



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## TŘENÍ MEZI MATERIÁLY PRO KONSTRUKCI OPTOMECHANICKÝCH PRVKŮ

FRICITION OF MATERIALS FOR OPTOMECHANICAL PARTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Mořický

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2020



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Ondřej Mořický</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Petr Šperka, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

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:

## **Tření mezi materiály pro konstrukci optomechanických prvků**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Při návrhu přesných optomechanických sestav, především uzlů v nichž dochází ke vzájemnému pohybu jednotlivých komponent (justáž, polohování), je žádoucí znát velikost třecích sil v jednotlivých rozhraních mezi komponenty pro možnost správného návrhu potřebných mechanismů a stanovení manipulačních momentů a sil. Součinitele tření mezi jednotlivými materiály jsou zásadně ovlivněny také drsností povrchu, povrchovými úpravami nebo případně dalšími speciálními vrstvami.

Typ práce: výzkumná

### **Cíle bakalářské práce:**

Cílem bakalářské práce je experimentální zjištění součinitele tření v kombinaci různých konstrukčních materiálů používaných při konstrukci optomechanických zařízení. Úkolem je zaměřit se na povrchy s různou drsností a opatřené různými povrchovými vrstvami.

Díličí cíle bakalářské práce:

- zpracovat přehled v oblasti tření mezi používanými materiály,
- navrhnout způsob testování a ověřit opakovatelnost,
- realizovat experimenty s různými kombinacemi materiálů,
- vyhodnotit měření a vyvodit závěry.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske--studium--ukonceni/>

**Seznam doporučené literatury:**

STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 0123970474.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá třením mezi materiály používanými při konstrukci optomechanických sestav. Cílem práce je porovnání součinitele tření u různých kombinací povrchů, v různých drsnostech a s různými povrchovými úpravami. Experimentální měření probíhalo na tribometru metodou pin-on-plate za podmínek suchého tření. Z výsledků měření byly sestaveny grafy vývoje součinitele tření v čase a tabulka pro srovnání jednotlivých kombinací. Součástí je analýza povrchů pomocí optické profilometrie před a po testech.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Optomechanická sestava, součinitel tření, pin-on-plate, suché kluzné tření, opotřebení

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with friction between materials used in the construction of optomechanical assemblies. The aim of the thesis is to compare coefficient of friction for different combinations of surfaces, different roughness, and different surface treatments. Experimental measurement was carried out on a tribometer using the pin-on-plate method under the dry friction conditions. Graphs of the development of coefficient of friction over time and a table to compare individual combinations were compiled from the results of the measurement. It includes an analysis of surfaces using optical profilometry before and after the tests.

## KEYWORDS

Optomechanical assembly, coefficient of friction, pin-on-plate, dry sliding friction, wear



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MOŘICKÝ, Ondřej. *Tření mezi materiály pro konstrukci optomechanických prvků*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124571>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Petr Šperka, Ph.D.





## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl rád poděkovat panu Ing. Petru Šperkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady, připomínky a vedení experimentů. Další poděkování patří Ing. Pavlu Kajnarovi, Ph.D. z firmy Meopta – optika, s.r.o. za pomoc s realizací výroby, ochotu a maximální flexibilitu při řešení problémů. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Petra Šperky, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Kontakt reálných těles	14
2.1.1	Index plasticity	15
2.2	Opotřebení	16
2.2.1	Adhezivní opotřebení	16
2.2.2	Abrazivní opotřebení	17
2.3	Analýza povrchu	18
2.3.1	Povrch z hlediska topografie	18
2.3.2	Optická profilometrie	19
2.4	Měření koeficientu tření a opotřebení	19
2.4.1	Přístroje a metody měření tření	19
2.4.2	Metoda pin-on-plate	20
2.4.3	Další metody	20
2.5	Přehled zkoumaných materiálů	21
2.5.1	Slitiny hliníku (EN AW-6061-T651)	21
2.5.2	Povrchové vrstvy na slitinách hliníku	21
2.5.3	Nerezové oceli (1.4301 a 1.4057)	23
2.5.4	Galling	24
2.5.5	Titanové slitiny (Ti-6Al-4V – Titan Grade 5)	25
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>26</b>
3.1	Analýza problému	26
3.2	Cíl práce	26
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>27</b>
4.1	Experimentální zařízení	27
4.1.1	Optický profilometr Bruker Contour GT-X8	27
4.1.2	Tribometr Bruker UMT TriboLab	27
4.2	Návrh provedení experimentu	28
4.3	Testované materiály	29
4.3.1	Slitina hliníku EN AW-6061-T651	29
4.3.2	Nerezové oceli	29
4.3.3	Titanová slitina Ti-6Al-4V	29

4.4	Průběh a podmínky experimentu	29
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>31</b>
5.1	Vyhodnocení koeficientu tření a opotřebení	31
5.2	Vliv rychlosti	35
5.3	Vliv normálové síly	36
5.4	Vliv počtu provedených cyklů	36
5.5	Porovnávací tabulka	37
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>43</b>
9.1	Seznam použitých zkratk	43
9.2	Seznam použitých veličin	43
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>44</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>46</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>47</b>
12.1	Výkresy	47

# 1 ÚVOD

Při návrhu přesných optomechanických sestav, především uzlů, kde dochází ke vzájemnému pohybu jednotlivých komponent, je v dnešní době již samozřejmostí zajištění spolehlivé funkce. V těchto uzlech dochází k třecím procesům. Jedná se většinou o plochy sloužící k justáži, tj. nastavení optických elementů do požadované polohy. Dochází zde většinou k provozu za sucha s nižšími zátěžemi, zato s požadavky minimálního opotřebení. Konstrukteři se v těchto kontaktech často setkávají s problémy, které mohou mít za následek např. špatný chod, či zadření a zamezení pohybu komponent. K tření dochází kromě jiného na čele objímek čoček, v závitech apod.

Teoretické hodnoty součinitele tření, vycházející mnohdy z obecných přehledů materiálových charakteristik, mohou být spíše orientační a pro dané aplikace nevyhovující. Tření není do značné míry záležitostí materiálu, ale právě systému, ve kterém k němu dochází. Vstupuje do něj mnoho parametrů, jako je drsnost povrchu, velikost zatížení, rychlost posuvu kontaktních ploch apod. Může být také razantně ovlivněno vrstvou oxidů na povrchu vytvořených, povrchovou úpravou, tvrdostí apod. U stejného materiálu může koeficient tření nabývat velmi odlišných hodnot. Často se během výroby setkáváme s problémy, kdy v některých případech systém funguje bezproblémově, jindy jsou třecí síly vysoké a jeho funkce je omezena. Třecí procesy probíhají současně s procesy opotřebení a navzájem se ovlivňují.

Motivací této práce je vytvoření základního přehledu v oblasti tření mezi materiály používanými pro optomechanické sestavy. Typickými materiály pro konstrukci optomechanických sestav jsou hliníkové slitiny a nerezové oceli. V současné době je doprovází také titanové slitiny, jejichž aplikace se stále rozšiřují.

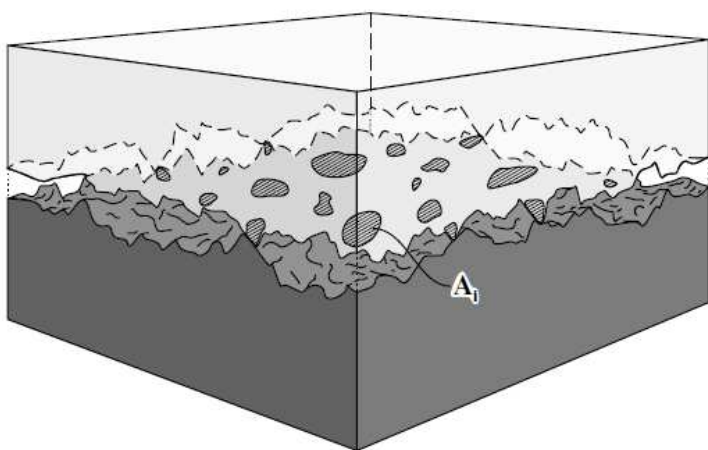
## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Studium tření mezi materiály si žádá pochopení základních principů, ke kterým dochází při dotyku pevných těles. Žádné reálné těleso není dokonale hladké a rovné, a je třeba na něj pohlízet jako na neideální. Tribologické procesy mezi konkrétními povrchy jsou ovlivněny kombinací materiálů, okolním prostředím, možnou přítomností třecích těles a dalšími podmínkami, za kterých ke tření dochází.

### 2.1 Kontakt reálných těles

Přibližují-li se k sobě dva povrchy, dojde nejdříve k prvnímu dotyku, při kterém je vymezena jejich vzájemná poloha. Místo styku představují nejvyšší výčnělky na povrchu součástí. Jsou ovšem malé, takže při zatěžování v těchto místech vzniká velký tlak, který má za následky elastickou a plastickou deformaci. Zvětšuje-li se zatěžující síla, do kontaktu přicházejí i další místa povrchu, a to tak dlouho, než vznikne dostatečně velká plocha styku, která působící zatížení unese [1].

Drsnost povrchu omezuje kontakt mezi tělesy na velmi malou část zdánlivé kontaktní plochy. Ke skutečnému kontaktu dochází pouze v nejvyšších místech, kde pozorujeme extrémní hodnoty napětí. Tato místa společně tvoří oblast, jejíž obsah je jen zlomkem obsahu celkové plochy vycházející z geometrie tělesa. Reálná oblast styku je tvořena z mnoha mikro oblastí kontaktu. Pokud je zatížení zvětšeno, kontaktních plošek přibývá a celková plocha styku se zvětšuje [2]. Reprezentace kontaktu reálných těles je schematicky znázorněna na Obr. 2-1.



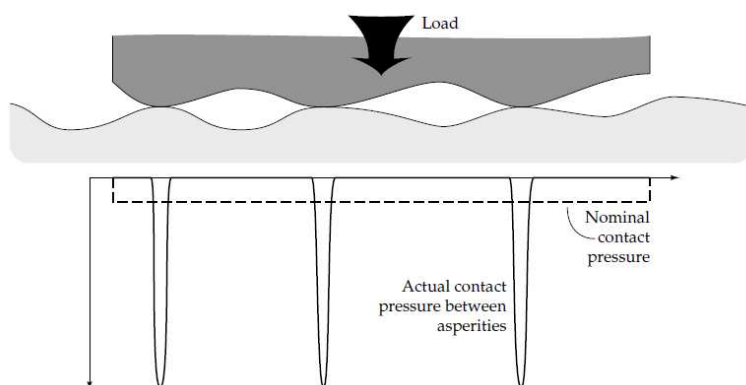
Obr. 2-1 Skutečná plocha kontaktu drsných povrchů [2].

Velikost celkové plochy kontaktu je potom dána vztahem

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_i, \quad (1)$$

kde  $A_r$  je celková plocha kontaktu,  $n$  je počet malých plošek a  $A_i$  plocha dílčí oblasti kontaktu.

Kontaktní napětí, situované do nejvyšších bodů na povrchu, je vysoké a v mnoha případech tak může v těchto místech způsobit plastickou deformaci. Schéma rozložení napětí lze pozorovat na Obr. 2-2.



Obr. 2-2 Kontaktní napětí v místech styku [2].

V místech kontaktu se neobjevují pouze plastické deformace, ačkoliv se to dříve předpokládalo, ale některé deformace mohou být zcela elastické [4]. Vztahy mezi kontaktní plochou a zatížením jsou významně důležité, protože mají vliv na tření a opotřebení. Velikost kontaktní plochy je funkcí normálového zatížení.

### 2.1.1 Index plasticity

Index plasticity (Plasticity index)  $\Psi$  popisuje, zda jsou kontakty především v elastickém nebo plastickém režimu. Slouží k predikci rozsahu plastické deformace vrcholů. Byl zaveden za účelem vyhodnocení důležitosti drsnosti kontaktu nebo záběrových účinků na valivých či kluzných kontaktních plochách [10,11].

Je funkcí tvrdosti ( $H$ ), Youngova modulu ( $E$ ), Poissonova čísla ( $\mu$ ), standardní odchylky výšky vrcholů ( $\sigma^*$ ) a středního poloměru zakřivení vrcholů ( $\beta$ ) [7,11]

$$\Psi = \frac{E'}{H} \left( \frac{\sigma^*}{\beta} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$\text{kde } E' = E / (1 - \mu^2). \quad (3)$$

Pokud index plasticity nabývá hodnoty pod 1, objevuje se hlavně elastická deformace. Hodnoty větší než 3 indikují plastické kontakty [7].

