

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## PŘEHLED SOUČASNÝCH METOD A ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ KOEFICIENTU TŘENÍ V MAZANÉM KONTAKTU TŘECÍCH POVRCHŮ

OVERVIEW OF PRESENT METHODS AND DEVICES FOR FRICTION COEFFICIENT  
MEASURING IN LUBRICATED CONTACT OF RUBBING SURFACES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

VÍT NEŠPOR

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. DANIEL KOUTNÝ, Ph.D.

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2010/11

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vít Nešpor

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:

### **Přehled současných metod a zařízení pro měření součinitele tření v mazaném kontaktu třecích povrchů**

v anglickém jazyce:

### **Overview of present methods and devices for friction coefficient measuring in lubricated contact of rubbing surfaces.**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je podat přehled současného stavu poznání v oblasti měření součinitele tření v mazaném kontaktu a rozbor konstrukčního řešení těchto zařízení doplněný vymezením trendů budoucího vývoje.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat:

- 1.Úvod
- 2.Definici základních pojmů
- 3.Přehled a rozbor existující literatury v dané oblasti
- 4.Analýzu a zhodnocení získaných poznatků
- 5.Vymezení trendů budoucího vývoje
- 6.Souhrnnou bibliografii
- 7.Závěr

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva

Typ práce: rešeršní

Účel zadání: pro VV a tvůrčí činnost ÚK

Seznam odborné literatury:

Etsion, I., Laser Surface Texturing – Measure to Reduce Friction, In: Proceeding of the 14th International Colloquium on Tribology, Esslingen, 2004, s.329-333.

Akamatsu et al, Influence of surface roughness skewness on rolling contact fatigue life, Trib. Trans.,1992, 35, s. 745-750.

SUH, N.P., MOSLEH, M., HOWARD, P.S. Control of friction. Wear. 1994, vol. 175, no. 1-2, s. 151-158. ISSN 0043-1648.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 26.11.2010

L.S.



*M. Hartl*  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
Ředitel ústavu

*M. Doupovec*  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## **ABSTRAKT**

---

V této práci byla rozebrána problematika měření koeficientu tření. Byl definován pojem tření a okrajově popsány základní fyzikální metody určování koeficientu tření. Práce byla převážně zaměřena na moderní pokročilé metody měření koeficientu tření, realizované pomocí experimentálních přístrojů – tribometrů. Tyto přístroje a s nimi spojené pokročile metody byly detailněji popsány s důrazem na měření třecí síly a jejich výhody či omezení. Byla rozebrána problematika přesnosti metod.

Klíčová slova: tření, koeficient tření, tribometr, pin-on-disc, tenzometr, snímač síly

## **ABSTRACT**

---

In this thesis was discussed measuring of friction coefficient. Phenomenon of friction and basic physical methods of determining friction coefficient were described. This work was rather oriented to modern advanced methods, realised by experimental devices - tribometers. These devices with methods were described in focus to measuring of friction force. Their advantages or disadvantages were described too. In detail was discussed the accuracy of methods.

Keywords: friction, coefficient of friction, tribometer, pin-on-disc, strain transducer, force gauge

### **Bibliografická citace:**

NEŠPOR, V.: *Přehled současných metod a zařízení pro měření součinitele tření v mazaném kontaktu třecích povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Koutný Ph.D.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

---

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

V Brně dne 26. 5. 2011

.....  
Vít Nešpor



## **PODĚKOVÁNÍ**

---

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Danielu Koutnému, Ph.D. za odborné vedení a veškerou pomoc při tvorbě bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mě při psaní bakalářské práce podporovali a inspirovali.



**OBSAH**

<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ</b>	<b>14</b>
1.1 Tření	14
1.1.1 Síly působící při smykovém tření	14
1.1.2 Koeficient tření	15
1.2 Experimentální metody pro měření koeficientu tření	15
1.3 Základní fyzikální metody	17
1.3.1 Metoda hmotnostního poměru	17
1.3.2 Metoda pružinové váhy	18
1.3.3 Metoda nakloněné roviny	19
1.3.4 Metoda svěrného mechanismu	20
1.3.5 Metoda kyvadla	20
1.4 Pokročilé metody měření koeficientu tření	21
1.4.1 Důležité aspekty měření	21
1.4.2 Vlivy působící na přesnost měření pomocí moderních metod	23
1.4.3 Měření pomocí motorizovaných tribometrů	24
<b>2 PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY</b>	<b>28</b>
2.1 Experimentální přístroje - tribometry	28
2.2 Kvantifikace tribometrů	29
2.3 Tribometry pro suchý, nebo částečně mazaný kontakt	30
2.3.1 Four-ball tester	30
2.3.2 Falex tester	31
2.3.3 Timken test	33
2.3.4 Pin-on-slab	33
2.3.5 Pin-on-disc	34
2.3.6 Pin-on-ring, ring-on-ring (ring-to-ring)	35
2.3.7 Ring-on-disc	36
2.4 Tribometry pro extrémní podmínky	38
2.4.1 Vakuové tribometry	38
2.4.2 Vysokoteplotní tribometry	41
2.4.3 Nízkoteplotní tribometry	43
2.5 Konstrukční řešení tribometrů	46
2.5.1 Upínání zkušebních vzorků	46
<b>3 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ</b>	<b>49</b>
<b>4 VYMEZENÍ TRENDŮ BUDOUCÍHO VÝVOJE</b>	<b>50</b>
<b>5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>51</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>53</b>
<b>7 SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>54</b>



## ÚVOD

---

Tření a opotřebení jsou jedněmi z nejčastějších fyzikálních jevů, se kterými se neustále setkáváme v různých oborech lidské činnosti. Bez tření by nebylo možné prakticky žít na Zemi. Avšak většinou působí tření negativními vlivy. Člověk se snaží, zejména ve strojírenské konstrukční praxi, tření minimalizovat, protože vede k opotřebení strojní součásti. To se děje například vhodnou konstrukcí součásti, úpravou tvaru jejího povrchu (např. laser surface texturing [2]), volbou materiálu a samozřejmě výběrem vhodného maziva a způsobu mazání. Abychom byli schopni určit, jak vzájemně interagují součásti ze dvou různých či stejných materiálů, které proti sobě konají kluzný pohyb, je třeba tření charakterizovat. Významným parametrem je koeficient tření, neboli také součinitel tření. Jeho měření se provádí na základě experimentálních metod.

Hlavním cílem této bakalářské práce je podat souhrnný přehled o metodách a zařízeních, které jsou v současném tribologickém výzkumu využívány pro měření součinitele tření v třecím kontaktu dvou mazaných ploch. Práce pojednává o jejich současných aplikacích, historii dalším vývoji. Je zde provedeno základní rozdělení metod, jejich popis, princip, příprava vzorků a možné výsledky měření. Krátce jsou zmíněny základní fyzikální metody, jako je např. nejstarší metoda hmotnostního poměru atd. Ve strojírenské praxi jsou tyto metody v základním provedení aplikovány zřídka, ale na jejich principu pracují metody pokročilejší, jimž je věnována větší část této práce.

## 1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

### 1.1 Tření

Tření je fyzikální jev, který obecně vzniká při relativním pohybu tělesa vůči jinému tělesu v těsném kontaktu. Tento jev může vznikat, jak mezi pevnými tělesy, tak mezi tělesy plynnými a kapalnými [3]. Tato práce se bude zabývat třením mezi konformně a nekonformně zakřivenými povrchy pevných těles. Jak je zmíněno v úvodu, se třením se lze setkat téměř ve všech oborech lidské činnosti. V mnoha případech je tření pro člověka užitečné, avšak většinou, obzvláště ve strojírenství, chceme tření odstranit, respektive eliminovat jeho negativní účinky.

Jedním z těchto účinků je opotřebení, které je přímým důsledkem tření. Opotřebení lze charakterizovat jako proces, který zapříčiňuje úbytek materiálu ze spoluzabírajících povrchů. Základními formami jsou adhezní, abrazní, erozní, únavové a korozní opotřebení interagujících povrchů [1].

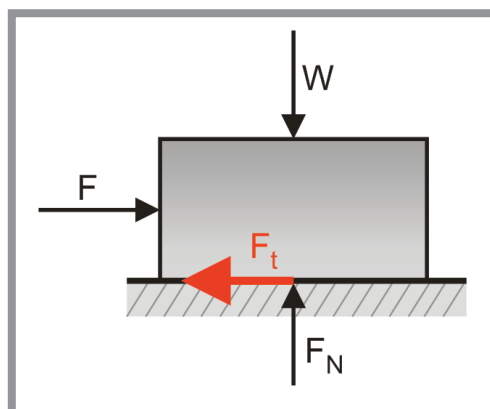
Tribologie je věda, která se zabývá mimo jiné zkoumáním jevu tření a odstraňováním jeho negativních důsledků. Tření a s ním spojené opotřebení můžeme minimalizovat mazáním, jež nám prostřednictvím maziva zabraňuje bezprostřednímu styku povrchů [1]. Mazání lze zefektivnit speciálními metodami, jako je např. cílená úprava tvaru povrchů interagujících těles - laser surface texturing [2]. Touto metodou je možno efektivně snížit koeficient tření [2].

#### 1.1.1 Síly působící při smykovém tření

Na těleso na Obr. 1 obecně při jeho pohybu po podložce působí tyto síly:

- $F$  (N)            - akční síla, která uvádí těleso do pohybu
- $F_n$  (N)        - síla normálová, která se v tomto případě rovná síle tíhové  $W$
- $F_t$  (N)        - třecí síla

Nejdůležitější z těchto sil je třecí síla  $F_t$ . Ta je přímo úměrná normálové síle  $F_n$



Obr. 1 Síly působící při tření

a je opačně orientována proti síle akční  $F$ . Vzájemnou závislost mezi těmito silami popisuje vztah (1):

$$F_t = \mu F_n \text{ (N)} \quad (1)$$

konstanta  $\mu$  se nazývá koeficient tření (nebo také součinitel tření).

Třecí síla za suchého tření se řídí těmito zákony [1]:

- třecí síla je přímo úměrná normálovému zatížení
- třecí síla nezávisí na velikosti stykové plochy těles
- třecí síla nezávisí na kluzné rychlosti

### 1.1.2 Koeficient tření

---

1.1.2

Koeficient tření je důležitá veličina, která číselně charakterizuje odpor povrchů dvojice těles z různých materiálů při tření. Jedná se o bezrozměrnou skalární veličinu. Tato se dále dělí na statický koeficient tření a dynamický koeficient tření. Označuje písmenem  $f$  nebo častěji řeckým písmenem  $\mu$ . Statický respektive dynamický koeficient tření se značí  $\mu_s$  resp.  $\mu_d$ . Statický koeficient tření je obvykle větší a vyjadřuje odpor, který těleso klade při působení akční síly těsně před uvedením tělesa do pohybu. Dynamický dosahuje zpravidla menších hodnot a získává se z působení sil na těleso během jeho pohybu. Jeho velikost je na rozdíl od třecí síly, závislá na rychlosti, kontaktním tlaku, teplotě a drsnosti třecích povrchů. [1, 3, 4, 5]

Pro každou dvojici materiálů je koeficient tření jiný, hodnoty se pohybují z velké části  $\mu < 1$ . V některých případech je koeficient vyšší než jedna (např. hliník na hliník je  $\mu = 1,05$  [1]). Všechny tyto hodnoty jsou uváděny ve stavu povrchů při suchém tření. Při použití vhodného maziva jsou oba koeficienty tření zcela jistě menší, to záleží na druhu maziva, prostředí, působící teplotě a dalších vlivech. Hodnoty tohoto koeficientu se zjišťují experimentálně pomocí specifických metod a zařízení, které jsou uvedeny dále v textu. Koeficient tření lze získat výpočtem ze vztahu (1), ovšem za podmínky, že jsou nám známy velikosti sil  $F_t$  a  $F_n$  [3]:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (2)$$

Získané poznatky, budou využity v následujícím popisu metod, kterými se zjišťují hodnoty koeficientu tření. Na principu znalosti třecí a normálové síly je založena většina zde popsaných metod.

## 1.2 Experimentální metody pro měření koeficientu tření

---

1.2

Základní úlohou experimentálních metod je simulace třecího kontaktu. Měření se provádějí v přesně stanovených laboratorních podmínkách, aby vliv okolí na experiment byl co nejmenší. Protože v reálných aplikacích se vyskytuje velké

množství kombinací třecích kontaktů mezi nejrůznějšími materiály a tvary povrchů, provozovaných za různých podmínek, je třeba v laboratořích simulovat co nejvíce těchto případů. Bude uvedeno rozdělení metod do základních skupin, které budou určovat jejich další dělení a aplikace [7].

Podle způsobu, s jakým můžeme obdržet výsledky měření, lze experimentální metody rozdělit na:

- základní fyzikální metody,
- pokročilé moderní metody.

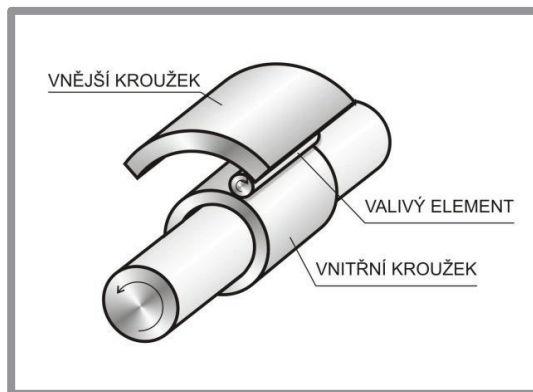
Dále můžeme rozlišit metody dle druhu styku třecích ploch na:

- metody měření při styku konformních povrchů (Obr. 2),

Charakteristickým rysem tohoto typu kontaktu je shodný tvar povrchů, jež do sebe zapadají s velkou přesností. Zatížení, která jsou poměrně malá, jsou přenášena po relativně velké ploše a nezpůsobují podstatné zvětšení kontaktní plochy. Typickým příkladem tohoto druhu styku jsou kluzná ložiska [1].



Obr. 2 Konformní povrchy



Obr. 3 Nekonformní povrchy

- metody měření při styku nekonformních povrchů (Obr. 3),

Styk nekonformních povrchů je charakterizován velmi malou kontaktní plochou, která je až o tři řády menší než v případě konformních povrchů. Zatížení bývají poměrně velká a se zvětšujícím zatížením roste i kontaktní plocha. Příkladem mohou být např. valivá ložiska a ozubená kola [1].

Podle vlastností okolí, ve kterém bude měření prováděno:

- za vysokých resp. nízkých teplot,
- ve vakuu,
- za působení korozivního prostředí.

Všechny experimenty bývají prováděny buď za sucha, nebo za přítomnosti maziva ve zkušebním uzlu.

### 1.3 Základní fyzikální metody

Pomocí základních metod probíhá měření třecí síly a následné určení koeficientu tření v čerstvém kontaktu třecích povrchů v určitém okamžiku, tudíž ve své základní podobě neumožňují měřit dané veličiny v závislosti na čase. Vypovídající hodnota experimentu prováděného pomocí základních metod závisí na mnoha aspektech. Je třeba uvažovat, za jakým účelem bude experiment prováděn a pro jakou tribologickou aplikaci budou výsledky měření směrodatné. Podle těchto aspektů se určí, jak přesné by měly být výsledky měření. Na základě informací o přesnosti vybereme vhodnou základní metodu a konstrukci experimentálního zařízení.

Tyto metody nacházejí využití v tribologických aplikacích, kde vykazují problémy elektronické snímače, protože princip metod umožňuje práci bez snímačů. Avšak v současné době se často u moderních přístrojů, pracujících čistě na principu základních fyzikálních metod, elektronických snímačů využívá. Rozsah využití je však omezený. Snímače měří pouze určité veličiny (např. u metody nakloněné roviny je to elektronické snímání úhlu naklonění) a ne přímo třecí sílu. Z naměřených veličin je pak vypočítána třecí síla a z ní koeficient tření [7].

#### 1.3.1 Metoda hmotnostního poměru

Tuto metodu lze označit jako jeden z nejstarších způsobů, kterým je možno zjišťovat hodnotu koeficientu tření. První zmínky a náčrtky metody lze nalézt ve spisech Leonarda da Vinciho z poloviny 16. století. Již v této době se da Vinci zabýval problémem tření, avšak jeho závěry nebyly renesančními matematiky adekvátně zhodnoceny a zpracovány [6].

Základním principem metody hmotnostního poměru je zjišťování třecí síly pomocí tzv. „mrtvé váhy“ závaží. Celé zařízení se sestává ze tří hlavních součástí, jimiž jsou zkušební těleso (blok), závaží a kladka, viz Obr. 4. Závaží a těleso jsou spojeny lanem procházejícím přes kladku. Hmotnost závaží vyvolává tíhovou sílu mířící ve vertikálním směru dolů. Tato síla, přenášejí se přes lano a kladku na těleso, uvádí blok do pohybu v horizontálním směru. Tedy tíhová síla je rovna síle třecí. Z této skutečnosti lze jednoduše dle vztahu (2) odvodit velikost koeficientu tření mezi zkušebním tělesem a třecím povrchem, po kterém se těleso pohybuje.

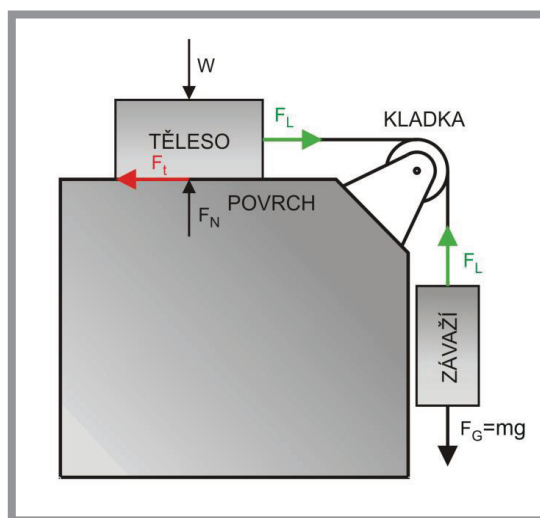
$$F_t = F_G = m_{závaží}g, F_n = W = m_{bloku}g \quad (3)$$

$$\mu = \frac{m_{závaží}g}{m_{bloku}g} \quad (4)$$

$$\mu = \frac{m_{závaží}}{m_{bloku}} \quad (5)$$

Pomocí tohoto aparátu lze zjišťovat pouze statický koeficient tření. Závaží má proměnnou hmotnost, kterou měříme, a je pro určení koeficientu tření směrodatná. Na laně je zavěšena plošina nebo nádoba o zanedbatelné hmotnosti. Na ni jsou postupně kladena závaží o stanovené hmotnosti. Tento proces se provádí do

okamžiku, než se začne zkušební těleso pohybovat. Takto lze jednoduše změřit velikost třecí síly a z ní statický koeficient tření.

