



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MECHINE DESIGN

EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRO STUDIUM MAZACÍCH FILMŮ

EXPERIMENTAL APPARATUS FOR LUBRICATION FILMS STUDY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MIROSLAV KOLMAN

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. IVAN KŘUPKA, PH. D.

BRNO 2007

ANOTACE

Diplomová práce je věnována ověření přesnosti nastavení provozních podmínek na experimentálním zařízení pro studium mazacích filmů a navržení vhodných úprav pro přesnější zajištění těchto podmínek. V průběhu řešení diplomové práce byl stanoven vliv změny rychlosti, zatížení a teploty na tloušťku mazacího filmu. Na základě získaných výsledků je možné konstatovat, že provedené úpravy přispěly významně k zajištění opakovatelných podmínek pro studium velmi tenkých mazacích filmů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Experimentální zařízení, tloušťka mazacího filmu, provozní podmínky

ANOTATION

The main subject of this diploma project is to verify operating conditions settings of experimental apparatus for lubrication films study and design suitable modifications of experimental apparatus. The effects of contact load and velocities of rubbing surfaces and lubricant temperature were considered. Designed modifications of experimental apparatus were proved to improve the accuracy of operating conditions settings for the thin film lubrication study.

KEY WORDS

Experimental apparatus, lubrication film thickness, operational conditions

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOLMAN, M. *Experimentální zařízení pro studium mazacích filmů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 58 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem napsal sám za pomoci mého vedoucího diplomové práce doc. Ing. Ivana Křupky, Ph.D. a za pomoci literatury uvedené v seznamu použitých zdrojů.

V Brně, dne 18. 5. 2007

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivanu Křupkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a cenné rady, které mi byly během tvorby diplomové práce velice prospěšné. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mě při tvorbě diplomové práce podporovali.

OBSAH

Úvod	15
1 Výzkum mazacích filmů	16
1.1 Výzkum mazacích filmů mezi nekonformně zakřivenými třecími povrchy	16
1.2 Experimentální zařízení pro výzkum mazacích filmů	18
1.3 Výzkum mazacích filmů na Ústavu konstruování	20
1.3.1 Experimentální zařízení	21
2 Provozní parametry	23
2.1 Rychlost třecích povrchů	23
2.1.1 Vliv změny rychlosti na tloušťku mazacího filmu	24
2.1.2 Měření rychlosti při odvalování	25
2.1.3. Vliv přesnosti stanovení středu otáčení disku na tloušťku mazacího filmu	26
2.2 Stanovení rychlosti třecích povrchů	27
2.3 Zatížení třecích povrchů	28
2.3.1 Způsob snímání zatížení	28
2.3.2 Vliv změny zatížení na tloušťku mazacího filmu	29
2.3.3 Vliv přesnosti nastavení poloměru R na tloušťku mazacího filmu	30
2.4 Teplota	32
2.4.1 Höpplerův viskozimetr	32
2.4.2 Rotační viskozimetr	33
2.4.3 Určení matematického modelu závislosti dynamické viskozity na teplotě	34
2.4.4 Vliv teploty na tloušťku mazacího filmu	35
2.4.5 Měření teploty oleje na experimentálním zařízení	36
2.4.6 Ověření teploty oleje v blízkém okolí kuličky	36
3 Úprava zařízení pro měření teploty	38
3.1 Volba snímače teploty	38
3.2 Úprava zařízení: Varianta 1	39
3.3 Úprava zařízení: Varianta 2	41
3.4 Úprava zařízení: Varianta 3	44
3.5. Úprava zařízení: Konečná varianta	46
3.5.1. Postup měření teploty s termočlánkem	49
3.6 Ověření teploty oleje na vstupu do kontaktní oblasti	49
Závěr	51
Seznam použitých zdrojů	52
Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	54
Seznam obrázků a grafů	56
Seznam tabulek	57
Seznam příloh	58

ÚVOD

Hledání cest pro výzkum mazacích filmů je odrazem nejen potřeby stále kvalitnějších mazacích olejů, ale i technického pokroku v oblasti mazaných soustav.

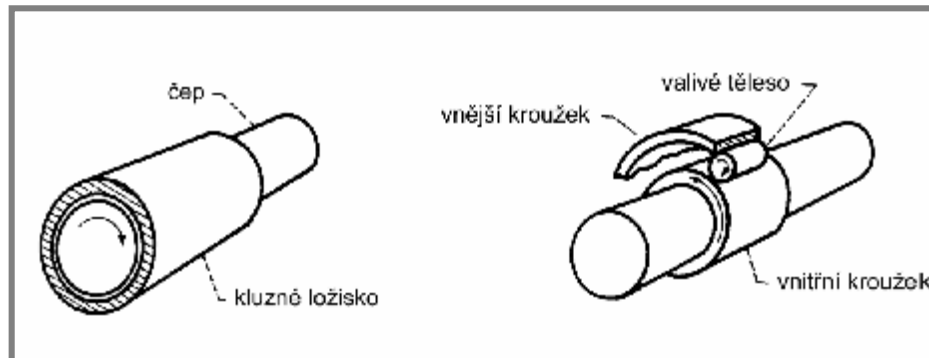
Na počátku 19. století byla teorie suchého tření, odvozená Ch. A. Coulombem [1], široce akceptována a experimentálně ověřená [2]. Pro mazané kontakty však podobná zákonitost neexistovala. Až do 80. let 19. století se předpokládalo, že zatížení v kluzném kontaktu je přenášeno přímo mezi třecími prvky a proto nebyl mazací film objektem studia. Až v pozdějších letech bylo zjištěno, že při zajištění dostatečného mazání mohou být třecí povrchy odděleny souvislou vrstvou maziva, která přenáší zatížení mezi tělesy v mazaném kontaktu [3].

Experimentální výzkum mazacích filmů poskytuje informace o chování mazaných kontaktů strojních soustav, které slouží jak k ověření teoretických modelů, tak i k poznání procesů, které jsou obtížně teoreticky řešitelné. S takovýmto výzkumem je nedílně spojeno použití experimentálního zařízení, které by mělo umožnit simulovat podmínky vyskytující se v reálných tribologických soustavách.

Cílem této diplomové práce je ověření přesnosti nastavení provozních podmínek na experimentálním zařízení používaném na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Jedná se o ověření nastavení zatížení a rychlostí třecích povrchů a teploty maziva. Tyto provozní podmínky přímo ovlivňují přesnost stanovení tloušťky mazacího filmu, která je určujícím parametrem pro studium procesů probíhajících mazaných v kontaktu nekonformně zakřivených těles v bodovém kontaktu kontaktů.

1 VÝZKUM MAZACÍCH FILMŮ

U konformně zakřivených třecích povrchů je tlak v mazacím filmu zpravidla menší než 5 MPa, a tento tlak tedy nemůže způsobit elastickou deformaci třecích povrchů. Naopak u nekonformně zakřivených třecích povrchů je kontaktní plocha velice malá a v některých případech mohou kontaktní tlaky dosahovat hodnot až několika gigapascalů, což způsobuje významné místní elastické deformace třecích povrchů [3]. Na obr. 1 je příklad konformně a nekonformně zakřivených třecích těles.



Obr. 1. Příklad konformně a nekonformně zakřivených třecích těles [3]

1.1 Výzkum mazacích filmů mezi nekonformně zakřivenými třecími povrchy

Počátek studia mazání nekonformně zakřivených třecích povrchů se datuje k počátku 20. století, kdy L. Gümbel [4] a H. M. Martin [5] publikovali výsledky teoretického studia mazání ozubeného soukolí. Analýzou boků zubů bylo zjištěno, že v mnoha případech v místě záběru jsou třecí povrchy odděleny souvislým mazacím filmem. Martin řešením Reynoldsovy rovnice pro případ styku dvou dokonale tuhých těles mazaných izoviskózním nestlačitelným mazivem získal vztah pro minimální tloušťku mazacího filmu v liniovém kontaktu:

$$h_{\min} = 4,896 \frac{u h_0 R_x}{w} \quad (1)$$

Po dosažení hodnot běžně se vyskytujících v kontaktech zjistil, že tloušťka mazacího filmu by se měla pohybovat okolo 0,03 μm , což je hodnota mnohem menší než střední aritmetická drsnost povrchu zubů, která v té době v nejlepším případě dosahovala 0,4 až 0,8 μm . Problémem bylo, že Martin při výpočtech nepočítal s elastickými deformacemi třecích těles, působícími na kontaktní oblasti, a s vlivem vysokého tlaku v kontaktu na vlastnosti maziva, zejména dynamickou viskozitu [3].

První reálný odhad tloušťky mazacího filmu ve styku velmi zatížených nekonformně zakřivených těles uveřejnil ve své studii v roce 1949 A. N. Grubin [6]. Řešením Reynoldsovy rovnice pro exponenciální nárůst tlaku v mazacím filmu na vstupu do kontaktní oblasti získal přibližný vztah pro tloušťku mazacího filmu v liniovém kontaktu:

$$h_c = 1,95(h_0 u a)^{0,73} R_x^{0,36} E^{0,09} w^{-0,09}. \quad (2)$$

K velmi podobnému závěru došli v roce 1959 D. Dowson a G. R. Higginson [7], kteří stanovili vztah pro minimální tloušťku mazacího filmu v liniovém kontaktu:

$$h_{\min} = 1,6a^{0,6}(h_0 u)^{0,7} R_x^{0,43} E^{0,03} w^{-0,13}. \quad (3)$$

Z rovnic (2) a (3) je zřejmé, že tloušťku mazacího filmu v liniovém kontaktu nekonformně zakřivených těles lze vyjádřit jako funkci několika proměnných:

$$h = f(R_x, E, h_0, a, w, u). \quad (4)$$

V roce 1976 zavedli D. Dowson a G. R. Higginson [8] pro výpočet minimální tloušťky mazacího filmu v bodovém kontaktu soubor pěti bezrozměrných parametrů, a to: bezrozměrný parametr tloušťky mazacího filmu H , bezrozměrný parametr rychlosti U , bezrozměrný parametr zatížení W , bezrozměrný parametr materiálů G a bezrozměrný parametr elipticity k . Jejich použitím lze vztah pro tloušťku mazacího filmu v bodovém kontaktu zapsat ve tvaru:

$$H = f(U, W, G, k), \quad (5)$$

po dosazení

$$\frac{h}{R_x} = f\left(\frac{u h_0}{E' R_x}, \frac{F}{E' R_x^2}, a E', \frac{a}{b}\right) \quad (6)$$

Dodnes nejpoužívanější vztahy pro výpočet minimální a centrální tloušťky mazacího filmu elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů, byly stanoveny D. Dowsonem a B. J. Hamrockem [1]

$$H_c = 2,69U^{0,67}W^{-0,067}G^{0,53}(1 - 0,61e^{-0,73k}). \quad (7)$$

$$H_{\min} = 3,63U^{0,68}W^{-0,073}G^{0,49}(1 - e^{-0,68k}). \quad (8)$$

K těmto výsledkům dospěli tak, že provedli 34 pokusů, ve kterých zkoumali vliv jednotlivých parametrů na tloušťku mazacího filmu [13-16].

Vliv rozdílných poloměrů třecích povrchů na mazaný kontakt studovali pro 10 rozdílných parametrů elipticity k v rozmezí 1 až 10, přičemž ostatní parametry byly konstantní. $H_{\min} = f(1 - e^{-0,68k})$ je výsledný vztah popisující vliv parametru elipticity na tloušťku mazacích filmů.

Pro zjištění vlivu rychlosti třecích povrchů na mazaný kontakt bylo použito 15 hodnot bezrozměrného parametru rychlosti. Výsledkem byl vztah $H_{\min} = f(U^{0,68})$ popisující vliv rychlosti na tloušťku mazacích filmů.

Vliv zatížení na mazaný kontakt byl stanoven jako $H_{\min} = f(W^{0,073})$. Ve srovnání s ostatními parametry má zatížení výrazně nižší vliv na tloušťku mazacího filmu.

Při posuzování vlivu materiálů museli vzít v úvahu, že se změna materiálu podle vzorce (8) projeví jak v parametru rychlosti tak v parametru zatížení. Výsledný vztah pro vliv materiálu na tloušťku mazacích filmů zní $H_{\min} = f(G^{0,49})$.

Přesto, že v následujících letech bylo odvozeno několik dalších vztahů pro výpočet centrální a minimální tloušťky mazacích filmů, pro účely této práce vystačíme se vztahy (7) a (8). Z těchto vztahů je zřejmý jak vliv rychlosti třecích povrchů, tak i zatížení a teploty maziva na tloušťku mazacího filmu.

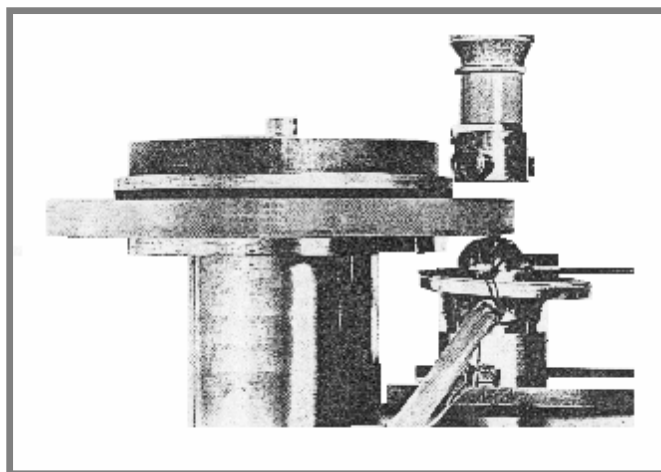
1.2 Experimentální zařízení pro výzkum mazacích filmů

Existuje mnoho typů experimentálních zařízení pro výzkum mazacích filmů. Liší se typem konstrukce, která je zpravidla určena měřicí metodou použitou ke stanovení tloušťky mazacího filmu.

Na konci 50. let 20. století L. B. Sibley a kol. [9] použili ke stanovení tloušťky mazacího filmu mezi dvěma odvalujícími se disky detekci X paprsků. Princip spočíval v tom, že třecí tělesa paprsky X pohltila, zatímco mazacím filmem prošly téměř beze změny. Po průchodu mazacím filmem byly paprsky detekovány Geigrovým čítačem. Srovnáním množství detekovaného záření s kalibrační tabulkou, získanou pro štěrbinu o známé šířce, mohla být stanovena výsledná tloušťka mazacího filmu. Tento typ zařízení používající disky (popřípadě válce) byl v té době běžně používán ke studiu mazacích filmů. Nicméně toto uspořádání třecích povrchů neumožňovalo přímé pozorování mazaného kontaktu.

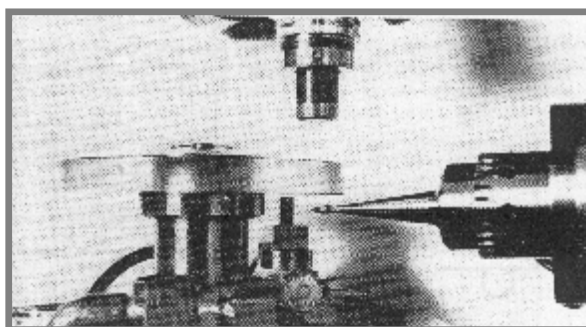
V roce 1961 J. F. Archard a M. T. Kirk [10] uvedli experimentální studii na téma elastohydrodynamické mazání bodových kontaktů. Pro simulaci podmínek vyskytujících se v bodových kontaktech použili dva válce s mimoběžnými osami. Průběh tloušťky mazacího filmu stanovili ze změny kapacitance mezi třecími povrchy. Pro měření použili zdroj bílého světla k osvětlení kontaktní oblasti, pro stanovení změny její velikosti se zatížením. V kontaktní oblasti poté pozorovali interferenční proužky stejné tloušťky, jejichž barvy se měnily se změnou zatížení a rychlosti třecích povrchů. Jednalo se tak o počátek optické interferenční metody pro studium mazacích filmů.

