



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE UPÍNACÍHO MECHANISMU PRO KULOVÉ A SOUDEČKOVÉ VZORKY

DESIGN OF CLAMPING FIXTURE FOR BALL AND SPHERICAL-ROLLER SPECIMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ VODRADA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN ZIMMERMAN

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Vodrada

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

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

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

Konstrukce upínacího mechanismu pro kulové a soudečkové vzorky

v anglickém jazyce:

Design of clamping fixture for ball and spherical-roller specimens

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je konstrukční návrh upínacího mechanismu pro vzorky tvaru koule a soudečku daných rozměrů tak, aby bylo možno vzorkem polohovat libovolně v rozsahu 2 cm v rámci všech os X, Y, Z.

Cíle bakalářské práce:

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

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

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva, technická dokumentace

Typ práce: konstrukční

Účel práce:pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

Seznam odborné literatury:

Seznam českých technických norem, 1díl, Český normalizační institut, Praha, 2007, ISBN 978-80-7283-225-5

STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W., & STACHOWIAK, G. (2004). Experimental methods in tribology. Tribology series, 44. Amsterdam, the Netherlands, Elsevier. <http://www.sciencedirect.com/science/publication?issn=01678922&volume=44>.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Zimmerman

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 24.11.2010

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem polohovací a zatěžovací části experimentální aparatury sloužící ke zkoumání reologických vlastností maziva v laboratoři Ústavu konstruování VUT v Brně. Práce obsahuje stručný přehled doposud zkonstruovaných aparatur včetně krátkého popisu jejich funkce, konstrukční požadavky, návrhy konstrukčních variant a popis jednotlivých částí navrhovaného zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elastohydrodynamické mazání, zatížení kontaktu, kontaktní tělesa

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with engineering design of positioning and loading part of experimental apparatus that is meant for studying of rheological properties of lubricants in VUT Brno. The thesis contains a brief summary of devices designed up to now including short descriptions of their function, engineering requirements, designs of constructional variations and descriptions of parts of designed device.

KEY WORDS

Elastohydrodynamic lubrication, contact load, contact solids

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VODRADA, T. *Konstrukce upínacího mechanismu pro kulové a soudečkové vzorky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Zimmerman.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci *Konstrukce upínacího mechanismu pro kulové a soudečkové vzorky* jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Martinem Zimmermanem a uvedl v seznamu všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 20. května 2011

Vlastnoruční podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Zimmermanovi za ochotu a vedení práce, své přítelkyni Vendule Heczkové za pomoc s anglickými překlady a své rodině a přátelům za podporu při studiu.

OBSAH

OBSAH	11
ÚVOD	12
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
1.1 Experimentální zařízení	13
1.1.1 Experimentální aparatura podle Kwena, Evanse a Snidlera	13
1.1.2 Experimentální aparatura podle Rena, Zhua a Wena	14
1.1.3 Experimentální aparatura podle Glovnea a Spikese	16
1.1.4 Experimentální aparatura podle Dalmaze, Lubrechta, Dowsna a Priestu	17
1.1.5 Experimentální aparatura podle Kanety, Ozakiho, Nishikawy a Gua	18
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA	20
2.1 Polohovací a zatěžovací část	20
3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	22
4 NÁVRH METODICKÉHO ŘEŠENÍ K PŘÍSTUPU	24
5 NÁVRH VARIANT A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY	25
5.1 Varianta č. 1	25
5.2 Varianta č. 2	26
5.3 Varianta č. 3	27
5.4 Výběr optimální varianty	29
6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	31
6.1 Lineární posuv	31
6.2 Nůžkový mechanismus	32
6.3 Uložení kuličky	33
6.4 Podpěra kuličky	33
6.5 Uložení soudečkového vzorku	34
6.6 Snímání zatíženého kontaktu	35
6.7 Řešení dynamického zatížení kontaktu	36
6.8 Temperace lázně	37
6.9 Montážní postup	37
7 ZÁVĚR	40
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	41
9 SEZNAM POŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN	43
10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK	44
10.1 Seznam obrázků	44
11 SEZNAM PŘÍLOH	45
11.1 Přílohy	45
11.2 Výkresová dokumentace	45

ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem polohovací a zatěžovací části zařízení, které slouží ke zkoumání chování mazacího filmu v elastohydrodynamicky (EHD) mazaném kontaktu při náhlé změně obvodové rychlosti kontaktních ploch popř. změně zatížení kontaktu. Elastohydrodynamicky mazaný kontakt je tvořen dvojicí nekonformně zakřivených těles, které jsou prezentovány skleněným diskem a ocelovou kuličkou popř. ocelovým soudečkem. S EHD mazaným kontaktem, který pracuje za neustálých provozních podmínek, se můžeme v praxi setkat velmi často např. u kontaktu vačky a zdvihátka, styku zubů ozubených kol nebo kontaktu valivého elementu valivých ložisek s vnějším popř. vnitřním ložiskovým kroužkem. Vlivem vysokého zatížení, které je pro EHD mazané kontakty specifické, dochází k nárůstu viskozity maziva. Chování maziva je zkoumáno na základě změny tloušťky mazacího filmu v oblasti kontaktu při změně výše popsanych provozních parametrů.

První kapitola bakalářské práce je zaměřena rešeršně s cílem popsat historický vývoj a současný stav řešení konstrukce experimentálních zařízení určených pro výzkum chování maziva při nestacionárních provozních podmínkách. V roce 1989 zkonstruovali Kwen, Evans a Snidler aparaturu, která byla určena pro výzkum utváření a chování mazacího filmu při čistém odvalování těles v kontaktu. O dva roky později byla publikována práce, jejíž součástí byl také popis konstrukce experimentální aparatury navržené pro zkoumání změny tloušťky mazacího filmu v centrální rovině ve směru valení pro případ kruhového a liniového kontaktu. Na vývoji zmiňovaného experimentálního zařízení se podíleli vědci Ren, Zhu a Zhen. V roce 2001 byla v Londýně představena vědci Glouvenou a Spikesem aparatura zaměřující se na chování mazacího filmu v kontaktu vačky a zdvihátka u spalovacích motorů. S rozvojem výkonných počítačů a jimi řízenou technikou byla v roce 2004 představena aparatura určená pro výzkum vlivu nestacionárních provozních podmínek na chování mazacího filmu uvnitř elastohydrodynamicky mazaného kontaktu. Počítač byl použit pro řízení rychlosti a míry skluzu zkoumaných těles, zatížení kontaktu a shromažďování hodnot pozorovaných parametrů v průběhu celého experimentu. Vývoj, konstrukci a provoz experimentálního zařízení zajišťovali vědci Dalmag, Lubrech, Dowson a Priest, kteří působili na Lyonské univerzitě. O tři roky později se na japonské univerzitě v Kyushu vědci Kaneta, Ozaki, Nishikawa a Guo zabývali zkoumáním tloušťky mazacího filmu při různých druzích zatěžování a vzájemného pohybu kontaktních těles. Použili k tomuto účelu aparaturu, jež využívala piezomotoru jako budiče dynamické složky zatížení. Zařízení pro zkoumání reologických změn při elastohydrodynamickém mazání se neustále zdokonalují a zpřesňují především díky rozvoji rychlých počítačů a velmi přesných a citlivých elektronických součástí.

V druhé kapitole je pojednáváno o kontaktních tělesech používaných při experimentech. Je zde nastíněno z jakých materiálů a v jakých rozměrech se tělesa nejčastěji používala. Kapitola se věnuje rozdělení druhů zatížení v kontaktu zkoumaných těles a popisuje, jak bylo tohoto zatížení docíleno a také jakými prostředky bylo snímáno. V této části práce je uvedeno jaké vzájemné pohyby mohou zkoumaná tělesa konat a způsoby, jakými jsou tyto tělesa poháněna.

Cílem práce je navrhnout polohovací a zatěžovací část experimentálního zařízení, která se po realizaci umístí do laboratoře Ústavu konstruování VUT v Brně.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1

1.1 Experimentální zařízení

1.1

1.1.1 Experimentální aparatura podle Kwena, Evanse a Snidlera

1.1.1

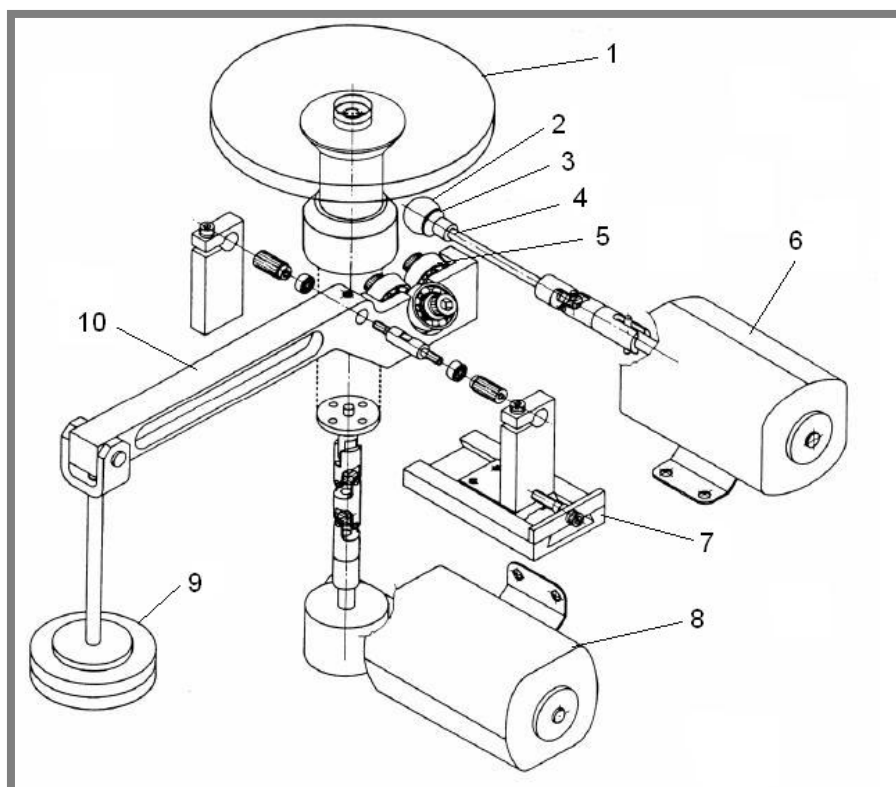
- [1] KWEH, C. C., EVANS, H. P., SNIDLE, R. W. (1989): *Elastohydrodynamic Lubrication of Heavily Loaded Circular Contacts*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Engineering Science, 203, s. 133-148.

Jednu z dříve publikovaných prací, které se zabývaly studiem jevů elastohydrodynamicky mazaného kontaktu publikovali v roce 1989 Kweeh, Evans a Snidle [4]. Práce se zabývala utvářením a chováním mazacího filmu při čistém odvalování těles v kontaktu.

Součástí práce je také schéma experimentální aparatury (obr. 1-1), ze které je patrné, že pro experiment jako kontaktní tělesa byl použit skleněný disk o průměru 101 mm (1) a ocelová kulička o průměru 19.05 mm (2). Aparatura umožňuje simulovat elastohydrodynamicky mazaný kontakt při stálé hodnotě zatížení a pro danou střední rychlost maziva na vstupu do kontaktu. Ocelová kulička je nalepena epoxidovou pryskyřicí na upínací vřeteno z lehké slitiny (3) a je zespono podopřena pomocí tří kuličkových ložisek (5) nasazených na vodorovnou páku (10). Pomocí vhodně zvolené zátěže (9) je možno skrze pákový mechanismus vyvodit v statickou sílu, která přitlačuje kuličku ke kontaktní ploše skleněného disku. Upínací vřeteno je skrze hřídel (4) a kloubovou spojku řízeno elektrickým motorem (6). Pákový mechanismus je uložen na posuvném stolku (7), který umožňuje měnit polohu kontaktu kuličky s diskem ve směru ke středu disku popř. od středu skleněného disku. Skleněný disk je nezávisle na kuličce poháněn druhým motorem (8). Mazivo je do kontaktu dodáváno pomocí malorážní subkutánní injekční jehly. Teploty skleněných a ocelových povrchů jsou měřeny niklochromovými a niklochromovými termočlánky, které se táhnou po povrchu. Optický systém se skládal z mikroskopu s vybavením pro snímání plochy kontaktu fotomikroskopickými přístroji. Jako zdroj světla byla použita wolframová lampa, která emitovala bílé světlo.