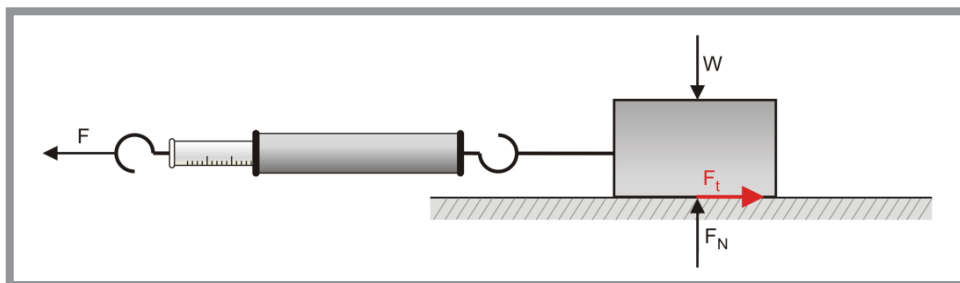


Obr. 4 Metoda hmotnostního poměru

Uvedená metoda přes svou jednoduchost patří mezi relativně nejméně přesné, protože se při tomto způsobu měření neuvažují účinky tření v čepu kladky a tření mezi lanem a kladkou. [4, 5, 6, 7, 8, 23].

### 1.3.2 Metoda pružinové váhy

Základní myšlenka metody spočívá v použití tzv. pružinové váhy neboli siloměru. Je to jednoduché laboratorní měřidlo pracující na principu pružiny umístěné v jeho pevném konci. Na pružině je upevněn válec se stupnicí ocejchovanou v Newtonech. Siloměr je pevným koncem pomocí háku spojen se zkušebním tělesem. Na druhém konci, který je pohyblivý, se vyvolá tahové zatížení. Tím dojde k natažení pružiny a vysunutí válce se stupnicí, což nám umožní okamžité odečtení akční síly, kterou uvádíme zkušební těleso do pohybu. Tato síla je rovna síle třecí, normálovou sílu jednoduše zjistíme z hmotnosti zkušebního tělesa.



Obr. 5 Metoda pružinové váhy

Pomocí této metody se zjišťuje jak statický, tak dynamický koeficient tření. Pružina je dostatečně natahována od nulového prodloužení, až po prodloužení, které předchází uvedení tělesa do pohybu. Maximální síla, použitá k prodloužení je

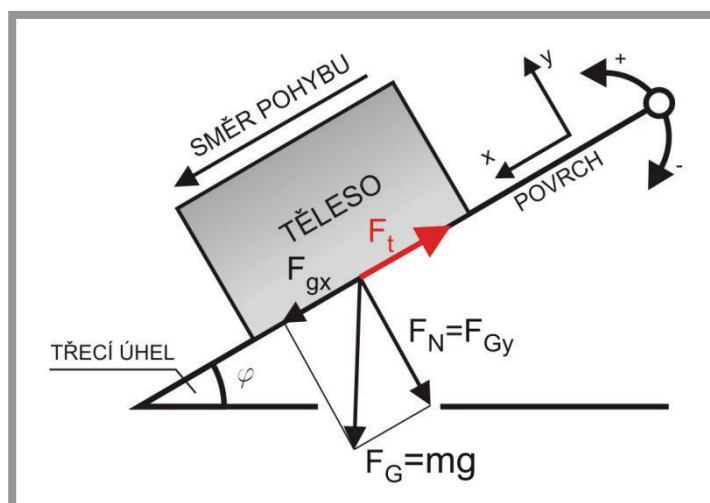
směrodatná pro určení statického koeficientu tření. Při pohybu tělesa je již tato síla menší a je směrodatná pro dynamický koeficient tření.

Oproti předchozí metodě, nabízí tato metoda relativně přijatelnější výsledky, jejichž přesnost se však odvíjí od použité pružinové váhy a přesnosti odečítání hodnot ze stupnice. Dalším aspektem ovlivňujícím přesnost měření je nutnost udržet při tažení siloměr v poloze rovnoběžné s rovinou tření [5].

### 1.3.3 Metoda nakloněné roviny

1.3.3

Princip této metody spočívá v kluzném pohybu zkušební tělesa po nakloněné rovině ve směru x-ové složky tíhové síly, za účelem zjištění třecí síly. Konstrukce tohoto aparátu umožňuje naklání roviny. Zkušební těleso se uvádí do pohybu za pomoci postupného zvětšování úhlu naklonění. Rovina se naklání tak dlouho, dokud nedojde samovolnému pohybu tělesa vlivem tíhové síly. Úhel naklonění  $\varphi$  se nazývá třecí úhel. Z jeho hodnoty se pak výpočtem ze známé tíhové síly získá x-ová složka tíhové síly. Ta je rovna síle třecí. Normálová síla pak odpovídá y-ové složce tíhové síly [5].

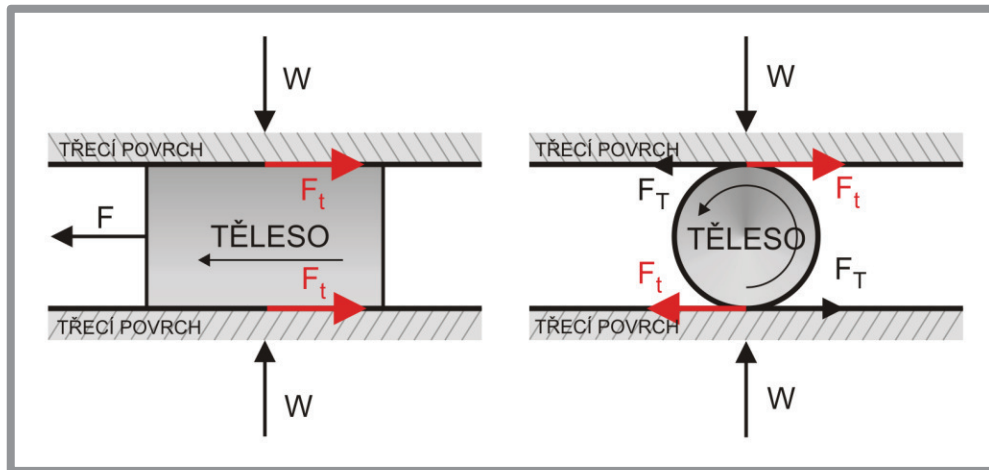


Obr. 6 Metoda nakloněné roviny

Ačkoli se jedná o jednoduchou metodu, která nezaručuje zcela spolehlivé výsledky, našlo se využití této metody i v současném tribologickém výzkumu. Stachowiak a kol. ve svém díle *Experimental methods in tribology* uvádí dva zajímavé případy využití. Metoda nakloněné roviny byla aplikována na první demonstraci měření vysokých koeficientů tření v interakci dvou čistých kovových povrchů ve vakuu. Výhoda metody nakloněné roviny při této aplikaci spočívala v absenci elektronického aparátu, jakým je například soustava elektronických snímačů třecích sil ve vakuové komoře. Dalším příkladem nedávného využití této metody v biotribologii, bylo měření koeficientu tření mezi podložkou a povrchem zvířecích chodidel. Experiment spočíval v základním určení maximální hodnoty koeficientu tření před sklouznutím zvířete z podložky [7].

### 1.3.4 Metoda svěrného mechanismu

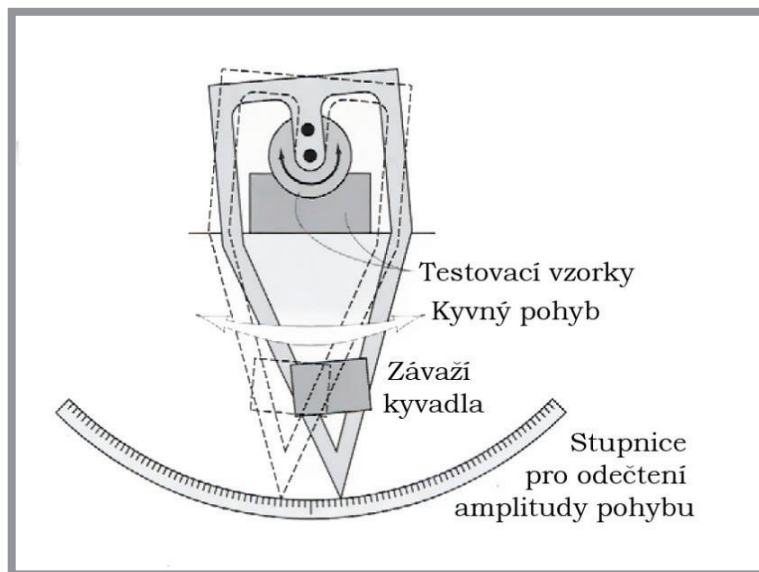
Tento způsob měření využívá především k určení statického koeficientu tření za podmínek vysokého kontaktního tlaku. Zkušební těleso je sevřeno mezi dvěma rovnoběžnými deskami, na které působí vnější zatížení. Měří se zde síla  $F$ , potřebná k uvedení tělesa do pohybu. Pro získání velikosti třecí síly je nutno sílu  $F$  podělit dvěma, protože jsou zde v interakci dva třecí povrchy [5].



Obr. 7 Metoda svěrného mechanismu

### 1.3.5 Metoda kyvadla

Pomocí této metody je možno měřit velmi malé koeficienty tření v kontaktu konformně zakřivených třecích povrchů, z nichž je jeden povrch statický a druhý koná rotační vratný pohyb, způsobený oscilací kyvadla. Měření se provede uvedením kyvadla do pohybu a následným změřením času, za který se kyvadlo zastaví. Známé hmotnost závaží a na stupnici odečítáme výchylku kyvadla. Z vyhodnocení těchto parametrů se určí koeficient tření. Tento způsob nachází využití při měření koeficientu tření mezi hřídelí a pouzdem radiálních ložisek [7]. Uvedenou situaci ilustruje Obr. 8. S výhodou se metoda používá tam, kde není možno použít elektronické snímače sil a napětí. Avšak existují různé variace této metody, kdy se naopak snímačů využívá k monitorování krouticího momentu na ložisku a k vizualizaci útlumu amplitudy kyvného pohybu v čase [5].



Obr. 8 Metoda kyvadla upraveno z [7]

## 1.4 Pokročilé metody měření koeficientu tření

1.4

V následujícím textu budou uvedeny rozdíly mezi základními a pokročilými moderními metodami. Jako hlavní rozdíl lze uvést fakt, že u základních metod je pohyb vzorku vyvoláván jeho vlastní tíhovou silou nebo tíhovou silou závaží. Naproti tomu u pokročilých metod je pohyb vzorku vyvolán motoricky. Dále tyto metody umožňují monitorovat a zaznamenávat dané veličiny v závislosti na čase nebo jiné veličině např. frekvenci pohybu vzorku [5, 7, 23].

Moderní metody vycházejí z metod základních, respektive všechna současná tribologická zařízení pro měření koeficientu tření či míry opotřebení ve své podstatě fungují na principech základních fyzikálních metod. Hlavním přínosem moderních metod je zapojení elektronických snímačů sil a napětí - tenzometrů do procesu měření třecí síly (případně normálové síly nebo jiných veličin zjišťovaných daným experimentem), což umožňuje využití počítačů pro vyhodnocování dat, získaných z těchto snímačů a tím dosáhnout hodnotnějších výsledků měření [7].

### 1.4.1 Důležité aspekty měření

1.4.1

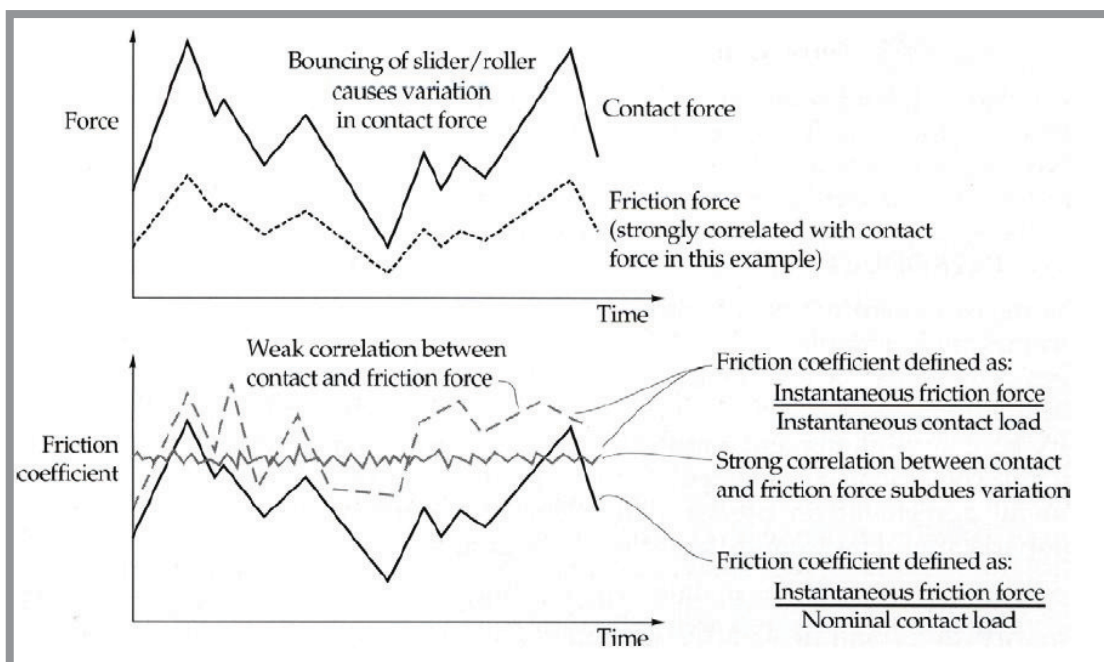
Filosofie téměř všech pokročilých metod je stejná. Spočívá v určení koeficientu tření ze změřené třecí síly a známého jmenovitého (normálového) zatížení. Určování však komplikují dvě následující skutečnosti [7]:

- třecí síla se mění průběžně v čase, hodnota koeficientu tření je tedy aproximována tak, aby se blížila skutečnému stavu
- následný výpočet třecího koeficientu dle vztahu (1) je založen na jmenovitém kontaktním zatížení

Často je jmenovité kontaktní zatížení vyvoláváno tíhovou silou závaží, což ve výsledku způsobí vznik tlakového kontaktního napětí mezi třecími povrchy. Je nutné, aby závaží bylo upevněno na experimentálním zařízení volně, což umožní pomocí snímače sledovat průběžně změny jmenovitého kontaktního zatížení v zatížení, které

jsou způsobeny vlivem drsnosti třecích ploch. Třecí síla je ovlivňována drsností povrchu třecích ploch [7]. Jinými slovy, čím jsou povrchy drsnější, tím dochází k výraznějším změnám ve jmenovitém zatížení (resp. v třecí síle). Sledování časové závislosti třecí síly a jmenovitého zatížení je velmi důležité pro přesnost výpočtu, protože jak uvádí [5], třecí síla a s ní i koeficient tření se při kluzném pohybu během první půl hodiny výrazně mění. Je třeba rozlišit pojmy jmenovité zatížení, okamžité jmenovité zatížení a okamžitá třecí síla. Jmenovité zatížení (normálová síla) je tíhová síla závaží nebo síla vyvozená jiným způsobem (např. pružinou nebo hydraulicky), která je přenášena přes zatěžující tělísko kolmo na pohybující se vzorek. Pokud se jmenovité zatížení mění v čase a je známa jeho hodnota v časovém okamžiku, jedná se o okamžité jmenovité zatížení. Analogicky to platí i pro třecí sílu [7].

Pro výpočet je důležitější okamžitá hodnota třecí síly, protože koeficient tření se časově mění ve vztahu s touto silou. Jeho výsledná hodnota je vypočítána jako průměr ze všech hodnot v jednotlivých časových okamžicích. Pokud je časově proměnná i normálová síla a vztah mezi ní a třecí silou není znám, pak se rozsah naměřených hodnot pro výpočet zúží pouze na hodnoty třecí a normálové síly, které korelují. Na Obr. 9 je znázorněn průběh těchto sil v čase, kde je patrná shoda peaků normálové a třecí síly. Tímto způsobem je možno zpřesnit výsledky měření [7].