C.A. Foord, W. C. Hammann a A. Cameron [11] použili experimentální zařízení, u něhož se ocelová kulička o průměru 25,4 mm odvalovala po skleněném kotouči uloženém v aerostatickém ložisku (Obr. 2.). K získání kontrastního interferenčního obrazce opatřili spodní povrch kotouče polopropustnou vrstvou chrómu o tloušťce deseti nanometrů. Zařízení tohoto typu se stalo nejčastěji používaným typem experimentálního zařízení pro studium mazacích filmů optickou interferenční metodou.



Obr. 2. Zařízení pro měření tloušťky mazacích filmů za podmínek čistého valení [3]

Tento typ zařízení umožňuje nejen studium kruhových kontaktů. G. Dalmaz [12] sestrojil experimentální zařízení, ve kterém modeloval eliptické kontakty vyskytující se v kuličkových ložiscích s kosouhlým stykem (Obr. 3.). Tloušťku mazacího filmu měřil chromatickou i monochromatickou interferometrií v kontaktu mezi ocelovým soudečkem a skleněným nebo safírovým kotoučem.

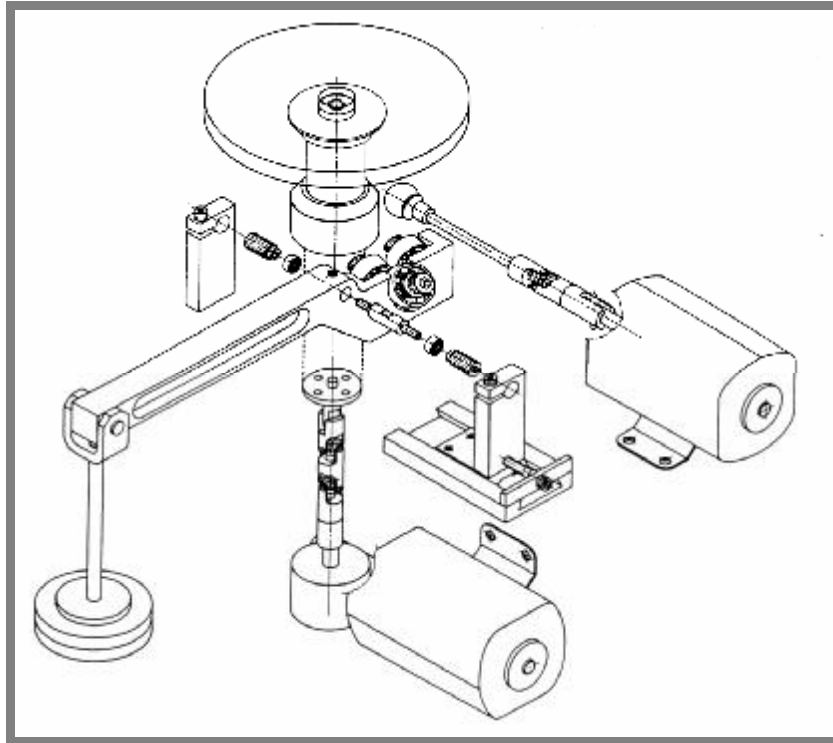


Obr. 3. Zařízení pro měření tloušťky mazacích filmů v eliptických kontaktech [3]

Konstrukce experimentálních zařízení tohoto typu se dále vyvíjela s tím, jak se vyvíjely dostupné měřicí metody i přístrojové vybavení. Typickým reprezentantem současných experimentálních zařízení je přístroj (obr. 4), který C. C. Kweh, H. P.

Evans a R. W. Snidle [17] použili ve své studii pro ověření vlastního teoretického řešení. Hodnoty centrální tloušťky mazacích filmů získali z chromatických interferogramů pro Hertzovy tlaky od 0,4 do 0,68 GPa pro kombinaci třecích povrchů ocel-sklo.

Zařízení obdobného typu jako používali Kweh, Evans a Snidle se stalo základem pro tvorbu vlastního experimentálního zařízení na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

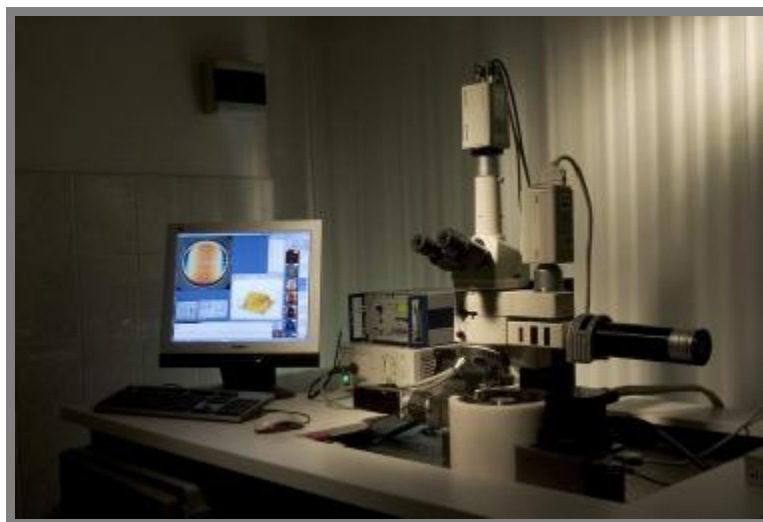


Obr. 4 Schéma experimentálního zařízení [17]

1.3 Výzkum mazacích filmů na Ústavu konstruování

Pro výzkum mazacích filmů byla na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně ustanovena tribologická skupina pod vedením doc. Ing. Ivana Křupky, Ph.D. Cílem skupiny je výzkum v oblasti mazacích filmů. Právě na Ústavu konstruování byla vyvinuta kolorimetrická interferometrie, metoda umožňující výzkum chování mazacích filmů o tloušťce řádu jednotek nanometrů jak u modelových nerovností, tak i u reálných třecích povrchů. Díky tomu bylo vůbec poprvé možné experimentálně získat informace o chování mazacího filmu v okolí jednotlivých reálných povrchových nerovností [18].

1.3.1 Experimentální zařízení

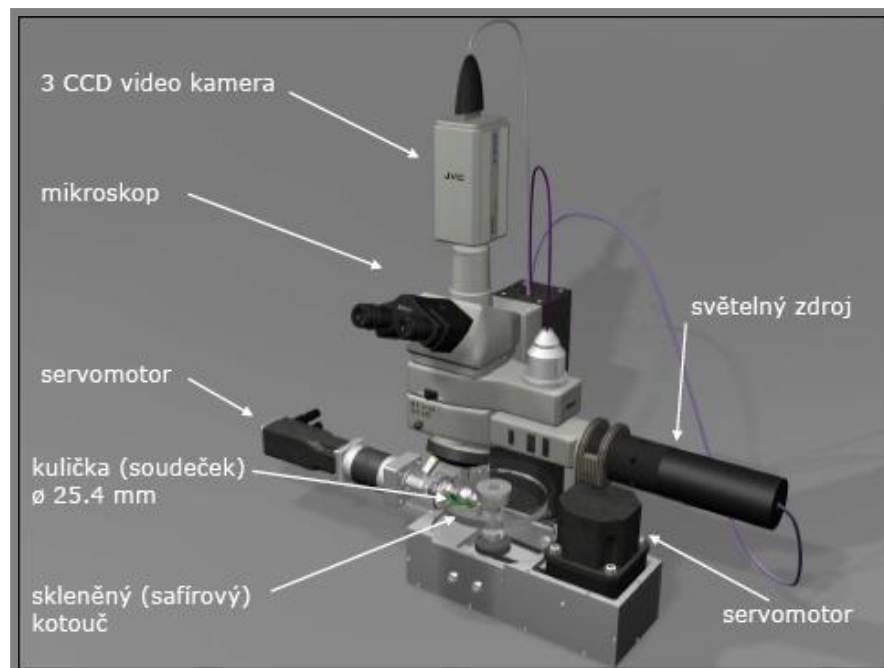


Obr. 5 Celkový pohled na experimentální zařízení [18]

Pro modelování podmínek vyskytujících se v reálných tribologických soustavách bylo na Ústavu konstruování sestrojeno experimentální zařízení (obr. 5) ve kterém je tenký mazací film vytvářen ve styku mezi rotujícím skleněným nebo safírovým diskem a otáčející se ocelovou kuličkou o průměru 25,4 mm. Osy rotace obou třecích povrchů jsou vzájemně kolmé. Obě strany disku jsou pokryty speciální vrstvou. Horní strana disku je pokryta protiodrazovou vrstvou, spodní je pokryta vrstvou chrómu. Kontakt je zatěžován přes disk, který je umístěn na dvojzvratné páce společně s pohyblivým závažím. Jak kulička, tak disk mohou být nezávisle poháněny servomotory s programovatelnými měniči frekvence. Díky tomu je možné experimentálně modelovat provozní podmínky vyskytující se ve strojních uzlech [19].

Mazivo je do kontaktu dopravován kuličkou, která se brodí v olejové lázni. Teplotní stabilita tribologické soustavy je zajištěna tepelnou izolací komory zařízení a užitím uzavřeného vyhřívacího okruhu.

Pozorování mazaných kontaktů je možné pomocí mikroskopového zobrazovacího systému složeného z průmyslového mikroskopu Nikon Optiphot 150. Podle potřeb je možno volit optimální kombinaci světelného zdroje a barevné kamery ke snímání chromatických interferenčních obrazců. Pro většinu studií mazacích filmů za ustálených podmínek je používán kontinuální halogenový nebo xenonový zdroj bílého světla a barevná televizní tříčipová CCD kamera Sony DXC 950P. Při výzkumu smíšeného mazání a procesů probíhajících za neustálených provozních podmínek se využívá zábleskový xenonový zdroj bílého světla v kombinaci s barevnou tříčipovou CCD kamerou JVC KY-F70B nebo barevnou vysokorychlostní kamerou IDT X-Vision 3. Během přípravy a při následné analýze jsou vzorky pozorovány stereomikroskopem Nikon SMZ 800 [19].

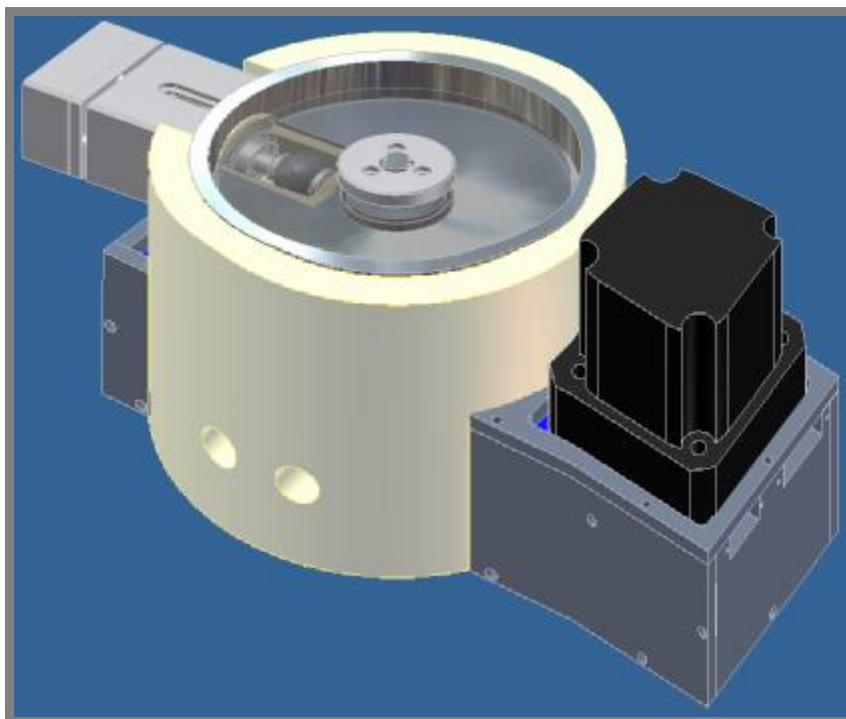


Obr. 6 Popis experimentálního zařízení [19]

2 PROVOZNÍ PARAMETRY

Provozními parametry jsou myšleny parametry, které podle vztahu (6) ovlivňují tloušťku mazacího filmu. Jedná se o rychlost třecích povrchů, zatížení kontaktní oblasti a viskozitu, respektive teplotu maziva v kontaktu.

Pro dokonalé pochopení funkce experimentálního zařízení a nastavení jednotlivých provozních parametrů byl sestaven jeho model v programu Autodesk Inventor 11 (obr.7). Díky tomuto modelu bylo mnohem snazší vytváření více variant nebo modifikací zařízení pro přesnější zjišťování provozních parametrů.



Obr. 7 Model experimentálního zařízení v programu Autodesk Inventor 11

2.1 Rychlost třecích povrchů

Rychlost je charakteristika pohybu popisující, jakým způsobem se mění poloha tělesa v čase [25].

Kulička a disk jsou poháněny samostatnými servomotory s možností nastavení rychlosti. Disk je poháněn servomotorem přes klínový řemen (obr. 6), ve kterém může docházet k prokluzu. Za předpokladu, že je tento prokluz zanedbatelný je rozdíl rychlostí mezi servomotorem a kotoučem tak malý, že nebude mít zásadní vliv na tloušťku mazacího filmu.

V případě odvalování kuličky je situace jiná. Odvalování znamená, že disk bude odpojen od servomotoru odmontováním řemenu a bude poháněn pouze otáčející se kuličkou. Je tedy možné, že bude docházet k prokluzu, který již může mít vliv na tloušťku mazacího filmu.

2.1.1 Vliv změny rychlosti na tloušťku mazacího filmu

Vliv rychlosti na tloušťku mazacího filmu je:

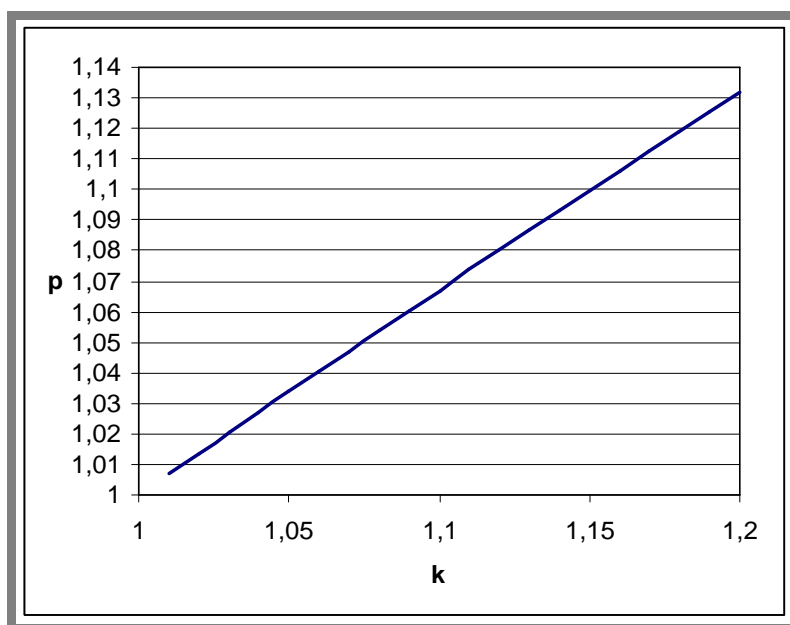
$$H_{\min 1} = f(U^{0,68}) \quad (9)$$

Pokud se rychlost změní o určitou hodnotu k , potom:

$$H_{\min 2} = f(k \cdot U)^{0,68} \quad (10)$$

Poměr těchto dvou tloušťek udává vliv změny rychlosti na tloušťku mazacího filmu.

$$p = \frac{H_{\min 2}}{H_{\min 1}} = \frac{(k \cdot U)^{0,68}}{U^{0,68}} = k^{0,68} \quad (11)$$



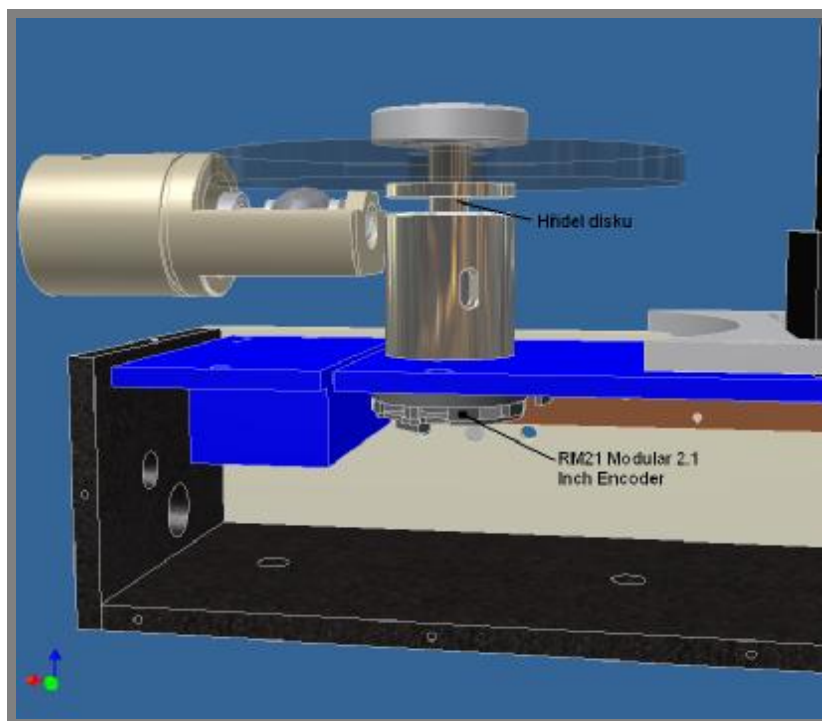
Obr. 8 Vliv změny rychlosti na tloušťku mazacího filmu

Z obr. 8 je patrné, že tloušťka mazacího filmu se zvětšuje se zvětšující se rychlostí a vliv změny rychlosti na tloušťku mazacího filmu je značný. Deseti procentní změna v rychlosti způsobí téměř 7% změnu v tloušťce mazacího filmu.