Výhodou této aparatury je fakt, že obě tělesa se mohou pohybovat nezávisle na sobě a tudíž může být korigována míra prokluzu kontaktních ploch. Další výhodou je možnost měnit polohu kontaktu ocelové kuličky a skleněného disku v radiálním směru a tím využít pro potřeby experimentu větší část disku.

Jednou z hlavních nevýhod experimentální aparatury je absence možnosti dynamického zatížení kontaktu. Další nevýhoda byla shledána v samotném převodu zatížení do kontaktu. Při případných vibracích v okolí experimentální aparatury se mohou tyto pomocí dlouhého ramene pákového mechanismu přenést do oblasti kontaktu a tím znehodnotit výsledky experimentu. Jako nevýhoda byl také shledán způsob dopravy a dávkování maziva do oblasti kontaktu. Využití injekční jehly je značně nepohodlné, zvyšuje nároky na přesnost dávkování maziva do kontaktu tak, aby nedošlo např. k hladovění kontaktu, a zároveň tento způsob dopravy maziva do kontaktu může vést k rozstříku maziva v aparatuře.



Obr. 1-1 Experimentální zařízení podle Kwena, Evanse a Snidlera[1]

1 – Skleněný disk, 2 – Ocelová kulička, 3 – Upínací vřeteno, 4 – Hřídel,
5 – Lože kuličky, 6 – Pohon kuličky, 7 – Posuv, 8 – Pohon disku, 9 – Statická
zátěž, 10 – Pákový mechanismus

1.1.2 Experimentální aparatura podle Rena, Zhua a Wena

- [2] REN, N. – ZHU, D. – WEN, S.Z. Experimental method for quantitative analysis of transient EHL. *Tribology International*, 1991, vol. 24, no. 4, s. 225–230. ISSN: 0301-679X.

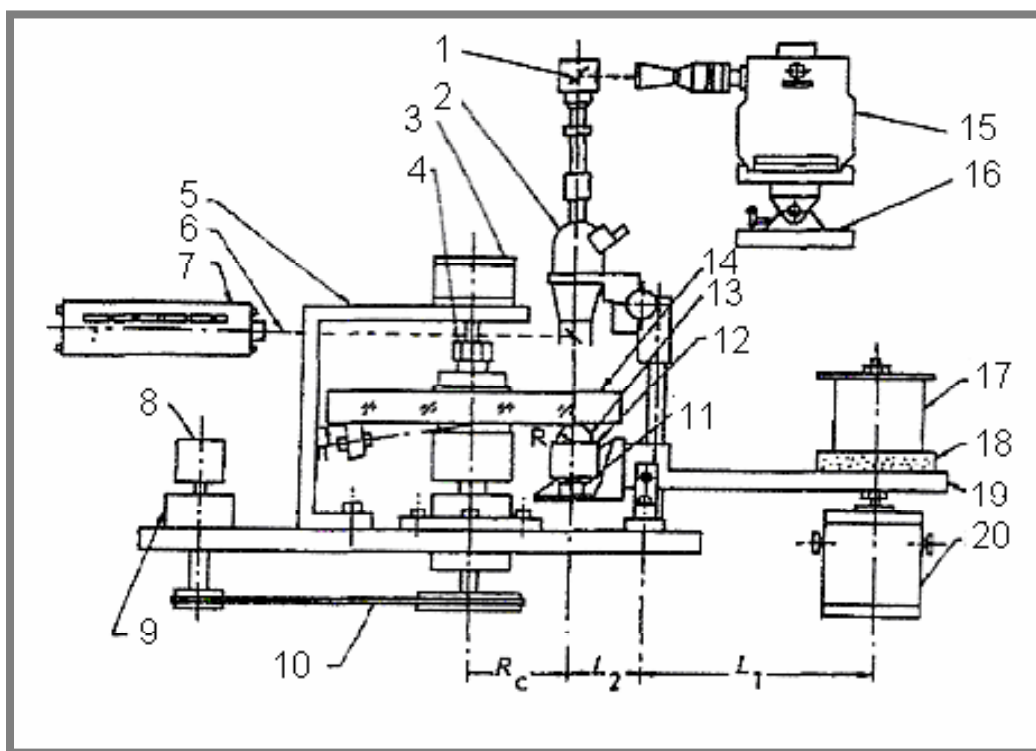
Další z prací, která se zabývala zkoumáním přechodových jevů u elastohydrodynamicky mazaného (EHL) kontaktu, publikovali v roce 1991 Ren, Zhu a Wen [1]. Práce se zabývala zkoumáním změny tloušťky mazacího filmu v centrální rovině ve směru valení pro případ bodového a liniového kontaktu.

K práci bylo přiloženo také názorné schéma použité experimentální aparatury (obr. 1-2). Z obrázku je patrné, že kontaktní tělesa jsou tvořena skleněným diskem (14) a ocelovou kuličkou (13). Princip funkce experimentální aparatury je následující. Kulička je uložena v zásobníku maziva (12) a je přitlačena ke kontaktní ploše disku. Vzhledem ke způsobu uložení kuličky je zřejmé, že kulička se v mazivu brodí a mazivo, které ulpí na povrchu kuličky je dopraveno do kontaktu disku a kuličky. Pod kuličkou je umístěn snímač kontaktní síly (11). Proměnné zatížení kontaktu se sestává ze staticky působící síly F_1 , která je vyvozena závažím (17) umístěným na pákovém mechanismu (19), a časově proměnné složky F_2 , která je vybuzena elektromagnetickým excitátorem (20). Poháněno je pouze jedno z kontaktních těles a to skleněný disk. Vzhledem k vysokému momentu setrvačnosti

není možné provádět experimenty s proměnnou rychlostí střední rychlosti maziva vstupujícího do kontaktu.

Výhodou je možnost záznamu síly v kontaktu v reálném čase pomocí tenzometrického snímače. Další z výhod je fakt, že je kulička uložena v zásobníku maziva. Tímto postupem je možno snížit množství maziva, které je pro experiment použito.

Jednou z hlavních nevýhod je zejména nemožnost řídit otáčky kuličky. Z tohoto důvodu umožňuje aparatura provádět experimenty pouze za předpokladu čistého valení. Jako další z nevýhod se jeví použití závaží umístěného na rameni. Vzhledem k omezené tuhosti ramene, na kterém je závaží umístěno, může při generování zátěžných pulzů docházet k ohybu ramena a ke vzniku vibrací, které mohou nepříznivě ovlivnit průběh experimentu.



Obr. 1-2 Experimentální aparatura podle Rena, Zhua a Wena [2]

1 – Zrcadlo, 2 – Mikroskop, 3 – Měřič rychlosti, 4 – Spojovací článek, 5 – Rám, 6 – Laserový paprsek, 7 – Laser, 8 – Motor, 9 – Převodovka, 10 – Řemen, 11 – Snímač, 12 – Olejová lázeň, 13 – Ocelová kulička, 14 – Skleněný disk, 15 – Kamera, 16 – Rám, 17 – Závaží, 18 – Guma (tlumič), 19 – Páka, 20 – Elektromagnetický budič

1.1.3 Experimentální aparatura podle Glovnea a Spikes

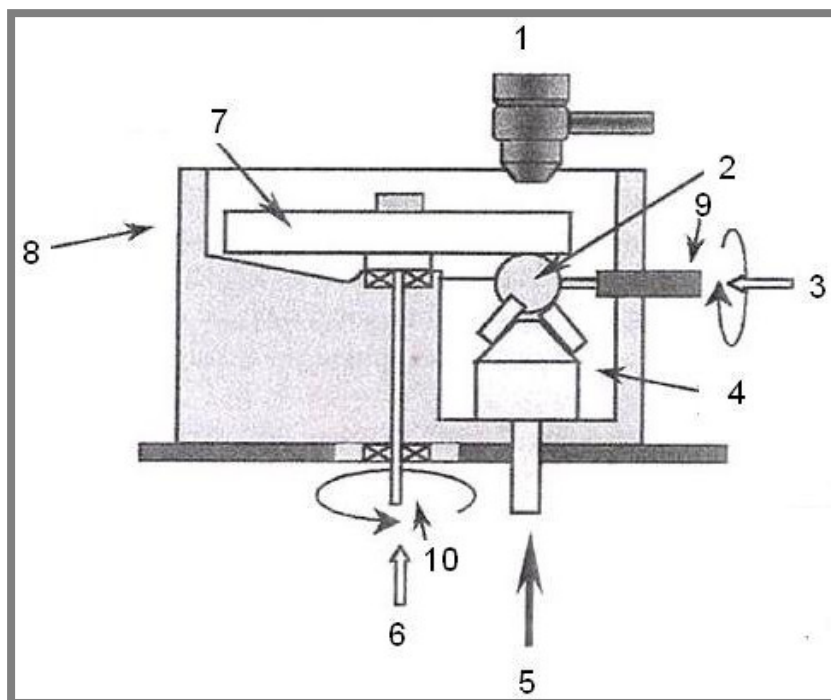
- [3] GLOVNEA, R.P., – SPIKES, H.A. The influence of cam-follower motion on elastohydrodynamic film thickness. In *Tribology Research: From model experiment to industrial problem, Proc. 27th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. DALMAZ, G. a kol. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001. s. 485–493. ISBN: 04-4450-581-4.

Další z prací, která se zabývala zkoumáním chování mazacího filmu v EDH mazaném kontaktu, byla publikována v roce 2001 Glovneou a Spikesem[2]. Práce je zaměřena na chování mazacího filmu v kontaktu vačky a zdvihátka u spalovacích motorů. Z pohledu tribologie se jedná o uzel velmi komplikovaný, neboť v průběhu jedné otáčky se mění jak zatížení kontaktu tak poloměry křivosti kontaktních ploch a zároveň i obvodové rychlosti kontaktních povrchů. Proto byl problém zjednodušen a jako jediný parametr proměnný v čase byla užita obvodová rychlost těles v kontaktu.

Součástí práce bylo také schematické znázornění experimentální aparatury spolu s popisem její funkce (obr 1-3). Z obrázku a přiloženého popisu vyplývá, že kontaktní tělesa jsou tvořena skleněným diskem a ocelovou kuličkou. Pro experiment byl použit skleněný disk o průměru 100 mm a tloušťce 10 mm(7), na jehož kontaktní straně byly nanесeny dvě poloodrazné vrstvy chromu a jedna vrstva křemíku. Jako druhé kontaktní těleso byla použita ocelová kulička o průměru 19 mm se střední hodnotou drsnosti povrchu cca $Ra = 11$ nm. Funkce aparatury je následující. Kulička je uložena na valivých ložiscích, přes které je zespodu přitlačována ke skleněnému disku. Ložiska i kulička jsou umístěna v zásobníku maziva (4), jehož část zůstane při pohybu kuličky na jejím povrchu a je dopravena do místa kontaktu se skleněným diskem. Disk i kulička jsou poháněny nezávisle na sobě skrze hřídele (9, 10). Vzhledem k tomu, že moment setrvačnosti ocelové kuličky je podstatně nižší než moment setrvačnosti disku, tak dynamická změna rychlosti byla použita pouze pro kuličku. Skleněný disk se po čas experimentu otáčel s konstantní úhlovou rychlostí. Průběh změny tloušťky mazacího filmu byl zaznamenáván vysokorychlostní kamerou (1), která byla schopna zaznamenávat až 1000 snímků za sekundu.

Výhodou této aparatury je bezesporu možnost pohybu disku i kuličky nezávisle na sobě, z čehož vyplývá možnost velkého množství simulací vzájemného pohybu těchto dvou těles.

Jednou z hlavních nevýhod této aparatury je nemožnost posuvu kuličky ve směru kolmém na osu disku. Tato skutečnost znemožňuje provedení více experimentů na jednom skleněném disku v okamžiku, kdy je na kontaktní straně disku v místě kontaktní stopy porušena křemíková a chromová vrstva. Jako další nevýhoda se jeví absence siloměrného členu a budiče časově proměnného zatížení. Mezi nevýhody lze také zařadit obrovský zásobník maziva a tudíž velká spotřeba testovaného maziva při jednom experimentu. Na tento problém navazuje i nemožnost odejmutí nádržky s mazivem od experimentální aparatury a tím spojené komplikace s čištěním aparatury od zbytků maziva.