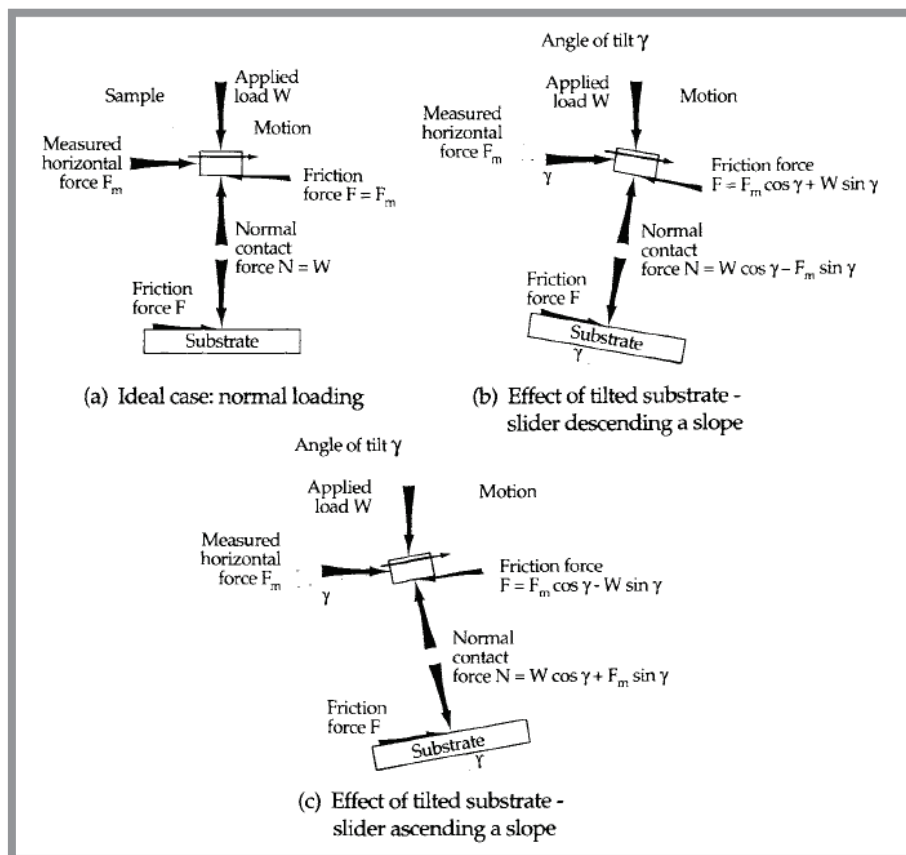
Obr. 9 Závislost síly a třecího koeficientu v čase [7]

Při měření se uvažují dva koncepty, podle kterých lze koeficient tření vypočítat. Prvním z nich je poměr okamžité třecí síly a jmenovitého zatížení, jež nám umožňuje zjistit rychlost disipace energie v přímé závislosti na koeficientu tření. Toto je velmi užitečné pro predikci průměrného růstu teploty v třecím kontaktu. Druhý koncept tvoří poměr okamžité třecí síly ku okamžitému jmenovitému zatížení. Tato varianta výpočtu umožňuje podrobněji sledovat efekt mikroskopických procesů v třecím kontaktu odděleně od vlivu makroskopických procesů, jako jsou např. mechanické vibrace způsobené konstrukcí zařízení. [7, 23].

### 1.4.2 Vlivy působící na přesnost měření pomocí moderních metod

Přesnost měření velmi malých koeficientů tření značně ovlivňuje nežádoucí naklonění vzorku vůči zatěžovacímu tělísku, které je způsobeno např. nepřesnou konstrukcí experimentálního zařízení. Již malé naklonění kolem  $\pm 1^\circ$  způsobí nezanedbatelné chyby v měření [7, 32]. Daný problém bude konkretizován na metodě pin-on-disc, jejíž přesný popis bude uveden dále v textu, avšak pro lepší porozumění bude krátce popsán její princip již nyní.

Jádrem experimentálního zařízení pin-on-disc je zatěžovací tělísko – pin (váleček), který je tlačěn normálovou silou svou plochou částí na plochou část vzorku (disku), jenž koná jednosměrný rotační pohyb. Takto je realizován plošný třecí kontakt a měřené veličiny (tečná popř. normálová síla) se zaznamenávají pomocí snímačů. Pokud se touto metodou měří koeficienty tření řádově 0,01, nelze s jistotou říct, že naměřený koeficient tření odpovídá skutečnému koeficientu tření. U této metody je třecí koeficient  $\mu$  definován jako podíl měřené tečné síly  $F_m$  ku kontaktní síle normálové  $N$ . Nežádoucí vychýlení vzorku o úhel  $\gamma$  od kolmé polohy vůči tělísku má za následek, že měřená třecí síla bude také o tento úhel odkloněna od síly tečné. Jestliže dojde takovéto situaci, je třeba počítat s malým přírůstkem zatížení  $W \sin \gamma$ . Při uvažování tohoto se obdrží tzv. naměřený koeficient tření  $\mu_m$  [7]. Uvedenou situaci znázorňuje Obr. 10.



Obr. 10 Vliv naklonění vzorku vůči zatěžovacímu tělísku [7]

Pro zpřesnění koeficientu tření získaného z naměřených hodnot tečné a normálové síly je třeba tento malý přírůstek zapojit do výpočtu. Nyní budou uvedeny zpřesňující výpočty koeficientu tření zahrnující negativní vliv naklonění.

- pro kladný úhel naklonění [7],

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{F_m \cos \gamma + W \sin \gamma}{W \cos \gamma - F_m \sin \gamma} = \frac{\frac{F_m}{W} + \tan \gamma}{1 - \frac{F_m}{W} \tan \gamma} = \frac{\mu_m + \tan \gamma}{1 - \mu_m \tan \gamma} \quad (6)$$

$$\mu_m = \frac{\mu - \tan \gamma}{\mu \tan \gamma + 1} \quad (7)$$

- pro záporný úhel naklonění (analogicky) [7],

$$\mu_m = \frac{\mu + \tan \gamma}{1 - \mu \tan \gamma} \quad (8)$$

- pro velmi malý úhel naklonění ( $\gamma$  je v radiánech) [7],

$$\mu_m = \mu + \gamma \quad (9)$$

Poslední výpočet lze použít pouze v případě, kdy  $\gamma \ll \mu$ . Pro příklad lze uvést  $1^\circ$  naklonění odpovídá úhlu  $\gamma = 0,017$  rad. Při měření velmi nízkých koeficientů tření stačí vychýlení o  $0,1^\circ$ , což způsobí 10% přesnost koeficientu tření 0,017 [7].

Jestliže se jedná o experimentální zařízení, kde vzorek koná vratný pohyb, je chyba vlivem nežádoucího naklonění mnohem menší, limitně se blížíci nule, protože při vratném pohybu se efekt naklonění vyruší. Znamená to, že se průměrná hodnota třecí síly získá až po vykonání celého cyklu vratného pohybu. Takto získaná hodnota se blíží hodnotě skutečné. Před provedením testu je třeba klást důraz na to, aby byl vzorek a zatěžovací tělísko ustaveny vůči sobě co nejvíce kolmo, tím pak vzrůstá povídající hodnota testu [7].

### 1.4.3 Měření pomocí motorizovaných tribometrů

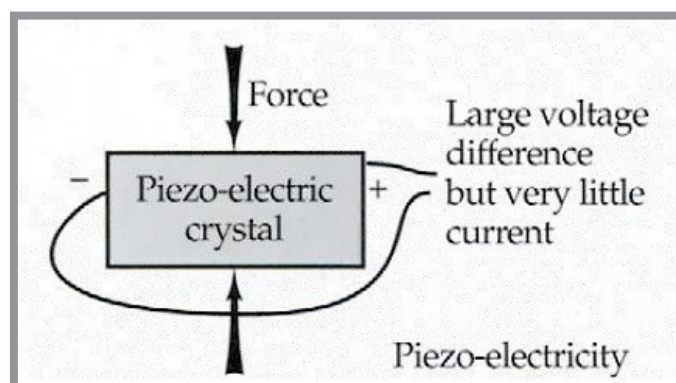
Experimentální přístroje, zvané tribometry, pracující na principu pokročilých metod jsou moderní zařízení, která při měření daných veličin plně využívají elektronických snímačů sil, což umožňuje využití počítačů pro vyhodnocování výsledků měření. Pohyb vzorku se děje motoricky, respektive točivý či vratný pohyb je vyvoláván externě uloženým motorem s převodem. Bližší definice tribometru je uvedena v kapitole 2. Následující text se podrobněji zabývá právě využitím snímačů v těchto přístrojích a obecně jejich konfigurací, která je společná pro všechny druhy tribometrů.

Elektronické snímače sil a deformací tvoří základní měřící prvek, s jehož pomocí měříme třecí sílu (popř. jiné veličiny). Tribometry jsou osazeny několika druhy snímačů a čidel, jako jsou např. výše zmíněné snímače sil, teplotní čidla a jiné.

O tom jaké snímače budou použity, rozhoduje účel, za jakým je daný test veden. Nadále budou rozebrány pouze snímače sil, napětí a deformace, protože jsou klíčové pro zjišťování koeficientu tření. Převážně se používají se dva typy těchto snímačů [7]:

- piezoelektrické snímače síly,
- snímače napětí (tenzometry).

Piezoelektrické snímače síly umožňují přímo sledovat třecí sílu jako elektrický impuls, který se pak zaznamenává v elektronické podobě. Schéma takového snímače znázorňuje Obr. 11. Dříve tyto snímače pracovaly na principu křemíkového krystalu, který se vyznačuje svou specifickou vlastností. Pokud na snímač působí tahové nebo tlakové zatížení, křemíkový krystal emituje na vývodech snímače elektrické napětí. V současné době je však křemíkový krystal nahrazován feroelektrickou keramikou, nebo slitinami zirkonu a titanu. Tyto materiály poskytují silnější výstupní elektrický signál vystupující. Snímače pracující na tomto principu mohou snímat změny v třecí síle o vysoké frekvenci až do 25 kHz [7]. V určitých situacích však vykazují jistá omezení. Snímaná frekvence musí být taková, aby nedošlo k vlastní oscilaci krystalu nebo snímaného objektu. Vše se odvíjí od užitého materiálu jádra snímače a snímaného materiálu. Toto limituje použitelnost piezoelektrického snímače. Jako příklad lze uvést typickou rychlost pohybu vzorku při testu  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , při ní frekvence 25 kHz koresponduje s výchylkou  $40 \text{ }\mu\text{m}$ . Během testu dochází k výchylkám přípravku, v němž je snímač umístěn. Výchylky jsou způsobeny deformací mikro výstupků třecích povrchů a porušováním mikrosvarů mezi těmito výstupky. Respektive snímač detekuje výchylky způsobené jednotlivými kontakty výstupků při nízké třecí rychlosti. Snímač má také omezení na nízkých frekvencích, což znemožňuje měření stabilní třecí síly, tedy síly, která se v čase mění nepatrně nebo vůbec [7].

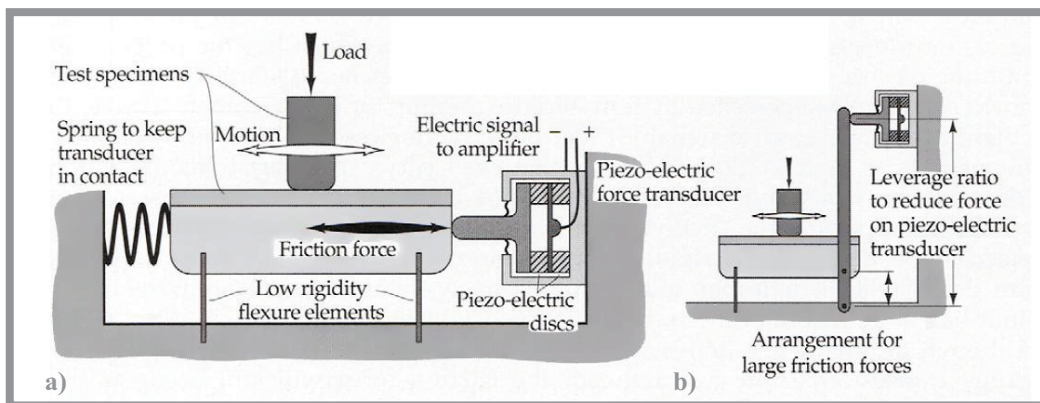


Obr. 11 Schéma piezoelektrického snímače [7]

Je velmi důležité, aby snímač byl na zařízení upevněn správným způsobem, protože umístění a upevnění snímače má značný vliv na přesnost a efektivitu měření. Pokud je upevnění snímače příliš měkké nebo naopak tuhé, mohou v tomto důsledku vzniklé vibrace negativně ovlivnit naměřená data [7].

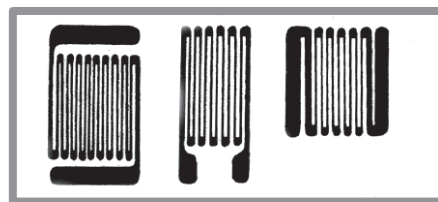
Pokud je třecí síla dostatečně malá, lze snímač připevnit tak, aby byl přímo v kontaktu se vzorkem (Obr. 12a). Zde poskytují vertikální zatížení dvě pružné podpory, čímž se neprojevuje vliv tření v uložení těchto podpor. Při větších třecích

silách je třeba, aby na zařízení bylo instalováno výkyvné rameno (Obr. 12b), s nímž bude snímač v kontaktu. V tomto případě se musí minimalizovat tření v uchycení ramena, aby nedocházelo k systematickým chybám měření. Dané situace ilustruje Obr. 12. Mezi nevýhody tohoto typu snímačů patří např. vyšší cena, náchylnost k teplotním změnám, vibracím a korozi. I přes jejich dobrou schopnost zaznamenávat sílu, je v některých případech nelze použít, proto jsou nahrazovány jiným typem snímače, například tenzometrem [7].



Obr. 12 Různé konfigurace umístění piezoelektrického snímače [7]

Tenzometry jsou oproti piezoelektrickým snímačům poměrně levnější a mohou snímat téměř libovolné zatížení. Tento typ snímače bývá upevněn na elastickém rameni směrem kolmým ke směru třecí síly (Obr. 14) [7]. Pro daná měření se převážně používají tenzometry pracující na odporovém principu. Mají tvar drátků nebo fólií, kterými protéká elektrický proud. Pokud působí na tenzometr vnější zatížení, dochází ke změně odporu. Tuto změnu lze zaznamenat a dle parametrů tenzometru přepočítat na sílu. Schéma je znázorněno na Obr. 13 [22].

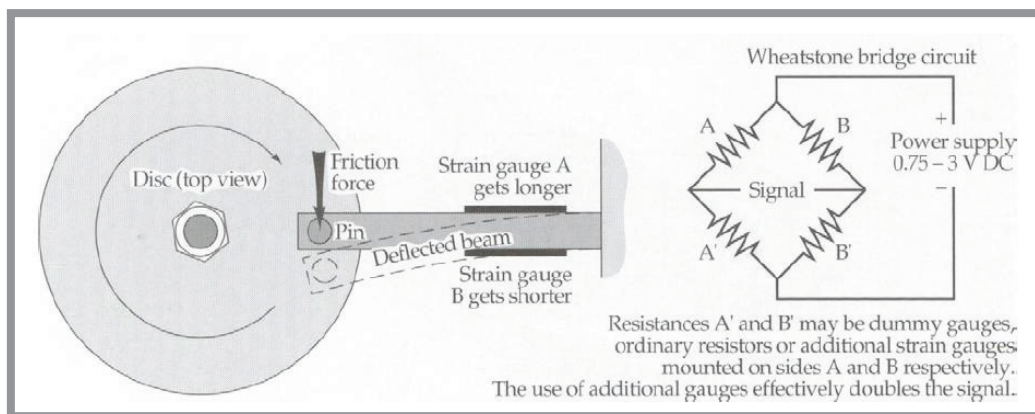


Obr. 13 Schéma tenzometru [22]

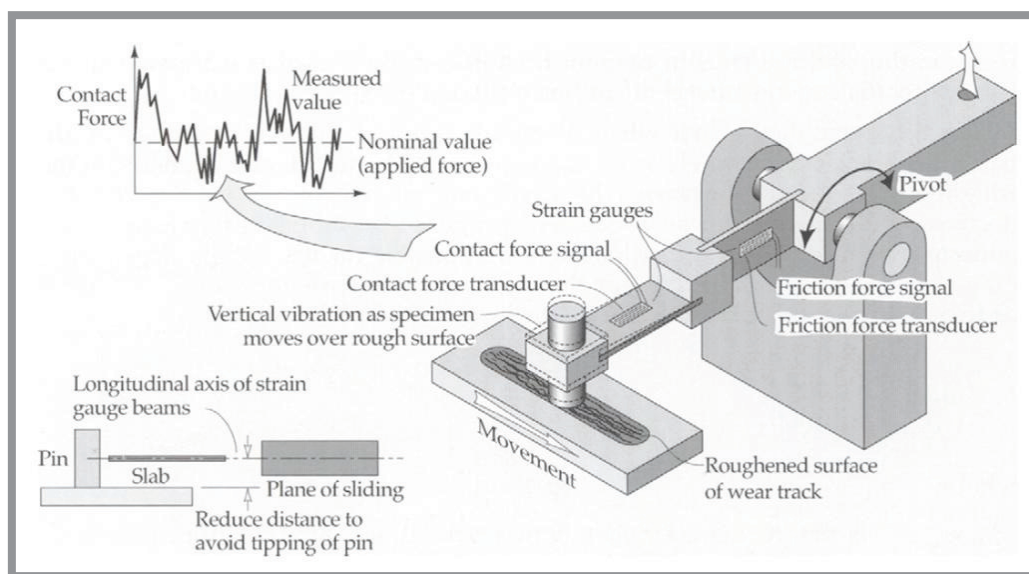
Ve většině případů tento druh snímače poskytuje přesné výsledky. Mezi jeho výhody patří např. efektivní snímání třecí síly v případech, kdy nejsou použitelné piezoelektrické snímače. Tenzometry mají však také svá omezení. Mohou snímat sílu pouze při nižších frekvencích změny třecí síly. Nelze je tedy použít u zařízení s vratným pohybem o vysoké frekvenci (viz zařízení Bowden-Leben - odstavec 2.3.4), nebo obecně v takových aplikacích, kde dochází k rapidní změně třecí síly. Pro hodnotné výsledky měření je třeba volit jak materiál elastického ramene o vhodné tuhosti, tak parametry tenzometru. Čím je rameno tužší, tím je nižší citlivost snímače vůči malým třecím silám [7, 23].

Jak bylo zmíněno výše, snímače neslouží jen pro měření třecí síly, ale také pro měření okamžitého jmenovitého zatížení (normálové síly). V tomto případě je

vhodná aplikace dvou snímačů. Lze použít dvojici piezoelektrických snímačů nebo tenzometrů. O tom, jaký druh snímačů bude použit, rozhoduje rychlost změny třecí popř. normálové síly. Podle těchto kritérií se též zvolí konstrukce experimentálního zařízení tak, aby umožňovala vhodné umístění těchto snímačů. Ideální konfiguraci tenzometrů na zařízení názorně popisuje Obr. 15 [7].



