

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie



Tribologické vlastnosti moderních povlaků

Tribological properties of modern coatings

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Petr Drašnar Ph.D.

Bc. Lukáš Marusič

2019

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat celé Skupině povrchových Úprav ústavu strojírenské technologie a hlavně vedoucímu této diplomové práce Ing. Petru Drašnarovi Ph.D. za podporu a odbornou pomoc. Dále bych chtěl jmenovitě poděkovat Ing. Zdeňkovi Hazdrovi a Ing. Jiřímu Kuchařovi za konzultaci a pomoc při měření.

Tato práce vznikla za podpory projektu Centrum pokročilých leteckých technologií reg. č.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000826 financovaného z ESIF, OP VVV, Fakulty strojní, ČVUT v Praze.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne 3.8.2019

.....

Lukáš Marusič

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Marusič** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **437119**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Tribologické vlastnosti moderních povlaků

Název diplomové práce anglicky:

Tribological properties of modern coatings

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor problematiky, tribologické vlastnosti moderních povlaků
2. Hodnocení tribologických vlastností povlaků zařízením typu pin on disc
3. Hodnocení tribologických vlastností povlaků zařízením typu linear test
4. Analýza opotřebení, porovnání metod, diskuze

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Drašnar, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Ing. Zdeněk Hazdra, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2019**


Ing. Petr Drašnar, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

30.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotační list

Jméno a příjmení autora: Lukáš Marusič

Název práce česky: Tribologické vlastnosti moderních povlaků

Název práce anglicky: Tribological properties of modern coatings

Rozsah práce: počet stran: 58

počet obrázků: 42

počet tabulek: 12

počet rovnic: 4

Akademický rok: 2018/2019

Jazyk práce: český

Ústav: Ústav strojírenské technologie

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Petr Drašnar, Ph.D.

Anotace

Rešeršní část diplomové práce rozebírá úvod do tribologie a jednotlivých testů. Důraz je kladen na standartní rotační metodu Pin on Disk a méně používaný lineární test. Práce popisuje měření na multifunkčním tribometru a zacházení s ním. Testovaným materiálem je potom hliník, s povrchovou úpravou anodické oxidace, známé jako eloxování a méně rozšířenou úpravou mikroobloukové oxidace. Při těchto metodách se vytváří odolná oxidická vrstva Al_2O_3 , zlepšující tribologické vlastnosti.

Experimentální část práce je zaměřena na měření a hodnocení tribologických vlastností, porovnání jednotlivých povrchových úprav a testů. Hodnoceny jsou činitele tření a profil vytvořený kontaktem tělíška a základního vzorku. Výsledky jsou doplněny analýzou profilu, prováděnou pomocí 3D profilometru.

Klíčová slova

Tribologie, tření, opotřebení, pin on disk, lineární test, anodická oxidace, anodizace, eloxování, mikrooblouková oxidace, mikroplazmová oxidace, plazmová elektrolytická oxidace, hliník.

Anotation

Research part of the thesis is focusing on introduction into tryibology and tribology testing. With emphasis on more standard test method which is Pin on Disc and less used linear test method. Thesis describes measuring with multifunctional tribometer and its correct use. Tested material is aluminum with anodic oxidation coating, also known as anodization and less used microarc oxidation coating. Both of these coatings create durable oxidized coat of Al_2O_3 , improving tribological properties.

Experimental part of thesis is focusing on measuring and evaluation of tribological properties, comparing used coatings and tests. Evaluated properties are coefficient of friction and profile created by contact of PIN and base sample. Results are completed with profile analysis on 3D profiler.

Key words

Tribology, friction, wear, Pin on disc, linear test, anodic oxidation, anodization, microarc oxidation, plasma arc oxidation, plasma electrolytic oxidation, aluminum.

Seznam symbolů

<i>Symbol</i>	<i>Význam</i>
<i>AO</i>	- anodická oxidace
<i>D</i>	- průměr
<i>F</i>	- síla (přítlačná)
<i>Ft</i>	- třecí síla
<i>G</i>	- tíha
<i>H_a</i>	- tvrdost abrazivní částice
<i>H_m</i>	- tvrdost opotřebovávaného materiálu
<i>k</i>	- koeficient opotřebení dle tvrdosti materiálu
<i>MAO</i>	- mikrooblouková oxidace (microarc oxidation)
<i>n</i>	- otáčky za minutu (RPM)
<i>RPM</i>	- otáčky za minutu
<i>v</i>	- rychlost otáčení
<i>α</i>	- úhel v obloukové míře
<i>μ</i>	- statický činitel smykového tření
<i>μ_k</i>	- dynamický činitel smykového tření
<i>π</i>	- Ludolfovo číslo

Seznam chemických značek

Al	- hliník
Al ₂ O ₃	- oxid hlinitý
C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₈ Na ₂	- kyselina ethylendiamintetraoctová
Cu	- měď
Fe	- železo
H ₂ O	- voda
H ₂ SO ₄	- kyselina sírová
KOH	- hydroxid draselný
Mn	- mangan
Na ₂ SiO ₃	- křemičitan sodný
Na ₂ WO ₄	- wolfram sodný
NaOH	- hydroxid sodný

PTFE - polytetrafluorethylen
Si - křemík
Zn - zinek

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Tribologie	2
2.1	Tribologický systém	2
2.2	Tření.....	3
2.3	Činitel smykového tření.....	3
2.4	Opotřebení	5
2.4.1	Adhezivní opotřebení.....	6
2.4.2	Abrazivní opotřebení.....	7
2.4.3	Erozivní opotřebení.....	7
2.4.4	Kavitační opotřebení.....	7
2.4.5	Únavové opotřebení	7
2.4.6	Vibrační opotřebení	8
3	Vlastnosti moderních povlaků	8
3.1	Odolnost proti abrazivnímu opotřebení.....	8
4	Tribologické testy.....	10
4.1	Lineární test.....	12
4.2	Pin on Disk	14
4.3	Vliv parametrů na test.....	15
4.3.1	Vliv materiálu tělíska.....	15
4.3.2	Vliv poloměru stopy při PIN-ON-DISC	16
4.3.3	Vliv drsnosti kontaktních ploch.....	17
5	Hliníkové oxidické vrstvy.....	18
5.1	Anodická oxidace.....	18
5.1.1	Technologický postup anodické oxidace.....	19

5.2	Mikrooblouková oxidace	23
6	Multifunkční tribometr	26
6.1	Softwarové rozhraní	29
6.2	Modul pro lineární test.....	32
6.3	Modul pro test Pin on disk/ball on disk.....	33
7	Experimentální část	35
7.1	Experimentální schéma	36
8	Výsledky tribologického měření	38
8.1	Výsledky testu Pin-on-Disk	38
8.2	Výsledky lineárního testu	40
8.3	Zhodnocení výsledků	40
8.3.1	Výsledky při změně zatěžující síly	43
8.3.2	Profilometrie	44
9	Závěr	50
	Seznam použité literatury	52
	Seznam obrázků	56
	Seznam tabulek	58
	Seznam rovnic	58

1 Úvod

Tribologické vlastnosti jsou důležitým parametrem pro pohybující se součásti ve vzájemném kontaktu. Jedním z těchto parametrů je činitel smykového tření. Pro jeho určení se používá řada tribologických testů. Nejčastější jsou však metody lineárního testu a rotačního testu Pin-on-Disk. Těmito metodami se dá určit jak statický, tak dynamický činitel smykového tření.

Hlavním účelem povrchových úprav je zvyšování korozní odolnosti materiálů. To znamená vytvoření ochranné bariérové či katodické ochrany a zamezit vytváření oxidických, korozních produktů. Další význam povrchových úprav je zvýšení kvality povrchu. Zde se jedná o zvýšení otěruvzdornosti, zvýšení tvrdosti, zvýšení tepelné odolnosti apod. Povrch může být chráněn povlakem ukotveným na profilu materiálu nebo vrstvou, která vzniká modifikací základního materiálu. V moderních konstrukcích jsou rozšířené materiály, jako jsou hliník, titan, hořčík, zirkonium a jejich slitiny. Používají se převážně pro jejich nízkou hmotnost.

Některé materiály disponují vlastností samopasivace. Pro tyto materiály funguje oxidická vrstva jako ochrana proti další korozi. Oxidická vrstva se vytváří samovolně, přirozeně. Je tvrdší a odolnější než základní materiál. Toho se využívá u součástí vyrobených z těchto materiálů.

Aby se vlastnosti povrchové vrstvy ještě zlepšily a prodloužila se její životnost, vytváří se oxidická vrstva uměle, pomocí průchodu elektrického proudu. Jedná se o povrchové úpravy typu anodická oxidace známá jako anodace či eloxování a poněkud novější technologie mikrooblouková oxidace.

Tyto metody značně navyšují tloušťku oxidových vrstev a zvyšují jejich účinnost jak z hlediska korozní odolnosti, tak z hlediska tribologických vlastností. Toto je motivací pro tribologické analýzy řešené v této práci.

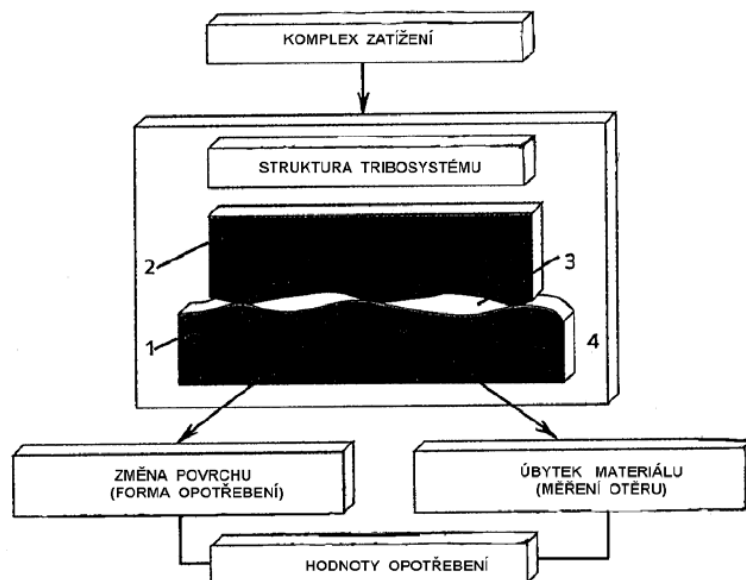
2 Tribologie

Tribologie je nauka o tření a opotřebení, která se zabývá vzájemným působením po sobě se pohybujících povrchů. Do oblasti tribologie se řadí její podoblasti, a to tribochemie, tribofyzika nebo tribotechnika. Tribofyzika je zaměřena na tření z pohledu fyzikálních vlastností materiálů. Tribochemie zkoumá struktury a chemické vlastnosti třecích uzlů. Tribotechnika se zabývá příklady konstrukce, montáže, provozu a údržby konkrétních tribologických systémů. [1]

2.1 Tribologický systém

Tribologický systém představuje vzájemné působení minimálně dvou prvků. Místo působení se nazývá tribologický uzel, který je tvořen čtyřmi členy [7]:

- 1 - základní třecí těleso,
- 2 – třecí těleso,
- 3 - mezilátka,
- 4 - okolí.



Obr. 1 - struktura tribologického systému [7]

Aktivními prvky jsou tělesa a mezilátka. Tyto prvky mají přímý vliv na funkci systému. Okolí je pasivní prvek, který se nepřímo zúčastňuje transformačních funkcí. Chybí-li některý z aktivních prvků (těleso, mazivo), mluvíme o tzv. redukovaném tribologickém systému. [7]

2.2 Tření

Tření, je představováno silami odporujícími v pohybu těles při jejich styku. Tyto síly je třeba minimalizovat v případě např. ložisek. Oproti tomu je ale využití zvýšení třecích sil např. brždění kotoučových brzd u kola nebo automobilu. Dochází zde ke změně mechanické práce na teplo. Zároveň je tření doprovázeno opotřebením jednotlivých stykových ploch. [1]

Tření je možno rozdělit podle typu mezivrstvy. Zde se nahlíží na to, zda je přítomna další látka mezi třecími plochami. Rozděluje se na:

- tření suché (bez maziva),
- tření s tuhým mazivem,
- tření s kapalným nebo plastickým mazivem,
- tření s mezivrstvou plynu. [1]

2.3 Činitel smykového tření

Hlavní rovnicí pro popis kluzného tření je tzv. Coulombův zákon, který zní:

$$\mu = \frac{F_t}{F}, \quad (2.1)$$

F_t značí třecí sílu proti směru pohybu, která je vyvozená přitlačnou silou F . Jejich podíl, je potom činitel smykového tření μ . Tento vztah, počítá s ideálními tělesy, co se týče tuhosti a bez jakýchkoliv deformací či opotřebením materiálu. [1]

Síla, která uvede těleso do pohybu, je větší, než síla potřebná pro setrvání tělesa v pohybu. Tomuto činiteli se říká dynamický činitel smykového tření μ_k . Je tedy zřejmé, že statický činitel je větší než dynamický činitel. [4]Tedy:

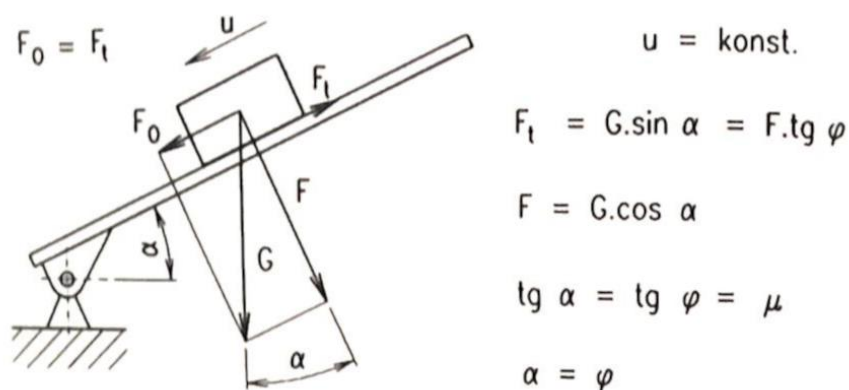
$$\mu \geq \mu_k, \quad (2.2)$$

Pro představu některých hodnot je uvedena tabulka zobrazující rozdíl ve statickém a dynamickém činiteli za pokojové teploty a tlaku:

Tab. 1 – činitel smykového tření pro styk kov na kov [4]

<i>Materiál</i>		<i>Činitel smykového tření</i>	
<i>Materiál 1</i>	<i>Materiál 2</i>	μ (statický)	μ_k (dynamický)
ocel	ocel	0,31	0,23
korozivzdorná ocel	měď	0,23	0,21
ocel	titan	0,48	0,48
hliník	hliník	0,42	0,34

Pro určení statického činitele smykového tření a jeho lepší představu nejlépe slouží nakloněná rovina. Po této rovině se zkoušený vzorek musí pohybovat rovnoměrnou rychlostí. Toho se docílí naklápěním roviny, tedy zvětšováním úhlu α . [1]



Obr. 2 – Stanovení činitele smykového tření na nakloněné rovině [1]

Zvětšováním sklonu roviny se uvede těleso do pohybu. Činitel μ_k , je tedy tangens úhlu naklonění roviny $\text{tg } \alpha$, při kterém je těleso v pohybu s konstantní rychlostí pohybu u . [1]

Činitel smykového tření se běžně pohybuje od 0,03 pro dobře namazaná ložiska. Pro suché tření v rozmezí 0,5 až 0,7. Např. pohodlnou chůzi zaručuje činitel smykového tření $\mu = 0,2 - 0,3$. [4]

Parametry přispívající ke změně hodnoty činitele μ :

- materiál stykové dvojice,
- profil povrchu,
- okolní prostředí,
- zatěžující síla,
- rychlost nebo relativní pohyb,
- druh relativního pohybu (rotační, lineární vratný atd.),
- druh kontaktu,
 - konformní – zatížení na velké ploše (kluzná ložiska),
 - nekonformní – zatížení soustředěno do soustředěno do úzkého místa (valivá ložiska),
- teplota,
- historie předchozího kontaktu součástí