2.1.2 Měření rychlosti při odvalování

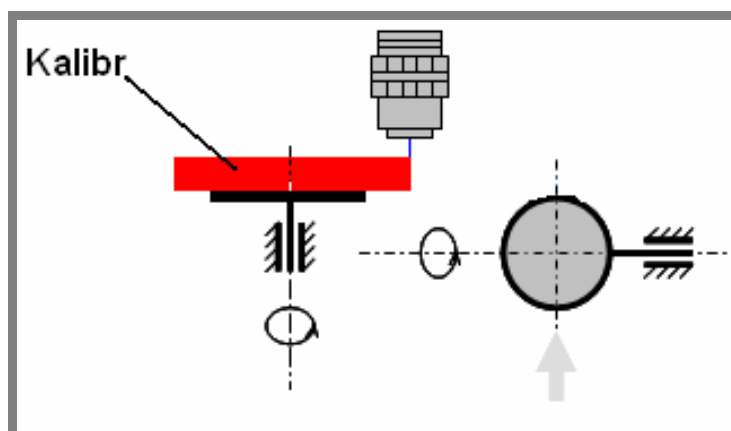
2.1.2

Pro stanovení otáček kotouče při odvalování bylo nutné z hřídele disku odmontovat řemenici (obr. 6) a na její místo připevnit otáčkoměr RM21 Modular 2.1 Inch Encoder od firmy RENCO (obr. 9). Jedná se o rotační inkrementální snímač otáček.



Obr. 9 Snímání otáček disku

Pro přesné stanovení rychlosti disku v kontaktní oblasti je nutné znát polohu kontaktní oblasti od osy otáčení disku. Jelikož v současné době není možné kvůli nedostatečnému posuvu najet objektivem mikroskopu do středu otáčení disku, byl vytvořen kalibr (viz. příloha 4), který nám umožní přesné stanovení středu otáčení disku.



Obr. 10 Určení polohy středu otáčení disku

- **Stanovení polohy středu otáčení**

Kvůli ochraně disku proti poškrábání se disk sundá z hřídele a na jeho místo se nasadí kalibr (obr.10). Objektívem mikroskopu se najede přesně na vnější hranu kalibru a na noniu posuvu zaznamenáme hodnotu. Od této hodnoty odečteme poloměr kalibru a tím získáme pozici středu otáčení disku.

2.1.3. Vliv přesnosti stanovení středu otáčení disku na tloušťku mazacího filmu

I přes přesné rozměry kalibru mohlo při jeho výrobě dojít k tomu, že byly dodrženy tolerance na horních nebo dolních tolerančních mezích. Stejně tak i průměr hřídelky, na které je kalibr nasazen může být vytvořen na hranicích tolerance rozměru. Pokud tomu tak je, potom se při stanovení polohy středu otáčení může v přesnosti nastavení projevit vůle v .

Rychlost třecích povrchů závisí na otáčkách kotouče n a poloměru R , na kterém dochází ke kontaktu s kuličkou.

$$u = 2pn \cdot R \quad (12)$$

Pokud je poloměr R změněn o vůli v , pak má rychlost třecích povrchů u' tvar:

$$u' = 2pn \cdot (R + v) \quad (13)$$

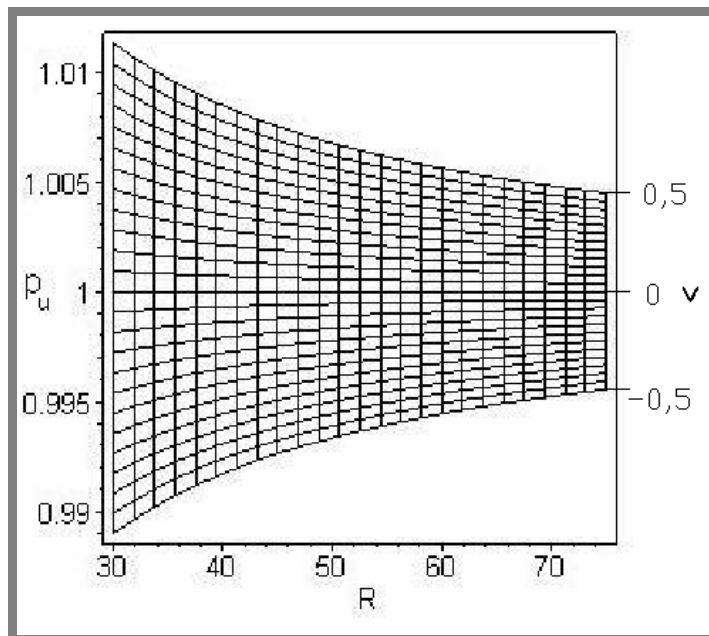
Vliv rychlosti třecích povrchů na minimální tloušťku mazacího filmu je dán vztahem (9). Podle rovnice (6) je bezrozměrný parametr rychlosti U lineárně závislý na rychlosti třecích povrchů u , proto tedy:

$$H_{u1} = f(u) = (2pn \cdot R)^{0,68} \quad (14) \quad \text{a} \quad H_{u2} = f(u') = [2pn \cdot (R + v)]^{0,68} \quad (15)$$

Poměr p_u (16) těchto dvou tlouštěk mazacího filmu udává procentuální změnu tloušťky mazacího filmu v závislosti na vůli v při daném poloměru R .

$$p_u = \frac{H_{cu1}}{H_{cu2}} = 100 \sqrt[0,68]{\frac{(2p \cdot n)^{68} \cdot R^{68}}{(2p \cdot n)^{68} \cdot (R + v)^{68}}} = 100 \sqrt[0,68]{\frac{R^{68}}{(R + v)^{68}}} \quad (16)$$

Obrázek 11 ukazuje tuto závislost graficky pro poloměr v intervalu $R_2 \text{ e } < 30 ; 75 >$ mm a pro vůli v intervalu: $v \text{ e } < -0,5 ; 0,5 >$ mm.



Obr. 11 Změna tloušťky mazacího filmu v závislosti na vůli a poloměru při změně rychlosti

Z obrázku 11 je patrné, že nepřesnost v nastavení poloměru $v = 0,5$ mm způsobí při minimálním nastavení poloměru $R = 30$ mm změnu v tloušťce mazacího filmu o více jak 1%. Z obrázku je také patrné, že vůle má na změnu tloušťky mazacího filmu se zvětšujícím se poloměrem zmenšující se vliv.

2.2 Stanovení rychlosti třecích povrchů

2.2

Pro zjištění rychlosti třecích povrchů bylo nejdříve potřeba zjistit přesnou polohu středu otáčení disku a poloměr, na kterém dochází ke kontaktu kuličky s diskem. K tomu byl použit kalibr. Postup stanovení poloměru pomocí kalibru je uveden v kapitole 2.1.2. Pro zjištění, zda se rychlosti kuličky a disku při čistém valení liší, bylo provedeno měření, kdy pro určité otáčky kuličky byla zaznamenávána frekvence impulzů z inkrementálního snímače otáček. Při jedné otáčce je na výstupu snímače 2500 impulzů.

Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 4 pro vzdálenost kontaktu od osy otáčení $R = 47,1$ mm a v tabulce 5 pro vzdálenost kontaktu od osy otáčení $R = 53,6$ mm. Obě tabulky jsou v příloze 1. V tabulkách jsou uvedeny:

n_m [1/min]	Otáčky motoru pohánějícího kuličku
i [1/s]	Počet impulzů z inkrementálního snímače rychlosti za sekundu
n_k [1/s]	Otáčky kuličky
n_d [1/s]	Otáčky disku
v_k [mm/s]	Rychlost kuličky v kontaktu
v_d [mm/s]	Rychlost disku v kontaktu
p_v [-]	Poměr rychlostí
Σ [-]	Prokluz

Kulička je poháněna motorem přes planetovou převodovku s poměrem 1:30, proto:

$$n_k = \frac{n_m}{30 \cdot 60} [1/s] \quad (17)$$

Otáčky disku lze spočítat z počtu impulzů z inkrementálního snímače rychlosti za jednu sekundu a počtu impulzů na jednu otáčku.

$$n_d = \frac{i}{2500} [1/s] \quad (18)$$

Rychlost kuličky resp. disku lze spočítat:

$$v_k = 2 \cdot p \cdot n_k \cdot R_k \quad (19) \quad \text{a} \quad v_d = 2 \cdot p \cdot n_d \cdot R \quad (20)$$

Poměr rychlostí:

$$p_K = \frac{v_d}{v_k} [-] \quad (21)$$

a prokluz:

$$\Sigma = \frac{2 \cdot (v_k - v_d)}{v_k + v_d} \quad (22)$$

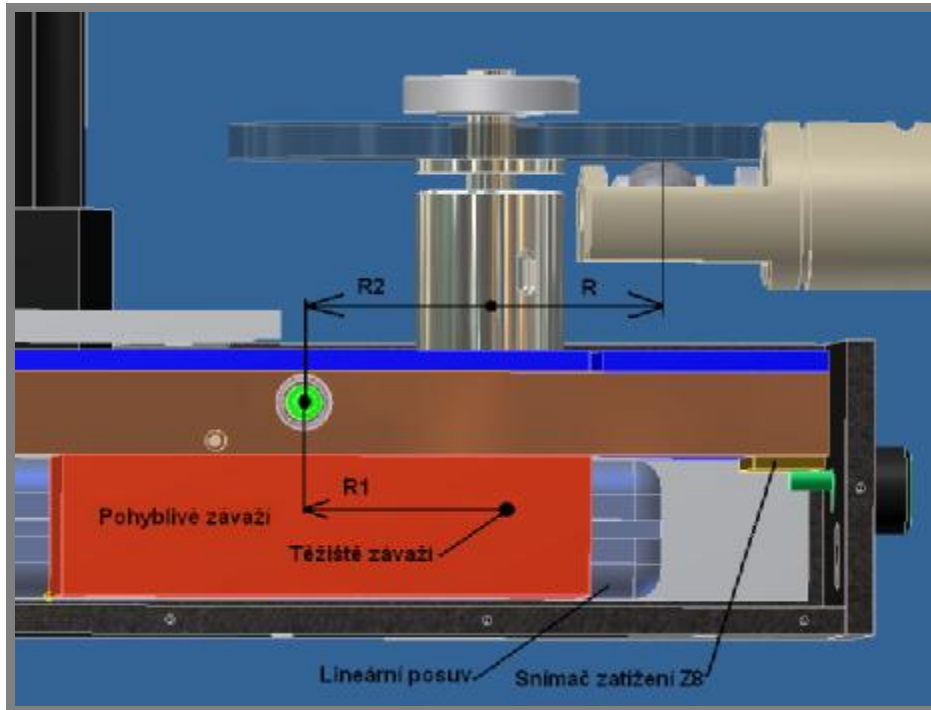
Z tabulek je vidět, že rozdíl rychlostí je nepatrný. Prokluz v obou případech dosahuje maximálně hodnoty -0,0061, což je zanedbatelná hodnota. V některých případech dosahuje rychlost disku větší hodnoty než rychlost kuličky. Ve skutečnosti je to v případě čistého valení nemožné. Pravděpodobně je to způsobeno nepřesností stanovení polohy kontaktu od osy otáčení disku nebo nepřesností odečtu impulzů. Na základě naměřených výsledků je možné konstatovat, že experimentální zařízení je vhodné pro studium mazacích filmů za podmínek čistého valení i v konfiguraci kdy je disk poháněn otáčející se kuličkou.

2.3 Zatížení třecích povrchů

2.3.1 Způsob snímání zatížení

Síla je snímána tenzometrickým snímačem síly Z8 od firmy HBM. Kontakt je zatěžován přes skleněný ev. safírový disk, který je společně s pohyblivým závažím umístěn na dvojzvratné páce (viz obr. 12 a 14).

Přesnost stanovení poloměru R , na kterém působí kontaktní síla, závisí na správném stanovení středu otáčení disku. Způsob stanovení středu otáčení disku je stejný, jako u stanovení středu otáčení disku u rychlosti. Postup je uveden v kapitole 2.1.2 na straně 26.



Obr. 12 Způsob snímání síly

2.3.2 Vliv změny zatížení na tloušťku mazacího filmu

2.3.2

Vliv zatížení na tloušťku mazacího filmu je:

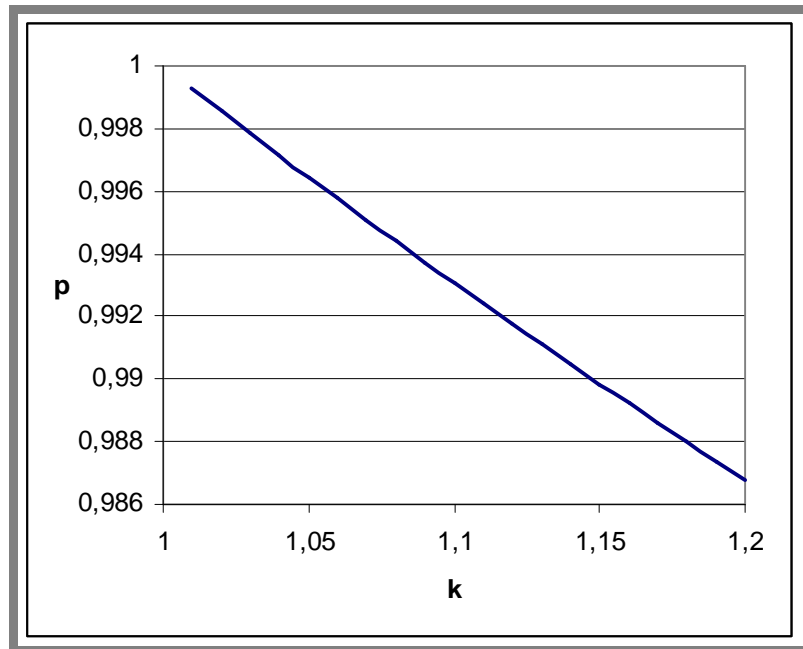
$$H_{\min 1} = f(W^{0,073}) \quad (23)$$

Pokud je zatížení zvětšeno o určitou hodnotu k , potom:

$$H_{\min 2} = f(k \cdot W)^{0,073} \quad (24)$$

Poměr těchto dvou tloušťek udává vliv změny rychlosti na tloušťku mazacího filmu.

$$p = \frac{H_{\min 2}}{H_{\min 1}} = \frac{(k \cdot U)^{-0,074}}{U^{-0,073}} = k^{-0,073} \quad (25)$$

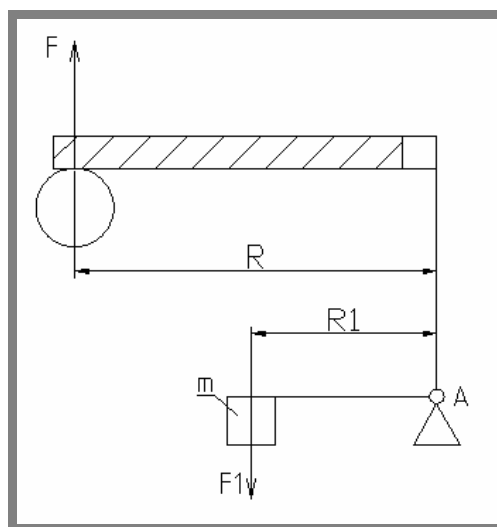


Obr. 13 Vliv změny zatížení na tloušťku mazacího filmu

Z obrázku 13 je patrné, že tloušťka mazacího filmu se zmenšuje se zvětšujícím se zatížením. Vliv změny zatížení na tloušťku mazacího filmu však není výrazný.

