosilních paliv roste jejich cena, je nutné, aby se při konstrukci strojů a strojních součástí nehledělo pouze na splnění funkčních požadavků, ale velký důraz je kladen i na jejich ekonomický a hospodárny provoz. Je zde snaha o maximální možné využití dodané energie a zároveň minimalizace ztrát při provozu stroje. Ztráty, vznikající při vzájemném pohybu součástí, jsou obvykle způsobené třením. Snížení nežádoucího tření a tím pádem i ztrát ve stroji, má za následek snížení spotřeby, ať už elektrické energie při použití elektrických pohonů, či spotřeby paliva u spalovacích motorů, což má pozitivní nejen ekonomický, ale i environmentální dopad. Tření se nejčastěji snižuje mazáním, při kterém se mezi kontaktní plochy dvou těles dodává mazivo. Mazivo mezi povrchy vytváří mazací vrstvu, jejíž tloušťka má významný vliv na velikost tření. Podle tloušťky mazacího filmu se určuje typ mazání. Na tvoření mazací vrstvy a její tloušťku má vliv mnoho faktorů, mezi které patří i jakost kontaktních ploch. V průběhu provozu však dochází k opotřebování kontaktních ploch, při němž se jakost zhoršuje, což má vliv na mazání, tím pádem i na velikost tření. V praxi to znamená růst spotřeby stroje v průběhu provozu. Proto se tento jev v dnešní době stává objektem výzkumů. Obsahem této práce je návrh experimentálního přístroje, který by umožnil studium vlivu opotřebení kontaktních ploch na mazání kontaktu, konkrétně na vytváření mazacího filmu.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Tribologie

Termín tribologie vznikl spojením řeckých slov „tribos“, což znamená tření nebo skluz, a „logos“, překládané jako věda. Poprvé se objevil v roce 1965 ve zprávě pracovní skupiny, kterou ustavilo britské Ministerstvo školství a vědy, a byl definován jako věda, která se zabývá vzájemným působením dvou povrchů při jejich relativním pohybu. Tribologie se však nezabývá pouze třením jako takovým, ale i jeho minimalizací v aplikacích, kde je tření nežádoucí. S tím samozřejmě souvisí mazání [1, 2].

Ačkoli největší rozmach tribologie byl ve dvacátém století, třením se lidé zabývali již dříve. Je známo mnoho zdokumentovaných příkladů toho, jak rané civilizace snižovali tření hladšími povrchy, případně primitivními ložisky. Postupem času se třením zabývali i další vzdělanci, mezi které patřil i Leonardo da Vinci, Guillaume Amontons, či Charles-Augustin de Coulomb. Avšak většinou byly práce o tření čistě teoretické. Zlomovou byla práce Osborna Reynoldse, která byla vydána roku 1886. Pojednávala o hydrodynamickém mazání a měla i své uplatnění v praxi [2].

2.2 Tribometr

Tření a opotřebení je velmi citlivé na změnu okolních podmínek jako jsou například změny teploty, zatížení či vlhkosti, proto je třeba pozorovat tyto veličiny na přístrojích, které umožňují tyto okolní podmínky monitorovat a případně upravovat. Takovými přístroji jsou právě tribometry. Tribometry se také používají v případech, kdy se tribologické veličiny, mezi které patří koeficient tření, tloušťka mazacího filmu i míra opotřebení, nedají měřit přímo na průmyslovém zařízení. Ať už z důvodu velké ekonomické náročnosti, konstrukčního řešení daného zařízení, či nepřesnosti při daném měření. Například možnosti při výzkumu tření a opotřebení mezi pístními kroužky a válci spalovacích motorů jsou velmi omezené, proto se předběžné testy mazání provádějí na jednodušších testovacích strojích [3].

Konstrukce tribometru se liší s ohledem na to, které parametry kontaktu a při jakých okolních podmínkách chceme měřit a pozorovat. Podle Society of Tribologists and Lubrication Engineers existuje přibližně 243 různých konstrukcí tribometru. Avšak počet konstrukcí pravidelně používaných výzkumnými skupinami je o mnoho menší [3].

Základ tribometru tvoří zatěžovací tělísko a vzorek. Mezi nimi se uskutečňuje pohyb, někdy je jeden z prvků statický a druhý vykonává pohyb, ale jsou časté i případy, kdy pohyb koná zatěžovací tělísko i vzorek. Dále jsou přístroje vybaveny nástroji, které zatěžují kontakt, pohybují s jednotlivými prvky kontaktu či přivádí mazivo do místa kontaktu. Vyspělejší technika zvládne i měření koeficientu tření, míry opotřebení, teploty, či vytvoření speciální atmosféry. Použití správných pracovních podmínek pro daný případ má zásadní vliv na konstrukci tribometru. Ačkoli existuje určité množství tzv. univerzálních přístrojů, většinou se tribometry konstruují pro konkrétní pracovní podmínky či třecí mechanismy a pro jiné použití jsou obvykle nevhovující nebo dokonce nevhodné.

2.2.1 Rozdělení tribometrů

2.2.1

Tribometry je možné rozdělit podle několika hledisek do různých skupin, které však spolu úzce souvisí.

- podle typu kontaktu
 - o tribometry s konformním stykem třecích ploch (plošný kontakt)
 - o tribometry s nekonformním stykem třecích ploch (bodový či liniový kontakt)

- podle typu kontaktních těles
 - o Falex
 - o Timken
 - o Four-ball
 - o Pin-on-slab
 - o Pin-on-disk
 - o Pin-on-ring
 - o Ring-on-ring
 - o Ball-on-disk

- tribometry pracující ve speciálních podmínkách
 - o vysokoteplotní tribometry
 - o nízkoteplotní tribometry
 - o tribometry pro práci ve vakuu
 - o tribometry pro práci v korozivních kapalinách

- speciální tribometry
 - o pro výzkum extrémních kluzných rychlostí
 - o pro výzkum opotřebení způsobený nárazem
 - o pro kombinace kluzu a valení
 - o tribometry In-Situ

- tribometry pro studium abrazivního a erozivního opotřebení

- tribometry pro studium mechanismu mazání

Úzké spojení tribometrů z různých skupin lze demonstrovat na příkladu. Při použití přístroje pin-on-disk, z kategorie tribometrů s různým typem kontaktních těles, podle tvaru pinu se může jednat o konformní kontakt, pakliže je pin ve tvaru válečku. Avšak pokud je pin kulového tvaru, jedná se o kontakt nekonformních povrchů. Zároveň je možné tento přístroj umístit do vakuové či nízkoteplotní nádoby, čímž lze získat vakuový, popřípadě nízkoteplotní tribometr [3].

2.2.2 Tribometry s různými typy kontaktních těles

2.2.2

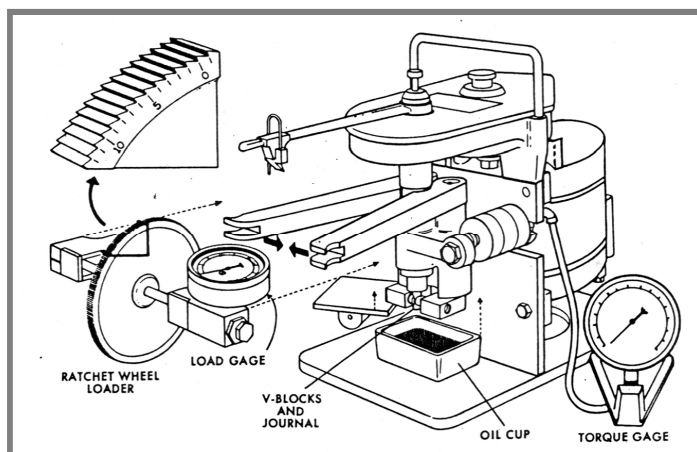
Tato skupina tribometrů je pravděpodobně nejvíce využívána a vyvíjena. Umožňuje zkoumat nejen tření a opotřebení, ale i mechanismy mazání.

Falex

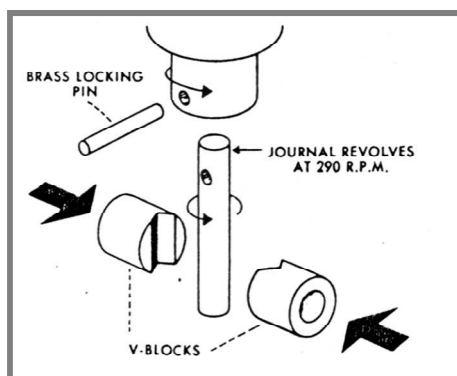
Falex tester je přístroj vyvíjen a vyráběn americkou firmou Falex Corporation, která má od roku 1999 laboratoře i v Evropě. Hlavní částí zařízení je testovací pin ve tvaru válcové tyče a průměru $\frac{1}{4}$ palce, která rotuje rychlostí okolo 290 otáček za minutu. Testovací pin je svírán dvěma bloky o průměru $\frac{1}{2}$ palce s V-zářezem, znázorněným na obr. 2-2. Zatížení je na bloky přenášeno západkovým mechanismem. Ve V-zářezech vznikají čtyři kontaktní místa, tedy i čtyři normálové síly, které se však navzájem vruší. Díky tomu se přivádí pouze síla, jež způsobuje sevření bloků a točivý moment po pohonu pinu [4].

Výhodou tohoto systému je dosažení velkých kontaktních tlaků, aniž by bylo nutné použít silné a rozměrné mechanismy. Na falex testeru je možno testovat jak kapalná maziva, tak při nižších rychlostech i pevná maziva. Velkou výhodou je také možnost přímého měření koeficientu tření bez chyby, kterou by způsobilo tření v ložiskách.

Nevýhodou může být vysoká teplota v kontaktu, zejména při vyšších rychlostech, či změna tlaku v kontaktu, způsobená otěrem a následným zvětšováním kontaktní oblasti. Dříve mezi nevýhody patřila i velká konstrukce přístroje, což znemožňovalo umístění přístroje například do vakuové komory. Postupem času s vývojem technologií byl tento nedostatek odstraněn, čímž se toto zařízení stalo často využívaným v průmyslových výzkumných laboratořích [3, 4, 5].



Obr. 2-1 Tribometr typu Falex [5]



Obr. 2-2 V-bloky a válcový pin [5]

Timken

Přístroj, který je dnes používán, vychází z přístroje vyráběného od třicátých let dvacátého století firmou Timken Company. Od roku 1982 jsou tribometry využívající systém Timken vyráběny americkou firmou Falex Corporation. Základ přístroje je tvořen testovacím kroužkem, který se otáčí rychlostí okolo 800 otáček za minutu. Na tento kroužek je pomocí pákového mechanismu přitlačována statická deska, které se někdy říká testovací blok. Celý kontakt je zaplavený mazivem a zatěžován pomocí pákového mechanismu. Při testu je každých 10 minut postupně zvyšován kontaktní tlak, čehož je dosaženo postupným přidáváním závaží na rameno páky, dokud není dosaženo tzv. OK zatížení. OK zatížení je maximální možné zatížení testovacího kroužku, při kterém ještě nedojde k vytváření známek vrubu na testovacím bloku. Závaží na ramenní páky je také používáno jako indikátor únosnosti mazacího filmu [6].

