

# Tribologické vlastnosti polymerů

Tomáš Kučera

---

Bakalářská práce  
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2011/2012

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš KUČERA**  
Osobní číslo: **T09440**  
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Tribologické vlastnosti polymerů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární studie na dané téma**
- 2. Příprava zkušebních vzorků pro experimentální část**
- 3. Provedení experimentu**
- 4. Vyhodnocení naměřených výsledků**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího práce**

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. David Maňas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

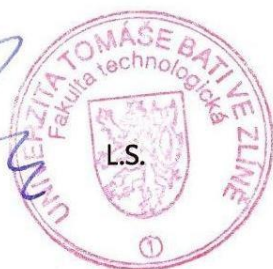
**13. února 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**25. května 2012**

Ve Zlíně dne 13. února 2012

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



  
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 20. dubna 2012 .....

  
.....



---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce s názvem Tribologické vlastnosti polymerů se zabývá tribologií, výhradně problematikou tření, opotřebení a mazání. Hlavním úkolem praktické části je stanovení jednotlivých parametrů jakými je třecí síla, akustická emise, hloubka profilu vrypu a součinitel tření mezi různými polymerními materiály pomocí mikrovrypového testu.

Klíčová slova: tribologie, tření, součinitel tření, opotřebení, mazání, polymer, mikrovrypový test

## **ABSTRACT**

Bachelor Thesis called Tribological properties of polymers deals with the tribology, specially issues of friction, wear and lubrication. The main task of the practical part is determination of individual parameters such as the frictional force, acoustic emission, the scratch depth profile and the coefficient of friction between various polymer materials using scratch test.

Keywords: tribology, friction, coefficient of friction, wear, lubrication, polymer, scratch test

Tímto chci poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Davidu Maňasi, Ph.D. za aktivní spolupráci, ochotu a cenné připomínky při tvorbě této práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Martinovi Ovsíkovi za odbornou asistenci při provedení mikrovrypového testu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

## OBSAH

ÚVOD.....	10
<b>I</b> <b>TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1</b> <b>HISTORICKÝ VÝVOJ TRIBOLOGIE</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b> <b>SOUVISLOST NAUKY O TŘENÍ A OPOTŘEBENÍ S JINÝMI OBLASTMI VĚDY A TECHNIKY</b> .....	<b>13</b>
<b>3</b> <b>EKONOMICKÝ VÝZNAM TRIBOLOGIE</b> .....	<b>15</b>
<b>4</b> <b>VOLBA MATERIÁLŮ</b> .....	<b>16</b>
4.1    POLYMER JAKO MATERIÁL ODOLNÝ PROTI OPOTŘEBENÍ .....	16
4.2    TŘECÍ A KLUZNÉ MATERIÁLY .....	17
4.2.1    Třecí materiály .....	17
4.2.2    Kluzné materiály .....	17
<b>5</b> <b>TRIBOLOGIE</b> .....	<b>18</b>
5.1    TŘENÍ .....	18
5.1.1    Geometrie povrchů třecích těles.....	20
5.1.2    Rozdělení tření .....	21
5.1.2.1    Kluzné tření.....	22
5.1.2.2    Valivé tření .....	24
5.1.2.3    Tření opásáním .....	25
5.2    OPOTŘEBENÍ.....	26
5.2.1    Rozdělení opotřebení .....	27
5.2.1.1    Adhezivní opotřebení.....	27
5.2.1.2    Abrazivní opotřebení .....	29
5.2.1.3    Erozivní opotřebení.....	31
5.2.1.4    Únavové opotřebení .....	33
5.2.1.5    Kavitační opotřebení.....	35
5.2.1.6    Vibrační opotřebení .....	36
5.2.1.7    Korozivní opotřebení .....	37
5.3    MAZÁNÍ.....	38
5.3.1    Klasifikace maziv .....	39
5.3.2    Rozdělení maziv .....	39
5.3.2.1    Plynné maziva .....	40
5.3.2.2    Kapalné maziva.....	40
5.3.2.3    Plastické maziva .....	41
5.3.2.4    Tuhé maziva.....	41
<b>II</b> <b>PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>42</b>
<b>6</b> <b>STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....	<b>43</b>
<b>7</b> <b>MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A PRINCIP MĚŘENÍ</b> .....	<b>44</b>



7.1	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	44
7.2	PRINCIP MĚŘENÍ .....	46
<b>8</b>	<b>POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI.....</b>	<b>48</b>
<b>9</b>	<b>POUŽITÉ VZORKY.....</b>	<b>50</b>
<b>10</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ MIKROVRYPOVÉHO TESTU .....</b>	<b>52</b>
10.1	VÝSLEDKY MĚŘENÍ PŘI APLIKOVANÉ ZATĚŽUJÍCÍ SÍLE 1 000 mN.....	52
10.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ PŘI APLIKOVANÉ ZATĚŽUJÍCÍ SÍLE 5 000 mN.....	56
10.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ PŘI APLIKOVANÉ ZATĚŽUJÍCÍ SÍLE 10 000 mN.....	60
10.4	DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	64
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>74</b>