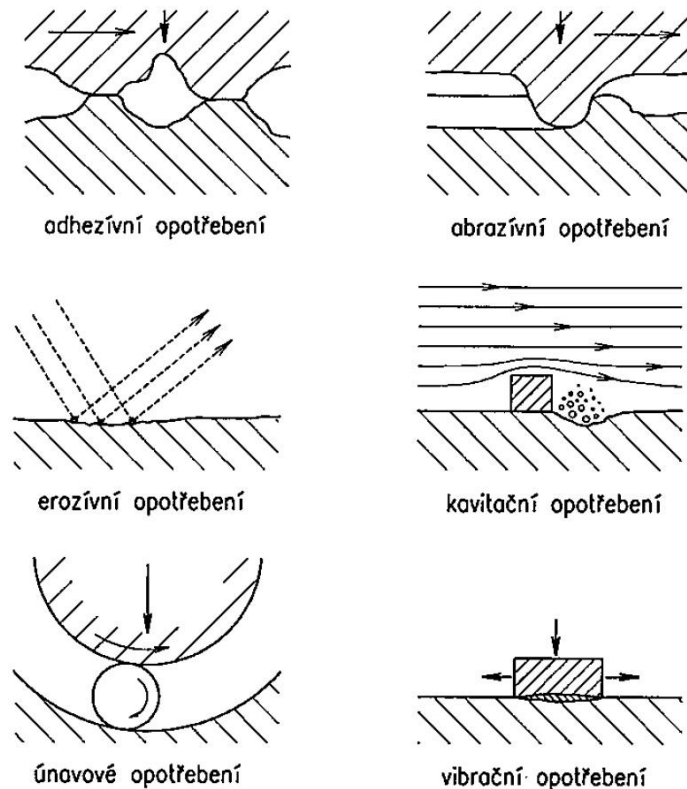
Hodnoty činitele tření se liší i případ od případu. Kromě kombinace materiálu závisí na spoustě dalších faktorů, které vstupují do vyhodnocení koeficientu tření. To znamená, že pro přesné určení činitele tření je zapotřebí provést měření na konkrétních vzorcích a v definovaném prostředí. [4]

2.4 Opotřebení

K opotřebení dochází v tribologickém systému, a to vlivem tribologických vlastností. Dochází zde k úbytku materiálu z těles, která se vůči sobě pohybují. Jedná se o součásti pohybující se vzájemně vůči sobě nebo při kontaktu součásti a přítomného média (písek, nečistoty, částice uvolněné z povrchu apod.). Při vzájemném pohybu dochází k styku nerovností ploch a tyto plochy se opotřebovávají. [1, 4]

Druhy opotřebení se rozdělují na 6 základních druhů, podle mechanismu opotřebení jsou:

- adhezivní,
- abrazivní,
- erozivní,
- únavové,
- vibrační. [1]



Obr. 3 – základní druhy opotřebení [1]

2.4.1 Adhezivní opotřebení

K adhezivnímu opotřebení dochází při styku funkčních povrchů. Součásti nejsou dokonale hladké a mají určitou drsnost. Jejich povrchy se tedy dotýkají lokálně na výstupcích, kde dochází k porušování povrchových vrstev. Zde se vytvoří mikrospoje, které se následným pohybem poruší. Tak dojde k odtržení těchto mikrospojů. To vede k přenosu hmoty z jednoho povrchu na druhý a dochází k adhezivnímu opotřebení. Velké adhezivní opotřebení se také nazývá zadírání. [1, 4]

Adhezivnímu opotřebení se dá předcházet pomocí mazání. Pokud je v kontaktu přítomné mazivo, snižují se adhezivní účinky. [1]

2.4.2 Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení je podobně jako adhezní mezi dvěma povrchy. Povrch měkčího tělesa je rozrýván výstupky tělesa tvrdšího a dochází zde k plastické deformaci výstupků. Povrch je tedy rozrýván, přičemž nedochází k přenosu materiálu. Dále ale může docházet k mikrořezání, které způsobí odstranění objemu materiálu ve formě třísek. Při abrazivním opotřebení jsou přítomny tvrdé částice. Ty nemusí být pouze v základním materiálu, ale mohou být přítomny v mezeře mezi plochami. Jedná se o abrazivní částice nečistot nebo už odebraného materiálu mikrořezáním. [1; 2]

2.4.3 Erozivní opotřebení

Povrch je opotřebováván částicemi, obsaženými v tekutině nebo tekutinou samotnou. Tekutina, tedy kapalina nebo plyn, proudící dopadá na povrch, kde může dojít k plastické deformaci. U křehkých materiálů až k lomu. Při erozivním opotřebení záleží na úhlu dopadu, rychlosti a vlastnostmi povrchu a dopadajících částic. Obsahuje-li tekutina abrazivní částice, může nastat případ, kdy částice odrazí od tvrdého povrchu, vytvoří třísku nebo vniknout do povrchu součásti a způsobovat deformaci.[1; 3]

2.4.4 Kavitační opotřebení

K opotřebení dochází kavitačních bublin v kapalině. V některých místech, může tlak poklesnout, pod kritickou mez tlaku nasycených par. Zde se vytvoří kavitační bublina. Při zániku těchto bublin dochází k hydrodynamickému rázu. Ten způsobuje namáhání povrchové vrstvy, které je doprovázeno vytrháváním jejich částic. [1]

2.4.5 Únavové opotřebení

Nastává při opakovaném silovém namáhání povrchové vrstvy vysokými lokálními tlaky. Dochází k vytvoření a šíření trhlinek, které jsou způsobeny únavou materiálu. Tyto trhliny se spojují, a to vede až k uvolňování jednotlivých částic povrchové vrstvy. Na povrchu se vytvoří důlky, ve kterých může vznikat důlková koroze (pitting). [1]

Nejčastěji se dá setkat s únavovým opotřebením u valivých součástí, jako jsou valivá ložiska, kola železničních dopravních prostředků apod.

2.4.6 Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení je způsobeno kombinací normálového zatížení a vibrací v tečném směru. Tyto vibrace mají malou amplitudu, a tak dochází jen k malým posuvům. Při tomto druhu opotřebení vznikají částice, které jsou podobné korozním produktům. Ty působí velmi abrazivně na povrch materiálu a déle ho opotřebovávají. [1]

Jak již vibrační opotřebení naznačuje, v praxi se často objevují kombinace některých z mechanismů opotřebení. Často jeden mechanismus vyvolá jiný. Například uvolněné částice z vibračního nebo únavového opotřebení způsobují opotřebení abrazivní. [1]

3 Vlastnosti moderních povlaků

Zejména v odvětvích jako jsou automotive, letectví nebo kosmonautika se neustále zkoumají nové technologie a materiály povlaků a vrstev. Ty mají zlepšit vlastnosti součástí a prodloužit tak jejich životnost či zvýšit rozsah použití některých materiálů. Mimo jiné, se dále zlepšují a upravují konvenční technologie povlakování pro dosažení lepších vlastností.

Z pohledu tribologie je na vlastnosti povlaků nahlíženo především jako nekluzné s nízkým činitelem smykového tření a na otěruvzdorné s odolností proti různým druhům opotřebení.

3.1 Odolnost proti abrazivnímu opotřebení

Odolnost proti opotřebení má zásadní vliv na životnost součástí, proto je zřejmé, že je na ni kladen velký důraz.

Při kontaktu dvou těles se vlivem abrazivního opotřebení vyrývají rýhy do materiálu nebo jsou z něj oddělovány částice mikrořezáním. Počet vrypů narůstá se zvyšováním zatěžující síly. Počet rýh roste téměř lineárně v důsledku vtlačování více abrazivních částic do měkčího materiálu. Na povrchu je tedy rýha, která plastickou deformací vytvoří na svých okrajích valy, vystupující nad povrch materiálu. U křehkých materiálů mohou být přítomny částice vytvořené již zmíněným mikrořezáním. [5]

Opotřebení roste s rostoucí zatěžující silou a dráhou na které působí. Zároveň je nepřímo úměrné tvrdosti opotřebovávaného materiálu. Záleží tedy na rozdílu tvrdosti obou materiálů. Tvrdost opotřebovávaného materiálu H_m a tvrdost abrazivní částice, tedy druhého tvrdšího materiálu H_a . Roste-li tvrdost opotřebovávaného materiálu H_m , roste i odolnost proti opotřebení. Z toho vychází vztah [5]:

$$H_m = \frac{H_a}{k}, [5] \quad (3.1)$$

Kdy maximálních hodnot odolnosti proti opotřebení dosahujeme při koeficientu $k = 1,3$ až $1,7$. [5]

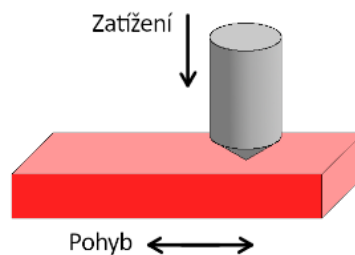
4 Tribologické testy

K určování tribologických vlastností slouží několik testů. Testy jsou navrženy tak, aby simulovaly různé druhy zatěžování v provozu. Těmito metodami se určují parametry jako je činitel smykového tření, třecí síla nebo opotřebení.

Jednotlivé metody se rozlišují podle druhu kontaktu funkční dvojice, tvaru aktivních členů a druhů pohybu. Mezi hlavní druhy kontaktu patří:

- bodový styk - Pin-on-Disk,
- přímková styk - block on ring,
- plošný styk - ring on ring.

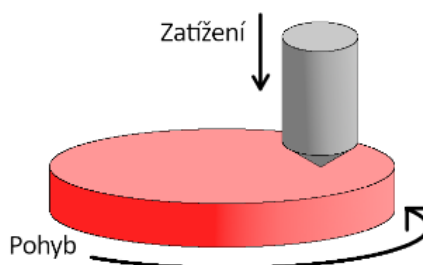
Lineární test



Obr. 4 - schéma lineárního testu

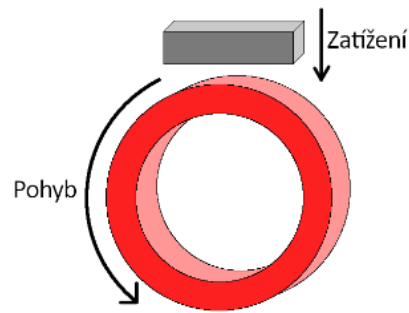
Statický pin nebo kulička jsou přitlačovány na pohybující se desku konající lineární vratný pohyb. Dráha je přímková.

Pin on Disk (rotační test)

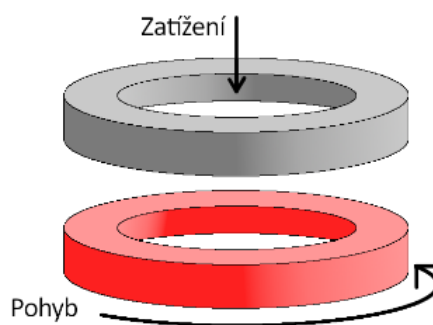


Obr. 5 - schéma testu Pin on Disk

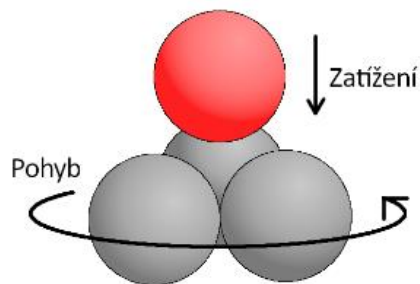
Při metodě pin on disk je pin opět hrot statický a je vtlačován do pohybujícího se vzorku. Vzorek (disk) vykonává rotační pohyb. Vytvořená stopa je tedy kružnice.

Block on Ring*Obr. 6 - schéma testu Block on Ring*

Pohybujícím se členem je rotační kroužek, na jehož obvod je přitlačován kvádr (blok).

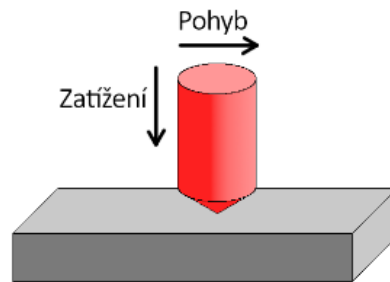
Ring on Ring*Obr. 7 - schéma testu Ring on Ring*

V této metodě jsou aktivními členy dva kroužky. Jeden statický a druhý vykonávající rotační pohyb.

Four Ball test*Obr. 8 - schéma Four Ball testu*

Test pomocí čtyř kuliček je vhodný pro testování lubrikačních vlastností. Tři, ze čtyř kuliček jsou fixovány ve spodním otočném držáku. Čtvrtá, fixně uložená kulička je kontrolovaně přitlačována ze shora. Stopa se vytvoří na kuličkách v podobě kruhové plošky.

Scratch test

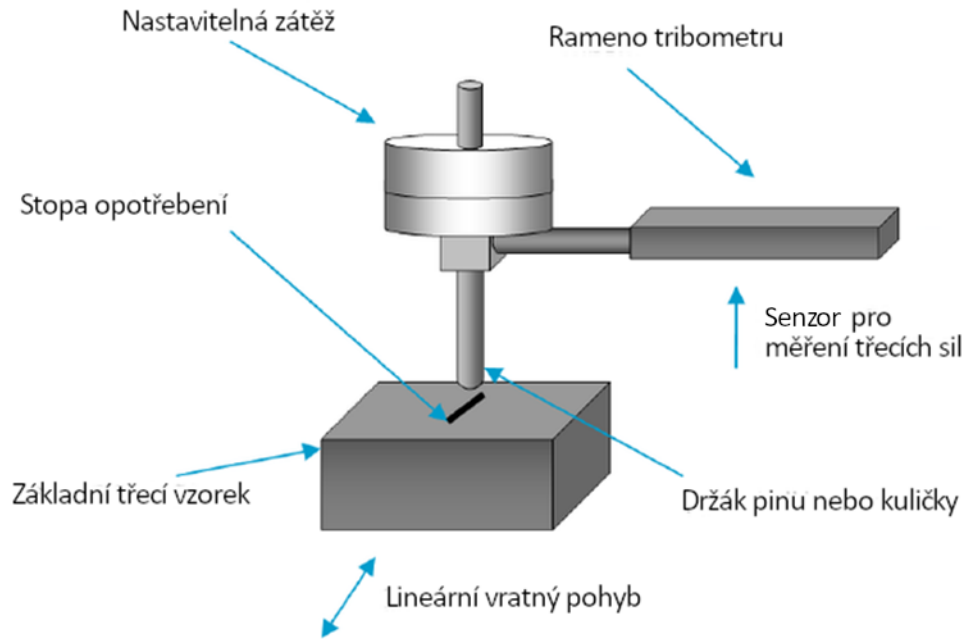


Obr. 9 - schéma Scratch testu

Pro testování adheze a koheze povlaků a vrstev je používána metoda scratch testu. Hrot je vtlačován zvyšující se silou do povrchu vzorku. Hrot se pohybuje konstantní rychlostí po přímce. Na vzorku se hodnotí kritické síly překonávající adhezivní síly povlaků.

4.1 Lineární test

Lineární test reprodukuje opakovaný pohyb dvou součástí po sobě. Tribologický systém je tvořen pinem, což může být hrot, kulička nebo i ploška známých parametrů. Základní třecí těleso je vzorek, který může být různých tvarů. Nejdůležitější je, aby měl na svém povrchu ploché místo pro provedení testu. [9]



Obr. 10 - schéma lineárního tribometru [10]

Hlavní vstupní parametry lineárního testu:

- Zatěžující normálová síla - konstantní/proměnná,
- dráha stopy opotřebení,
- čas, po který je test prováděn/ celková vzdálenost/ počet cyklů,
- rychlost lineárního vratného pohybu,
- teplota vzorku a okolí.

Na začátku testu se vzorek zatíží pinem/kuličkou na požadované normálové zatížení. Základní vzorek se poté začne pohybovat lineárním vratným pohybem po dobu testu. V průběhu testu se na vzorku vytváří stopa opotřebení, která slouží k vyhodnocení vlastností povrchu. Senzorikou je zaznamenávána třecí síla v obou směrech pohybu vzorku. Tato třecí síla následně slouží k výpočtu činitele tření. [9]

Doba, po kterou je vzorek zatěžován může být určena několika způsoby, a to:

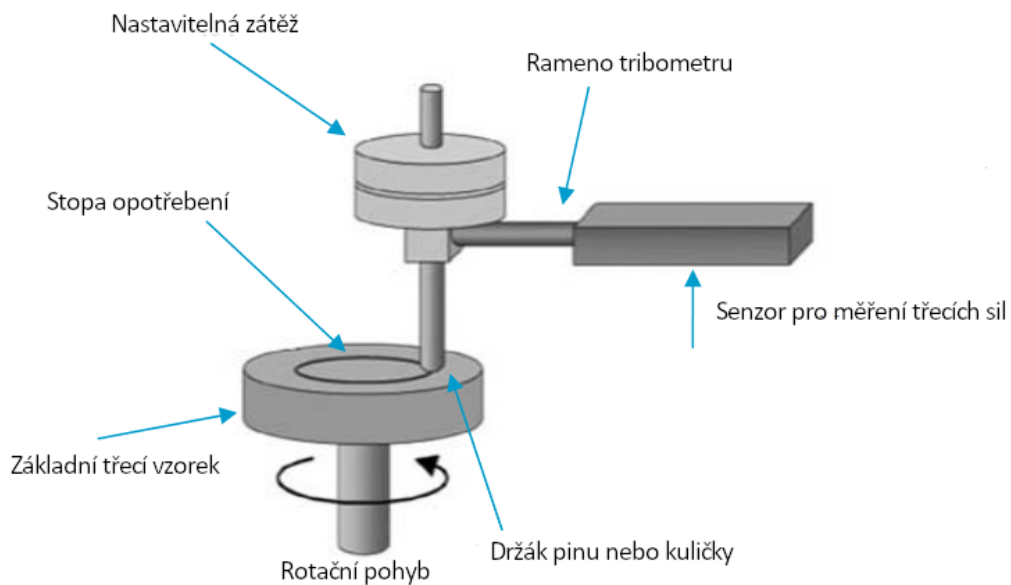
- fixní doba zatěžování součásti,
- celková uražená vzdálenost,
- počet cyklů/ vratných pohybů.