Často je jako testovací kroužek používán kroužek ložiska a testem jsou získány údaje o maximální možné zatěžovací síle, působící na ložisko při daném mazivu. Výhodou tohoto systému je možnost zatížení poměrně velkými tlaky.

Nevýhodou může být stejně jako u systému Falex kolísání kontaktního tlaku během testu či zvětšení liniové kontaktní oblasti na plošnou [3, 6].



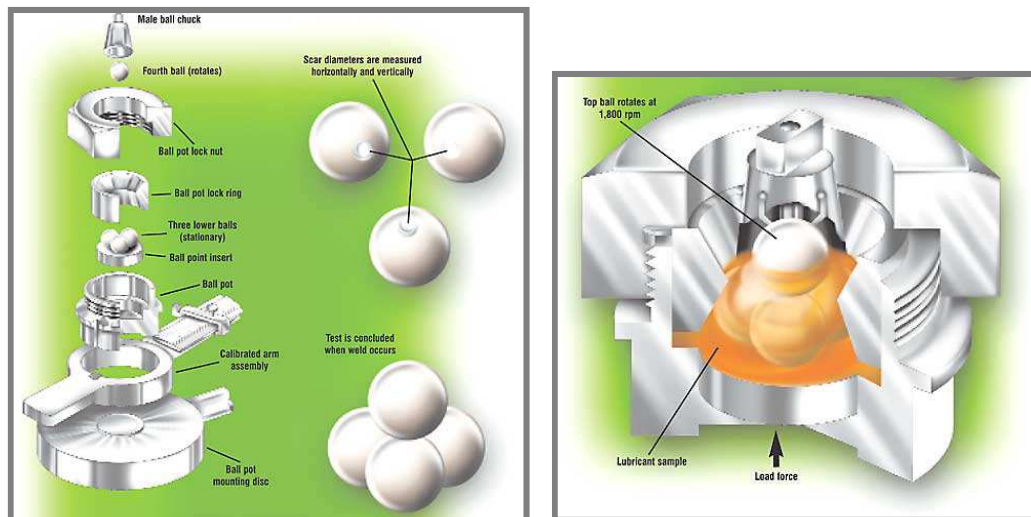
Obr. 2-3 Tribometr typu Timken [6]

Four-ball

Tento typ tribometru byl vyvinut ve třicátých letech dvacátého století a stal se poměrně rozšířeným. Základem přístroje jsou čtyři kuličky o průměru půl palce. Jedna z nich je připevněna do upínacího pouzdra a roztáčena rychlostí až 1760 otáček za minutu. Zbylé tři kuličky jsou staticky upevněny v pánvi, která bývá vyplněna testovaným mazivem.

Při testu jsou staticky upevněné kuličky tlačeny proti té rotující v desetiminutových intervalech a při každém intervalu se zvýší tlak mezi kuličkami. Během testu jsou měřeny otřené plochy kontaktu na každé ze staticky upevněných kuliček a skutečná velikost se určí jako průměr těchto tří měření. Test končí, jakmile se dosáhne takového zatížení, že je rotující kulička přivařena k těm pevně uloženým.

Výhodou této metody jsou relativně přesné výsledky způsobené samovolným vystředěním kuliček v průběhu testu a možnost použití velkých kontaktních tlaků. Nevýhodou, stejně jako u předchozích dvou metod, je zvětšování kontaktní oblasti z bodového Hertzova kontaktu na plošný kontakt, jehož velikost závisí na opotřebení kuliček [3, 9].



Obr. 2-4, 2-5 Princip tribometru Four-ball [8]

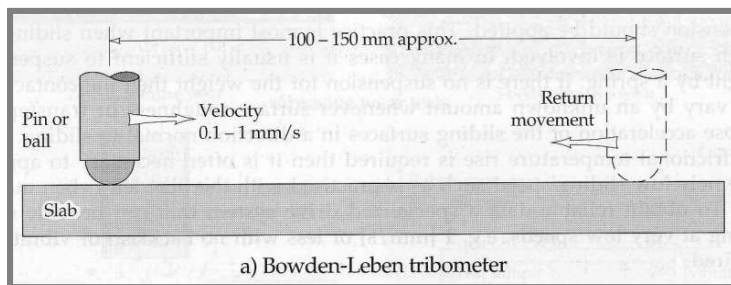
Pin-on-slab

Tento typ tribometru je složen z pinu, který koná vratný pohyb po ploché desce. V některé literatuře je pro tento typ použit název pin-on-plate. Pinem může být kulička (při výzkumu dotyku nekonformních ploch) nebo váleček (pro kontakt konformních ploch). Pravděpodobně nejznámější použití principu pin-on-slab je v tribometrech typu Bowden-Leben nebo Cameron-Mill, jež byly použity při mnoha výzkumech. Rozdíl mezi oběma typy je schematicky znázorněn na obr. 2-6 a 2-7.

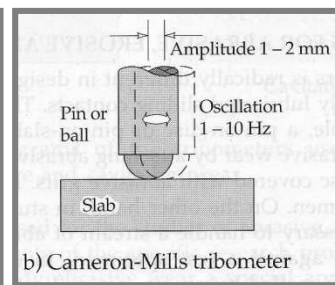
Tribometr typu Bowden-Leben se vyznačuje nízkou kluznou rychlostí, která se pohybuje v rozmezí 0,1 a 1 mm/s. Typická pro tento typ je též velká amplituda dosahující až 150 mm, s čím však souvisí nízká frekvence pohybu. Díky nižší frekvenci a delší amplitudě jsou získávány data týkající se především počátečních stádií tření a opotřebení.

Typ Cameron-Mill byl vyvinut teprve nedávno a od výše zmíněného typu se liší především amplitudou, která bývá 1 až 2 mm. Oproti tomu frekvence pohybu pinu po desce je mnohokrát vyšší než u Bowden-Lebena a dosahuje hodnot od 1 do 10Hz, díky čemuž rychle dosáhneme ustáleného stavu v místě kontaktu.

Výhodou obou zařízení je možnost výroby ať už pinu či desky z různých materiálů, což je velký rozdíl například oproti four-ball tribometru, kde kuličky bývají z oceli [3, 10].



Obr. 2-6 Princíp Bowden-Leben [3]



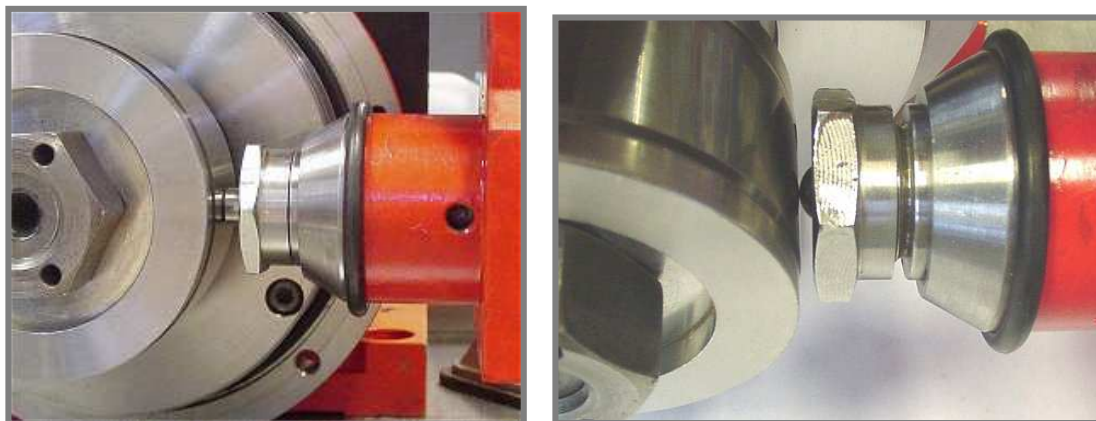
Obr. 2-7 Princíp Cameron-Mills [3]

Pin-on-ring, ring-on-ring

Základem tohoto typu tribometru je staticky upevněný pin, který je radiálně přitlačován k rotujícímu prstenci. Podle volby pinu můžeme simulovat různé typy kontaktů. Pokud použijeme kuličku, simulujeme bodový nekonformní kontakt, avšak jako pin lze použít i druhý prstenek, čímž vznikne konfigurace ring-on-ring a kontakt bude nekonformní liniový. Konformní kontakt je možné získat použitím například válečku upevněného tak, že osa rotace válečku bude kolmá na osu rotace prstence.

Na tomto zařízení je možné simulovat suché kontakty, při připojení zásobníku maziva i mazané kontakty. Dokonce je možné simulovat kontakt v dusíkové atmosféře. Kromě rotace jedním směrem o rychlosti až 900 otáček za minutu dokáže přístroj vykonávat i vratný pohyb. Tribometr může být vybaven i indukčním ohřívačem, který umožní testovat tření a opotřebení při teplotách až 700°C. Záměnou standardního prstence za prstenek s abrazivní úpravou můžeme zkoumat abrazivní opotřebení [11, 12].

Výhodou tohoto typu je možnost připojení různého přídatného vybavení, které zvětšuje možnosti tribometru.

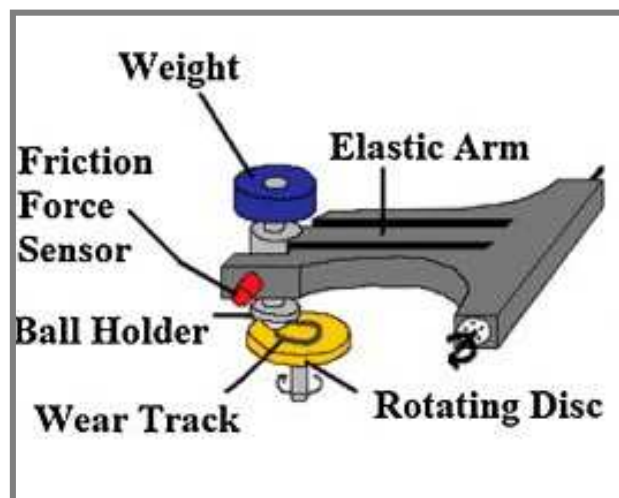


Obr. 2-8, 2-9 Tribometr typu pin-on-ring [11]

Pin-on-disk

Přístroje typu pin-on-disk jsou velmi používané především v materiálovém inženýrství pro studium opotřebení povlaků. Umožňují dobrou kontrolu a případné upravení okolních podmínek. Jelikož existuje velká škála různých druhů a modifikací této konstrukce, není možné je všechny v této práci obsáhnout [3].

