VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

REŽIMY OPOTŘEBENÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN
WEAR REGIMES OF ALUMINIUM ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE **Václav Slivka**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE **Ing. Petr Šperka, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	**Václav Slivka**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Petr Šperka, Ph.D.**
Akademický rok:	2016/17

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:

Režimy opotřebení hliníkových slitin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době je stále více součástí vyráběných z hliníkových slitin. Často součásti obsahují plochy, na kterých dochází k tření s dalšími součástmi. Obecnými požadavky pro tyto plochy je aby jejich tření a opotřebení bylo nízké. To závisí na režimu opotřebení, ke kterému dochází. Tribometr je laboratorní zařízení běžně používané v průmyslu pro měření tření a opotřebení.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je vyhodnotit hodnoty míry abrazivního a adrezivního opotřebení hliníkových slitin. Práce kombinuje experimenty na univerzálních tribometrech s hodnocením povrchu vzorků na optickém profilometru.
Dílčí cíle bakalářské práce:
- přehled v oblasti opotřebení hliníkových slitin,
- příprava vzorku vybraných hliníkových slitin,
- měření tření a opotřebení.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.
Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).
Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:
http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam literatury:

STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. 3rd ed. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

ZHANG, J.; ALPAS, A. T. Transition between mild and severe wear in aluminium alloys. Acta Materialia, 1997, 45.2: 513-528.

CHEN, H.; ALPAS, A. T. Sliding wear map for the magnesium alloy Mg-9Al-0.9 Zn (AZ91). Wear, 2000, 246.1: 106-116.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT
Tato práce se zabývá zkoumáním režimů opotřebení vybrané hliníkové slitiny za podmínek suchého tření. Cílem práce bylo vyhodnotit míru abrazivního a adhezivního opotřebení této slitiny z experimentů provedených na základě poznatků z rešeršní studie. Z výsledků měření byly sestaveny závislosti opotřebení na kluzné rychlosti a zatížení, tření na kluzné rychlosti a zatížení a závislost normalizovaného tlaku na normalizované rychlosti tzv. mapa opotřebení.

KLÍČOVÁ SLOVA
Abraze, adheze, režimy opotřebení, mapa opotřebení, hliníková slitina

ABSTRACT
This thesis deals with the research of the wear regimes of the selected aluminium alloy in the conditions of dry friction. The aim of this work is the evaluation of the measure of an abrasive and adhesive wear of this alloy. This evaluation is made from the experiments which are made on the base of the knowledge of the research study. The dependence of the wear on the sliding speed and load, the friction on the sliding speed and load and the dependence of the normalised pressure on the normalised speed, so called the map of wear, are given on the base of the results of the measure.

KEY WORDS
Abrasion, adhesion, wear regimes, wear map, aluminium alloy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLIVKA, V. *Režimy opotřebení hliníkových slitin.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Šperka, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci *Režimy opotřebení hliníkových slitin* jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Petra Šperky Ph.D.. Současně prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 26. května 2017

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Šperkovi, Ph.D. za cenné připomínky, rady a čas strávený při konzultacích a vedení experimentů. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu.

OBSAH

1 ÚVOD

Díky malé hustotě, dostatečné pevnosti, recyklovatelnosti, odolnosti vůči korozi, tvárnosti, snadné opracovatelnosti a nízké ceně jsou hliník a jeho slitiny stále více využívány v průmyslu na výrobu strojních součástí. Využití nalézají například v automobilovém průmyslu, kde se z hliníkových slitin vyrábí části kluzných ložisek, písty a vložky válců spalovacích motorů, bloky válců atd. U všech těchto součástí je možné nalézt plochy, kde dochází ke kontaktu kovu na kov a vzájemnému tření, což znamená, že dochází k opotřebení stykových ploch. Obecně je požadováno, aby hodnoty opotřebení a tření dosahovaly co nejnižších hodnot. Velikost těchto hodnot závisí na mechanismu a režimu opotřebení, ke kterému dochází. U hliníkových slitin převládají dva mechanismy opotřebení, konkrétně abraze a adheze. U adhezivního opotřebení dochází k porušování povrchové vrstvy a v místě styku povrchů vznikají mikrosvary, které se při dalším pohybu porušují a to může vést k oddělení částic ve formě otěru nebo k přenesení materiálu z povrchu na povrch mezi materiály ve styku. Abrazivní opotřebení se vyznačuje oddělováním a přemisťováním částic materiálu při řezání tvrdšími částicemi a při rýhování. V praxi dochází ke kombinaci obou těchto mechanismů, ale jeden má vždy větší podíl na výsledném opotřebení. Oba tyto mechanismy se mohou v závislosti na vnějších podmínkách a vlastnostech materiálu vyskytovat v mírném nebo intenzivním režimu.

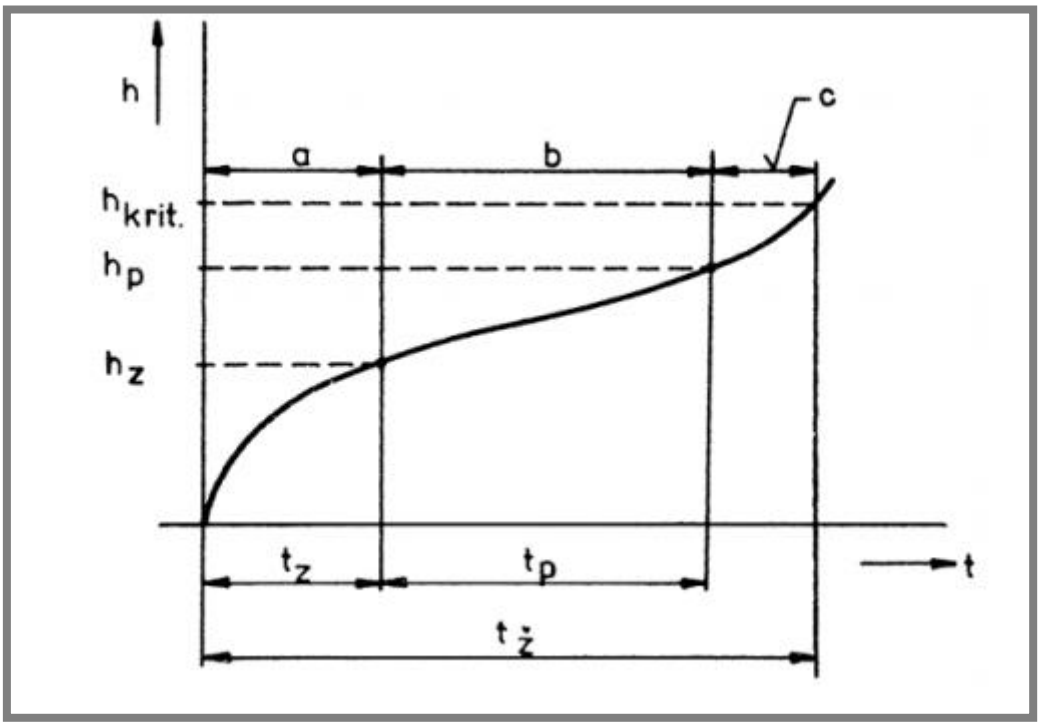
Studiem tření, opotřebení a mazání se zabývá vědecký obor nazvaný tribologie. Pro měření tření a opotřebení se v praxi používá laboratorní zařízení nazvané tribometr, na kterém je možné simulovat a zkoumat různé druhy opotřebení a také nastavovat podmínky experimentu. Vyhodnocení opotřebovaného povrchu se může provádět pomocí optických profilometrů, kde lze přesně určit topografii povrchu.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Opotřebení

Opotřebení může být definováno jako nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, která je způsobená buď vzájemným působením funkčního povrchu a média nebo dvou funkčních povrchů. Projevuje se odstraněním nebo přemístěním částic hmoty z funkčního povrchu mechanickými účinky a může být doprovázena i jinými vlivy např. chemickými, elektrickými nebo elektrochemickými. Podle normy ČSN 01 5050 je opotřebení popsáno jako trvale nežádoucí změna povrchu (rozměrů), způsobená vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a opotřebovávajícího média. [8] Existuje 6 základních druhů procesů opotřebení: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační. V praxi působí současně více druhů opotřebení. [2]

Opotřebení má obecně časový průběh, který je rozdělen do tří časových úseků, které se navzájem liší rychlostí opotřebení. Podle toho rozlišujeme opotřebení v záběhu, během technického provozu a při havarijní situaci. [7]

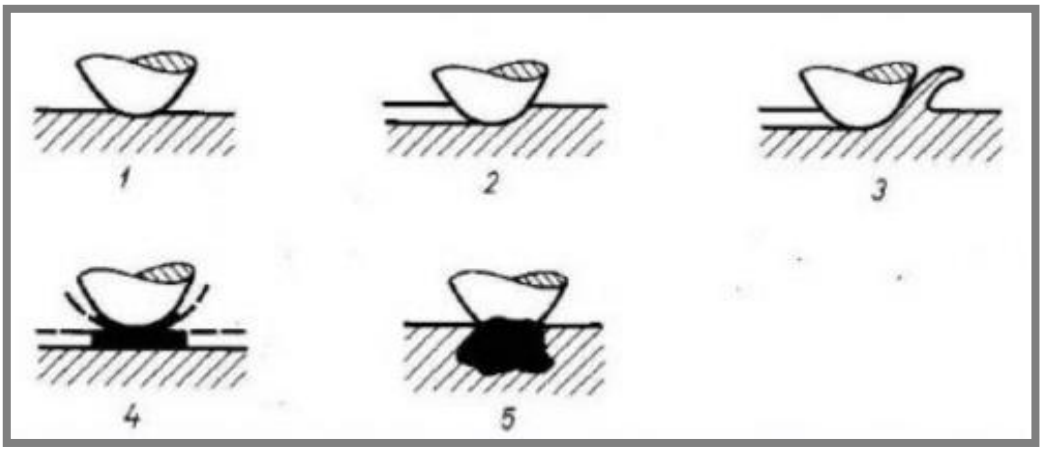


Obr. 2.1: *Křivka časového průběhu opotřebení: a-záběh, b-provoz, c-havarijní situace, h-hodnota opotřebení, h_{krit}-kritická hodnota opotřebení, h_p-provozní hodnota opotřebení, h_z-záběhová hodnota opotřebení, t-čas, t_z-doba záběhu, t_p-doba provozu, $t_ž$-celkový čas [7]*