Lineárním tribologickým testem je možné vyhodnocovat:

- statický a dynamický činitel tření,
- rychlost opotřebení,
- body zvratu,
- velikost tření v závislosti na rychlosti,
- otěruvzdornost. [9]

4.2 Pin on Disk

Metoda pin on disk neboli rotační metoda je jedním ze základních tribologických testů. Principem tohoto testu je přitlačování tělíška (pin, kulička) na povrch základního třecího vzorku známou silou. Kromě posuvu kolmo k vzorku je pin statický. Hlavní pohyb vykonává rotační stůl jak je vidět na schématu. [12]



Obr. 11 - schéma rotačního tribometru Pin on disk [11]

Kromě přesné zatěžující síly, je definována i přesná pozice pinu, tedy na specifické kružnici. To umožňuje přesně určit rychlost v místě dotyku pinu a vzorku. Obecně může být test nastaven na určitý počet otáček v daném časovém intervalu nebo celkovou vzdáleností pinu po vzorku. [12]

Hlavní vstupní parametry testu pin on disk:

- Zatěžující normálová síla - konstantní/proměnná,
- dráha stopy opotřebení,
- počet otáček za minutu (RPM),
- čas, po který je test prováděn/ celková vzdálenost/ počet cyklů,
- rychlost rotačního stolu,
- teplota vzorku a okolí.

Pin on disk je vhodná metoda pro určování opotřebení. Díky nepřetržitému otáčení je tato metoda vhodná pro měření koeficientu tření v závislosti na čase. Pokud je možné plynule měnit otáčky stolu v průběhu testu, dá se určit i statický činitel smykového tření. Tento činitel se dá měřit i pomocí vratného rotačního pohybu, kdy se vzorek otáčí po směru hodinových ručiček. Po otočení o určitý úhel se zastaví a otočí se o stejnou hodnotu úhlu v opačném směru. [11, 12]

4.3 Vliv parametrů na test

Na vyhodnocení tribologického testu se musí nahlížet komplexněji. Jednotlivé vstupní parametry budou mít velký vliv na konečné výsledky testu. Naměřený průběh koeficientu tření musí být tedy doplněn od další parametry jako materiály funkční dvojice a geometrie kontaktu, rychlost pohybu, přítláčná síla, drsnost apod. [15]

4.3.1 Vliv materiálu tělíška

Tělíško neboli „PIN“ má zásadní vliv na koeficient tření. Nejčastěji, se toto tělíško, používá ve formě ocelové kuličky, vzhledem k její dostupnosti. Při hodnocení tvrdých a otěruvzdorných povrchů je ocelové kulička nevhodná. Ocelová kulička není dostatečně tvrdá a velmi rychle se opotřebovává. Opotřebovaný materiál kuličky pak ulpívá na vzorku a mění tak stykovou plochu mezi tělíškem a základním vzorkem. V takovémto případě je vhodné použít tělíško z odolnějšího materiálu. V některých případech však může být cílem sledovat konkrétní materiál funkční dvojice. Tedy i materiál tělíška „PIN“. [15]

Pro tvrdé povrchy je vhodné použít i tvrdší kuličky například korundové nebo rubínové (Al_2O_3) nebo kuličky z tvrdokovů jako jsou karbidy titanu nebo wolframu.



Obr. 12 - korundové kuličky - průměr 6,35 mm [16]

Dále je vhodné použít materiály tak, aby přibližovali danou aplikaci. Např. vzorek ze slinutého karbidu SK v kombinaci s ocelovou kuličkou, může přibližovat tření mezi karbidovou břitovou destičkou a ocelovým materiálem při obrábění. [15]

Pokud se jedné o kontakt tělísko/vzorek jako tribologický systém, bylo by vhodné vyhodnocovat i opotřebení tohoto tělíska.

4.3.2 Vliv poloměru stopy při PIN-ON-DISC

Pokud se zvolí stejný počet otáček na dvou různých průměrech, bude celková ujetá vzdálenost rozdílná. Na větším poloměru bude vzdálenost delší a bude větší i rychlost. Tato vzdálenost se projeví na opotřebení jak tělíska PIN, tak na vzorku. Tomu se dá zamezit zvýšením otáček na menším poloměru. [15] Chceme-li zanechat stejnou vzdálenost, tedy stejnou rychlost zvolíme otáčky podle vzorce:

$$n = \frac{v \cdot 1000}{\pi \cdot D}; \quad (4.1)$$

Rychlost v [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] je dělena obvodem opsané kružnice o průměru D [mm]. Hodnota **1000** je pouze pro přepočet jednotek a π je Ludolfovo číslo. Výsledkem jsou otáčky n [min^{-1}] někdy uváděny jako [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$] nebo *RPM* - *revolutions per minute* (otáčky za minutu).

Při takto zvolených otáčkách má dráha stejnou vzdálenost. Změnou poloměru se ale změní teplota kontaktních ploch. Na malém poloměru nebude mít teplo tolik času pro přechod do atmosféry. Kontaktní plochy se budou více zahřívat. Takto vzrostlá teplota může lokálně ovlivňovat kontakt kulička-vzorek a usnadňovat plastickou deformaci a adhezní ulpívání materiálu kuličky na vzorku. [15]

4.3.3 Vliv drsnosti kontaktních ploch

Drsnost vzorků může do koeficientu tření vnášet značnou chybu. Proto je důležité, aby testované vzorky měli stejnou charakteristiku povrchu. Většina laboratorních testů se provádí na vyleštěných vzorcích. Takto vyleštěné součásti se v praxi nevyskytují. Díky tomu jsou naměřené výsledky rozdílné od výsledků plynoucích z provozu reálných tribologických dvojic. [15]

Pokud se provádí tribologické měření, je vhodné uvádět drsnost povrchu pro pozdější porovnávání.

5 Hliníkové oxidické vrstvy

Hliník a jeho slitiny mají vlastnost samopasivace. Díky tomu, že se hliník váže s kyslíkem, se na povrchu vytvoří oxidická vrstva oxidu hlinitého (Al_2O_3). Tato vrstva chrání základní materiál před korozí. Běžně se tato vrstva vytvoří o tloušťce 0,005 až 0,015 μm . Vrstva není velmi odolná proti kyselému nebo alkalickému prostředí. To omezuje její korozní ochranu na prostředí s neutrálním pH, a to 5 až 8 pH. [17]

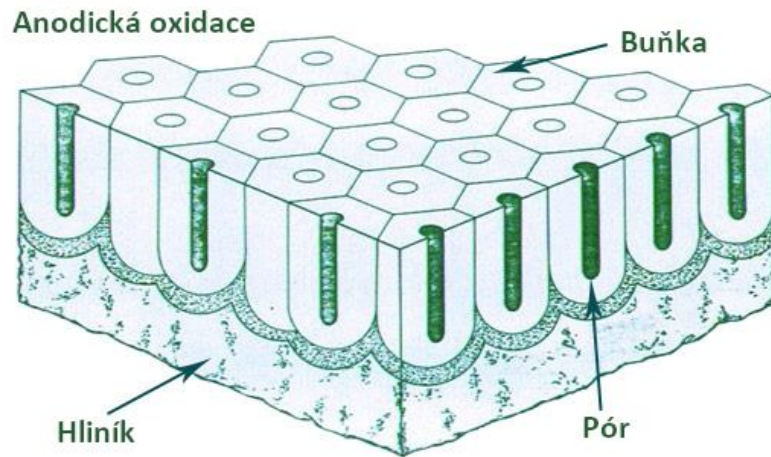
Kromě zvýšení korozní odolnosti má vrstva oxidu hlinitého ještě jednu výhodu. Tou je nárůst odolnosti proti opotřebení. Oxid hlinitý je velmi tvrdý materiál v přírodě se vyskytující ve formě korund. [17]

Korozní odolnost se u hliníku dá zvýšit, a to umělým vytvořením oxidové vrstvy. Tímto procesem je anodická oxidace. [17]

5.1 Anodická oxidace

Anodická oxidace neboli eloxování je povrchová úprava, kdy se na povrchu hliníku, titanu, hořčíku nebo zirkonia vytvoří ochranná oxidická vrstva. V případě hliníku Al_2O_3 . Uměle se tato vrstva vytvoří průchodem stejnosměrného elektrického proudu. Hliníkový materiál je připojen na kladný pól a je tedy anodou. Elektrody anoda (materiál) a katoda jsou umístěny v elektrolytu. Tím je nejčastěji kyselina sírová (H_2SO_4). Záporné aniony předají kyslík anodě a na povrchu anody (hliníku) se vytvoří oxid hlinitý. [17, 18]

Vrstva oxidu hlinitého je nevodivá a elektricky izoluje materiál. Vhodnou volbou elektrolytu se vytvoří porézní oxidická vrstva, která dokáže proud propustit. Nejprve se vytvoří amorfni neporézní vrstva nazývaná jako přepážková nebo mezní vrstva. Na tu se dále napojují buňky, které dále rostou. Buňky jsou porézní a mají hexagonální tvar. [17, 18]



Obr. 13 - struktura anodické oxidace [19]

Anodická oxidace hliníku se běžně dělí na dekorativní a tvrdé eloxování. Při dekorativním eloxování je větší pórovitost povrchu než u tvrdého neboli technického eloxování. Dekorativní má pórovitost cca 25% a u technické se pohybuje okolo 12%. Velikost pórů je závislá na druhu elektrolytu a pohybuje se v rozmezí 0,01 - 0,02 μm . Proces anodické oxidace je ovšem stejný. Liší se v použitých pracovních podmínkách, jako např. proudová hustota, teplota elektrolytu, koncentrace kyseliny apod. [18]

5.1.1 Technologický postup anodické oxidace



Obr. 14 - technologický postup anodické oxidace

Odmaštění

Před anodickou oxidací musí být materiál dokonale čistý. Prvním krokem je odmaštění povrchu. Za pomoci organických rozpouštědel se odstraňují silné vrstvy konzervačních látek. Používané odmašťovací prostředky jsou benzín nebo technická líh. [18]

Moření

Mořením se z povrchu hliníku odstraňuje oxidická vrstva Al_2O_3 . Povrch je naleptán v alkalické lázni hydroxidu sodného NaOH. Výrobce lázně uvádí teploty a dobu moření.[18]

Výrobce odmašťovací a mořící lázně RO GAL 18 uvádí, že lázeň obsahuje rozpouštěcí (mořící) i emulgační látky. Doporučená teplota lázně 50 °C, doba ponoru 2 - 6 min (v některých případech postačuje několik vteřin). [20]

Vyjasnění

Pro zvýšení čistoty a lesku hliníkového povrchu se používá vyjasňování. Odstraňuje stíratelné intermetalické vrstvy křemíku, které se mohou na povrchu vytvořit po moření. Lázeň je na bázi kyseliny dusičné. Tato lázeň se používá za studena. [18]

Anodická oxidace

Jak již bylo řečeno, eloxování se dělí na tvrdé a dekorativní.

- Tvrdá anodická oxidace



Obr. 15 - součást s povrchovou úpravou tvrdé anodizace [21]

Vytvoření velmi odolné vrstvy oxidu hlinitého na povrchu hliníku. Nejčastějším používaným elektrolytem je 10 až 20% kyselina sírová H_2SO_4 . Tato lázeň se používá při snížených teplotách -5 až 10 °C. Vznikají silné vrstvy oxidu hlinitého (25 - 130 μm) s tvrdostí HV 300 až 600. Zvyšuje se odolnost proti opotřebení a korozní odolnost hliníkové slitiny. [18, 20]

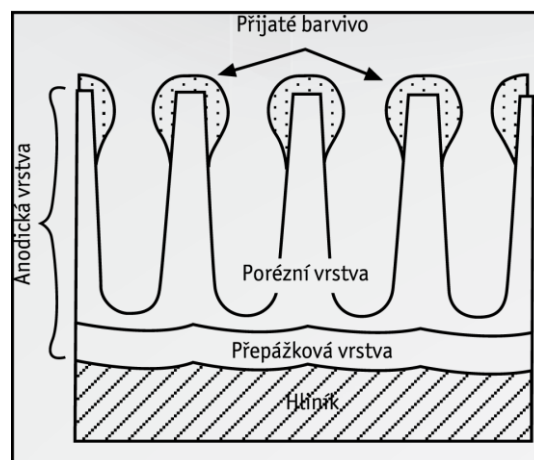
- Dekorativní anodická oxidace

Při dekorativním eloxování se vytvoří velmi porézní vrstva, která je vhodná k barvení. Existují dva druhy barvení eloxované vrstvy. [17]



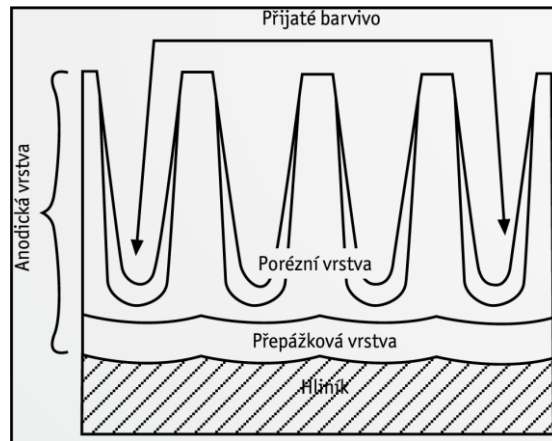
Obr. 16 - eloxované čepičky pro galuskové ventily [22]

První variantou je barvení ponorem nebo nástřikem. Jedná se o organická a anorganická barviva. Barviva jsou absorbována, ale i chemicky vázána na oxidickou vrstvu. Barvivo je ukotveno v horní části pórů. [17]



Obr. 17 - schématické znázornění barvení ponorem [17]

Druhou variantou barvení je za pomoci elektrolýzy. Tento proces je používanější. Barvivo se vylučuje pomocí střídavého proudu. Součást je ponořena v elektrolytu obsahující sůl kovu. Během elektrolýzy, se ve spodu pórů vylučuje kov. Takto vyloučené barevné vrstvy jsou odolnější a proti poškrábání. [17]



Obr. 18 - schéma znázornění barvení elektrolyzou [17]

Vypírání oxidické vrstvy

Jedná se o proplachování eloxované součásti. Tekoucí vodou nebo ve vodní lázni jsou odstraňovány zbytky elektrolytu. Proplachování trvá minimálně 30 min nebo stejnou dobu jako trvala anodická oxidace. Nevypláchnutá kyselina by mohla porušit oxidickou vrstvu nebo změnit barevný odstín. [18]

Utěsnění oxidické vrstvy

U dekorativního i tvrdého eloxování je důležité utěsnění oxidické vrstvy. Póry jsou utěsněny a zvyšuje se korozní odolnost vrstvy. Utěsnění se může provádět v demineralizované (DEMI) vodě při teplotě 95°C po dobu 30 min. vřelou vodou se povrch změní na monohydráty $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, póry se utěsní a změní se krystalická mřížka. [18, 20]

Dalším způsobem utěsnění je vyplnění pórů kovovými solemi. [18]

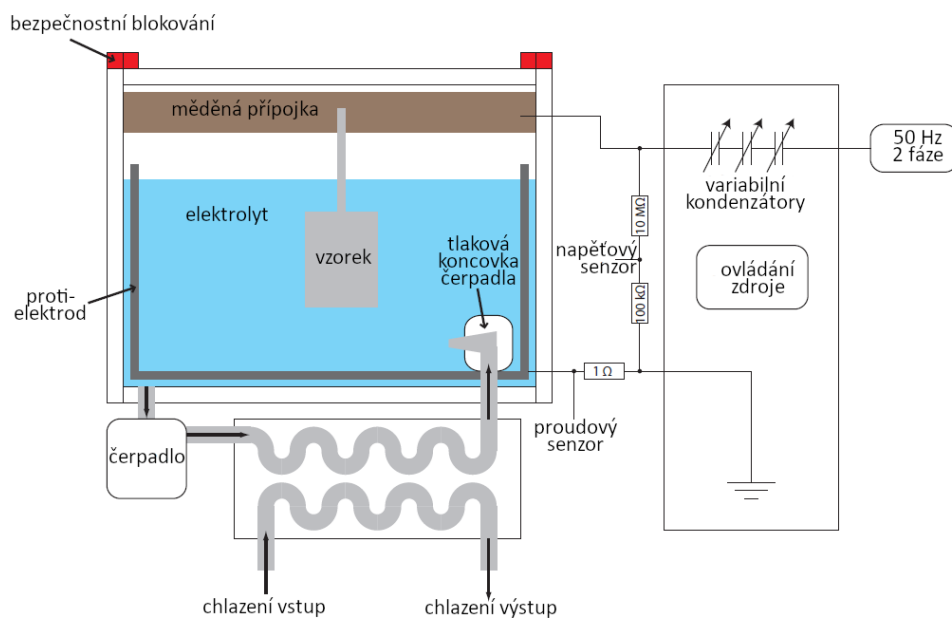
Vyplňování pórů oxidické vrstvy

Vyplňováním pórů lze dosáhnout lepších vlastností povrchu. Póry mohou být vyplněny např. nanočásticemi PTFE. [18]