Obr. 14 Základní konfigurace tenzometru u metody „PIN-ON-DISC“ [7]



Obr. 15 Ideální umístění tenzometrů u tribometru , kde vzorek koná vratný pohyb [7]

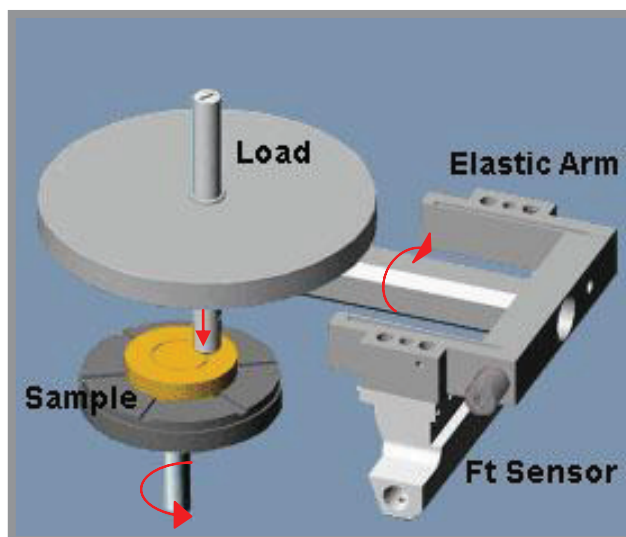
## 2 PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY

### 2.1 Experimentální přístroje - tribometry

Tribometr lze obecně definovat jako laboratorní zařízení, které umožňuje provádět různá tribologická měření. Zejména tedy měření koeficientu tření, míry opotřebení, či tloušťky mazacího filmu a dalších. Podle druhu měření se tribometry liší svou konstrukcí a využitím v různých odvětvích tribologie. Organizace Society of tribologists and lubrication engineers (STLE) uvádí na 243 různých druhů konstrukcí tribometrů [7].

Nadále budou rozebrány převážně tribometry, určené pro zjišťování koeficientu tření v třecím kontaktu dvou povrchů. Tato zařízení patří mezi základní technologie měření, které se používají v současném tribologickém výzkumu. Jejich hlavním úkolem je simulace tření a opotřebení za sledovaných podmínek. Jevy tření a opotřebení jsou náchylné na vnější vlivy, jako jsou změny teploty, zatížení, nebo vlhkost. Proto konstrukce tribometru musí tyto vlivy brát v úvahu a umožňovat jejich kontrolu a monitorování [7, 18].

Hlavními prvky tribometru jsou zatěžovací tělísko a vzorek, z nichž vzorek koná rotační nebo reciproční pohyb a zatěžovací tělísko je statické (výjimkou však není ani současný pohyb tělíska a vzorku). Tyto prvky společně realizují třecí kontakt. Důležitou součástí tribometru je také příslušenství, které umožňuje pohyb vzorku, jeho zatěžování, či dodávku maziva do třecího kontaktu. Moderní tribometry jsou dále vybaveny měřicím aparátem v podobě nejrůznějších senzorů a čidel, které umožňují monitorování a kontrolu podmínek měření [7, 8, 18, 23].



Obr. 16 Schematické znázornění principu tribometru „PIN ON DISC“ [10]

## 2.2 Kvantifikace tribometrů

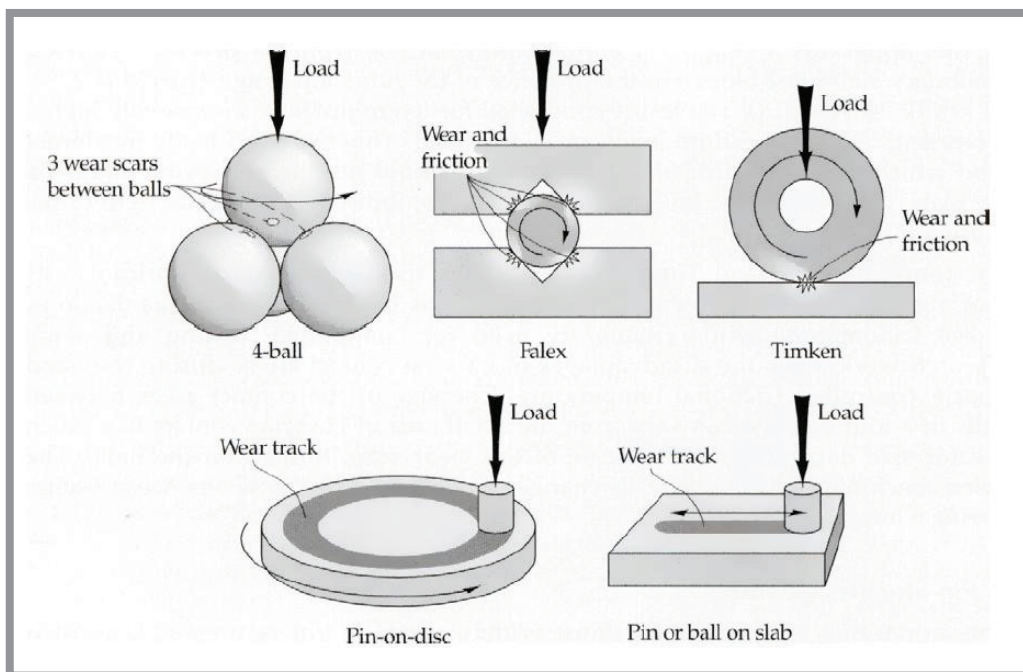
Tribometry lze kvantitativně rozdělit do několika základních skupin, které spolu velmi úzce souvisí [7]:

- podle druhu styku třecích povrchů,
  - tribometry s konformním stykem třecích ploch (plošný kontakt),
  - tribometry s nekonformním stykem třecích ploch (liniový, bodový kontakt),
  
- tribometry pro suchý, nebo částečně mazaný kluzný kontakt,
  - four-ball tester
  - falex tester
  - timken
  - pin-on-disc
  - pin-on-ring
  - ring-on-disc
  - ring-on-ring
  - pin-on-slab
  
- podle podmínek, za kterých pracují,
  - vysokoteplotní,
  - nízkoteplotní,
  - pro operaci ve vakuu,
  - pro operaci v korozivních kapalinách,
  
- speciální,
  - pro studii otěru,
  - pro extrémně vysoké kluzné rychlosti či tlaky,
  - pro studii opotřebení nárazem,
  - pro kombinované valení a klouzání
  - in-situ tribometry
  
- tribometry pro studii erozivního a abrazivního opotřebení
- tribometry pro studii mechanismu mazání

Zástupci kategorie „pro suchý, nebo částečně mazaný kluzný kontakt“ charakterizují pokročilé metody, které budou podrobněji popsány dále v kapitole 2.3. Tyto metody náležejí i do dalších zde uvedených kategorií tribometrů. Jako příklad lze uvést tribometr pracující na principu metody pin-on-disc, který dle tvaru použitého pinu zapadá buď do skupiny tribometrů s konformním stykem nebo do skupiny s nekonformním stykem třecích ploch. Pokud je zařízení osazeno vysokoteplotní nebo vakuovou komorou, lze hovořit o vysokoteplotním tribometru respektive pro práci ve vakuu atd.

## 2.3 Tribometry pro suchý, nebo částečně mazaný kontakt

Tento typ tribometrů pracuje na principech znázorněných na Obr. 17. Testy lze obecně vést za sucha nebo za aplikace maziva. V prvním případě zkoumáme pouze koeficient tření a míru opotřebení. Jestliže je však při testu do třecího kontaktu přiváděno mazivo, zkoumáme kromě výše uvedených veličin také lubrikační vlastnosti.



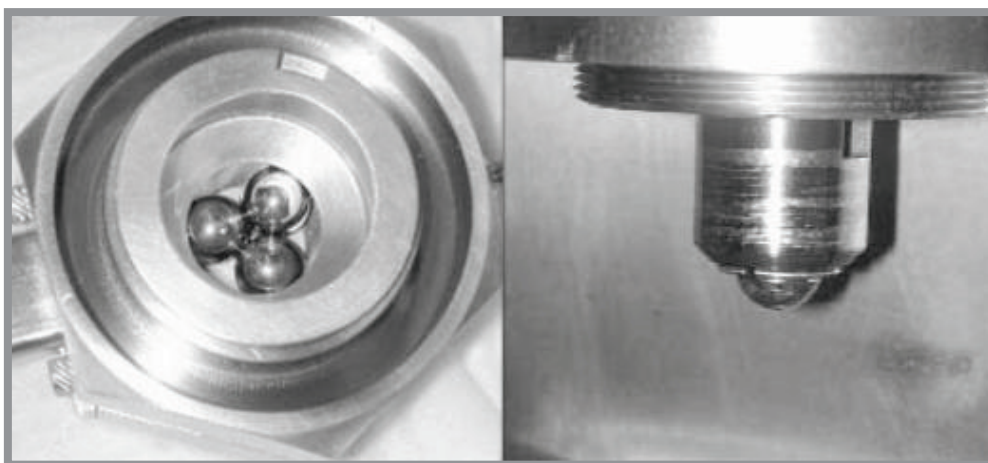
Obr. 17 Schémata konfigurací vzorku a zatěžovacího tělíska při simulaci suchého nebo částečně mazaného kontaktu [7]

### 2.3.1 Four-ball tester

Tato metoda byla vyvinuta již v roce 1933 [12] a v praxi je velmi často využívána, protože nabízí relativně přesné a cenově přijatelné měření parametrů tření a opotřebení v reálném čase. Jádrem zařízení tvoří čtyři kuličky o průměru 12,7 mm, z nichž jedna koná rotační pohyb rychlostí  $1770 \text{ ot.min}^{-1}$ . Zbývající tři kuličky, staticky uložené v pánvi, jež je vyplněna mazivem, jsou tlačeny proti rotující kuličce. Metoda se používá především pro měření míry opotřebení. Dochází zde k bodovému styku kuliček, opotřebení se tedy vyhodnocuje na plochách tohoto styku. Výše uvedené parametry testu se vztahují právě k měření opotřebení dle norem ASTM D 2783-88 a IP 239/97 [7]. Výhoda této metody, plynoucí z její podstaty, spočívá v samovolném vystředění kuliček během testu, což přináší hodnotnější výsledky [12]. Oproti tomu nevýhodou je výrazná změna rozměrů kontaktní plochy mezi kuličkami během testu. Velikost plochy plynule roste od rozměrů Hertzova kontaktu směrem k vyšším hodnotám, závislým na míře opotřebení kuliček [7].

Parametry měření koeficientu tření pomocí metody four-ball popisuje norma ASTM D 5183 [12], která udává rychlost otáčení kuličky  $600 \text{ ot.min}^{-1}$ , dobu trvání testu přibližně 60 min a zátěžnou sílu, jejíž hodnota se pohybuje v rozmezí od 98,1 N

do 392 N. Test probíhá v desetiminutových intervalech [7, 11, 12]. Jak zařízení vypadá v praxi, ilustruje Obr. 11.

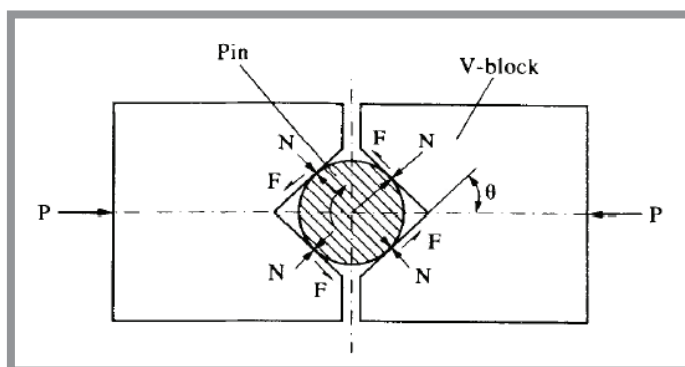


Obr. 18 Zařízení four-ball [12]

### 2.3.2 Falex tester

2.3.2

Za vývojem a distribucí těchto přístrojů převážně stojí americká firma Falex Corporation a odtud tedy plyne častější název této metody – Falex [7, 15]. Odborně bývá spíše označována anglickým výrazem pin & v-block [13, 16]. Název plyne z principu metody. Zkušební tělísko – pin má válcový tvar a je svíráno mezi dva bloky s výřezy tvaru V. Pin koná rotační pohyb a bloky jsou tlačeny zatěžující silou  $P$  proti rotujícímu pinu, jak je znázorněno na Obr. 12. Pomocí tohoto zařízení zjišťujeme míru opotřebení pinu a bloků, maximální hodnotu zatěžující síly, než dojde k zadření a hodnoty koeficientu tření. Současně s těmito testy také prověřujeme vlastnosti tuhých (dle ASTM D 2625 [14]) a kapalných maziv (dle ASTM D 2670 [14]), při nízkých či vysokých kluzných rychlostech za extrémních tlaků. Parametry takto vedených testů jsou dány normami ASTM D 3233-93 [7] a IP 241/84 [7]. Dochází zde k liniovému třecímu kontaktu mezi pinem a bloky na čtyřech místech současně. Smykové tření v těchto kontaktech vyvolává třecí síly a ty následně krouťací moment, jehož hodnotu získáváme přímo pomocí snímače, nebo jej zjistíme nepřímou ze zatěžující síly výpočtem [7, 13]. Všeobecně přesnost měření



Obr. 19 Geometrie kontaktu zařízení PIN & V-BLOCK [13]

koeficientu tření ovlivňuje i tření v ostatních částech zařízení. Pokud je použit snímač pro získání velikosti krouticího momentu, tak metoda Falex nabízí možnost přímého měření tření bez chyb generovaných třením v ložiscích [7].

Výpočtem lze ze znalosti zatěžující síly zjistit krouticí moment  $T$  a následně třecí koeficient  $\mu$  za pomoci vztahů (4) a (5) [13], kde  $P$  je zatěžující síla,  $N$  je normálová síla působící přímo v kontaktu,  $F$  je třecí síla,  $\theta$  je úhel rozevření výřezu tvaru V a  $r$  je poloměr pinu. Typické hodnoty jsou  $r = 3,2$  mm a  $\theta = 48^\circ$  [13].

$$T = 4rF = 4r\mu N \quad (10)$$

$$N = \frac{P}{2\sin \theta} \quad (11)$$

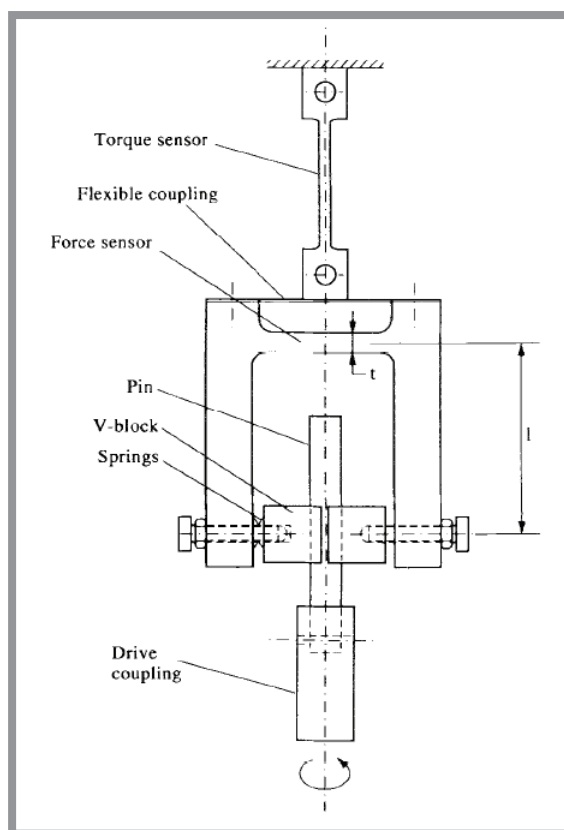
$$T = 4rF = 4r\mu \frac{P}{2\sin \theta} \quad (12)$$

$$\mu = \frac{T\sin \theta}{2Pr} \quad (13)$$

Za nevýhody této metody se dají považovat zejména výrazná změna kontaktního tlaku během testu, ne zcela dobře kontrolovatelná teplota v místě styku a hlavně rozměry a konstrukce zařízení, které neumožňují provádět testy za nestandardních podmínek např. ve vakuu, nebo při vysokých či nízkých teplotách. S postupujícím vývojem technologií se konstrukce zařízení Falex přizpůsobuje i těmto náročným podmínkám, což vede k faktu, že se tato metoda v průmyslovém výzkumu používá stále častěji [7, 13].

K. Savio Sebastian a V. R. Bhaskar v [13] zkoumali použití Pin & V-Block zařízení ve vesmírném průmyslu, kde se považují za zcela běžné extrémní podmínky vakua či nízkých teplot. Protože mechanismy na principu rotačních kinematických dvojic, tedy, kloubů, závěsů apod., se ve strojích pracujících ve vesmíru vyskytují často, je třeba zkoumat vlivy tření a mazání za těchto extrémních podmínek. Ve svém díle [13] publikují speciální konstrukci tohoto zařízení, které umožňuje použití této metody za podmínek vakua [13]. Na Obr. 13 je znázorněno bez vakuové komory.

Aparát je zavěšen v pevném rámu a osazen dvěma snímači pro měření zatěžující síly a krouticího momentu. V-bloky jsou připevněny pomocí šroubů k oběma ramenům snímače zatěžující síly. Soustava talířových pružin na jednom z ramen je použita pro dosažení odpovídající tuhosti této zatěžovací konfigurace. Modulární konstrukce umožňuje operativně měnit snímače pro měření větších rozsahů zatěžujících sil a krouticích momentů. Rotační pohyb pinu zajišťuje externě umístěný motor, jehož hřídel vede do zařízení přes vakuové těsnění. Všechny kabely a příslušenství vedoucí ze zařízení jsou též vedeny přes tato těsnění, jež jsou důležitá pro udržení vakua v komoře. K. Savio Sebastian a V. R. Bhaskar prováděli měření třecího koeficientu a míry opotřebení za podmínek vakua a vzduchu na vzorcích vyrobených z různých kovových materiálů. Při měření ve vakuu bylo dosahováno výrazně nižších koeficientů tření než při měření za působení okolního vzduchu [13].