2.1.1

2.1.1 Adhezivní opotřebení[1]

Pro adhezivní opotřebení je charakteristické, že mezi dvěma stykovými plochami dochází lokálně ke kontaktu nerovností povrchu, oddělování a přemisťování částic kovu. K porušování povrchových vrstev materiálu dochází v důsledku relativního pohybu funkčních povrchů. V místě styku dochází k elastické a plastické deformaci. První fáze se projevuje vznikem elastické deformace na vrcholcích nerovností. Pokud dosáhne tlakové napětí v oblasti dotyku meze kluzu v tlaku, pak dojde k postupné plastické deformaci těch povrchových vrstev materiálu, které mají nižší mechanické vlastnosti. Při tom může dojít k porušení povrchových vrstev a na kontaktních plochách nerovností povrchů se začnou vytvářet mikrospoje. K porušování mikrospojů dochází působením tangenciálních nebo normálných sil při relativním pohybu obou povrchů buď pod povrchem jednoho z kontaktních materiálů, obvykle toho měkčího, nebo na původní ploše dotyku. [6] Adheze mezi kovy je také ovlivněna chemickou reaktivitou nebo elektropozitivitou jednotlivých kovů. Chemicky aktivní prvky jako například hliník se vážou snadno a proto u nich lze pozorovat silnější adhezi než u ušlechtilých kovů. Vznik mikrospoje je v důsledku tření doprovázen ohřevem materiálů v místě kontaktu a tak vzniká vhodné prostředí pro reakci kovu s okolím, která může mít za následek zvýšení rychlosti opotřebení. V technické praxi lze toto opotřebení nalézt např. při kontaktu železničního kola s kolejnicí, u kluzných ložisek nebo čepů apod. [5]



Obr. 2.2: *Základní typy porušování podle molekulárně-mechanické teorie tření a opotřebení: 1-elastická deformace, 2-plastická deformace, 3-rýhování, 4-porušování povrchových vrstev, 5-vytrhávání základního materiálu [6]*

Míru opotřebení může výrazně ovlivnit také médium vyskytující se mezi funkčními povrchy. Příkladem může být mazivo, které částečně dokáže oddělit stykové plochy a tak zmenšit vzájemnou interakci povrchových mikronerovností a může také fungovat jako chemická ochrana povrchů materiálu proti působení látek způsobující oxidaci povrchu.

---

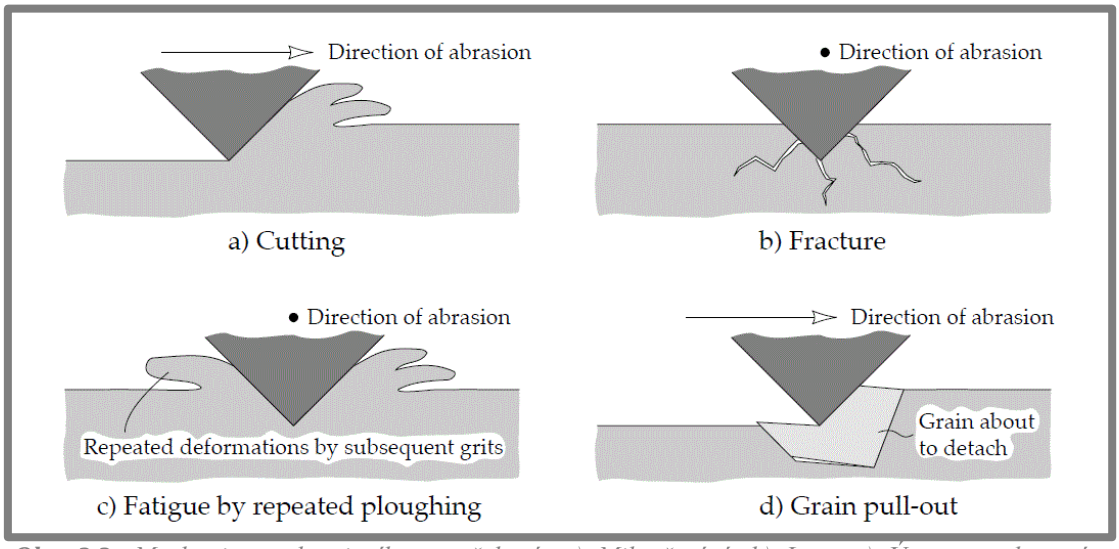
[1] *Podle Rigney (1988) slovo „adhezivní“ předpokládá, že na kontaktních plochách dochází výhradně k adhezi a ignoruje další možné spoluexistující mechanismy, proto doporučil používat termínu posuvové opotřebení (sliding wear) místo adhezivní opotřebení. [1]*

Adhezivní teorie tření a opotřebení, jejíž autorství se připisuje Bowdenovi a Taborovi, považuje za hlavní tvorbu mikrospojů působením adhezivních sil a v míře menší uvažuje účinek rýhování nerovností. Naproti tomu Kragelský ve své molekulárně-mechanické teorii tření a opotřebení bere v úvahu působení makro i mikronerovností povrchů a rozlišuje 5 různých typů porušování, které se od sebe odlišují stupněm deformace okolí styku povrchů. Jsou to elastická deformace, plastická deformace, rýhování, porušování povrchových vrstev a vytrhávání základního materiálu. [6] [9]
Na proces adhezivního opotřebování má vliv řada faktorů, mezi nejdůležitější patří zatížení, kluzná rychlost, materiály třecí dvojice, fyzikálně-mechanické a chemické charakteristiky, okolí, mazivo, systém mazání, velikost stykových povrchů a doba jejich funkce. Zatížení může působit v jednom nebo více směrech a může být konstantní nebo přerušované. Velmi podstatně ovlivňuje proces tření a odolnost proti adheznímu opotřebení a tím i rychlost opotřebení. Obecně lze říct, že velikost opotřebení je přímo úměrná působícímu zatížení, pokud nedochází během procesu opotřebení ke změně stavu povrchů. Kluzná rychlost má velký vliv na tepelný režim v oblasti styku ploch, protože při tření dochází k přeměně energie mechanické na tepelnou. Při vyšších teplotách snáze dochází k chemickým reakcím, které mohou značně ovlivnit proces opotřebení. Vysoké teploty také mění mechanické vlastnosti povrchové vrstvy, což se projeví na změně intenzity opotřebení.

2.1.2 Abrazivní opotřebení

2.1.2

Abrazivní opotřebení nebo abraze nastává, pokud se tvrdá částice nebo výčnělek na povrchu dostane do interakce s povrchem součástky, nástroje nebo stroje. Abraze může být dvou nebo tříbodová podle počtu složek, které obsahuje systém. Pokud opotřebovávají tvrdé částice pouze jeden funkční povrch, dochází k interakci dvou těles-částic a součásti. Pokud dochází k opotřebení částicemi, které jsou mezi dvěma funkčními povrchy, pak jde o interakci tří těles. K této tříbodové abrazi dochází prakticky u všech pohybových mechanismů, do kterých mohou vnikat a vnikají částice nebo nečistoty z okolí. [3] Udává se, že více než 50 % případů opotřebení strojů a strojních zařízení je zapříčiněno abrazí. [2]



***Obr. 2.3**: Mechanismy abrazivního opotřebení: a) Mikrořezání, b) Lom, c) Únava opakovaným rýhováním [4]*

Tvrdé částice mohou být buď volné, nebo vázané. Abrazivní působení částic vyvolává různorodé změny na funkčních površích součásti, což je ovlivněno působícími faktory materiálovými, provozními a konstrukčními.
Nejjednodušší model abrazivního opotřebení kovů je případ dvou těles, při kterém pevně vázané tvrdé částice nebo nerovnosti povrchu vnikají do povrchu a při relativním pohybu částic a měkkého povrchu rýhují opotřebovávaný povrch. Může nebo nemusí docházet k oddělování třísek opotřebovávaného materiálu. Existují dva extrémní případy. Při prvním z nich dochází k rýhování ve spojení s plastickou deformací a vytváří se nárůstek před abrazivní částicí, materiál je rovnoměrně vytlačován na boky a vytváří tak valy kolem vznikající rýhy. Protože z teoretického hlediska nedochází k přenosu materiálu a ani nevznikají otěrové částice, nedochází tedy k otěru. V praxi bude otěr pravděpodobně zapříčiněn delaminačním mechanismem po vyčerpání deformační schopnosti povrchových vrstev materiálu. Druhý případ spojuje tvorbu rýh s odstraňováním materiálu z povrchu tzv. mikrořezáním. Extrémem je odstranění celého objemu materiálu vzniklého při tvorbě rýhy bez vzniku valů po stranách. Ve skutečných podmínkách může na různých místech houževnatého materiálu docházet k porušování povrchových vrstev díky vysokocyklovému kontaktnímu únavovému procesu (abrazivní částice nevnikají do povrchu, ale způsobují pouze elastickou deformaci), nízkocyklovému kontaktnímu únavovému procesu, což je plastická deformace při vniku abrazivních částic do povrchu a také procesem rýhování spolu s oddělováním částic opotřebovávaného materiálu. Pokud jsou rychlosti relativního pohybu abrazivních částic vůči povrchu vysoké, je třeba uvažovat i další degradační mechanismy: tepelné ovlivnění materiálu, adsorbční porušování a tribochemické reakce materiálu s okolím. [2]

2.2

2.2 Režimy opotřebení

U hliníkových slitin může docházet k mírnému nebo intenzivnímu režimu opotřebení. Nejčastěji je přechod mezi těmito režimy opotřebení zkoumán jako funkce použitého zatížení a kluzné rychlosti. Na přechod mezi jednotlivými režimy mají vliv: použité zatížení (stykový tlak), kluzná rychlost, teplota v místě kontaktu dvou materiálů, složení materiálu vzorku i protilehlé třecí plochy.