## 2.2 Opotřebení

Třecí procesy jsou často doprovázeny tvorbou opotřebení. To může být definováno jako nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buďto vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává. Projevuje se odstraňováním nebo přemísťováním částic hmoty z funkčního povrchu mechanickými účinky. Tento jev může být v některých případech doprovázen i jinými vlivy, například chemickými, elektrochemickými apod. U opotřebení rozlišujeme šest základních druhů: abrazivní, adhezivní, erozivní, únavové, kavitační a vibrační [1].

Tvorba opotřebení má vliv na tření mezi součástmi a může negativně ovlivnit jejich chování v provozu. Opotřebení je obecně důsledkem přímé interakce mezi materiály při přenosu zatížení a za relativního pohybu povrchů.

Tření a opotřebení jsou současně probíhající děje a navzájem se ovlivňují. Vysoké opotřebení, stejně tak vysoké tření, je výsledkem přímých interakcí. Tvorba opotřebení může vést ke zvyšování třecích sil, nebo v některých systémech naopak k jejich snižování.

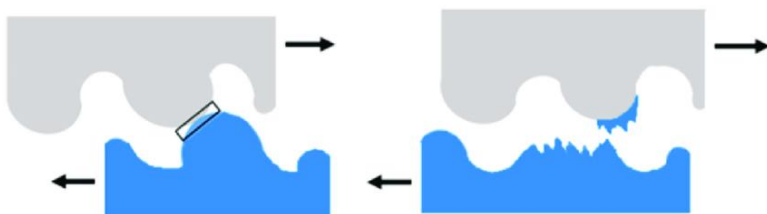
### 2.2.1 Adhezivní opotřebení

Jedná se o nejčastější formu opotřebení a dochází k němu běžně při bezprostředním styku kovu s kovem [5]. Jeho podstatou je vznik mikrosvarů mezi vrcholky nerovností obou povrchů, jejich následné porušování a vytrhávání částic materiálu z povrchů.

Adhezivní opotřebení charakterizují dva režimy, mírný a intenzivní. Kritickými projevy adhezivního opotřebení mohou být galling (blíže v další kapitole), scruffing (zadirání) a seizure (zadření). Kovy jsou zvláště náchylné k tomuto opotřebení, a proto je třeba jim věnovat pozornost. Nejméně příznivá situace nastává v případě kombinace stejných a čistých kovů. Pro zamezení přímého kontaktu povrchů se používá mazivo s určitým stupněm separace. Pokud mazivo není k dispozici, je přilnavost kluzných povrchů a jejich následné opotřebení nevyhnutelné [2]. Je však třeba zmínit, že bez maziva se na povrchu kovů tvoří pasivační vrstvy oxidu, které přímé interakci kovu do určité míry zabraňují.



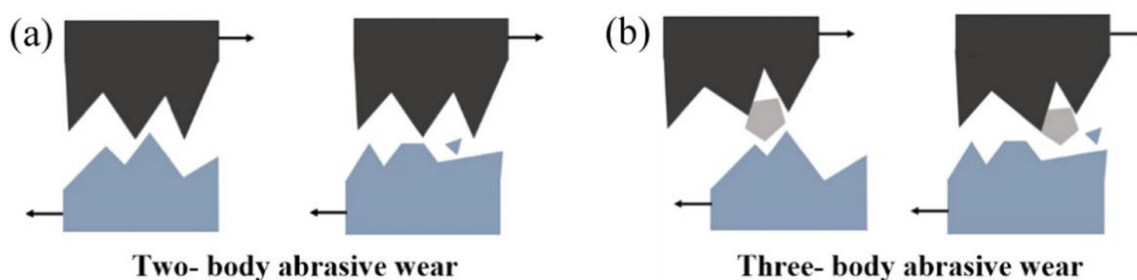
Ke snižování adheze přispívá přítomnost kontaminačních vrstev kyslíku, vody a oleje, stejně tak zvyšující se drsnost a tvrdost styčných ploch [2]. Kromě ušlechtilých kovů, jako je zlato a platina, jsou všechny ostatní kovy vždy pokryty filmem oxidů, pokud je přítomen v nezreagované formě v oxidační atmosféře. I přesto, že tloušťka oxidového filmu často nabývá hodnot v pouhých jednotkách nanometrů, což vede k jeho neviditelnosti a povrch tak vypadá leskle a čistě, má tento film schopnost zabraňovat skutečnému kontaktu mezi kovy a bránit tvorbě opotřebení [3].



Obr. 2-3 Adhezivní opotřebení [6].

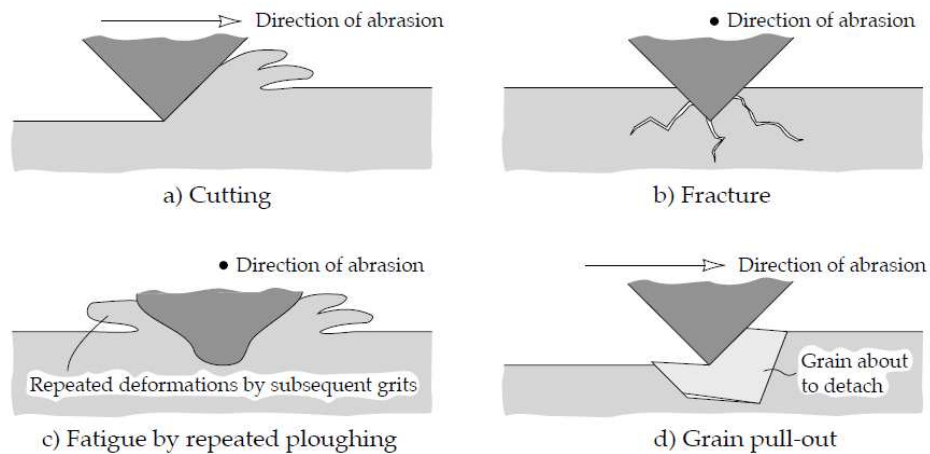
## 2.2.2 Abrazivní opotřebení

K abrazivnímu opotřebení dochází vždy, když je pevné těleso zatíženo částicemi materiálu s vyšší tvrdostí. Tento způsob tvorby abrazivního opotřebení se nazývá „two-body“. Pokud je opotřebení tvořeno důsledky přítomnosti dalších abrazivních částic, mluvíme o něm jako o „three-body“. Rozdíl mezi těmito dvěma způsoby je zobrazen na Obr. 2-4. Problémem označení „abrazivní opotřebení“ je, že zcela nepopisuje použité mechanismy opotřebení. Ve skutečnosti se skládá z několika vzájemně působících mechanismů, které však mají odlišnou charakteristiku [1, 2].



Obr. 2-4 Abrazivní opotřebení tvrdším materiálem (a) a přítomností dalších částic (b) [6].

Původně se předpokládalo, že abrazivní opotřebení, způsobené zrny nebo tvrdými nerovnostmi, se podobá řezání sérií řezných nástrojů nebo pilníkem. Mikroskopické zkoumání však odhalilo, že proces řezání je pouze aproximován nejostřejšími zrny a dochází k mnoha dalším nepřímým mechanismům. Mezi nejčastější patří řezání, křehký lom, únava opakovaným vyrýváním a vytržení zrn (Obr. 2-5) [2].



Obr. 2-5 Různé mechanismy abrazivního opotřebení [2].

## 2.3 Analýza povrchu

### 2.3.1 Povrch z hlediska topografie

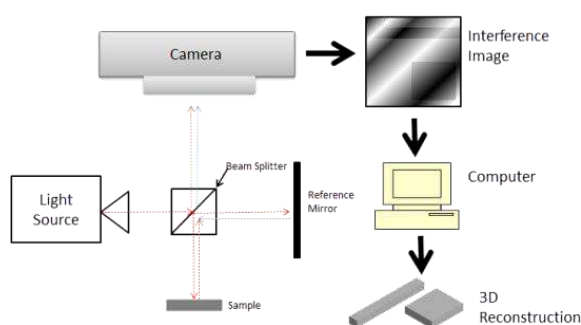
Podíváme-li se blíže na povrchy opracovávané běžnými obráběcími metodami, zjistíme, že vykazují určité charakteristické znaky nerovností, označované jako textura povrchu. Její součástí je drsnost a zvlnění následky odebrání materiálu [7].

Výstupky a prohlubně, které mají určitou výšku, tvar, vzdálenost mezi vrcholy apod., mohou být analyzovány různými způsoby. Mezi základní patří pozorování běžnými mikroskopy, skenování elektronovými mikroskopy nebo nasnímání povrchu profilometry. Běžný mikroskop nám může poskytnout užitečné informace ohledně směru a vzdálenosti vrcholů. Podrobné informace o jejich výšce jsou však touto metodou téměř nezjistitelné. Elektronový mikroskop už nám poskytuje důležité informace o topografické struktuře. Jeho výhodou je vysoké příčné rozlišení a většinou se používá pro zjištění detailů struktury povrchu [7]. Pomocí profilometrie potom můžeme provést komplexní 3D nasnímání povrchu, realizovatelné buďto mechanickou, nebo optickou cestou.

## 2.3.2 Optická profilometrie

Optická profilometrie je bezkontaktní metoda sloužící k získání topografických dat z povrchu. Na rozdíl od mechanické profilometrie, postavené na kontaktním snímání pomocí hrotu, využívá optická profilometrie světelného svazku. Klíčovou součástí této techniky je směřování světelného svazku tak, aby bylo možné detekovat strukturu povrchu ve 3D. Existuje několik různých technik, které jsou využívány, např. nízkokoherentní interferometrie, konfokální mikroskop, laserová triangulace, digitální holografie apod. [8,9].

Vertikální rozlišení se obvykle pohybuje v řádech nanometrů, laterální rozlišení je nižší, z důvodu limitovaných možností na straně vlnové délky nebo zdroje nekoherentního světla. Rychlost skenování je určována světlem odraženým od povrchu, a je proto vyšší než u kontaktních profilometrů. Protože se jedná o bezkontaktní metodu, je zde větší bezpečnost proti poškození vlivem kontaktního snímání povrchu nebo neopatrnosti obsluhy [9].



Obr. 2-6 Schéma optického profilometru [8].

## 2.4 Měření koeficientu tření a opotřebení

### 2.4.1 Přístroje a metody měření tření

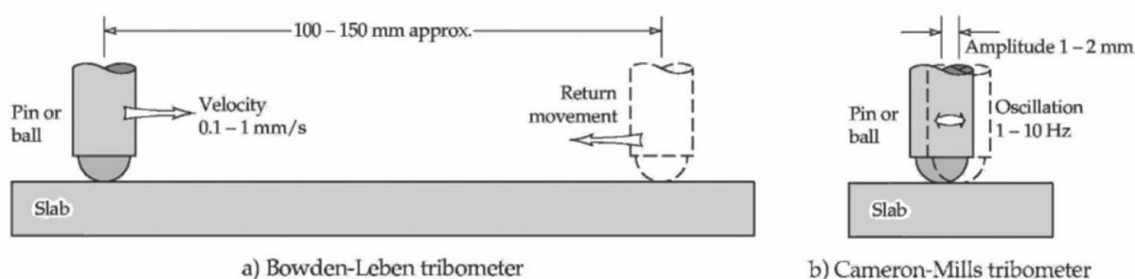
Způsobů, jak zjistit koeficient tření je hned několik. Zkoušky spočívají v měření zatěžující síly v normálovém směru a síly třecí na ni kolmé. U měření může být kladen požadavek na konfiguraci tak, aby se přiblížila skutečným aplikacím a výsledky byly maximálně relevantní. Obecně se přístroje na měření tření nazývají tribometry a mohou mít různou podobu.

## 2.4.2 Metoda pin-on-plate

Tato metoda, někdy také nazývaná pin-on-slab, spočívá ve vratném pohybu pinu vůči ploché desce. Pin může mít dvě podoby, a to buď válcový kolík (dotyk konformních ploch) nebo kulička (dotyk nekonformních ploch). Asi nejznámějšími aplikacemi metody pin-on-plate jsou tribometry typu Bowden-Leben a Cameron-Mills [4].

Bowden-Leben tribometr se vyznačuje relativně malou kluznou rychlostí (0,1 až 1 mm/s) a delší dráhou, zatímco typ Cameron-Mills využívá krátké amplitudy (1 až 2 mm) a oscilace s frekvencí 1 až 10 Hz.