5.2 Mikroblouková oxidace

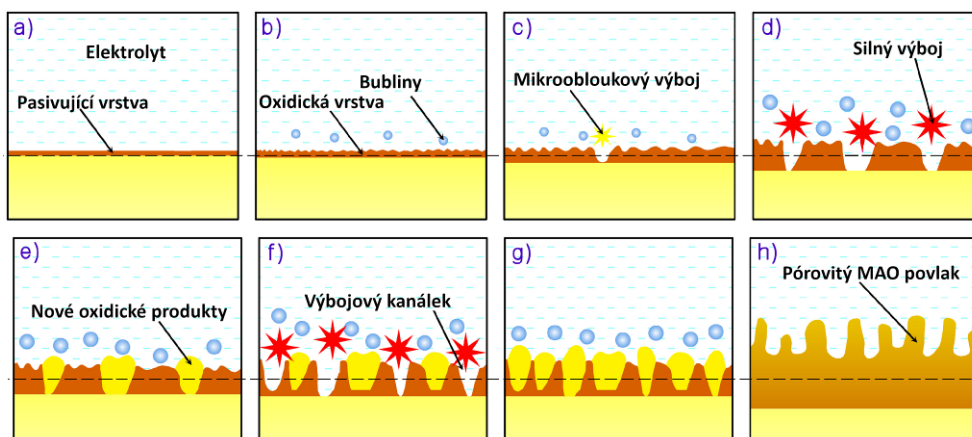
Mikroblouková oxidace (MAO) dále známá jako mikroplazmová oxidace nebo plazmová elektrolytická oxidace je povrchová úprava hliníku, hořčíku, niobu, titanu nebo zirkonia. Touto metodou se vytváří velmi tvrdá a korozně odolná vrstva oxidu hlinitého (Al_2O_3) na povrchu součásti. [18]

Součást je ponořena v elektrolytu a zapojena do elektrického obvodu. Zdroje elektrického proudu pro mikrobloukovou oxidaci jsou vysokonapěťové zdroje střídavého napětí. Samotný vzorek je elektrodou. Druhá proti-elektroda je také umístěna v elektrolytu. Nejčastěji je vyrobena z korozivzdorné oceli. [14, 18]



Obr. 19 - Schéma 10kW 50 Hz AC plazma elektrolytického procesu [24]

Hlavní podstatou mikrobloukové oxidace je vytvoření mikroplazmových výbojů. V počátku se na povrchu součásti vytvoří pórovité oxidy, podobně jako u anodické oxidace. V pórech je dojde k elektrickému průrazu a vzniká plazmový výboj. Ten lokálně roztaví oxidy v póru a dojde k výbuchu. Poté se materiál rychle smrští a zchladne, a tak uzavře pór. Tento proces se opakuje na různých místech, dokud se nevytvoří celistvá vrstva oxidů. [18, 23, 26]



Obr. 20 - schéma vytváření MAO keramické vrstvy [23]

Schéma na Obr. 20 - schéma vytváření MAO keramické vrstvy [23] vyobrazuje postupné vytváření MAO vrstvy. Nejprve vytvoření pasivující (a) a oxidické vrstvy (b) v počátku při lineárním nárůstu napětí. Po dosažení potřebného napětí vzniká mikroobloukový výboj (c) a napětí se koncentruje do malých míst. Tak vzniká pórovitá struktura. Jiskry jsou neustále větší (d) a amorfnní výstupky oxidu hlinitého rostou. Pokud je nově vzniklá oxidická vrstva dostatečně silná s vysokým elektrickým odporem, začne v pórech docházet k chemickým reakcím (e). Vznikají nové oxidy vyplňující póry. Prodlužováním procesu ve velkých výbojových kanálcích vystupují (f). Střídavý rozpad a formování oxidů způsobuje kolísání v tloušťce vrstvy (g). Rozpouštění základního materiálu a zplynování elektrolytu umožňují vytvoření porézního keramického povlaku (h). [23, 26]

Lázně pro mikroobloukovou oxidaci jsou na alkalické bázi. Běžně používané složení lázně je uvedeno v následující tabulce:

Tab. 2 - Elektrolyty pro technologii mikroobloukové oxidace [18]

Lázeň	Složení lázně	Koncentrace [g·l ⁻¹]	Proudová hustota [A·dm ⁻²]	Doba expozice [min]	Tloušťka vrstvy [μm]
1	Na ₂ SiO ₃	10	8	25	49
	NaOH	1			
	Na ₂ WO ₄	6			
	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₈ Na ₂	1			
2	KOH	8	1,5	12	47,5
	Na ₂ SiO ₃	10			
	Destilovaná voda				
3	KOH	4	0,002	30	-
	Na ₂ SiO ₃	2			

Předúprava povrchu před mikroobloukovou oxidací je podobná jako při technologii anodické oxidace. [14]

6 Multifunkční tribometr

Multifunkční tribometr MFT-5000 společnosti Rtec kombinuje několik druhů tribologických testů. Pomocí tohoto přístroje se dají měřit tribologické vlastnosti metodami pin on disk nebo lineární metodou. Měření může být za sucha i za mokra podle přítomnosti maziva. Stroj je opatřen speciálním kontejnerem, umožňujícím měření za mokra. Pro použití metody pin on disk a lineárního testu jsou k dispozici vysokoteplotní moduly pro použití do 500 °C a 1000°C. Jednotlivé moduly pro konkrétní testy jsou vyměnitelné.

Možnosti měření multifunkčního tribometru MFT-5000:

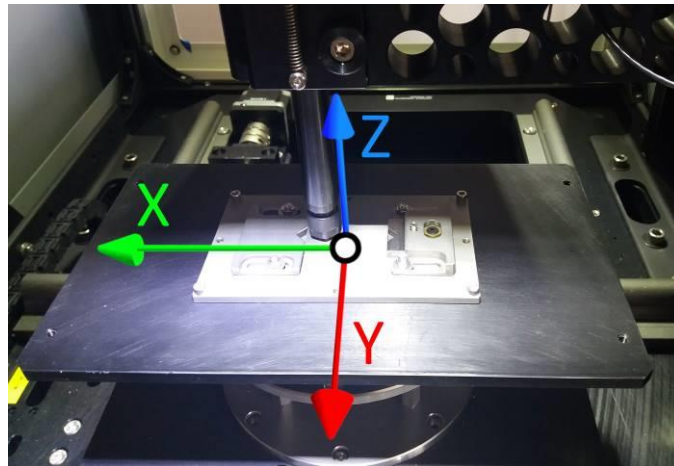
Maximální zátěžná síla - 200 N

Maximální teplota měření - 1000 °C



Obr. 21 - multifunkční tribometr Rtec MFT-5000 [13]

Pracovní prostor stroje, je popsán souřadným systémem „XYZ“. Zařízení Rtec má senzory pro zaznamenávání sil v osách „X“ a „Z“, aby bylo možné určit třecí a normálovou sílu. Posuvy ve směrech os „X“ a „Y“ jsou realizovány pomocí stolu. Posuv ve směru osy „Z“ je konán ramenem, ve kterém je umístěn držák tělíska „PIN“.



Obr. 22 - souřadný systém přístroje Rtec MFT-5000

Mimo jiné je přístroj MFT-5000 vybaven 3D optickým profilometrem, který dokáže naskenovat vytvořenou stopu a následně jí zobrazit ve 3D. Profilometry má vlastní osu „Z2“, díky které se může zaostřit do daného místa.

Ovládání pohybu ve všech osách může být realizováno softwarově. To je vhodné pro přesné najetí a pro pohyby realizující se v průběhu měření. Druhou možností je manuální ovládání pohybu. Manuální posuv je vhodný pro posuvy mimo měření. Operace jako najíždění „PINem“ k vzorku před měřením, pohyb vzorkem při měření 3D profilometrem nebo pro odjetí tělíska „PIN“ od vzorku při výměně tělísek či vzorků.



Obr. 23 - ovladač manuálního pohybu

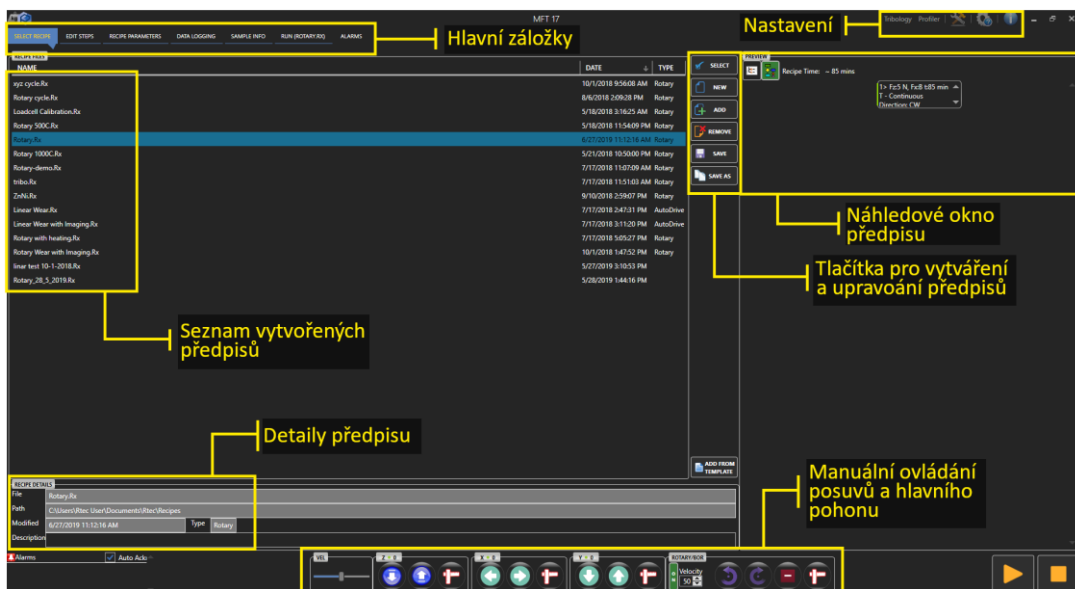
Tělísko je upevněno v držáku „PIN“ a je zajištěno proti pohybu stažením převlečné matice. Matice se nedotahuje příliš velkou silou tak, aby nedošlo k velkému pnutí v tělísku. Princip upnutí kuličky je podobný jako např. u čelistového sklíčidla vrtačky. Je důležité, aby byl držák po zatížení kolmo na plochu vzorku. To se dá jednoduše ověřit pomocí vodováhy, upevněné na rameně přístroje.



Obr. 24 - držák kuličky multifunkčního tribometru Rtec

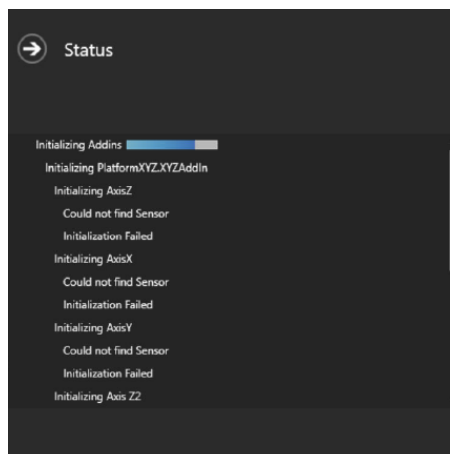
6.1 Softwarové rozhraní

Pro správné používání multifunkčního tribometru Rtec (dále jen MFT) a využití jeho plného potenciálu je důležité, seznámit se se softwarovým prostředím. Po spuštění programu „MFT17.exe“ se otevře hlavní okno. To slouží především k výběru předpisu neboli „recipe“. Předpisem obsahuje veškerá nastavení měření včetně pohybů, časů, zatížení apod.



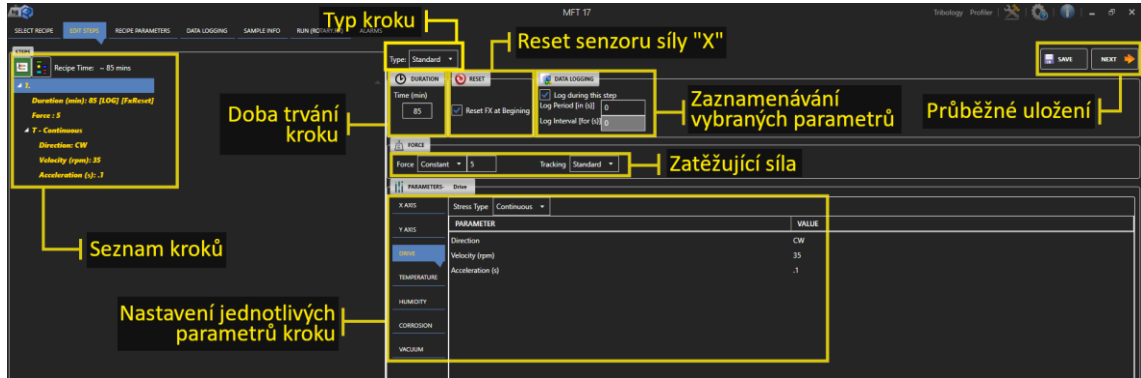
Obr. 25 - inicializační okno softwaru

Okamžitě po spuštění se také objeví okno, indikující správné spuštění programu. Pokud okno zmizí, je vše software připraven k bezproblémovému používání.



Obr. 26 - úvodní kontrola správného spuštění softwaru

Vybraný předpis se dále upravuje v záložce editace kroků „EDIT STEPS“. Zde jsou do předpisu vkládány jednotlivé kroky. Ty mohou obsahovat samotné měření nebo mohou být podpůrné. Podpůrné kroky mohou být chápány jako najetí do určité pozice nebo pro ovládání dalších přídatných modulů (ohřev na teplotu, chlazení, vytvoření vakua apod.)



Obr. 27 - okno editace kroků

Po vybrání kroku je možné upravovat parametry. Nejprve se vybere typ kroku:

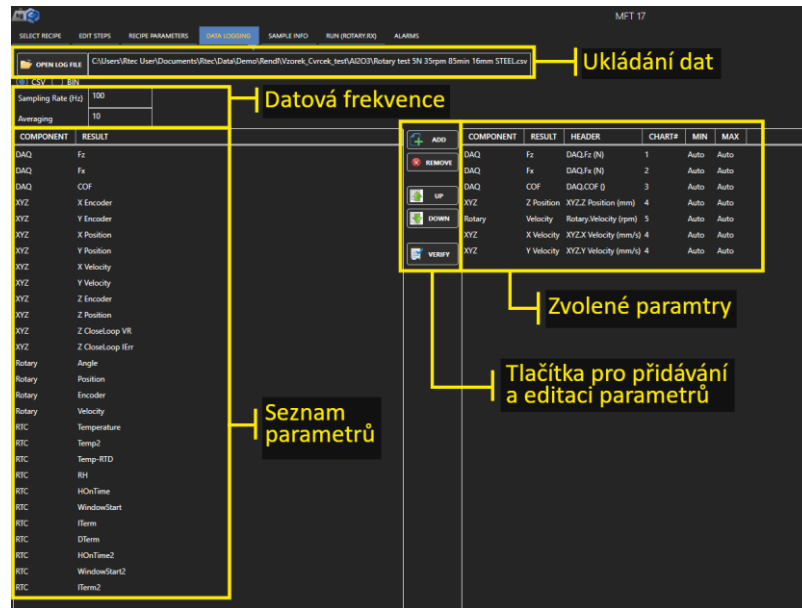
- Standard - krok určený k měření,
- Reposition - krok určen k pohybu pinu či stolu,
- Loop/delay - krok vytvářející smyčku nebo setrvání v určitém stavu.

Jednotlivé parametry se nastavují zvlášť pro osu „X“ a „Y“. Dále se nastavují parametry hlavního pohybu „DRIVE“. Na hlavní pohon může být připojen např. rotační stůl. Tzn. Volba otáček, směr otáčení, zrychlení apod.

Další důležité parametry jsou zatěžující normálová síla, a doba trvání kroku. Pokud je nastaven krok určený k měření, je důležité, aby bylo zaškrtnuto pole pro záznam hodnot („Log during this step“).

Po dokončení editace každé záložky je nutné jí průběžně uložit, aby se změny projevíly. K tomu slouží tlačítka „SAVE“ a „NEXT“.

Důležitou záložkou je záznam dat „DATA LOGGING“. Zde se mohou vybrat data, která je třeba zaznamenávat. Jedná se o síly ve směrech osy X a Z, koeficient tření, teplotu, pozici, rychlost a další. Jednotlivé parametry je třeba vybrat ze seznamu a klepnutím na tlačítko „ADD“ se přidá do vybraných parametrů.