2.2.1

2.2.1 Mírný režim

Kontakt při malých kluzných rychlostech a malém zatížení obvykle vede k mírnému opotřebení. Při mírném režimu opotřebení jsou stopy opotřebení vzorků charakterizovány povrchovou deformací a poškozením ve formě podélných rýh prodloužených rovnoběžně se směrem posuvu. Rýhy jsou také částečně pokryty tmavou zhutněnou povrchovou vrstvou. Dalším charakteristickým rysem je vznik kráterů na opotřebovaném povrchu. Mírný režim probíhá dvěma různými mechanismy: a) vznikem a delaminací (odlupováním) mechanicky smíchaných povrchových vrstev skládajících se z jemných částic hliníku, železa a oxidu hliníku; b) delaminací hliníkových vrstev nacházejících se v blízkosti kontaktu povrchů a mající za výsledek vznik deskových částic třísky. V tomto režimu byly pozorovány dva typy morfologie třísek. Třísky vzniklé při malých zatíženích a rychlostech se zdály tmavě hnědé a byly ve formě jemných částic přibližně rovnoosého tvaru s průměrem 0,5 až 5 μm. Druhý typ třísek se skládal z velkých částic s deskovitou

morfologií. Bylo zjištěno, že míra deskovitých částic vzrůstá s použitým zatížením. Tloušťka těchto třísek byla okolo 5 až 30 μm s poměrem stran tloušťka/délka menší než 1:10. Tento typ třísek není složen z malých jednotlivých částic, ale je to monolitická částice oddělená od hliníku.[12]

2.2.2 Intenzivní režim

2.2.2

Při intenzivním režimu opotřebení má opotřebený povrch kovový a lesklý vzhled. Rozsah deformací a poškození povrchu je podstatně větší ve srovnání s mírným režimem opotřebení. K intenzivnímu opotřebení začne docházet, pokud povrchová teplota v místě kontaktu dvou povrchů překročí rekrystalizační teplotu. Na tuto teplotu má vliv velikost zatížení, kluzná rychlost a také okolní podmínky. [12] Dochází také k velkému přenosu částic mezi třecími povrchy, což může mít za následek až zadření třecí dvojice.

2.3 Mapy opotřebení

2.3

Pro popis režimů opotřebení se používá map režimů opotřebení, kde je na osu *x* vynášena kluzná rychlost v $m \cdot s^{-1}$ a na osu *y* zatížení v N, případně stykový tlak v MPa. Častěji se však používá konfigurace, kdy se na osu *x* vynáší bezrozměrná normalizovaná rychlost *V* a na osu *y* bezrozměrný normalizovaný tlak *P*. Tyto mapy mohou být užitečné pro predikci podmínek, ve kterých bude tribologický systém fungovat bezpečně nebo také jako vodítko pro výběr materiálu odolného vůči opotřebení a vhodné protilehlé třecí plochy.

První mapy mechanismu opotřebení byly sestaveny Limem a Ashbym (1987) pro různé oceli za účelem lépe analyzovat informace o opotřebení a ukázat vztahy mezi různými procesy opotřebení. [11] Proměnné používané pro konstrukci map jsou normalizovaný tlak, normalizovaná rychlost, normalizovaná rychlost opotřebení a jsou popsány následujícími vztahy:

Normalizovaný tlak: $$P = \frac{F}{HA} \quad (1)$$

Normalizovaná rychlost: $$V = \frac{vr}{a} \quad (2)$$

Normalizovaná rychlost opotřebení: $$W = \frac{w}{A} \quad (3)$$

Kde *F*[N] je aplikované zatížení, *H*[$N \cdot m^{-2}$] je tvrdost za pokojové teploty, *A*[m^2] je zdánlivá plocha kontaktu, *v*[$m \cdot s^{-1}$] je kluzná rychlost, *r*[m] je zaoblení kolíku (pinu), *a*[$m^2 \cdot s^{-1}$] je tepelná vodivost a *w*[$m^3 \cdot m^{-1}$] je rychlost opotřebení. [1]

V návaznosti na jejich práci sestavili Antoniou and Subramanian (1988) kvantitativní mapu mechanismu opotřebení pro hliníkové slitiny. Data pro sestavení mapy získali přímým pozorováním opotřebovaných povrchů hliníkové slitiny i ocelové protilehlé třecí plochy. V této mapě (obr. 2.4) identifikovali oblasti s různými mechanismy [1]:

Oblast a- Oblast formování jemných rovnoosých částic. Při malých kluzných rychlostech a aplikovaném tlaku má opotřebovávaná slitina lesklý povrch s tmavými oblastmi spojenými s vysokým obsahem železa. Tyto tmavé oblasti dokazují,

že proběhl materiálový přenos mezi protilehlou ocelovou třecí plochou a hliníkem. V tomto režimu opotřebení dochází ke vzniku vrstvy na kluzných površích hliníkových slitin a protilehlých třecích plochách. Tuto vrstvu nazýváme tribovrstva, která obsahuje jemně rozemletý a mechanicky smíchaný materiál z kluzných povrchů, objevuje se při přesunu a zpětném přesunu materiálu hliníku a třecí protiplochy. Prostředí může mít vliv na tvorbu tribovrstvy například prostřednictvím oxidace. Míru oxidace při tvorbě tribovrstvy je třeba ještě prokázat. Přítomnost krystalických oxidů nebyla dokázána, ale spekuluje se, že amorfní oxidy mohou existovat. Existence železnatých oxidů je pouze za podmínky použití třecí protiplochy ze železa.

Oblast b- Delaminace kompaktní vrstvy. Při vyšším zatížení a kluzné rychlosti začne docházet k delaminaci kompaktní vrstvy. Tuto vrstvu lze také nazvat jakýmsi druhem tribovrstvy, protože vzniká z kluzného povrchu hliníku a třecí protiplochy a také díky reakci s okolím. Tato oblast je přechodem mezi oblastí vzniku jemných rovnoosých částic a plastickou delaminací. Tribovrstva nadále existuje, ale otěr se skládá převážně z laminárních částic oddělených z tribovrstvy namísto jedné rovnoosé částice.

Oblast c- Plastická delaminace. Pokud aplikovaná rychlost a zatížení dále roste, teplota na rozhraní dosáhne kritické hodnoty a to způsobí, že hliníková slitina začne měknout a začne se zvětšovat hloubka podpovrchových deformací. Smyková nestabilita vzniklá třecími silami má za následek vznik laminárních částic na povrchu. Podle Suhovy delaminační teorie, trhlina vzniká ve slabém místě stejně jako poškození nebo sekundární fáze a roste díky opakované aplikaci síly skrz kontaktní nerovnosti, což vede k případnému vzniku laminárních částic. Částice se skládají z hliníku a minima nebo žádného materiálu třecí protiplochy. Reakce s okolím a případná oxidace se v této oblasti neobjevuje.

Oblast d- Melt wear. Povrch hliníkové slitiny může dosáhnout teploty blízké k bodu tavení, pokud aplikované zatížení a kluzná rychlost dosahují vysokých hodnot. Roztavená vrstva hliníku sníží koeficient tření v této oblasti. Opotřebení nastává skrze odstranění natavených kapiček hliníku z povrchu. Toho opotřebení je velmi obtížné dosáhnout a ani není řádně prozkoumáno.

Oblast e- Velký přesun materiálu. Při velmi vysokých kluzných rychlostech a velkých zatíženích dochází k velkému přesunu materiálu mezi hliníkovou slitinou a třecí protiplochou. Jakmile je disk potažen vrstvou hliníku, dochází ke skluzu, který vede ke vzniku velkých částic opotřebení. Pokud je nominální plocha kontaktu stejná jako skutečná plocha kontaktu, dochází k zadření.

2.4

2.4 Vlivy na opotřebení

2.4.1

2.4.1 Kluzná rychlost

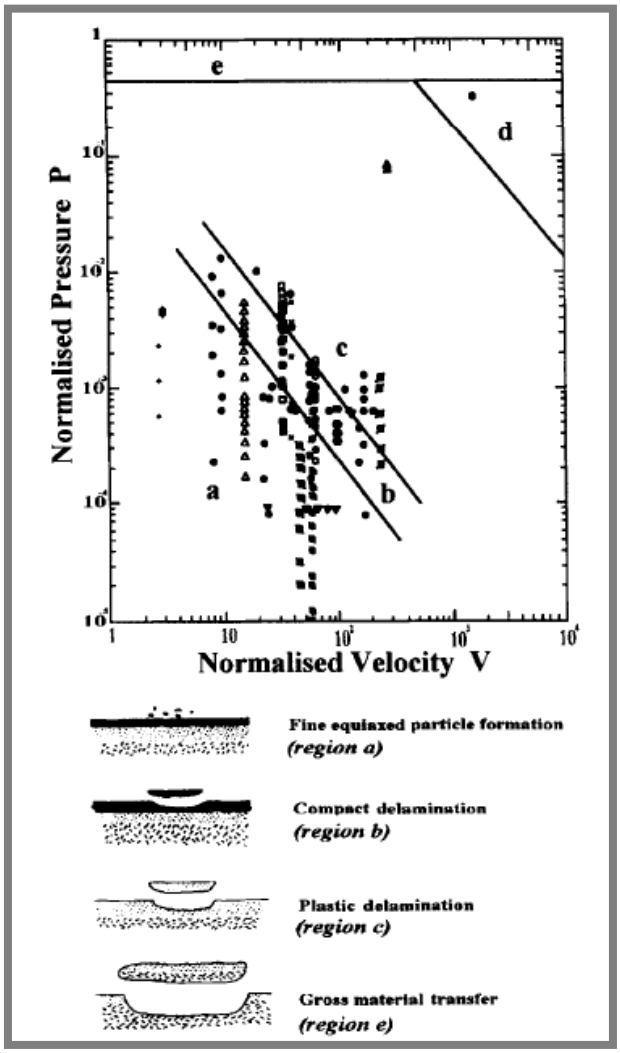
Relativní rychlost mezi kluznými povrchy má vliv na míru a mechanismus opotřebení hliníkových slitin. Teplota povrchu závisí na kluzné rychlosti, se kterou se třecí povrchy pohybují vůči sobě. Přechod mezi mechanismy opotřebení nastane náhle, pokud se zvýší rychlost a dojde k překročení kritické hodnoty. Kritická velikost rychlosti je ovlivněná také použitým zatížením, teplotní difuzivitou

a tvrdostí povrchů. [11] Při malých rychlostech míra opotřebení klesá s kluznou rychlostí, než dosáhne minima a pak začne opět vzrůstat. Tento trend je způsoben rostoucí pevností hliníku s rychlostí deformace, jelikož je známo, že pevnost hliníku roste s mírou zatížení tzv. rychlostí deformace. Teplo, které vzniká při tření, má za následek měknutí hliníku. [1]

2.4.2 Zatížení

2.4.2

Aplikované zatížení na opotřebovávané povrchy má velký vliv na míru opotřebení. Podle pozorování Subramaniana z roku 1989 opotřebení vzrůstá se zatížením. Pokud dosáhneme hodnoty kritického zatížení, často to znamená, že došlo ke změně mechanismu opotřebení. Vliv použitého zatížení na třecí chování měřeného pomocí třecího součinitele (tj. třecí síla podělená použitým zatížením) je zřídka významný. Pokud ale dochází k velké variaci třecího součinitele, je pravděpodobná změna mechanismu opotřebení nebo míry opotřebení. Rozsah třecího součinitele hliníku třeného proti různým kovovým třecím protiplochám na vzduchu se pohybuje od 0,4 do 0,6. [1] Není možné jednoznačně určit jednu hodnotu, při které dojde k přechodu mezi režimy opotřebení, jelikož každý hliníkový materiál má specifické materiálové vlastnosti.