Typ Cameron-Mills má výhodu rychlého dosažení ustáleného stavu míry tření a opotřebení, který se liší od počátečního stavu. Zatímco Bowden-Leben má snahu vyhodnocovat tření a opotřebení pouze při počátečních fázích, protože pin koná méně přejezdů po stejné dráze za stejnou jednotku času. Zvýšení povrchové teploty je potlačeno omezenými rychlostmi posuvu v obou zařízeních [4]. Rozdíl těchto dvou zařízení je schematicky zobrazen na Obr. 2-7.



Obr. 2-7 Rozdíl mezi metodami lišící se frekvencí a amplitudou [4].

Pin může mít podobu kuličky nebo válcového kolíku. Při použití kuličky dochází ke styku ideálně v jednom bodě a můžeme teoreticky vypočítat kontaktní tlak dle Hertzovy teorie. Při použití válcového kolíku je tlak teoreticky rozdělen rovnoměrně po ploše. V praxi je soustředěn hlavně do hran a nerovností na povrchu.

## 2.4.3 Další metody

Existuje také mnoho dalších metod, z nichž k nejznámějším patří tzv. pin-on-disk metoda, spočívající v rotačním pohybu disku. Pin stojí pevně na svém místě, zatímco disk rotuje okolo své osy. Dochází k plynulému pohybu s nulovým zrychlením a nedochází ke směně směru pohybu.

## 2.5 Přehled zkoumaných materiálů

Mezi materiály, které budou předmětem experimentu, byly vybrány dvě nerezové oceli (1.4301 a 1.4057), slitina hliníku EN AW-6061-T651 a titanová slitina Ti-6Al-4V, Titan Grade 5.

### 2.5.1 Slitiny hliníku (EN AW-6061-T651)

Hliník a jeho slitiny nacházejí v posledních desítkách let uplatnění v téměř všech odvětvích průmyslu. Vytváří všestranný materiál vyznačující se především nízkou hmotností, dobrou pevností a obrobitelností. Oproti jiným kovům mají své výhody díky zlepšeným fyzikálním a mechanickým vlastnostem, jako je pevnost, houževnatost, odolnost proti otěru, rázu a korozi [11].

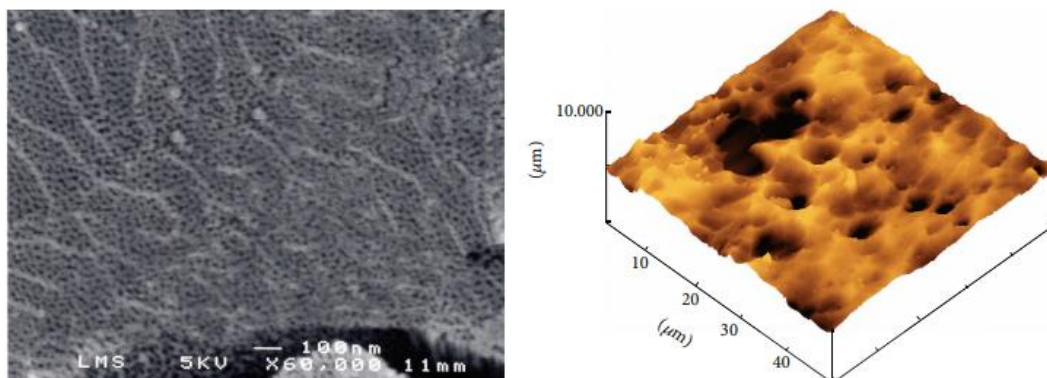
Hliníková slitina EN AW-6061 je jednou z nejvšestrannějších tříd tepelně zpracovatelných slitin hliníku. Slitiny série 6xxx jsou tepelně zpracovatelné a získávají svou pevnost díky legujícím prvkům (Mg a Si) a precipitačnímu vytvrzování. Přídavek v označení „-T651“ značí, že se jedná o tepelně zpracovanou slitinu v roztoku a následně vystavenou umělému stárnutí. Dosahuje se tím vyšší tvrdosti a pevnosti oproti neošetřeným slitinám.

Charakteristiky obrábění se mezi komerčně dostupnými slitinami poměrně liší, obecně lze však říct, že jsou lepší, než má železo, ocel nebo titan [11]. Také díky tomu jsou vhodné (a ve značné míře používané) pro optomechanické sestavy, kde je třeba zaručit požadovanou geometrickou přesnost, drsnost povrchů a nízkou hmotnost. K nevýhodám hliníkových slitin patří potom především po konstrukční stránce vysoká hodnota koeficientu teplotní roztažnosti.

### 2.5.2 Povrchové vrstvy na slitinách hliníku

Většina hliníků nepřichází ke konečné montáži v surovém stavu, ale je opatřena povrchovou úpravou. Pokud se máme zaměřit na tření mezi takto vyrobenými součástmi, je třeba si uvědomit, že k plošnému kontaktu bude docházet na povrchové vrstvě. Tření tak nebude do značné míry ovlivněno tribologickou charakteristikou slitiny, ale právě její povrchovou úpravou. Jednou z vrstev, která bude předmětem výzkumu, je anorganická anodická oxidace, často nazývaná jako eloxová vrstva.

Anodické vrstvy oxidu vzrůstají v mnoha inženýrských aplikacích z důvodu jejich vysoké tvrdosti a odolnosti vůči tepelným a korozivním vlivům v kombinaci s relativně nízkou hustotou. Vrstva anodického oxidu má porézní strukturu a sestává se hlavně z amorfního  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Díky pórovitosti může být vrstva anodického oxidu užitečná pro tribologickou aplikaci, především k udržení maziva a vytvoření samomazných struktur. Vědecky bylo prokázáno zlepšení tření a opotřebení eloxovaného hliníku pomocí plazmové elektrolytické oxidace, případně úpravou anodické struktury [12].

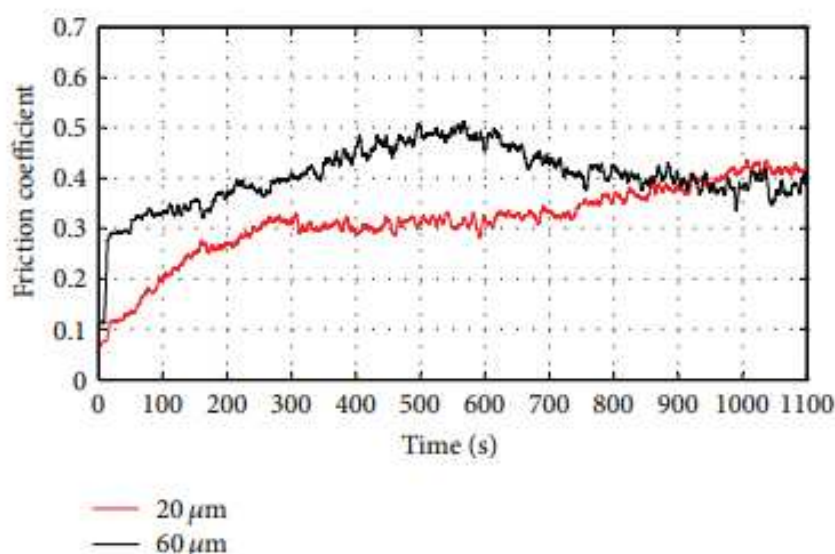


Obr. 2-8 Typická struktura anodické vrstvy [12].

Při průzkumu provedeném na anodické vrstvě na slitině Al5754 byl metodou ball-on-disk zkoumán vliv normálového zatížení, rychlosti a tloušťky anodické vrstvy [12]. Bylo zjištěno, že menší tloušťka (20  $\mu\text{m}$ ) je efektivnější a dosahuje nižších hodnot součinitele tření oproti silnější vrstvě (60  $\mu\text{m}$ ). Silné povlaky mají dlouhé a hluboké póry s otevřenější strukturou, kvůli dlouhé době ponechání v anodické lázni a dochází u nich také k výrazné deformaci pod kontaktním tlakem. Ukázalo se také, že povlaky s menší tloušťkou jsou účinnější z hlediska tření, poškrábání a odolnosti proti nárazu [13].

Koeficient tření se zvyšuje se zatížením a rychlostí posuvu. Zvýšení těchto dvou parametrů umožňuje urychlení třecího procesu a vývoj koeficientu tření, který plynule stoupá a po delší době dojde k jeho ustálení na konstantní hodnotě. Opotřebení se projevuje značným vyleštěním povrchu, které je způsobeno plastickou deformací anodické vrstvy. To je doprovázeno mikrotrhlinami a oddělováním opotřebovaných částic. Póry jsou deformovány a vyplněny odbroušenými částicemi. Povrch je tak po testu hladký, vyleštěný [12].

Vývoj součinitele tření, experimentálně zjištěný v práci [12], můžeme sledovat na Obr. 2-9



Obr. 2-9 Vliv tloušťky anodické oxidace na koeficient tření. Metoda ball-on-disk;  $F = 1 \text{ N}$ ;  $n = 100 \text{ min}^{-1}$  [12].

### 2.5.3 Nerezové oceli (1.4301 a 1.4057)

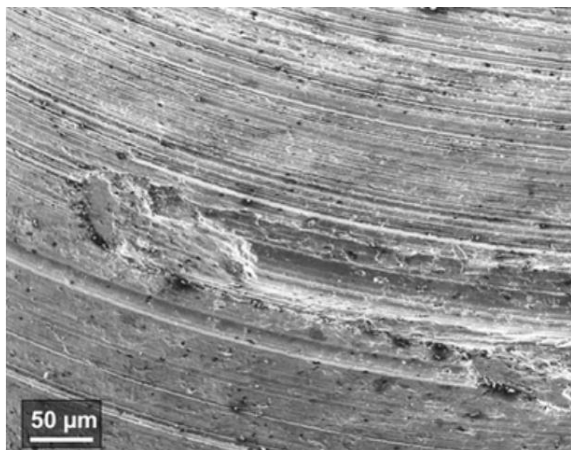
U nerezových ocelí může být stanovení koeficientu tření za sucha problematické, především z důvodu intenzivní tvorby opotřebení a vyšší adhezivní interakci. K testům byly vybrány dvě nerezové oceli, austenitická 1.4301 (AISI 304) a martenzitická 1.4057 (AISI 431).

První zmiňovaná, austenitická chrom-niklová ocel AISI 304, je hojně používaným materiálem. Je korozivzdorná, odolává vodě a slabším kyselinám. Díky nízkému obsahu uhlíku je dobře svařitelná, není však kalitelná [16].

Martenzitické oceli, jako je AISI 431, jsou optimalizovány pro vysokou tvrdost a další vlastnosti mají do určité míry omezeny. Jejich tvrdost lze upravit tepelným zpracováním. Obecně mají tyto oceli nižší odolnost proti korozi než běžné austenitické. AISI 431 je magnetická, a kvůli vysokému obsahu uhlíku je jen těžko svařitelná. Po zušlechtění může dosahovat pevnosti v tahu až 1000 MPa [17].

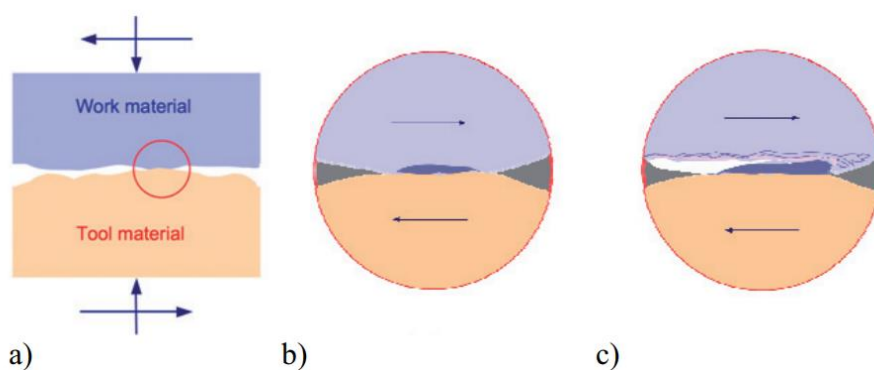
## 2.5.4 Galling

Při vysokých zatíženích, kdy dochází k silné interakci na větší kontaktní ploše, se může objevit hrubé poškození povrchu, které má za následek zadření a zamezení pohybu součástí. Tento jev hrubého poškození se obvykle označuje jako „galling“ a může k němu dojít už po malém množství cyklů pohybu mezi spolu zabírajícími povrchy. Souvisí s rýhováním, vytahováním částic z jednoho povrchu a jejich udržení na povrchu druhém. Typickými příklady z praxe, kde se s gallingem můžeme setkat, jsou šrouby, především z nerezových ocelí.