Obr. 1-3 Experimentální aparatura podle Glovnea a Spikesa [3]

1 – Vysokorychlostní kamera s mikroskopem, 2 – Ocelová kulička,
3 – pohon kuličky, 4 – zásobník maziva, 5 – zatížení, 6 – pohon disku,
7 – skleněný disk, 8 – rám, 9, 10 – hřídele

1.1.4 Experimentální aparatura podle Dalmaz, Lubrechta, Dowsna a Priesty

1.1.4

[4] DALMAZ, G. – LUBRECHT, A.A. – DOWSON, D. – PRIEST, M.

Transient processes in triology. Elsevier B. V., 2004, s. 401 – 408.

The University of Leeds and Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

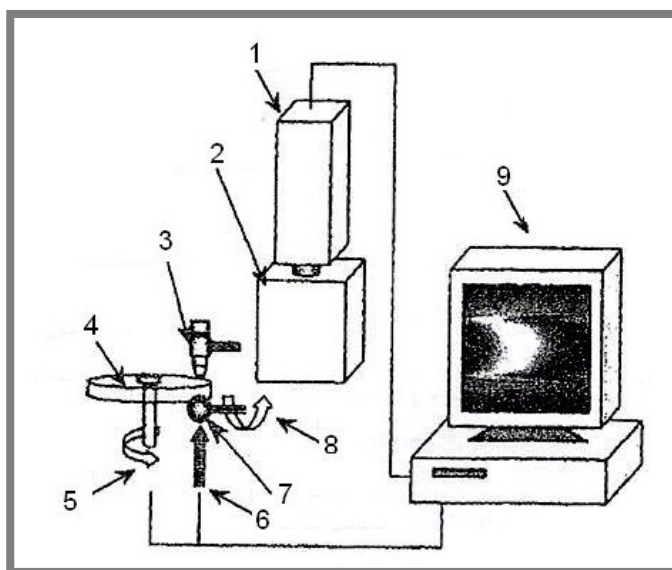
Článek zabývající se zkoumáním vlivu nestacionárních podmínek na chování mazacího filmu uvnitř elastohydrodynamicky mazaného (EHL) kontaktu, byl publikován v roce 2004 Galmazem, Lubrechtem, Dowsnem a Priestem [3]. Článek se zabýval chováním maziva v kontaktu zkoumaných těles při řízených rychlostech a statickém zatížení 25N.

V článku je také zahrnuto zjednodušené schéma použité aparatury (obr. 1-4). Z obrázku je vidět, že kontaktní tělesa jsou tvořena safírovým diskem (4) o průměru 100 mm, který je pokryt na kontaktní straně vrstvou chromu a na odvrácené straně je nanesena vrstva oxidu křemíku, a ocelovou kuličkou (7) o průměru 19 mm. Princip funkce aparatury je takovýto. Kulička je uložena v zásobníku maziva, které na kuličce při rotaci ulpívá a je dopravováno do kontaktu obou těles. Kulička je přitlačována (6) na skleněný disk statickou silou o velikosti 25N. Disk i kulička jsou poháněny nezávisle na sobě přes hřídele (5, 8), jejichž rychlost je kontrolována a zaznamenávána během každého testu. Mikroskop (3) zde má dvojí roli. Tou první je směřovat světlo xenonové výbojky do kontaktu těles a druhou je směřovat světlo od

místa styku ke vstupu do spektrometru (2). Obraz rozptýlený spektrometrem je zachycen vysokorychlostní kamerou (1). Obraz a všechny informace týkající se rychlosti těles a zatížení jsou posílány do počítače (9) k analýze.

Výhodou této aparatury je možnost řídit rychlosti obou těles nezávisle na sobě. Tento způsob pohonu těles zvyšuje univerzálnost celé aparatury. Můžou být např. prováděny experimenty s čistým valením, ale také experimenty s řízenou velikostí skluzu. Další výhodou je uložení kuličky v zásobníku maziva, což značně snižuje spotřebu maziva při experimentu.

Jednou z hlavních nevýhod tohoto řešení je absence dynamického zatěžování, které lépe simuluje reálné chování EHL kontaktu.



Obr. 1-4 Experimentální zařízení podle Dalmaze, Lubrechta, Dowsna a Priesta [4]

1 - Vysokorychlostní kamera, 2 – Spektrometr,
3 – Mikroskop, 4 - Sařirový disk, 5 - Hřidel motoru,
6 - Statické zatížení, 7 - Ocelová kulička, 8 - Hřidel motoru,
9 - Počítač

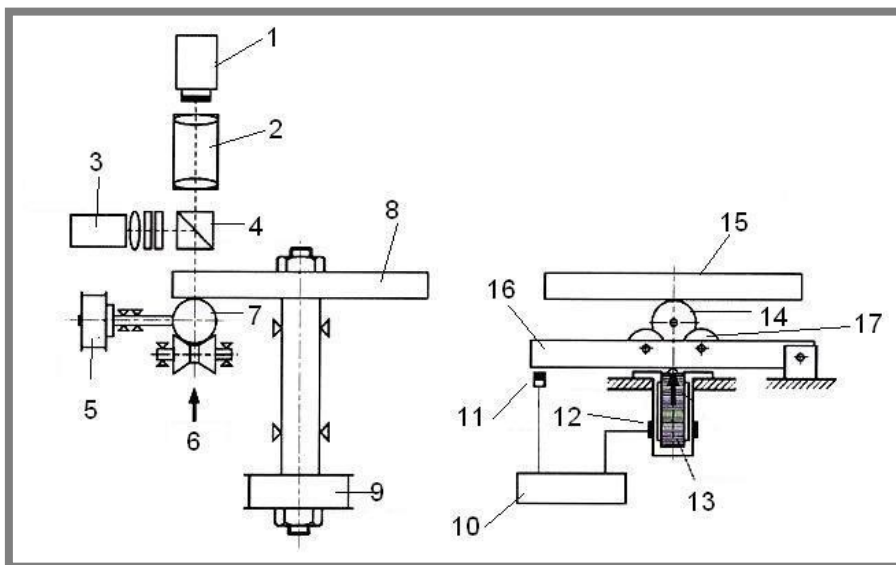
1.1.5 Experimentální aparatura podle Kanety, Ozakiho, Nishikawy a Gua

- [5] KANETA, M. – OZAKI, S. – NISHIKAWA, H. – GUO, F. Effects of impact loads on point contact elastohydrodynamic lubrication films. *Journal of Engineering Tribology-Part J*, 2007, vol. 221, no. 3, s. 271–278. ISSN: 1350-6501.

V roce 2007 publikoval Kaneta, Ozaki, Nishikawa a Guo práci, která se zabývala zkoumáním vlivu rázového zatížení na chování a utváření mazacího filmu v elastohydrodynamickém kontaktu. Práce se zabývala zkoumáním tloušťky mazacího filmu při různých druzích zatěžování a vzájemného pohybu kontaktních těles.

K práci bylo také přiloženo schéma použité experimentální aparatury (obr. 1-5). Ze schématu je zřejmé, že kontaktní tělesa jsou tvořena skleněným diskem (8, 15) o průměru 180 mm opatřeným vrstvou chromu na jeho kontaktní straně a ocelovou kuličkou (7, 14) o průměru 25,4 mm. Obě tělesa jsou poháněna nezávisle na sobě pomocí řemenic (5, 9), které spojují výstupní hřídele motorů s hřídelemi kontaktních těles a přenášejí tak krouticí moment. Tento nezávislý pohon obou členů umožňuje korigovat míru skluzu zkoumaných těles. Kulička je podepřena čtyřmi kužely (17), se kterými je uložena v zásobníku maziva na rameni (16). Mazivo, které ulpí na povrchu kuličky, je při jejím rotačním pohybu dopraveno do místa kontaktu s diskem. Pod ramenem je umístěn piezo-motor (13), kterým je možno plynule měnit zatížení v kontaktu kuličky a disku. Zatížení je měřeno v reálném čase pomocí tenzometrických snímačů (12) a výchylka páky je měřena pomocí detektoru přiblížení (11). Obě informace jsou zaznamenávány a po vyhodnocení poskytují informace o průběhu zatížení kontaktu v průběhu experimentu. K měření tvaru a tloušťky mazacího filmu byla použita dvoubarevná optická interferometrie. Jako světelný zdroj byla použita xenonová výbojka. Obraz kontaktu byl pomocí mikroskopu (2) zvětšen, a pak tyto zvětšené snímky byly zachyceny vysokorychlostní kamerou (1).

Výhodou je možnost záznamu síly a vychýlení ramena v reálném čase pomocí tenzometrického snímače a detektoru přiblížení. Další výhodou je možnost řídit otáčky disku a kuličky nezávisle na sobě a tudíž určovat míru vzájemného skluzu těles.



Obr. 1-5 Experimentální aparatura podle Kanety, Ozakiho, Nishikawy a Gua[5]

1 - Vysokorychlostní kamera, 2 – Mikroskop, 3 – Filtr světla, 4 – Zrcadlo,
5 – Kladka, 6 – Zatížení, 7 – Kulička, 8 – Skleněný disk, 9 – Kladka,
10 – Záznamník, 11 – Detektor přiblížení, 12 – Tenzometr, 13 – Piezomotor,
14 – Kulička, 15 – Skleněný disk, 16 – Rameno, 17 – Kužely

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

2.1 Polohovací a zatěžovací část

Tato část zařízení slouží k vytvoření statické a dynamické síly v kontaktu těles, mezi nimiž se nachází zkoumané mazivo. Dále pak slouží k polohování a pohonu ocelové kuličky a k měření sil působících v kontaktu.

1) Kontaktní tělesa

Kontaktní tělesa jsou části experimentální aparatury, mezi nimiž je zkoumáno testované mazivo. Nejčastěji se jedná o kalenou ocelovou kuličku a skleněný disk (pro větší tlaky safír). V experimentálních zařízeních [1], [2], [3], [4], [5] bylo použito různých průměrů kuliček (nejčastěji byla však použita kulička o průměru 1 palec) a různých průměrů skleněných disků.

2) Zatěžování

Aby bylo dosaženo požadovaného kontaktního tlaku v kontaktu mezi kuličkou a diskem, je třeba tělesa k sobě přitlačovat statickou nebo dynamickou silou, nebo jejich kombinací. K vyvození tohoto zatížení bylo použito pákového mechanismu [1], [2], [5], kde na jednom konci bylo kontaktní těleso a na druhém konci statická [1], dynamická [5], nebo statická i dynamická složka zatížení zároveň [2]. K buzení časově proměnného zatížení se používalo např. piezo-motoru [5]. Ten plní svou funkci díky krystalu, který při elektrickém impulzu zvětšuje svůj objem a vytváří tak zatížení, které je velmi snadno ovladatelné.

3) Snímání zatížení

Pokud je v kontaktu pouze zatížení statické [1], [3], [4], používá se obyčejných siloměrů, které jsou vhodně uloženy tak, aby kontrolovaly, že je v kontaktu zatížení, které je pro experiment požadováno. Pokud se však jedná o dynamická zatížení [2], [5], nejčastěji se používá speciálních siloměrů, které mají schopnost velmi rychle zachycovat změny zatížení, a tudíž jsou pro tento druh zatížení nejvhodnější.