Obr. 2.4: Mapa opotřebení pro hliníkové slitiny a schématické kresby podpovrchových struktur v jednotlivých oblastech.[11]

3

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE

3.1

3.1 Analýza problému

Z provedené rešeršní studie vyplývá, že časový průběh opotřebení je rozdělen na tři úseky s rozdílnou rychlostí opotřebení. Rozlišujeme opotřebení v záběhu, během technického provozu a při havarijní situaci. Dva mechanismy s největším vlivem na opotřebení jsou abraze a adheze. Základním principem abraze je interakce tvrdé částice nebo výčnělku s povrchem součásti. K adhezi dochází při styku kontaktních nerovností povrchů, které mají za následek vznik mikrospojů a následné porušení povrchu materiálu. U hliníkových slitin může docházet k mírnému i intenzivnímu opotřebení. Nejčastěji je přechod mezi těmito režimy opotřebení zkoumán jako závislost použitého zatížení a kluzné rychlosti. Na změnu režimu má největší vliv použité zatížení respektive stykový tlak, kluzná rychlost, teplota v místě kontaktu materiálů a složení materiálů, které jsou ve vzájemném kontaktu. Pro popis režimů se používá map režimů opotřebení, což je graf závislosti normalizovaného tlaku na normalizované rychlosti. Tyto mapy jsou užitečné pro určení ideálních podmínek, ve kterých bude tribosystém fungovat bezpečně nebo také pro volbu vhodného materiálu součásti. Kontakt při malých kluzných rychlostech a malém zatížení obvykle vede k mírnému opotřebení, které se vyznačuje malým rozsahem poškození povrchu a také tím, že povrch kryje tribologická vrstva. K opotřebování dochází delaminací, tj. oddělováním vrstev, které byly mechanicky smíchány nebo také delaminací pomocí nukleace a růstu podpovrchových trhlin. Intenzivní opotřebení se vyznačuje velkým poškozením povrchu, velkým množstvím hliníku přecházejícího do třecí protiplochy a vznikem hrubých nečistot, typicky ve tvaru destiček s lesklým kovovým vzhledem. Intenzivní opotřebení se začne projevovat, pokud povrchová teplota v místě kontaktu dvou povrchů překročí rekrystalizační teplotu materiálu. Často také dochází ke změkčování materiálu, pokud je teplota povrchu větší než 0,4krát teplota tání materiálu. Se zvyšující se kluznou rychlostí dochází ke snižování kritického zatížení, což je zatížení, kdy dojde k přechodu mezi režimy opotřebení.

3.2

3.2 Cíle práce

Cílem bakalářské práce je posoudit míru abrazivního a adhezivního opotřebení hliníkové slitiny pomocí experimentů na univerzálním tribometru a vyhodnocení pomocí optického profilometru. Zkoumáno bude opotřebení za podmínek suchého tření tj. bez použití maziva. Ke splnění hlavního cíle je potřeba splnit několik dílčích cílů:

- přehled v oblasti opotřebení hliníkových slitin
- příprava vzorku vybrané hliníkové slitiny
- měření tření a opotřebení

4 MATERIÁL A METODY

4

4.1 Materiál

4.1

Jako materiál pro testování byla použita hliníková slitina Al-Si-Sn. Vzorek byl vyříznut z polotovaru používaného pro výrobu kluzného ložiska používaného v automobilním průmyslu, kterým byl bimetalový pás složený z 300 µm tlusté vrstvy hliníkové slitiny a vrstvy oceli tlusté 1-2 mm. Z pásu byl vyroben disk o průměru 46 mm. Do disku byly vyvrtány díry pro uchycení vzorku do tribometru.

4.2 Experimentální zařízení

4.2

4.2.1 Univerzální tribometr

4.2.1

Pro měření součinitele tření byl použit univerzální tribometr Bruker UMT Tribolab, což je počítačem řízené zařízení sloužící primárně pro provádění tribologických testů, měření tření a opotřebení, simulaci různých provozních a okolních podmínek např. vysoké teploty, mazání, zatížení. Dále je také možné například provádět měření mikrotvrdosti a vrypové zkoušky. Zařízení se skládalo z rotačního modulu, který umožňuje rotaci v obou směrech otáčkami od 0,1 do 5000 RPM. Další částí je dvouosý senzor síly s maximálním zatížením 1000 N a 50 N. Třetí nejdůležitější částí je vertikální posuv s rozsahem do 150 mm, rozlišením polohy 0,25 µm, rychlostí v rozsahu od 0,002 do 10 mm·s^{-1}. Celé zařízení bylo řízeno pomocí počítače programem UMT umožňující sepsání skriptu obsahující postup a zatěžující podmínky při jednotlivých testech a také záznam vybraných parametrů testů.

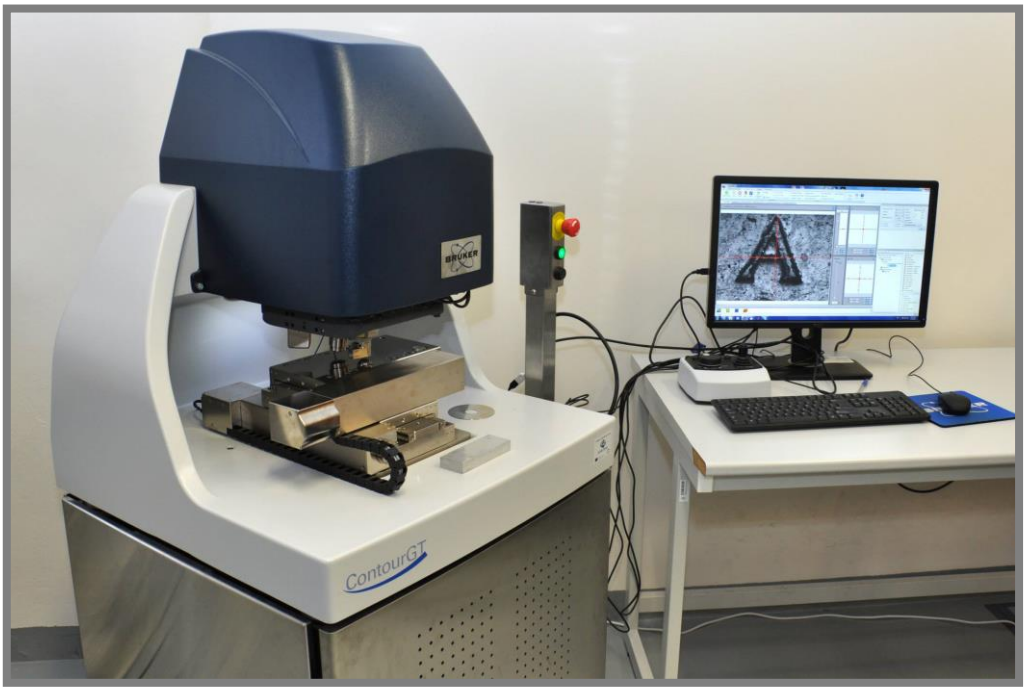
Obr. 4.1: *Univerzální tribometr Bruker UMT Tribotec [13]*

4.2.2 Optický profilometr

4.2.2

Pro naskenování a následné vyhodnocení povrchu byl použit 3D optický profilometr Bruker ContourGT-X8‘. Tento optický profilometr s vysokou rychlostí, přesností a rozsahem slouží pro bezkontaktní 3D měření běžných povrchů strojních součástí

nebo i povrchů přesných mechanických součástí, ale i pro měření plastových součástí apod. Je to jeden z nejpokročilejších dostupných optických interferometrických profilometrů s vlastním ovládacím softwarem. Je možné využít zvětšení 2x, 5x, 10x, 20x, 50x, vertikální rozlišení je 0,01 nm. Skenovací rozsah v ose *z* je 0,1 nm-10 mm a maximální skenovací rychlost je 92,5 $\mu m \cdot s^{-1}$. Výhodou je také opakovatelnost měření.



Obr. 4.2: *Profilometr Bruker ContourGT-X8' [13]*

4.3

4.3 Průběh experimentů

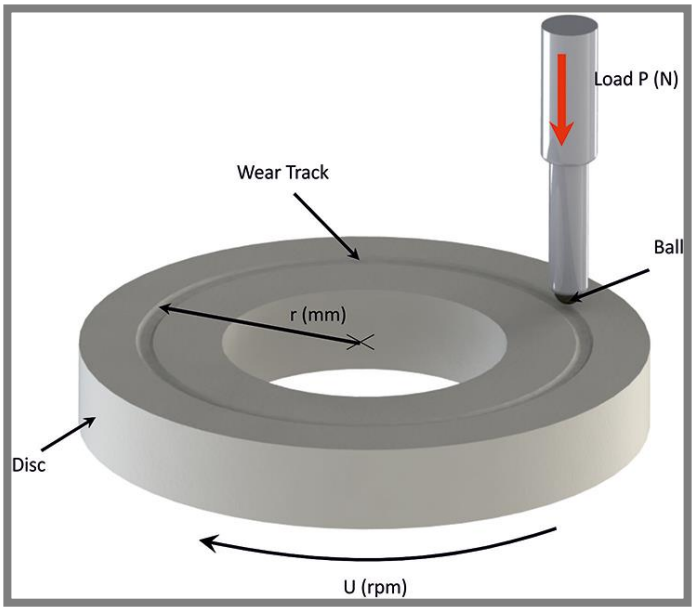
Při experimentech byla použita metoda ball-on-disk. Cílem je zatížit kuličku oproti disku a měřit tření. Při relativním pohybu dochází k vytvoření stopy vlivem opotřebení povrchu. Jako ball byla použita ocelová kulička, která byla pevně zafixována v držáku, tak aby se zabránilo jejímu protáčení při testech. Disk byl vyroben ze zkoumané hliníkové slitiny Al-Si-Sn. Při experimentech byl zaznamenáván koeficient tření, síly v ose *z* a *x*. Všechny testy byly prováděny bez přítomnosti maziva, tak abychom docílili suchého tření mezi kuličkou a diskem. Experimenty byly prováděny za pokojové teploty 25 °C a bez korekce vzdušné vlhkosti.