Obr. 2-10 Příklad gallingu [19].

Galling je projevem intenzivního adhezivního opotřebení. Vlastnosti, které gallingu napomáhají, jsou vysoká tažnost a deformační zpevňování. Obojí vede na postupnou tvorbu tvrdších a opakovaně plasticky převářených kumulací materiálu, které jsou vystaveny intenzivní interakci během kontaktního procesu. Urychlení procesu dále napomáhá pomalá rychlost posuvu, zvyšování teploty a také snižování vůli v sestavách [14, 15].



Obr. 2-11 Princip tvorby gallingu. a) Dva materiály proti sobě pod normálovým zatížením. b) Přilnutí jednoho materiálu k druhému. c) Další tváření může vytvořit škrábance a porušení [19].

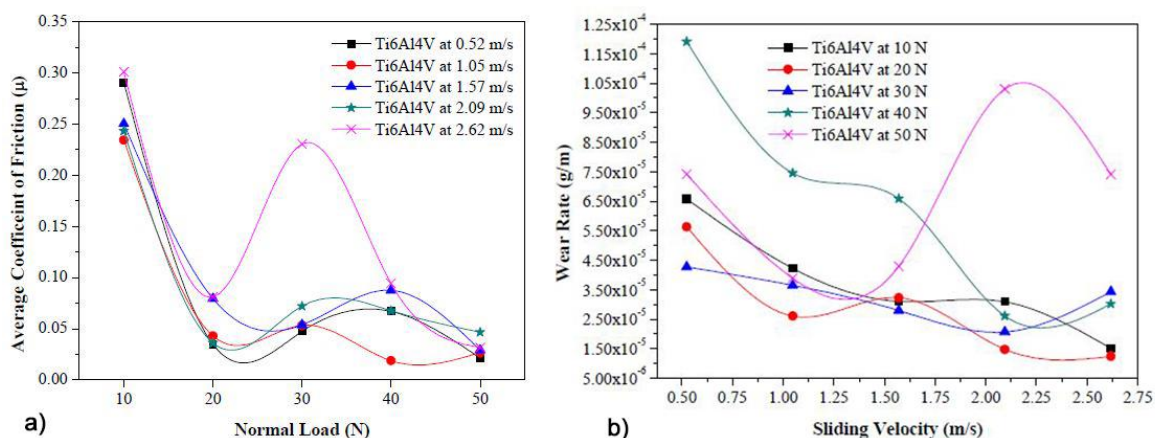


Existuje několik možností, jak gallingu předcházet. Na jeho tvorbu má vliv tvrdost. Pokud je povrch jedné součásti opatřen povrchovou úpravou s vyšší tvrdostí, doprovázející změnou chemické podstaty povrchu v kontaktu (např. tvrdochrom, nitridování, cementování), má větší odolnost proti gallingu. Doporučuje se, aby spolu zabírající povrchy měly tvrdost rozdílnou alespoň o 50 HB. Také je možné předpokládat, že povrchy s velmi nízkou drsností (většinou leštěné/lapované;  $R_a < 0,25 \mu\text{m}$ ), případně naopak s vysokou drsností ( $R_a > 1,5 \mu\text{m}$ ), mají vyšší tendenci ke gallingu. Další možností je ošetření povrchu speciálními povlaky, jako jsou Diamant-Like-Carbon (DLC), TiN, chrom aj., případně použití maziva [15].

## 2.5.5 Titanové slitiny (Ti-6Al-4V – Titan Grade 5)

Díky svým vlastnostem, jako je vysoká pevnost, tvárnost, odolnost proti únavě a výborná odolnost proti korozi, představují slitiny titanu atraktivní materiál pro využití v mnoha odvětvích průmyslu. Spolu s dobrým poměrem pevnosti vůči hmotnosti jsou vhodné k aplikacím, kde je kladen požadavek na ušetření váhy výrobku. Protikladem k výhodnosti použití titanových slitin je jejich vyšší cena a horší obrobiteľnosť.

Při výzkumu [18], který měl za cíl objasnit chování titanové slitiny Ti-6Al-4V při suchém tření, byl sledován vliv normálového zatížení, rychlosti posuvu a ujeté dráhy. Experiment zahrnoval vzájemný kontakt titanové slitiny Ti-6Al-4V proti oceli EN31 (51 HRC). Bylo zjištěno, že míra opotřebení klesá se zvyšující se rychlostí posuvu a snižující se normálovou silou, až na několik výjimek. Průměrný koeficient tření se zvyšuje spolu s ujetou dráhou za všech hodnot normálové síly (10 až 50 N) a za každé rychlosti, opět s několika výjimkami.



Obr. 2-12 Koeficient tření v závislosti na normálové síle (a); Míra opotřebení v závislosti na rychlosti (b) [18].

Opotřebení u titanové slitiny Ti-6Al-4V je hlavně adhezivního původu. U výše zmíněného testu se objevuje také three-body abrazivní opotřebení důsledky přítomnosti tvrdších částic.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Vývoj součinitele tření je závislý na mnoha faktorech popsaných v teoretické části. Patří mezi ně materiálové konfigurace, drsnost povrchu, povrchové vrstvy, velikost zatěžujících sil, kinematické podmínky experimentu, okolní atmosféra apod. Z důvodu těchto vlivů je třeba zaměřit se na konkrétní materiálové konfigurace a podmínkami experimentu se co nejvíce přiblížit podmínkám v praxi. Do práce byly vybrány vzorky běžně používaných materiálů v oblasti optomechanických sestav. Byly opatřeny standartními povrchovými úpravami a vyrobeny obvyklými technologiemi. Mezi materiály patří slitiny hliníku AW-6061-T651 opatřeny anodickou oxidací (černou a transparentní), dvě nerezové austenitické oceli (1.4301 a 1.4057) a slitina titanu Ti-6Al-4V. Je sledováno chování tření jak mezi stejnými materiály, tak napříč jejich kombinacemi. Výstupem práce je podrobná analýza vývoje součinitele tření u zkoumaných vzorků za různých podmínek měření, stanovení odlišnosti a ověření opakovatelnosti.

### 3.2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je experimentální studium součinitele tření v kombinaci různých konstrukčních materiálů, používaných při konstrukci optomechanických zařízení. Experimenty budou provedeny na vzorcích s různou drsností, opatřené různými povrchovými vrstvami, za různých kinematických podmínek, a s cílem objasnit vliv jednotlivých parametrů. Pro splnění uvedeného cíle je potřeba splnění následujících dílčích cílů:

#### **Dílčí cíle:**

- Návrh a výroba vzorků.
- Analýza topografie zkoumaných vzorků, určení drsnosti.
- Stanovení kinematických podmínek experimentů.
- Měření koeficientu tření jednotlivých konfigurací metodou pin-on-plate.
- Analýza a vyhodnocení získaných dat.

## 4 MATERIÁL A METODY

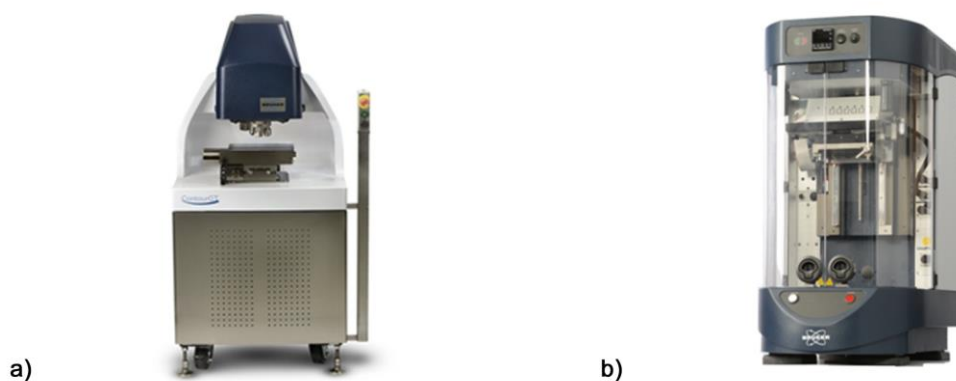
### 4.1 Experimentální zařízení

#### 4.1.1 Optický profilometr Bruker Contour GT-X8

Pro naskenování a vyhodnocení drsnosti povrchu byl použit 3D optický profilometr Contour GT-X8 německé firmy Bruker (Obr. 4-1a). Ten poskytuje bezkontaktní 3D měření morfologie povrchu pro laboratorní výzkum a kontrolu výrobních procesů. Jedná se o pokročilý interferometrický profilometr a obsahuje vlastní ovládací software Vision64. Nabízí použití zvětšení 2x, 5x, 10x, 20x, 50x a vertikální rozlišení 0,01 nm. Skenovací rozsah v ose z je 0,1 nm až 10 mm a dosahuje maximální skenovací rychlosti  $92,5 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  [20].

#### 4.1.2 Tribometr Bruker UMT TriboLab

Měření koeficientu tření probíhalo na zařízení UMT TriboLab od společnosti Bruker (Obr. 4-1b). Jedná se o univerzální tribometr, na kterém lze provádět řadu tribologických testů. Systém má univerzální základnu, která může být vybavena řadou hnacích modulů simulujících rotační, lineární nebo kmitavé pohyby. Horní vozík nabízí uchycení různých snímačů síly. Laboratoř ÚK je vybavena dvěma snímači s maximálním zatížením 1000 N a 50 N. Vertikálním posuvem s rozlišením polohy  $0,25 \mu\text{m}$  a rychlostí v rozsahu od  $0,002 \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $10 \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  lze simulovat zatížení ve vertikálním směru. Snímač má zpětnou odezvu, takže lze relativně přesně nastavit velikost normálové síly. Zařízení je řízeno pomocí počítače programem UMT, který umožňuje sepsat skript obsahující postup a zatěžující podmínky jednotlivých testů. Je pořízen záznam vybraných parametrů testů a následně vyhodnocen v softwaru UMT Viewer [20].

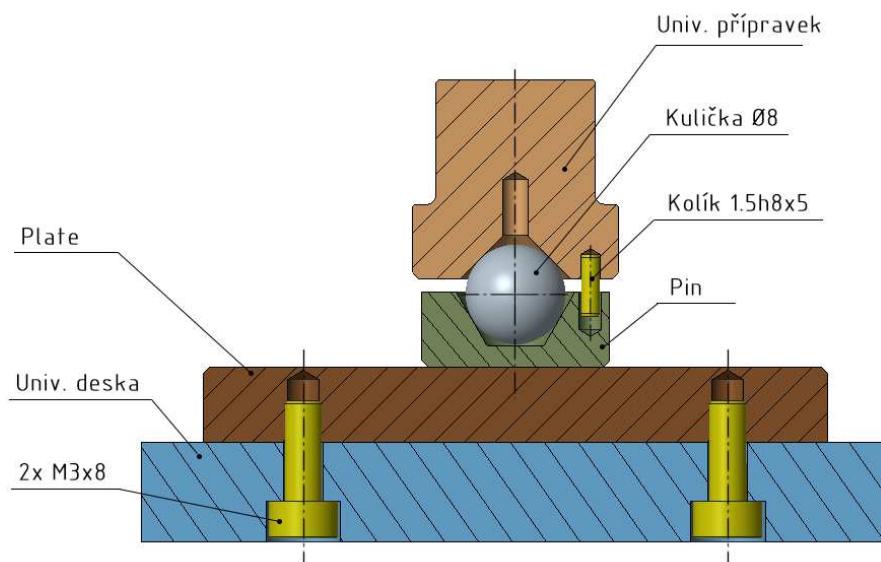


Obr. 4-1 Optický profilometr Bruker Contour GT-X8 (a); Univerzální tribometr Bruker UMT Tribolab (b) [20].

## 4.2 Návrh provedení experimentu

Cílem návrhu vzorků je možnost integrace na tribometr UMT TriboLab pro zkoumání chování různých kombinací materiálů. Byla zvolena konfigurace pin-on-plate, jako nejreprezentativnější metoda pro dané aplikace. Vzorky se skládají z pinu, uchyceném v horní části tribometru (slideru), který je vybaven snímačem zatížení, a z desky (plate), která je upnuta v dolní části (lower drive).