4) Pohon těles

V praktickém použití součástí se velmi často setkáváme nejen s čistým valením, ale také například s vzájemným prokluzem obou těles. Tento jev se vykytuje např. u styku vačky a zdvihátka. V tomto případě dochází ke vzájemnému tření a může být porušena vrstva maziva a dojít ke kontaktu těles, což je nežádoucí. Některé z aparatur simulovaly pouhé valení [2], avšak většina aparatur [1], [3], [4], [5] mohla a také simulovala případ

prokluzu mezi kontaktními tělesy. K pohonu kuličky a disku jsou nejčastěji používány servomotory s možností nastavení rychlosti a tudíž může být nastavena požadovaná míra skluzu mezi zkoumanými tělesy.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem předložené bakalářské práce je návrh konstrukčního řešení upínacího mechanismu pro kulové a soudečkové vzorky, který by jakožto modulární jednotka doplnil experimentální zařízení v laboratoři Ústavu konstruování VUT v Brně. Nově navržený upínací mechanismus má zejména usnadnit výměnu kontaktních těles a umožnit použití různých typů kontaktních těles. Vzhledem k tomu, že je uvažována funkce navrhovaného mechanismu se současným vybavením laboratoře Ústavu konstruování, tak je potřeba vzít v úvahu řadu omezení a doporučení, která mají zajistit bezproblémovou funkčnost. Omezení a požadavky kladené na navrhovanou konstrukci jsou následující:

1) Rozměry zastavěného prostoru

Maximální výška upínacího mechanismu je omezena vzdáleností kontaktní plochy skleněného disku, který tvoří jedno z kontaktních těles, od upínací desky stolu. Nový upínací mechanismus by měl být řešen jako samostatná jednotka, kterou je možno polohovat nezávisle na zbytku experimentální aparatury. Tento efekt by mohl napomoci lepšímu využití plochy skleněného disku, než je tomu u současného experimentálního zařízení, kde z celkového průměru disku 150 mm je využita pouze stopa o šířce 15 mm.

2) Snadná výměna kontaktních těles

Nově navržený systém by měl umožňovat pohodlnější výměnu ocelové kuličky popř. kuželíku a zároveň umožnit snadnější čištění experimentální aparatury od zbytků testovaných maziv. U současně používaného experimentálního zařízení je potřeba při výměně jednoho z kontaktních těles demontovat část experimentálního zařízení. Tento problém by měl být novou konstrukcí odstraněn. Také čištění prostoru, kde se nachází testované mazivo, je u stávající experimentální aparatury nesnadné a časově značně náročné. Některé části je možno čistit pouze manuálně. Nově navržená konstrukce by měla umožňovat čištění všech částí experimentální aparatury, které přijdou do kontaktu s testovaným mazivem, v ultrazvukové lázni, kterou je laboratoř Ústavu konstruování vybavena, a která s vhodně zvolenou náplní dokáže čistit kontaminované povrchy daleko efektivněji.

3) Možnost temperování olejové lázně

Dalším z požadavků kladených na konstrukci je možnost regulovat teplotu testovaného maziva dle předepsaného schématu. Často je potřeba provést experimentální měření chování maziva při teplotách, které jsou odlišné od pokojové teploty. Navržená konstrukce by měla zahrnovat návrh vytápění komory s mazivem spolu se snímáním teploty testovaného maziva.

4) Zajištění opakovatelnosti měření – zatížení kontaktu

Zatížení kontaktu je možno rozdělit do dvou složek, kde jednu představuje složka statická, která je v průběhu experimentu neměnná, a složka dynamická, která v příslušném měřítku kopíruje průběh zatížení v reálných tribologických uzlech. Dynamická složka zatížení je generována pomocí lineárního piezo-motoru. V rámci navrhované konstrukce je potřeba zajistit možnost opakovaně nastavit požadovanou hodnotu statické složky zatížení kontaktu.

5) Snímání provozních parametrů v průběhu experimentu

Experimenty zkoumání vliv různých okrajových podmínek na chování maziva v elastohydrodynamicky (EHD) mazaném kontaktu jsou plně řízeny počítačem. Pro ověření správnosti průběhu veličin jako je zatížení kontaktu, rychlost kontaktních ploch a teplota testovaného maziva je nutné užít vhodné snímače zmíněných veličin.

4 NÁVRH METODICKÉHO ŘEŠENÍ K PŘÍSTUPU

K řešení konstrukce je přistupováno na základě znalostí a dovedností získaných během bakalářského studia na VUT v Brně. Snahou je navrhnout řešení, které splňuje cíle uvedené v kapitole 3. Zvláště důležité je dodržení maximální výšky, ve které bude umístěn pozorovaný vzorek. Zařízení musí být snadno smontovatelné, ovladatelné a dostatečně tuhé, aby v případě použití piezo-motoru nedošlo k vybuzení parazitních vibrací, které by ovlivnily výsledky experimentu.

Konstrukce bude vycházet z požadavků na možnost polohování vzorku a z požadavku na nutnost použití daného piezo-motoru, sloužícího jako generátor proměnného zatížení, který se nachází v laboratoři VUT. Konstrukce bude navržena v programu Autodesk Inventor Professional 2010. Výrobní výkresy, kusovník a výkresy sestav budou zpracovány v programu AutoCAD mechanical 2010.

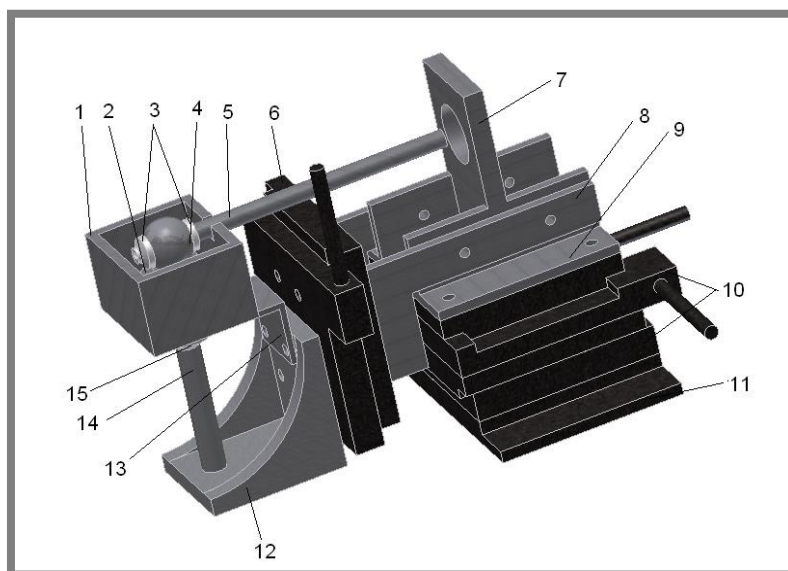
5 NÁVRH VARIANT A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

5

5.1 Varianta č. 1

5.1

Varianta je znázorněna na obr. 5-1. Statický přítlak ocelové kalené kuličky s vyjiskřenou dírou (4) ke skleněnému disku je iniciován pomocí vertikálně položeného lineárního posuvu (6) od firmy Thorlabs [6], který má vertikální únosnost až 180N a rozsah posuvu 50 mm, což je pro potřeby experimentálního zařízení dostačující. Horizontální posuvy ve směrech X a Y jsou zajištěny stejným lineárním vedením (10) od téže firmy, tentokrát jsou však položeny horizontálně a v této konfiguraci mají únosnost až 310N, což je také dostačující. Kulička je uložena na třech valivých ložiscích (2), které zajišťují její přesnou polohu ve všech třech osách a umožňují její odvalování. Kulička je připevněna k hnací hřídeli (5) pomocí dvou kuželových čelistí (3). Tyto při sevření zajistí dostatečnou třecí sílu, jež zabrání protočení kuličky a zaručí také vycentrování jejího středu vzhledem k ose hřídele, který je poháněn servomotorem. Ten je spolu s převodovkou přišroubován k přírubě (7). Příruba je spojena se základním tělesem (9), které je uloženo na horizontálních posuvech, které umožňují pohyb vzorku v osách X a Y . Podstavec (11) umožňuje připevnění horizontálních posuvů k pracovnímu stolu. K základnímu tělesu je přišroubován také držák vertikálního posuvu (8). K horizontálnímu posuvu je připevněno ocelový profil (12), který slouží jako základna pro lineární piezo-motor (14). Další z ocelových profilů (13) zajišťuje pomocí vodicích otvorů přesné vedení vaničky s kuličkou ve vertikálním směru. Siloměrný člen (15) je přišroubován třemi šrouby k ocelové vaně (1), ve které jsou uložena podpěrná ložiska kuličky a která je v průběhu experimentu zaplněna zkoušeným mazivem. Kulička se při pohybu brodí testovaným mazivem a mazivo, které ulpí na povrchu kuličky je dopravováno do místa kontaktu kuličky s diskem.



Obr. 5-1 – První varianta upínacího přípravku ocelové kuličky
1 – Vana, 2 – Podpěra s ložisky, 3 – Kuželové upínací čelisti, 4 – Ocelová kulička, 5 – Hnací hřídel, 6 – Vertikální posuv, 7 – Příruba, 8 – Držák vertikálního posuvu, 9 – Základna, 10 – Lineární vedení, 11 – Podstavec, 12 – Základna piezo-motoru, 13 – Vodicí člen, 14 – Piezo-motor, 15 – Snímač síly

Výhody této varianty byly shledány v možnosti polohovat kuličku ve 3 osách a v jednoduchosti montáže a obsluhy této aparatury.

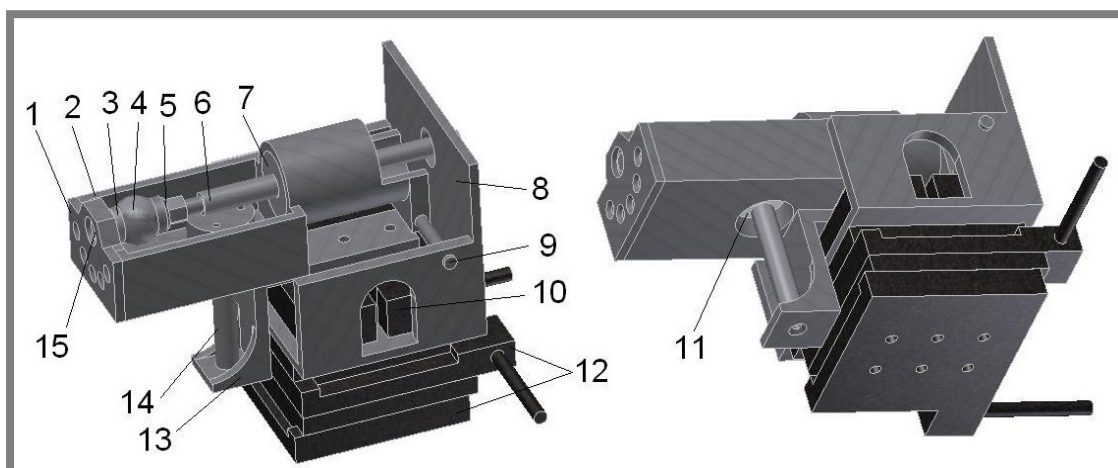
Hlavní nevýhodou je však velká hodnota vysazení vaničky vzhledem k horizontálním posuvům, na které působí síla od kuličky ve formě klopného momentu, což s sebou nese velké zatížení celé aparatury a možnost generování parazitních vibrací a následovné znehodnocení výsledků měření. Další nevýhodou je malý manipulační prostor mezi vrcholem kuličky a spodní rovinou skleněného disku.

5.2 Varianta č. 2

Varianta je znázorněna na obr 5-2. Statický přítlak kalené ocelové kuličky (4) na skleněný disk je realizován pomocí nůžkového zvedacího mechanismu (10) od firmy Thorlabs [6], který má nosnost až 220N a zdvih až 26.2 mm, což je dostačující pro uvažovanou aplikaci. Horizontální posuvy ve směru os X a Y jsou realizovány pomocí lineárních posuvů (12) taktéž od firmy Thorlabs [6] s únosností až 310N a s rozsahem posuvu až 50mm. Ocelová kulička je z obou stran uchycena do kuželových čelistí (3 a 5), které zajistí vycentrování středu kuličky vzhledem k ose hnacího hřídele. Stlačení kuličky upínacími kužely vyvede dostatečnou třecí sílu, aby nedošlo k prokluzu kuličky při náhlých změnách smyslu otáčení. Levá kuželová čelist (3) je otočně uložena v ložisku (15). Pravá kuželová čelist (5) je opatřena šestihranem a je závitem spojena s hnacím hřídelem (6). Pomocí nástrčného klíče je pak možno regulovat sílu sevření ocelové kuličky. Hnací hřídel je zajištěn dvěma radiálními ložisky (7), jak v radiálním, tak v axiálním směru a je spojen s převodovkou, která je spolu s motorem přišroubována k základnímu tělesu (8). Zatížení v kontaktu je měřeno snímačem síly (6), který je umístěn v dutině vany s olejem (12) tak, aby došlo k maximální úspoře místa a ke zvýšení kompaktnosti celého zařízení. Základní těleso je připevněno šrouby k lineárním posuvům a zároveň je spojeno s nůžkovým mechanismem, který zajišťuje pohyb piezo-motoru v ose Z . Pohybem mechanismu ve vertikálním směru je zvedána základna piezo-motoru (13). Piezo-motor (14) v navržené koncepci plní úkol budiče dynamického zatížení kontaktu. Ovládáním nůžkového mechanismu je možno zvednout piezo-motor, který je umístěn naproti snímači síly a změnou polohy piezo-motoru dochází k natočení vany s olejem v čepu. Vana je naplněna mazivem, jež je rotací kuličky dopravováno do místa kontaktu s diskem.