Mezi hlavní části zařízení patří disk, který rotuje kolem osy rotace, avšak je schopen vykonávat i vratný pohyb. Poloha disku může být vertikální, avšak v dnešní době převažuje horizontální poloha. Materiál a rozměry disku však závisí na metodách zatěžování a měření tribologických veličin. Kontakt může vznikat i na obvodu disku, tato konfigurace je známá spíše pod názvem pin-on-drum. Častěji však kontakt vzniká mezi plochou částí disku a pinem, jenž může představovat kuličku, soudeček, či váleček. Pin je připevněn staticky, čímž je pohyb v kontaktu čistě kluzný. Způsob zatěžování kontaktu se také může lišit podle toho, jaké měření se bude na přístroji provádět. Zatěžovací sílu je možné vyvodit například pomocí pružiny, pákového systému, pneumatického, popřípadě hydraulického systému, závažím působícím na disk, případně na pin. Při měření koeficientu tření je důležitou částí tribometru elastické rameno, na kterém je připevněn pin (obr. 2-10).



Obr. 2-10 Elastické rameno [14]

Při testu se v rameni vlivem tření vytvoří tangenciální síla, která rameno ohne. Tuto sílu je možné měřit speciálním snímačem, který určí velikost koeficientu tření. Konstrukce pin on disk se však používá především pro studium opotřebení kontaktních ploch v režimu mezného mazání [3, 13].

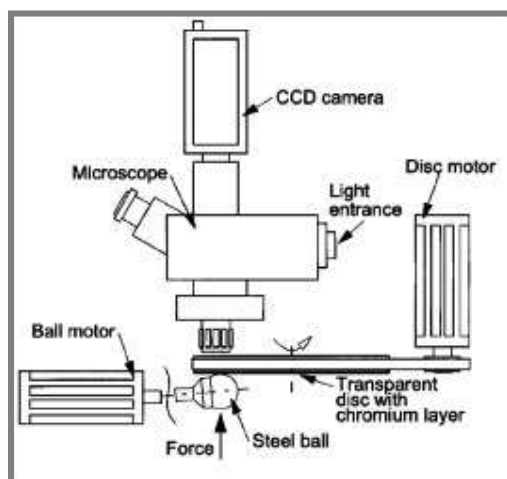
Ball-on-disk

Tribometry typu ball-on-disk jsou také používány ke studiu opotřebení. Kontakt je zde rovněž simulován diskem a valivým tělískem, například kuličkou. Na rozdíl od metody pin-on-disk není kulička připevněna k přístroji staticky, ale může se vzhledem k disku pohybovat. Je umožněn valivý pohyb v kontaktu, dokonce může být kulička připojena na nezávislý pohon, který jí umožní konat čistě valivý pohyb, případně částečně valivý s přesným poměrem mezi valením a kluzem. Namísto kuličky je možné použít i soudeček. Zatěžování kontaktu může být prováděno prostřednictvím kuličky, případně i prostřednictvím disku. Zatěžovací sílu je možné vyvodit podobnými systémy jako v případě pin-on-disk [3].

2.2.3 Optické tribometry typu ball-on-disk

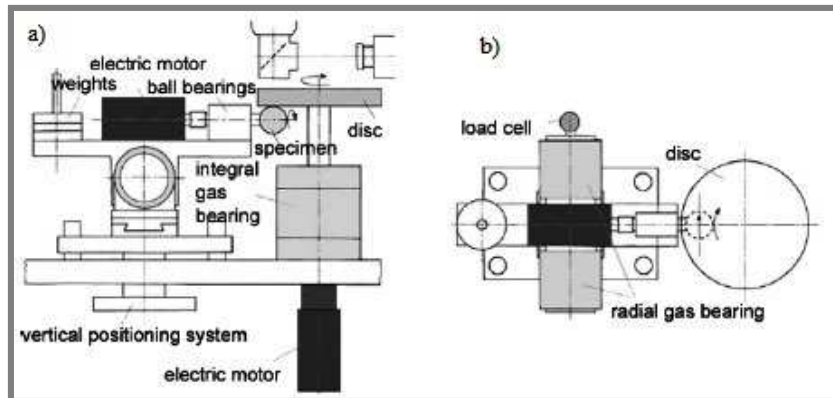
Zvláštní skupinou jsou optické tribometry typu ball-on-disk. Na rozdíl od klasických tribometrů tohoto typu, se zde pro simulaci kontaktu používá disk vyrobený z optického skla. Tento disk má na kontaktní ploše nanosenou vrstvičku chromu, které umožňuje prostřednictvím optické interferometrie pozorovat kontakt. Tyto přístroje se používají především pro studium tření, maziv či pro výzkum utváření mazacího filmu. Toto je možné provádět za podmínek, kdy jsou oba povrchy zcela hladké, ale studují se i případy, kdy se snižuje tření cílenou modifikací jednoho z povrchů, nejčastěji se modifikace provádí vytvořením mikrotextury na povrchu kuličky. Nebo naopak se provádí záměrné zdrsňení kuličky s cílem pozorování jeho vlivu na tvorbu mazací vrstvy.

V praxi byl například používán tribometr, jehož základ byl tvořen ocelovou kuličkou s velmi lesklým povrchem a průhledným skleněným diskem, na jehož povrch, na kontaktní stranu, byla nanášena tenká polopropustná chromová vrstva. Tato vrstva umožnila měřit tloušťku mazacího filmu pomocí optické interferometrie. Potřebné osvětlení dodal zdroj trichromatického světla. V tomto případě byl poháněn disk i kulička, což umožnilo nastavit přesný poměr mezi kluzem a valením. Kontakt byl zatížen přes kuličku [15].



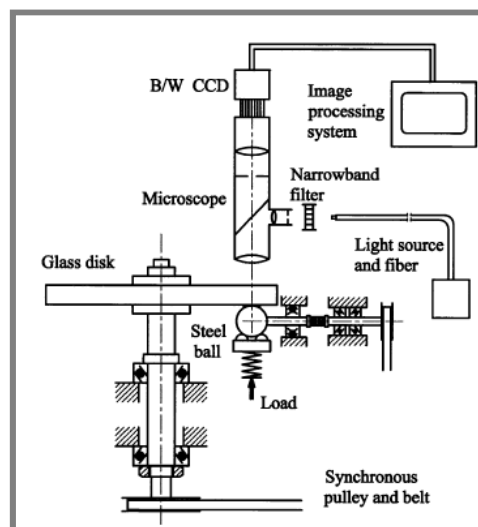
Obr. 2-11 Tribometr se zatěžováním přes kuličku [15]

Jiný příklad z praxe ukazuje podobný přístroj jako v prvním případě, rozdíl je však v zatěžování kontaktu. V tomto případě bylo zatížení vyvozeno pomocí závaží přes pákový mechanismus, který měl na středním čepu pneumatické ložisko. Zařízení obsahovalo i snímač zatížení, jenž umožňoval měřit třecí sílu v kontaktu s přesností na 0,05N [16].



Obr. 2-12 Tribometr s pneumatickým ložiskem [16]

Při výzkumu vlivu poměru kluzu vůči valení byl použit přístroj, jehož základem byla ocelová kulička o průměru 25,4mm (1 palec), tlačena proti 15mm silnému skleněnému disku s vrstvičkou chromu. Zatížení na kuličku bylo vyvozeno pružinou. Na rozdíl od předchozí aplikace byl pro pohon disku i kuličky stejný motor. Výkon motoru se přenášel pomocí dvou šnekových převodovek a ozubených řemenů. Díky regulaci rychlosti bylo možné získat velký rozsah otáček. Interferenční obrazec mazaného kontaktu byl získán optickým mikroskopem s koaxiálním osvětlením. Zdrojem světla byla halogenidová výbojka [17].



Obr. 2-13 Tribometr se zatížením přes pružinu [17]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Z přehledu současného stavu poznání vyplývá, že pro experimentální studium kontaktů těles je k dispozici celá řada tribometrů různých konstrukcí. Ty slouží především ke studiu tření a opotřebení. Zvláštní skupina tribometrů typu ball-on-disk je používána ke studiu distribuce mazacího filmu v kontaktech pomocí optických interferenčních metod.

Optické tribometry většinou používají velmi hladké povrchy a relativně nízké zatížení pro zajištění úplného oddělení těles kapalným mazacím filmem (režim elastohydrodynamického mazání – EHD). Podmínky vyskytující se v reálných kontaktech ovšem většinou „připouštějí“ určitou míru opotřebení. Toto opotřebení ovlivňuje chování mazacího filmu. V případě tribometrů pro studium opotřebení je toto hodnoceno většinou po provedení experimentu analýzou povrchu vzorků. Kombinací tribometru pro studium opotřebení a optického tribometru pro hodnocení mazacího filmu lze získat zařízení, které umožní studovat rozvoj opotřebení v kontaktu reálných povrchů a současně studovat vliv tohoto opotřebení na mazací film. Takový tribometr ovšem dosud není dostupný.

Cílem práce je konstrukční návrh tribometru pro studium vlivu reálného opotřebení na utváření mazacího filmu.

Požadované parametry jsou následující:

- kontakt simulován mezi ocelovou kuličkou a skleněným a současně ocelovým diskem
- nezávislé pohony všech tří kontaktních těles a nezávislé zatěžování
- průměr kuličky ½ palce nebo 1 palec
- maximální kontaktní tlak 1GPa (sklo) a 2GPa (ocel)
- nastavitelná poloha dráhy kuličky
- snadná výměna vzorků

Zařízení bude vycházet z konstrukce optických tribometrů používaných na Ústavu konstruování.

4 VARIANTY KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ

Tribometr bude typu ball-on-disk a bude nutné jej navrhnout tak, aby umožňoval simulaci dvou kontaktů současně při různých podmínkách, jako jsou například nezávislé pohony a zatěžování, případně různé kontaktní tlaky. První kontakt bude tvořen mezi kuličkou a skleněným diskem. Skleněný disk, vyrobený z optického skla s nanesenou vrstvičkou chromu na kontaktní ploše, umožní, pomocí optické interferometrie, pozorovat kontakt a studovat vliv reálného opotřebení, které bude vznikat v druhém kontaktu, na utváření mazacího filmu. Velikost kontaktního tlaku v tomto kontaktu by měla odpovídat hodnotě 1GPa. Druhý kontakt se bude vytvářet mezi reálnými (ocelovými) tělesy, jež budou reprezentovány kuličkou a ocelovým diskem. Zatížení tohoto kontaktu bude větší než v předchozím případě. Kontaktní tlak bude dosahovat hodnoty až 2GPa, což bude mít za následek vznik požadovaného opotřebení na valivém tělese. Zatížení bude do kontaktu vnášeno prostřednictvím pákového mechanismu.

Při řešení zadání bylo navrženo několik možných konstrukčních variant, které by měly splňovat zadané funkční požadavky. Následně bylo nutné zvolit optimální způsob výroby dané konstrukce.

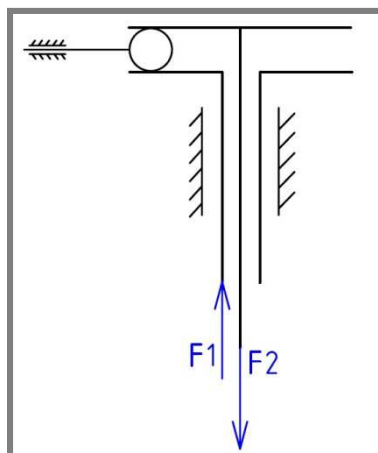
4.1 Varianty z pohledu funkce

Na začátku řešení zadaného problému byly navrženy tři konstrukční varianty, které by odpovídaly požadavkům zadání. Každá z variant měla své klady i zápory.