Z důvodu ohybové tuhosti snímače, která nezaručuje realizaci experimentu mezi rovnoběžnými plochami, je třeba lineární pohyb přenášet přes kuličku o průměru 8 mm. Ta eliminuje možné naklonění snímače. Je vlepena pomocí epoxidového lepidla do univerzálního držáku a volně umístěna do kuželového zhloubení v pinu. Řešení je schematicky znázorněno na Obr. 4-2.



Obr. 4-2 Řez navrženou konfigurací.

Válcový kolík o průměru 1,5 mm nalisovaný v univerzálním přípravku omezuje rotaci pinu okolo své osy při lineárním pohybu do stran. Díra v pinu o průměru 1,8 mm potom garantuje dostatečnou vůli umožňující potřebné naklonění snímače.

Deska (plate) je k přístroji upnuta pomocí univerzální desky. Všechny hrany kontaktních ploch jsou opatřeny sražením o velikosti  $0,5 \times 45^\circ$  z důvodu redukce koncentrace napětí (a tím i tření). Vnější průměr pinu je 15 mm. Po odečtení sražení je velikost průměru nominální kontaktní plochy 14 mm. Deska má rozměry 50 x 20 mm, její plochu lze rozdělit na poloviny a využít ji tak pro dva experimenty.

## 4.3 Testované materiály

Pro test byly vybrány následující materiály s nejvíce používanými povrchovými úpravami. Vzorky byly vyrobeny běžnými metodami a postupy ve firmě Meopta – optika, s.r.o.

### 4.3.1 Slitina hliníku EN AW-6061-T651

Povrchu na vzorcích ze slitiny hliníku EN AW-6061-T651 bylo dosaženo broušením a následně byly povrchy opatřeny vrstvou anodické oxidace (eloxové vrstvy) dle normy MIL-A-8625, Typ 2, Třída 2. Anodická oxidace je anorganická a na rozdíl od organické se projevuje nižší pórovitostí. Tloušťka vrstvy na vzorcích dosahuje průměrně 15 mikronů. Eloxová vrstva je provedena ve dvou variantách zbarvení, v černé a transparentní barvě.

### 4.3.2 Nerezové oceli

U austenitické chrom-niklové oceli 1.4301 (AISI 304) je povrch pasivován dle normy ASTM-A-967. Řízenou pasivací je vytvořena ochranná vrstva na povrchu oceli, která chrání před přímou adhezivní interakcí materiálu. Martenzitická ocel 1.4057 (AISI 431) je v surovém stavu bez povrchové úpravy a tepelného zpracování. Textury povrchu je v obou případech opět dosaženo broušením.

### 4.3.3 Titanová slitina Ti-6Al-4V

U titanové slitiny Ti-6Al-4V je povrchu dosaženo frézováním (plate) a soustružením (pin). Na základě odlišných technologických podmínek obrábění jsou vyrobeny vzorky ve dvou variantách drsnosti povrchu a je sledován její vliv na vývoj koeficientu tření.

## 4.4 Průběh a podmínky experimentu

Jak již bylo zmíněno, při experimentech byla použita metoda pin-on plate. Cílem je zatížit pin vůči desce v normálovém směru, přičemž při vratném lineárním pohybu pinu v kolmém směru je sledována závislost normálové a třecí síly na čase.

V první fázi experimentu bylo třeba zjistit skutečnou drsnost povrchu, toho bylo dosaženo na optickém profilometru Contour GT-X8. Měření probíhalo v několika různých bodech. U broušeného a soustruženého povrchu je drsnost po celé ploše relativně konstantní. U frézovaných ploch se objevuje anizotropie povrchu. Drsnost je vyšší v ose stopy po nástroji a se vzdáleností od osy klesá.

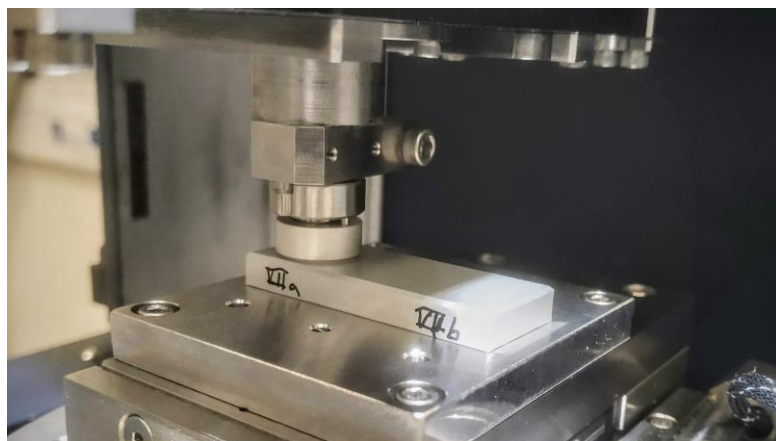
Po analýze povrchu vzorků byl stanoven postup a podmínky, za kterých bude měření probíhat. Bylo třeba volit podmínky tak, aby byly blízké použití v praxi a zaručily tak maximálně reprezentativní výsledky. Bylo voleno nižší zatížení v rozmezí 10 až 40 N a byl sledován jeho vliv. Dále byl sledován vliv rychlosti a vývoj koeficientu tření v závislosti na počtu provedených cyklů. Po prvotních úvahách podložených testem<sup>1</sup> byl zvolen univerzální postup, kterým byly analyzovány všechny materiály a jejich kombinace. Univerzální test obsahuje 5 fází a jeho podmínky jsou uvedeny v Tab. 4-1. K pohybu dochází na dráze 5 mm.

Tab. 4-1 Podmínky univerzálního testu

Fáze testu	Zatížení F [N]	Rychlost [mm/s]	Počet cyklů
1.	10	10	300
2.	10	0,1	2
3.	10	1	5
4.	20	10	10
5.	40	10	10

První fáze obsahuje 300 cyklů, během kterých dochází k záběhu součástí a stabilizaci vývoje koeficientu tření. Další fáze souží pro ověření vlivů rychlosti a zatěžující síly.

Experimenty probíhaly za laboratorní teploty 25 °C. Všechny vzorky byly před měřením očištěny za pomoci ultrazvukového čištění, aby se na povrchu nevyskytovaly žádné zbytky maziv, otisky prstů apod. a docházelo skutečně k suchému tření.



Obr. 4-3 Průběh měření v tribologické laboratoři ÚK.

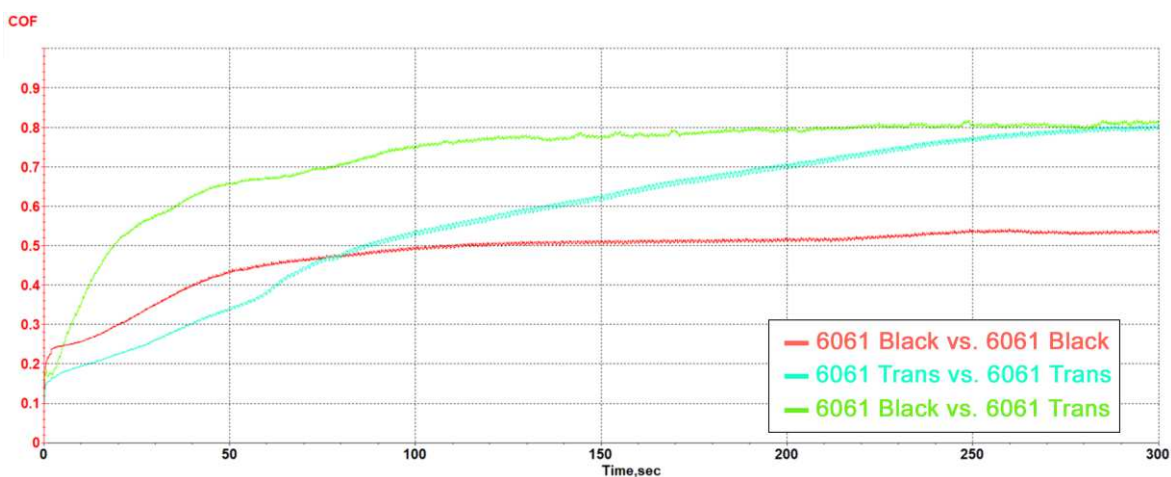
<sup>1</sup> Materiál EN AW-6061-T651 černý elox; F = 10 N; v = 10 mm/s

## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Vyhodnocení koeficientu tření a opotřebení

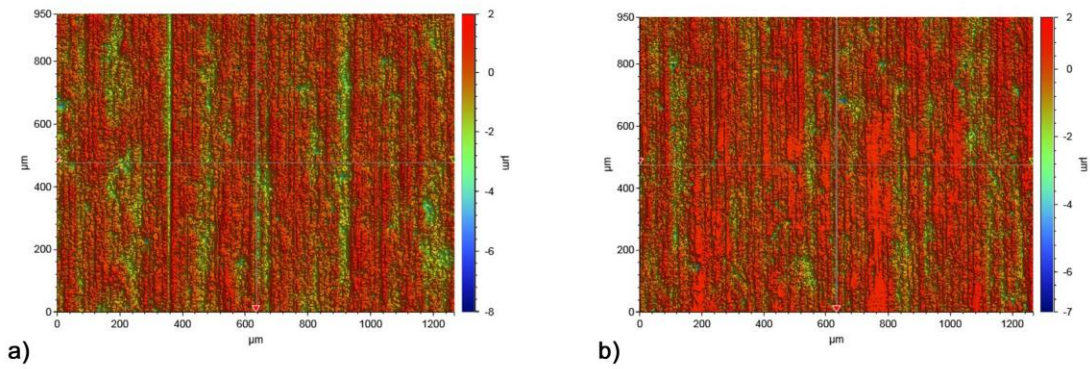
Během testu na tribometru byl veden záznam normálové a třecí síly, díky kterému byl v programu UMT Viewer sestaven graf závislosti koeficientu tření na čase, resp. počtu provedených cyklů. Dle předpokladů každý materiál vykazoval odlišné chování. Nejlepších třecích vlastností dosahují kombinace hliníkových slitin ve spojení s titanem nebo nerezovými oceli. Nejhůře jsou na tom vzájemné kombinace nerezových ocelí, kde se setkáváme s rychlým nástupem gallingu. Třecí procesy za sucha jsou natolik intenzivní, že dochází k opotřebení již po několika málo cyklech díky vysoké vzájemné interakci povrchů.

Naměřená data jsou zpracována v grafech a ukazují vývoj koeficientu tření během první fáze testu, tj. během 300 cyklů (dle Tab. 4-1). Po testech jsou vytvořeny snímky povrchů a některé příklady jsou interpretovány spolu s grafy.



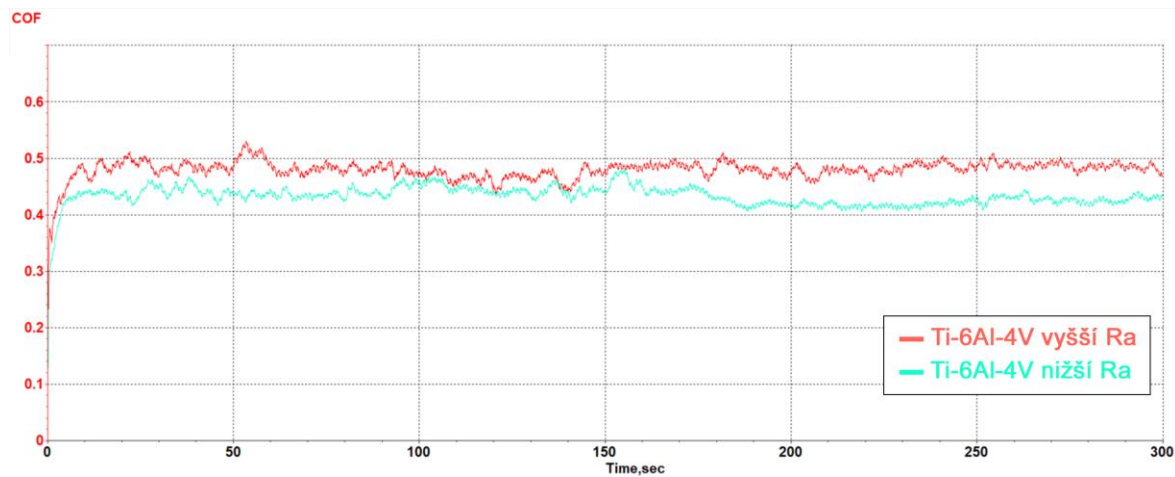
Obr. 5-1 Vývoj součinitele tření hliníkové slitiny 6061-T651 v černém a transparentním eloxu, včetně jejich kombinace.