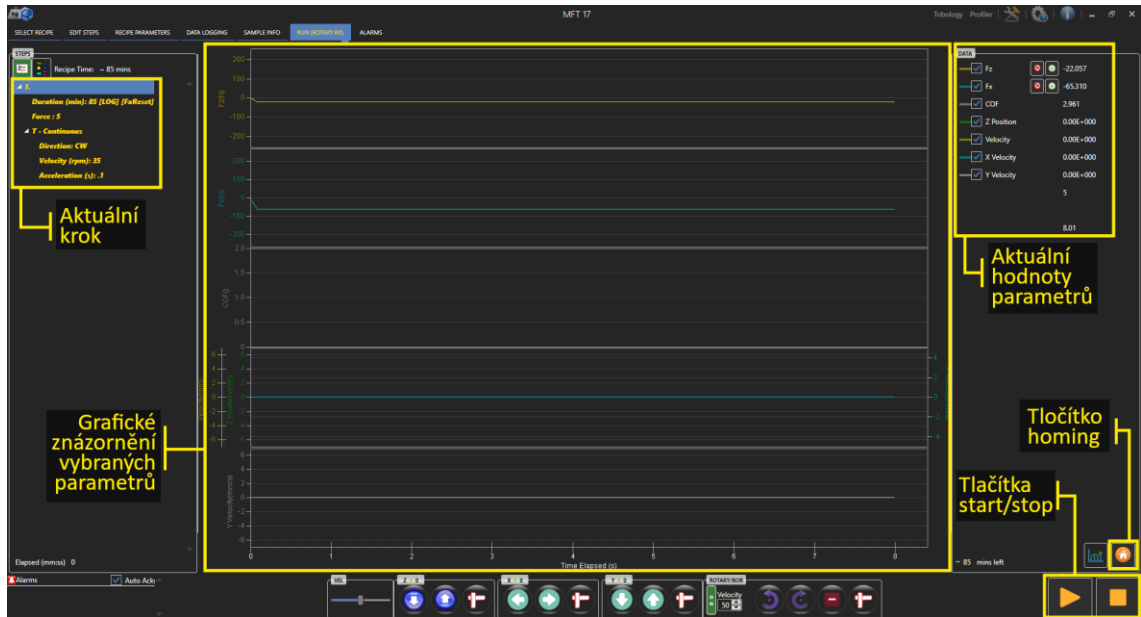


Obr. 28 - okno pro zaznamenávání dat

Kliknutím na pole „OPEN LOG FILES“ se otevře okno pro uložení dat. Data se ukládají ve dvou souborech, jeden pro komunikaci se softwarem a druhý ve formátu Excel tabulky „.xlsx“.

Datová frekvence „sampling rate“ udává, jaké množství dat se bude zaznamenávat. Hodnota je udávána v Hz. Čím vyšší je frekvence, tím více dat se zaznamená. To ale znamená, že při delších testech bude mít měření mnoho neúčelných zaznamenaných dat. Pro běžné testy postačí frekvence 100Hz. Pro dlouhodobé testy pak stačí desítky či jednotky Hz. Druhou hodnotou je „averaging“, průměrování. Hodnota 10 znamená, že každých 10 datových bodů se zprůměruje. Dochází ke kompresi dat a soubor není tak rozsáhlý.

Spuštění předpisu se realizuje v záložce spuštění „RUN“. Důležitým krokem před spuštěním je tzv. „homing“. Tato funkce najde výchozí bod souřadného systému a automaticky se vyrovná. Tento úkon, je dobré provádět po zapnutí stroje. Spuštění funkce se realizuje kliknutím na tlačítko „homing“ označené ikonou „domku“ v pravém dolním rohu obrazovky.



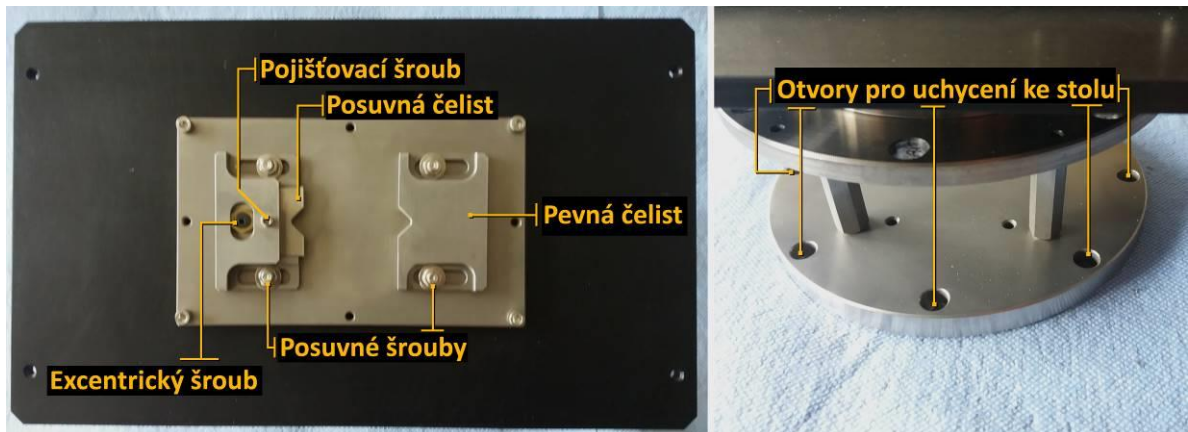
Obr. 29 - okno spuštění

Po kliknutí na tlačítko „start“ se předpis spustí. Aktuální krok je ve stromu žlutě podbarven a v levém dolním rohu je zobrazena doba trvání testu. Aktuální hodnoty zvolených parametrů jsou zobrazeny v levém sloupci. Uprostřed okna jsou zvolené parametry vyobrazeny graficky. V grafickém zobrazení je patrný průběh jednotlivých parametrů od počátku testu. Na svislé ose je daná hodnota parametru a na ose vodorovné je zobrazen čas.

Tlačítko „stop“ slouží k předčasnému ukončení testu.

6.2 Modul pro lineární test

Moduly je do stroje usazen tak, aby se stůl mohl pohybovat v ose „X“. Tribometr má senzor pro snímání síly ve směru osy „X“, proto není ani jiná možnost instalace modulu možná z hlediska funkčnosti.



Obr. 30 - popis modulu pro lineární test

Modul je ke stolu přístroje uchycen pomocí osmi šroubů. Žádný dodatečný pohon se k modulu nepřipojuje. Pohyb je realizován lineárním vedením stolu.

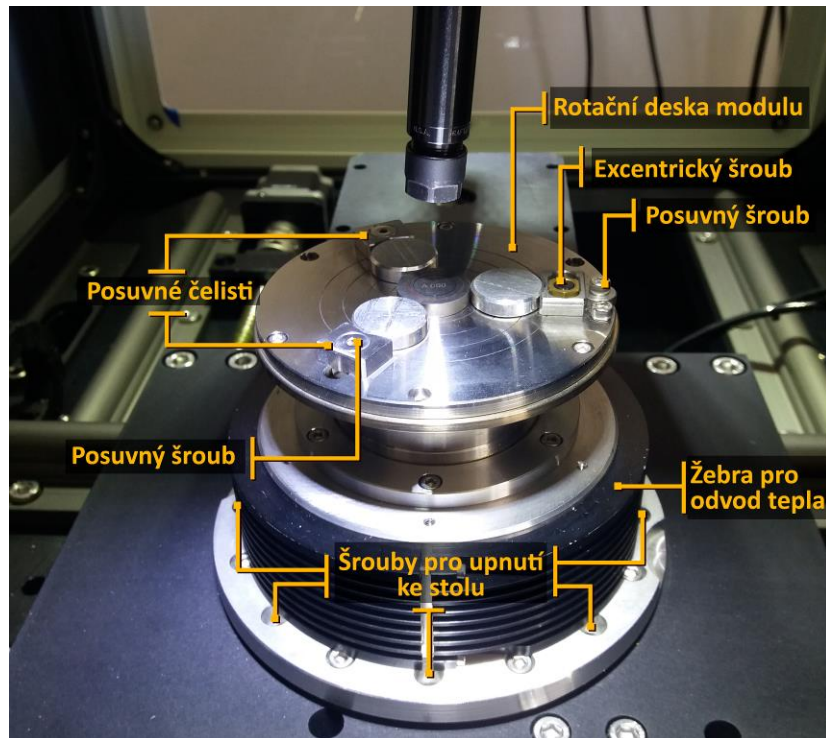
Vzorek je umístěn mezi čelisti. Povoláním posuvných šroubů se nastaví vhodná vzdálenost čelistí. Po opětovném dotažení se mezi čelisti vloží vzorek. Vzorku se zamezí v pohybu dotažením excentrického šroubu, který dotáhne pohyblivou čelist. Pojišťovací šroub zamezí pohyb posuvné čelisti.

6.3 Modul pro test Pin on disk/ball on disk

Rotační modul je stejně jako lineární připevněn ke stolu přístroje pomocí osmi šroubů. Na rozdíl od lineárního se dá rotační modul umístit pouze do jedné polohy. To je z důvodu umístění pohonné jednotky. Vzorek se na rotační desce vycentruje pomocí soustředných kružnic, vyznačených na rotačním modulu.

Upevnění vzorku je zajištěno pomocí tří posuvných prismatických čelistí. Jedna s čelistí je opatřena excentrickým šroubem. Po utažení excentrického šroubu je vzorek zajištěn proti pootočení.

Rotační modul je poháněn kvůli rotaci vzorku. Tento modul je připojen dvěma kabely k přístroji. Jeden kabel je určen pro přísun elektrické energie. Druhý z kabelů slouží ke komunikaci modulu se softwarovým rozhraním a přístrojem samotným. Jedná se o celkový počet otáček, rychlost otáčení, směr otáčení, zrychlení a mód pohybu.



Obr. 31 - popis rotačního modulu Pin-on-Disk

Jak je vidět na obrázku výše, některé vzorky je nutno upnout pomocí přípravku. Čelisti totiž nedovolují upnutí menších vzorků. Např. vzorek o průměru 20 mm může být upnut pomocí tří tablet o stejném průměru.

Velmi důležitým nastavením při měření Pin-on-Disk je poloměr stopy. Poloměr či průměr společně s nastavenými otáčkami za minutu (RPM) určují rychlost otáčení mezi tělískem „PIN“ a základním vzorkem. V praxi se hodnota poloměru nastaví vyosením držáku „PIN“ do požadované polohy. Jedinou podmínkou při měření na multifunkčním tribometru je vyosení držáku pouze ve směru osy „Y“. Důvodem je absence senzoru síly ve směru „Y“. Pokud je posuv realizován pouze ve směru osy „Y“, má třecí síla pouze složku F_x . Pokud by byla posunuta i ve směru „X“, měla by síla obě složky F_x a F_y . Tak by byla hodnota třecí síly rozložena do dvou směrů a přístroj by nemohl zaznamenat její přesnou hodnotu.

Žebrování se na rotační modul nasazuje v případě použití pece. Slouží ke zlepšení odvodu tepla při zahřívání vzorku. Na rotační modul je pouze nasazeno a zajištěno proti pohybu dvojicí šroubů. Pro standardní měření za pokojové teploty není žebrování důležitou součástí sestavy a nemusí být použito.

7 Experimentální část

MFT umožňuje měření pomocí několika typů testů. To je předpokladem pro ověřování tribologických vlastností. Zkoumaná skupina povrchových úprav je vytvořena na základní hliníkové slitině. Jedná se o perspektivní i moderní povrchové úpravy anodické oxidace a mikroobloukové oxidace MAO, známé také pod názvem plazmatická oxidace PEO.

Základním materiálem vzorků je hliníkový plech ze slitiny EN AW 1050.

Tab. 3 - Chemické složení hliníkové slitiny použité pro výrobu vzorků [25]

Prvek	Al	Cu	Fe	Mn	Mg	Si	Zn	Ti	Ostatní
Obsah [%]	min 99,5	0,05	max 0,4	0,01	0,05	0,25	max 0,7	max 0,05	max 0,3

Na hliníkových vzorcích byla vytvořena vrstva anodické AO a mikroobloukové oxidické vrstvy. Dva vzorky byly anodicky oxidovány. Vzorek č. 1 - dekorativní AO, vzorek č. 2 - tvrdá AO. Na dalších dvou vzorcích byla vytvořena vrstva Al_2O_3 pomocí mikroobloukové oxidace. Vzorek č. 3 - tenká vrstva MAO a vzorek č. 4 - silná vrstva MAO. Hodnoty tloušťek vrstev byly dodány společně se vzorky. Hodnoty vrstev byly uvedeny jako výsledky z metalografických výbrusů, kde měly hodnoty tloušťek dekorativní AO - 69,77 mm, tvrdá AO - 66,25 mm, slabá MAO - 22,73 mm a silná MAO - 43,18 mm.

Tab. 4 - tloušťky oxidických vrstev

Číslo vzorku	Povrchová úprava
1.	dekorativní AO
2.	tvrdá AO
3.	tenká MAO
4.	silná MAO

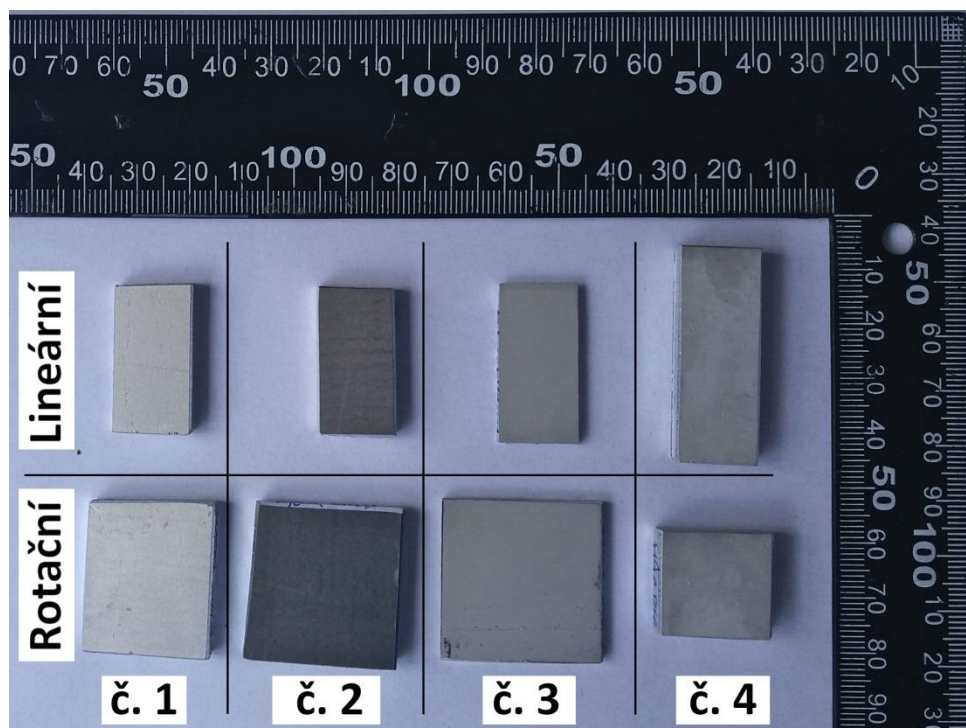
Jednotlivé vzorky byly připraveny pro lineární test i pro rotační Pin-on-Disk. Vzhledem k dostupnosti byli rotační vzorky čtvercového tvaru. Rotační stůl tribometru neumožňuje upnutí součástí s průměrem menším než 30 mm. Z toho důvodu musely

být některé vzorky přilepeny k podložce kyanoakrylátovým lepidlem. Podložkou byla rotační deska s průměrem 50 mm. Deska měla uprostřed otvor pro snadnější odstranění vzorku.

Pro vytvoření oxidické vrstvy pomocí MAO je používá několikanásobně vyšších hodnot elektrického napětí než při technologii anodické oxidace. Od těchto vrstev se očekává vyšší korozní odolnost a další vlastnosti jako například vyšší otěruvzdornost. Tyto předpoklady byly motivací pro sestavení experimentálního schéma, společně s ověřením a porovnáním tribologických vlastností.

7.1 Experimentální schéma

Experimentální část je zaměřena na zkoumání součinitele tření pomocí lineárního a rotačního Pin-on-Disk testu.



Obr. 32 - použité vzorky lineárního a rotačního testu

Pro porovnatelnost výsledků měření jednotlivých vzorků, budou použity odpovídající parametry testů.

Základním parametrem je normálová zatěžující síla. Ta je stanovena hodnotu 5 N. Hodnota 5 N byla určena na základě studia odborných článku a externích zdrojů,

zabývajících se tribologickými testy. Celková ujetá dráha při rotačním testu je 125 m na poloměru 8 mm. Při rychlosti $5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, neboli otáčkám 60 min^{-1} , je celkový počet cyklů 2500. Tyto hodnoty odpovídají celkovému času 41,5 min.

Lineární test má podobné parametry jako test rotační. Normálové zatížení odpovídá hodnotě síly rotačního testu, tedy 5 N. Délka stopy je zvolena 10 mm a celková vzdálenost snížena na hodnotu 3 m. Rychlost pohybu je stanovena na $0,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Celková doba měření je 10 min.