4.1.1 Varianta 1

Základ této varianty je tvořen dutým hřídelem určeným pro pohon a zatěžování ocelového disku. Hřídel je uložen pomocí ložisek v ložiskovém tělese, které je pevně připevněno k rámu. Vzájemné uložení ložisek a hřídele je však uložení s velmi malou vůlí či přesahem, což umožní hřídeli relativně snadný axiální posuv vůči ložiskovému tělesu, avšak zároveň je nutno zabezpečit, aby vůle nevnášela nepřesnosti do měření. Tento posuv je nezbytný pro zatěžování kontaktu mezi kuličkou a ocelovým diskem upevněným na čelní straně dutého hřídele. Otvorem v ose dutého hřídele prochází druhá hřídel sloužící k pohonu a zatěžování transparentního disku. Její uložení je také řešeno pomocí ložisek, jejichž uložení musí stejně jako u dutého hřídele umožňovat snadný axiální posuv s minimální vůlí.

Mezi nevýhody této varianty patří náročnost na výrobu, především z toho důvodu, že uložení musí být velmi přesné. Výroba dutého hřídele by byla velmi náročná i po finanční stránce, nicméně výsledek by nemusel být uspokojivý. Další nevýhodou by byla poměrně velká výška přístroje, ta je však omezena kvůli rozměrům mikroskopu, jenž se používá pro zobrazení kontaktu mezi kuličkou a transparentním diskem.



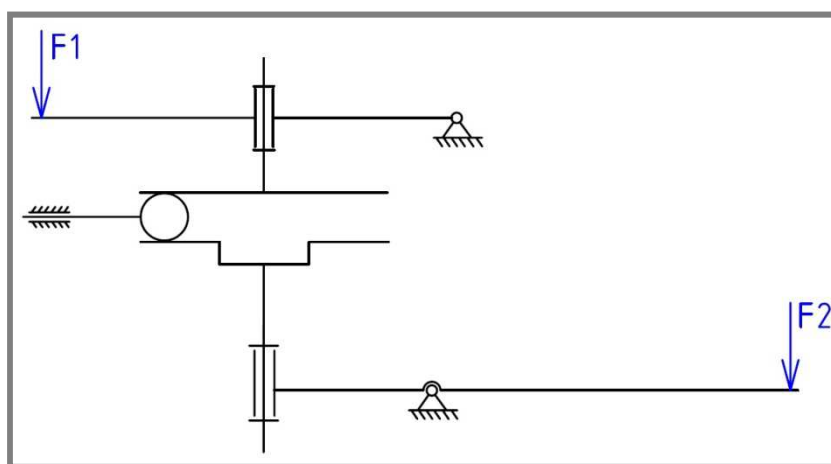
Obr. 4-1 Schéma varianty 1

4.1.2 Varianta 2

4.1.2

Tato konstrukce je zcela odlišná od předchozí varianty. Základ je tvořen dvojicí pákových ramen, jež jsou uloženy prostřednictvím ložisek a čepů k rámu. Součástí pákových ramen jsou i ložisková tělesa s ložisky, ve kterých jsou uloženy hřídele. Na hřídele jsou upevněny oba disky tak, že k dolnímu hřídeli je upevněn disk ocelový a k hornímu transparentní. Oba pákové mechanismy umožňují změnu vzdálenosti disků vzhledem ke kuličce, která koná vůči rámu pouze rotační pohyb, a zároveň jsou jejich prostřednictvím zatěžovány oba kontakty. Avšak kvůli pákovému mechanismu je nutné pohonné jednotky obou disků umístit na páková ramena. Zatížení, jež v obrázku reprezentují síly F_1 a F_2 , je způsobeno závažími umístěnými na konci páky.

Jedna z nevýhod tohoto řešení může vyvstat při zatížení obou disků, jelikož by už jejich povrchy nemusely být přesně rovnoběžné, což by mělo za následek, že myšlená osa, spojující oba bodové kontakty, by neprocházela středem kuličky. To by mělo neblahý vliv na přesnost měření. Další nevýhodou by byla nutnost použít poměrně těžká závaží při zatěžování kontaktu mezi ocelovým diskem a kuličkou, aby převážila i hmotnost ocelového disku, ložiskového tělesa s ložisky a hřídele.

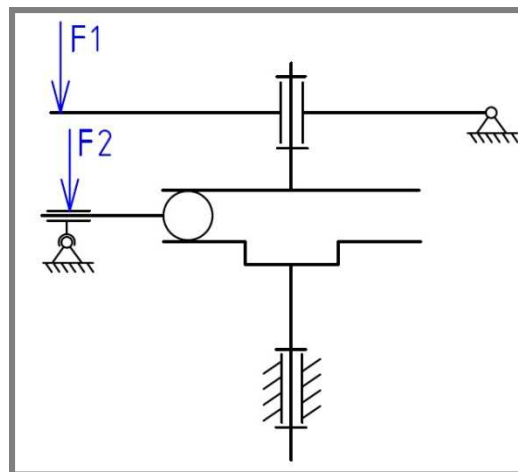


Obr. 4-2 Schéma varianty 2

4.1.3 Varianta 3

Tato konstrukční varianta částečně vychází z předešlé konstrukce. Horní část, která zahrnuje páku, ložiskové těleso s ložisky, hřídel a transparentní disk je shodná. Zbývá část konstrukce je však odlišná. Ocelový disk je prostřednictvím hřídele a ložiskového tělesa s ložisky k rámu upevněn tím způsobem, že může konat pouze rotační pohyb. Pohon transparentního disku musí být připevněn k horní páce, avšak pohon ocelového disku lze staticky připevnit k rámu. Kontakt mezi ocelovým diskem a kuličkou je zatěžován přes uložení kuličky. Kulička je prostřednictvím ložisek upevněna k ramenu, jež jí umožňuje pohyb ve směru kolmém na funkční plochu disku. Zároveň je k ramenu připevněna zatěžovací páka se závažím, která kontakt zatěžuje.

Nevýhodou tohoto řešení je poměrně komplikované upevnění kuličky, které musí umožňovat zatěžování kontaktu, ale zároveň i připojení kuličky k pohonu, aniž by připojení bránilo, či významně ovlivňovalo zatěžování.



Obr. 4-3 Schéma varianty 3

4.2 Varianty z pohledu výroby

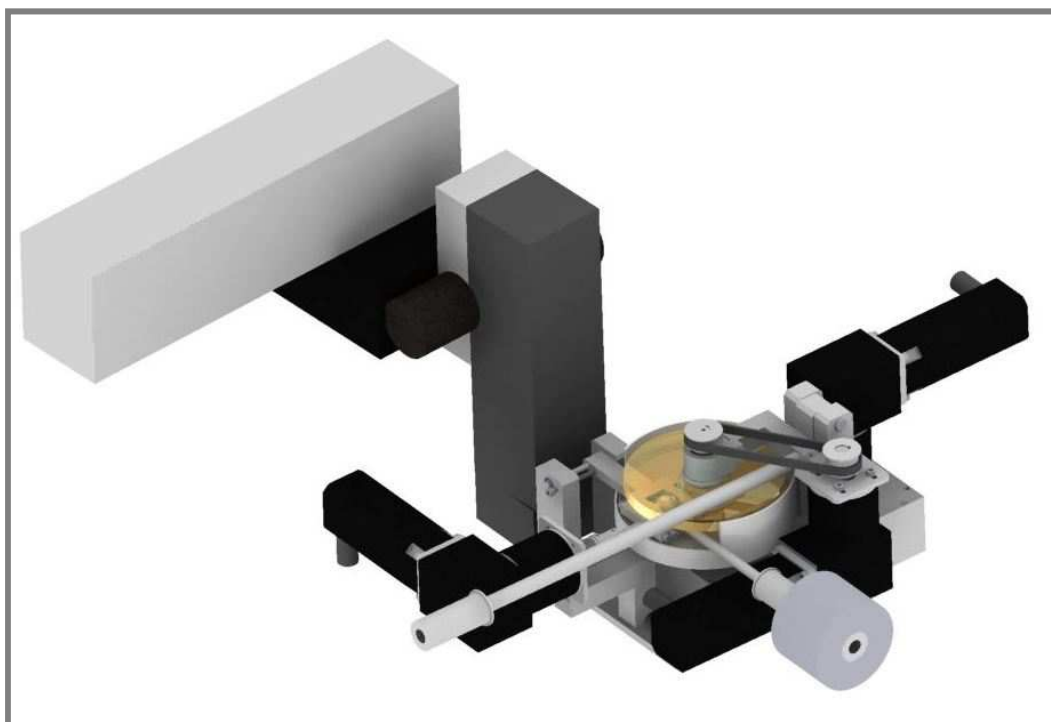
Kromě volby optimální konstrukční varianty je nutné zvolit i způsob výroby, především způsob spojení jednotlivých částí konstrukce. V úvahu připadá možnost některé díly svařit a jen ty nenutnější části šroubovat, či navrhnou šroubovanou kompletně celou konstrukci.

Pro svařování hovoří skutečnost, že by výroba byla levnější. Avšak při svařování mezi součástmi vzniká zbytkové napětí, které by mohlo způsobit odchylky rozměrů daných součástí. Odchylky by se však daly odstranit následným obrobením, což však výrobu prodraží. Další nevýhodou svařované konstrukce by bylo snížení možnosti modifikovat, či vyměnit některé díly. Pokud by totiž bylo nutné nahradit nějaký díl jiným, musel by se upravit, případně vyměnit celý svařenec, což by opět bylo nákladné.

Při použití šroubované konstrukce by bylo možné, díky dnešním technologiím, celou konstrukci vyrobit s velkou přesností. Zároveň by bylo možné modifikovat, popřípadě nahrazovat různé části mnohem snadněji a levněji než v případě svařence. Proti použití šroubované konstrukce hovoří především vyšší náklady na výrobu.

5 OPTIMÁLNÍ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Po konzultaci s vedoucím práce byla jako optimální zvolena třetí konstrukce. Tato varianta totiž nejlépe splňovala všechny požadavky. Při této konzultaci vyvstal také problém s tuhostí upnutí kuličky. Z tohoto důvodu bylo též upraveno zadání s tím, že minimální velikost průměru používané kuličky bude místo $\frac{1}{2}$ palce $\frac{3}{4}$ palce, což odpovídá 19,05mm. Tato změna umožní použít tužší konstrukci upnutí. Zároveň bylo rozhodnuto, že maximální kontaktní tlak mezi transparentním diskem a kuličkou bude snížen z hodnoty 1GPa na 0,8GPa. Tlak byl snížen proto, aby při experimentech nedošlo k poškození či dokonce zničení skleněného disku. Nutné bylo též zvážit, zda bude lepší zvolit svařovanou nebo šroubovanou konstrukci vzhledem k účelnosti stroje, přesnosti při měření a nákladnosti výroby. Po uvážení všech aspektů, s přihlédnutím na pozitivní zkušenost pracovníků ÚK, byla zvolena šroubovaná konstrukce, která je sice nákladnější na výrobu, avšak nabízí mimo jiné větší přesnost rozměrů a velmi dobrou možnost modifikace různých dílů, aniž by se musela měnit velká část tribometru.