U hliníkových slitin je vývoj koeficientu tření pozvolný, avšak dochází k jeho stálému nárůstu. Při pohledu na vzorky po testech se objevuje opotřebení vrcholků nerovností. Na pohled povrch vypadá lesklý. Ke koncentraci tření a opotřebení dochází po hranách pinu. Snímky povrchu hliníkové slitiny EN AW-6061-T651 v provedení černého eloxu jsou na Obr. 5-2.

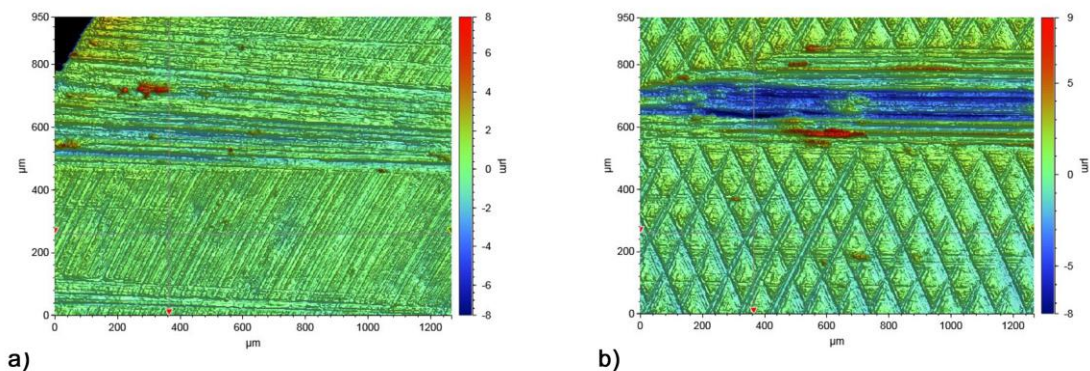


Obr. 5-2 Hliníková slitina 6061-T651 v černém eloxu před testem (a) a po testu (b).

U titanové slitiny Ti-6Al-4V byl sledován také vliv drsnosti povrchu. U drsnějších povrchů je koeficient tření vyšší než u povrchů s nižší drsností. V obou případech se objevují prvky adhezivního opotřebení (Obr. 5-4).

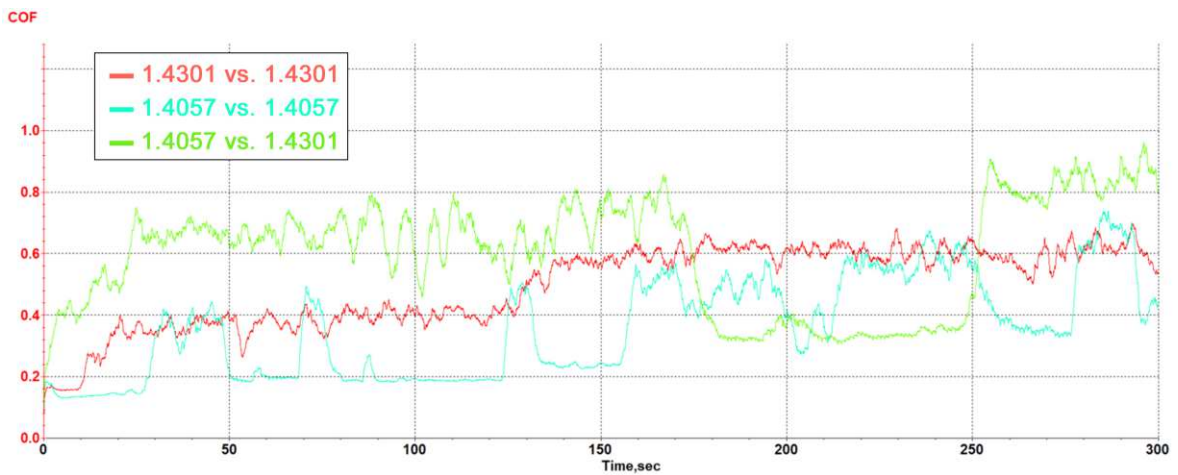


Obr. 5-3 Vývoj součinitele tření titanové slitiny Ti-6Al-4V (Nižší  $Ra_{pin} = 0,24$ ,  $Ra_{plate} = 0,41$ ; Vyšší  $Ra_{pin} = 1,34$ ,  $Ra_{plate} = 0,64$ ).



Obr. 5-4 Ti-6Al-4V po testu; a) Pin ( $Ra = 0,24$ ); b) Deska ( $Ra = 0,41$ ).

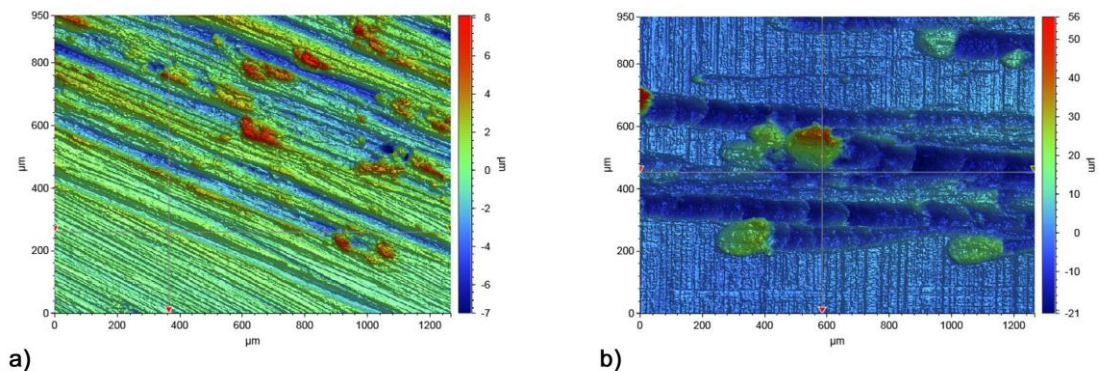




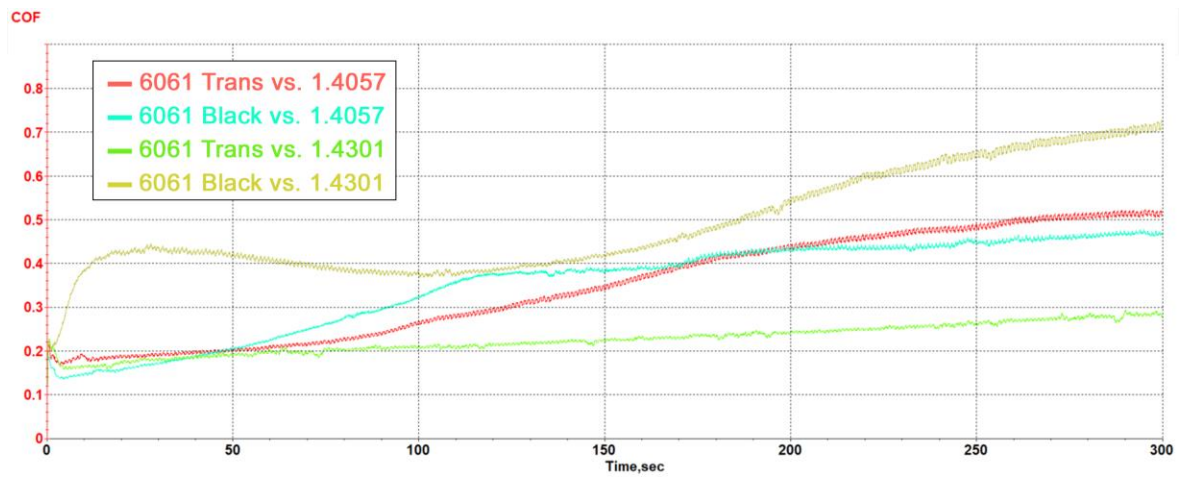
Obr. 5-5 Součinitel tření v závislosti na čase u nerezových ocelí.

U nerezových ocelí se dostáváme do problému se silnou vzájemnou interakcí povrchů. Ta má za následky vznik vysoké adheze, rychlé tvorby opotřebení a nestability koeficientu tření. K prvním známkám opotřebení došlo již po několika málo cyklech a v průběhu testu koeficient tření dosáhl v několika bodech i hodnoty přes 1. Z těchto důvodů není možné rozumně vyhodnotit koeficient tření. Je velmi nestabilní a může se v mnoha případech chovat odlišně.

Snímky opotřebení po testu jsou uvedeny na Obr. 5-6.

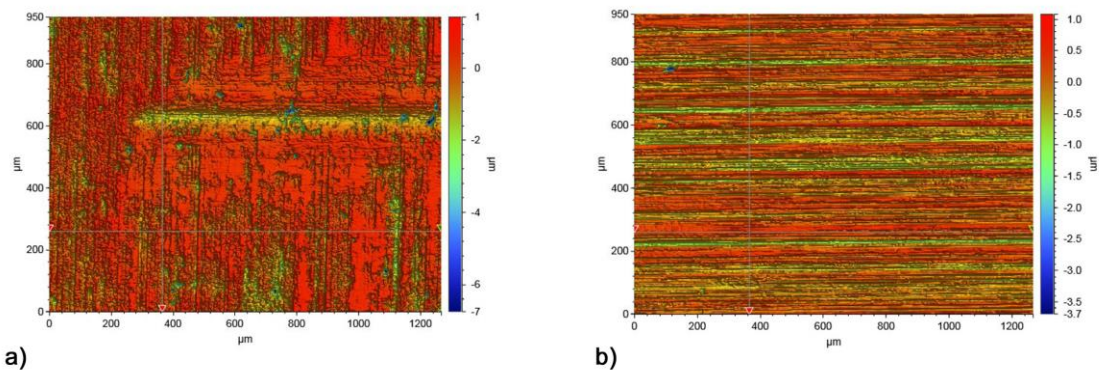


Obr. 5-6 Projevy gallingu u nerezových ocelí; a) Materiál 1.4301; b) Materiál 1.4057.

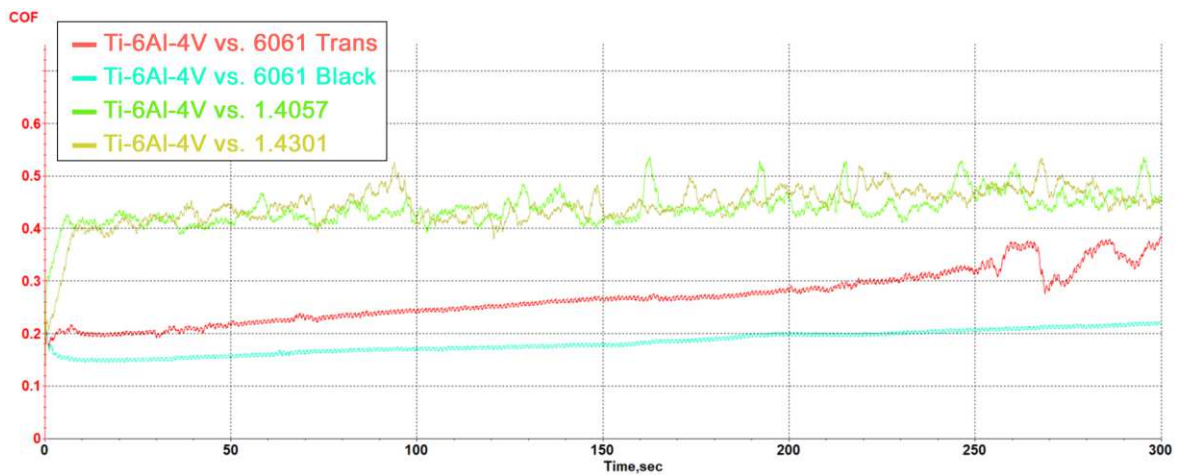


Obr. 5-7 Součinitel tření pro kombinace hliníkové slitiny 6061-T651 a nerezových ocelí.

Kombinace eloxovaných hliníkových slitin s nerezovými oceli dosahují nižších hodnot koeficientu tření. Pozorujeme však jeho stabilní nárůst v čase. U kombinace černého eloxu s nerezovou ocelí 1.4301 je vidět mírný pokles a opětovný nárůst. Opatření se omezuje na opotřebení vrcholků nerovností na povrchu hliníkových slitin. U nerezových ocelí v této kombinaci není opotřebení pouhým okem ze snímku topografie viditelné (viz Obr. 5-8).