2.3.3 Vliv přesnosti nastavení poloměru R na tloušťku mazacího filmu

Síla v kontaktu mezi kuličkou a kotoučem je vyvolána závažím působícím přes páku (obr. 14).



Obr. 14 Způsob zatěžování kontaktních těles

Momentová věta pro bod A zní:

$$\Sigma M_A = 0 \Rightarrow F_1 \cdot R_1 - F \cdot R = 0 \quad (26)$$

Z této rovnice vyjádříme kontaktní sílu F :

$$F = \frac{F_1 \cdot R_1}{R} \quad (27)$$

Budeme-li předpokládat, že součin $F_1 \cdot R_1$ se nemění, tj. je konstantní, lze vzorec (27) psát:

$$F = \frac{C}{R} \quad \text{kde } C = F_1 \cdot R_1 \quad (28)$$

Pokud je poloměr R změněn o vůli v , pak má kontaktní síla F' podobu:

$$F' = \frac{C}{R + v} \quad (29)$$

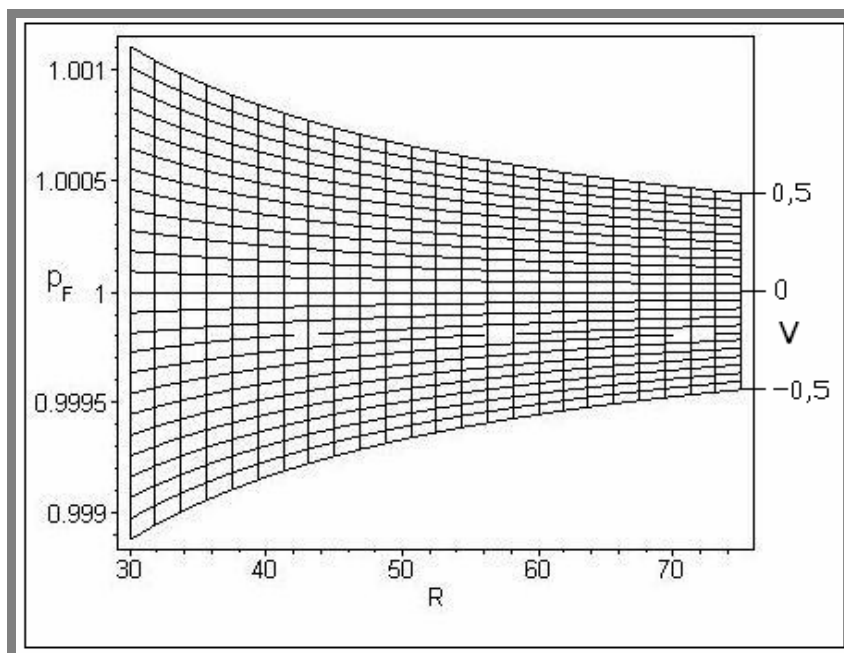
Vliv kontaktní síly na minimální tloušťku mazacího filmu je dána vztahem (29). Podle rovnice (6) je bezrozměrný parametr zatížení W lineárně závislý na kontaktní síle F , proto tedy:

$$H_{F1} = f(F) = \left(\frac{C}{R}\right)^{-0,073} \quad (30) \quad \text{a} \quad H_{F2} = f(F') = \left(\frac{C}{R+v}\right)^{-0,073} \quad (31)$$

Poměr p_F těchto dvou tloušťek mazacího filmu udává procentuální změnu tloušťky mazacího filmu v závislosti na vůli v při daném poloměru R .

$$p_F = \frac{H_{F2}}{H_{F1}} = \frac{\left(\frac{C}{R}\right)^{0,073}}{\left(\frac{C}{R+v}\right)^{0,073}} = 1000 \sqrt{\frac{(R+v)^{73}}{R^{73}}} \quad (32)$$

Obrázek 15 ukazuje tuto závislost graficky pro poloměr R v intervalu $R_2 \in < 30 ; 75 >$ mm a pro vůli v v intervalu: $v \in < -0,5 ; 0,5 >$ mm.



Obr 15. Změna tloušťky mazacího filmu v závislosti na vůli a poloměru při změně zatížení

Z obrázku 15 je vidět, že nastavení poloměru na tloušťku mazacího filmu při změně zatížení nemá výrazný vliv. Při vůli $v = 0,5$ mm a minimálním nastaveném poloměru $R = 30$ mm je změna tloušťky pouze o něco více než 0,1%. To znamená, že při použití kalibru pro stanovení středu otáčení disku lze určit velikost zatížení kontaktní oblasti s dostatečnou přesností.

2.4 Teplota

Teplota je fyzikální veličina vyjadřující míru tepelného stavu tělesa [23]. Dle vzorce (6) je tloušťka mazacího filmu závislá na dynamické viskozitě. Vliv teploty na viskozitu kapaliny lze zjistit pomocí viskozimetrů. Na Ústavu konstruování jsou k dispozici dva typy viskozimetrů - Höpplerův viskozimetr a rotační viskozimetr.

2.4.1 Höpplerův viskozimetr

Princip tohoto zařízení spočívá v měření doby pádu kuličky olejem v měřicí trubici mezi dvěma ryskami. Podle [24] se dynamická viskozita oleje vypočítá podle vzorce

$$h = K \cdot \left(r_1 - \frac{r_2}{1000} \right) \cdot t \quad [\text{mPa}\cdot\text{s}] \quad (33)$$

Kde:

η [mPa·s]	je dynamická viskozita
K [mPa·cm ³ /g]	je konstanta kuličky
ρ_1 [g/cm ³]	je hustota kuličky
ρ_2 [kg/m ³]	je hustota kapaliny při dané teplotě
t [s]	je doba pádu kuličky kapalinou mezi dvěma ryskami

Hodnota konstanty kuličky K a hustota kuličky ρ_1 se vybere z tabulky [24] pro příslušnou kuličku. Kulička je vybírána dle předpokládané viskozity kapaliny.

Hustota kapaliny ρ_2 se musí dopočítat z hmotnosti a objemu kapaliny při dané teplotě.

2.4.2 Rotační viskozimetr

2.4.2

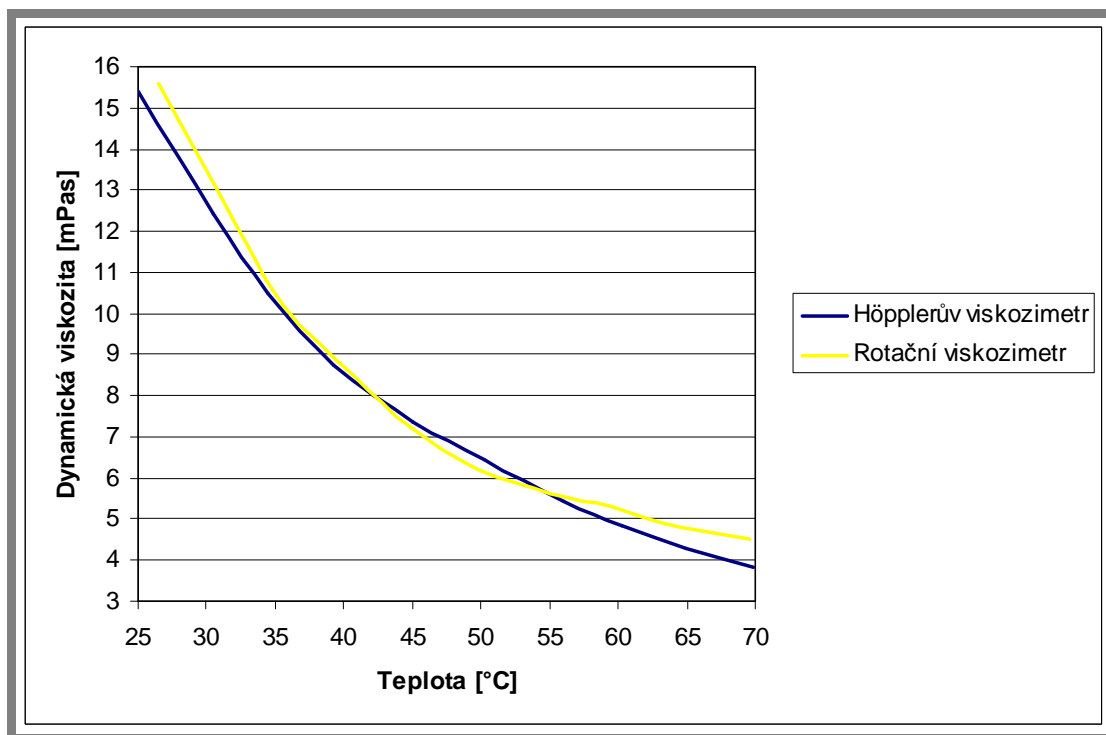
Principem metody [26] je stanovení napětí ve stříhu kapaliny a jeho přepočtení na dynamickou viskozitu a to podle vzorce:

$$h = \frac{t}{g} \quad (34)$$

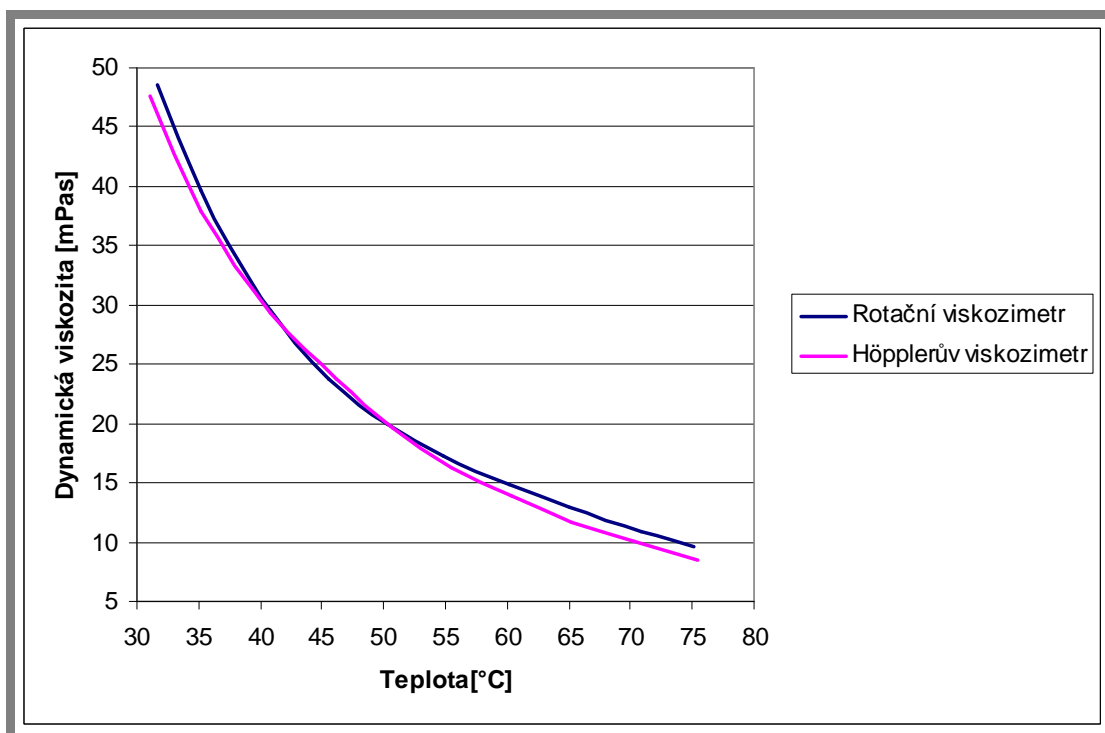
Kde:

h [Pa·s]	je dynamická viskozita
t [Pa]	je smykové napětí v kapalině
g [1/s]	je smykový poměr

Pro měření viskozity jsou na tomto rotačním viskozimetru dvě možnosti. Buď přímá, kdy je kvůli omezení statického tření odebráno větší množství vzorků v delším časovém intervalu, nebo tzv. metoda „Snap-Shot-Test“ kdy je měřeno více veličin popisujících kapalinu, jako je např. teplota, viskozita, tixotropie, mez kluzu, atd. Pro ověření hodnot viskozity z Höpplerova viskozimetru jsem použil rychlejší metodu „Snap-Shot-Test“. Porovnání výsledků Höpplerova a rotačního viskozimetru jsou uvedeny pro olej H.P.O.70 na (Obr. 16) a pro olej H.P.O. 200 na (Obr.17).



Obr. 16 Porovnání průběhu viskozity oleje H.P.O.70 mezi Höpplerovým a rotačním viskozimetrem



Obr. 17 Porovnání průběhu viskozity oleje H.P.O.200 mezi Höpplerovým a rotačním viskozimetrem

2.4.3 Určení matematického modelu závislosti dynamické viskozity na teplotě

Z obrázků 16 a 17 je patrné, že průběh viskozity z rotačního viskozimetru se téměř neliší od průběhu viskozity z Höpplerova viskozimetru, proto jsem pro výpočet matematického modelu závislosti dynamické viskozity na teplotě použil hodnoty z Höpplerova viskozimetru. Pokud se závislost dynamické viskozity na teplotě zlogaritmuje, vyjde přímková závislost. Je tedy možné napsat matematický model závislosti dynamické viskozity na teplotě. Po dosazení krajních hodnot z měření höpplerovým viskozimetrem do obecné rovnice přímky, výpočtu všech potřebných konstant a následném odlogaritmování rovnice vyšly následující vzorce pro výpočet viskozity v závislosti na teplotě oleje pro olej H.P.O.70 (35) a pro olej H.P.O.200 (36).