Obr. 20 Speciální konstrukce PIN &amp; V-BLOCK [13]

### 2.3.3 Timken test

2.3.3

Princip této metody spočívá v otáčejícím se zatěžovacím tělísku tvaru kroužku tlačícím zatěžující silou proti staticky uložené desce za přítomnosti maziva (ASTM D 2782-94, IP 240/84) [7]. Kroužek rotuje rychlostí  $800 \text{ ot.min}^{-1}$  a dotýká se desky svým obvodem, čímž je realizován liniový nekonformní styk povrchů kroužku a desky. Tribometry, pracující na principu této metody se užívají především pro testování schopností maziv zabraňovat projevům abrazního opotřebení, zejména tzv. scoringu (rýhování), jenž je charakterizováno krátkými ryskami nebo vtisky na kontaktních plochách orientovaných ve směru valení [1, 7]. Test je veden po dobu 10 min [7]. Síla se přenáší přes rameno na rotující kroužek. Zatížení je postupně zvyšováno až do hodnoty tzv. „OK zatížení.“ Toto je charakterizováno maximální hodnotou zatížení, které může být aplikováno, aniž by došlo ke scoringu. Schematicky je metoda znázorněna na Obr. 17.

### 2.3.4 Pin-on-slab

2.3.4

Zařízení typu pin-on-slab jsou vhodná pro studii tření a opotřebení mezi povrchy, jež vůči sobě konají posuvný vratný pohyb. Třecí kontakt je zde realizován mezi staticky uloženým pinem a pohybujícím se vzorkem (deskou - slab). Schéma znázorňuje Obr. 17. Ve většině aplikací je jako pin užíván váleček, jenž realizuje s deskou styk konformních povrchů, nebo kulička, realizující bodový nekonformní kontakt. Z hlediska frekvence a amplitudy recipročního pohybu desky lze toto zařízení kvantifikovat do dvou skupin. První z nich tvoří přístroje typu Bowden-

Leben, jenž lze považovat za nejznámější aplikaci principu pin-on-slab [7]. Rychlost desky se u těchto zařízení pohybuje mezi (0,1 až 1) mm.s<sup>-1</sup>, amplituda pohybu je přibližně mezi (100 až 150) mm. Druhou skupinu tvoří přístroje typu Cameron-Mills. Tato zařízení jsou výsledkem nedávného vývoje a oproti Bowden-Leben se vyznačují menší amplitudou (1 až 2) mm a výrazně vyšší frekvencí oscilace pohybující se desky (1-10) Hz [7].

### 2.3.5 Pin-on-disc

Tribometry, pracující na principu pin-on-disc (Obr. 16, 17 a 27), jsou všestranná laboratorní zařízení pro měření vlastností tření a opotřebení v třecím kontaktu, realizovaném mezi povrchy pinu a vzorku, v případné interakci s mazivy za sledovaných podmínek zatížení, rychlosti a teploty. Parametry měření udává norma ASTM G 99-95a [32]. Mezi průkopníky této metody patří prof. Duncan Dowson a Dr. Michael Plint, kteří se v 60. letech 20. století zabývali mimo jiné konstrukcí zařízení typu pin-on-disc. Výsledkem jejich práce byl přístroj TE 97, zkonstruovaný na bázi soustruhu Myford. Bylo jej vyrobeno na 200 kusů a ve své době, až do 80. let, byl nejvíce dodáván jako laboratorní zařízení na univerzity po celém světě [9]. V současné době vyrábí moderní přístroje tohoto principu současně několik firem, zabývajících se dodávkou a produkcí přístrojů pro tribologický výzkum. Za všechny lze zmínit firmy, jako jsou např. švýcarská CSM Instruments, nebo americká Nanovea [7, 9].

Jednoduchý princip metody lze popsat následovně. Vzorek (disk) koná rotační pohyb. Na jeho plochou část je zatěžující (normálovou) silou tlačěn pin tvaru kuličky (ball-on-disc) nebo válečku (váleček se dotýká disku svou plochou částí) ve směru axiálním, nebo radiálním, kdy se však pin dotýká obvodu disku (tato modifikace se nazývá pin-on-drum [7]). Normálová síla je vyvolaná buď tíhou závaží, pružinou, hydraulicky, nebo jiným způsobem. V případě axiálního směru zatěžování působí tato síla na určitém poloměru disku, kde je důležitý vliv jeho obvodové rychlosti na dynamický koeficient tření. Pin je uchycen v přípravku na elastickém rameni. Pomocí snímače se během testu provádí měření výchylky tohoto ramene a z její hodnoty se určuje koeficient tření. Důležitou součástí tvoří i třecí snímač. Vzorek může být na zařízení orientován horizontálně i vertikálně. V případě vertikálního uložení je zde možnost použít současně dva piny (z každé strany disku jeden) [9]. Avšak v současných tribologických aplikacích se častěji setkáváme s horizontálním uložení [17, 18, 32].

Výsledky měření, prováděných pomocí těchto přístrojů, poskytují informace o lubrikačních vlastnostech maziv, hodnotě koeficientu tření v závislosti na obvodové rychlosti či zatížení, nebo informace o míře opotřebení pinu a vzorku. Aparát pin-on-disc nabízí dobrou kontrolu podmínek experimentu [7]. Konstrukce zařízení umožňuje vést měření ve vakuu či při zvýšených nebo snížených teplotách za relativně stálých podmínek bez systematických změn v kontaktní oblasti, nebo změn kluzné rychlosti, které mohou nastat u jiných typů tribometrů.

Nevýhodou tohoto typu tribometru je problematická kontrola normálového zatížení pinu. Na počátku testu je povrch disku hladký, ale později v průběhu experimentu dochází k jeho zdrsňování, což způsobuje nežádoucí výchylky a vibrace pinu, které zapříčiňují negativní změny v normálovém zatížení, čímž klesá vypovídající hodnota testu. Z tohoto důvodu není zcela vhodné použít k vyvození

normálového zatížení tíhovou silou závaží (přesto se však často používá), protože tato konfigurace nedokáže výše uvedené negativní vlivy efektivně minimalizovat. Pro konzistentní data experimentu je vhodnější vyvolání normálové síly zatěžovacím systémem, realizovaným pružinou, či hydraulickým systémem se stabilizací tlaku [7]. I přes toto omezení, je metoda velmi často využívána při studiu povrchových úprav materiálů [7, 9, 17].

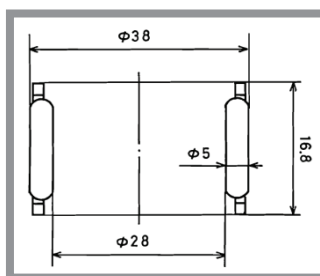
### 2.3.6 Pin-on-ring, ring-on-ring (ring-to-ring)

2.3.6

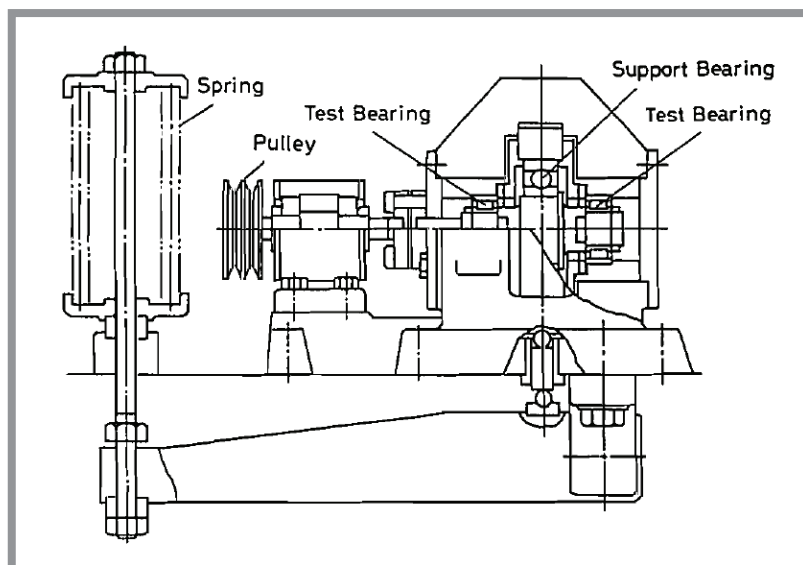
U metody pin-on-ring se jedná o modifikaci metody pin-on-drum, která, jak bylo uvedeno výše, vychází z pin-on-disc. Princip těchto metod je stejný. Rozdíl mezi nimi tvoří pouze použitý tvar vzorku. Oproti pin-on-drum má vzorek tvar kroužku (prstence). Jeho zatěžování probíhá tak, že normálová síla tlačí pin, který je staticky uložen v přípravku, radiálním směrem na obvod kroužku, a to buď z jeho vnější, nebo vnitřní strany. Osa rotace vzorku je na zařízení orientována horizontálně, nebo častěji vertikálně. Tvar pinu se liší dle druhu styku třecích ploch, který má v daném testu figurovat. Jedná se standardně o tvar kuličky, válečku, či jiný. Pokud je použit pin tvaru kuličky, lze tuto metodu s výhodou použít ke sledování vlastností tření a zejména míry opotřebení radiálních kuličkových ložisek, protože dosažený tvar stykové plochy (jedná se o bodový nekonformní styk) a způsob zatěžování vhodně simuluje podmínky provozu tohoto druhu ložisek. Z tohoto důvodu pin a vzorek bývají často zhotoveny z materiálů, vhodných pro výrobu ložisek [19].

Další princip, na kterém experimentální zařízení pracují, nese název ring-on-ring (ring-to-ring [21]). Tato metoda je vhodná zejména pro testování radiálních kluzných, válečkových, jehlových a kuličkových ložisek. Pomocí ní se zjišťují vlastnosti veličin tření a opotřebení, provádí se testy lubrikačních vlastností maziv resp. jejich schopností snižovat koeficient tření a negativní účinky opotřebení, nebo je zkoumán únavový život ložisek. Mezi nesporné výhody této metody patří možnost simulace tření a valení současně. Dále lze realizovat druhy třecích kontaktů, odpovídající jednotlivým druhům ložisek a simulovat různé režimy mazání. Popis této metody a experimentálních zařízení, bude konkretizován právě na výše uvedené typy ložisek.

Pro dosažení liniového nekonformního třecího kontaktu se jako pin se užívá samotný váleček (válcový segment ložiska), jenž je během testu tlačěn zatěžující silou proti vzorku (prstenci) z jeho vnější, nebo vnitřní strany. V tomto případě je pin stacionární a kroužek proti němu koná rotační pohyb. Praktičtější význam má použití celistvého ložiska jako vzorku. Akamatsu a kol. v [21] zkoumali únavový život jehlového ložiska. Zařízení a vzorek, které použili, znázorňují Obr. 21 a Obr. 22.



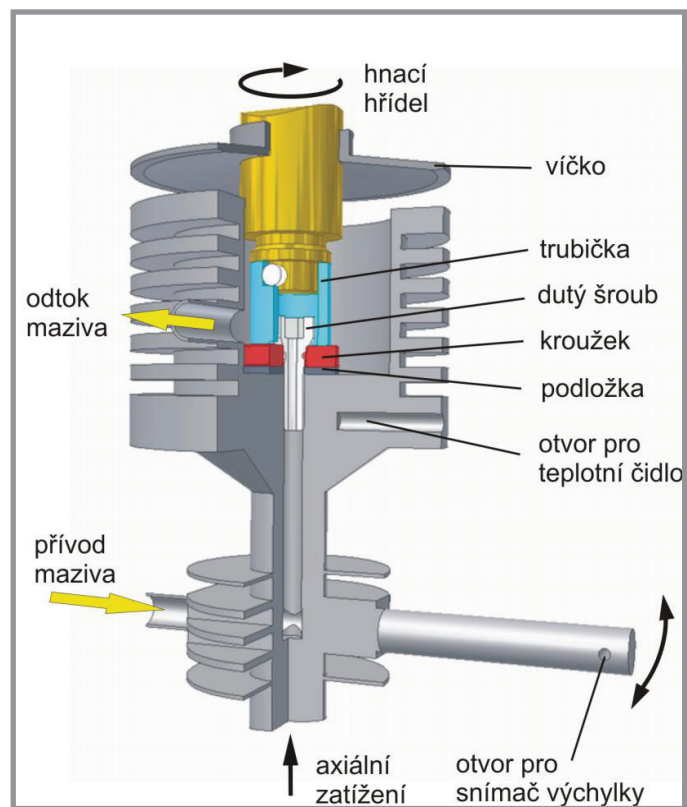
Obr. 21 Testovací ložisko [21]



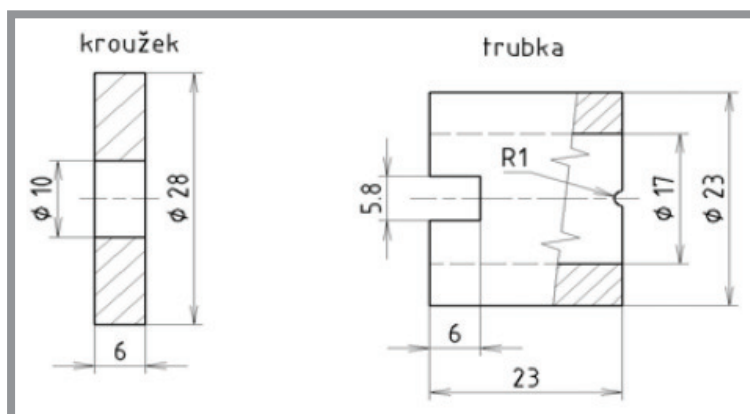
Obr. 22 Experimentální zařízení pro test ložisek [21]

### 2.3.7 Ring-on-disc

Princip metody a popis experimentálního zařízení bude uveden na přístroji AX-MAT, umístěném na Ústavu konstruování FSI VUT Brno. Z Obr. 23 jsou patrné hlavní části zařízení. Zkušební vzorky v tomto případě tvoří disk (kroužek) a prstenec (trubička). Kroužek je staticky upevněn v hliníkové vaně pomocí dutého šroubu, který umožňuje přívod maziva do zkušebního uzlu. Je zde realizován plošný třecí kontakt tvaru mezikruží, kdy oba ze vzorků jsou během testu plně ponořeny do maziva. Proti kroužku je axiálním směrem tlačena rotující trubička. Toto uspořádání vzorků zajišťuje, že kontaktní plocha se v průběhu experimentu nemění. Za povšimnutí stojí speciální tvar trubičky (Obr. 24). Na jednom z konců je vyfrézována drážka, do které přesně zapadá čep hnací hřídele. Tento styk realizuje přenos krouticího momentu z hřídele na trubičku. Na druhém konci trubičky, který je v kontaktu s kroužkem, jsou zhotoveny dvě menší drážky. Jejich funkcí je zajistit přístup maziva na třecí plochy a jeho odvod ze zkušebního uzlu, protože do tohoto uzlu je mazivo přiváděno z vnitřní strany trubičky. Konstrukce vany, ve které je zkušební uzel umístěn, zajišťuje plynulý oběh maziva. Na této vaně lze nalézt otvory pro přívod a odvod maziva, žebrování usnadňující chlazení zkušebního uzlu během testu a velmi důležitou součást, rameno, ve kterém se nachází otvor pro snímač výchylky tohoto ramene. Dle této výchylky se určí třecí síla. Ze znalosti zatížení a třecí síly pak lze určit koeficient tření [20].



Obr. 23 Schéma zařízení „RING-ON-DISC“ [20]



Obr. 24 Testovací vzorky [20]

## 2.4 Tribometry pro extrémní podmínky

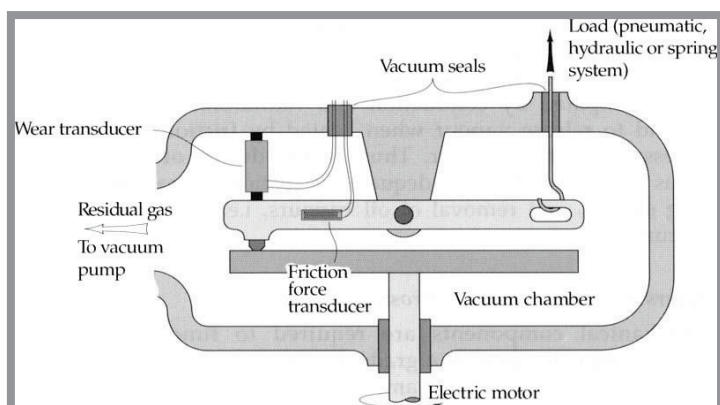
S rychlým vývojem nových technologií je třeba přizpůsobovat i konstrukce tribometrů. Vyvstala potřeba znát tribologické vlastnosti materiálů za nestandardních podmínek, jako jsou např. zvýšená či snížená teplota, vakuum, nebo působení korozivního prostředí na testované vzorky. Jinými slovy, tribometr musí být zkonstruován tak, aby co nejlépe simuloval tyto podmínky při měření. V některých aplikacích je požadováno, aby tribometr zvládal simulovat i kombinaci extrémních podmínek (např.: vakuum + snížená teplota) [7]. Praktický přínos těchto experimentálních zařízení lze nalézt např. v leteckém, vesmírném či jaderném průmyslu, kde jsou extrémní podmínky běžné. Jako konkrétní příklad uvedme následující. V raketových motorech na kapalná paliva je zapotřebí valivých ložisek v mechanismech pro čerpání a usměrnění toku kapalného kyslíku. Ložiska se nacházejí v části motoru vystavené extrémně vysokým teplotám. Proto je nezbytné zkoumat po stránce tribologie, jak se ložisko bude chovat za těchto extrémních podmínek a zdali vydrží bez výrazného opotřebení nejméně po dobu letu [7].

Tribometry pro měření koeficientu tření za extrémních podmínek pracují na stejných principech jako tribometry zmíněné v předchozí kapitole (pin-on-disc, four ball, atd.). Podstatným rozdílem je však zahrnutí přídatných částí do konstrukce tribometru (jako jsou např. vakuová komora, ohřívací či chladičí zařízení). Je nezbytné, aby konstrukce tribometru uvažovala co nejlepší izolaci zkušební uzlu jak od ostatních částí tribometru (např. snímače třecí síly, pohony a další), tak od samotné obsluhy. Toto zaručuje minimalizaci škodlivých vlivů extrémních podmínek mimo zkušební uzel na proces měření, tudíž vzrůstá vypovídající hodnota testu.

V následujícím textu budou pro jednoduchost a názornost rozebrány zařízení převážně typu pin-on-disc upravená pro extrémní podmínky.