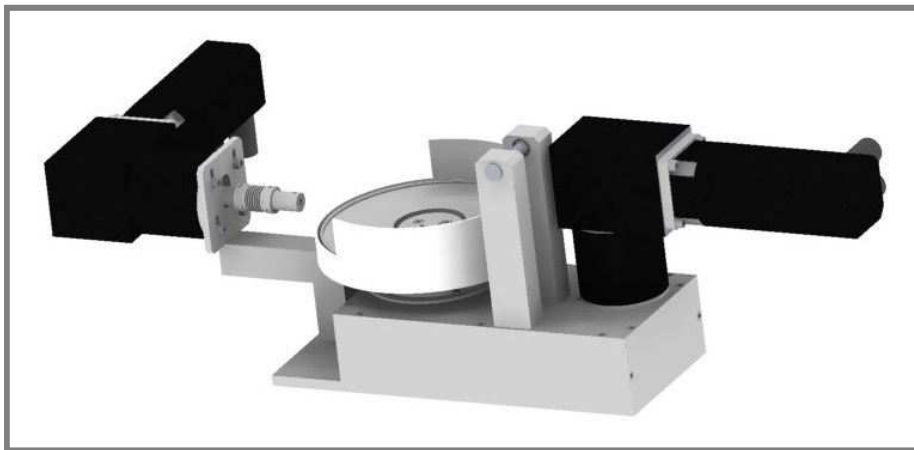


Obr. 5-1 Tribometr s mikroskopem

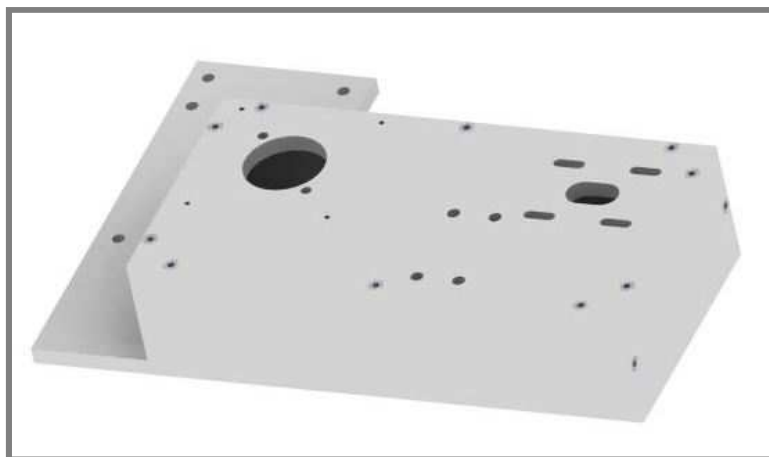
Zvolené optimální konstrukční řešení bylo zpracováno v 3D grafickém modeláři Autodesk Inventor 2010. Při řešení konstrukce bylo přihlédnuto k tomu, aby byl tribometr kompatibilní s těmi prvky, které se v laboratořích Ústavu konstruování již používají, jako je například závaží, nástavec zatěžovací páky, případně poháněcí jednotky či transparentní disky. Dále bylo nutné uvažovat o omezení rozměrů způsobené mikroskopem, jímž je snímán kontakt. Přístroj bude k pracovnímu stolu upevněn prostřednictvím stolku, který umožňuje posuv ve dvou osách a který se také v laboratořích již používá. Celá konstrukce byla volena tak, aby měla dostatečnou tuhost, protože případnou deformací prvků tribometru by mohlo dojít ke zkreslení měřených údajů.

5.1 Vybrané součásti

Základem a nosným prvkem tribometru je šroubovaná skříň. Její spodní část je větší než zbytek skříňe a jsou na ni uchyceny všechny části přístroje, mezi něž patří i držák pohonu kuličky a stojany pro rameno upevňující kuličku. Zároveň bude tribometr prostřednictvím této části připevněn ke stolku s posuvem. Horní část skříňe je uzpůsobena k upevnění dolního ložiskového tělesa, plastového krytu a stojanů pro horní část tribometru, která zahrnuje především transparentní disk včetně upevnění a pohonu, zatěžovací páku a pohonnou jednotku. K horní části skříňe je také připevněn motor s úhlovou převodovkou pro pohon ocelového disku. Pro toto upevnění jsou zde namísto klasických otvorů vyrobeny drážky, které umožňují posuv motoru v jednom směru, mající za následek změnu osové vzdálenosti mezi řemenicí pohonné jednotky a ocelového disku. To pomůže především při instalaci a seřízení ozubeného řemene. Obě ozubené řemenice včetně řemene jsou umístěny uvnitř skříňe a jejich obsluha je možná po jednoduchém odšroubování bočního dílu skříňe.



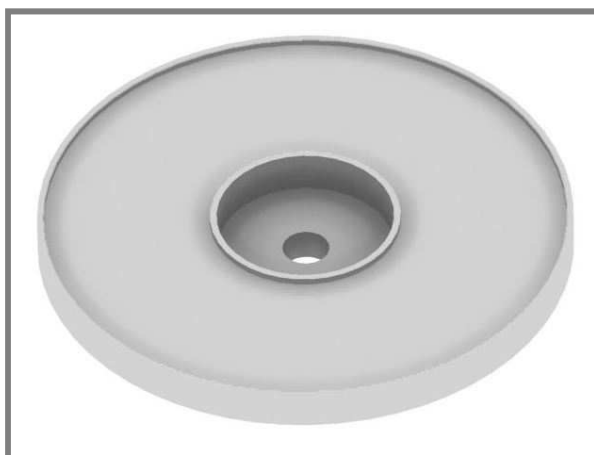
Obr. 5-2 Upevnění součástí na skříni



Obr. 5-3 Skříň

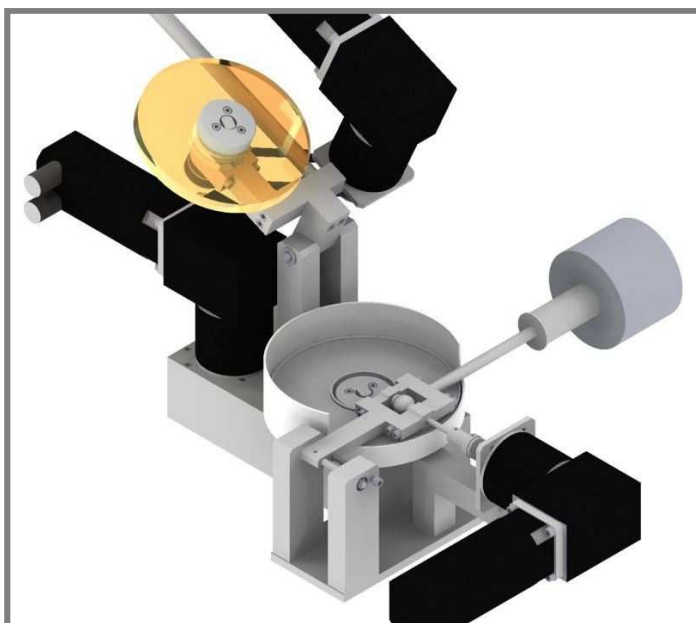
Neodmyslitelnou částí tribometru je ocelový disk. Disk je upevněn k dolnímu hřídeli a jeho prostřednictvím k dolnímu ložiskovému tělesu. Ložiskové těleso obsahuje nalisovaná ložiska a je přišroubováno ke skříni. Poloha dolního hřídele vůči ložiskovému tělesu je vymezena pojistnými kroužky. Pro upevnění ocelového disku k hřídeli je použit držák disku, který se skládá ze dvou částí. Tento držák ve spojení

s hřídelem se také již v laboratorních ÚK používá, díky čemuž bude možné ať už držák či disk bez problému nahradit nebo použít na jiných přístrojích. Výhodou tohoto typu držáku je velmi rychlá možnost výměny disku. Jedním ze znaků disku je zahloubení držáku disku, které je navrženo z toho důvodu, aby vzdálenost mezi oběma disky mohla být menší a jednotlivé držáky disků mezi sebou nekolidovaly. Funkční část disku je ohraničena zvýšenými hranami, jež mají zabránit odtoku maziva mimo funkční plochu. Předpokládaná drsnost funkční plochy je $0,4\mu\text{m}$, avšak tato hodnota se pravděpodobně bude modifikovat podle potřeb různých výzkumů.



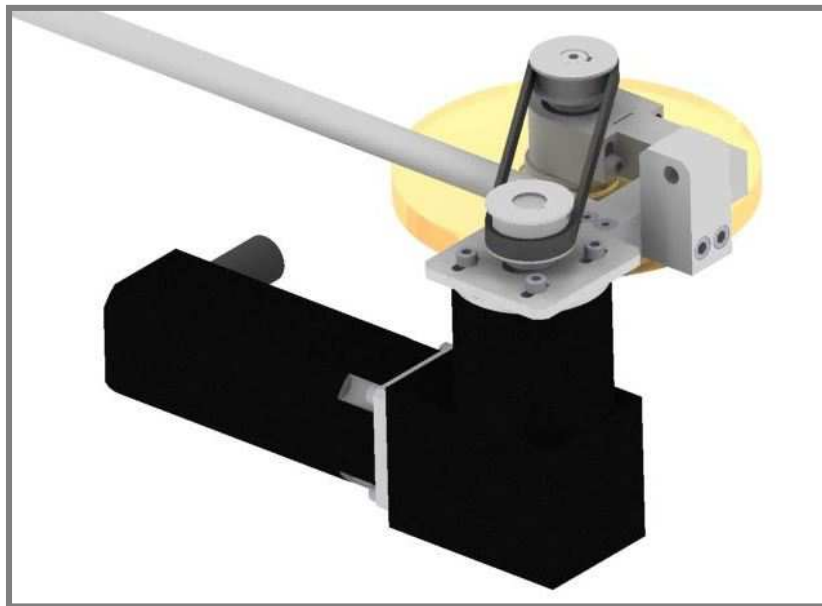
Obr. 5-4 Ocelový disk

Horní část tribometru je spojena se stojany upevněnými ke skříni pomocí čepu, jenž zároveň umožňuje naklápění celé horní části. Naklápění je důležité nejenom z důvodu zatěžování kontaktu, ale i kvůli snadné montáži či demontáži horního disku, během které dojde k úplnému odklopení. K horní části je připevněn také motor s převodovkou. Upevnění pohonné jednotky, podobně jako u pohonu ocelového disku, nabízí možnost měnit osovou vzdálenost mezi řemenicemi motoru a transparentního disku.