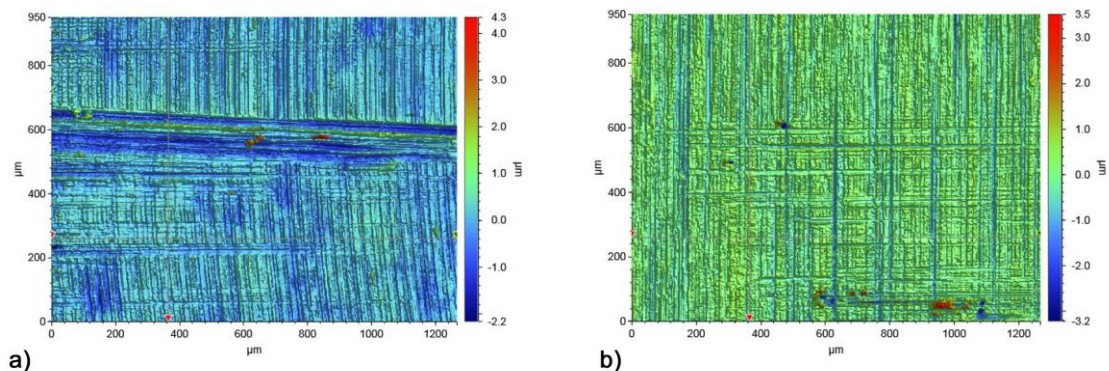
Obr. 5-8 Otláčení nerovností na slitině 6061-T651 (a) a neznatelné opotřebení nerezové oceli 1.4301 (b).



Obr. 5-9 Součinitel tření pro kombinaci titanu s hliníkovou slitinou a nerezovou ocelí.

Titan v kombinaci s hliníkovými slitinami má stabilní pozvolný vývoj. U kombinace s transparentním eloxem je v posledních 50 vteřinách velký rozptyl, který může být způsoben vytvořením opotřebení na desce od hrany pinu.

Kombinace nerezových ocelí s titanem vykazuje větší opotřebení, proto má také křivka koeficientu tření vyšší rozptyl. U titanu je opotřebení vyšší než u nerezových ocelí. Snímky opotřebení titanu Ti-6Al-4V a nerezové oceli 1.4057 jsou uvedeny na Obr. 5-10.



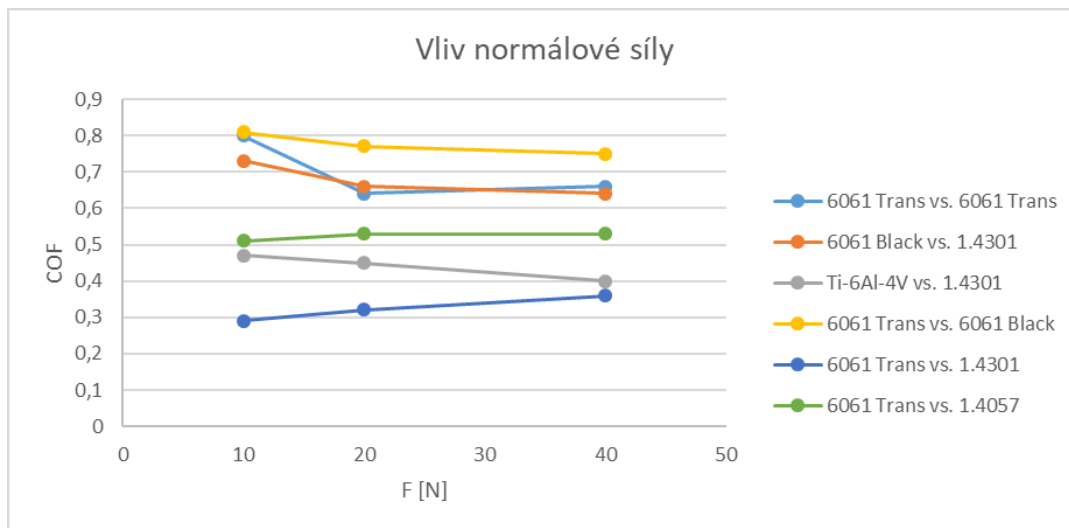
Obr. 5-10 Opotřebení u kombinace Ti-6Al-4V (a) vs. 1.4057 (b).

## 5.2 Vliv rychlosti

U všech testů probíhaly také fáze s nižšími rychlostmi (0,1 mm/s a 1 mm/s), dle Tab. 4-1. Ve všech případech byla odchylka koeficientu tření menší než 10 % oproti hodnotě při 10 mm/s. V některých případech byla hodnota vyšší, v některých nižší. Vliv rychlosti však není velký a z toho důvodu nebyl dál analyzován. U nerezových ocelí nebyl vliv rychlosti vůbec posouzen z důvodu celkové nestability.

## 5.3 Vliv normálové síly

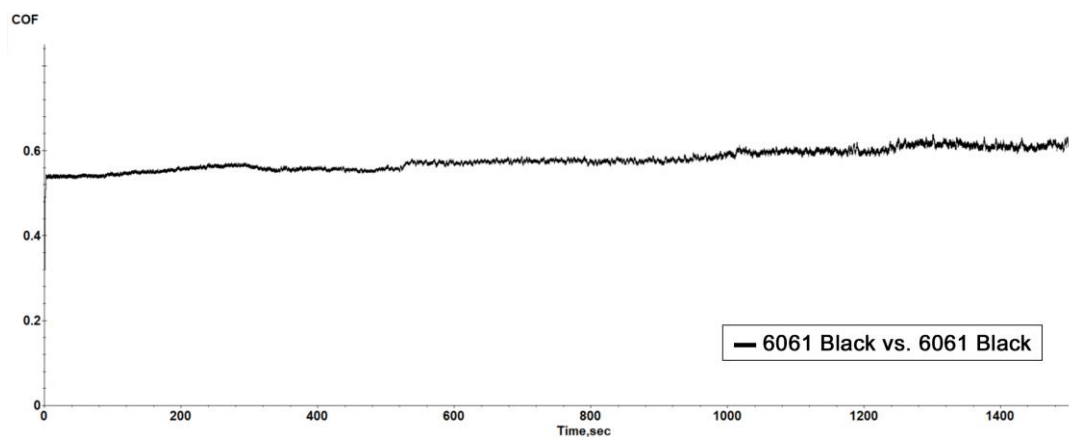
Dále byl sledován vliv normálové síly při čtvrté a páté fázi testu (Tab. 4-1). Ten je vyšší než vliv rychlosti. Ve většině případů koeficient tření klesá se zvyšujícím se zatížením, pouze u kombinací EN AW-6061-T651 v transparentním eloxu s nerezovými oceli roste. Kombinace s největším vlivem jsou znázorněny v grafu na Obr. 5-11. U ostatních kombinací je vliv minimální.



Obr. 5-11 Vliv normálové síly;  $v = 10 \text{ mm/s}$ .

## 5.4 Vliv počtu provedených cyklů

U materiálu EN AW-6061-T651 v černém eloxu byl proveden ještě jeden test, který obsahoval 1500 cyklů při rychlosti 10 mm/s a síle 10 N. Ukázalo se, že koeficient tření postupně roste a naměřené hodnoty mají větší rozptyl. Během zkoušky došlo ke zvýšení hodnoty koeficientu tření z 0,54 na 0,62.



Obr. 5-12 Vývoj po dalších 1500 cyklech u černého eloxu.

## 5.5 Porovnávací tabulka

V následující tabulce je uvedeno porovnání zjištěných koeficientů tření pro všechny vyhodnocované materiálové kombinace. Tab. 5-1 udává tření během 300 cyklů, za podmínek testu dle Tab. 4-1. V tabulce je pro porovnání zjednodušeně uvedena také míra opotřebení.

Tab. 5-1 Přehled provedených experimentů a naměřených hodnot drsnosti Ra na vzorcích

Č. ex.	Materiál I	Ra	Materiál II	Ra	Koeficient tření <sup>2</sup>	Míra opotřebení
1	6061-T651 Černá	0,43	6061-T651 Černá	0,48	<b>0,50</b>	nízká
2	1.4057	0,21	6061-T651 Černá	0,48	<b>(0,45)</b>	nízká
3	1.4301	0,22	1.4301	0,18	<b>nestabilní</b>	vysoká
4	1.4057	0,27	1.4057	0,24	<b>nestabilní</b>	vysoká
5	6061-T651 Čirá	0,64	6061-T651 Čirá	0,65	<b>(0,80)</b>	nízká
6	Ti-6Al-4V	0,24	Ti-6Al-4V	0,41	<b>0,45</b>	střední
7	1.4301	0,24	6061-T651 Černá	0,51	<b>(0,70)</b>	nízká
8	6061-T651 Černá	0,51	6061-T651 Čirá	0,65	<b>0,80</b>	nízká
9	6061-T651 Černá	0,45	Ti-6Al-4V	0,41	<b>0,20</b>	nízká
10	1.4057	0,27	1.4301	0,18	<b>nestabilní</b>	vysoká
11	6061-T651 Čirá	0,63	1.4301	0,18	<b>(0,30)</b>	nízká
12	Ti-6Al-4V	0,28	1.4301	0,18	<b>0,45</b>	střední
13	1.4057	0,27	6061-T651 Čirá	0,63	<b>(0,50)</b>	nízká
14	Ti-6Al-4V	0,26	1.4057	0,24	<b>0,45</b>	střední
15	6061-T651 Čirá	0,65	Ti-6Al-4V	0,64	<b>(0,30)<sup>3</sup></b>	nízká
16	Ti-6Al-4V	1,34	Ti-6Al-4V	0,64	<b>0,50</b>	střední

<sup>2</sup> Tabulka ukazuje průměrnou ustálenou hodnotu koeficientu tření, pokud nepřesáhne odchylky nad 5 %. Pokud se koeficient tření dále vyvíjí, je číslo uvedeno v závorce a je konečnou hodnotou testu. Předpokládáme ale jeho další vývoj. Hodnoty jsou záměrně zaokrouhlené na pět setin.

<sup>3</sup> Na konci testu došlo k vyššímu opotřebení v hraně vzorku, proto mají data v posledních 50 vteřinách velký rozptyl (viz. graf Obr. 5-5)

## 6 DISKUZE

Tření je u různých materiálů odlišné, závislé hlavně na materiálové kombinaci, povrchové úpravě, drsnosti povrchu, tendenci k vzájemné interakci apod. Série provedených experimentů se měla co nejvíce přiblížit praktickým příkladům, například klouzáni čela objímky v těle objektivu. Byly voleny charakteristické znaky pro pohyb optomechanických prvků bez přítomnosti maziva. Mezi ně patří nižší počet cyklů přestavení, zatížení v rozmezí od 10 N do 40 N, drsnosti povrchů do Ra 0,8 aj. Jsou vybrány materiály s jejich typickými povrchovými úpravami s ohledem na běžnou praxi v optomechanických systémech. Ukázalo se, že při suchém kluzném tření jsou některé materiály vhodné k aplikaci, některé nikoliv. Co lze zcela vyloučit z doporučení pro použití takového kontaktu, jsou nerezové oceli vůči sobě. Tření za sucha je velmi intenzivní jak pro materiál 1.4301 a 1.5047, tak pro jejich kombinaci. Dochází k vysoké adhezi a rychlému nástupu silného opotřebení, které je součástí procesu gallingu. Tento jev je možno pozorovat na Obr. 5-6.

Dobré jsou naopak kombinace anodicky oxidovaných hliníkových slitin s nerezovými ocelmi, případně titanem. Vůbec nejlepší kluzné vlastnosti ze série provedených testů představuje titanová slitina Ti-6Al-4V spolu s černě eloxovanou hliníkovou slitinou EN AW-6061-T651. Zde se koeficient tření pohybuje okolo hodnoty 0,20 a to i dlouhodobě.

Z pohledu 300 cyklů, které byly voleny dle běžného počtu mechanického přestavení optomechanického systému, a času testování, se některé kombinace jeví stabilně. Ovšem i tření u těchto kombinací by mohlo v dalším vývoji růst a při výrazně vyšším počtu cyklů vést ke zvýšení rozptylu a intenzivnější interakci mezi povrchy (Obr. 5-12).