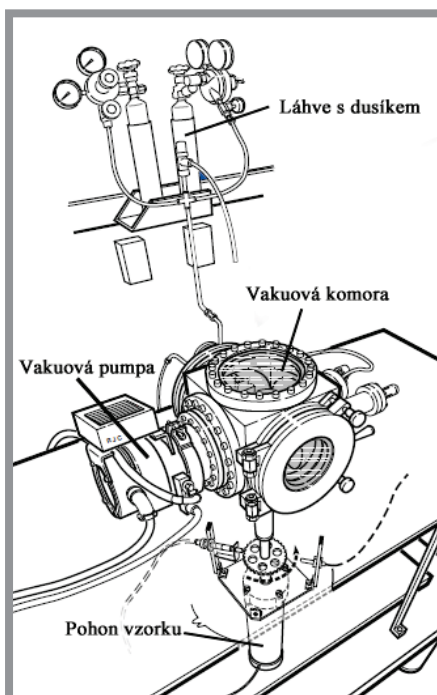
### 2.4.1 Vakuové tribometry

Vakuové tribometry (též ultra high vacuum – UHV) jsou obvykle vybaveny vakuovou komorou, ve které se nachází zkušební uzel. Komora je připojena na vakuovou pumpu, která odsátím vzduchu uvnitř vytvoří vakuum. Pohon vzorku a zatěžovací systém bývají vyvedeny mimo vakuovou komoru a od okolí jsou odděleny těsněním. Snímače třecí síly mohou být umístěny v komoře, protože vakuum na ně nemá vliv. Koeficienty tření mají tendenci být ve vakuu nestabilní. Jakmile totiž při testu dojde vlivem opotřebení k odstranění ochranných filmů maziva a oxidů, dochází u většiny kovů k rapidnímu zvýšení třecího koeficientu a třecí síly. Proto je nutné, aby rám přístroje vykazoval dostatečnou tuhost. Nepřítomnost vzduchu v komoře zabraňuje také přímému chlazení třecího kontaktu prostupem tepla. Teplo vzniklé třením je disipováno vedením nebo sáláním. Pokud je test veden za přítomnosti maziva, je také nutné odvádět výpary vzniklé odpařováním maziva při tření. Výpary totiž zvýší tlak v komoře a není tak dosaženo požadovaného vakuu. Tyto problémy řeší např. použití účinného chladičího systému a výkonné vakuové pumpy. Schéma na Obr. 25 ilustruje konfiguraci zkušební uzlu ve vakuové komoře [7].

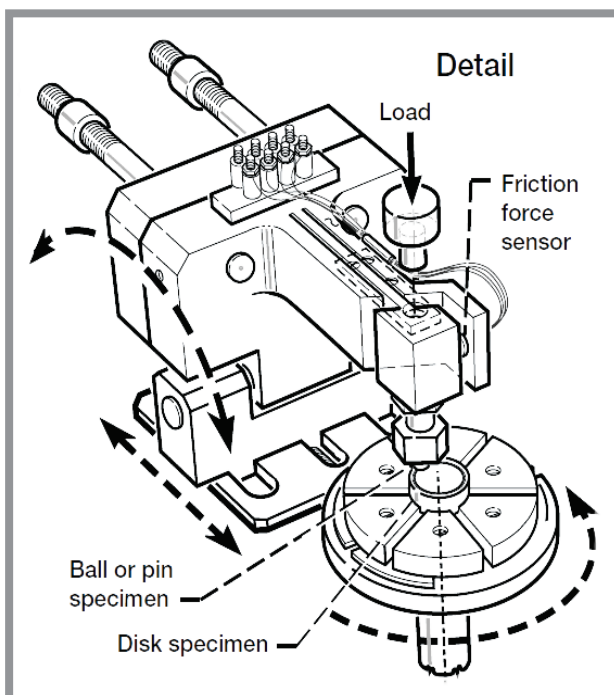


Obr. 25 Schéma vakuové komory [7]

Myioishi a kol. v [25] pomocí vakuového tribometru zkoumal tribologické vlastnosti tuhých mazacích filmů pro účely leteckého průmyslu. Bylo použito experimentální zařízení typu pin-on-disk uzavřené ve vakuové komoře. Konstrukce tribometru umožnila vést test za podmínek vakua ( $7 \times 10^{-7}$  Pa), v prostředí suchého dusíku při relativní vlhkosti  $< 1\%$  a ve vzduchu při relativní vlhkosti  $\sim 20\%$ , při pokojové teplotě. Testovaly se tři vzorky tvaru disku z materiálu AISI 440C (nerezová ocel ČSN 17 042) s povlaky z nalepovaného  $\text{MoS}_2$ , magnetronově naprašovaného  $\text{MoS}_2$  a obloukově odpařovaného stříbra. Kulička o průměru 6mm byla vyrobena rovněž z materiálu 440C. Všechny testy byly vedeny při zatížení 5,9 N a při kluzné rychlosti  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [25]. Obr. 26 ilustruje konfiguraci jejich experimentálního zařízení, je zde patrný externě uložený pohon vzorku. Obr. 27 znázorňuje pin-on-disk ve vakuové komoře, kde je znázorněn způsob zatěžování pomocí závaží.



Obr. 26 Vakuový tribometr (upraveno z [25])



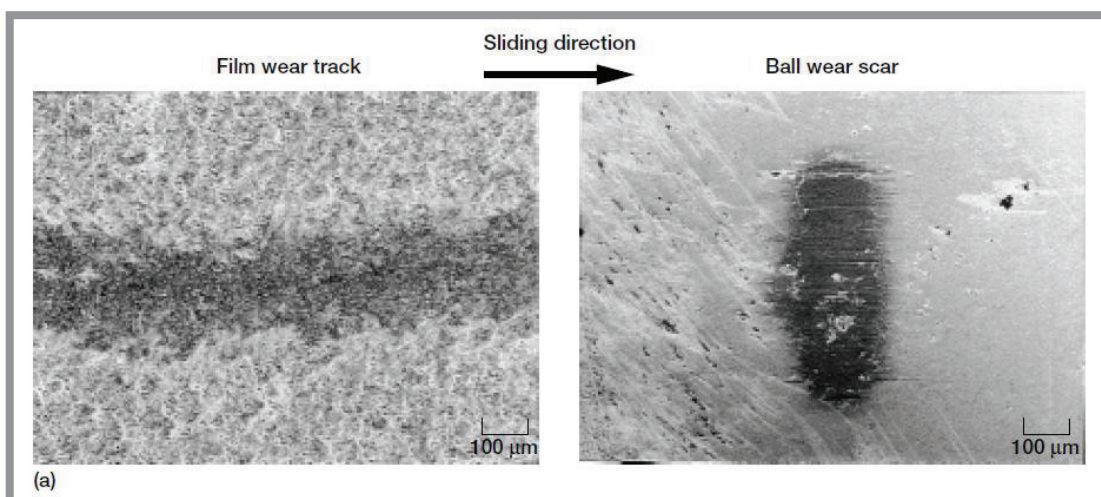
Obr. 27 Pin-on-disk uvnitř vakuové komory (upraveno z [25])

Zjišťoval se mimo jiné koeficient tření, vlastnosti opotřebení a odolnosti proti opotřebení v extrémních podmínkách. Po testu byly výsledné zbytky povlaků po opotřebení a celkově povrchy vzorků hodnoceny pomocí elektronové mikroskopie (SEM), rentgenové spektroskopie (EDX) a profilometru. Při posuzování výsledků měření byla stanovena dvě kritéria a to koeficient tření měl být menší než 0.3 a rychlost opotřebení nejvýše  $10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ . Pro příklad budou uvedeny výsledky jeho měření a vzhled ploch disku a kuličky po testu ve vakuu viz Obr. 28 a 29. Z tabulky na Obr. 28 plyne, že nejmenších koeficientů tření se dosahovalo ve vakuu a neoxidické atmosféře dusíku, naopak větších hodnot nabýval koeficient tření v prostředí vzduchu. S výjimkou povlaku stříbra ve vzduchu, kde koeficient tření dosahoval hodnoty 0,43, splnily všechny povlaky stanovené kritérium pro maximální hodnotu třecího koeficientu.

Film	Film material	Steady-state coefficient of friction	Film wear (endurance) life <sup>a</sup>	Film wear rate, $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$	Ball wear rate, $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$
Bonded $\text{MoS}_2$	Vacuum	0.045	>1 million	$6.0 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-9}$
	Air	.14	113 570	$2.4 \times 10^{-6}$	$8.1 \times 10^{-8}$
	Nitrogen	.04	>1 million	$4.4 \times 10^{-8}$	$6.9 \times 10^{-10}$
Magnetron-sputtered $\text{MoS}_2$	Vacuum	0.070	274 130	$9.0 \times 10^{-8}$	$2.5 \times 10^{-9}$
	Air	.10	277 377	$2.4 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-7}$
	Nitrogen	.015	>1 million	$1.6 \times 10^{-8}$	$9.9 \times 10^{-10}$
Ion-plated silver	Vacuum	0.20	364 793	$8.8 \times 10^{-8}$	$2.4 \times 10^{-8}$
	Air	.43	8	$5.5 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$
	Nitrogen	.23	1040	$1.6 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-5}$

<sup>a</sup>Film wear life is determined to be the number of passes at which the coefficient of friction rises to 0.3.

Obr. 28 Výsledky obdržené z měření vakuovým tribometrem [25]

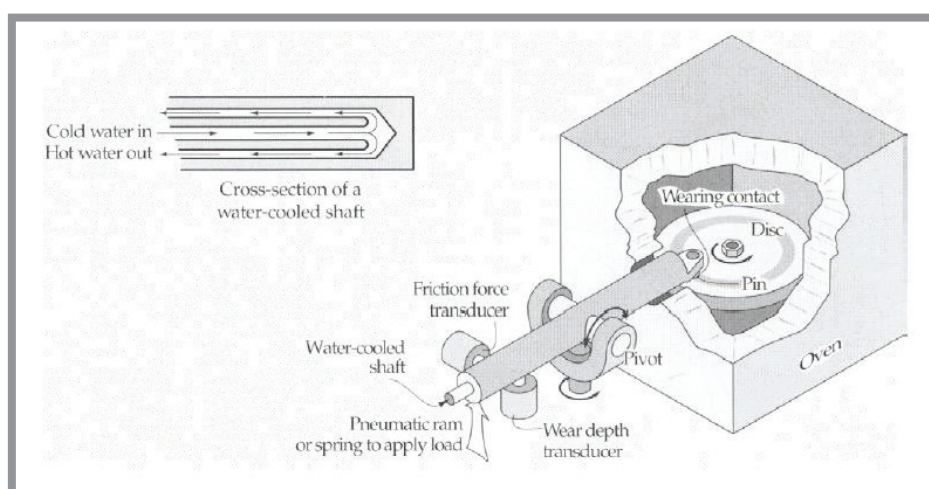


Obr. 29 Příklad stop opotřebení po 1 milionu cyklů ve vakuu vlevo na disku s povlakem z nalepovaného  $\text{MoS}_2$  a vpravo na kuličce ze 440C [25]

### 2.4.2 Vysokoteplotní tribometry

S tímto typem tribometru lze měřit tribologické vlastnosti materiálů za zvýšených teplot (koeficient tření, míra opotřebení lubrikační vlastnosti maziv, a další). Praktické uplatnění vysokoteplotních tribometrů je mimo jiné ve výzkumu pokročilých keramických materiálů a maziv na bázi keramiky užívaných ve spalovacích motorech a plynových turbínách, kde se očekávají vysoké teploty (1000 až 1400) °C [7]. V aplikacích kde klasická tekutá maziva selhávají při daleko nižších teplotách, je vhodné použít pevná maziva na bázi keramiky, která odolávají teplotám nad 800 °C [7]. Například maziva na bázi nitridu boru odolávají teplotám okolo 1200 °C [26]. Proto tyto tribometry musí zvládat simulovat tak vysoké teploty při zachování hodnotných výsledků měření [7].

Konstrukce vysokoteplotních tribometrů bývá mnohdy založená na tribometrech pro měření za pokojové teploty. Relativně bez výrazných nákladů lze klasické tribometry (např.: pin-on-disc) přestavit na jejich vysoko či nízkoteplotní varianty. Úpravy jsou v podobě osazení zkušebního uzlu klasického tribometru komorou s vyhřívací pecí, jež je dostatečně tepelně izolován od zbytku konstrukce tribometru. Protože držák pinu u metody pin-on-disc musí být v přímém kontaktu s vysokou teplotou, je vhodné ho chladit zevnitř vodou, což lze považovat za jeden z prvků tepelné izolace zkušebního uzlu viz Obr. 30. Vysokoteplotní tribometry mohou pracovat také za kombinovaných podmínek jako např.: vysoká teplota + vakuum, vzduch nebo atmosféra jiného plynu. Podle toho jaké podmínky chceme při testu simulovat, se upraví konstrukce tribometru. Za podmínek atmosféry vzduchu či jiného plynu je dosažení požadované teploty v komoře často realizováno elektricky pomocí topných tělísek (Kanthal, SiC). Pokud tribometr pracuje v kombinaci vysoká teplota + vakuum, lze realizovat ohřev zkušebního uzlu elektronovým paprskem, který může dosáhnout teploty až 1200 °C. Sledování teploty v komoře zajišťují termočlánky, které jsou umístěné v blízkosti testovaných vzorků. Někdy bývá komora s pecí osazena okýnkem pro přímé sledování experimentu. V tomto případě lze teplotu uvnitř zjišťovat také infračerveným pyrometrem [7]. Stručné schéma vysokoteplotního tribometru ilustruje Obr. 30.



Obr. 30 Základní schéma vysokoteplotního tribometru s vnitřním chlazením ramena [7]

Jako názornější příklad konfigurace vysokoteplotní komory je zde uveden popis tribometru pro vysoké teploty typu pin-on-disc od výrobců Phoenix Tribology Ltd. a Nanovea.



Obr. 31 Vysokoteplotní komora přístroje TE92/HT [27]



Obr. 32 Vysokoteplotní komora pin-on-disc od Nanovea [28]

Zařízení TE92/HT na Obr. 31 vyrábí firma Phoenix Tribology Ltd. Jeho komora je schopna dosáhnout uvnitř maximální teploty 600 °C za pomoci elektrického vytápění. Na obrázku je patrná izolace stěn komory a termočlánek pro měření teploty. Aby bylo zamezeno nežádoucímu vedení tepla k ložiskům unášecího vřetene vzorku, byl celkově zvětšen rám přístroje a unášecí vřeteno bylo prodlouženo [27].

Přístroj pin-on-disc od výrobce Nanovea na Obr. 32 je vybaven odnímatelnou vysokoteplotní komorou, tudíž lze podle potřeby užívat zařízení pro testy jak za pokojové teploty, tak za zvýšených teplot. Na obrázku je patrné rameno pro snímání třecí síly a bezpečnostní mřížka, která chrání obsluhu před popálením. Uvnitř komory lze dosáhnout dvou teplotních stupňů 600 °C a 900 °C. Termočlánek uvnitř může být umístěn ve dvou pozicích. Buď může snímat teplotu přímo na zkušební kuličce, nebo v komoře blízko zkušebního vzorku což je podle výrobce výhodnější konfigurace pro přesnější měření teploty než umístění termočlátku pod vzorkem nebo v blízkosti topného tělesa. Tribometr v této konfiguraci je vhodný pro studii keramických materiálů, maziv, olejů, aditiv a samomazných materiálů [28].

### 2.4.3 Nízkoteplotní tribometry

### 2.4.3

Nízkoteplotních tribometrů (kryotribometrů) je užíváno pro studium tribologických vlastností materiálů a maziv, které budou součástí strojních zařízení pracujících za extrémně snížených teplot, jako například stroje pracující v polárních oblastech či ve vesmíru [7].

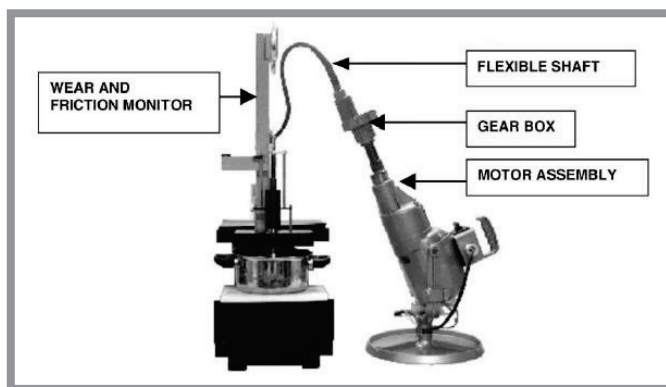
V kryotribometrech se nejčastěji dosahuje nízkých teplot za pomoci tekutého dusíku (teplota varu: -195.8 °C [30]) či helia (teplota varu: -268.93 °C [31]). Zkušební uzel je uzavřen a ponořen do nádoby naplněné tekutým dusíkem či heliem, což zaručí snížení teploty [7, 29]. Není však pravidlem, že zkušební uzel musí být do tekutého plynu ponořen. Pokud není žádoucí ponoření, je zde alternativa ofuku zkušebního uzlu kyslíkem ochlazeným průchodem skrze tekutý dusík [7]. Samozřejmostí je opět požadavek na dokonalé odizolování nízkoteplotní části tribometru od ostatního vybavení přístroje. Pro popis zařízení bude použit vysokorychlostní nízkoteplotní tribometr, jehož konstrukce je detailně popsána v [29].

Subramonian a Basu v [29] zkonstruovali vysokorychlostní kryotribometr na principu metody ball-on-disc za účelem zkoumání tribologických vlastností kuličkových ložisek v kryogenických podmínkách turbočerpadel raketových motorů na kapalná paliva. Zařízení umožňuje zkoumat mechanismy tření a opotřebení při kluzných rychlostech ( $>0,5$  až  $45$ )  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , testování valivého tření jedné kuličky a testování mazaného či nemazaného kuličkového ložiska při vysokých rychlostech až  $36\,000$   $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$  a to vše v kryogenických podmínkách [29].