Mezi hlavní výhody této varianty se řadí možnost polohování kuličky ve 3 na sobě nezávislých osách a velká únosnost použitého nůžkového mechanismu. Další z výhod je umístění ocelové kuličky blízko krajní stěně vaničky, což umožňuje využití větší plochy disku pro experimenty.

Jednou z nevýhod je složitější konstrukce upínacího mechanismu, která kombinuje lineární posuvy ve třech hlavních osách spolu s naklápěním vaničky, ve které je umístěna ocelová kulička a zkoumané mazivo. Komplikované by bylo také čištění vaničky, kdy pro tuto variantu řešení by byla nezbytná její demontáž. Zároveň konstrukce obsahuje příliš mnoho pohyblivých částí, které mohou při dynamickém zatěžování kontaktu generovat setrvačné síly. Tyto pak mohou změnit způsob zatížení kontaktu a experimentální měření znehodnotit. Jako nevýhodné se taky jeví umístění snímače síly, který není uložen pod kuličkou, a proto by bylo nutné sílu v kontaktu vždy přepočítat.



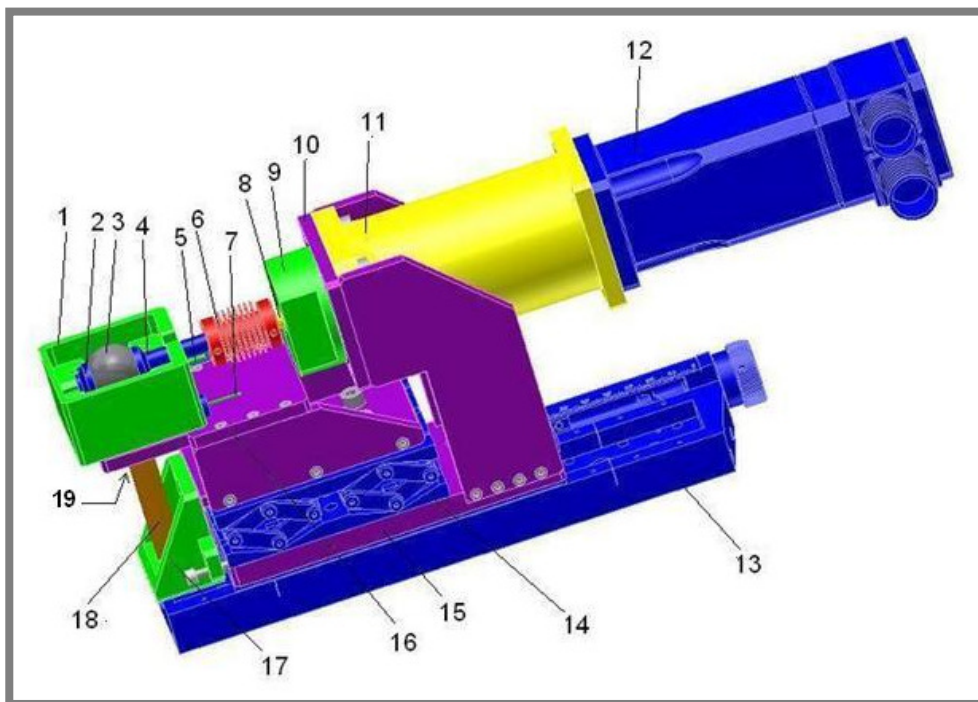
Obr. 5-2 – Druhá varianta upínacího přípravku ocelové kuličky

1 – Čelní deska vany, 2 – Vana, 3 – Levá kuželová upínací čelist, 4 – Ocelová kulička, 5 – Pravá kuželová upínací čelist, 6 – Hnací hřídel, 7 – Radiální ložiska, 8 – Základna, 9 – Čep, 10 – Nůžkový mechanismus, 11 – Snímač zatížení, 12 – Lineární posuvy v ose X a Y , 13 – Základna piezo-motoru, 14 – Piezo-motor, 15 – Radiální ložisko

5.3 Varianta č. 3

Konstrukční řešení varianty č. 3 je znázorněno na obr 5-3a. Tato varianta je kombinací prvků z předchozích dvou variant. Statický přítlak ocelové kuličky (3) na skleněný disk je vytvářen již zmiňovaným nůžkovým mechanismem (14) firmy Thorlabs [6]. Horizontální posuv v normálovém směru na plochu boku disku je realizován posuvným mechanismem (13) od firmy Standa Ltd. [7], jenž má horizontální únosnost až 400N a rozsah posuvu 100mm, což dává možnost vysunutí celého upínacího mechanismu z prostoru pod skleněným diskem bez nutnosti jeho demontáže. Kulička je uložena v ocelové vaně (1) a je sevřena mezi dvěma kuželovými čelistmi (2,4), které zajistí její vycentrování středu kuličky do osy hnacího hřídele. Pravá kuželová čelist (4) má vnitřní závit, do kterého se zašroubuje levá kuželová čelist (2). Toto spojení vytvoří tlak na styčných plochách kuželů a kuličky, jež způsobí dostatečnou třecí sílu, která zabráni vzájemnému prokluzu mezi kuličkou a kuželovými plochami. Pravá čelist je opatřena šestihranem a je spojena s převodovkou (11). Je zde požadováno pružné spojení, a proto bylo využito vlnovcové spojky (6). Výstupní otáčky převodovky jsou snímány enkodérem (9), který je součástí výbavy laboratoří Ústavu konstruování, a nasnímaná data jsou posílána ke zpracování do počítače. Z důvodu použití enkodéru, je výstupný hřídel z převodovky krátký a nedosahoval by až k vlnovcové spojce. Proto je nutno použít prodlužující člen (8). Enkodér i převodovka jsou přišroubovány k přírubě (10), jež je připevněna k základně (15). Základní deska nese také nůžkový polohovací mechanismus, ke kterému jsou připevněny komponenty držící vodící desku (16) a základnu piezo-motoru (17). Piezo-motor (18) plní v navržené aparatuře funkci budiče dynamického zatížení kontaktu kuličky a disku. Silové působení v kontaktu je snímáno snímačem síly (19) s frekvencí 15,7 kHz, která umožňuje sledovat průběh zatížení v kontaktu i při náhlých změnách zatížení. Snímač síly je připevněn

k ocelové vaně a umístěn pod středem ocelové kuličky tak, aby bylo zajištěno přesné měření síly v kontaktu.



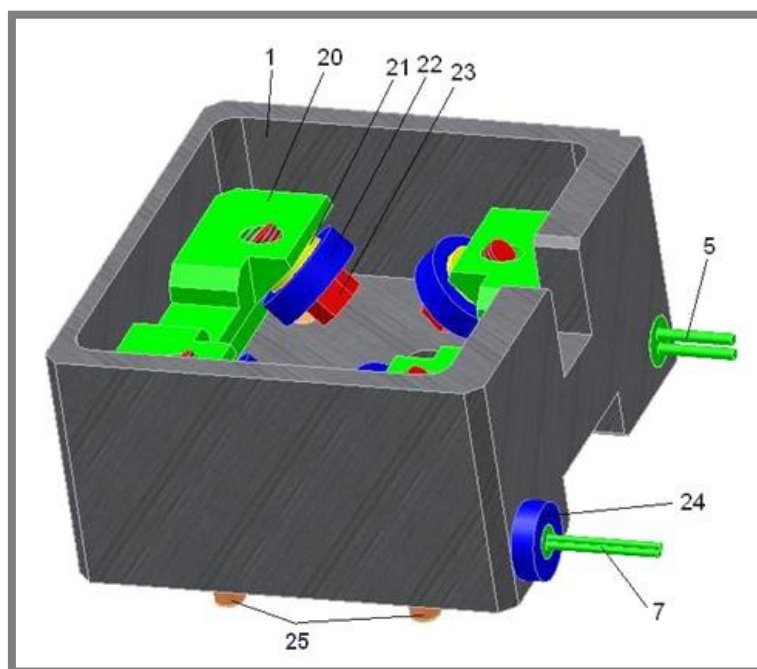
Obr 5-3a Třetí varianta upínacího přípravku ocelové kuličky

1 – Vana, 2 – Levá kuželová upínací čelist, 3 – Ocelová kulička, 4 – Pravá upínací kuželová čelist, 5 – Termočlánek, 6 – Vlnovcová spojka, 7 – Teplotní čidlo, 8 – Prodlužující člen, 9 – Enkodér, 10 – Přívodovka, 11 – Převodovka, 12 – Motor, 13 – Lineární posuv, 14 – Nůžkový mechanismus, 15 – Základna, 16 – Vodící deska, 17 – Základna piezo-motoru, 18 – Piezo-motor, 19 – Snímač zatížení

Ocelová vana je vyobrazena na obr. 5-3b. Vana je naplněna zkoumaným mazivem, ve kterém se kulička brodí. Část maziva, které ulpí na jejím povrchu, je dopravena do místa kontaktu s diskem. Kulička je ve vaně uložena na čtyřech kuličkových ložiscích (21), která jsou přišroubována k unašečům (19). V ocelové vaně je zakomponován termočlánek (5), jehož úkolem je vyhřívat tělo vany. Přestupem tepla dochází k zahřátí maziva na požadovanou teplotu. Kontrola teploty oleje je zajištěna teplotním čidlem (7), které je v přímém kontaktu s mazivem. Spínání a vypínání termočlátku bude obsluhováno programem, který bude na základě požadované teploty a teploty zjištěné snímačem ovládat vyhřívání vany. Teplotní čidlo nesmí být v kontaktu s ocelí, která je velmi dobrým tepelným vodičem a bude mít větší teplotu než zkoumané mazivo. Tento problém byl vyřešen plastovým dílcem (23), který je nalisován do otvoru ve stěně ocelové vany. Tento dílec plní dvojí funkci. Izoluje teplotní čidlo od teplejšího kovového těla vany a těsní otvor proti úniku maziva. Dílec je vyroben z materiálu odolávajícímu vysokým teplotám např. Murylon® A GF od výrobce Murtfeldt Plasty s.r.o. [8]. Celá vana je usazena ve vodící desce pomocí čtyř vodících tyčí (24), které jsou zalisovány v přesných otvorech ve dně vany.

Hlavní výhodou tohoto řešení je vysoká tuhost celé sestavy a tudíž eliminace parazitních vibrací, jež by mohly znehodnotit výsledky měření. Mezi další výhody se řadí možnost vysunutí celé sestavy z prostoru pod skleněným diskem a následné jednoduché vyjmutí vany např. z důvodu jejího vyčištění. Jako další výhoda se jeví použití vlnovcové spojky, která dovoluje pružné spojení hřídelí a dovoluje rychlé dynamické změny směru a rychlosti otáčení.

Nevýhodou této varianty je nutnost velmi přesné výroby některých dílů a nemožnost polohování kuličky v tečném směru na skleněný disk.