Tab. 4.1: *Navrhované testovací podmínky*

Zatížení kuličky [N]	20	10	5	15	10	5	5	5	2,5	15	7,5	5	5	5
Rychlost disku [$m \cdot s^{-1}$]	0,5	0,5	0,1	1,25	2,5	5	2,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,25	0,25	0,1
Délka testu [s]	60	60	60	60	60	60	60	180	180	180	180	60	300	300

První fází byla příprava experimentu, kde bylo nutné určit zatěžovací podmínky: rychlost disku, zatížení kuličky a také délku testu. Podmínky byly zvoleny se zřetelem na očekávané chování hliníkové slitiny a zároveň tak, aby bylo dosaženo více režimů opotřebení.

Druhou fází byla příprava testovacího skriptu, datové složky na počítači a příprava samotného testovacího zařízení. Hliníkový disk byl šroubem připevněn k rotujícímu modulu, proti pootočení během testu zajištěn malým kolíkem a jeho povrch byl následně očištěn acetonem. Pro první sérii testů byla použita kulička o poloměru 4,75 mm, pro druhou sérii testů byla použita kulička o poloměru 6,32 mm. Ve třetí fázi probíhalo postupné testování za určených podmínek. Po každém testu byl poloměr, na kterém docházelo ke styku kuličky a disku zvětšen tak, aby nedošlo k překrytí stop, poloměr disku vhodný k testům byl od 13,5 mm do 22 mm. Před druhou sérií testů byl jeden z disků reprofilován pomocí smirkového papíru a následně důkladně očištěn acetonem.



Obr. 4.3: *Princip metody ball-on-disk [14]*

4.4 Způsob vyhodnocení

4.4

Po opotřebení na tribometru byl vzorek vyjmut, testovaný povrch očištěn acetonem a naskenován na profilometru. Po naskenování byly pomocí softwaru profilometru odečteny hodnoty hloubky a šířky jednotlivých stop. Dále byl dopočítán objem odebraného materiálu jako obsah kruhové úseče vynásobený obvodem stopy. Objem byl také určen přímo pomocí softwaru profilometru tak, že hodnota objemu získaná z profilometru byla vynásobena obvodem stopy a podělena výškou oblasti, ze které byl odečten objem. Ujetá dráha při testu byla spočtena z kluzné rychlosti vynásobené časem testu. Měrné opotřebení bylo získáno jako podíl objemu a dráhy vynásobené tlakem. Byly také zapsány průměrné hodnoty součinitele tření v oblastech s ustáleným chováním při jednotlivých testech. Pro zakreslení naměřených bodů do mapy opotřebení byla dopočítána normalizovaná rychlost a normalizovaný tlak podle vztahu (1) a (2). Pro výpočet byly uvažovány následující materiálové

konstanty hliníkové slitiny: Tvrdost H=30·10^{7} N·m^{-2} a tepelná difuzivita a=9,61·10^{-5} m^{2}· s^{-1}. Z důvodu opotřebení a tím způsobené změny nominální kontaktní plochy byl stykový tlak počítán podle Hertzovy teorie jako liniový kontakt o šířce dané stopou opotřebení na disku po testu a ty byly uvažovány 0,7 mm pro menší kuličku a 1,2 mm pro kuličku větší.

Hertzův model kontaktního napětí platí za těchto zjednodušujících předpokladů [15]:

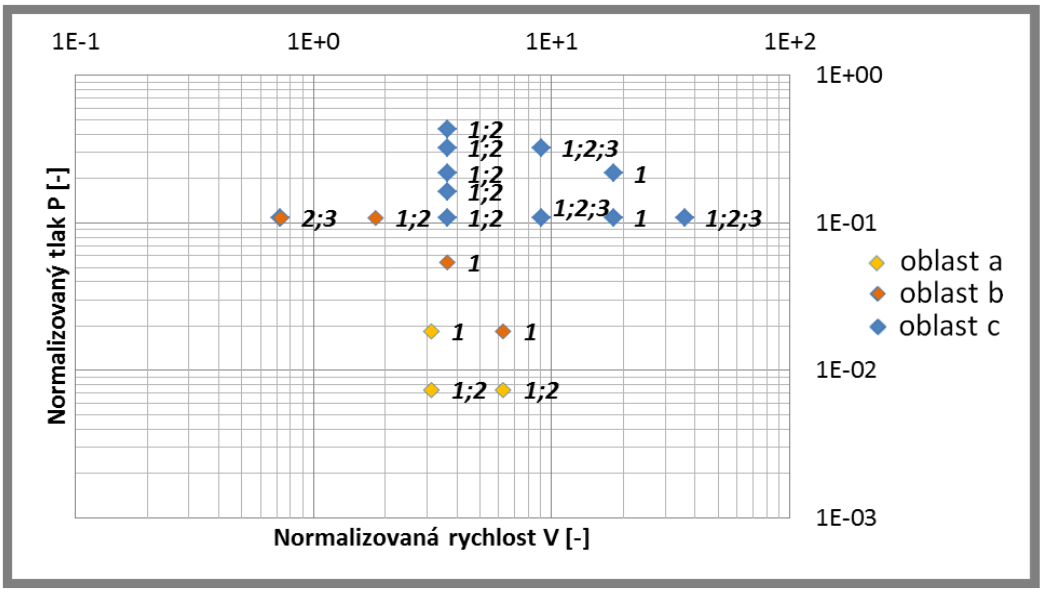
- Materiál je isotropický a homogenní
- Kontaktní plochy mají stejný obsah a jsou dokonale hladké
- V průběhu deformace musí být platný Hookův zákon
- Materiály mají podobné mechanické vlastnosti
- Kontaktní plochy mají stejný obsah a jsou dokonale hladké
- Tvar kontaktu je elipsa
- Kontaktní povrch má konstantní zakřivení
- Kontaktní plocha je malá ve srovnání s ostatními rozměry

Všechna data byla zpracovávána a zapisována do programu Excel. Povrch disku byl následně vyhodnocován pomocí volně dostupného programu Gwyddion 2.47 za použití dat získaných z profilometru.

5 VÝSLEDKY

5.1 Vyhodnocení povrchu vzorku

Vzhled stop byl vyhodnocován pro jednotlivé zatěžovací podmínky podle tří znaků. Prvním znakem byl výskyt oblastí s vytrhaným materiálem, který by ukazoval na opotřebení spíše adhezivního charakteru. Druhým bylo vytlačení materiálu mimo stopu vyskytující se často při intenzivním režimu opotřebení. Třetím znakem byl kulatý tvar profilu stopy charakterizující abrazivní opotřebení. Znaky byly přidány jako popisky do naměřené mapy opotřebení (obr. 5.1). Po zakreslení do grafu nebyly bohužel dostatečně jasně patrné hranice mezi jednotlivými oblastmi a také nelze uspokojivě přesně definovat dominantní znak dané oblasti.

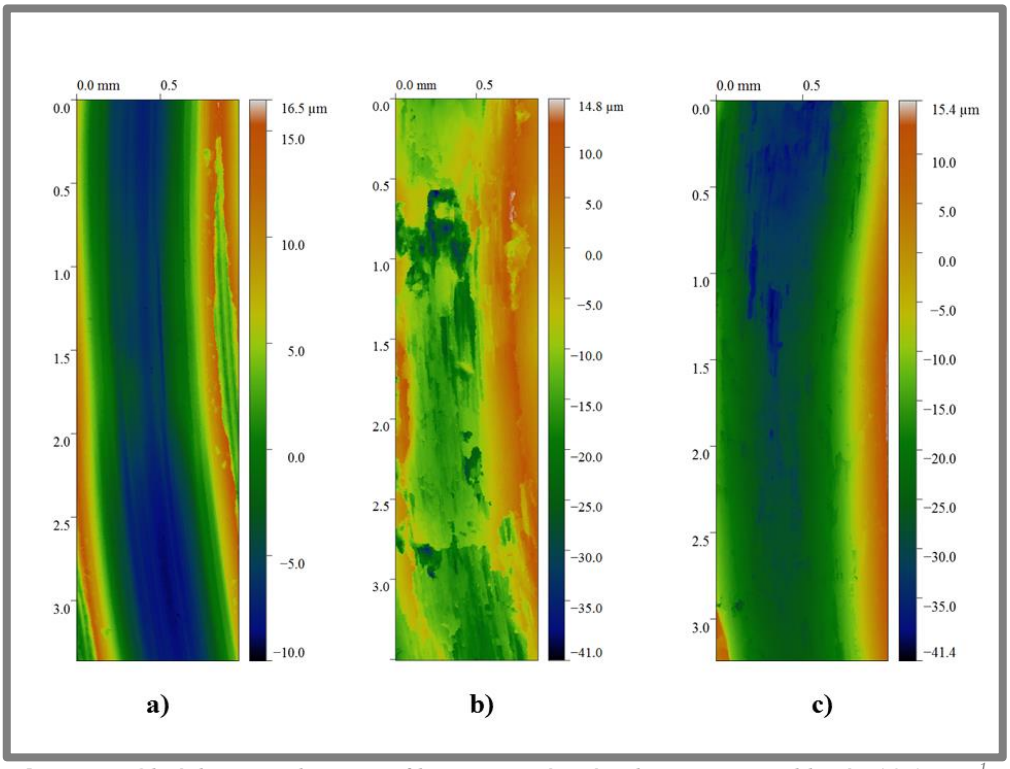


Obr. 5.1: Hodnocení povrchu disku (1-vytrhaný materiál; 2-vytlačený materiál mimo stopu; 3-kulatý profil stopy)