- Olej H.P.O.70

$$h = 10^{(1,5253 - 0,0135 \cdot T)} \quad (35)$$

- Olej H.P.O.200

$$h = 10^{(2,1988 - 0,0168 \cdot T)} \quad (36)$$

2.4.4 Vliv teploty na tloušťku mazacího filmu

Dle rovnice (6) a (8) je tloušťka mazacího filmu závislá na viskozitě:

$$H = f(h^{0,68}) \quad (37)$$

Pro olej H.P.O.70 má rovnice (31) tvar:

$$H = (10^{(1,5253-0,0135 \cdot T)})^{0,68} \quad (38)$$

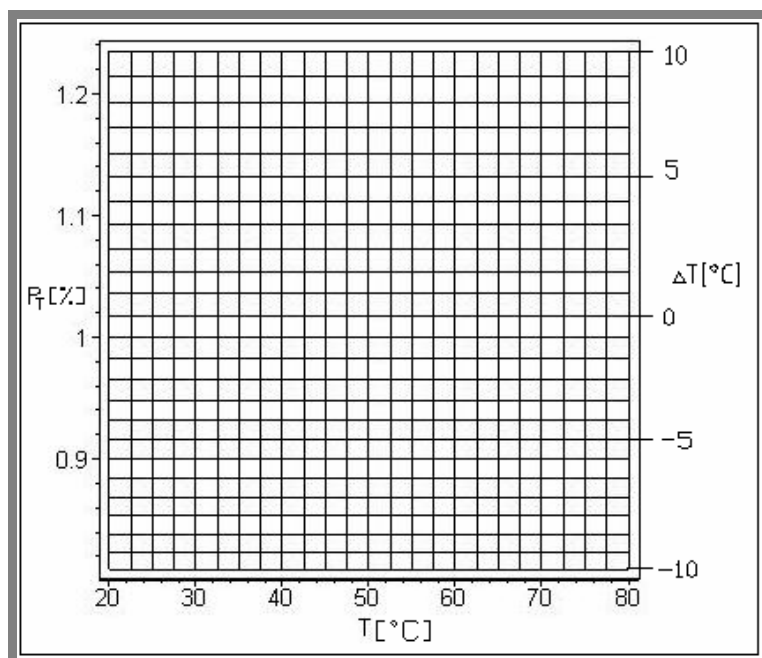
Při změně teploty o hodnotu ΔT bude mít vztah (37) tvar:

$$H_1 = (10^{[1,5253-0,0135 \cdot (T+\Delta T)]})^{0,68} \quad (39)$$

Poměr p_T těchto dvou tloušťek mazacího filmu udává procentuální změnu tloušťky mazacího filmu v závislosti na změně teploty.

$$p_T = \frac{H_1}{H} = \left(\frac{10^{[1,5253-0,0135 \cdot (T+\Delta T)]}}{10^{[1,5253-0,0135 \cdot T]}} \right)^{0,68} \quad (40)$$

Obrázek 18 ukazuje tuto závislost pro teplotu v intervalu $T \in < 20 ; 80 > ^\circ\text{C}$ a pro změnu teploty v intervalu $\Delta T \in < -10 ; 10 > ^\circ\text{C}$.

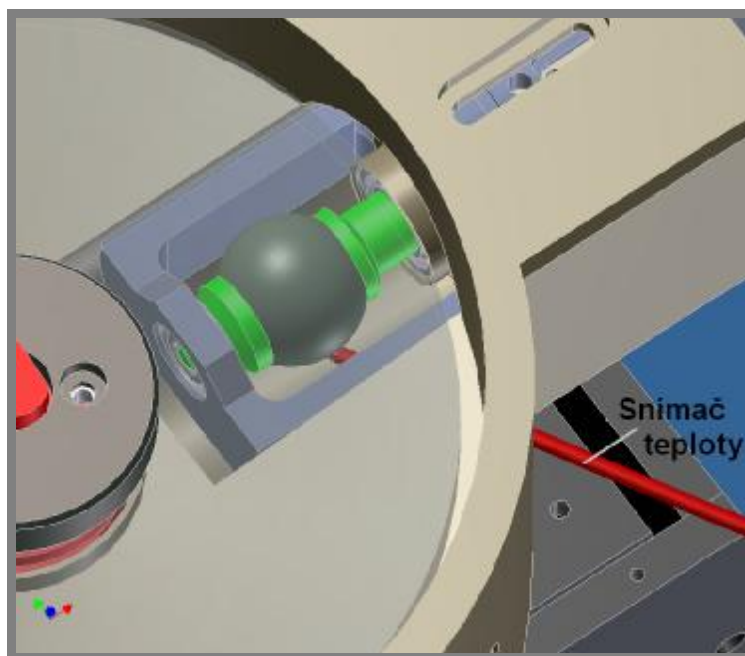


Obr. 18 Změna tloušťky mazacího filmu v závislosti na teplotě T a změně teploty ΔT

2.4.5 Měření teploty oleje na experimentálním zařízení

V současné době je teplota oleje měřena odporovým snímačem teploty Pt100. Snímač teploty prochází tělem vany do prostoru pod kuličkou v nádržce s olejem (viz. obr. 19). Tento snímač současně slouží pro řízení vnějšího okruhu ohřevu maziva v experimentálním zařízení.

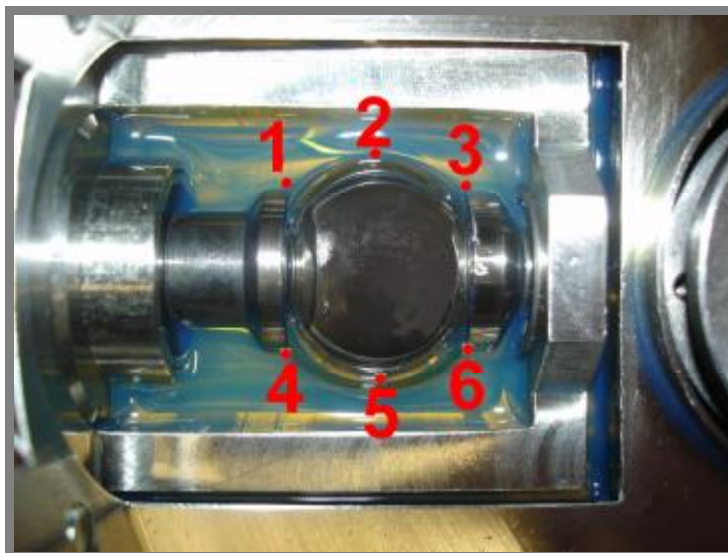
Z obrázku 18 je patrné, že změna teploty o 10 °C má za následek změnu tloušťky mazacího filmu o více jak 20%. Z toho vyplývá, že teplota má značný vliv na tloušťku mazacího filmu. Pro výpočet tloušťky mazacího filmu (6) je rozhodující teplota oleje na vstupu do kontaktu mezi kuličkou a diskem. Proto je nevýhodné měřit teplotu oleje pod kuličkou v olejové nádržce, protože tato teplota se může značně lišit od teploty v kontaktu.



Obr. 19 Současné měření teploty oleje

2.4.6 Ověření teploty oleje v blízkém okolí kuličky

Pro posouzení vhodnosti současného měření teploty oleje bylo provedeno zkušební měření teploty v šesti bodech (obr. 20) v blízkosti kuličky co nejvíce u hladiny oleje. Bylo provedeno pět měření teploty pro každý bod při dvou nastavených teplotách (T_{set}). V tabulkách 1 a 2 jsou uvedeny pouze výsledné průměrné teploty v jednotlivých bodech pro jednotlivé nastavené teploty T_{set} . T_{set} je teplota, kterou měřil snímač teploty Pt100 v nádržce s olejem v prostoru pod kuličkou.



Obr. 20 Body pro měření teploty oleje

V tab.1 jsou uvedeny hodnoty teplot v případě nepohybující se kuličky, v tab.2 jsou hodnoty teplot v případě rotace kuličky rychlostí 16 ot/min.

T_{set}	B1	B2	B3	B4	B5	B6
40	35,9	36,38	35,94	35,64	35,64	35,32
42,5	39,66	40,24	39,58	39,2	39,74	37,78

Tabulka 1 Teploty pro nepohybující se kuličku

T_{set}	B1	B2	B3	B4	B5	B6
40	37,86	38,6	38,12	37,86	38,6	38
42,5	40,32	41,28	40,94	40,26	41,06	40,28

Tabulka 2 Teploty pro rotující kuličku

Z výsledků je patrné, že teplota u hladiny oleje se liší od nastavené teploty až o 4,5°C. Z obrázku 18 lze usuzovat, že při takovémto rozdílu teplot bude změna tloušťky mazacího filmu více jak 10%. Lze také předpokládat, že teplota oleje v kontaktu kuličky a disku bude ještě nižší a změna tloušťky mazacího filmu tak bude ještě větší.

3 ÚPRAVA ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ TEPLoty

Z výsledků kapitoly 2.3.6 vyplývá, že bude potřeba měřit teplotu co nejbližší kontaktu. Měřit teplotu je možno buď bezkontaktním nebo kontaktním způsobem.

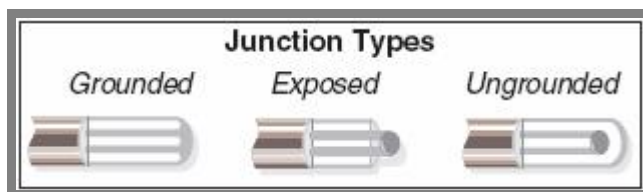
Principem bezkontaktního měření teploty je vyhodnocení množství vyzářené energie v infračerveném spektru [26]. Při bezkontaktním měření teploty se měří teplota na ploše minimálně o průměru 10 mm. Pro většinu aplikací je toto vyhovující, avšak v případě měření teploty oleje na kuličce co nejbližší kontaktu s diskem, by mohlo z důvodu malého prostoru docházet k ovlivnění výsledků měření.

Snímače pro dotykové měření teploty se dle [20] dělí na elektrické, dilatační a tlakové. Mezi elektrické patří odporové a termoelektrické snímače. Termoelektrické snímače (termočlánky) převádí teplotní změnu prostředí na změnu elektrického napětí [21]. Odporové snímače teploty převádí teplotní změnu prostředí na změnu elektrického odporu [22].

Dotykové snímače teploty mají oproti bezdotykovým snímačům teploty výhodu, že při jejich vhodné velikosti lze měřit teplotu oleje v bezprostřední blízkosti kontaktu kuličky a disku. Při návrhu úprav zařízení bude cílem použití snímače s co nejmenším průměrem pláště.

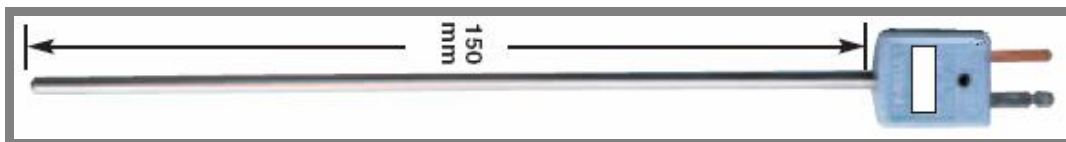
3.1 Volba snímače teploty

Při volbě snímače teploty byla na výběr spousta typů a výrobců. Byl hledán snímač s co nejmenším průměrem pláště, aby bylo možno měřit teplotu v co nejbližším okolí kontaktu. Nakonec bylo rozhodnuto pro firmu OMEGA a její termočlánek HJMQSS-010-E-6. Tento termočlánek je typu J (rozsah teplot 0°C – 750°C) s odhaleným koncem (obr.21), plášť je vyroben z nerez oceli, průměr pláště je 0,25 mm a délka sondy 150 mm [27].



Obr. 21 Typy konců termočlánků [27]

Termočlánek je na výstupním konci opatřen konektorem umožňujícím rychlé zapojení k měřicímu přístroji (Obr. 22).

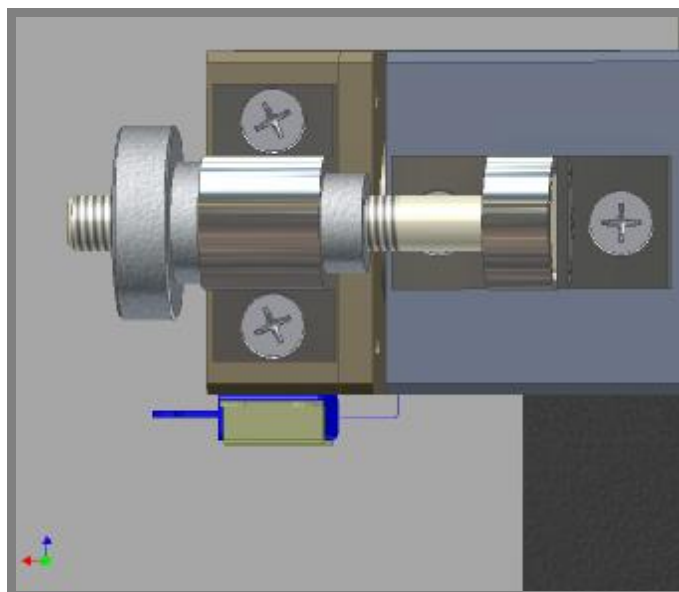


Obr. 22 Termočlánek [28]

3.2 Úprava zařízení: Varianta 1

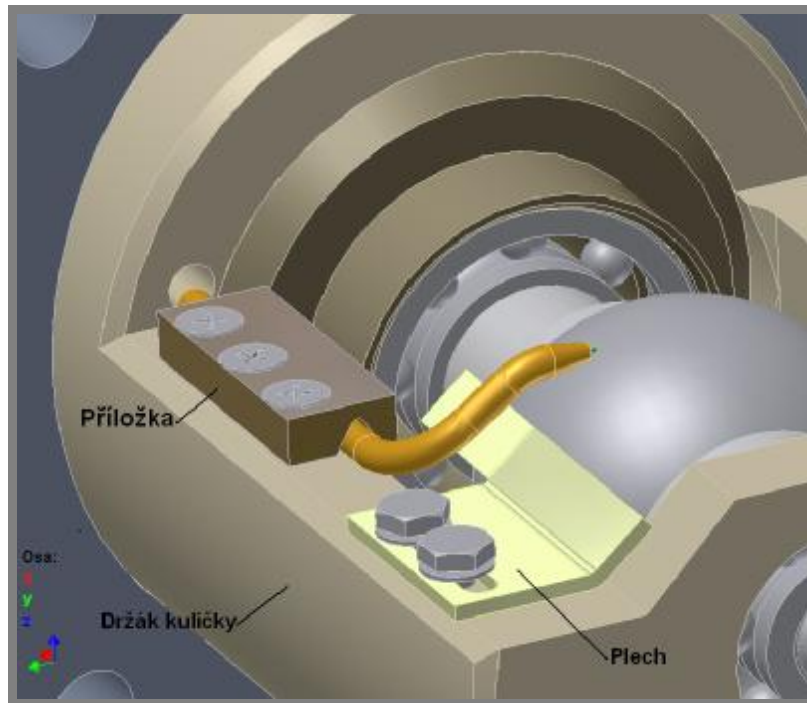
3.2

Při prvním návrhu úpravy zařízení pro umístění termočláneku k měření teploty oleje byla snaha o co nejmenší zásahy do konstrukce zařízení a zároveň co nejméně porušit tepelnou izolaci zařízení.



Obr. 23 Uchycení termočláneku a posuv kuličky

Konektor termočláneku je tedy připevněn přišroubováním ohnutého plechu na spodní stranu příruby pro uchycení motoru pohánějícího kuličku (obr. 23).



Obr. 24 Zavedení termočládku ke kontaktu kuličky s diskem

Plášť termočládku prochází otvorem v držáku kuličky (obr. 24) a následně je provlečen mosaznou trubičkou. Trubička v tomto případě slouží k zavedení termočládku do mazacího filmu. Poloha trubičky v ose z je nastavitelná pohybem „plechu“ v ose x.

Držák kuličky bývá posouván kvůli omezení vlivu opotřebení disku. Aby při posouvání nedošlo k natočení držáku a tím i kolizi trubičky s diskem, byl navržen jednoduchý šroubový posuv (obr. 23).

- **Výhody řešení:**

Velkou výhodou tohoto řešení je, že úpravy nezasahují do tepelné izolace zařízení a je použit velmi tenký termočlánek, který umožňuje přiblížit se při měření velmi blízko kontaktu.