## ÚVOD

V oblasti technických, společenských nebo přírodních věd je mnoho nevyřešených otázek a problémů, na které hledají odpovědi vědci, výzkumníci, praktici i teoretici. Po období masivního rozvoje v minulém století, kdy se nebral ohled na energetickou náročnost a ochranu životního prostředí, nastává posledních pár desetiletí a zvláště pak příchodem třetího milénia jisté vystřízlivění a uvědomění a šetření veškerými druhy energií se stává důležité a prioritní. Proti tomu dochází k rozšiřování a vzniku mnoha vědních oborů v závislosti na vyšší kvalitě života člověka, jeho potřebách a touze objevovat. [2]

K plnění vytčených cílů jsou dnes konstruktéři strojů a zařízení vyzbrojeni poměrně hlubokými znalostmi z řady oborů, jako je pružnost a pevnost, strojírenská technologie, mechanika či termodynamika. To jim umožňuje řešit mnohé problémy statického a dynamického namáhání strojních součástí, jejich krátkodobého i dlouhodobého tepelného namáhání a volbu materiálů pro dané provozní podmínky.

Zcela odlišná je situace v určení trvanlivosti a opotřebením strojních součástí, vystavených tření a opotřebením. V mnoha případech chybí totiž inženýrům nutné znalosti a zvláště potřebné technické podklady. Problém vyplývá především ze složitosti vzájemného působení materiálů na funkčním povrchu strojních součástí, proměnlivosti provozních podmínek, jimiž jsou určovány dominantní faktory tření a opotřebením. [1]

Od strojů a zařízení se požadují stále vyšší měrné výkony, prosazují se kontinuální výrobní technologie, důraz je kladen na zvyšování spolehlivosti a prodlužování technické životnosti. Praxe, jako kritérium správnosti teorie, dokázala, že při současné úrovni vývoje techniky i společnosti nemůže zákonitě vést k rychlému a požadovanému úspěchu individuální či izolovaný přístup k řešení problémů. Je třeba klást důraz na úzkou spolupráci mezi konstruktérem a technologem a problematikou tribologie se zabývat. [2]

Je důležité připomenout, že s rozvojem ambiciózních materiálů, mezi které polymery bezprostředně patří, musíme počítat s vytlačováním, nebo již zcela nahrazením klasických materiálů, jako je např. ocel a brát tyto jako zcela rovnocenné při moderním pojetí konstrukce strojů, nástrojů a technologických zařízení. Dovolte mi tedy seznámit se s problematikou tribologie, jejími hlavními principy a zpětnou vazbou na konkrétní řešený problém.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 HISTORICKÝ VÝVOJ TRIBOLOGIE

Tření, jako fenomenální jev přírody poskytlo člověku asi před 500 000 lety oheň a teplo, jako základní předpoklad pro jeho existenci. Svědectví o tom, že otázky vyplývající z běžného života starých civilizací souvisely i s třením, nám dokazují staré egyptské reliéfy a nástěnné malby. Obdobnou tematiku je možné spatřit i na sumerských tabulkách se znakovým písmem. Takovéto vyobrazení zároveň dokumentují skutečnost, že už v tomto období bylo známo, že přiváděná kapalina mezi třecí plochy snižuje tření, a tím i sílu potřebnou k uvedení břemena do pohybu. [2]

Ve vývoji lidstva představoval vznik kola a vozu nový, vyšší stupeň techniky, jímž člověk znásobil své síly a možnosti, problém tření a opotřebení ale stále přetrvával. Bylo zapotřebí použít maziva ke snížení tření náboje kola na hřídeli a hledat zároveň způsob snížení opotřebení samotného kola ve styku s terénem.