Parametry lineárního testu byly upraveny na základě technických možností stroje a předchozí zkušenosti měření pomocí lineárního testu.

Pro všechny testy je zvoleno tělísko „PIN“ ve formě korundové kuličky Al_2O_3 o průměru 6,3 mm.

Tab. 5 - tabulka vstupních parametrů měření

Parametry	Lineární test	Rotační test
normálová síla	5 N	5 N
rychlost pohybu	$0,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$
délka stopy	10 mm	-
poloměr stopy	-	8 mm
celková ujetá vzdálenost	3 m	125 m
počet cyklů	~600	~2500
čas měření	10 min	41,5 min
tělisko „PIN“	korundová kulička \varnothing 6,3 mm	

Pro další porovnání budou u rotačních vzorků č. 3 a č. 4 (vzorky MAO) naměřeny další stopy za stejných podmínek s výjimkou normálového zatížení. Tato hodnota byla upravena na 2 N.

Lineární test pro vzorky č. 3 a č. 4 bude také doplněn, a to přidáním dalších dvou stop, při kterých bude změněna celková doba měření.

Tab. 6 - časové údaje pro měření lineárního testu

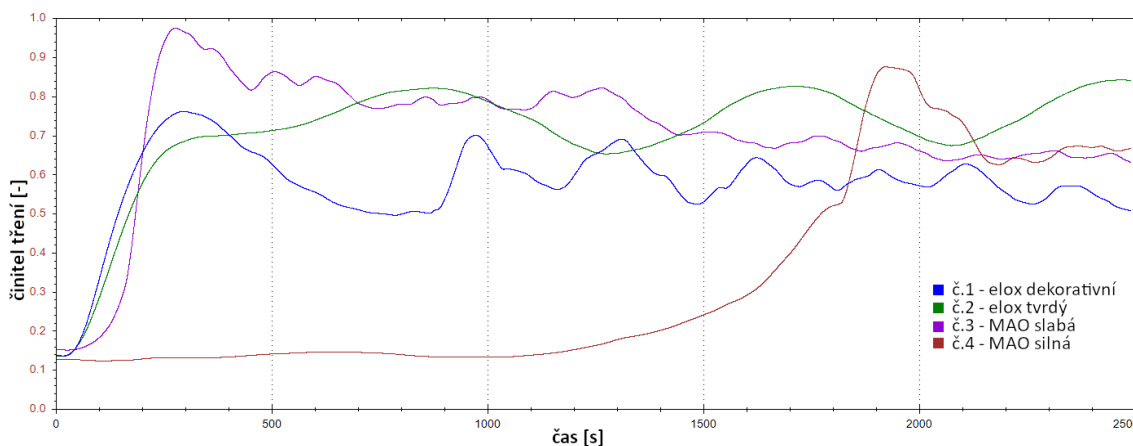
Vzorek	Časové úseky [min]			
vzorek č. 3	3	6	10	-
vzorek č. 4	-	6	10	20

8 Výsledky tribologického měření

Měření byla provedena na multifunkčním tribometru Rtec MFT-5000 za pokojové teploty. Software přístroje naměří požadovaná data v průběhu testu a zanesse je do zvolených grafických závislostí. Sledovaným parametrem byl činitel tření všech vzorků, a to v průběhu lineárních i rotačních tribologických testů. Profil stopy byl hodnocen pomocí 3D profilometru.

8.1 Výsledky testu Pin-on-Disk

Graf znázorňuje průběh činitele tření při tribologickém testu typu rotační Pin-on-Disk test. Všechny měření byly prováděny při normálovém zatížení 5 N.



Obr. 33 - časová závislost činitele tření Al_2O_3 oxidických vrstev - rotační test

Tabulka udává hodnoty koeficientu tření před porušením uměle vytvořené vrstvy oxidů Al_2O_3 . Tyto hodnoty byly odečteny z grafických závislostí. Hodnota času porušení vrstvy je taktéž patrná z grafické závislosti, kde může být patrná výrazným zvýšením koeficientu tření.

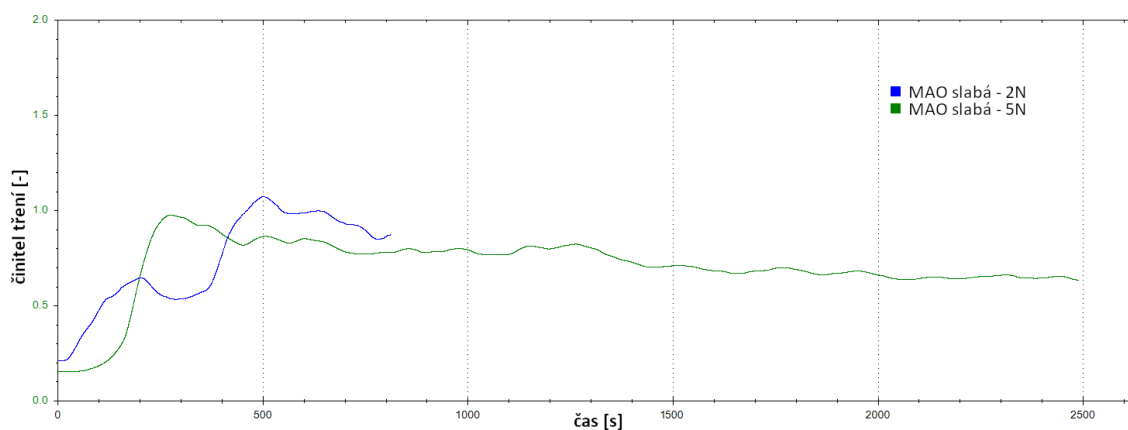
Tab. 7 - činitele tření jednotlivých měřených vzorků - rotační test

Vzorek	Dynamický činitel tření [-]	Funkční čas vrstvy [s]
dekorativní AO	0,5	850
tvrdá AO	0,75	nedošlo ^{*)}
slabá vrstva MAO	0,15	400
silná vrstva MAO	0,13	1200

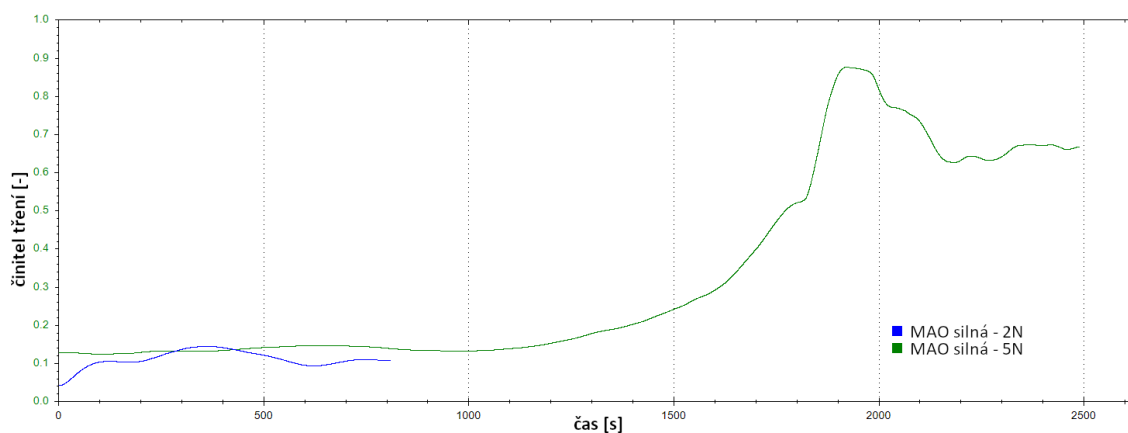
*) - v průběhu testu (~42 min) nedošlo k porušení vrstvy

Vzhledem k délce testu při zatížení 5 N je možné porovnat odolnosti jednotlivých oxidických vrstev.

Pro demonstraci vlivu zvolených parametrů na průběh testu, jsou uvedeny další měření pro vzorky s úpravou MAO. Parametry testů jsou shodné s výjimkou zatěžující síly 2 N a zkrácení doby měření díky časové náročnosti.



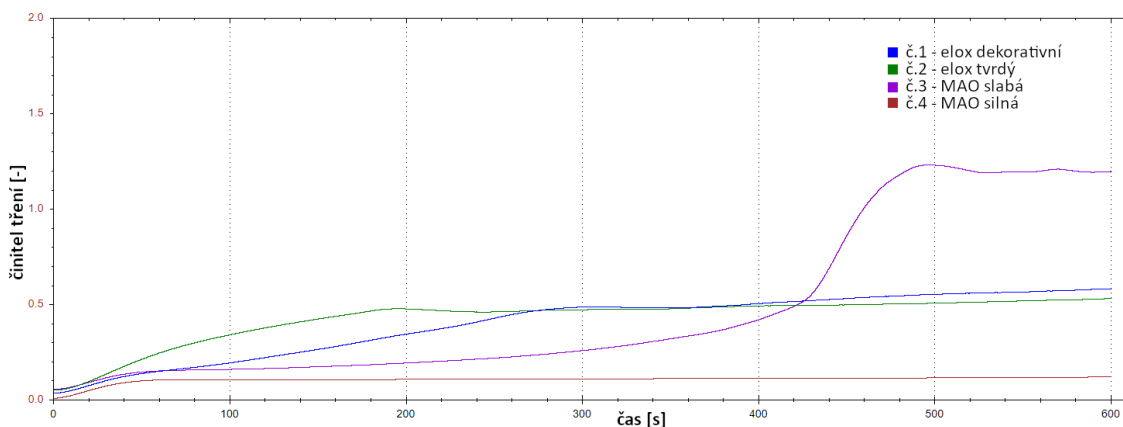
Obr. 34 - koeficient tření slabé vrstvy MAO při dvou zatíženích rotačního testu



Obr. 35 - koeficient tření silné vrstvy MAO při dvou zatíženích rotačního testu

8.2 Výsledky lineárního testu

Graf znázorňuje průběh činitele tření při tribologickém testu typu lineární test. Všechny měření byly prováděny při normálovém zatížení 5 N. Ve zkráceném časovém úseku 10 min.



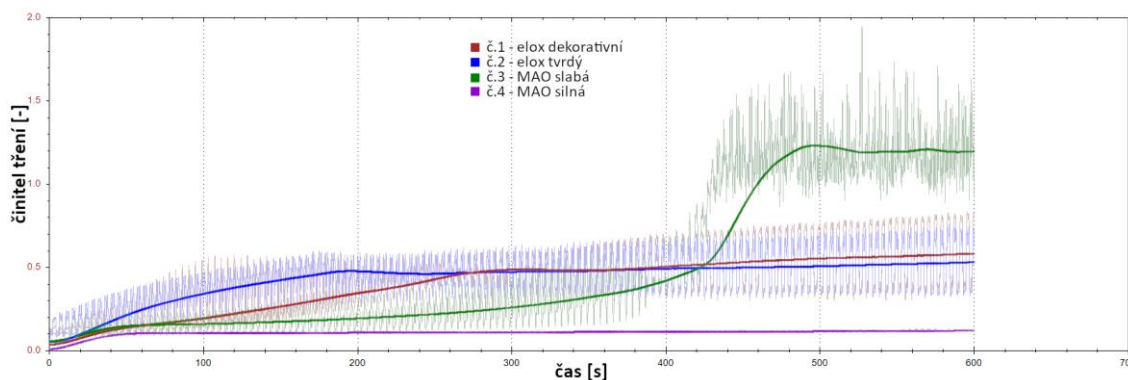
Obr. 36 - časová závislost činitele tření Al_2O_3 oxidických vrstev - lineární test

Tab. 8 - hodnoty dynamického činitele tření lineárního testu

Vzorek	Dynamický činitel tření [-]
dekorativní AO	0,5
tvrdá AO	0,5
slabá vrstva MAO	0,2
silná vrstva MAO	0,1

8.3 Zhodnocení výsledků

Nastavením vysoké frekvence pro záznam dat se získají přesné hodnoty z průběhu testu. Tyto hodnoty ale mají vysoký rozkmit a je nutno je patřičně vyfiltrovat. Po vyfiltrování jsou křivky hladké a znázorňují průměrné hodnoty činitele tření v průběhu testu.



Obr. 37 - rozdíl při filtrování naměřených dat

Při porovnávání výsledků obou tribologických testů, je patrné výrazné snížení koeficientu tření použitím mikroobloukové oxidace. Při porovnání tvrdé anodické oxidace se silnou vrstvou MAO, jedná se o pětinasobné snížení činitele tření.

Tab. 9 - porovnání dynamických činitelů tření

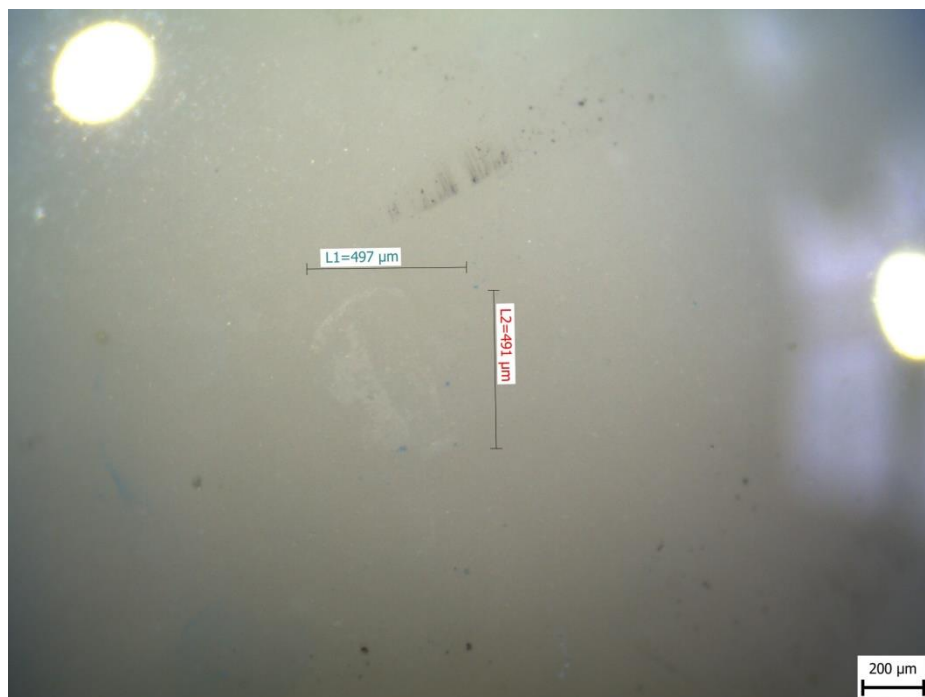
Vzorek	Dynamický činitel tření [-]	
	rotační test	Lineární test
dekorativní AO	0,5	0,5
tvrdá AO	0,75	0,5
slabá MAO	0,15	0,2
silná MAO	0,13	0,1

Z tabulky Tab. 9 - porovnání dynamických činitelů tření je patrné výrazné a předpokládané snížení koeficientu tření u vrstvy mikroobloukové oxidace. Zároveň silnější vrstva MAO má v případě lineárního testu poloviční hodnotu činitele tření.

V průběhu tribologických testů, se z vrstvy oddělují drobné částice oxidů, které se chovají jako abrazivum. Tyto částice napomáhají opotřebení, což se projevuje zvyšováním činitele tření. Tento jev je zřetelný hlavně v případě slabé vrstvy MAO při lineárním testu. U rotačního testu je tento jev nejméně výrazný u vrstvy silné MAO.

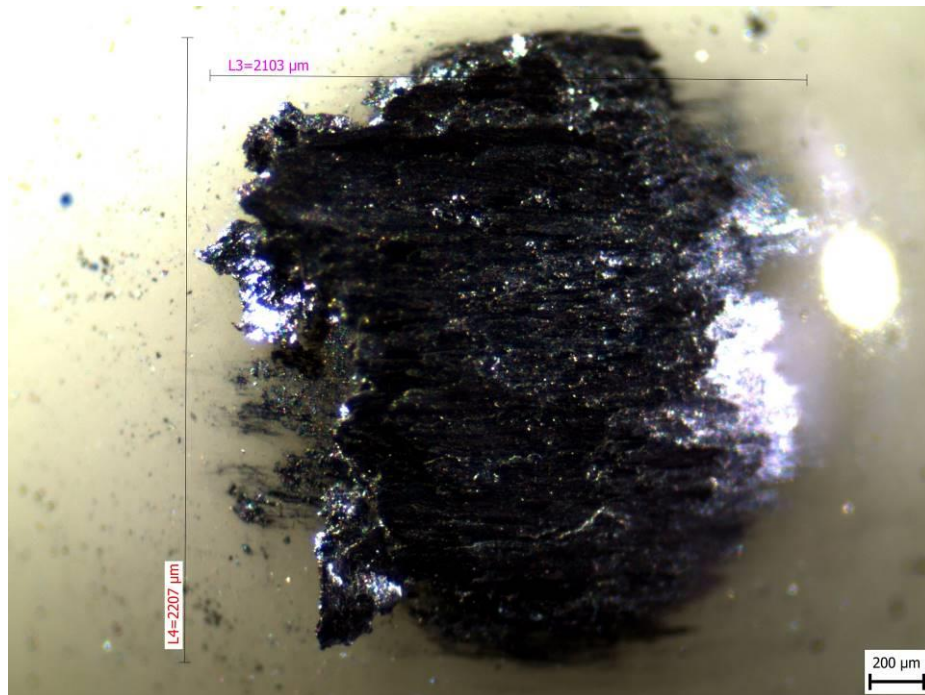
Materiály byly testovány za stejných podmínek. Předpokladem bylo, že mikrooblouková oxidace bude mít lepší vlastnosti, co se týče otěruvzdornosti. Při zatěžování silou 5 N, otáčkami 60 RPM a délce testu 41,5 min se jako nejlepší jevila povrchová úprava tvrdého eloxování. Navzdory poměrně vysokému činiteli tření.