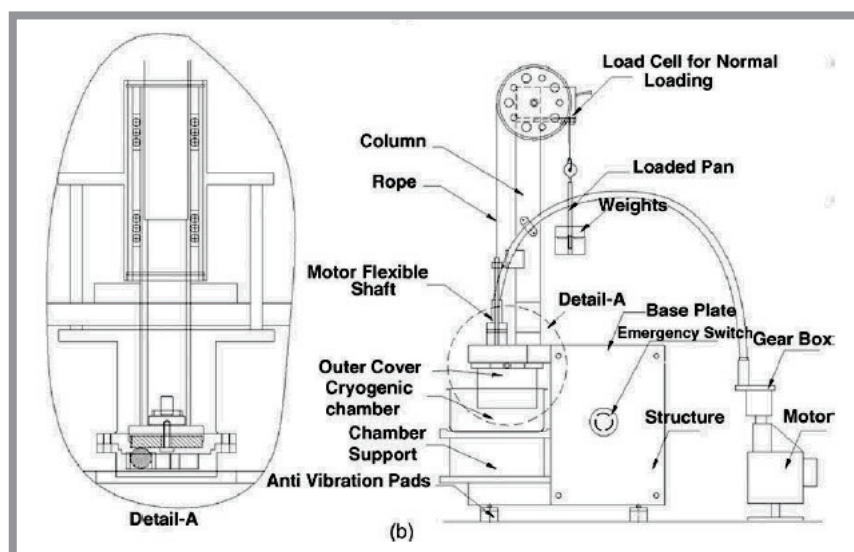
Jejich zařízení se skládá s těchto základních částí [29]:

- Soustava s unášecím vřetenem
- Soustavy uložení vzorku v podobě kulička-pánev a upevnění celého ložiska
- Systém upevnění vzorku zatěžovací mechanismus
- Hnací motor s převodovkou
- Systém získávání dat a řídicí systém

Soustava s unášecím vřetenem se sestává z pružné hnací hřídele, kde jeden konec je napojen k motoru s převodovkou a druhý konec je spojen s hřídelí pohánějící disk. Umístění stacionární kuličky je navrženo tak, aby při testu byla ze spodní strany a disk se otáčel na ní, což přináší výhodu v podobě lepšího odvodu zbytků opotřebovaného materiálu a tím pádem zajištění opotřebení pouze mezi dvěma povrchy kuličkou a diskem bez třetího povrchu (zbytků). Konfigurace kulička-pánev umožňuje umístit kuličku při testu ve čtyřech polohách (resp. na čtyřech průměrech) vůči disku. Toto řešení přináší výhodu, že na jednom disku lze vést experiment při čtyřech kluzných rychlostech což šetří finanční prostředky na výrobu vzorků [29]. Upevnění celého ložiska se děje tak, že vnitřní kroužek testovaného ložiska je upevněn k flexibilní hřídeli. Zatěžování probíhá za pomoci závaží zavěšeného přes kladku (max. 50 N), což podle autorů zajistí podmínky konstantního normálového zatížení. Při této zatěžovací konfiguraci přijde kulička do kontaktu se vzorkem až v momentě, kdy je vyvozeno normálové zatížení. Navíc se zde nabízí možnost sledování normálového zatížení a třecí síly současně, protože u kladky je navíc umístěn snímač, který sleduje normálové zatížení. Hnací motor je schopen vyvodit maximální otáčky  $36\,000\text{ ot.min}^{-1}$  při minimálních vibracích a velmi malé hlučnosti. Otáčky se regulují pomocí převodovky se 14 rychlostními stupni v rozmezí  $(850\text{ až }36\,000)\text{ ot.min}^{-1}$  [29]. Zařízení je znázorněno na Obr. 33 a Obr. 34.

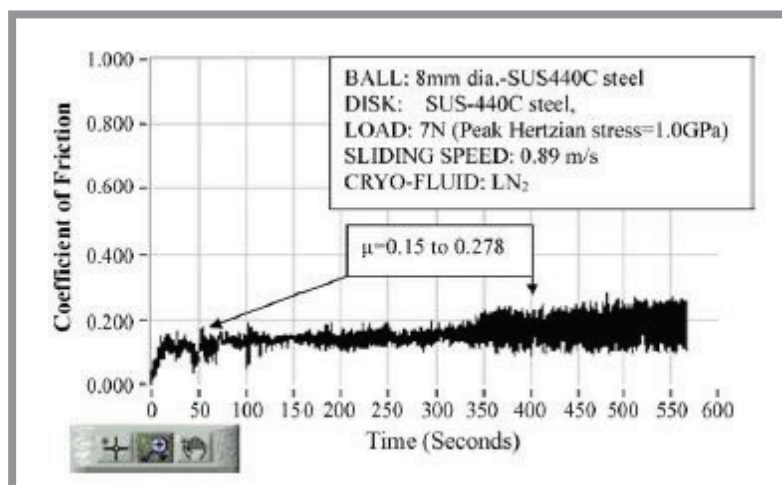


Obr. 33 Celkový pohled na kryotribometr a jeho části [29]

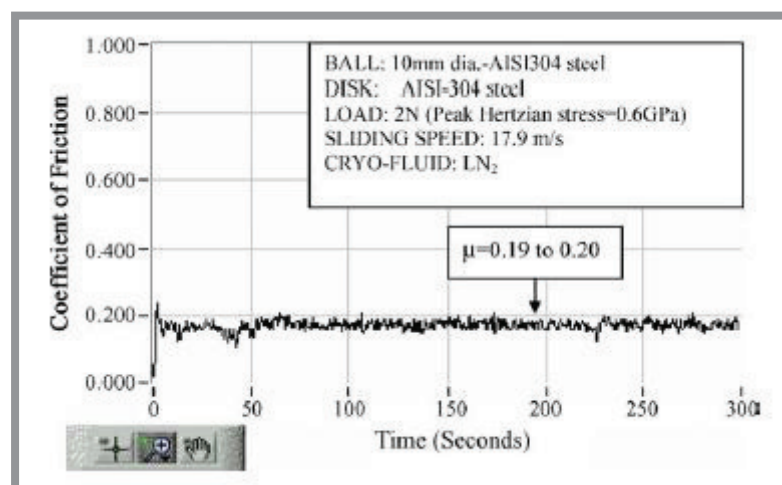


Obr. 34 Detailnější popis kryotribometru [38]

Jako příklad výsledku měření s tímto tribometrem bude krátce uveden jeden ze závěrů jejich měření, ke kterému Subramonian a Basu dospěli. Byly testovány leštěné vzorky tvaru disku z nerezových ocelí SS304 a 440C. Kuličky byly ze stejného materiálu jako vzorky. Pro první vzorek měla kulička průměr 10 mm a pro druhý 8 mm. Test SS304 probíhal při 17 100 ot.min<sup>-1</sup> a pro 440C při 850 ot.min<sup>-1</sup> a oba vzorky byly ponořeny v tekutém dusíku. Při obvodové kluzné rychlosti 22,4 m.s<sup>-1</sup> byl u SS304 zjištěn koeficient tření ~0,1 a při rychlostech 17,9 a 13,4 m.s<sup>-1</sup> se koeficient pohyboval okolo 0,2. U 440C se koeficient tření v prvních 10 s testu zvýšil z velmi malé hodnoty na hodnotu 0,15. V prvních 5 minutách se ustálil na této hodnotě a v posledních 5 min. bylo znatelné jemné zvýšení koeficientu tření z 0,15 na 0,278. Autoři uvádí, že pro tyto oceli jsou při pokojové teplotě a normální vlhkosti vzduchu (35 až 40)% typické hodnoty koeficientu tření (0,5 až 0,6). Z tohoto testu plyne, že kryogenní teploty mají výrazný vliv na snížení koeficientu tření cca o 50% u oceli SS304 [29]. Výsledek je patrný z grafů na Obr 35. a Obr. 36.



Obr. 35 Koeficient tření pro ocel 440C při rychlosti 0,89 m.s<sup>-1</sup> [29]



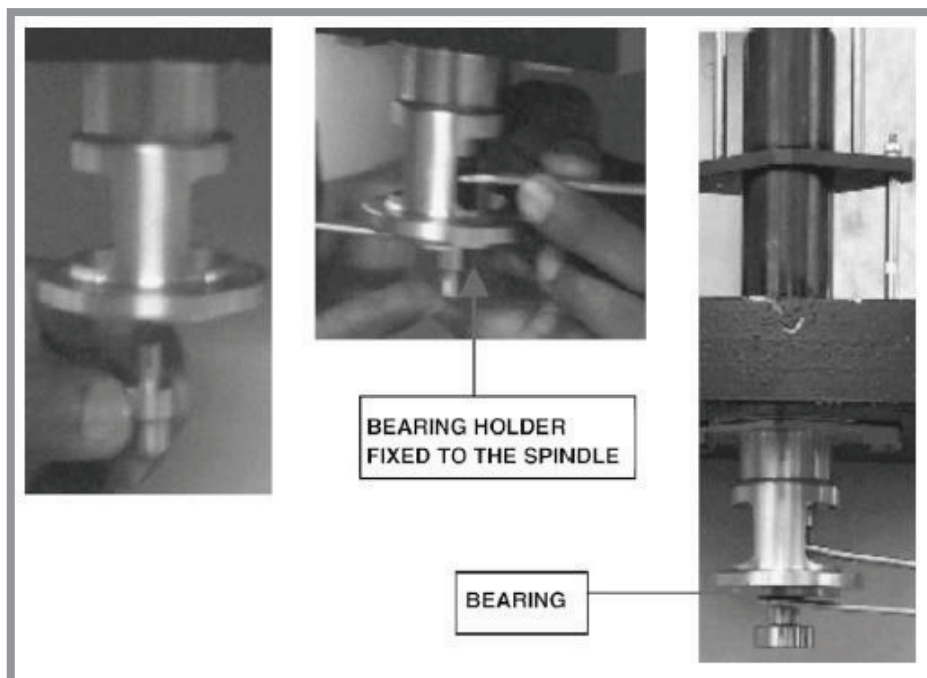
Obr. 36 Koeficient tření pro ocel SS304 při rychlosti 17,9 m.s<sup>-1</sup> [29]

## 2.5 Konstrukční řešení tribometrů

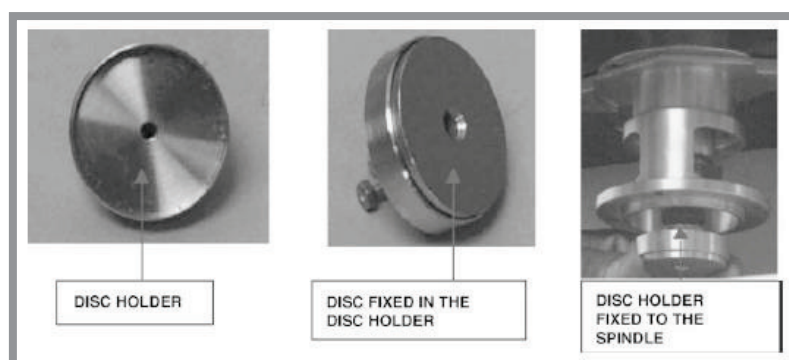
Vzhledem k velkému množství druhů tribometrů a rozsáhlé problematice jejich konstrukce bude popis konstrukčního řešení značně konkretizován. Vhodnými příklady jsou tribometry pracující na principu metod pin-on-disc a four-ball. Obecný popis těchto zařízení se stručně nastíněnou problematikou jejich konstrukce byl popsán v odstavcích 2.3.1 a 2.3.5. Nadále bude konkrétněji rozebrána problematika upínání zkušebních vzorků, protože tyto aspekty konstrukce se významně podílí na přesnosti měření [7, 32].

### 2.5.1 Upínání zkušebních vzorků

U zařízení typu pin-on-disc se vzorek tvaru disku upíná většinou do sklíčidla způsobem znázorněným na Obr. 27 či Obr. 34. Pin bývá upnut v držáku na elastickém rameni a to např. způsobem znázorněným na Obr. 40. Zajímavý způsob upínání vzorku a pinu lze nalézt na zařízení v [29]. Toto zařízení umožňuje zkoumat valivé tření jedné kuličky (ball-on-disc), po výměně upínání pak tribologické vlastnosti celistvých kuličkových ložisek. Více viz odstavec 2.4.3. Způsob upínání na tomto zařízení znázorňují Obr. 37 a 38. Na upnutí vzorků je kladen velký důraz, protože správné ustavení disku a pinu vůči sobě je nanejvýš důležité pro přesnost měření. Více o přesnosti ustavení vzorků v následujícím odstavci.



Obr. 37 Upevnění testovacího ložiska na přístroji [38]



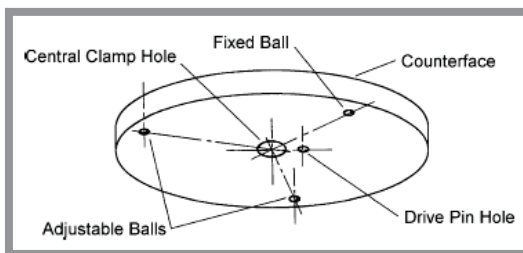
**Obr. 38** Znárodnění uchycení vzorku v držáku (patrný otvor pro centrální šroub) [38]

Garcia-Prietto, Faulkner a Alcock v [32] se zabývali vylepšením upínání vzorků u tribometru typu pin-on-disc. Problém spočíval v ustavení polohy pinu a disku vůči sobě resp. v rovnoběžnosti os pinu a otáčejícího se disku. K této nepřesnosti může dojít vlivem špatné konstrukce celého tribometru, vlivem špatných ložisek, nebo vlivem nepřesně vyrobených vzorků či nedokonalým způsobem jejich upnutí. Pin tvaru kuličky je výhodný, protože vychýlení os pinu a disku nemá významný vliv na skutečnou velikost opotřebované plošky na pinu [32]. Avšak komplikace nastávají při použití pinu s rovnou kontaktní plochou (flat-on-flat), kde není zcela možno kontrolovat velikost kontaktní plochy. Norma ASTM G99-G95a udává maximální vychýlení os  $\pm 1^\circ$ . Tato hodnota může při použití pinu tohoto typu způsobit značné nepřesnosti v naměřených hodnotách. Autoři našli způsob jak vhodně upnout disk a pin v zařízení aby vychýlení bylo mnohem menší než  $\pm 1^\circ$  [32].

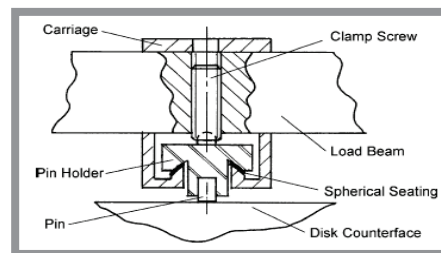
Konstrukčními úpravami vzorku a upínacího systému eliminovali vliv čelního házení disku, které může vést k nerovnoběžnosti os pinu a disku. K nepřesnostem může vést také špatná délka pinu či špatná kolmost čelní plochy pinu vzletem k ose. Problém délky je ponechán na zkušenostech obsluhy tribometru aby byl pin dobře upnut v držáku. Vzorek byl dle Obr. 39 při původní konfiguraci (Obr. 42) upnut do sklíčidla centrálním šroubem. Toto uspořádání umožnilo pouze vystředit disk vzhledem k jeho ose otáčení. Upravená konfigurace nabízela to samé, ale navíc spodní strana disku byla osazena 3 kuličkami, z nichž jedna byla stacionární, a zbylé dvě byly uloženy pohyblivě, což umožňuje vertikálně natočit vzorek pro doladění čelního házení. Výraznější úpravy byly provedeny na držáku pinu. Ten byl osazen půlkulatou pánev viz schéma na Obr. 40. Kolmosti vůči vzorku se dosáhlo tak, že upnutý pin se dotknul povrchu disku celou svou kontaktní plochou tak, že spolu lícovaly a půlkulatá pánev umožnila samovolné ustavení pinu do kolmé polohy [32].

Na původní konfiguraci disku bylo naměřeno na průměru 50 mm čelní házení 28  $\mu\text{m}$  po úpravě na tom samém průměru bylo naměřeno házení 3,5  $\mu\text{m}$ . Z toho vyplývá, že provedené úpravy vedly ke zpřesnění ustavení vzorků a tím i k přesnějším výsledkům měření [32].

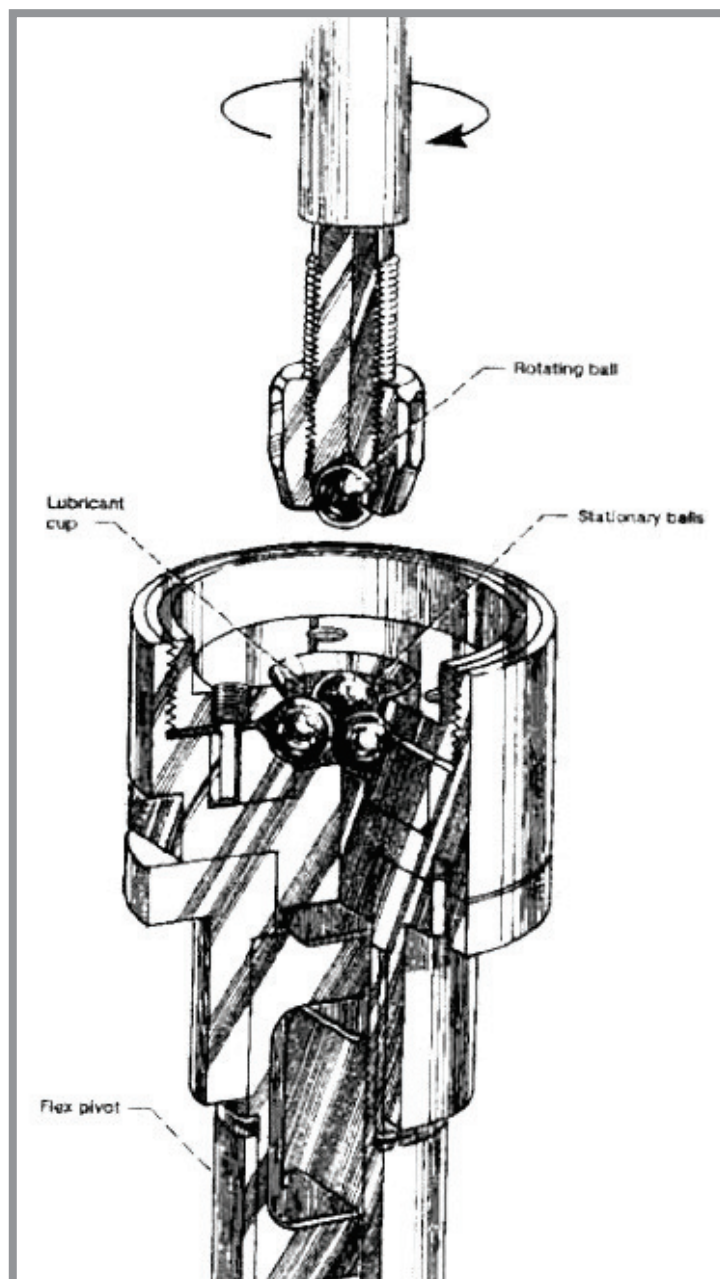
U zařízení typu four-ball, jehož bližší popis je v odstavci 2.3.1 lze zkušební vzorky (4 kuličky) upínat systémem svěrného spoje za pomoci převlečné matice. Princip upínání je zřejmý z Obr. 41. Výhodou této metody je, že konfigurace nabízí možnost samovystředění testovacích kuliček [12]. Další způsob upnutí vzorků lze nalézt u metody ring-on-disc v odstavci 2.3.7 kde je také podrobnější popis celého zařízení.