Obr 5-3b Třetí varianta upínacího přípravku ocelové kuličky – detailní zobrazení vany

5 – Termočlánek, 7 – Teplotní čidlo, 20 – Unašeč ložisek,
21 – Podložka, 22 – Ložisko, 23 – Hřídel ložiska, 24 – Plastový dílec, 25 – Vodicí tyč

5.4 Výběr optimální varianty

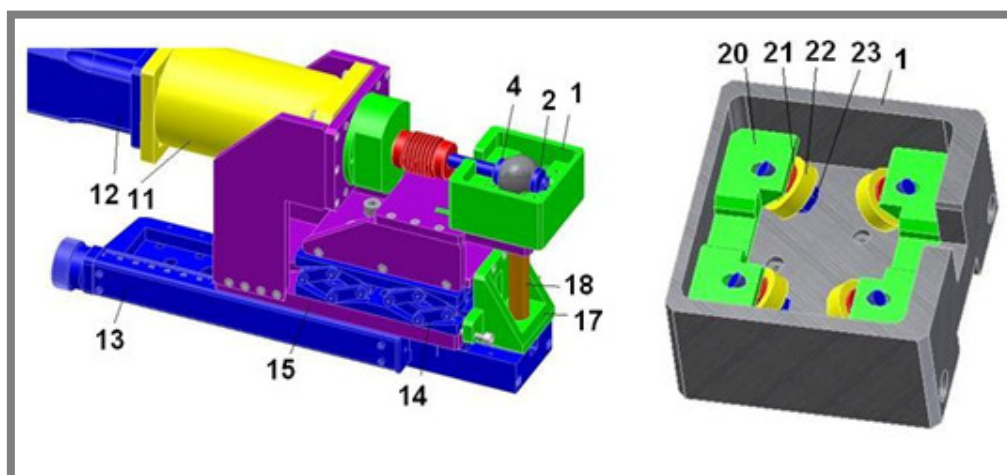
Varianta č. 1 je z konstrukčního hlediska velmi jednoduchá a umožňuje polohovatelnost kuličky ve 3 osách. Nevýhodou je možné rozvibrování aparatury a následné znehodnocení experimentu. Další z nevýhod je velký zastavěný prostor pod skleněným diskem. Konstrukce je nákladná z důvodu použití tří nakupovaných lineárních posuvů, které zajišťují přesné polohování ocelové kuličky. Varianta č. 2 je konstrukčně i výrobně značně složitější než předchozí. Výhodou je malý zastavěný prostor pod diskem, možnost upnutí vzorku velmi blízko ke středu disku a polohovatelnost ve 3 osách. Velkou nevýhodou je ovšem značné množství materiálu, který by se dynamicky pohyboval, a následně vybuzené parazitní vibrace způsobené setrvačnými silami by mohly způsobit rozvibrování celé soustavy a znehodnotit experimentální měření. Varianta č. 3 je kombinací předchozích dvou variant se

snahou využít výhody a eliminovat nevýhody. Výhodou této varianty je použití polohovadel s velkou únosností a tudíž větší tuhost celého systému než u předchozích variant. Nevýhodou je polohovatelnost jen ve 2 osách. Možnost polohování v ose tečné na skleněný disk, však byla v průběhu řešení práce shledána jako nepotřebná a tudíž nebyla při návrhu konstrukčního řešení uvažována.

Jelikož je v experimentu kladen důraz na tuhost této části aparatury, byla vybrána varianta č. 3

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Hlavními částmi mechanismu jsou lineární posuvný (13) a nůžkový zvedací mechanismus (14), pohon kuličky (12), zatěžovací piezo-motor (18), upínací členy kuličky (2, 4) a podpůrné členy (20-23) kuličky uloženy ve vaně (1). Statické zatížení kontaktu je realizováno pomocí nůžkového mechanismu a dynamická složka zatížení je buzena piezo-motorem. Piezo-motor je připevněn k nůžkovému mechanismu pomocí ocelového profilu (17) a ocelového plechu. Kulička je držena třecí silou mezi dvěma kuželovými upínacími čelistmi (2, 4), a pokud by tato třecí síla nebyla dostatečná a docházelo by k vzájemnému prokluzu stykových ploch, je možno toto spojení pojistit dvousložkovým lepidlem. Podpora kuličky je realizována čtyřmi radiálními ložisky (21) umístěnými v ocelové vaně (1). Pohon kuličky je zajišťován elektromotorem (12). Elektromotor je připevněn k základní desce (15) pomocí tří ocelových plechů a má možnost pohybu jen v jedné ose. Jeho pohyblivost ve vertikálním směru byla odstraněna z důvodu odlehčení nůžkového mechanismu, který by byl zbytečně zatěžován momentem způsobeným hmotností motoru a převodovky (11). Jednotlivé komponenty jsou spojeny šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Při návrhu byla uvažována možnost montáže přípravku na pracovní stůl v laboratoři Ústavu konstruování VUT v Brně.



Obr. 6-1 Model upínacího a polohovacího mechanismu

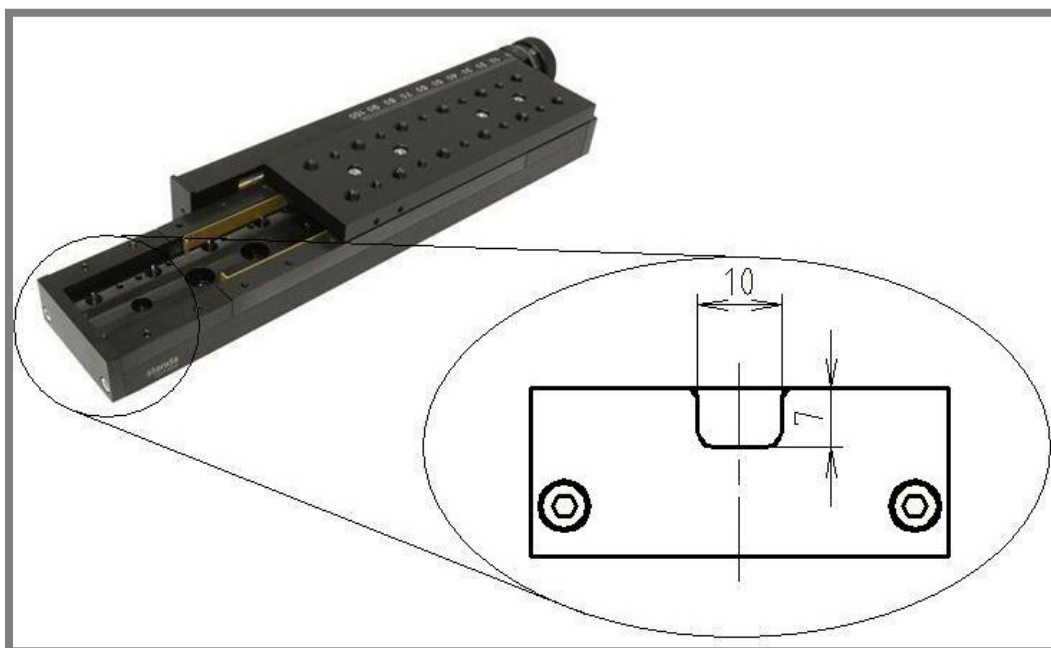
1 – Vana, 2 – Levá kuželová upínací čelist, 4 – Pravá kuželová upínací čelist,
11 – Převodovka, 12 – Motor, 13 – Lineární posuv, 14 – Nůžkový mechanismus,
15 – Základní deska, 17 – Základna piezo-motoru, 18 – Piezo-motor, 20 – Unašeč ložisek,
21 – Podložka, 22 – Ložisko, 23 – Hřídel ložiska

6.1 Lineární posuv

6.1

K lineárnímu posuvu kuličky ve směru ke středu disku byl použit lineární posuv 7T175-100 od výrobce Standa Ltd. [7]. Tento posuv se vyznačuje vysokou horizontální únosností až 400N, což je pro požadavky experimentální aparatury dostačující a naskýtá se zde možnost vytvoření většího zatížení kontaktu pro případné experimenty s jinými kontaktními tělesy, než pro které je aparatura primárně určena. Posuv dále disponuje polohovacím rozsahem 100 mm s přesností na 2 μ m, což jsou ideální parametry pro případné vysunutí celé aparatury z pracovního prostoru a následné navrácení do shodné polohy. Tento díl však bude

nutno před smontováním aparatury upravit. V čelní stěně je nutno vyříznout otvor o velikosti 10 x 7mm, aby tímto otvorem mohla procházet válcová hlava šroubu M5 držící piezo-motor. Otvor může být vyhotoven např. na frézce stopkovou frézou a musí být dodrženy minimální zadané rozměry, aby byla zaručena průchodnost válcové hlavy šroubu. Po vyříznutí je nutno zaoblit ostré hrany, aby nemohlo dojít k úrazu obsluhy zařízení. Tento díl se k pracovnímu stolu přišroubuje pomocí čtyř šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem se závitem M6.



Obr. 6-2 Lineární posuv 7T175-100 [9]

6.2 Nůžkový mechanismus

K horizontálnímu přiblížení kuličky do místa kontaktu se skleněným diskem a zároveň k vytvoření statického zatížení v kontaktní ploše byl použit nůžkový mechanismus L200 Mini Lab Jack od výrobce Thorlabs [6]. Ten může být vertikálně zatížen až na 220N, jež jsou pro požadavky experimentů dostačující. Stejně jako lineární posuv, může být tento použit pro experiment s jinými kontaktními tělesy, která musí být zatěžována více, než ta, pro která je aparatura přednostně určena. Tento mechanismus má zdvih 26.2 mm, avšak nemá žádný měřicí člen, ze kterého by bylo vyčteno, o kolik byl mechanismus zvednut. Mechanismus ovšem slouží pouze k dopravení kuličky do místa kontaktu a pro následné vytvoření statického zatížení. Velikost statického zatížení je měřena snímačem zatížení, tudíž absence měřicího členu není na závadu. Celý tento prvek bude připevněn pomocí dvou šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem se závitem M6 k základní desce.

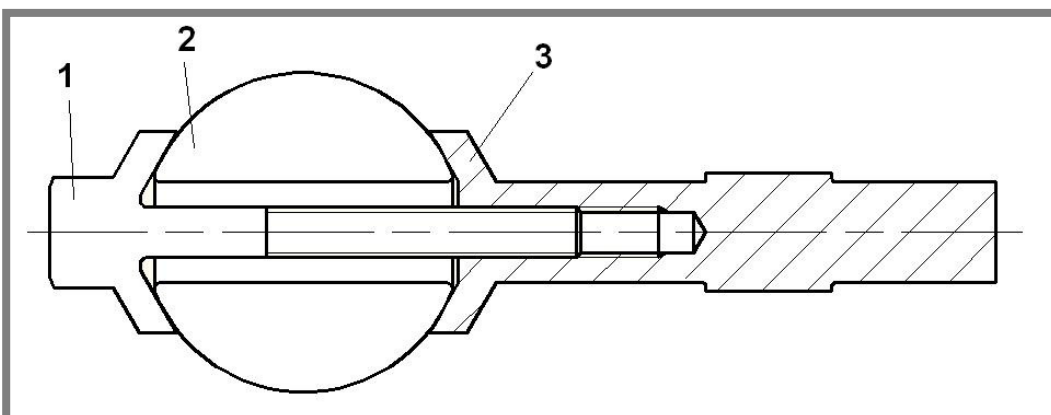


Obr. 6-3 Nůžkový mechanismus L200 Mini Lab Jack [10]

6.3 Uložení kuličky

6.3

Kulička (3) je uložena mezi dvěma upínacími kuželovými čelistmi s vrcholovým úhlem 120° . Levá kuželová čelist (2) je zakončena vnějším závitem M4 a lze ji dotahovat klíčem na šrouby se šestihrannou hlavou o velikosti 8mm. Pravá kuželová čelist (4) je součástí hřídele s vnitřním závitem, do kterého bude zašroubována a dotažena na požadovaný moment závit levé kuželové čelisti. Na hřídeli je šestihran pro lepší dotažení obou čelistí. Pokud by svěrná síla vytvořená zašroubováním závitů do sebe nebyla dostatečná, je možnost na kuželové plochy nanést vrstvu lepidla a pojistit tak kuličku a kuželové plochy proti vzájemnému prokluzu adhezními a kohezními silami vytvořenými lepidlem.