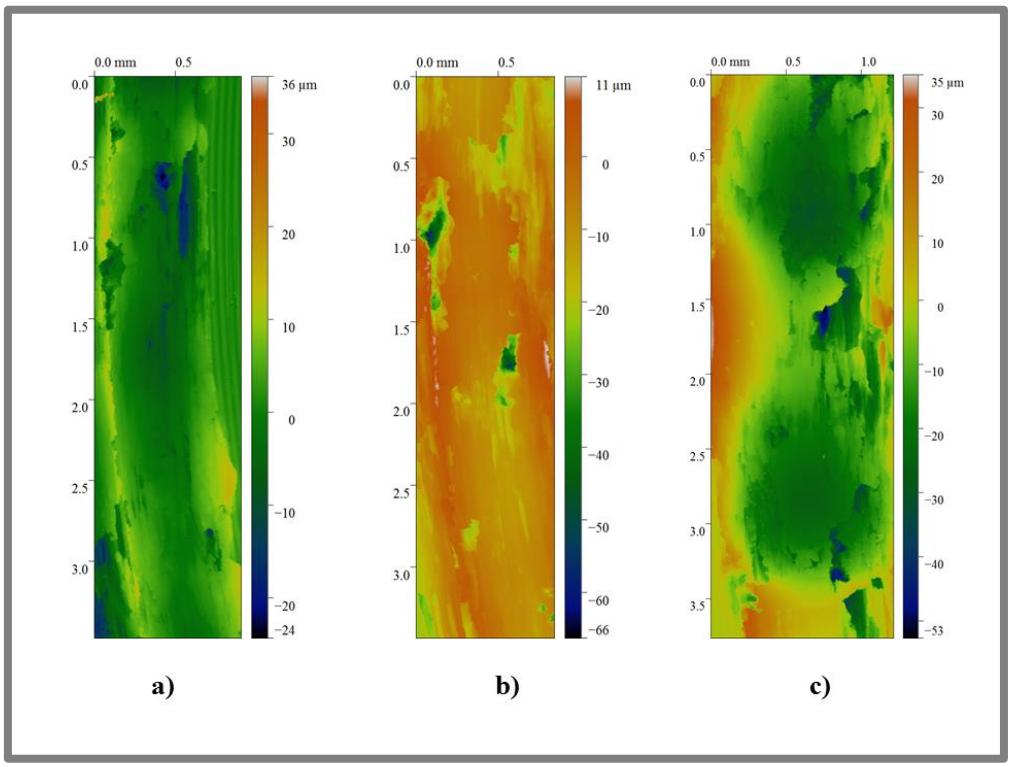
Po testování při zatížení 5 N a rychlosti 0,1 m·s^{-1} měla stopa malou hloubku a kruhový profil. Došlo také k vytlačení materiálu mimo stopu a vytvoření valů kolem stopy. Bylo viditelné rýhování ve stopě a stopa se opotřebovávala rovnoměrně. Tyto znaky ukazují, že dominantním mechanismem opotřebení byla za těchto podmínek abraze. Při zvýšené rychlosti 0,5 m·s^{-1} a totožném zatížení stále docházelo k vytlačování materiálu mimo stopu. Stopa již neměla kruhový profil a bylo možné nalézt místa, kde docházelo k vytrhávání materiálu. Opotřebení stopy bylo nerovnoměrné a hloubka stopy narostla. Při nejvyšší rychlosti 5 m·s^{-1} a stejném zatížení bylo opět možné pozorovat vytlačený materiál mimo stopu. Opotřebení stopy se stalo rovnoměrným, ale bylo možné sledovat místa s vytrhaným materiálem, hloubka stopy se opět zvětšila a profil byl kruhový, viz obr. 5.2.

Po zatížení 2,5 N a rychlostí 0,5 m·s^{-1} bylo možné pozorovat místa, kde došlo k vytržení materiálu nebo k vytlačení materiálu mimo stopu. Stopa měla poměrně malou hloubku. Po zvýšení zatížení na 7,5 N a stejné rychlosti docházelo na povrchu vzorku k vytrhávání materiálu a nebylo možné pozorovat souvislejší opotřebení, bylo také možné identifikovat lokální vytlačení materiálu mimo stopu. Po nejvyšším

aplikovaném zatížení 20 N a totožné rychlosti bylo možné pozorovat nerovnoměrné opotřebení, které se projevovalo střídavým výskytem oblastí s hlubokou stopou a oblastí plasticky přeneseného materiálu ve stopě. V některých místech docházelo k vytrhávání materiálu poukazující na adhezivní opotřebení, viz obr. 5.3.



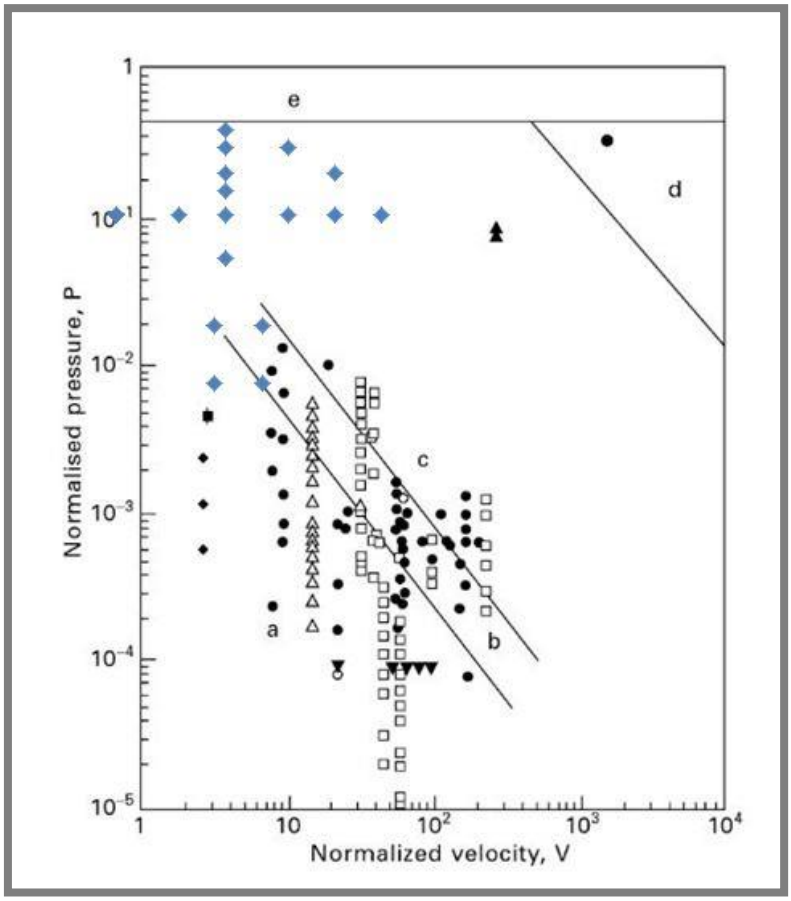
Obr. 5.2: *Obrázky povrchu z profilometru zatížené silou 5N a rychlostí a)0,1 m·s^{-1}; b)0,5 m·s^{-1}; c)5 m·s^{-1}*



Obr. 5.3: *Obrázky povrchu z profilometru zatížené rychlostí 0,5 m·s^{-1} a silou a)2,5 N; b)7,5N; c)20 N*

5.2 Vyhodnocení opotřebení a tření

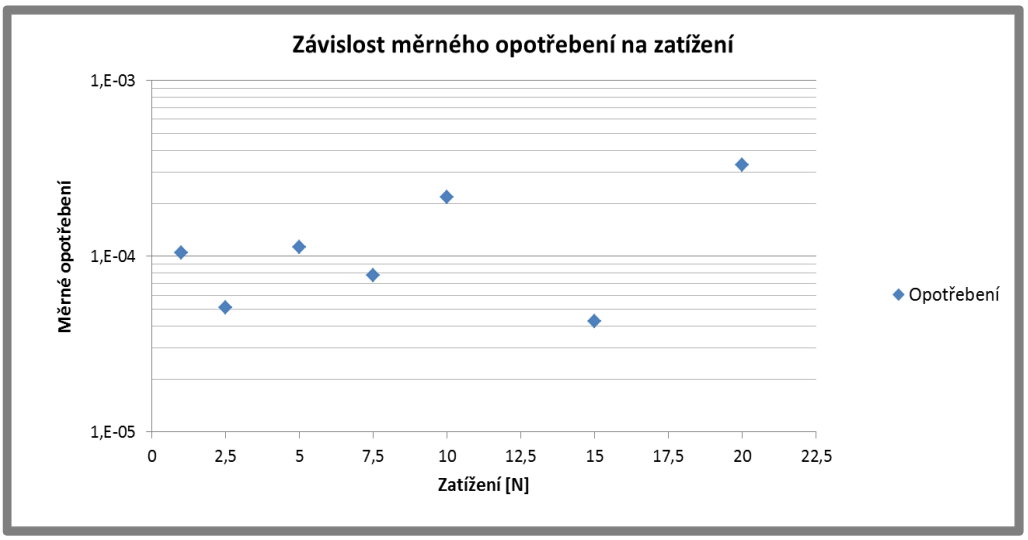
Výsledné hodnoty naměřeného měrného opotřebení byly určeny s pomocí objemů získaných oběma způsoby výpočtů popsanými v kap. 4.4. Pro tvorbu grafů bylo použito hodnot měrného opotřebení získaného druhým způsobem. Tyto hodnoty opotřebení byly dokresleny do mapy opotřebení sestavené Limem a Ashbym [1]. Z grafu na obr. 5.4 lze vidět, že většina naměřených bodů leží v oblasti *c* a také, že žádný z naměřených bodů se nepřekrývá s body uvedenými v původní mapě opotřebení [1]. Bylo očekáváno, že průběh opotřebení vzorku v jednotlivých oblastech se bude shodovat s popisem oblastí uvedeným v kap. 2.3. Toto očekávání se nepotvrdilo, protože znaky charakteristické pro jednotlivé oblasti nebyly pozorovány.