V průběhu testu došlo u dvou vzorků k porušení vrstvy oxidů (slabá a silná MAO) k porušení vrstvy oxidů Al_2O_3 . Po porušení vrstvy nastal kontakt korundové kuličky a základního hliníkového materiálu. Po kontaktu se začal základní Al materiál adhezně spojovalt s povrchem kuličky. Na kuličce se vytvořil nárůstek, který ještě více abrazivně opotřebovával základní materiál. Nárůstek se vytvořil i při rotačním testu dekorativní AO. Z 3D profilometrie není však patrné, zda došlo k porušení vrstvy v celé její tloušťce. Nárůstek může tedy být následkem nesoudržnosti dekorativní vrstvy. Nárůstek je patrný na následujících snímcích pořízených pomocí mikroskopu Olympus SZ61.



Obr. 38 - korundová kulička pro Pin-on-Disk - vzorek tvrdá AO

Na snímku je viditelné opotřebení kuličky. Vybroušená ploška má rozměry $L1 = 497 \mu\text{m}$ a $L2 = 491 \mu\text{m}$. Zatížení bylo 5 N při rychlosti $5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ a čase 41,5 min. Snímek je 4,5x zvětšení kuličky, což je maximální zvětšení mikroskopu Olympus SZ61.



Obr. 39 - korundová kulička pro Pin-on-Disk - vzorek slabá vrstva MAO

Oproti kuličce použité pro měření vzorku s tvrdou AO má kulička pro slabou vrstvu MAO již zmiňovaný nárůstek. Nárůstek má rozměry $L3 = 2103 \mu\text{m}$ a $L4 = 2207 \mu\text{m}$. To odpovídá průměrné hodnotě 2,155 mm. Ploška, která se vytvořila na tělísku, je v tomto případě zakryta nárůstkem a nedá se tedy určit její velikost.

Podobně jako u slabé vrstvy MAO vypadají kuličky pro dekorativní AO a silnou vrstvu MAO. Díky tomuto nárůstku se patřičně nedá určit opotřebení kuliček.

8.3.1 Výsledky při změně zatěžující síly

Změna zatěžující síly by podle rovnice (2.1) neměla mít vliv na hodnotu činitele tření. V rešeršní části je ale uvedeno, že zatěžující síla patří mezi parametry, ovlivňující hodnotu činitele tření. Pro jednoduché ověření byly tedy provedeny krátké rotační testy na vzorcích s MAO úpravou. Testy byly upraveny tak, aby zatěžující síla byla nižší než první zvolená. Konkrétně tedy z hodnoty 5 N na hodnotu 2 N. Měření ukázala rozdílné hodnoty činitele tření v obou případech, jak je patrné z Obr. 34 a Obr. 35. Hodnoty byly změněny následovně:

Tab. 10 - porovnání činitelů tření při změně zatížení

Vzorek	Činitel tření [-]	
	síla 2 N	síla 5 N
slabá MAO	0,5	0,15
silná MAO	0,1	0,13

U obou testů při zatížení 2 N je viditelná záběhová část testu, která není patrná při hodnotě 5 N. Také, došlo k opotřebení vrstvy oxidů po delším čase, což se předpokládalo vzhledem k nižšímu zatížení.

Vzhledem k struktuře povrchu nebyla hodnota zatěžující síly 2 N vhodná. Při měření docházelo k vysokému rozkmitu, který mohl značně ovlivnit výsledky. Nedá se tedy s jistotou tvrdit, zda jsou hodnoty činitele tření při nižším zatížení správné.

8.3.2 Profilometrie

Profil tribologické stopy byl měřen na 3D optickém profilometru, kterým také disponuje multifunkční tribometr Rtec MFT-5000. Použit byl objektiv s desetinásobným zvětšením, který je dodáván ke stroji. Profilometru se musí nastavit parametry skenování, jako jsou fokusovací vzdálenost, hraniční vzdálenosti snímání, barva použitého světla a jeho intenzita. 3D profilometr používá různé druhy světla, tedy vlnové délky světla pro širší škálu skenovatelných materiálů. V softwarovém prostředí zařízení se pak dá proces skenování plně automatizovat, podobně jako měřící kroky programu.

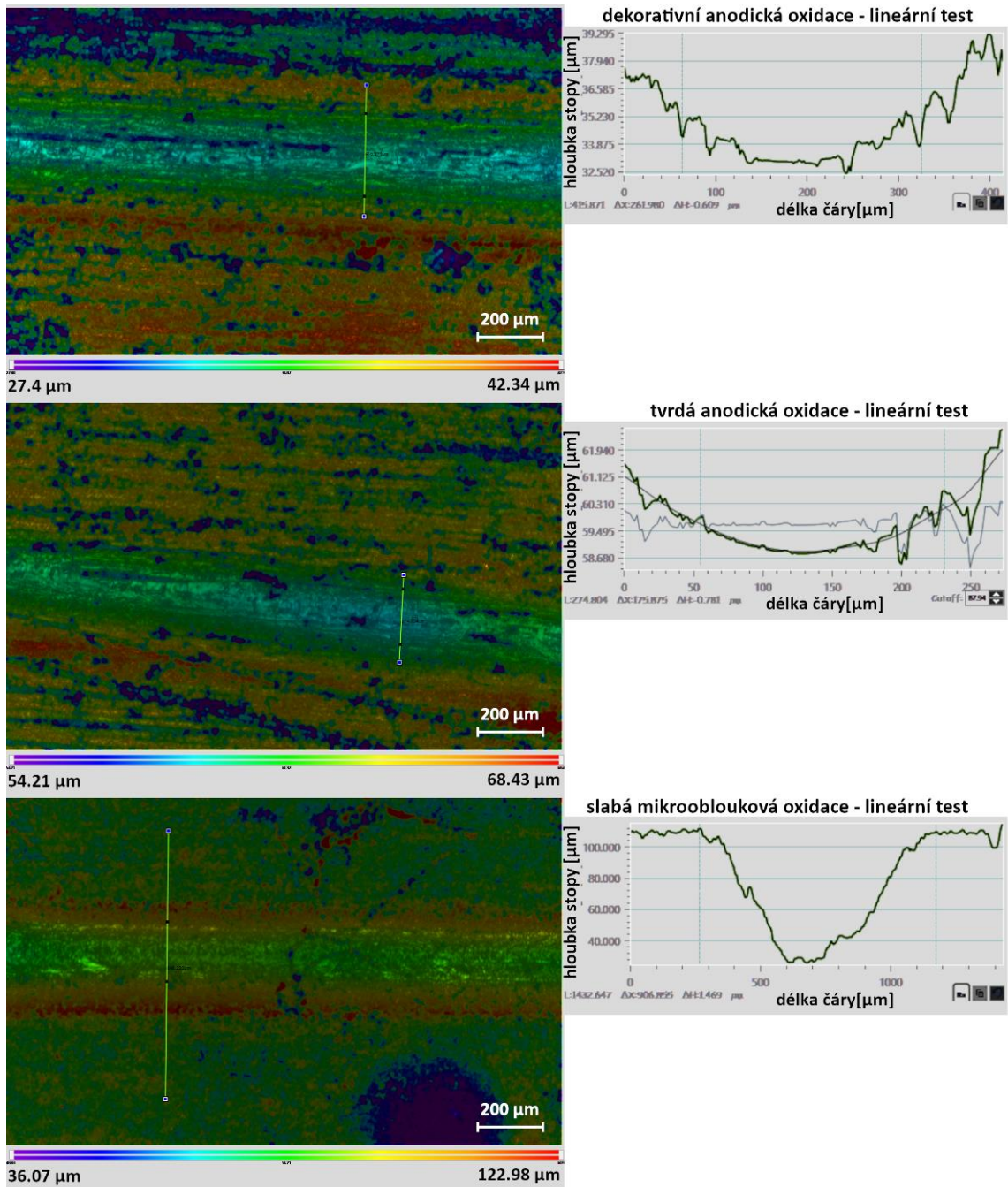
Po naskenování povrchu přístroj vyhodnotí profil. Použita je standardní barevná škála od fialové po červenou, kde fialová barva značí nejnižší místo a červená barva nejvyšší místo. Krajní hodnoty jsou potom opatřeny číselnými hodnotami pro snadnější orientaci v barevné škále. Další možností softwaru profilometru, je vytvoření řezu danou tribologickou stopou. Po vytvoření přímkový řezu se zobrazí graf značící konkrétní řez. Na vodorovné ose grafu je vynesena vzdálenost, konkrétně délka zvolené čáry a na svislé je naměřená výška profilu.

Pravděpodobně vlivem struktury povrchu a zbarvení vzorků č. 3 a č. 4, tedy MAO, nebylo možné nasnímat stopu pomocí 3D profilometru. V případě vzorku č. 3 dokázal profilometr určit profil stopy, nicméně nedokázal nasnímat základní povrch. Na snímcích vzorku č. 4 nebylo možné rozlišit tribologickou stopu od základního povrchu.

Tab. 11 - rozměry tribologických stop lineárního testu

Povrchová úprava	šířka stopy [μm]	hloubka stopy [μm]
dekorativní AO	265	4,1
tvrdá AO	175	2,3
slabá MAO	700	37
silná MAO	-	-

Z Obr. 40 a Tab. 11 je patrné již zmiňované porušení oxidické vrstvy a kontakt tělíska „PIN“ se základním hliníkovým materiálem. K tomuto porušení vrstvy v celé tloušťce došlo v případě slabé vrstvy MOA. U tohoto vzorku je patrné vytvoření výstupků po okrajích tribologické stopy. To může být důsledkem kompletního odstranění oxidické vrstvy a kontaktu kuličky s měkčím základním materiálem. Dekorativní a tvrdá AO a silná MAO nebili v průběhu testu porušeny. Na dekorativní AO se ale také objevili již zmiňované výstupky po okrajích stopy.



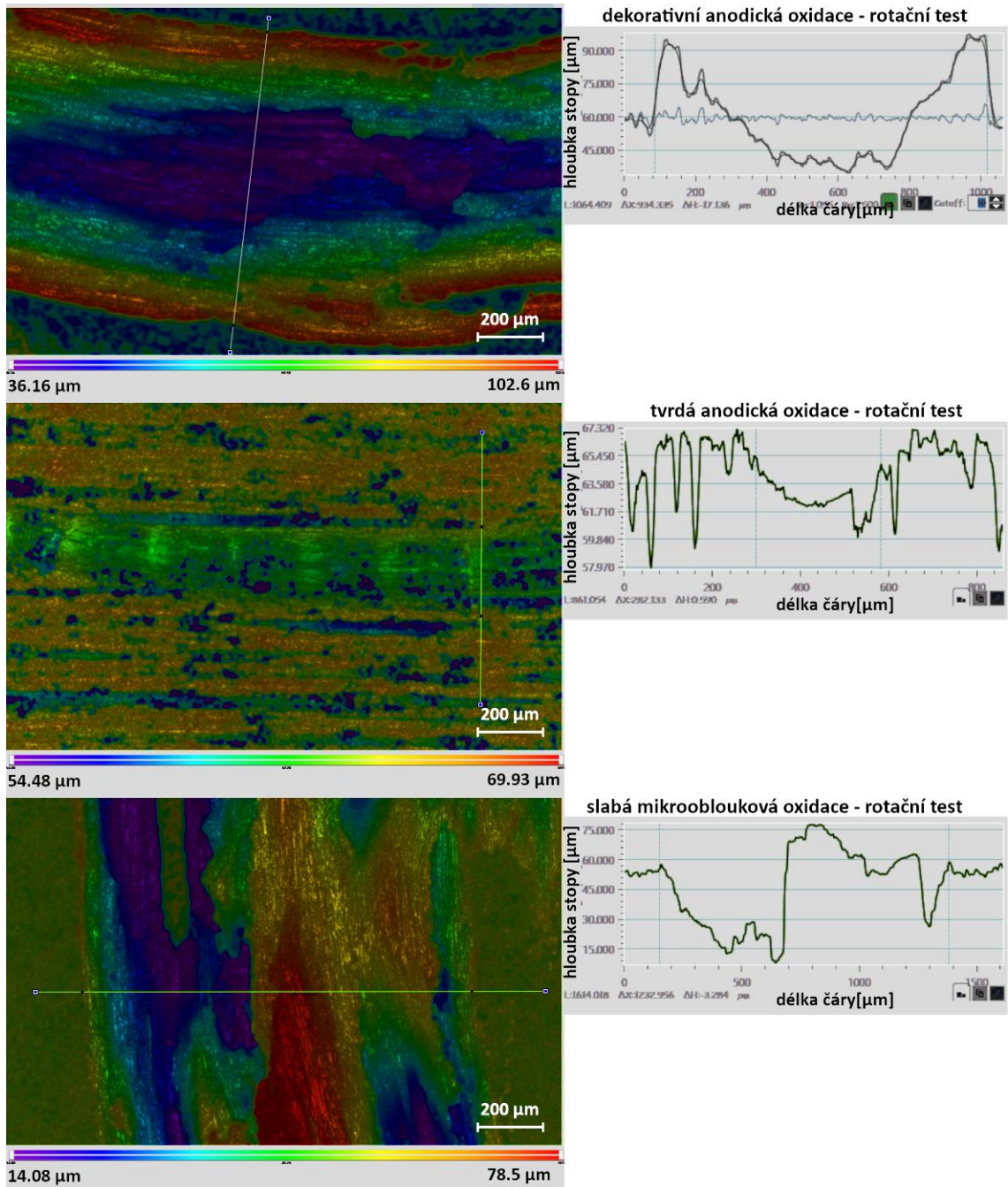
Obr. 40 - profilometrie lineárního testu oxidických vrstev

Při měření rotačním testem byla oproti lineárnímu použita delší doba testu. Proto se dá očekávat větší opotřebení vzorků. Opět nebylo možné nasnímat vzorek č. 4 z již zmíněných důvodů. Vzorky byly opotřebený podobně jako při lineárním testu úměrně s dobou testu (41,5 min). K porušení vrstvy došlo v obou případech mikroobloukové oxidace. V případě dekorativní AO byla plastická deformace vrstvy tak vysoká, že se po okrajích stopy vytvořily vysoké výstupky. Ty měli za následek zkreslení snímku 3D profilometru, který nedokázal patřičně nasnímat stopu v celé hloubce.