Obr. 6-4 Uložení kuličky

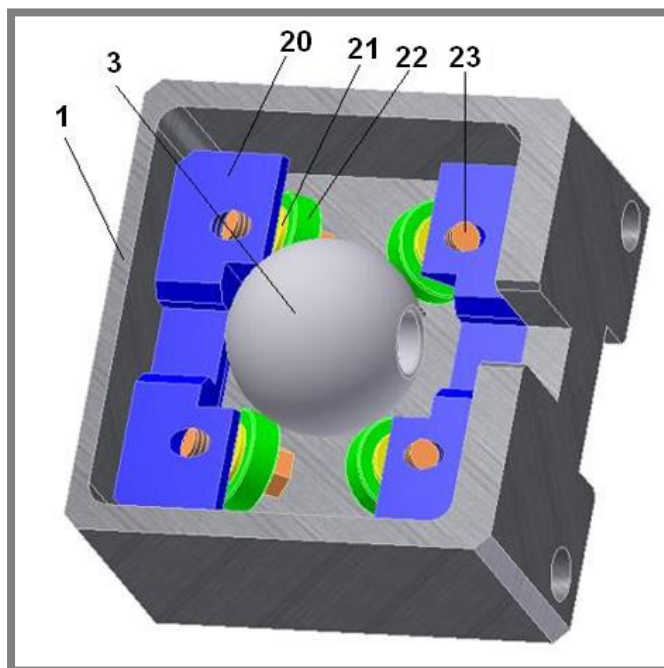
1 – Levá upínací čelist s šestihranem, 2 – Kuličkový vzorek, 3 – Pravá upínací čelist s šestihranem

6.4 Podpěra kuličky

6.4

Kulička je podpírána čtyřmi radiálními ložisky 619/5 (22) od výrobce SKF [11]. Podpory slouží k přenosu statických a dynamických sil do místa kontaktu a také k

zajištění shodné polohy po vyjmutí a opětovném vrácení kuličky do vany (kulička se mezi čtyřmi stykovými body vycentruje). Ložiska jsou nalisována na hřídel ložiska (23). Tento hřídel je zakončen vnějším závitem M4, který je zašroubován do unašeče ložisek (20). Mezi ložiskem a unašečem ložiska je vložena podložka (21) o šířce 0,8 mm. Tato podložka slouží k oddělení ložiska od unašeče ložisek. Absence této podložky by způsobila drhnutí vnějšího kroužku ložiska o stěny unašeče.

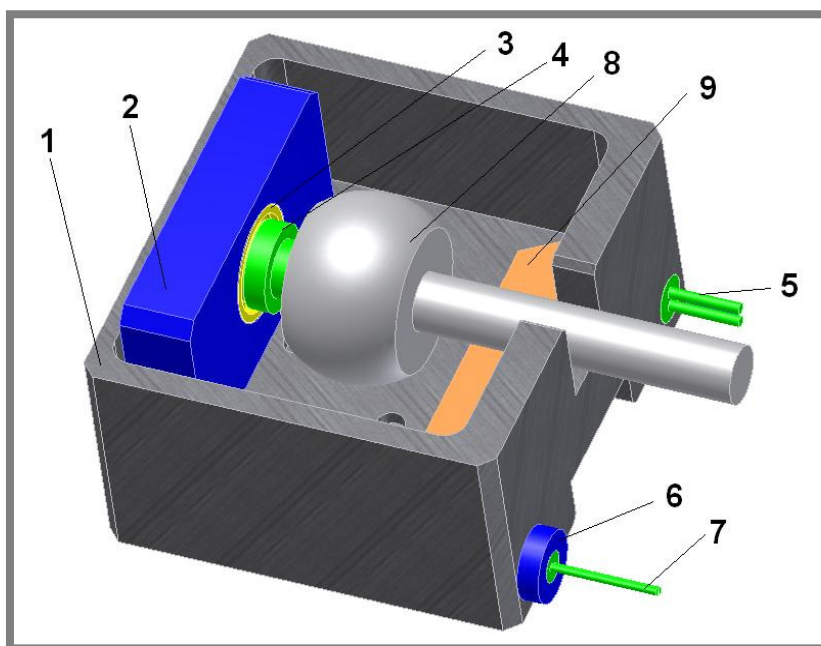


Obr. 6-5 Podpěra kuličky

1 – Vana, 3 – Kulička, 20 – Unašeč ložisek, 21 – Podložka,
22 – Ložisko, 23 – Hřídel ložiska

6.5 Uložení soudečkového vzorku

Soudečkový vzorek (8) je uložen v téže vaně (1) jako vzorek kulový, kde rozdíl je pouze ve členech umístěných uvnitř vany. Z levé strany vany je ze spodní strany přišroubován unašeč ložiska (2), ve kterém je uloženo radiální ložisko 625 (3) od výrobce SKF [11]. Ložisko je opatřeno středícím hrotem (4), který zajišťuje vycentrování vzorku. Z důvodu použití shodné vany, ale odlišných součástí uvnitř, musí být doplněn plastový těsnicí člen (9), který ucpává nevyužité průchozí díry pro šrouby, aby nedocházelo k úniku zkoumaného maziva. Při experimentu se soudečkovými vzorky je samozřejmě také požadavek na temperování zkoumaného maziva. Tento problém byl vyřešen shodně jak u kuličkového vzorku. Termočlánek (5) je uložen v těle vany a teplotní čidlo (7) je chráněno plastovým dílcem (6), který zároveň těsní otvor v boku vany proti úniku maziva.



Obr. 6-6 Uložení soudečku

1 – Vana, 2 – Unašeč ložiska, 3 – Radiální ložisko, 4 – Středící hrot,
5 – Termočlánek, 6 – Plastový dílec, 7 – Teplotní čidlo, 8 – soudečkový
vzorek s hřídelem, 9 – Těsnění

6.6 Snímání zatíženého kontaktu

Při výběru snímače síly, který by byl vhodný pro navrhovanou aplikaci, bylo stanoveno několik kritérií, které byly určující pro samotný výběr. Jedním z prvních požadavků byla teplotní stálost snímače a relevantnost výsledků i pro vyšší teploty měření. Vzhledem k tomu, že snímač síly je spojen s vaničkou pomocí ocelových šroubů a dosedá na spodní plochu vaničky, tak při temperaci olejové lázně bude docházet k zahřívání i snímače síly a to až do teplot 70° C. Dalším z požadavků byl malý rozměr snímače vzhledem k omezenému prostoru pod skleněným diskem experimentálního zařízení. Experimentální aparatura je navržena pro sledování náhlých změn provozních parametrů v průběhu experimentu. Proto i vzorkovací frekvence, s kterou je schopen snímač odečítat zatížení v kontaktu, musí být dostatečná, aby bylo možno zpětně rekonstruovat průběh změny zatížení. Dalším podstatným parametrem, který ovlivňuje výběr snímače je maximální rozsah sil, které mohou být, s výrobcem udávanou chybou, měřeny snímačem. Snímač byl zvolen tak, aby pokryl současný používaný rozsah zatížení 5 N až 80 N s dostatečnou rezervou, aby bylo možno měřit i vyšší zatížení při jiné konfiguraci kontaktních těles. Po uvážení zmíněných kritérií byl vybrán snímač C9B firmy Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) [12] s výškou pouhých 13mm, maximálním rozsahem měřitelného zatížení 0 N až 200 N, s teplotní stabilitou v rozsahu -10°C až +75°C a vzorkovací frekvencí 15,7 kHz.



Obr. 6-7 Snímač síly [13]

6.7 Řešení dynamického zatížení kontaktu

Pro vyvození dynamické složky zatížení byl zvolen lineární piezo-motor. Jedním z hlavních důvodů volby piezo-motoru byla možnost provozovat toto zařízení v tzv. režimu closedloop. Tento režim umožňuje kontrolovat polohu hrotu piezo-motoru, který přiladuje vaničku s kuličkou oproti skleněnému disku pomocí zpětnovazební smyčky. Další výhodou je možnost použití vysokých frekvencí pro zatěžování kontaktu a malé rozměry piezo-motoru a ostatního příslušenství nezbytného pro jeho provoz. Pro navrhované zařízení byl zvolen piezo-motor s maximálním rozsahem posuvu hrotu 45 μm . Tento rozsah, při daném počátečním zatížení, může vybudit proměnné dynamické zatížení v rozsahu 0N až 30N. Piezo-motor bude ovládán pomocí software, který je poskytnut výrobcem, který umožňuje použít různé typy zátěžných pulzů (sinusový pulz, schodový pulz, pilový pulz, čtvercový pulz atd.) a pro jednotlivé typy pulzů je možno nastavit odpovídající parametry, jako je frekvence změny zatížení, maximální amplituda, strmota změny zatížení atd. Další informace týkající se vybraného lineárního piezo-motoru jsou uvedeny v příloze.



Obr. 6-8 Lineární piezo-motor [14]

6.8 Temperace lázně

6.8

Pro ohřev olejové lázně byla vybrána topná patrona HHP s průměrem 6,5mm, délkou 40mm a výkonem 125W při 230V od firmy Hotset ČR s.r.o. [15]. Patrona je umístěna v těle vany a přenáší tepelnou energii do materiálu vany, který ohřívá zkoumané mazivo. Hlavní důvod výběru byl poměr velikosti a výkonu. Patrona funguje tak, že se sepne na plný výkon a vyhřívá, dokud nedostane impuls k vypnutí od řídicího členu. Ten získává informace o aktuální teplotě maziva z teplotního čidla, které je umístěno přímo v mazivu. Výhodou tohoto řešení temperace je úplné řízení spínání a vypínání vyhřívání pomocí softwaru v počítači. Toto řešení umožňuje nastavení teplot olejové lázně od 25°C až do hodnoty cca 70°C. Montážní postup topné patrony je popsán v příloze.



Obr. 6-9 Topná patrona [16]

6.9 Montážní postup

6.9

Ke smontování celé sestavy je použito především šroubů s válcovou hlavou a s vnitřním šestihranem a dále 6 ks stavěcích šroubů s drážkou a plochým koncem se závitem M4 a délce 7 mm. Šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem jsou využity v těchto rozměrech a množstvích: M6 o délce 10mm - 10 ks, M5 o délce 8mm - 1 ks, M5 o délce 16mm - 4 ks, M4 o délce 12mm - 10 ks, M3 o délce 10mm - 30 ks, M2 o délce 4mm - 3ks.

Čísla jednotlivých součástí odpovídají číslům pozic na výkresech sestavení s tím, že součásti sestavy budou značeny čísly bez indexu, např. (1, 2); součásti podsestavy pro kuličkový vzorek budou značeny indexem a, např. (1a, 2a) a součásti podsestavy pro soudečkový vzorek budou značeny indexem b, např. (1b, 2b).

Montáž podsestavy pro kuličkový vzorek:

- 1) Do vany (1a) se nalisují čtyři vodící kolíky (4a).
- 2) Pomocí tří šroubů M2 x 4mm (7a) se do vany připevní siloměrný člen (12a).
- 3) Do otvoru ve stěně vany se vloží těsnicí kroužek čidla (5a).
- 4) Na každý hřídel ložiska (3a) se nasune ložisko 619/5 (9a) a následně podložka (8a).
- 5) Tyto hřídele s ložisky se našroubují do unašečů ložisek (2a).
- 6) Každý unašeč se pomocí dvou šroubů M4 x 10mm (6a) přišroubuje dovnitř vany.