Vliv rychlosti je menší než 10 % a nebyl dále analyzován. Při nižších rychlostech lze pozorovat také rozdílnost hodnot v závislosti na směru pohybu. V jednom směru byl koeficient tření nižší a naopak. To může být způsobeno texturou povrchu, konfigurací tribometru, tuhostí snímače apod. Z hlediska průměrné hodnoty však nebyl koeficient tření natolik odlišný, abychom mohli mluvit o výrazném vlivu rychlosti. I při nejnižší rychlosti 0,1 mm/s a vzorkování hodnot třecích sil nebylo pozorováno výrazné statické tření na začátku pohybu ani v jedné kombinaci materiálů.

Při změně velikosti normálové síly pozorujeme odchylky v grafu na Obr. 5-11. Tření klesá kromě výjimky hliníkové slitiny v transparentním eloxu v kombinaci s nerezovými ocelmi. U ostatních kombinací jsou hodnoty koeficientu tření pro různé zatížení takřka stejné.

U titanové slitiny Ti-6Al-4V byl sledován vliv drsnosti povrchu. U drsnějších povrchů byla hodnota koeficientu tření o 10 % vyšší než u povrchů s nižší drsností. Zde bylo vidět, že tření má podobný vývoj u obou konfigurací, ale pozorovaná hodnota je u drsnějších povrchů posunuta o několik setin nahoru (Obr. 5-3).

Při pohledu na vzorky dochází k soustředění opotřebení, a tím pádem i tření, v hranách. Na okrajích vzorků jsou nejexponovanější místa, zatímco uprostřed je opotřebení menší. U většiny materiálů, především kombinací hliníkových slitin, docházelo v průběhu experimentu k jevu „stick-slip“. Ten spočívá v zadrhnutí, nárůstu tření, následnému uvolnění a sklouznutí mezi povrchy. Tento jev je doprovázen charakteristickým zvukovým projevem a docházelo k němu při většině testů.

## 7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou součinitele tření u materiálů používaných pro konstrukci optomechanických systémů. V první části jsou popsány základní obecné mechanismy, ke kterým dochází při styku reálných povrchů, a jsou rozebrány jednotlivé materiály a jejich chování při třecích procesech. Hlavním obsahem práce je výzkumná část, kde je navržen způsob testování metodou pin-on-plate, a následná realizace experimentů. Metoda pin-on-plate je volena z důvodu nejvhodnější aplikace pro materiálové kombinace a styk rovinných ploch. Vzorčky jsou vyrobeny ve spolupráci s firmou Meopta – optika, s.r.o. Byly vyrobeny za běžných podmínek, s typickými povrchovými úpravami a firmou používanými technologiemi, aby bylo zajištěno nejvěrnější napodobení aplikace v laboratorních podmínkách. Součástí práce je naměření drsnosti povrchů před testem na optickém profilometru a nasnímání vzorků po testu. Zjištěné hodnoty součinitele tření jsou zpracovány v grafech a je vypracována shrnující tabulka (Tab. 5-1) pro porovnání jednotlivých kombinací.

Výsledkem práce je analýza chování součinitele tření jednotlivých kombinací a jejich porovnání. Práce shrnuje základní poznatky a určuje, kterým směrem se mohou ubírat další testy.

Hlavní poznatky experimentů lze shrnout do těchto několika bodů:

1. Experimenty prokázaly, že třecí procesy za suchých podmínek jsou velmi intenzivní a v mnoha případech dochází rychle k nestabilnímu vývoji tření.
2. Kombinace materiálů má vliv na chování tření, zejména pokud se jedná o povrchy ze stejného materiálu proti sobě. Ani provedená pasivace nerezové oceli nedokáže zabránit vysoké interakci materiálu a dochází rychle k poškození.
3. Vliv rychlosti ani zatěžující síly nehraje velkou roli, pokud se pohybujeme v rozsahu podmínek uvedených v Tab. 4-1
4. Na základě realizovaných experimentů lze konstatovat, že jako nejvhodnější kluzné kombinace se jeví použití eloxovaných hliníkových slitin s titanovou slitinou nebo nerezovými ocelmi. Povrchy jsou odolné vůči adhezi a dochází k minimálnímu opotřebení v porovnání s ostatními kombinacemi.



## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VOCEL, Milan a Vladimír DUFEK. Tření a opotřebení strojních součástí. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1976, 374 stran : ilustrace (černobílé).
- [2] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. [cit. 2020-02-05] ISBN 0123970474. [Online] Dostupná z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpETE00005/engineering-tribology/engineering-tribology> (EN)
- [3] BOWDEN, F. P. a G. W. ROWE. The adhesion of clean metals. Proc. Roy. Soc. London, 1956(233), 429-442. Dostupné také z: <http://doi.org/10.1098/rspa.1956.0001>
- [4] STACHOWIAK, G. W., A. W. BATCHELOR a G. B. STACHOWIAK. Experimental methods in tribology. Amsterdam: Elsevier, 2004. ISBN 0 444 51589 5.
- [5] HARTL, M. Přednáška 4, Konstruování strojů – strojní součásti. Presentation presented at: [Fakulta strojního inženýrství VUT; 2019, Brno]
- [6] SHARMA, Nidhi, Syed Nasimul ALAM, Bankim Chandra RAY, Surekha YADAV a Krishanu BISWAS. Wear behavior of silica and alumina-based nanocomposites reinforced with multi walled carbon nanotubes and graphene nanoplatelets. Wear. 2019, 2019(418-419), 290-304.
- [7] NEALE, M. J. The Tribology Handbook. 2nd ed. United Kingdom: Butterworth Heinemann, 1995. ISBN 0750611987.
- [8] Optical Profilometry. Nanoscience Instruments [online]. Phoenix, Arizona, 2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/optical-profilometry/>
- [9] HORÁKOVÁ, Radmila. Měření ultra-tenkých vrstev deponovaných na povrch polymerních desek. Zlín, 2013. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [10] Effects of surface topography and running-in upon rolling contact fatigue life: Evaluation by plasticity index. Tribology Series. 1998, (Volume 34), 291-299.N
- [11] ALAM, Tanwir a Akhter Husain ANSARI. Review of aluminium and its alloys for automotive applications. International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science. India, 2017, 2017(5), 278-294. ISSN 2348-7550.
- [12] GUEZMIL, M., W. BENSALAH, A. KHALLADI, K. ELLEUCH, M. DE-PETRIS WERY a H. F. AYEDI. Effect of Test Parameters on the Friction Behaviour of Anodized Aluminium Alloy. International Scholarly Research Notices. 2014, 2014, 1-9. DOI: 10.1155/2014/795745. ISSN 2356-7872. Dostupné také z: <https://www.hindawi.com/archive/2014/795745/>

- [13] YEROKHIN, A. L., X. NIE, A. LEYLAND, A. MATTHEWS a S. J. DOWEY. Plasma electrolysis for surface engineering. Surface and Coatings Technology. 199n. 1., 1999(122), 73-93..
- [14] REVIEW OF THE WEAR AND GALLING CHARACTERISTICS OF STAINLESS STEELS. Washington, D.C.: Committee of Stainless Steel Producers American Iron and Steel Institute, 1978.
- [15] GALLING AND ITS CONTROL. Brisbane: Australian Stainless Steel Development Association, c2020.
- [16] BADDOO, N. R. Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. Journal of Constructional Steel Research. 2008, 64(11), 1199-1206.
- [17] Stainless Steel Bar 431. Melbourne: Atlas Specialty Metals, 2006.
- [18] DUTT SHARMA, Mukund a Rakesh SEHGAL. Dry Sliding Friction and Wear Behaviour of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V). Tribology Online. 2012, 7(2), 87-95. DOI: 10.2474/trol.7.87. ISSN 1881-2198.
- [19] HANSON, Magnus. On Adhesion and Galling in Metal Forming. ISBN 978-91-554-7072-2. ISSN 1651-6214.
- [20] Bruker Corporation [online]. Madison: Bruker, c2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

### 9.1 Seznam použitých zkratek

COF	Coefficient of Friction
AISI	American Iron and Steel Institute
HB	tvrdost podle Brinella
HRC	tvrdost podle Rockwella
DLC	Diamant-Like-Carbon povlaky
UMT	Universal Mechanical Tester

### 9.2 Seznam použitých veličin

F	[N]	zátěžná síla
Ra	[ $\mu\text{m}$ ]	drsnost povrchu
v	[mm/s]	rychlost posuvu
A <sub>r</sub>	[mm <sup>2</sup> ]	celková plocha kontaktu
A <sub>i</sub>	[mm <sup>2</sup> ]	plocha dílčí oblasti kontaktu
n	[-]	počet malých plošek
$\psi$	[-]	index plasticity
H	[HB]	tvrdost
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti
$\mu$	[-]	Poissonovo číslo
$\sigma^*$	[mm]	standartní odchylka výšky vrcholů
$\beta$	[mm]	střední poloměr zakřivení vrcholů

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Skutečná plocha kontaktu drsných povrchů [2].	14
Obr. 2-2 Kontaktní napětí v místech styku [2].	15
Obr. 2-3 Adhezivní opotřebení [6].	17
Obr. 2-4 Abrazivní opotřebení tvrdším materiálem (a) a přítomností dalších částic (b) [6].	17
Obr. 2-5 Různé mechanismy abrazivního opotřebení [2].	18
Obr. 2-6 Schéma optického profilometru [8].	19
Obr. 2-7 Rozdíl mezi metodami lišící se frekvencí a amplitudou [4].	20
Obr. 2-8 Typická struktura anodické vrstvy [12].	22
Obr. 2-9 Vliv tloušťky anodické oxidace na koeficient tření. Metoda ball-on-disk; $F = 1 \text{ N}$ ; $n = 100 \text{ min}^{-1}$ [12].	23
Obr. 2-10 Příklad gallingu [19].	24
Obr. 2-11 Princip tvorby gallingu. a) Dva materiály proti sobě pod normálovým zatížením. b) Přilnutí jednoho materiálu k druhému. c) Další tváření může vytvořit škrábance a porušení [19].	24
Obr. 2-12 Koeficient tření v závislosti na normálové síle (a); Míra opotřebení v závislosti na rychlosti (b) [18].	25
Obr. 4-1 Optický profilometr Bruker Contour GT-X8 (a); Univerzální tribometr Bruker UMT Tribolab (b) [20].	27
Obr. 4-2 Řez navrženou konfigurací.	28
Obr. 4-3 Průběh měření v tribologické laboratoři ÚK.	30
Obr. 5-1 Vývoj součinitele tření hliníkové slitiny 6061-T651 v černém a transparentním eloxu, včetně jejich kombinace.	31
Obr. 5-2 Hliníková slitina 6061-T651 v černém eloxu před testem (a) a po testu (b).	32
Obr. 5-3 Vývoj součinitele tření titanové slitiny Ti-6Al-4V (Nižší $Ra_{\text{pin}} = 0,24$ , $Ra_{\text{plate}} = 0,41$ ; Vyšší $Ra_{\text{pin}} = 1,34$ , $Ra_{\text{plate}} = 0,64$ ).	32
Obr. 5-4 Ti-6Al-4V po testu; a) Pin ( $Ra = 0,24$ ); b) Deska ( $Ra = 0,41$ ).	32
Obr. 5-5 Součinitel tření v závislosti na čase u nerezových ocelí.	33
Obr. 5-6 Projevy gallingu u nerezových ocelí; a) Materiál 1.4301; b) Materiál 1.4057.	33

Obr. 5-7 Součinitel tření pro kombinace hliníkové slitiny 6061-T651 a nerezových ocelí.....	34
Obr. 5-8 Otláčení nerovností na slitině 6061-T651 (a) a neznatelné opotřebení nerezové oceli 1.4301 (b).....	34
Obr. 5-9 Součinitel tření pro kombinaci titanu s hliníkovou slitinou a nerezovou ocelí. .....	35
Obr. 5-10 Opotřebení u kombinace Ti-6Al-4V (a) vs. 1.4057 (b).....	35
Obr. 5-11 Vliv normálové síly; $v = 10$ mm/s.....	36
Obr. 5-12 Vývoj po dalších 1500 cyklech u černého eloxu.....	36

## 11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Podmínky univerzálního testu.....	30
Tab. 5-1 Přehled provedených experimentů a naměřených hodnot drsnosti Ra na vzorcích .....	37

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

### 12.1 Výkresy

**Příloha 1.** BP-01: Univerzální přípravek – deska

**Příloha 2.** BP-02: Univerzální přípravek – pin

**Příloha 3.** BP-03: Plate

**Příloha 4.** BP-04: Pin