Tab. 12 - rozměry tribologických stop rotačního testu

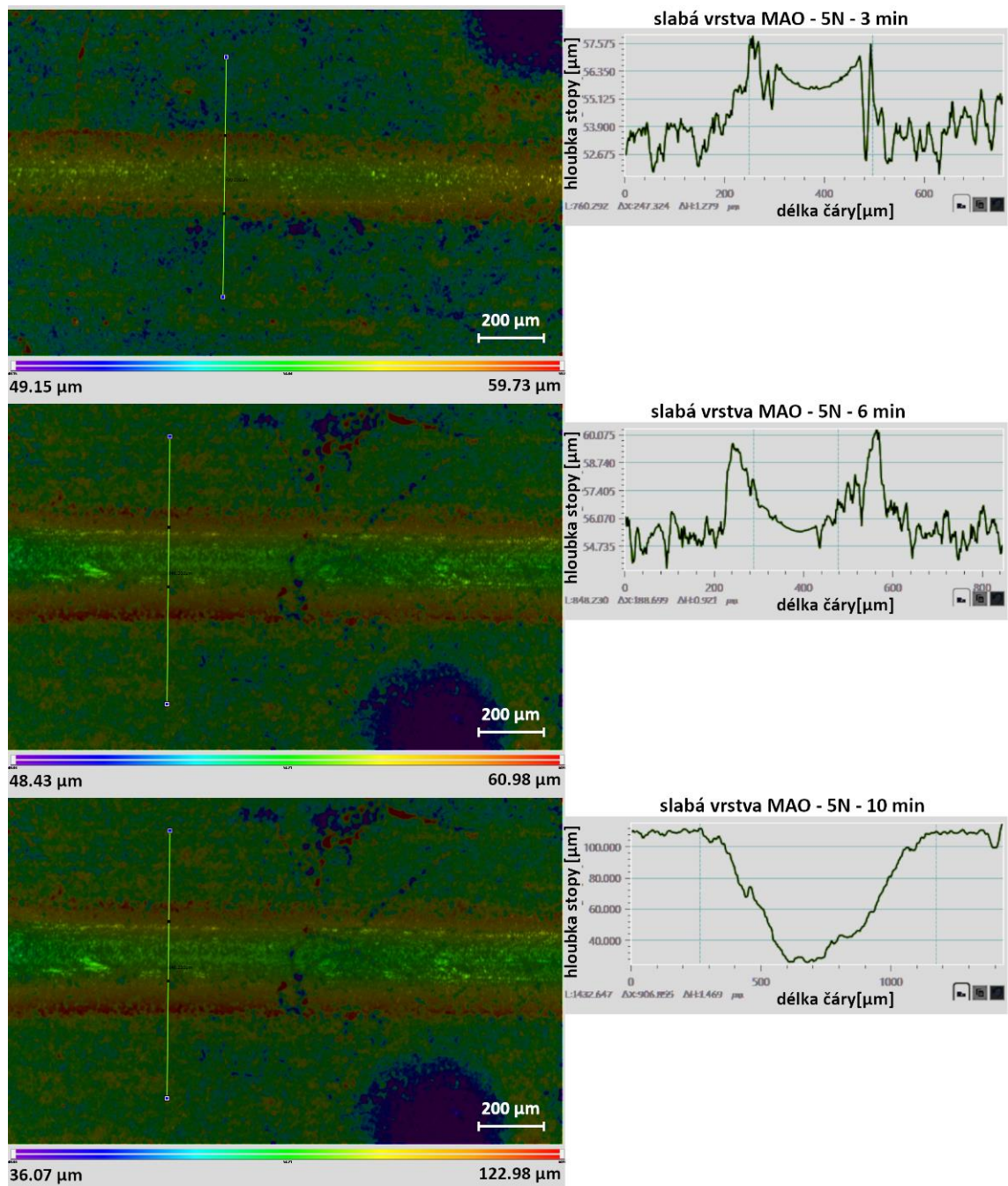
Povrchová úprava	šířka stopy [μm]	hloubka stopy [μm]
dekorativní AO	470	22,5
tvrdá AO	380	5,3
slabá MAO	1250	52
silná MAO	-	-

Největší odolnost proti opotřebení vykazovala vrstva tvrdé anodické oxidace. V průběhu testu trvajícím 41,5 min se vrstva ztenčila o 5,3 mm. U hodnoty hloubky slabé vrstvy MAO je patrné, že velkou část testu byla kulička v kontaktu se základním materiálem. Dekorativní AO byla zkreslena velkou plastickou deformací a snímek profilometru neprokazuje porušení vrstvy, nýbrž jen její deformování.



Obr. 41 - profilometrie rotačního testu oxidických vrstev

Některé vzorky musely být při snímání otočeny o 90°, aby byla viditelná celá šířka stopy vzorku. Konkrétně je to vzorek č.3, na kterém je vidět velký výstupek vprostřed tribologické stopy. To bylo způsobeno dlouhodobým kontaktem kuličky se základním hliníkovým materiálem. Ten je oproti oxidické vrstvě měkký a byl kuličkou s nárůstkem takřka obráběn.



Obr. 42 - postupné opotřebení slabé vrstvy MAO

Aby bylo možno sledovat průběh opotřebení, byla provedena tři měření se stejnými parametry, která se lišila pouze dobou trvání testu. Testy byly prováděny na vrstvách MAO. Uvedeny jsou snímky z 3D profilometru vzorku č. 3 - slabá MAO. Jak se očekávalo z předchozích testů, nedošlo ani v jednom případě k opotřebení vrstvy v celé její tloušťce.

9 Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou tribologie a tribologického testování. Práce uvádí úvod do tribologie a její problematiky včetně rozdělení jednotlivých testů. Testy typu rotačního Pin-on-Disk a lineárního testu byly dále podrobně rozebrány v rešeršní části. V závěru rešeršní části byl uveden multifunkční tribometr, který byl použit pro veškerá tribologická měření, díky jeho víceúčelovosti a možnostem konfigurace. V rámci práce byly také vypracovány podrobné popisy a návody k obsluze zmiňovaného tribometru. Zkoumány byly tribologické vlastnosti moderních povlaků.

Otestovány byly jak standartní, tak moderní povrchové úpravy hliníku a jeho slitin. Jednalo se o anodickou oxidaci, a to jak dekorativní, tak tvrdou technickou vrstvu oxidů. V druhé řadě se jednalo o moderní a perspektivní vrstvy mikroobloukové oxidace MAO. Hlavní důraz byl kladen na hodnotu dynamického činitele tření. Jednotlivé vzorky byly podrobeny dvěma typům testu. První byl lineární test, při kterém koná vzorek lineární vratný pohyb a vytvoří se tak přímková stopa. Druhým testem by tes Pin-on-Disk neboli rotační test. V průběhu tohoto testu se vzorek otáčí a tělísko na něm vytváří stopu ve tvaru kružnice.

Použité vzorky byly seřazeny od jedné do čtyř, tedy dekorativní a tvrdá anodická oxidace a slabá a silná vrstva mikroobloukové oxidace. Zmiňované vlastnosti byly tedy hodnota činitele tření a doba, za jakou se oxidická vrstva opotřebí.

Podle předpokladu se až pětinašobně lišila hodnota činitele tření mikroobloukových vrstev oproti vrstvám anodické oxidace. Nejlepší vlastnosti potom vykazovala silná vrstva MAO. Na základě rešeršní části předpokládaná hodnota ukázala jako skutečná. Na základě porovnání dvou vzorků s různou tloušťkou vrstvy MAO lze tvrdit, že činitel tření se snižuje s rostoucí tloušťkou vrstvy. Nelze však popisovat chování tohoto činitele u vrstev silnějších než byla tloušťka vrstvy vzorku č. 4.

Co se týče opotřebení oxidické vrstvy, byl opět předpoklad ten, že vrstvy MAO budou proti opotřebení odolnější než vrstvy eloxované. Po porovnání dvou vzorků AO a MAO se stejnou tloušťkou vrstvy byla zjištěna minimální odolnost proti opotřebení mikroobloukové vrstvy. Navzdory vysokému koeficientu tření, měla vrstva tvrdé

anodické oxidace (tvrdý elox) nejlepší odolnost proti opotřebení. Vrstva silné mikroobloukové oxidace odolávala nejdéle, ale na konci testu došlo také zde ke kontaktu se základním hliníkovým materiálem. Po tomto kontaktu následoval prudký nárůst hodnoty činitele tření.

V důsledku kontaktu „PINu“ a základního materiálu se na zmiňovaném „PINu“ vytvářel nárůstek. Základní materiál byl tedy adhezně spojen s korundovou kuličkou a v závěrečné části testu měnil její geometrii, a tím i kontaktní plochu. Proto mohou být těmito okolnostmi výsledky profilometrie zkresleny.

Tribologie jako věda je velmi komplikovaný obor. Při vyhodnocování výsledků záleží na znalostech a z velké části na dlouholetých zkušenostech v oboru. Seběmenší změna parametru může významně ovlivnit výsledky měření a určování tribologických parametrů. Proto nikdy nestačí uvádět pouze hodnotu činitele tření, ale je důležité uvést i ostatní podmínky testu. Pokud jsou podmínky uvedeny, je pak snazší porovnávání jednotlivých výsledků z jiných měření.

Tribologické testování hliníkových oxidických vrstev je velmi důležité, pro kompletní popis jejich vlastností. V dnešní době jsou vysoké nároky nejen na korozní odolnost povrchových úprav, ale také na kluzné vlastnosti, vysokou otěruvzdornost. MAO vrstvy jsou moderní povrchovou úpravou vhodnou pro řadu kovů, jako je např. Al, Ti, Mg nebo Zr. Díky vysokým tepelným odolnostem těchto oxidických vrstev by bylo vhodné testovat jejich chování i za zvýšených teplot.

Seznam použité literatury

[1] BEČKA, Jan. *Tribologie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01621-8.

[2] SUCHÁNEK, Jan. Abrázivní opotřebení kovových materiálů. *Tribotechnika* [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html>

[3] SUCHÁNEK, Jan. Erozivní opotřebení a volba kovových materiálů v praxi - 1.část. *Tribotechnika* [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32010/erozivni-opotrebeni-a-volba-kovovych-materialu-v-praxi-1cast.html>

[4] DAVIS, J. R. *Surface engineering for corrosion and wear resistance* [online]. Materials Park, OH: Institute of Materials, 2001 [cit. 2019-04-15]. ISBN 978-087-1707-000. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=3002327>

[5] SUCHÁNEK, Jan a Vladimír KUKLÍK. Odolnost proti abrazivnímu opotřebení slitin neželezných kovů. *Tribotechnika* [online]. 2012 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12012/odolnost-proti-abrazivnimu-opotrebeni-slitin-nezelezných-kovu.html>

[6] GATTO, George a kol. a . What Engineers Should Know about Zinc-Nickel Coatings. *MachineDesign* [online]. 26.2.2017 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/materials/what-engineers-should-know-about-zinc-nickel-coatings>

[7] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *Technická diagnostika a spolehlivost I. Tribodiagnostika* [online]. Ostrava, 2000 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: www.340.vsb.cz/doc/cms_library/skripta-technicka-diagnostika-i-tribo-193.pdf

[8] ZIVIC, F., M. BABIC, S.MITROVIC a A. VENCL. Continuous control as alternative route for wear monitoring by measuring penetration depth during linear reciprocating sliding of Ti6Al4V alloy. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2011, **509**(19), 5748-5754 [cit. 2019-05-04]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.02.158. ISSN 09258388. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092583881100538X>

[9] Linear wear friction ASTM G133. *Nanovea* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://nanovea.com/linear-wear-test/>

[10] Schematic of the linear wear test. In: *ResearchGate* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-linear-wear-test_fig2_276294478

[11] LI, Duanjie. *Static coefficient of friction measurement using tribometer* [online]. 2014 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: <http://nanovea.com/App-Notes/static-friction-measurement.pdf>

[12] Rotative wear friction test ASTM G99. *Nanovea* [online]. [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: <https://nanovea.com/rotative-wear-test/>

[13] Tribometr MFT-5000. In: *Rtec Instruments* [online]. [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: <https://rtec-instruments.com/assets/images/tribometer-408x612.png>

[14] MAMAJEV, A. I., V. KREIBICH a V. AGARTANOV. Mikrooblouková oxidace kovů. *Povrcháři* [online]. 2012, (7), 2-3 [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/201207_povrchari.pdf

[15] KŘÍŽ, Antonín. Tribologická analýza pin-on-disc. *METAL 2004* [online]. 2004 [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf

[16] Korundové kuličky. In: *Redhill Precision Specialty Balls* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.redhill-balls.eu/cz/produkty/kulicky-z-oxidu-hliniku-al203-korund>

[17] Aodická oxidace. *AluNet* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/anodicka-oxidace>

[18] FICKOVÁ, Zuzana a Jan KUDLÁČEK. Technologie v kosmickém výzkumu –část II. *Povrcháři* [online]. 2014, (1), 4-8 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/201401_povrchari.pdf

[19] Anodická oxidace. In: *Ace Specialty Nameplate & Anodizing* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <http://acespecialtyanodizing.ca/anodizing/>

[20] *Anodická oxidace hliníku a jeho slitin – eloxování* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: http://www.ekochemppu.cz/Materi%C3%A1ly/Anodicka_oxidace_hliniku_a_jeho_slitin.pdf

[21] Tvrdé eloxování. In: *Rosma* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://rosma.cz/galvanovna/tvrde-eloxovani>

[22] Čepička pro galuskové ventilký elox Sting. *Pepe* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.pepebike.cz/cz-detail-144160-cepicka-pro-galuskove-ventilky-elox.html>

[23] HE, Xiaojing, Xiangyu ZHANG, Xin WANG a Lin QIN. Review of Antibacterial Activity of Titanium-Based Implants' Surfaces Fabricated by Micro-Arc Oxidation. *Coatings* [online]. 2017, 1856-1868, 7(3) [cit. 2019-07-04]. DOI: 10.3390/coatings7030045. ISSN 2079-6412. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2079-6412/7/3/45>

[24] DUNLEAVY, Christopher S. *Development of Quantitative Techniques for the Study of Discharge Events During Plasma Electrolytic Oxidation Processes* [online]. 2010 [cit. 2019-07-05]. Dostupné z: http://www.dspace.cam.ac.uk/bitstream/1810/228637/1/csd30_thesis. Disertace. University of Cambridge.

[25] Hliníkové plechy. *Alumeco* [online]. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://www.alumeco.cz/hlink/plechy/prodn-plechy/en-aw-1050a/05-x-1000-x-2000-mm/p/390/3714>

[26] CHVOJKA, M., V. KREIBICH a P. DRAŠNAR. Moderní PEO vrstvy jako alternativa konvenčnímu eloxování. In: *Mezinárodní odborný seminář: Progresivní a netradiční technologie povrchových úprav*. 2018.

Seznam obrázků

Obr. 1 - struktura tribologického systému [7]	2
Obr. 2 – Stanovení činitele smykového tření na nakloněné rovině [1]	4
Obr. 3 – základní druhy opotřebení [1].....	6
Obr. 4 - schéma lineárního testu	10
Obr. 5 - schéma testu Pin on Disc	10
Obr. 6 - schéma testu Block on Ring	11
Obr. 7 - schéma testu Ring on Ring	11
Obr. 8 - schéma Four Ball testu.....	11
Obr. 9 - schéma Scratch testu	12
Obr. 10 - schéma lineárního tribometru [10]	13
Obr. 11 - schéma rotačního tribometru Pin on disk [11]	14
Obr. 12 - korundové kuličky - průměr 6,35 mm [16]	16
Obr. 13 - struktura anodické oxidace [19]	19
Obr. 14 - technologický postup anodické oxidace	19
Obr. 15 - součást s povrchovou úpravou tvrdé anodizace [21]	20
Obr. 16 - eloxované čepičky pro galuskové ventilký [22]	21
Obr. 17 - schématické znázornění barvení ponorem [17]	21
Obr. 18 - schéma znázornění barvení elektrolýzou [17].....	22
Obr. 19 - Schéma 10kW 50 Hz AC plazma elektrolytického procesu [24]	23
Obr. 20 - schéma vytváření MAO keramické vrstvy [23]	24
Obr. 21 - multifunkční tribometr Rtec MFT-5000 [13]	26
Obr. 22 - souřadný systém přístroje Rtec MFT-5000.....	27
Obr. 23 - ovladač manuálního pohybu	28
Obr. 24 - držák kuličky multifunkčního tribometru Rtec	28

Obr. 25 - inicializační okno softwaru.....	29
Obr. 26 - úvodní kontrola správného spuštění softwaru	29
Obr. 27 - okno editace kroků	30
Obr. 28 - okno pro zaznamenávání dat.....	31
Obr. 29 - okno spuštění.....	32
Obr. 30 - popis modulu pro lineární test	33
Obr. 31 - popis rotačního modulu Pin-on-Disk	34
Obr. 32 - použité vzorky lineárního a rotačního testu	36
Obr. 33 - časová závislost činitele tření Al_2O_3 oxidických vrstev - rotační test.....	38
Obr. 34 - koeficient tření slabé vrstvy MAO při dvou zatíženích rotačního testu	39
Obr. 35 - koeficient tření silné vrstvy MAO při dvou zatíženích rotačního testu	39
Obr. 36 - časová závislost činitele tření Al_2O_3 oxidických vrstev - lineární test.....	40
Obr. 37 - rozdíl při filtrování naměřených dat	41
Obr. 38 - korundová kulička pro Pin-on-Disk - vzorek tvrdá AO	42
Obr. 39 - korundová kulička pro Pin-on-Disk - vzorek slabá vrstva MAO	43
Obr. 40 - profilometrie lineárního testu oxidických vrstev.....	46
Obr. 41 - profilometrie rotačního testu oxidických vrstev	48
Obr. 42 - postupné opotřebení slabé vrstvy MAO.....	49

Seznam tabulek

Tab. 1 – činitel smykového tření pro styk kov na kov [4]	4
Tab. 2 - Elektrolyty pro technologii mikroobloukové oxidace [18].....	24
Tab. 3 - Chemické složení hliníkové slitiny použité pro výrobu vzorků [25].....	35
Tab. 4 - tloušťky oxidických vrstev	35
Tab. 5 - tabulka vstupních parametrů měření	37
Tab. 6 - časové údaje pro měření lineárního testu	38
Tab. 7 - činitele tření jednotlivých měřených vzorků - rotační test.....	39
Tab. 8 - hodnoty dynamického činitele tření lineárního testu	40
Tab. 9 - porovnání dynamických činitelů tření.....	41
Tab. 10 - porovnání činitelů tření při změně zatížení	44
Tab. 11 - rozměry tribologických stop lineárního testu	45
Tab. 12 - rozměry tribologických stop rotačního testu.....	47

Seznam rovnic

(2.1) - Coulombův zákon	3
(2.2) - vztah činitelů tření.....	3
(3.1) - poměr tvrdostí materiálů	9
(4.1) - rovnice pro výpočet otáček	16