Obr. 39 Upravený vzorek tvaru disku [32]



Obr. 40 Upravený držák pinu [32]



Obr. 41 Způsob upínání vzorků u metody four-ball [24]

### 3 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

Před začátkem tribologického experimentu je třeba uvažovat nad tím, jaké veličiny mají být výsledkem měření a jaký druh styku třecích ploch je požadován. Podle toho je vybírána příslušná metoda a vhodný typ tribometru. Pro měření koeficientu tření mezi dvěma třecími povrchy lze nalézt nepřeberné množství druhů tribometrů, které takové testy umožňují. Změřit koeficient tření teoreticky dokáže každý tribometr, i ten co není k tomuto účelu přímo vyroben (např. pokud je určen jen k měření tloušťky mazacího filmu). Tribometry se vyvíjely postupně od základních fyzikálních metod přes složitější zařízení určená k měření pouze jedné veličiny (např. pouze koeficientu tření či tloušťky mazacího filmu) až k zařízením kombinovaným, které jsou schopny měřit více veličin současně. Lze uvést příklad tribometru in-situ, kdy se měří například koeficient tření a současně s tímto je možno pomocí rentgenu a mikroskopu za chodu přístroje pozorovat mikro a makroskopické změny v třecím kontaktu [7]. U jiných typů tribometrů toto nelze realizovat, je možné navíc pouze sledovat teplotu v měřeném uzlu. S rostoucími požadavky na simulaci různých prostředí se vyvíjí specializované tribometry měřící tribologické veličiny za extrémních podmínek ve zkušebním uzlu (vysoko či nízkoteplotní a vakuové) [7, 25, 29]. Univerzální experimentální zařízení v poslední době nabízejí možnost vyměnitelného zkušebního uzlu, tzn., že na jednom stroji lze realizovat více druhů třecího kontaktu [27].

Všechny tribometry mají společnou vlastnost a tou je třecí styk dvou povrchů. Je realizován obecně jako konformní či nekonformní. Podle toho se také liší konstrukce zařízení a účel jeho použití. Některé tribometry jsou navrhovány univerzálněji, aby zvládaly valení i klouzání, např. tribometry pracující na principu metody ring-on-ring [21]. Tyto jsou vhodné zejména pro testování kluzných a valivých ložisek. Dále se rozlišují tribometry podle toho, zdali se pohybuje vzorek, zatěžovací tělísko, či oba současně. Další dělení se odvíjí dle způsobu pohybu vzorku. Zdali se tedy jedná o rotační, posuvný, vratný či jiný pohyb.

Základní fyzikální metody se dnes nepoužívají již tak často [7]. Naproti tomu metody pokročilé, ze základních však vycházející, jsou pro svůj praktický význam v tribologické praxi standardem. Každá z pokročilých metod, na kterých současně tribometry pracují má své výhody i omezení. Omezení se týkají např. vzájemné polohy vzorku a zatěžovacího tělísko (zejména metoda pin-on-disc), kdy dochází vlivem mírného odklonění k nepřesnostem měření velmi malých koeficientů tření [7, 23, 32]. Další nepřesnosti během testu vznikají zřetelným zvětšením kontaktní plochy třecích ploch vlivem jejich opotřebení. Toto je obzvláště patrné, pokud má styk třecí ploch na počátku testu charakter bodového nekonformního kontaktu (např. u metody Four-ball). Výhodou tribometrů, pracujících na principu pokročilých metod, je zapojení elektronických snímačů do procesu měření třecí síly, což umožňuje zaznamenat průběh třecího koeficientu v čase a takto naměřená data vhodně aproximovat, aby se výsledný koeficient tření blížil skutečné hodnotě [7, 23].

Pro dosažení hodnotných výsledků měření je třeba volit vhodnou konstrukci tribometru, u kterého by nemělo docházet k ovlivňování měření okolními vlivy (teplota, vlhkost vzduchu atd.). Dalším negativním vlivem jsou vibrace, které mohou nastat při testu, což způsobí odchylky v měření třecí síly. Vibrace nastávají např. vlivem špatných ložisek ve stroji či nedokonalým upnutím vzorků. Rám tribometru by proto měl být dostatečně tuhý.

## 4 VYMEZENÍ TRENDŮ BUDOUCÍHO VÝVOJE

V současné době se konstrukce tribometrů silně odvíjí od potřeby co nejvíce napodobit skutečné podmínky provozu třecího kontaktu. Čím více takových situací bude možné experimentálně realizovat, tím více budou důležité funkční části strojů odolnější vůči negativním důsledkům tření a tím bude také vyvinuto větší množství druhů tribometrů. Tento trend bude převládat dále do budoucna dle dosažených poznatků v oblasti tribologie. S rozvojem inženýrství v oblasti vesmírných technologií se budou zdokonalovat tribometry pracující ve vakuu či za extrémních teplot, protože i ve vesmíru pracují mechanismy, které musí být mazány. Pro budoucí pokrok v této oblasti je nutné podrobně znát chování mazaného třecího kontaktu za těchto extrémních podmínek. Cílem bude dosahovat přesnějších výsledků měření, které jsou směrodatné pro dokonalejší konstrukci strojů. V důsledku efektivního odstraňování negativních účinků tření bude docházet ke snižování energie potřebné pro pohon strojního zařízení, tudíž má vědecký výzkum v oblasti tribologie také značný ekologický význam. Dále lze hovořit o značné úspoře finančních prostředků.

Celosvětově je ročně prohospodářeno mnoho miliard dolarů díky špatně nastavenému tribologickému systému [17]. Je možno uvést příklad Spojených států, kdy v roce 1974 byla předložena zpráva Národní materiálové komise Kongresu Spojených států, ve které bylo uvedeno, že ročně vlivem ztrát třením opotřebením USA přicházejí o stovky miliard. Z tohoto důvodu zažily Spojené státy obrovský rozmach tribologie již v této době a jsou dnes považovány za nejrozvinutější stát v této oblasti vědy [17].

Protože nedílnou součástí moderních tribometrů jsou nejrůznější snímače a čidla, lze očekávat výrazný vývoj i v této oblasti. Tento se bude odvíjet v hledání vhodnějších materiálů pro snímače. K dalšímu zpřesňování výsledků měření může docházet též s rozvojem informačních technologií a statistických metod, které umožní lepší aproximaci experimentálních dat.

Tribometry jsou pro tribologický výzkum fundamentální záležitostí. Na tyto stroje budou nadále kladeny požadavky na přesnost měření, tudíž jejich propracovanější konstrukce, která by mohla minimalizovat např. nepřesnosti v usazení vzorku a zatěžovacího tělíska by opět vedla ke zpřesnění výsledků měření (např. [32]). Je také očekáván další rozvoj v oblasti studia povlaků, který s sebou ponese snáze realizovatelné, efektivnější a levnější metody úprav povrchů třecích ploch. To vše za pomoci stále dokonalejších tribometrů.

## 5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HARTL, M.: *Tření, opotřebení a mázání*. Učební text Fakulty strojního inženýrství VUT Brno – přednáška č. 4. Brno, 2008
- [2] ETSION, I.: *Laser Surface Texturing – Measure to Reduce Friction*. Proceeding of the 14th International Colloquium on Tribology. Esslingen, 2004, s. 329-333
- [3] Wikipedia .: *Tření* [online]. poslední revize 07. 05. 2011 [citováno 2011-05-10]. Dostupné z <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Tření>>
- [4] Wikipedia .: *Friction* [online]. poslední revize 24. 05. 2011 [citováno 2011-05-24]. Dostupné z <<http://en.wikipedia.org/wiki/Friction>>
- [5] Tribology-Abc.: *How to measure friction?* [online]. poslední revize 09. 08. 2008 [citováno 2009-12-27]. Dostupné z <<http://www.tribology-abc.com/abc/friction.htm>>
- [6] DOWSON, D.: *History of tribology – 2nd edition*. Wiley, 1998. 768s. ISBN: 186058070X
- [7] STACHOWIAK, G. W., et al.: *Experimental methods in tribology*. Oxford: Elsevier, 2004. 354s. ISBN: 04-4451-589-5
- [8] Wikipedia .: *Tribometer* [online]. poslední revize 24. 04. 2011 [citováno 2011-04-24]. Dostupné z <<http://en.wikipedia.org/wiki/Tribometer>>
- [9] PLINT, G.: *A Brief History of Plint Tribology Products* [online]. 1992 [citováno 2010-05-11]. Dostupné z <<http://www.phoenix-tribology.com/cat/at2/index/history.pdf>>
- [10] Csm Instruments.: *The tribology principle* [online]. 2010 [citováno 2010-05-11]. Dostupné z <<http://www.csm-instruments.com/en/Tribometer>>
- [11] Tribotesters.: *Four-ball EP wear test machine* [online]. 2010 [citováno 2010-05-11]. Dostupné z <[http://www.tribotesters.net/four\\_ball\\_wear\\_test\\_machine.htm](http://www.tribotesters.net/four_ball_wear_test_machine.htm)>
- [12] Ice32.: *Four-ball friction and wear tests* [online]. poslední revize 2010 [citováno 2010-05-16]. Dostupné z <[http://www.ice32.com/Four\\_Ball\\_Flier.pdf](http://www.ice32.com/Four_Ball_Flier.pdf)>
- [13] SAVIO SEBASTIAN, K., BHASKAR, V. R.: *A new design for the pin and V-blocks tribometer*. Tribology International, 1995, vol. 28, no. 4, s. 219-223
- [14] Ice32.: *Falex friction and wear tests* [online]. poslední revize 2010 [citováno 2010-05-16]. Dostupné z <[http://www.ice32.com/Falex\\_Flier.pdf](http://www.ice32.com/Falex_Flier.pdf)>
- [15] Falex Tribology.: *A brief history* [online]. 2010. Dostupné z <<http://www.falexint.com/functions/content.asp?Pag=11&pnav=;5;20;>>
- [16] Falex Tribology.: *Tribology petroleum test equipment* [online]. 2010. Dostupné z <<http://www.falex.com/testeqip.htm>>
- [17] HÁJEK, J., KŘÍŽ, A.: *Tribologická analýza „PIN-ON-DISC.“* Konference Metal 2005, 2005. Ostrava
- [18] BLAU, P. J., et al.: *ASM Handbook Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International Handbook Committee, 1992. 1879s. ISBN: 0-87170-380-7
- [19] Tribology-Abc.: *Pin-on-ring* [online]. 13. 12. 2008 [citováno 2010-04-12]. Dostupné z <<http://www.tribology-abc.com/abc/pinring.htm>>

- [20] KOUTNÝ, D. *Experimentální studium chování mazacích filmů kontaminovaných vodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 80s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.
- [21] AKAMATSU et al.: *Influence of surface roughness skewness on rolling contact fatigue life*. Tribology Transactions, 1992, 35, s. 745-750, ISSN 0569-8197
- [22] BURŠA, J.: *Experimentální metody mechaniky těles*. Učební text Fakulty strojního inženýrství VUT Brno – přednáška č. 13. Brno, 2009
- [23] BHUSHAN, B.: *Modern tribology handbook*. USA: CRC Press LLC, 2001. 1760s. ISBN: 9780849384035
- [24] JONES, W. R., POSLOWSKI, A. K., SHOGRIN, B. A., et al.: *Evaluation of several space lubricants using a vacuum four-ball tribometer*. Tribology Transactions, 1999, 42 (2), s. 317-323, ISSN 1040-2004
- [25] MIYOSHI, K., IWAKI, M., GOTOH, K., et al. [online]: *Friction and wear properties of selected solid lubricating films – Part 1*, 1999 [citováno 2011-05-15]. Dostupné z < <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/1999/TM-1999-209088-PART1.pdf>>
- [26] Tribology-Abc.: *Solid lubricants* [online]. 2010 [citováno 2011-05-11]. Dostupné z < <http://www.tribology-abc.com/abc/solidlub.htm#boron>>
- [27] Phoenix Tribology.: *TE92 Microprocessor controlled rotary tribometer* [online]. 22. 05. 2011 [citováno 2011-05-22]. Dostupné z <<http://www.phoenix-tribology.com/cat/at2/leaflet/te92.htm>>
- [28] Nanovea.com.: *Tribometer / Tribometers / Tribology / Pin On Disk* [online]. 18. 05. 2011 [citováno 2011-05-22]. Dostupné z <<http://www.nanovea.com/Tribometers.html>>
- [29] SUBRAMONIAN, B., BASU, B.: *Development of high-speed cryogenic tribometer: Design concept and experimental results*. Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing, 2006, vol. 415, s. 72-79, ISSN 0921-5093
- [30] Wikipedia.: *Dusík* [online]. 16. 05. 2011 [citováno 2011-05-23]. Dostupné z <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Dus%C3%ADk>>
- [31] Wikipedia.: *Helium* [online]. 20. 04. 2011 [citováno 2011-05-23]. Dostupné z <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Helium>>
- [32] GARCIA-PRIETO, I., FAULKNER, M. D., ALCOCK, J. R.: *The influence of specimen misalignment on wear in conforming pin on disc tests*. Wear, 2004, vol. 257, s. 157-166, ISSN 0043-1648

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN

$F$	[N]	- akční síla, která uvádí těleso do pohybu
$N, F_n$	[N]	- síla normálová
$F_t$	[N]	- třecí síla
$F_m$	[N]	- naměřená tečná síla
$W, F_G$	[N]	- tíhová síla tělesa
$P$	[N]	- zatěžující síla
$\mu$	[-]	- koeficient tření
$\mu_s$	[-]	- statický koeficient tření
$\mu_d$	[-]	- dynamický koeficient tření
$\mu_m$	[-]	- naměřený koeficient tření
$g$	[m.s <sup>-2</sup> ]	- gravitační zrychlení
$m_{závaží}$	[kg]	- hmotnost závaží
$m_{bloku}$	[kg]	- hmotnost bloku
$\varphi$	[°]	- třecí úhel
$\gamma$	[°, rad]	- nežádoucí úhel naklonění vzorku oproti normální poloze
$\theta$	[°]	- úhel rozevření výřezu tvaru V
$T$	[Nm]	- krouticí moment
$r$	[mm]	- poloměr pinu

**7 SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1	Síly působící při tření	14
Obr. 3	Nekonformní povrchy	16
Obr. 2	Konformní povrchy	16
Obr. 4	Metoda hmotnostního poměru	18
Obr. 5	Metoda pružinové váhy	18
Obr. 6	Metoda nakloněné roviny	19
Obr. 7	Metoda svěrného mechanismu	20
Obr. 8	Metoda kyvadla	21
Obr. 9	Závislost síly a třecího koeficientu v čase	22
Obr. 10	Vliv naklonění vzorku vůči zatěžovacímu tělísku	23
Obr. 11	Schéma piezoelektrického snímače	25
Obr. 12	Různé konfigurace umístění piezoelektrického snímače	26
Obr. 13	Schéma tenzometru	26
Obr. 14	Základní konfigurace tenzometru u metody „PIN-ON-DISC“	27
Obr. 15	Ideální umístění tenzometrů u tribometru , kde vzorek koná vratný pohyb	27
Obr. 16	Schematické znázornění principu tribometru „PIN-ON-DISC“	28
Obr. 17	Schémata konfigurací vzorku a zatěžovacího tělíška při simulaci suchého nebo částečně mazaného kontaktu	30
Obr. 18	Zařízení four-ball	31
Obr. 19	Geometrie kontaktu zařízení PIN & V-BLOCK	31
Obr. 20	Speciální konstrukce PIN & V-BLOCK	33
Obr. 21	Testovací ložisko	35
Obr. 22	Experimentální zařízení pro test ložisek	36
Obr. 23	Schéma zařízení „RING-ON-DISC“	37
Obr. 24	Testovací vzorky	37
Obr. 25	Schéma vakuové komory	39
Obr. 26	Vakuový tribometr	39
Obr. 27	Pin-on-disc uvnitř vakuové komory	39
Obr. 28	Výsledky obdržené z měření vakuovým tribometrem	40
Obr. 29	Příklad stop opotřebení po 1 milionu cyklů ve vakuu vlevo na disku s povlakem z nalepovaného MoS <sub>2</sub> a vpravo na kuličce ze 440C	40
Obr. 30	Základní schéma vysokoteplotního tribometru s vnitřním chlazením ramena	41
Obr. 31	Vysokoteplotní komora přístroje TE92/HT	42
Obr. 32	Vysokoteplotní komora pin-on-disc od Nanovea	42
Obr. 33	Celkový pohled na kryotribometr a jeho části	44
Obr. 34	Detailnější popis kryotribometru	44
Obr. 35	Koeficient tření pro ocel 440C při rychlosti 0,89 m.s <sup>-1</sup>	45
Obr. 36	Koeficient tření pro ocel SS304 při rychlosti 17,9 m.s <sup>-1</sup>	45
Obr. 37	Upevnění testovacího ložiska na přístroji	46
Obr. 38	Znázornění uchycení vzorku v držáku	47
Obr. 40	Upravený držák pinu	48
Obr. 39	Upravený vzorek tvaru disku	48
Obr. 41	Způsob upínání vzorků u metody four-ball	48