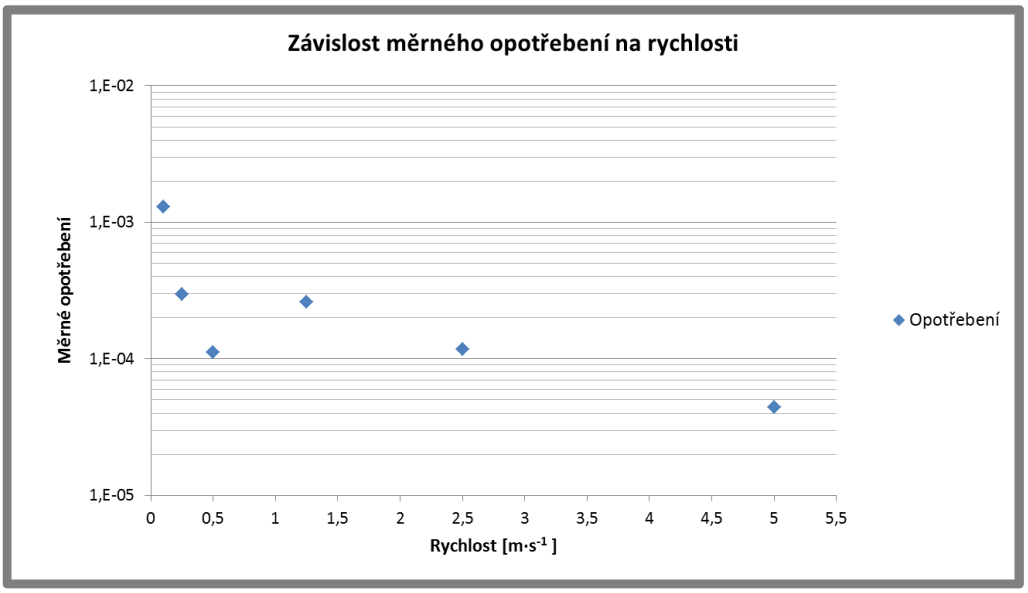
Obr. 5.4: *Mapa opotřebení doplněná o naměřené body*

Z grafů naměřených hodnot opotřebení vyplývá, že se zvyšující se kluznou rychlostí měrné opotřebení klesá (obr. 5.6) a se zvyšujícím se zatížením měrné opotřebení roste (obr. 5.5). Tyto pozorované závislosti odpovídají závislostem, které ve své práci popsali Zhang a Alpas [12].

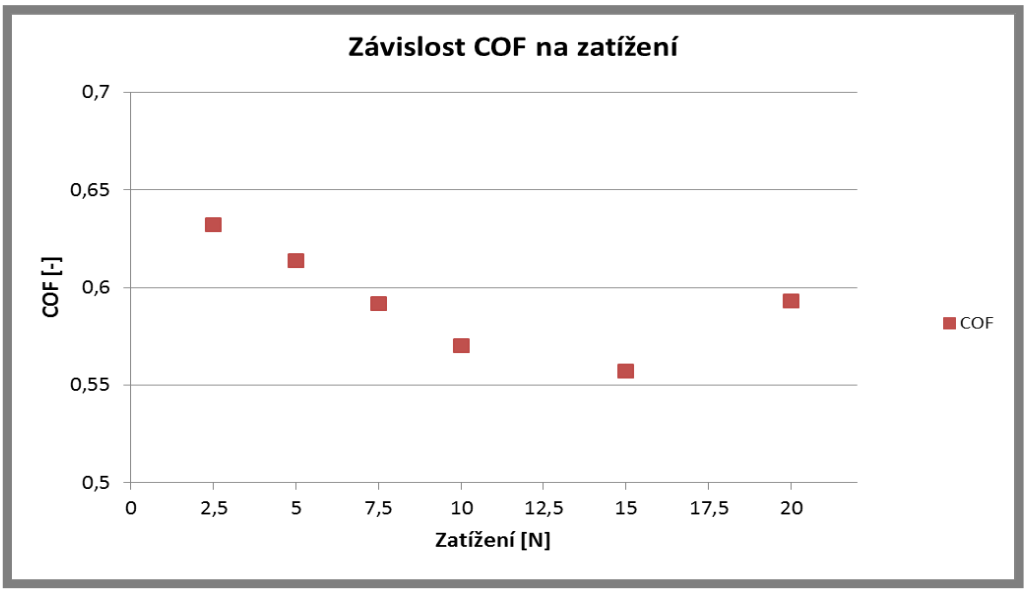
Průměrná hodnota součinitele tření se pohybovala kolem hodnoty 0,6, jak je také patrné z grafů na obr. 5.7 a obr. 5.8. Z grafu na obr. 5.7 lze také vypozorovat očekávanou závislost součinitele tření na zatížení, kdy do určité hodnoty součinitel tření klesal a poté začal narůstat. Závislost součinitele tření na rychlosti nevykazovala žádný viditelný trend.



Obr. 5.5: Závislost měrného opotřebení na zatížení

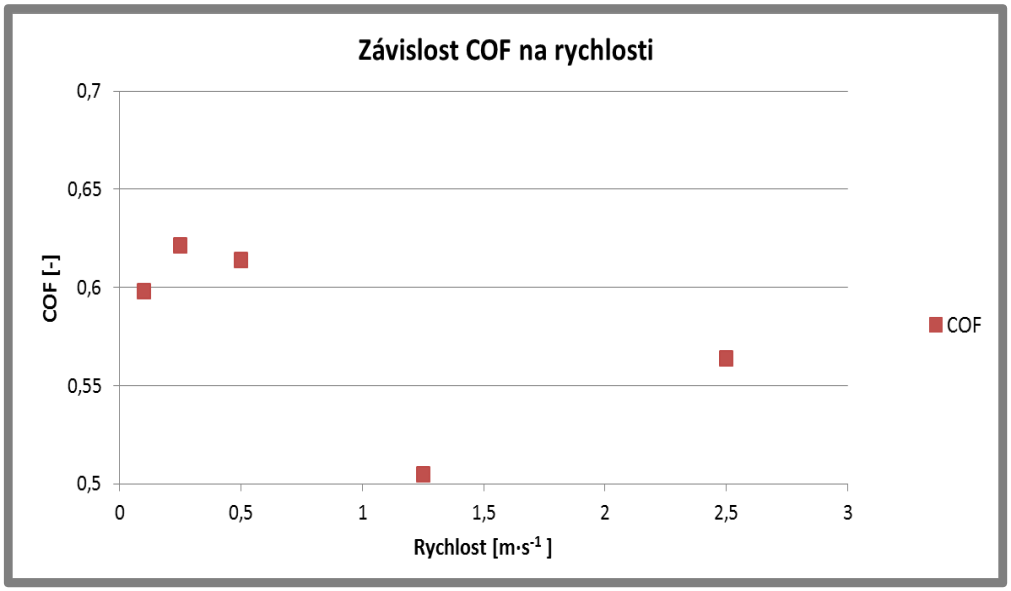


Obr. 5.6: Závislost měrného opotřebení na rychlosti

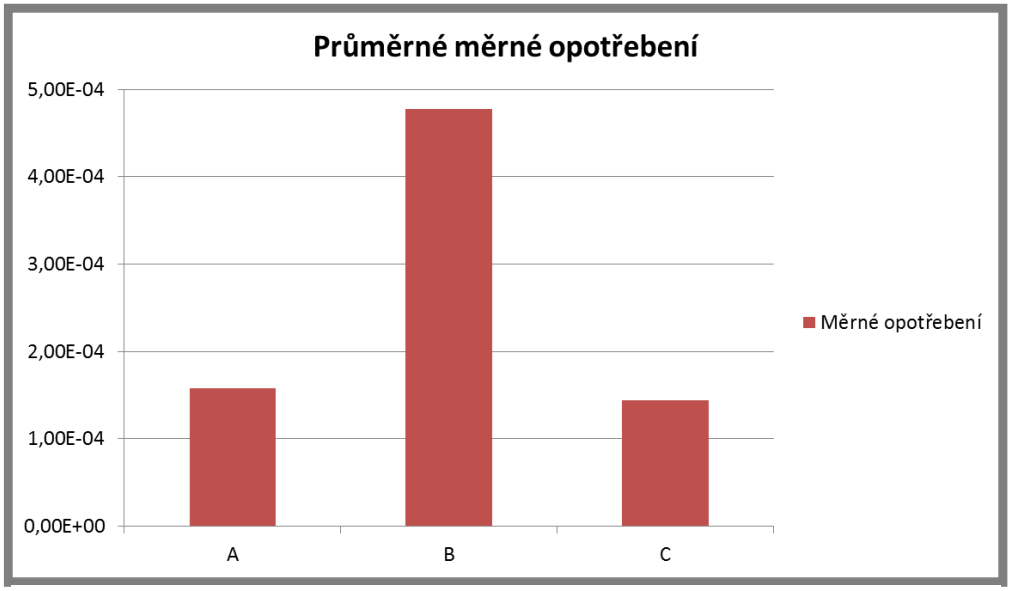


Obr. 5.7: Závislost součinitele tření na zatížení

Z jednotlivých hodnot měrného opotřebení byl spočten aritmetický průměr hodnot měrného opotřebení v jednotlivých oblastech. Z výsledků uvedených v grafu na obr. 5.9 plyne, že k nejvyššímu měrnému opotřebení dochází v oblasti *b*, v oblastech *a* a *c* pak měrné opotřebení nabývá přibližně stejných hodnot. Soubor hodnot pro oblast *a* má 3 členy, pro oblast *b* 4 členy a pro oblast *c* pak 11 členů. Za nejpřesnější lze tedy považovat výsledek pro třetí zmíněnou oblast *c*. Vzhledem k relativně malému celkovému počtu hodnot je nutno brát však výsledky na obr. 5.9 spíše orientačně.