Obr. 5-5 Odklopení horní části

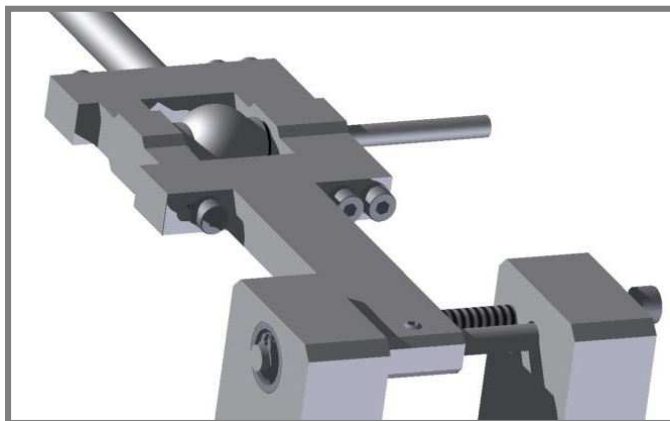
Za zmínku stojí, že řemenice na motoru je vyšší než u disku, aby se předešlo křížení, dokonce spadávání řemene při změně vzdálenosti obou disků. Tato změna je umožněna drážkami v upnutí horního ložiskového tělesa. Díky možnosti nastavení vzdálenosti obou disků lze v tribometru užít do jisté míry i jiný rozměr valivého tělesa. Horní, neboli transparentní disk je upevněn pomocí držáku disku a hřídele stejně jako disk ocelový. Pozice horního hřídele je vzhledem k ložiskovému tělesu s nalisovanými ložisky vymezena pojistnými kroužky. Transparentní disk bude vyroben z optického skla a jeho rozměry odpovídají diskům již v laboratorních přístrojích ÚK používaným. Dalším prvkem horní části tribometru je zatěžovací páka, prostřednictvím které je zatěžován kontakt především mezi kuličkou a horním diskem. Páka je opatřena závitem, díky němuž je snadná jak montáž, tak i demontáž páky. Funkční část páky je navržena tak, že umožňuje použití závaží, která jsou již k dispozici, případně prodloužení páky prodlužovacím členem.



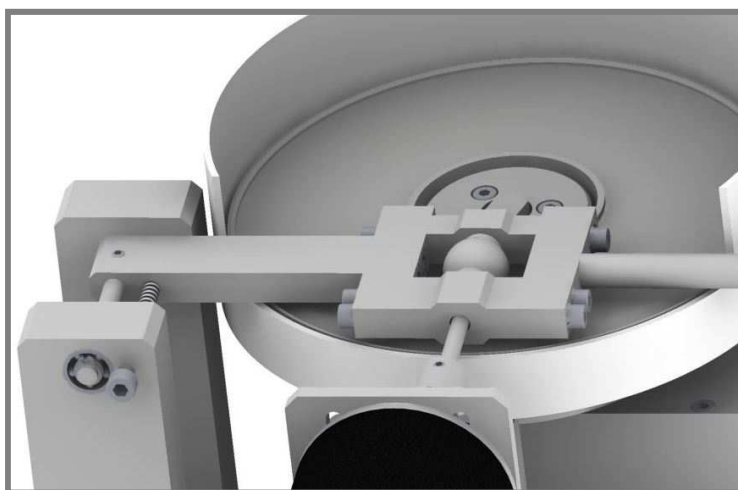
Obr. 5-6 Horní část tribometru

Velmi důležitou částí tribometru je prvek, který zajišťuje ustavení polohy kuličky vůči diskům a umožňuje zatěžování kontaktu mezi kuličkou a ocelovým diskem. Tento prvek je tvořen rámečkem, skládajícím se z dvojice ložiskových těles a příček. Části jsou mezi sebou sešroubovány, avšak vzdálenost mezi ložiskovými tělesy lze měnit pomocí dvojice šroubů v drážce vytvořené v příčkách. V ložiskových tělesech jsou v ložiskách uloženy tzv. nátrubky. Změnou vzdálenosti ložiskových těles je možné upevnit kuličku mezi nátrubky. Díky kuželovitému tvaru kontaktní strany nátrubků se sevřením kulička i vycentruje. K jedné z příček je upevněna druhá zatěžovací páka, prostřednictvím níž je zatěžován kontakt mezi kuličkou a ocelovým diskem. I tuto páku lze díky závitu snadno namontovat či demontovat a její funkční část rozměrově odpovídá závaží a prodlužovacímu prvku, jenž se již v laboratořích ÚK používají. Ke druhé z příček je upevněno rameno, jehož druhá strana obsahuje otvor, v němž je uložena osa. Uložení mezi osou a otvorem umožňuje axiální posuv ramena vůči ose, a tím změnu poloměru trajektorie, po které se bude kulička po disku pohybovat. Při provádění experimentu by se vytvořilo opotřebení i na disku, což by mělo vliv na další experimenty. Díky posuvu se změní poloměr a tím se

prodlouží dobu, po kterou je možno ocelový disk používat, aniž by bylo nutné funkční povrch opětovně brousit. K přesnějšímu nastavení axiálního posuvu lze použít šroub, jenž prochází jedním ze stojanů. Poloha se následně zajistí stavěcím šroubem. Snadné otáčení osy zabezpečují ložiska, která jsou nalisovaná ve stojanech. Stojany jsou přišroubovány k dolní části skříně.

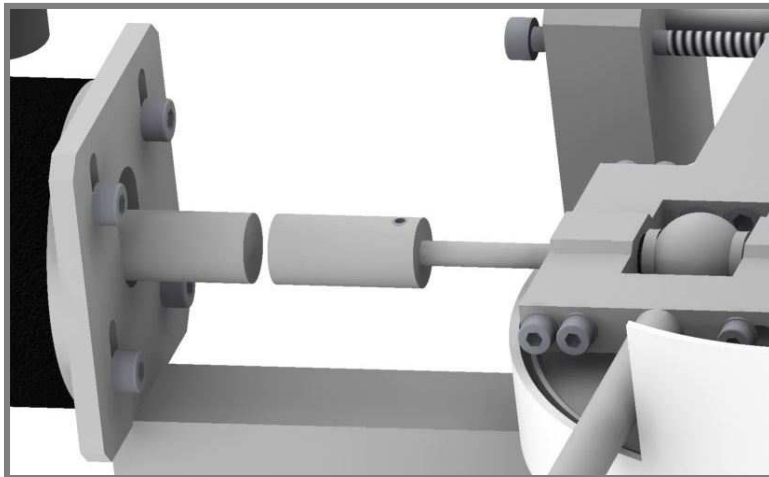


Obr. 5-7 Upevnění kuličky



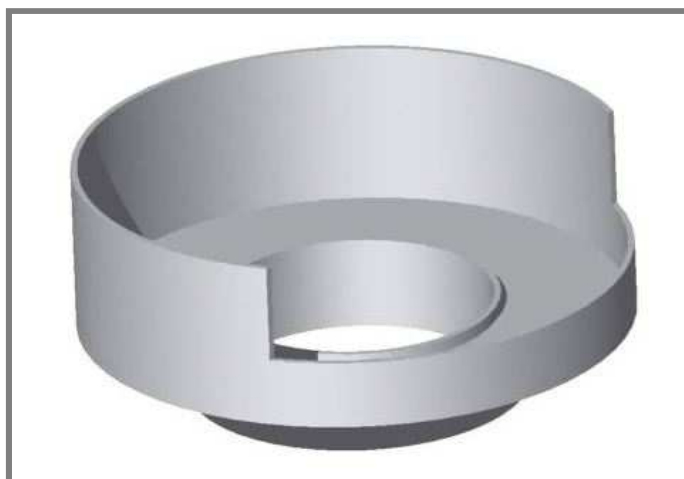
Obr. 5-8 Šroub pro změnu poloměru trajektorie

Při navrhování pohonu kuličky bylo nutné umožnit posuv kuličky v axiálním směru, případně nastavení výšky pohonu, který se bude částečně měnit v závislosti na velikosti použitého valivého tělíska. Nastavení výšky pohonu umožňuje držák pohonné jednotky skládající se ze dvou ramen a upnutí pohonné jednotky, jenž je připevněn k dolní části skříně. Výška se mění pomocí čtveřice šroubů a drážek v upnutí. Možnost posuvu upnutí kuličky v axiálním směru je umožněna nástavcem s otvorem. Nástavec má tvar trubičky a díky otvoru v ose umožní zasouvání a vysouvání nátrubku. Ustavení přesné polohy a přenos krouticího momentu je umožněn přes stavěcí šroub. Vnější průměr nástavce je navíc shodný s průměrem výstupního hřídele převodovky. Zatěžováním kuličky může dojít k malé nesouososti mezi osou nástavce a výstupním hřídelem převodovky. Tato nesouosost se vyrovnává pomocí vlnovcové spojky.



Obr. 5-9 Nástavec

Přesto, že je počítáno s prací při nízkých otáčkách, může se stát, že z pracovní plochy odletí kapka maziva. Pro tyto případy je okolo disků umístěn ochranný kryt, jenž bude vyroben z plastu. Jeho tvar není nikterak jednoduchý, což je způsobeno především konstrukcí části, která upíná a zatěžuje kuličku. Výroba by mohla být provedena pomocí technologie rapid prototyping.



Obr. 5-10 Plastový kryt

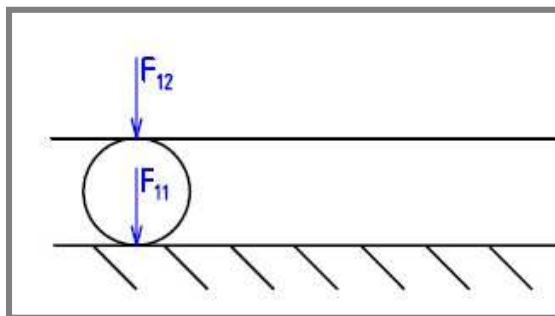
5.2 Určení zátěžných sil

Potřebná síla v kontaktu na základě požadovaného tlaku byla vypočtena s použitím Hertzovy teorie pro kontakt nekonformních povrchů. Při výpočtu byly použity následující parametry. Pro ocel byla za modul pružnosti vzata tabelovaná hodnota $E_o = 213\text{GPa}$ a Poissonovo číslo $\mu_o = 0,3$. Pro optické sklo $E_s = 81\text{GPa}$ a $\mu_s=0,206$. Výpočet byl proveden pomocí on-line kalkulátoru [18].

Výpočtem bylo zjištěno, že síla potřebná pro zatížení v kontaktu ocelového disku a kuličky o průměru $\frac{3}{4}$ palce odpovídá hodnotě $F_{11}=273,8\text{N}$. V kontaktu transparentního disku a kuličky stejného průměru, jako v předchozím případě, potřebná síla vyšla $F_{12}=62,2\text{N}$. Analogicky byl proveden výpočet pro kuličku

o průměru jednoho palce. Potřebné síly v kontaktu kuličky a ocelového, resp. transparentního disku jsou rovny hodnotám $F_{21}=486,8\text{N}$, resp. $F_{22}=110,5\text{N}$.