- **Nevýhody řešení:**

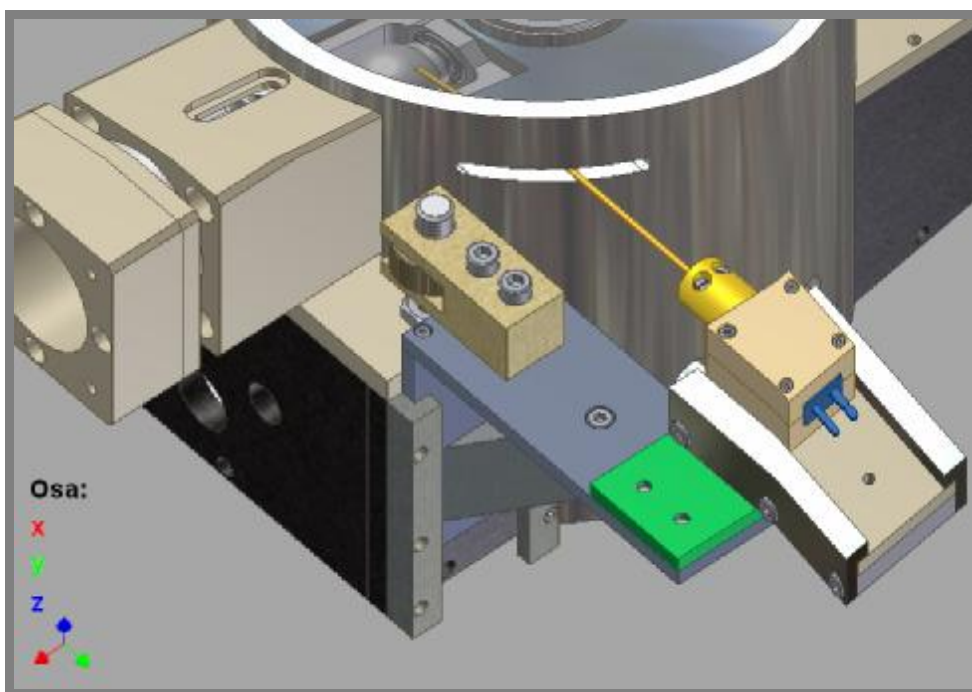
Nevýhodou tohoto řešení je špatná nastavitelnost polohy kuličky. Před nastavením je kvůli přístupu k trubičce nutné sejmut disk. Pokud je disk sejmутý, špatně se odhaduje výška nastavení trubičky (obr. 24, osa z). Je také nutné přesně zohnout trubičku. Při malém úhlu ohybu bychom se s termočlánekem dostali příliš nízko od kontaktu kuličky s diskem a při velkém úhlu ohybu by se termočlánek nemusel vůbec do kontaktu dostat. V horším případě by trubička mohla poškodit povrch disku.

Často se také mění držák kuličky za držák kuličky jiné velikosti, nebo při výzkumu jiných než bodových kontaktů se mění držák kuličky za držák jiného tělíska. V tomto případě by bylo nutné vysunout termočlánek z trubičky a otvoru v držáku kuličky. Při časté výměně držáků by mohlo dojít ke zničení odhaleného konce termočlánu, tedy ke zničení jeho měřící části.

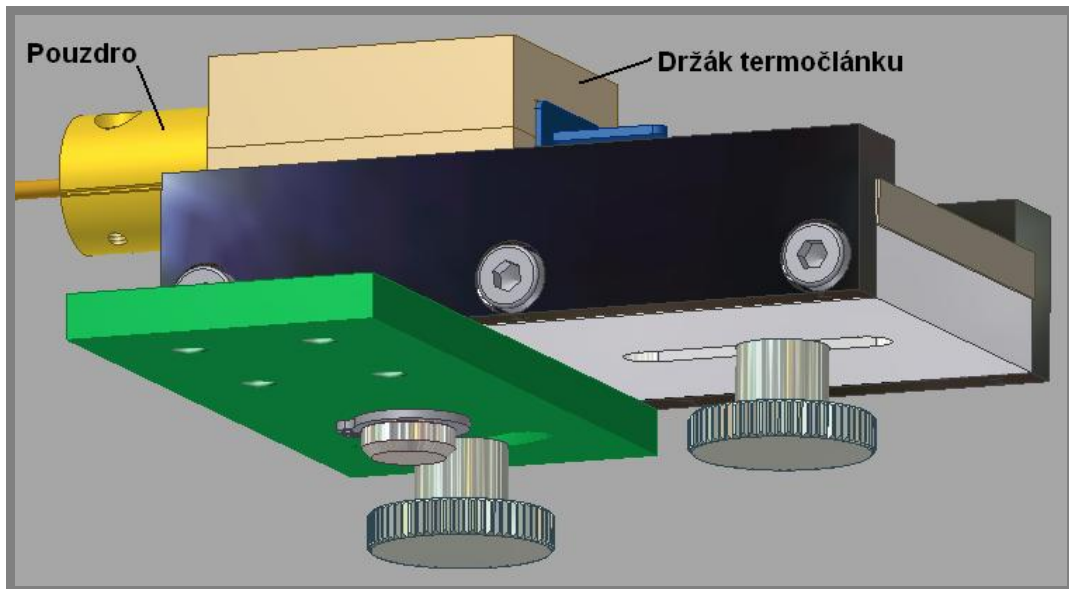
3.3 Úprava zařízení: Varianta 2

3.3

Další možností, kudy přivést termočlánek ke kontaktu je přes vanu. Tato možnost vyžaduje vytvořit ve vaně otvor (drážku) pro zavedení termočlánu do kontaktu (obr. 25). Pro uchycení termočlánu byla vytvořena konzola. Posuv konzoly v ose z je zajištěn pomocí šroubu a matice. Konzola je vedena v lištách připevněných k boční stěně zařízení.



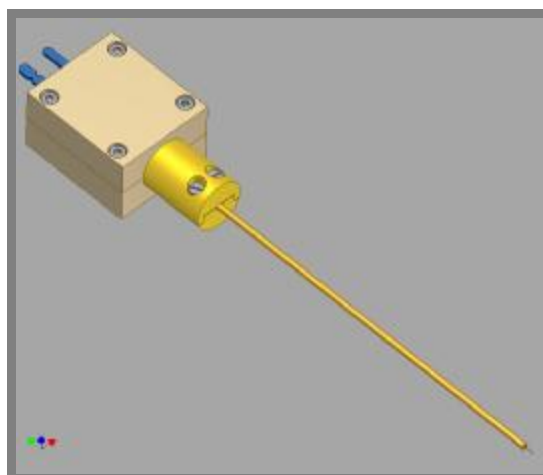
Obr. 25 Úprava zařízení: Varianta 2



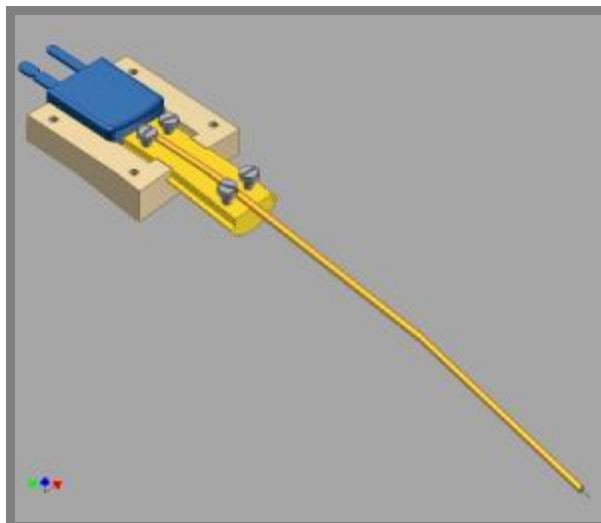
Obr. 26 Nastavení polohy termočláňku

Při změně polohy držáku kuličky je nutné opět přiblížit termočlánek ke kontaktu kuličky s diskem. Nastavení termočláňku ke kontaktu lze provést pomocí posuvů v osách y , z a natočení kolem osy z . Termočlánek je natačen kolem čepu. Posuvová deska pro posuv konektoru v ose y je vedena v lištách. Zajištění polohy termočláňku se provede jisticími šrouby (obr. 26).

Při návrhu byl použit stejný typ termočláňku jako v předcházející variantě úpravy. Díky tomu, že průměr pláště je pouze 0,25 mm je tento termočlánek velice ohebný. Aby se zamezilo ohnutí termočláňku při měření, je na něj nasunuta trubička, která celý plášť termočláňku vyztuží. Trubička by měla mít vnější průměr maximálně 2 nebo 3 mm. Čím menší průměr trubičky, tím se lze s termočláňkem dostat blíže kontaktu a tím budou výsledky měření teploty blíže skutečné teplotě v kontaktu.



Obr. 27 Držák termočláňku – celkový pohled



Obr. 28 Držák termočlánu - řez

Trubička je uchycena v pouzdře a to je zasazeno v zámku v držáku termočlánu (obr. 27, 28). Tím se zabrání posunu trubičky po plášti termočlánu.

- **Výhody řešení:**

Výhodou oproti minulému řešení je poměrně snadná nastavitelnost polohy konektoru. Při posunu držáku kuličky je možno konektorem natáčet kolem čepu a přisouvat jej do kontaktu. K zajištění polohy konektoru slouží dva jistící šrouby.

Výhodou je i jednoduchá demontáž držáku konektoru. Držák konektoru je na posuvové desce nasazen na dvou kolíčkách. To umožňuje jednoduché nasazení a sundání konektoru.

- **Nevýhody řešení:**

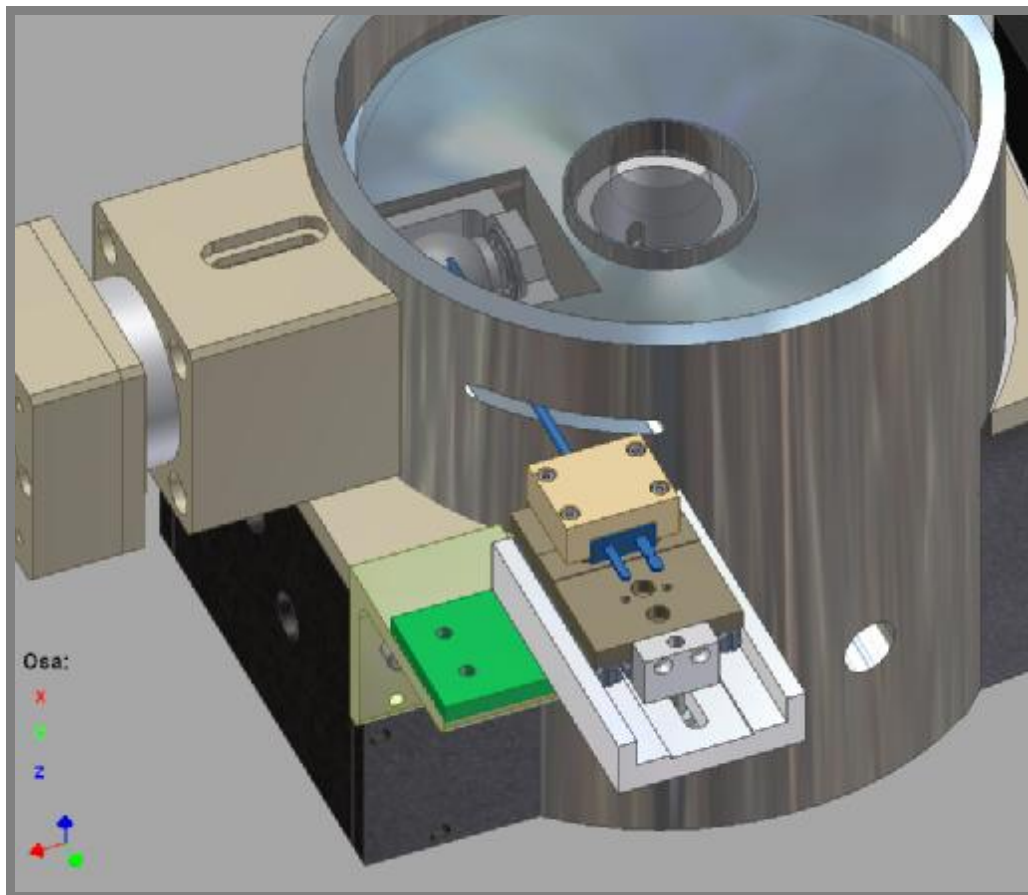
Posuvy jak v ose z tak v ose y jsou řešeny posouváním desek. Dochází tak k tření velkých ploch, což by mohlo bránit plynulému posouvání. Obzvláště při posouvání v ose z by mohly nastat problémy. Nastavení polohy v ose z se pohybuje ve velmi malém rozmezí, maximálně 3 mm. Proto, kvůli plynulosti a snadnosti manipulace, není výhodné mít ovládání posuvu na špatně přístupném místě jako je u tohoto řešení (obr. 25). Matice, jejímž otáčením se zvedá nebo spouští termočlánek v ose z, je dobře přístupná pouze z vnější strany, jinak je přístup blokován buď úplně nebo částečně částmi zařízení.

Velkou nevýhodou řešení je velikost konzoly. Konzola příliš vyčnívá z těla zařízení. Nejedná se jen o estetickou záležitost. Čím větší je páka, na které působí tíha konzoly na plochy posuvové desky v ose z, tím hůře půjde s posuvem manipulovat. Je to způsobeno délkou termočlánu. Pro tento způsob zavedení termočlánu do kontaktu by byla vyhovující menší délka než 150 mm.

Demontáž konzoly z experimentálního zařízení není jednoduchá. Pokud by bylo potřeba celou konzolu odmontovat, muselo by se nejprve odjet s termočlánkem z prostoru vany a poté vymontovat matku ze šroubu u posuvu osy z a nakonec vysunout celou konzolu z vodících lišt.

Tepelná izolace zařízení je provedena pomocí vnějšího silonového pláště obklopujícího vanu. Při tomto způsobu řešení je však nutno tento plášť na několika místech přerušit. Jedná se o vytvoření drážky pro termočlánek a odstranění části pláště kvůli místu pro konzolu. Na těchto místech tak může docházet k většímu odvodu tepla z prostoru vany.

3.4 Úprava zařízení: Varianta 3

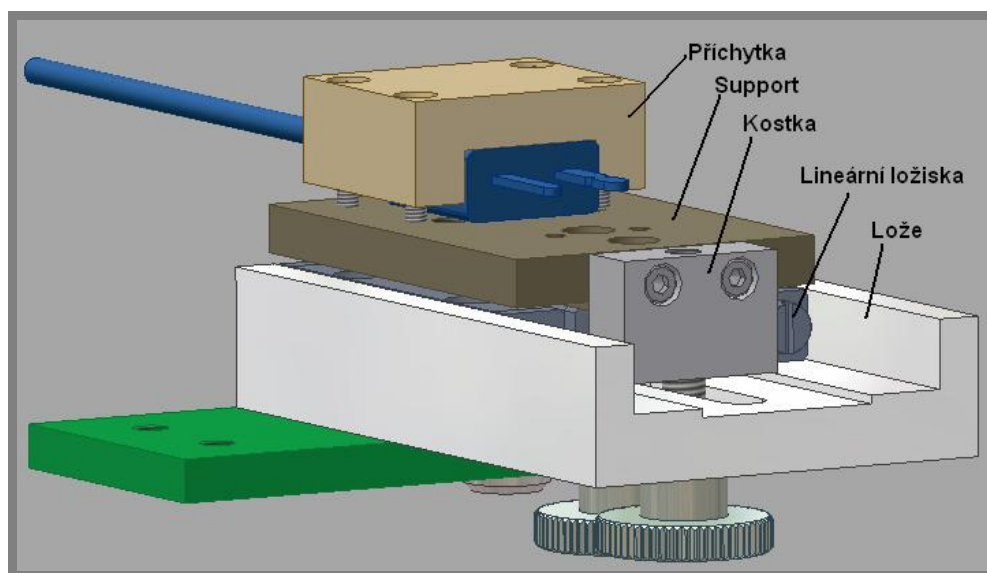


Obr. 29 Úprava zařízení: Varianta 3

Při navrhování této verze bylo vycházeno z varianty minulé. Bylo zachováno zavádění termočlánku do kontaktu přes otvor ve vaně (obr. 29). Použit však byl jiný termočlánek. Typově stejný (HJMQSS) ovšem s průměrem pláště 2 mm a atypickou délkou sondy 80 mm. Tento byl u výrobce objednan na základě zkušeností s předchozí variantou.