- 7) Kulička (22) se vloží mezi pravou upínací čelist (12) a levou upínací čelist (13), které se do sebe zašroubují a utáhnou na dostatečný moment.
- 8) Kulička i s upínacími čelistmi se usadí na ložiska až před experimentem.
- 9) Teplotní čidlo (10a) a termočlánek (11a) se do sestavy vkládají až před začátkem experimentu z důvodu čištění vany v ultrazvukové lázni po každém měření

Montáž podsestavy pro soudečkový vzorek:

- 1) Shodné s krokem 1) podsestavy pro kuličkový vzorek.
- 2) Shodné s krokem 2) podsestavy pro kuličkový vzorek.
- 3) Shodné s krokem 3) podsestavy pro kuličkový vzorek.
- 4) Do unašeče ložiska (2b) se nalisuje ložisko 618/8 (7b).
- 5) Do ložiska (7b) se vloží středící hrot (3b).
- 6) Unašeč se pomocí dvou šroubů M4 x 10mm (6a) přišroubuje dovnitř vany.
- 7) Do zbylých dvou otvorů ve dně vany se vloží ucpávka (5b).
- 8) Soudečkový vzorek se středícím důlkem se usadí na středící hrot až před experimentem.
- 9) Teplotní čidlo (10a) a termočlánek (11a) se do sestavy vkládají až před začátkem experimentu. Viz krok 9 u podsestavy pro kuličku

Montáž sestavy:

- 1) K lineárnímu posuvu (20) se pomocí čtyř šroubů M6 x 10mm (18) upevní základní deska (4).
- 2) K základní desce se pomocí dvou šroubů M6 x 10mm přišroubuje zvedák Thorlabs (21).
- 3) Na zvedák se pomocí čtyř šroubů M6 x 10mm přišroubuje spojovací deska (9).
- 4) Z boku se ke spojovací desce přišroubují pomocí šroubů M3 x 10mm (14) dvě bočnice (7) a zepředu se stejnými šrouby přišroubuje základna piezo-motoru (5).
- 5) Do základny se šroubem M5 x 8mm (17) přišroubuje piezo-motor (24) a do otvorů na bocích se našroubují dva šrouby M4 x 12mm (15).
- 6) Na horní část bočnic se pomocí šroubů M3 x 10mm přišroubuje vodicí deska (6).
- 7) K základní desce se šrouby M3 x 10mm přišroubují unašeče motoru (8).
- 8) K unašečům se šrouby M3 x 10mm přišroubuje příruba převodovky (10).
- 9) Na přírubu se šrouby M3 x 10mm přišroubuje enkodér (25).
- 10) Na výstupní hřídel převodovky (2) se stavěcími šrouby M4 x 7mm (19) připevní spojovací člen (11).
- 11) Spojovací člen se prostrčí otvorem v enkodéru a převodovka se pomocí šroubů M5 x 16mm (16) přišroubuje k přírubě.

- 12) K převodovce se pomocí šroubů M4 x 12mm přišroubuje motor (1).
- 13) Na konec spojovacího členu se pomocí stavěcích šroubů připevní vlnovcová spojka (23).
- 14) Dle zkoumaného vzorku je podsestava pro kuličku (3a), nebo pro soudeček (3b) vložena vodícími kolíky do otvorů ve vodící desce a snímací částí siloměrného členu je položena na piezo-motor.
- 15) Hřídel soudku (5b) nebo pravá upínací čelist použitá pro ocelovou kuličku (12) je stavěcími šrouby spojena s vlnovcovou spojkou.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem prezentované bakalářské práce bylo navrhnout upínací mechanismus pro kulové a soudečkové vzorky, který bude možno, jakožto modulární jednotku, umístit do prostoru experimentální aparatury v laboratořích Ústavu konstruování VUT v Brně. Tento cíl byl splněn i přes velmi omezený prostor pod jedním z kontaktních těles reprezentovaným skleněným diskem, jehož kontaktní strana je umístěna ve výšce 142 mm nad základní deskou, ke které je připevněna druhá část experimentálního zařízení. Dalším cílem byla možnost snadné výměny kontaktních těles popř. demontáž části sestavy kontaminované zkoumaným mazivem z důvodu vyčištění např. v ultrazvukové lázni. Protože vana, v níž je umístěno jak jedno z kontaktních těles, tak testované mazivo, je vyjímatelná, byl i tento cíl splněn. Dalším z cílů bylo umožnit, při navržené konstrukci upínacího mechanismu, temperování zkoumaného maziva na požadovanou teplotu. Použitím topné patrony, snímače teploty a předpokladu využití řídicího softwaru dodavatelské firmy byl splněn i tento cíl. Návrh uvažuje s temperováním zkoumaného maziva v rozsahu teplot 25 °C až 70°C. Dalším cílem bylo zajištění opakovatelnosti měření z pohledu nastavení počátečního silového působení při experimentech. Tohoto cíle je dosaženo použitím nůžkového mechanismu, kterým je zaručena možnost nastavit shodné hodnoty statického zatížení kontaktu při opakovaném měření. Navržený lineárního piezo-motor, jenž je řízen softwarově, slouží k zajištění buzení dynamické složky zatížení kontaktu. Posledním cílem byla možnost snímat předem definované fyzikální veličiny v průběhu experimentálního měření. Tohoto cíle je dosaženo použitím enkodéru, který zaznamenává změnu otáček ocelové kuličky popř. ocelového soudečku, a snímače zatížení, který je umístěn pod středem kuličky a který poskytuje informace o průběhu zatížení kontaktu.

Zařízení slouží ke sledování chování mazacího filmu v EDH mazaném kontaktu při neustálených podmínkách a umožňuje tak ve zjednodušených podmínkách simulovat chování těchto filmů v reálných tribologických uzlech. Nastavením parametrů pohonu těles je možno docílit čistého valení kontaktních těles nebo je možno nastavit libovolnou míru skluzu. Z důvodu výrobních nákladů jsou polohovací části aparatury ovládány ručně. Pohon pomocí motorů by výrazně zvýšil pořizovací cenu, hmotnost celého zařízení, zástavbový prostor a vynaložené prostředky by nebyly adekvátní vzhledem k tomu, jakou funkci by motorizované pohony plnily. Součástí práce je detailní výkresová dokumentace, která je základem pro vlastní výrobu upínacího mechanismu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KWEH, C. C., EVANS, H. P., SNIDLE, R. W. (1989): *Elastohydrodynamic Lubrication of Heavily Loaded Circular Contacts*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Engineering Science, 203, s. 133-148.
- [2] REN, N. – ZHU, D. – WEN, S.Z. Experimental method for quantitative analysis of transient EHL. *Tribology International*, 1991, vol. 24, no. 4, s. 225–230. ISSN: 0301-679X.
- [3] GLOVNEA, R.P., – SPIKES, H.A. The influence of cam-follower motion on elastohydrodynamic film thickness. In *Tribology Research: From model experiment to industrial problem, Proc. 27th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. DALMAZ, G. a kol. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001. s. 485–493. ISBN: 04-4450-581-4.
- [4] DALMAZ, G. – LUBRECHT, A.A. – DOWSON, D. – PRIEST, M. Transient processes in tribology. Elveiser B. V., 2004, s. 401 – 408. The University of Leeds and Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
- [5] KANETA, M. – OZAKI, S. – NISHIKAWA, H. – GUO, F. Effects of impact loads on point contact elastohydrodynamic lubrication films. *Journal of Engineering Tribology-Part J*, 2007, vol. 221, no. 3, s. 271–278. ISSN: 1350-6501.
- [6] Thorlabs, Inc. - *Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control* [online]. c1999 [cit. 2011-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.thorlabs.de/>>
- [7] Standa [online]. c2000 [cit. 2011-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.standa.lt/>>.
- [8] Murtfeldt - *Kvalita a vysoký výkon v plastech* [online]. c2011 [cit. 2011-05- 21]. Dostupné z WWW: <<http://www.murtfeldt.cz/>>.
- [9] Standa [online]. 2000 [cit. 2011-05-21]. Translation Stages - Translation & Rotation stages - Catalog - Opto-Mechanical Products - Standa. Dostupné z WWW:<http://www.standa.lt/products/catalog/translation_rotation?item=38[/]=translation_stages>.
- [10] Thorlabs, Inc. - *Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control* [online]. 1999 [cit. 2011-05-21]. Thorlabs.com - Lab Jack Series. Dostupné z WWW: <http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=1496>.
- [11] SKF Group - *Bearings and units Lubrication solutions Mechatronics Seals Services Condition Monitoring Linear Motion - SKF.com* [online]. c2005 [cit. 2011-05-21]. Dostupné z WWW: <http://www.skf.com/portal/skf_cz/home>.
- [12] HBM Test and Measurement: *Transducer, Load Cell, DAQ System* [online]. 1996 [cit. 2011-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.hbm.com/>>.
- [13] HBM Test and Measurement: *Transducer, Load Cell, DAQ System* [online]. 1996 [cit. 2011-05-21]. C9B - HBM Test and Measurement. Dostupné z WWW:<<http://www.hbm.com/en/menu/products/transducers-sensors/force/force-transducers-for-industrial-applications/single/categorie/force-transducers-industrial/product/c9b/backPID/force-transducers-and-force-sensors/>>.

- [14] *PI Leader in: Piezo Technology, Precision Nano-Positioning & Piezo Engineering, NanoAutomation, Piezo Stage, Hexapod, PZT, Piezo Actuator, Transducer: Sub-Nanometer Resolution, Metrology, Photonic Packaging Automation, Piezo Linear Motor, Steering Mirror, Translation Rotation Stage, MicroPositioning, Hexapods, Capacitance Sensor* [online]. c1996 [cit. 2011-05-21]. PI Datasheet | Details: P-840 · P-841 Preloaded Piezo Actuators Optional with Integrated Position Sensor ;PI: Ultra Precision Motion Control. Dostupné z WWW: <<http://www.physikinstrumente.com/en/products/prdetail.php?sortnr=101000>>.
- [15] *HotSet ČR s.r.o.* [online]. c2005 [cit. 2011-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.hotset.cz/index.htm>>.
- [16] *HotSet ČR s.r.o.* [online]. c2005 [cit. 2011-05-21]. HotSet ČR s.r.o. Dostupné z WWW: <<http://www.hotset.cz/produkty/vyhrevnepatrony.htm>>.
- [17] SVOBODA, Pavel; BRANDEJS, Jan; PROKEŠ, František. *Výběr z norem pro konstrukční cvičení. 2.* Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2007. 223 s. ISBN 978-80-7204-534-1.
- [18] SVOBODA, Pavel; BRANDEJS, Jan; PROKEŠ, František; DVOŘÁČEK, Jiří. *Základy konstruování.* Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2008. 234 s. ISBN 978-80-7204-584-6.

9 SEZNAM POŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN

9

F_1	N	statická složka síly v kontaktu
F_2	N	dynamická složka síly v kontaktu
Ra	nm	drsnost povrchu
X	mm	posuv ve směru osy x
Y	mm	posuv ve směru osy y

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

10.1 Seznam obrázků

Obr. 1-1 Experimentální zařízení podle Kwena, Evanse a Snidlera	14
Obr. 1-2 Experimentální aparatura podle Rena, Zhua a Wena	15
Obr. 1-3 Experimentální aparatura podle Glovnea a Spikese	17
Obr. 1-4 Experimentální zařízení podle Dalmaze, Lubrechta, Dowsna a Priesta	18
Obr. 1-5 Experimentální aparatura podle Kanety, Ozakiho, Nishikawy a Gua	19
Obr. 5-1 První varianta upínacího přípravku ocelové kuličky	25
Obr. 5-2 Druhá varianta upínacího přípravku ocelové kuličky	27
Obr. 5-3a Třetí varianta upínacího přípravku ocelové kuličky	28
Obr. 5-3b Třetí varianta upínacího přípravku ocelové kuličky – detailní zobrazení vany	29
Obr. 6-1 Model upínacího a polohovacího mechanismu	31
Obr. 6-2 Lineární posuv 7T175-100	32
Obr. 6-3 Nůžkový mechanismus L200 Mini Lab Jack	33
Obr. 6-4 Uložení kuličky	33
Obr. 6-5 Podpěra kuličky	34
Obr. 6-6 Uložení soudečku	35
Obr. 6-7 Snímač síly	36
Obr. 6-8 Lineární piezo-motor	36
Obr. 6-9 Topná patrona	37

11 SEZNAM PŘÍLOH

11

11.1 Přílohy

11.1

1. Datasheet ke snímači síly
2. Datasheet k lineárnímu piezo-motoru
3. Montážní postup topné patrony

11.2 Výkresová dokumentace

11.2

1-A7-00/00
K-A7-00/00
2-A7-01/00
K-A7-01/00
2-A7-02/00
K-A7-02/00
2-A7-01/01
3-A7-00/01
3-A7-00/07
4-A7-00/02
4-A7-00/03
4-A7-00/04
4-A7-00/05
4-A7-00/06
4-A7-00/08
4-A7-00/09
4-A7-00/10
4-A7-01/02
4-A7-01/03
4-A7-01/04
4-A7-01/05
4-A7-02/01
4-A7-02/02
4-A7-02/03