Z důvodu upořádání kontaktů je zatížení horního kontaktu přeneseno prostřednictvím kuličky i do kontaktu s ocelovým diskem. To má za následek snížení zátěžných sil, z čehož následně plyne i snížení hmotnosti závaží, jenž je třeba umístit na páku zatěžující kontakt kuličky s ocelovým diskem.

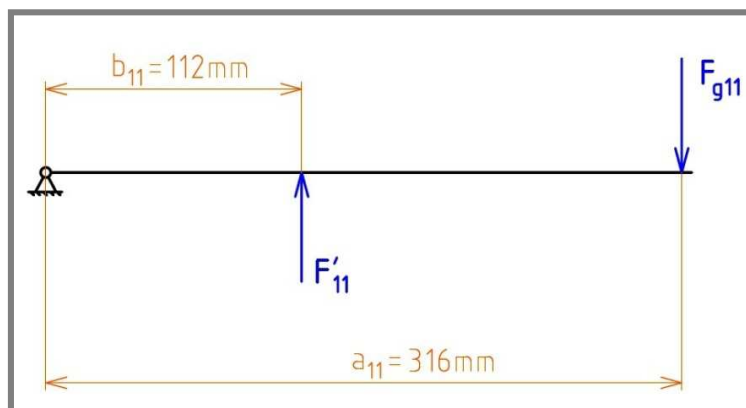


Obr. 5-11 Schéma působení zátěžných sil na kuličku

$$\begin{aligned} F'_{11} &= F_{11} - F_{12} & F'_{11} &= 273,8 - 62,2 = 211,6 \text{ N} \\ F'_{21} &= F_{21} - F_{22} & F'_{21} &= 486,8 - 110,5 = 376,3 \text{ N} \end{aligned}$$

Tíhová síla závaží umístěného na páce, bude vypočtena na základě momentové rovnosti. Při výpočtu je třeba brát v úvahu to, že při použití více kusů závaží se změní poloha působíště celkové tíhové síly, a je nutné započítat tuto změnu do délky ramen a_{11} a a_{12} .

Výpočet sil v kontaktu ocelového disku a kuličky o průměru $\frac{3}{4}$ palce.



Obr. 5-12 Schéma rozložení zátěžných sil na části upínající kuličku

$$M_{a11} = M_{b11}$$

$$F_{g11} * a_{11} = F'_{11} * b_{11} \quad F_{g11} = \frac{F'_{11} * b_{11}}{a_{11}} \quad F_{g11} = \frac{211,6 * 0,112}{0,316} = 75 \text{ N}$$

Hmotnost potřebného závaží se vypočítá podle prvního Newtonova zákona ($F = m * a$), kam za zrychlení dosadíme gravitační zrychlení $g=9,81 \text{ m/s}^2$.

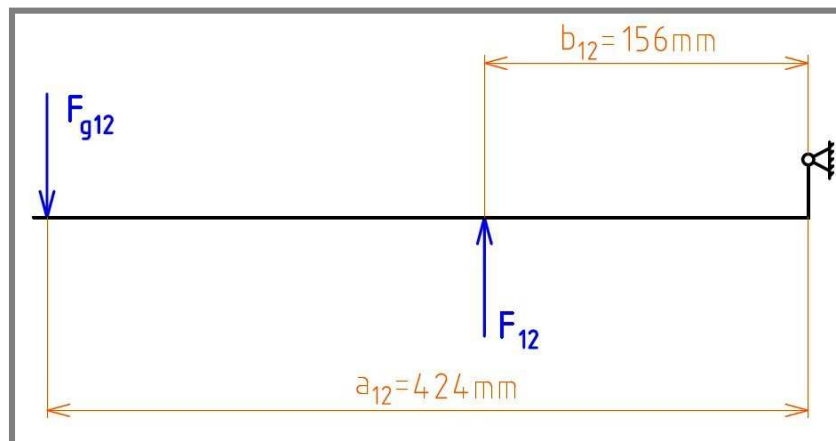
$$F_{g11} = m_{11} * g \quad m_{11} = \frac{F_{g11}}{g} \quad m_{11} = \frac{75}{9,81} = 7,7 \text{ kg}$$

Hmotnost potřebného závaží je možné snížit prodloužením páky pomocí prodlužovacího členu o délce $l = 200$ mm.

$$F_{gl11} * (a_{11} + l) = F_{11} * b_{11} \quad F_{gl11} = \frac{F_{11} * b_{11}}{a_{11} + l} \quad F_{gl11} = \frac{211,6 * 0,112}{0,316 + 0,2} = 45,9 N$$

$$F_{gl11} = m_{l11} * g \quad m_{l11} = \frac{F_{gl11}}{g} \quad m_{l11} = \frac{45,9}{9,81} = 4,7 \text{ kg}$$

Při výpočtu sil pro kontakt transparentního disku a kuličky o průměru $\frac{3}{4}$ palce, je nutné ve výpočtu uvažovat možnost změny poloměru trajektorie, po které se kulička vůči disku pohybuje. Toto má vliv na délku ramena b_{12} , proto je výpočet proveden se střední hodnotou této délky.



Obr. 5-13 Schéma rozložení zátěžných sil na horní části tribometru

$$M_{a12} = M_{b12}$$

$$F_{g12} * a_{12} = F_{12} * b_{12} \quad F_{g12} = \frac{F_{12} * b_{12}}{a_{12}} \quad F_{g12} = \frac{62,2 * 0,156}{0,424} = 22,9 N$$

$$F_{g12} = m_{12} * g \quad m_{12} = \frac{F_{g12}}{g} \quad m_{12} = \frac{22,9}{9,81} = 2,3 \text{ kg}$$

Zcela analogicky se vypočítá hmotnost závaží, potřebného pro zatěžování kontaktů s kuličkou o průměru jednoho palce.

Zátěžná síla a hmotnost závaží potřebná k zatížení kontaktu kuličky s ocelovým diskem.

$$F_{g21} = 133,4 N \quad m_{21} = 13,6 \text{ kg.}$$

Při použití prodlužovacího členu, se potřebná síla a hmotnost sníží.

$$F_{gl21} = 81,7 N \quad m_{l21} = 8,3 \text{ kg.}$$

Zátěžná síla a hmotnost závaží nutná k zatížení kontaktu kuličky a transparentního disku.

$$F_{g22} = 40,7 N \quad m_{22} = 4,1 \text{ kg.}$$

6 DISKUSE

6.1 Příprava experimentu

Zvednutím horní části tribometru a ramena pro upevnění a zatěžování kuličky je získán manipulační prostor pro upevnění obou disků. Ocelový disk se nasadí na dolní hřídel a jeho poloha se zajistí držákem a třemi šrouby s válcovou hlavou. Následně se funkční plocha disku očistí a odmastí. Dále se očistí a odmastí i kulička a upevní se do nátrubků. Sevření kuličky se zajistí utažením dvojice šroubů s válcovými hlavami v drážkách. Rameno s upevněnou kuličkou se sklopí, aby se kulička dotýkala disku. Poloměr trajektorie, po které se bude kulička vůči disku pohybovat, se nastaví šroubem ve stojanu, a poloha se zajistí stavěcím šroubem v ramenu. Připojením nástavce na konec nátrubku a vlnovcové spojky se připojí ke kuličce pohonná jednotka, přičemž výška výstupní hřídele převodovky se nastaví prostřednictvím čtveřice šroubů na upnutí pohonu kuličky tak, aby výstupní hřídel a nástavec byli sousedé. Následně se na funkční plochu ocelového disku nanese potřebné množství maziva. V další fázi se na horní hřídel nasadí transparentní disk, který je oddělen od kovových částí gumovými podložkami. Pro upevnění disku se použije shodný držák jako v případě ocelového disku. Upevněný disk se odmastí a spolu s horní částí se přiklopí na kuličku. Nastavení rovnoběžnosti funkčních ploch lze provést pomocí dvojice drážek a šroubů na horním ložiskovém tělese. Na horní část i na držák kuličky se našroubují zatěžovací páky, na které se umístí závaží. Konkrétní zatížení potřebné pro experiment se získá nasazením závaží určité hmotnosti či kombinací různých závaží. Hmotnost závaží, jež je nutné použít, lze snížit prodloužením zatěžovací páky pomocí prodlužovacího nástavce, se kterým se již v laboratořích pracuje. Pro kontakt kuličky o průměru $\frac{3}{4}$ palce a skleněného disku se použije závaží o hmotnosti 2,3 kg, pro kontakt kuličky s ocelovým diskem bude hmotnost závaží 7,7 kg. Při použití prodloužení páky bude stačit závaží o hmotnosti 4,7 kg. Aby bylo možné kontakt zkoumat, je třeba na něj umístit objektiv mikroskopu. Pomocí počítače a softwaru roztočíme oba disky a kuličku s tím, že můžeme jednotlivé úhlové rychlosti nastavit nezávisle na sobě. Po uvedení snímacího zařízení do provozu je možné zahájit experiment.

7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byl konstrukční návrh tribometru pro studium reálného opotřebení na utváření mazacího filmu za podmínek, kdy budou současně vytvořeny dva kontakty. Zatěžování a pohon elementů v obou kontaktech budou navzájem nezávislé. První kontakt bude vytvořen mezi valivým tělesem, jehož průměr bude v rozmezí od ½ do 1 palce, a skleněným diskem. Maximální velikost kontaktního tlaku v tomto kontaktu bude 1GPa a bude sloužit především k pozorování vytváření mazacího filmu. Druhý kontakt bude vznikat mezi valivým tělesem a ocelovým diskem. V tomto kontaktu se bude vytvářet reálné opotřebení a z toho důvodu je nutno kontakt zatěžovat tlakem 2GPa.

Po úvodním seznámení s danou problematikou bylo zjištěno, že tribometr, jenž by zadané požadavky splňoval, není na trhu dostupný, a proto bylo nutné tento tribometr navrhnout. Z toho důvodu jsou ve druhé kapitole představeny nejpoužívanější typy konstrukcí, které se při výzkumu používají. Jako výchozí byla zvolena konstrukce tribometru typu ball-on-disk, jenž se využívá i v několika experimentálních zařízeních již na Ústavu konstruování používaných.

Následně bylo navrženo několik konstrukčních variant, které se lišily především ve způsobu uložení obou disků k základnímu rámu. Varianty jsou uvedeny ve čtvrté kapitole, která zároveň obsahuje i varianty technologie spojování součástí.

Po konzultaci s vedoucím práce byla zvolena optimální konstrukční varianta s tím, že součásti se mezi sebou budou spojovat šroubovými spoji. Při konzultaci byly provedeny změny v zadání práce, které spočívaly ve zvětšení dolní hranice průměru kuličky z ½ palce na ¾ palce a ve snížení maximálního kontaktního tlaku v kontaktu mezi transparentním diskem a kuličkou z 1GPa na 0,8GPa. Konečná konstrukce je popsána v páté kapitole, v níž se také nachází výpočet pro určení potřebných zátěžných sil, ze kterých jsou vypočteny i hmotnosti potřebných závaží.