Kratší délka termočlánu umožnila zmenšit velikost konzoly. Konzola tedy již nemusela být tvořena více částmi jako u minulého řešení, ale stačilo ji vytvořit z L profilu o rozměrech L 60x50x6 dle ČSN 42 5545. K bočnici experimentálního zařízení je konzola přišroubována dvěma šrouby M5 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Přesná poloha je jištěna dvěma válcovými kolíky 4x10 A ISO 2338.

Oproti minulé verzi nebylo uvažováno s posuvem v ose z a to z důvodu, že pozice v souřadnicích osy z se mění minimálně, spíše vůbec. Pozice se nastaví pouze při najíždění termočlánu ke kontaktu a poté se již nemění.



Obr. 30 Nastavení polohy termočlánu

V předchozí variantě mohlo vlivem velkých stykových ploch docházet při posouvání k zasekávání posuvu. Pro odstranění tohoto problému byl posuv v ose y vylepšen použitím lineárních ložisek (obr. 30). Ta umožňují velmi snadné posouvání konektorem v ose y v dostatečném rozmezí.

Natáčení konektoru do kontaktu je řešeno stejným způsobem jako v předchozí variantě, a to natáčením kolem čepu. Stejně je i zajištění polohy termočlánu. Pro přichycení lineárních ložisek byl použit existující support (obr. 30) z již nefunkčního posuvu. Na tomto supportu nebylo místo, kudy posuv zajistit proti pohybu, proto byla vytvořena kostka. V kostce je díra se závitem, do které se zašroubuje jistící šroub a dotažením se zajistí poloha termočlánu.

Pro uchycení termočlánu na supporty byla vytvořena přichytka. Na vnitřní straně má vyfrézované vybrání, do kterého zapadá konektor termočlánu. Přichytka je přišroubována k supportu. Utáhnutím čtyř šroubů dojde k přitažení přichytky k supportu a tím k upevnění konektoru mezi supportem a přichytkou.

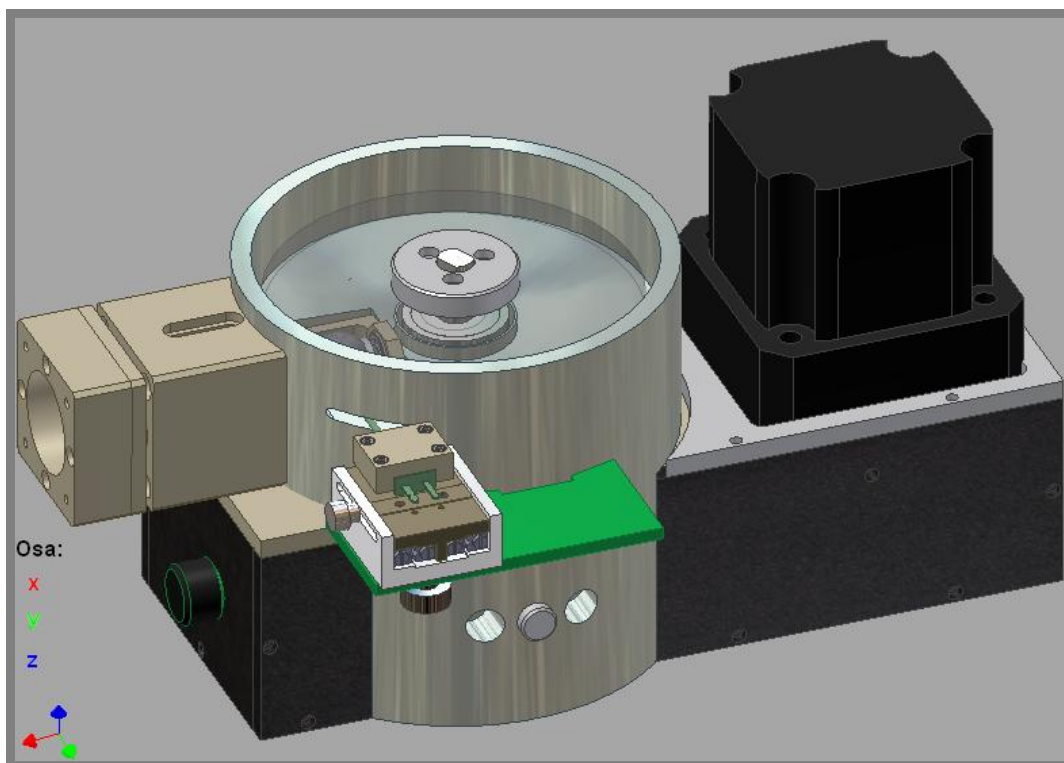
- **Výhody řešení:**

Výhodami řešení je zmenšení rozměrů konzoly, použití kratšího termočlánku s větším průměrem pláště a použití lineárních ložisek pro posuv v ose y. Díky termočlánku s větším průměrem pláště odpadá použití trubičky a jejího složitého uchycení k termočlánku jak bylo použito v minulém řešení.

- **Nevýhody řešení:**

Menší nevýhodou je připevnění konzoly k boku experimentálního zařízení. Pokud by konzola byla připevněna přímo k vaně, ušetřil by se jeden díl na výrobu (L profil) a nutnost úprav u stávajících dílů by se zmenšila pouze na jeden (vana).

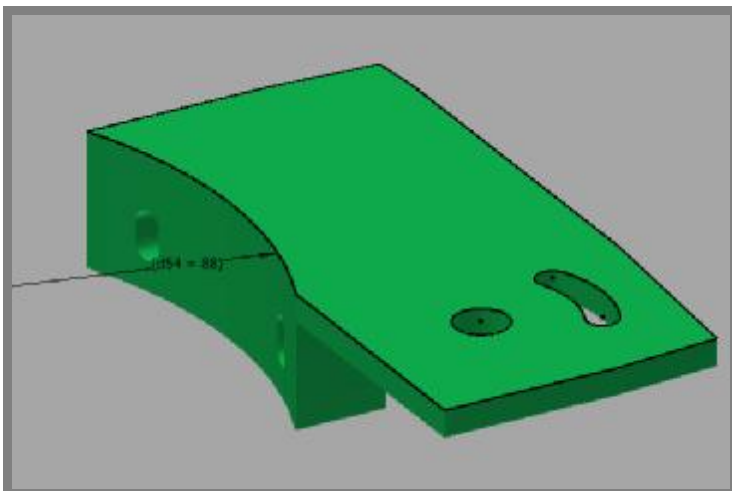
3.5. Úprava zařízení: Konečná varianta



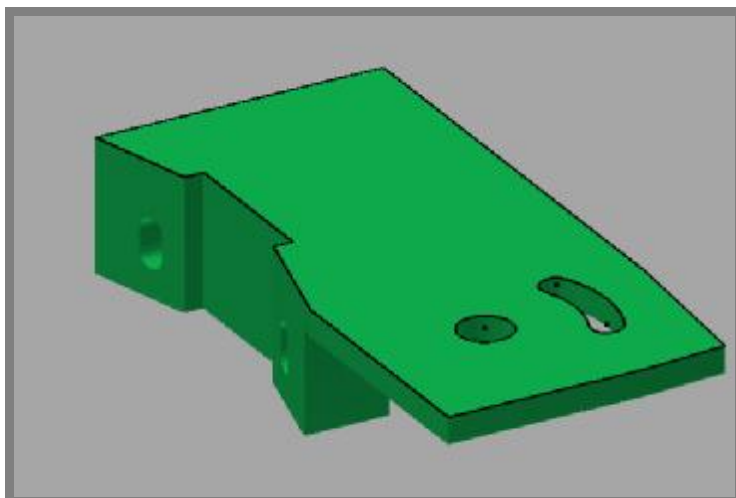
Obr. 31 Úprava zařízení: Konečná varianta

Při návrhu koncové varianty úpravy zařízení byla snaha co nejvíce minimalizovat počet dílů potřebných pro vytvoření konzoly termočlánku. Proto bylo navrženo připevnit konzolu přímo na vanu (obr. 31).

Při návrhu konzoly musel být zohledněn tvar vany o vnějším průměru 176 mm.



Obr. 32 Konzola s válcovou dosedací plochou



Obr. 33 Konzola s rovinnými dosedacími plochami

Možnosti při konstrukci konzoly byly dvě. Vytvořit konzolu kopírující tvar vany (obr. 32) nebo konzolu, která by na vanu doléhala tečně (obr. 33).

- **Konzola s válcovou dosedací plochou**

Výhodou konzoly s válcovou dosedací plochou je, že po celém obvodu dosedá na vanu a neumožní tak upnutí konzoly k vaně ze šikma. Nevýhodou je obtížná vyrobiteľnosť válcové plochy na konvenčních obráběcích strojích.

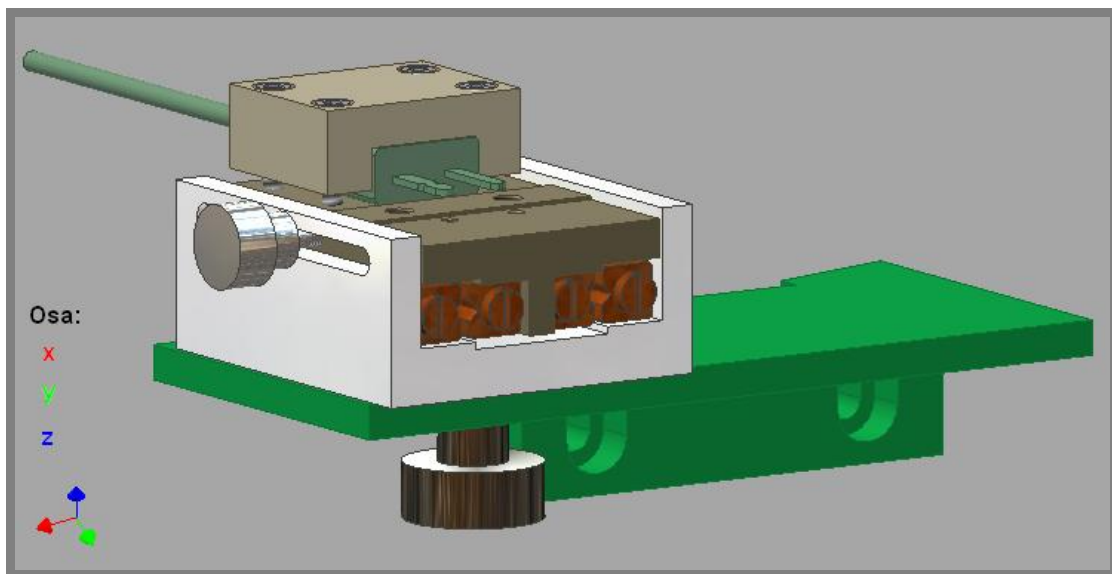
- **Konzola rovinnými dosedacími plochami**

Tato konzola má nevýhodu, že na vanu dosedá tečně a může se stát, že bude upnuta ze šikma. Pokud by výchylka v upnutí byla příliš velká, mohlo by se při natáčení

termočlánek stát, že se se sondou dostaneme z měřicí oblasti (mazacího filmu). Srovnání konzoly do roviny pouhým okem je však dostačující, aby se tak nestalo. Pro výrobu je mnohem jednodušší vyrobit tuto konzolu, kdy se pouze frézují dosedací plochy pod patřičným úhlem. Z důvodu jednodušší výroby byla použita konzola bez rádius.

Kvůli omezení vlivu nepřesnosti výroby na polohu termočlánek v ose z byly v konzole vytvořeny pro upnutí na vanu drážky. Díky nim je možné pohodlně nastavit polohu termočlánek v ose z. Natačení kolem osy z stejně jako zajištění polohy je řešeno stejným způsobem jako v předchozí verzi.

Posuv v ose y je řešen také stejně jako v předchozí verzi pomocí lineárních ložisek. Jištění polohy již je provedeno jinak (obr. 34).



Obr. 34 Konzola pro termočlánek

Místo jištění zespoda bylo rozhodnuto jistit polohu v ose y z boku. Do supportu do jedné jeho boční stěny bylo třeba vyrobit závit odpovídající závitu šroubu. Kvůli malé tloušťce stěny supportu byl zvolen závit M3. Aby bylo možno polohu supportu zajistit, musely být zvýšeny boční stěny lože (Obr. 34). Do levé bočnice byla vyrobena průchozí drážka ve které chodí jistící šroub.

Výhodou tohoto řešení je jeho kompaktnost, snadná nastavitelnost polohy termočlánek, v případě nutnosti velice snadná výměna termočlánek. Snadná demontáž a montáž celé konzoly na vanu.

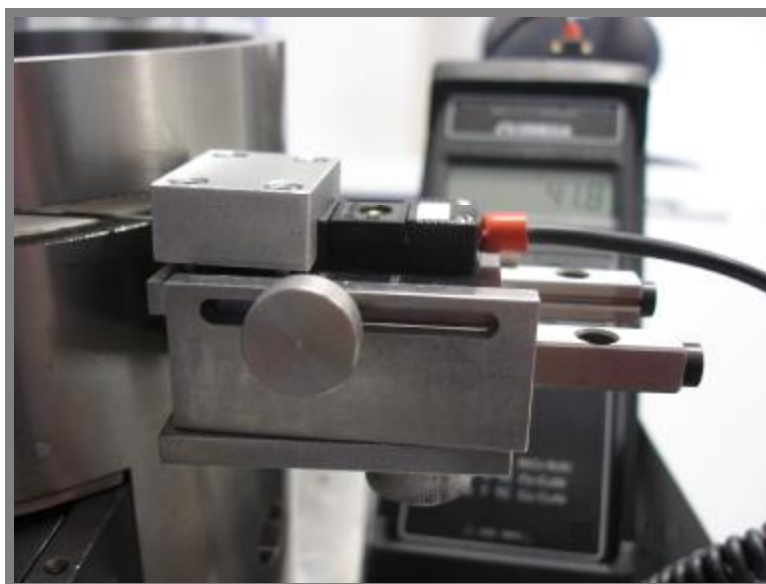
Pro tuto variantu byla vypracována výkresová dokumentace (viz příloha) a vyrobeny všechny součásti.

3.5.1. Postup měření teploty s termočlánkem

Pro správné měření teploty je nejdříve nutné měřený olej temperovat určitý čas na požadovanou teplotu. Během temperace lze na vanu připevnit konzolu. Před samotným připevněním konzoly nastavíme support do bezpečné pozice, aby při montáži nedošlo k poškození termočlánku. Bezpečnou pozicí je myšlena krajní poloha posuvu v ose y směrem od kontaktu kuličky a disku. Po připevnění konzoly k vaně připojíme k termočlánku měřicí zařízení HH-21 od firmy Omega. Nastavíme termočlánek do měřicí pozice (co nejbližší kontaktu kuličky s diskem), ujistíme se, že odhalený konec termočlánku je ponořen do mazacího filmu a nedotýká se kuličky, zapneme měřicí zařízení a odečteme teplotu.

3.6 Ověření teploty oleje na vstupu do kontaktní oblasti

Po vyrobení a úpravě jednotlivých dílů byl přípravek pro měření teploty připevněn na vanu (obr. 35). Termočlánek byl nastaven do měřicí polohy (obr. 36).



Obr. 35 Přípravek pro měření teploty

Ke konektoru termočlánku bylo připojeno měřicí zařízení HH-21, zapnuta termocirkulační jednotka a po dobu jedné hodiny byl olej temperován na teplotu 42,5°C. Po zahřátí oleje na požadovanou teplotu bylo provedeno měření, které mělo potvrdit nebo vyvrátit hypotézu, že na povrchu kuličky bude teplota oleje ještě nižší než na hladině.