Obr. 5.8: Závislost součinitele tření na rychlosti



Obr. 5.9: Průměrné měrné opotřebení v jednotlivých oblastech

6 DISKUZE

V práci byly zkoumány režimy opotřebení hliníkové slitiny především v závislosti na kluzné rychlosti a zatížení. Z mapy opotřebení lze vidět, že naměřené hodnoty spadají do oblasti *a*, *b* a *c* dle hodnocení režimů podle Lim a Ashby [1]. Očekávaný vzhled povrchu vzorku v jednotlivých oblastech popsaný v literatuře [1] se od skutečného povrchu lišil a nebylo možné určit jasnou hranici mezi jednotlivými oblastmi, tak jak byla popsána v teoretické části. Na povrchu disku bylo možné najít místa, kde docházelo k plastickému tečení materiálu, což značí přechod mírného na intenzivní režim opotřebení. Ke zřetelnému přechodu docházelo při vyšším zatížení a vyšších kluzných rychlostech. Působení adhezivního opotřebení se projevovalo vytrháváním materiálu z disku a tento znak bylo možné najít u všech měření s výjimkou jednoho. Vytrhávání materiálu při nižším zatížení a rychlostech mohlo být důsledkem dynamických účinků, protože při testování docházelo k poměrně značným vibracím z důvodu malé tuhosti dvouosého senzoru. Eliminace těchto vibrací je bohužel nad rámec bakalářské práce. Abrazivní opotřebení se projevovalo kruhovým profilem stopy a rýhováním povrchu stopy, tento znak bylo možné najít u 4 kombinací zatěžovacích podmínek. Ani v jednom případě nebylo možné říct, že by docházelo pouze k jednomu z mechanismů opotřebení, vždy to byla jejich kombinace. Bohužel také nelze z naměřených dat dostatečně přesně určit jasnou hranici, kdy začne docházet k přechodu mezi mírným a intenzivním režimem opotřebení. Závislosti opotřebení na rychlosti a zatížení nejsou hladké křivky, ale i přesto z nich lze určit trend, který ukazuje na chování, jak je popsali Zhang a Alpas [12] tj. růst opotřebení s rostoucím zatížením a pokles opotřebení s rostoucí rychlostí. Závislosti součinitele tření na zatížení a rychlosti vykazují také očekáváné chování. Součinitel tření se zatížením klesá až do svého minima a pak opět začne růst. Z grafu závislosti součinitele tření na rychlosti nelze jednoduše stanovit matematickou závislost. K tomuto kroku jednak nebylo získáno dostatečné množství dat, a dále má také v určitých oblastech na hodnotu součinitele tření vliv i zatížení, rychlost pohybu povrchů nebo také působení tepla vznikajícího při tření povrchů. Průměrný součinitel tření byl kolem 0,6, což je typické pro hliník a jeho slitiny za podmínek suchého tření na vzduchu.

Vliv zatížení na míru opotřebení je obvykle považován za malý, pokud nedojde k výrazné změně režimu opotřebení. Ze závislosti měrného opotřebení na zatížení (obr. 5.5) lze vidět, že jednotlivé režimy opotřebení byly u většiny podmínek podobné jenom se mírně lišily proporce. U závislosti měrného opotřebení na kluzné rychlosti můžeme pozorovat znatelný trend (obr. 5.6). Na míru opotřebení má vliv také proporce jednotlivých fází opotřebení. Při vyšších rychlostech je fáze rozběhu, kdy dochází k většímu opotřebení, překonána rychleji a čas ve stabilní části s menším opotřebením je relativně delší. Tím také lze vysvětlit pozorovaný trend, protože záběhová a stabilní fáze byly u měření různé dlouhé. S tím, že stopy nebyly před měřením opotřebení a tření zabíhány souvisí také hodnota středního rozptylu měřeného součinitele tření, který byl průměrně 12 %.

Veškeré výsledky uvedené v kap. 5 jsou samozřejmě zatíženy určitou nepřesností. Odebraný objem materiálu byl určován dvěma způsoby popsanými v kap. 4.4. Při prvním způsobu byla šířka a hloubka stopy byla odečítána na profilometru na 5-ti místech skenované části disku s přesností na dvě desetinná místa, výsledná hodnota byla stanovena jako aritmetický průměr těchto hodnot zaokrouhlený také na dvě

desetinná místa. Výsledná šířka a hloubka stopy byla pak uvažována jako konstantní po celém obvodu disku, což je podstatná idealizace způsobující spolu se zaokrouhlováním vnesení nepřesnosti do výpočtu objemu. Při druhém způsobu bylo měřeno cca. 20 % obvodu disku a bylo uvažováno, že objem odebraného materiálu v této části je stejně velký i po zbytku obvodu. Přesto, že tato úvaha je také jistým zjednodušením lze získaný výsledný objem považovat za přesnější, protože při výpočtu byl uvažován reálný profil stopy. Hodnoty objemů se od sebe průměrně lišily o 2,8 %.

Prvním důvodem omezené přesnosti výpočtu kontaktního tlaku podle Hertze je uvažování kontaktu hladkých povrchů. Použité povrchy nebyly hladké, a proto kontakt probíhal ve skutečnosti na menší ploše a tlak byl v místě kontaktu vyšší a proměnný podle toho, jaké nerovnosti obou povrchů byly v kontaktu. Druhým důvodem je uvažování pouze elastické deformace resp. platnosti Hookova zákona během deformace. Po opotřebení bylo možné najít na disku místa, kde docházelo k viditelnému plastickému tečení materiálu a která tedy nelze počítat touto teorií. Dalším důvodem bylo uvažování liniového kontaktu o šířce dané šířkou stopy na disku, kde se projevuje přesnost odečtení šířky stopy. Liniový kontakt byl použit z důvodu, že bodový kontakt nepostihuje vznikající opotřebení, které má na tlak podstatný vliv.

7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá zkoumáním režimů opotřebení vybrané hliníkové slitiny za podmínek suchého tření. Pro testy byla zvolena slitina Al-Si-Sn, která se využívá pro výrobu kluzných ložisek v automobilním průmyslu a proto je vhodné zkoumat její režimy opotřebení. Pro testování byl vyroben vzorek ve tvaru disku. Byla použita testovací metoda ball-on-disk, protože byla v daných laboratorních podmínkách nejlépe realizovatelná a bylo také možné dobře vyhodnotit povrch vzorku. Zatížení se pohybovalo od 1 N do 20 N a rychlost v rozmezí 0,1 až 5 $m \cdot s^{-1}$. Po opotřebení v univerzálním tribometru byl povrch naskenován optickým profilometrem a byly zapsány průměrné hodnoty součinitele tření při jednotlivých testech. Byla změřena šířka a hloubka stopy, dopočítán objem odebraného materiálu a také měrné opotřebení. Pro sestrojení mapy opotřebení bylo nutné vypočítat normalizovanou rychlost a normalizovaný tlak ze zatěžovacích podmínek a materiálových konstant. Dále byly sestrojeny grafy závislosti opotřebení na rychlosti a zatížení a také součinitele tření na rychlosti a zatížení. Získaná závislost součinitele tření na zatížení koresponduje s obecnými poznatky z dané oblasti.

Některé body v grafech závislostí vybočují z trendu. Lze předpokládat, že toto odchýlení je způsobeno vibracemi vznikajícími při určitých provozních podmínkách. V návaznosti na tuto práci by tedy bylo vhodné zaměřit se na jejich eliminaci např. změnou tuhosti pružiny silového senzoru. Bylo by také vhodné se pokusit naměřit více bodů v oblastech *a* a *b*, případně upravit testovací podmínky tak, abychom se dostali dál od teorií definované přechodové hranice. Na režim opotřebení má vliv i teplota v místě kontaktu, která nebyla v této práci měřena a tato závislost by se tedy mohla stát předmětem dalšího zkoumání. Všechny cíle práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] DONG, Hanshan (ed.). Surface engineering of light alloys: aluminium, magnesium and titanium alloys. Elsevier, 2010. [online]

[2] SUCHÁNEK, Jan. Abrazívní opotřebení kovových materiálů. Tribotechnika.sk, 2008-2015. [online]. [Cit. 20.4.2017] Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html

[3] VOCEL, Milan a Vladimír DUFEK. Tření a opotřebení strojních součástí. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1976. Řada strojírenské literatury.

[4] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. 3rd ed. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

[5] FAMFULÍK, Jan; MÍKOVÁ, Jana; KRZYŽANEK, Radek. Teorie údržby. Vysoká škola báňská-Technická univerzita, 2008.

[6] SUCHÁNEK, Jan. Adhezivní opotřebení. Tribotechnika: TechPark, 2010, 2008-2015. [online]. [Cit. 19.4.2017] Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22010/adhezivni-opotrebeni.html

[7] KUČERA, T. Tribologické vlastnosti polymerů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2012. 74 s. Vedoucí práce: doc. Ing. David Maňas, PhD.

[8] ČSN 015050: Opotřebení materiálu. Názvosloví. [online]

[9] ZIEGLER, J.; HELEBRANT, F.; MARASOVÁ, D. Technická diagnostika a spolehlivost I-Tribodiagnostika. 2004.

[10] ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ. Tribologie [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování

[11] DEUIS, R. L.; SUBRAMANIAN, C.; YELLUP, J. M. Dry sliding wear of aluminium composites—a review. Composites Science and Technology, 1997, 57.4: 415-435.

[12] ZHANG, J.; ALPAS, A. T. Transition between mild and severe wear in aluminium alloys. Acta Materialia, 1997, 45.2: 513-528.

[13] NETME Centre Laboratoř tribologie [online]. [Cit. 24. 4. 2017] Dostupné z: http://netme.cz/cs/tribology-laboratory/

[14] MIRAMONTES, José Cabral, et al. Wear Resistance of Thermal Spray WC-Co-VC Nanostructured Coatings. In: Advances in Tribology. InTech, 2016. [online]. Dostupné z: https://www.intechopen.com/books/advances-in-tribology/wear-resistance-of-thermal-spray-wc-co-vc-nanostructured-coatings

[15] JOHNSON, K. Contact mechanics. 9 vydání. Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 451 s. ISBN 05-212-5576-7.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

COF	-součinitel tření
NETME	-New Technologies for Mechanical Engineering
RPM	-revolutions per minute
ČSN	-Česká státní norma
3D	-třídimenzionální
atd.	-a tak dále
apod.	-a podobně
tj.	-to je
resp.	-respektive
tzv.	-takzvaný
V [-]	-normalizovaná rychlost
P [-]	-normalizovaný tlak
W [-]	-normalizovaná rychlost opotřebení
v [$m \cdot s^{-1}$]	-kluzná rychlost
H [$N \cdot m^{-2}$]	-tvrdost za pokojové teploty
F [N]	-zatížení
A [m^2]	-zdánlivá plocha kontaktu
w [$m^3 \cdot m^{-1}$]	-rychlost opotřebení
a [$m^2 \cdot s^{-1}$]	-tepelná vodivost
r [m]	-zaoblení kolíku (pinu)

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

SEZNAM TABULEK