Konečná konstrukce splnila požadované požadavky. Navíc byla konstrukce navržena tak, aby bylo možné použít některé součásti, které se již v laboratořích ÚK používají. Jednou z velkých předností konstrukce je i možnost měnit poloměr trajektorie, po které se bude kulička pohybovat vzhledem k ocelovému disku, což výrazně prodlouží dobu v provozu ocelového disku bez nutnosti broušení.

Výstupem práce je kompletní výkresová dokumentace.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KŘUPKA, Ivan. *Prezentace odborné skupiny Tribologie* [online]. 2006-02-03 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: <http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=72>. Prezentace. ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně.
- [2] STACHOWIAK, G. a A. BATCHELOR. *Engineering tribology*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005, xxiv, 801 s. ISBN 07-506-7836-4.
- [3] STACHOWIAK, Gwidon W., Andrew W. BATCHELOR a Grazyna B. STACHOWIAK. *Experimental methods in tribology*. Amsterdam: Elsevier, 2004. ISBN 0 444 51589 5.
- [4] Falex tribology. FALEX CORPORATION. *Falex: A brief history* [online]. 2010 [cit. 2013-02-14]. Dostupné z: <<http://www.falexint.com/functions/content.asp?Pag=11&pnav=>>>.
- [5] Pin & Vee Block Test Machine. FALEX CORPORATION. *Falex* [online]. 2011, 2012 [cit. 2013-02-14]. Dostupné z: www.falex.com/pdf/FalexPinVeeBlock.pdf.
- [6] FALEX TIMKEN test rig. FALEX CORPORATION. *Falex* [online]. 2009, 2012 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://www.falex.com/pdf/FalexTimken.pdf>.
- [7] Falex/Timken test machine. FALEX CORPORATION. *Falex* [online]. 2010 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://www.falexint.com/functions/list.asp?Lid=2&pnav=;3;10;&item=12>.
- [8] Properties of Enclosed Gear Drive Lubricants. *Machinery lubrication* [online]. 2004 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: http://media.noria.com/sites/archive_images/Backup_200405_indfoc-fig2.jpg.
- [9] Falex Four-ball Extreme Pressure Test Machine. *Falex* [online]. 2011, 2012 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://www.falex.com/pdf/FalexFourBallEP.pdf>.
- [10] TE 37 BOWDEN-LEBEN MACHINE. PHOENIX TRIBOLOGY LTD. *Plint* [online]. 2011, 2012 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://www.phoenix-tribology.com/cat/at2/leaflet/te37.pdf>.
- [11] PIN-ON-RING TEST RIG. *Tribology-ABC* [online]. 2008, 13.12.2008 [cit. 2013-02-18]. Dostupné z: <http://www.tribology-abc.com/abc/pinring.htm>.
- [12] Pin-On-Ring Tribometer. *Aerospace & Advanced Composites GmbH* [online]. 2011 [cit. 2013-02-18]. Dostupné z: http://www.aac-research.at/products/products_AAC_TestFacilities_PinonRingTribo_de.html.

- [13] NAIT, Rahul Premachandran, Drew GRIFFIN a Nicholas X. RANDALL. The use of the pin-on-disk tribology test method to study three unique industrial applications. *Wear*. 2009, č. 267, s. 823-827. ISSN 0043-1648.
- [14] MOLIAN, Pal, Raathai MOLIAN a Rajeev NAIR. Laser shock wave consolidation of nanodiamond powders on aluminum 319. *Applied Surface Science*. 2009, roč. 255, č. 6, 3859–3867. ISSN 0169-4332. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433208022216>.
- [15] LORD, J. a R. LARSSON. Effects of slide–roll ratio and lubricant properties on elastohydrodynamic lubrication film thickness and traction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part J*. 2001, č. 215.
- [16] CARLI, M., E. CIULLI, H.P. EVANS a R.W. SNIDLE. Thermal point contact EHL analysis of rolling/sliding contacts with experimental comparison showing anomalous film shapes. *Tribology International*. 2009, č. 42.
- [17] FU, Z., F. GUO a P. L. WONG. Non-classical Elastohydrodynamic Lubricating Film Shape Under Large Slide-roll Ratios. *Tribology Letters*. 2007-6-25, roč. 27, č. 2, s. 211-219. ISSN 1023-8883. DOI: 10.1007/s11249-007-9227-8. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11249-007-9227-8>.
- [18] Engineering-abc.com: Tribology calculators. *Tribology-abc* [online]. 2008 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.tribology-abc.com/calculators/default.htm>

9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN

E_o	[GPa]	-modul pružnosti oceli
E_s	[GPa]	-modul pružnosti optického skla
μ_o	[1]	-Poissonovo číslo ocel
μ_s	[1]	-Poissonovo číslo optického skla
F_{11}	[N]	-síla potřebná pro zatížení kontaktu ocelového disku a $\frac{3}{4}$ palcové kuličky
F_{12}	[N]	-síla potřebná pro zatížení kontaktu transparentního disku a $\frac{3}{4}$ palcové kuličky
F_{21}	[N]	-síla potřebná pro zatížení kontaktu ocelového disku a palcové kuličky
F_{22}	[N]	-síla potřebná pro zatížení kontaktu transparentního disku a palcové kuličky
F'_{11}	[N]	-síla potřebná pro zatížení kontaktu ocelového disku a $\frac{3}{4}$ palcové kuličky, zmenšená o sílu F_{12}
F'_{21}	[N]	-síla potřebná pro zatížení kontaktu ocelového disku a palcové kuličky, zmenšená o sílu F_{22}
F_{g11}	[N]	-tíhová síla závaží potřebného pro zatížení kontaktu ocelového disku a $\frac{3}{4}$ palcové kuličky
F_{g12}	[N]	-tíhová síla závaží potřebného pro zatížení kontaktu transparentního disku a $\frac{3}{4}$ palcové kuličky
F_{g21}	[N]	-tíhová síla závaží potřebného pro zatížení kontaktu ocelového disku a palcové kuličky
F_{g22}	[N]	-tíhová síla závaží potřebného pro zatížení kontaktu transparentního disku a palcové kuličky
F_{gl11}	[N]	-tíhová síla závaží potřebného pro zatížení kontaktu ocelového disku a $\frac{3}{4}$ palcové kuličky, při použití prodlužovacího členu
F_{gl21}	[N]	-tíhová síla závaží potřebného pro zatížení kontaktu ocelového disku a palcové kuličky, při použití prodlužovacího členu
M_{a1}	[Nm]	-moment od zátěžných sil
M_{b1}	[Nm]	-moment od tíhových sil
a_{11}	[m]	-délka ramena, na kterém působí tíhová síla F_{g11}
a_{12}	[m]	-délka ramena, na kterém působí tíhová síla F_{g12}
b_{11}	[m]	-délka ramena, na kterém působí zátěžná síla F'_{11}
b_{12}	[m]	-délka ramena, na kterém působí zátěžná síla F_{12}
a_{21}	[m]	-délka ramena, na kterém působí tíhová síla F_{g21}
a_{22}	[m]	-délka ramena, na kterém působí tíhová síla F_{g22}
b_{21}	[m]	-délka ramena, na kterém působí zátěžná síla F'_{21}
b_{22}	[m]	-délka ramena, na kterém působí zátěžná síla F_{22}
l	[m]	-délka prodlužovacího členu
g	[m/s ²]	-gravitační zrychlení

m_{11}	[kg]	-hmotnost závaží potřebného pro zatížení kontaktu ocelového disku a $\frac{3}{4}$ palcové kuličky
m_{111}	[kg]	-hmotnost závaží potřebného pro zatížení kontaktu ocelového disku a $\frac{3}{4}$ palcové kuličky, při použití prodlužovacího členu
m_{12}	[kg]	-hmotnost závaží potřebného pro zatížení kontaktu transparentního disku a $\frac{3}{4}$ palcové kuličky
m_{21}	[kg]	-hmotnost závaží potřebného pro zatížení kontaktu ocelového disku a palcové kuličky
m_{121}	[kg]	-hmotnost závaží potřebného pro zatížení kontaktu ocelového disku a palcové kuličky, při použití prodlužovacího členu
m_{22}	[kg]	-hmotnost závaží potřebného pro zatížení kontaktu transparentního disku a palcové kuličky

10 SEZNAM OBRÁZKŮ**10**

Obr. 2-1	Tribometr typu Falex [5]	12
Obr. 2-2	V-bloky a válcový pin [5]	12
Obr. 2-3	Tribometr typu Timken [6]	13
Obr. 2-4	Princip tribometru Four-ball [8]	14
Obr. 2-5	Princip tribometru Four-ball [8]	14
Obr. 2-6	Princip Bowden-Leben [3]	15
Obr. 2-7	Princip Cameron_Mills [3]	15
Obr. 2-8	Tribometr typu pin-on-ring [11]	15
Obr. 2-9	Tribometr typu pin-on-ring [11]	15
Obr. 2-10	Elastické rameno [14]	16
Obr. 2-11	Tribometr se zatěžováním přes kuličku [15]	17
Obr. 2-12	Tribometr s pneumatickým ložiskem [16]	17
Obr. 2-13	Tribometr se zatížením přes pružinu [17]	18
Obr. 4-1	Schéma varianty 1	21
Obr. 4-2	Schéma varianty 2	21
Obr. 4-3	Schéma varianty 3	22
Obr. 5-1	Tribometr s mikroskopem	23
Obr. 5-2	Upevnění součástí na skříni	24
Obr. 5-3	Skříň	24
Obr. 5-4	Ocelový disk	25
Obr. 5-5	Odklopení horní části	25
Obr. 5-6	Horní část tribometru	26
Obr. 5-7	Upevnění kuličky	27
Obr. 5-8	Šroub pro změnu poloměru trajektorie	27
Obr. 5-9	Nástavec	28
Obr. 5-10	Plastový kryt	28
Obr. 5-11	Schéma působení zátěžných sil na kuličku	29
Obr. 5-12	Schéma rozložení zátěžných sil na části upínající kuličku	29
Obr. 5-13	Schéma rozložení zátěžných sil na horní část tribometru	30

11 SEZNAM PŘÍLOH

Výkresová dokumentace

- Výkres sestavy 0-3A1-1/1
- Seznam položek 0-3A1-1/1
- Výkresy součástí 3-3A1-1/2
3-3A1-1/3
4-3A1-1/4
4-3A1-1/5
4-3A1-1/6
4-3A1-1/7
3-3A1-1/8
4-3A1-1/9
4-3A1-1/10
4-3A1-1/11
4-3A1-1/12
4-3A1-1/13
4-3A1-1/14
4-3A1-1/15
4-3A1-1/16
4-3A1-1/17
4-3A1-1/18
4-3A1-1/19
4-3A1-1/20
4-3A1-1/21
4-3A1-1/22
4-3A1-1/23
4-3A1-1/24
4-3A1-1/25
4-3A1-1/26
4-3A1-1/27
4-3A1-1/28
4-3A1-1/29
4-3A1-1/30
4-3A1-1/31
4-3A1-1/32
4-3A1-1/33
4-3A1-1/34
4-3A1-1/35
4-3A1-1/36
4-3A1-1/37
- CD s elektronickou podobou práce