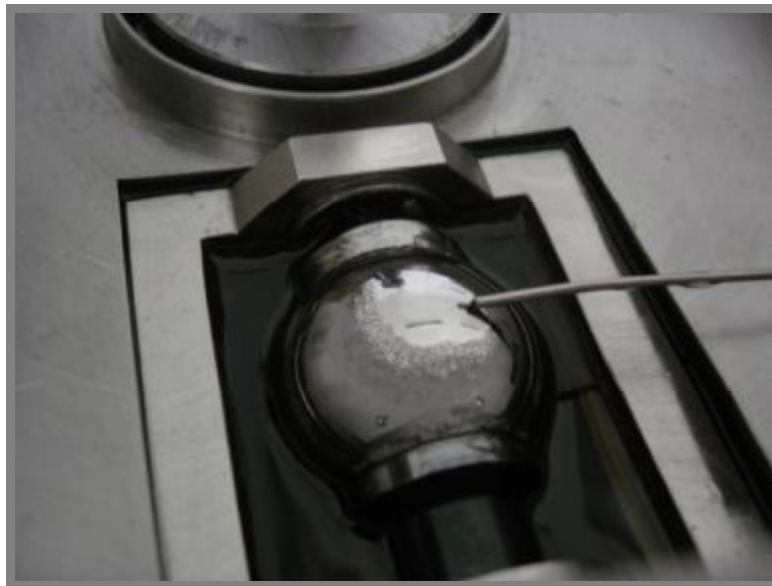
Otáčky kuličky [1/min]	1,66	3,33	5	6,66	8,33	10	12	13,33	16,66	20	23,33	26,66
Teplota na vstupu [°C]	41,3	41,3	41,4	41,5	41,5	41,6	42	41,7	41,8	42	42	42

Tab. 3 Teploty oleje na vstupu do kontaktní oblasti v závislosti na rychlosti rotace kuličky

Během měření byl disk zvednut, tzn. nedocházelo ke kontaktu mezi kuličkou a diskem. Měření bylo provedeno pro různé otáčky kuličky. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.

Z výsledků je patrné, že teplota olejového filmu na kuličce je závislá na rychlosti otáčení kuličky. Čím pomaleji se kulička otáčí, tím nižší je teplota oleje na vstupu do kontaktu. Je to způsobeno chladnutím tenké vrstvy oleje na povrchu kuličky. I přes to je teplota na vstupu do kontaktní oblasti vyšší než u hladiny. Je to způsobeno tím, že kulička při otáčení nabírá olej zespodu, kde je teplejší než na povrchu.

Faktorem, se kterým nebylo počítáno, je olej, který ulpí na disku a po jednom otočení disku opět vstupuje do kontaktu. Tento olej je mnohem chladnější než olej vstupující do kontaktu z olejové nádržky a proto bude mít určitý vliv na výslednou teplotu oleje v kontaktu.



Obr. 36 Termočlánek v kontaktu

Provedená měření prokázala vhodnost navržené varianty pro stanovení teploty na vstupu do kontaktní oblasti. Na základě provedených úprav tak je nyní možné zajistit opakovatelné podmínky pro studium velmi tenkých mazacích filmů.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo ověření přesnosti nastavení provozních podmínek na experimentálním zařízení používaném na Ústavu konstruování a návržení vhodných úprav. Jednalo se o ověření zatížení a rychlostí třecích povrchů a teploty maziva.

V průběhu řešení diplomové práce byl stanoven vliv změny rychlosti, zatížení a teploty na tloušťku mazacího filmu. Bylo ověřeno, že nejmenší vliv na tloušťku mazacího filmu má zatížení, větší vliv má změna rychlostí třecích povrchů a nejnámenněji tloušťku mazacího filmu ovlivňuje teplota maziva.

Pro přesnější stanovení zatížení a rychlostí třecích povrchů byl navržen postup využívající kalibr nasazený na hřídeli disku. Byla provedena kontrolní měření rychlostí třecích povrchů v konfiguraci kdy je disk poháněn otáčející se kuličkou. Získané výsledky prokázaly, že experimentální zařízení umožňuje detailní studium mazacích filmů i za těchto podmínek.

Na základě zjištěných rozdílů teploty maziva v zásobníku a v blízkosti mazaného kontaktu bylo navržen postup měření teploty na vstupu do kontaktní oblasti. Byla navržena a realizována úprava experimentálního zařízení. Výsledky kontrolních měření prokázala vhodnost navržené varianty pro stanovení teploty na vstupu do kontaktní oblasti.

Na základě získaných výsledků je možné konstatovat, že provedené úpravy přispěly významně k zajištění opakovatelných podmínek pro studium velmi tenkých mazacích filmů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] COULOMB, C. A. *Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leurs parties, et a la roideur des cordages*. Mém. Math. Phys., 1785, s. 161-342.
- [2] DOWSON, D. *History of Tribology*. New York, Longman Inc. 1979, s. 210-224.
- [3] KŘUPKA, I.: *Studium elasto-hydrodynamického mazání bodových kontaktů strojních soustav*, Habilitační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství Brno 2002, 120 s.
- [4] GÜMBEL, L. *Über geschmierte Arbeitsräder*. Z. ges. Turbinenweseu, 1916, s. 205-272.
- [5] MARTIN, H. M. *Lubrication of Gear Teeth*. *Engineering*, 1916, s. 119-121.
- [6] GRUBIN, A. N. *Fundamentals of the Hydrodynamic Theory of Lubrication of Heavily Loaded Cylindrical Surfaces*. In: *Investigation of the Contact of Machine Components (Central Scientific Research Institute for Technology and Mechanical Engineering Book No. 30)*. Moscow, Gosud. Nauch-Tekh. Izdat. Mash. Lit. 1949, s. 118-196.
- [7] DOWSON, D., HIGGINSON, G. R. *A Numerical Solution to the Elasto-hydrodynamic Problem*. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1959, s. 6-15.
- [8] HAMROCK B. J., DOWSON D. *Isothermal Elasto-hydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part II -Ellipticity Parameter Results*. *Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineerings), Journal of Lubrication Technology*, 1976, s. 375-383.
- [9] SIBLEY, L. B., BELL, J. C. - ORCUTT, F. K. - ALLEN, C. M. *A Study of the Influence of Lubricant Properties on the Performance of Aircraft Gas Turbine Engine Rolling-Contact Bearing*. WADD technical report, 1960, s. 60-189.
- [10] ARCHARD, J. F., KIRK, M. T. *Lubrication at Point Contacts*. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1961, s. 535-550.
- [11] FOORD, C. A., HAMMANN, W. C. - CAMERON, A. *Evaluation of Lubricants Using Optical Elasto-hydrodynamics*. *ASLE (the American Society of Lubrication Engineers) Transactions*, 1968, s. 31-43.
- [12] DALMAZ, G. *Simulating Angular Ball Bearing Lubricated Elliptical Contacts - Film Thickness and Traction Measurement*. *Tribology International*, 1978, s. 273-279.
- [13] HAMROCK B. J., DOWSON D. *Isothermal Elasto-hydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part I -Theoretical Formulation*. *Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology*, 1976, s. 223-229.
- [14] HAMROCK B. J., DOWSON D. *Isothermal Elasto-hydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part II -Ellipticity Parameter Results*. *Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology*, 1976, s.375-383.
- [15] HAMROCK B. J., DOWSON D. *Isothermal Elasto-hydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part III -Fully Flooded Results*.

- Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 1977, s. 264-276.
- [16] HAMROCK B. J., DOWSON D. *Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part IV -Starvation Results*. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 1977, s. 15-23.
- [17] KWEH, C. C. - EVANS, H. P. - SNIDLE, R. W. *Elastohydrodynamic Lubrication of Heavily Loaded Circular Contacts*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Engineering Science, 1989, s. 133-148.
- [18] *Profil skupiny*, [online], [cit. 2006-06-19], dostupné z: <<http://www.uk.fme.vutbr.cz/index.php?akce=80&sekce=vyzkum&ln=cs&stranka=2>>
- [19] *Vybavení*, [online], [cit. 2006-06-19], dostupné z: <<http://www.uk.fme.vutbr.cz/index.php?akce=80&sekce=vyzkum&ln=cs&stranka=3>>
- [20] *Snímače teploty* [online], [cit.2006-03-28], dostupné z: <<http://skriptum.wz.cz/autom/teplota.htm>>
- [21] *Termoelektrické snímače teploty* [online], [cit.2006-03-28], dostupné z: <<http://www-dt.fme.vutbr.cz/measure/Senzor/CI-TerCI.htm>>
- [22] ATERM, Otrokovice, *Měření a regulace teploty* [online], [cit.2006-03-28], dostupné z: <<http://www.aterm.cz/Teperm.htm#5>>
- [23] *Snímače teploty* [online], [cit. 2007-04-16], dostupné z: < <http://skriptum.wz.cz/autom/teplota.htm> >
- [24] *Instruction manual* [online], [cit. 2007-04-18], dostupné z: <http://www.thermo.com/eThermo/CMA/PDFs/Articles/articlesFile_23945.pdf>
- [25] *Rychlost* [online], [cit. 2007-04-29], dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Rychlost>>
- [26] *Instruction manual – HAAKE RotoVisco* [online], [cit. 2007-05-01], dostupné z: <http://www.thermo.com/eThermo/CMA/PDFs/Articles/articlesFile_23949.pdf>
- [27] *Úvod do termočlánků* [online], [cit. 2007-05-02], dostupné z: <<http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>>
- [28] *Quick disconnect thermocouple probe assemblies with high temperature miniature connectors – standard dimensions* [online], [cit. 2007-02-23], dostupné z: <<http://www.omega.com/Temperature/pdf/HJMQSS.pdf>>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

C	Nm	Konstantní součin síly od závaží a ramene, na kterém působí
E'	Pa	Redukovaný modul pružnosti
F	N	Síla v kontaktu kuličky s diskem
F'	N	Kontaktní síla působící na rameni zvětšeném o vůli
F ₁	N	Síla od závaží
G	1	Bezrozměrný parametr materiálů
H	1	Bezrozměrný parametr tloušťky mazacího filmu
H _{F1}	1	Bezrozměrný parametr tloušťky mazacího filmu v závislosti na síle
H _{F2}	1	Bezrozměrný parametr tloušťky mazacího filmu v závislosti na síle změněné o vůli
H _{u1}	1	Bezrozměrný parametr tloušťky mazacího filmu v závislosti na rychlosti otáčení kotouče
H _{u2}	1	Bezrozměrný parametr tloušťky mazacího filmu v závislosti na rychlosti otáčení kotouče změněné o vůli
K	mPa·cm ³ /g	Konstanta kuličky
M _A	Nm	Ohybový moment k bodu A
R	m	Rameno, na kterém působí kontaktní síla
R _k	mm	Poloměr kuličky
R _x	m	Redukovaný poloměr třecích povrchů ve směru osy x
R ₁	m	Rameno, na kterém působí síla od závaží
T	°C	Teplota oleje
ΔT	°C	Změna teploty
T _{set}	°C	Teplota nastavená na termocirkulační jednotce
U	1	Bezrozměrný parametr rychlosti
W	1	Bezrozměrný parametr zatížení
a	m	Délka hlavní poloosy bodového kontaktu
b	m	Délka vedlejší poloosy bodového kontaktu
h _c	m	Centrální tloušťka mazacího filmu
h _{min}	m	Minimální tloušťka mazacího filmu
i	-	Počet impulzů
k	1	Parametr elipticity
n _d	1/s	Oáčky disku
n _k	1/s	Otáčky kuličky
n _m	1/min	Otáčky motoru
p	1	Poměr tlouštěk mazacího filmu
p _F	1	Poměr tlouštěk mazacího filmu v závislosti na změně síly
p _T	1	Poměr tlouštěk mazacího filmu v závislosti na změně teploty
p _u	1	Poměr tlouštěk mazacího filmu v závislosti na změně rychlosti
p _v	1	Poměr rychlostí v kontaktu
u	m·s ⁻¹	Rychlost otáčení disku
v	m	Vůle
v _d	mm/s	Rychlost disku v kontaktu
v _k	mm/s	Rychlost kuličky v kontaktu
t	s	Čas pádu kuličky
α	Pa ⁻¹	Viskozitně – tlakový koeficient
γ	1/s	Smykový poměr

η	Pa.s	Dynamická viskozita
η_0	Pa.s	Dynamická viskozita při nulovém tlaku
ρ_1	kg.m^{-3}	Hustota kapaliny
ρ_2	kg.m^{-3}	Hustota kuličky
τ	Pa	Smykové napětí v kapalině

Obr.	Obrázek	
N	Newton	Jednotka síly
Pa	Pascal	Jednotka tlaku
m	metr	Jednotka délky
°C	stupeň celsia	Jednotka teploty

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Příklad konformně a nekonformně zakřivených třecích těles	16
Obr. 2 Zařízení pro měření tloušťky mazacích filmů za podmínek čistého valení	19
Obr. 3 Zařízení pro měření tloušťky mazacích filmů v eliptických kontaktech	19
Obr. 4 Schéma experimentálního zařízení	20
Obr. 5 Celkový pohled na experimentální zařízení	21
Obr. 6 Popis experimentálního zařízení	22
Obr. 7 Model experimentálního zařízení v programu Autodesk Inventor 11	23
Obr. 8 Vliv změny rychlosti na tloušťku mazacího filmu	24
Obr. 9 Snímání otáček disku	25
Obr. 10 Určení polohy středu otáčení disku	25
Obr. 11 Změna tloušťky mazacího filmu v závislosti na vůli a poloměru při změně rychlosti	27
Obr. 12 Způsob snímání síly	29
Obr. 13 Vliv změny zatížení na tloušťku mazacího filmu	30
Obr. 14 Způsob zatěžování kontaktních těles	30
Obr. 15 Změna tloušťky mazacího filmu v závislosti na vůli a poloměru při změně zatížení	32
Obr. 16 Porovnání průběhu viskozity oleje H.P.O.70 mezi Höpplerovým a rotačním viskozimetrem	33
Obr. 17 Porovnání průběhu viskozity oleje H.P.O.200 mezi Höpplerovým a rotačním viskozimetrem	34
Obr. 18 Změna tloušťky mazacího filmu v závislosti na teplotě T a změně teploty ΔT	35
Obr. 19 Současné měření teploty oleje	36
Obr. 20 Body pro měření teploty oleje	37
Obr. 21 Typy konců termočlánků	38
Obr. 22 Termočlánek	39
Obr. 23 Uchycení termočlánku a posuv kuličky	39
Obr. 24 Zavedení termočlánku ke kontaktu kuličky s diskem	40
Obr. 25 Úprava zařízení: Varianta 2	41
Obr. 26 Nastavení polohy termočlánku	42
Obr. 27 Držák termočlánku – celkový pohled	42
Obr. 28 Držák termočlánku – řez	43
Obr. 29 Úprava zařízení: Varianta 3	44
Obr. 30 Nastavení polohy termočlánku	45
Obr. 31 Úprava zařízení: Konečná varianta	46
Obr. 32 Konzola s válcovou dosedací plochou	47
Obr. 33 Konzola s rovinnými dosedacími plochami	47
Obr. 34 Konzola pro termočlánek	48
Obr. 35 Přípravek pro měření teploty	49
Obr. 36 Termočlánek v kontaktu	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Teploty pro nehybnou kuličku	37
Tabulka 2	Teploty pro rotující kuličku	37
Tabulka 3	Teploty oleje na vstupu do kontaktní oblasti v závislosti na rychlosti rotace kuličky	49
Tabulka 4	Měření rychlosti disku při vzdálenosti kontaktu od středu otáčení R = 47,1 mm	Příloha 1
Tabulka 5	Měření rychlosti disku při vzdálenosti kontaktu od středu otáčení R = 47,1 mm	Příloha 1

SEZNAM PŘÍLOH

	Název	Číslo výkresu
1	Tabulka hodnot	
2	FSI2004_001.ipt	2007-4-01-001
3	Support.ipt	2007-4-01-002
4	Kalibr.ipt	2007-4-01-003
5	Čep.ipt	2007-4-01-004
6	Konzola.ipt	2007-4-01-005
7	Lože.ipt	2007-3-01-006
8	Příchytka.ipt	2007-4-01-007
8	Šroub_1.ipt	2007-4-01-008
10	Šroub_2.ipt	2007-4-01-009