Nejstarší stopa živočišného tuku, použitého jako mazivo, byla nalezena na hřídeli kola dřevěného vozíku v egyptské hrobce již z roku 1400 př. n. l.. Používání rostlinných tuků jako maziv dokládají zejména zápisky ze Syrakus o Archimédových strojích z let 250 př. n. l., které obsahovaly kovová ložiska mazaná olejem. [1]

Od středověku můžeme mluvit o prvních teoriích ohledně tření až v 15. století a patří k nim především práce Leonarda da Vinci, který podle vlastních experimentálních pozorování dospěl k poznatkům, že:

- velikost třecí síly je úměrná kolmému zatížení a nezávisí na velikosti plochy třecích těles
- součinitel tření je pro všechny kovy stejný a dosahuje hodnotu 0,25

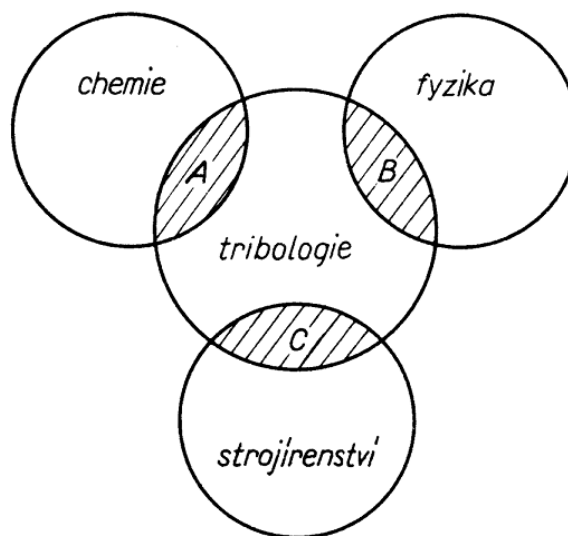
V 17. století formuluje francouzský inženýr Amontons stejné poznatky, a tím zakládá geometricko – mechanickou teorii tření. V roce 1699 definuje první zákon tření (1), který později přechází do literatury pod pojmem Coulombův zákon, ačkoliv Coulomb až roku 1779 podle provedených experimentů nachází dvoudílný výraz pro třecí sílu (obr. 1).

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

Nejnovější teorií v oblasti tribologie je energetická analýza tření, kterou reprezentují práce Kuznecova, Daviesa, Trossa, Kosteckého a Fleischera. První klasifikaci druhu opotřebení vypracoval Brinell podle kinematických kritérií roku 1921. Za zmínku stojí práce Stribecka v roce 1902 a Sommerfelda o dva roky později. Neméně podstatným výsledkem výzkumu je elasto-hydrodynamická teorie mazání představená Grubinem. [2]

## 2 SOUVISLOST NAUKY O TŘENÍ A OPOTŘEBENÍ S JINÝMI OBLASTMI VĚDY A TECHNIKY

Analýza dějů týkajících se tření a opotřebení musí zahrnovat všechna hlediska, která mohou přispívat k řešení složitých problémů exponovaných strojních součástí, mechanismů a strojů. Praxe dokázala, že pro úspěšná řešení složitých úkolů výroby a techniky se neobejde bez vzájemné a úzké spolupráce. Snaha o komplexní spojení vědy s praxí v oblasti tření, opotřebení a mazání tedy dala vznik novému oboru – tribologii. [1]

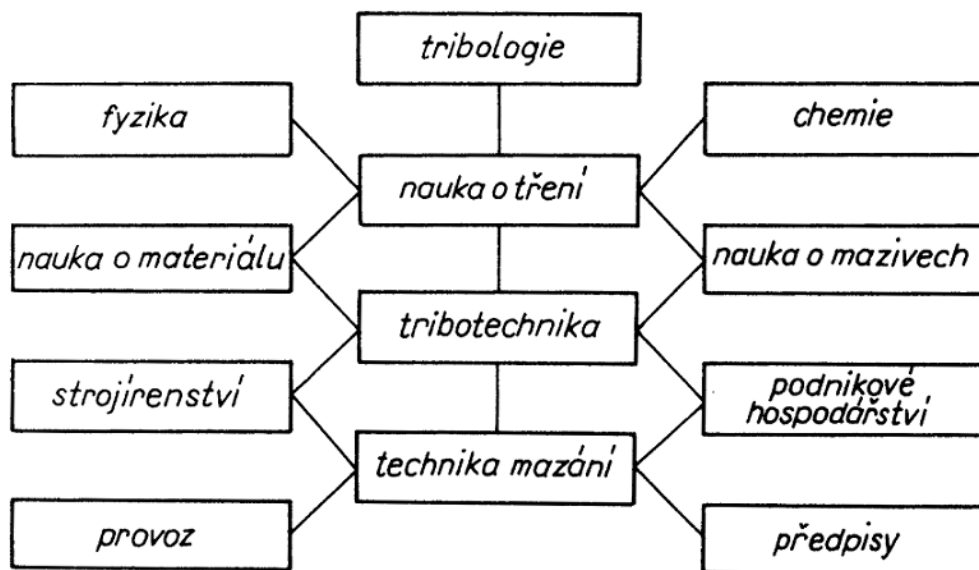


Obr. 1. Souvislost tribologie se základními vědními obory: A – tribochemie, B – tribofyzika, C - tribotechnika

Dle obrázku (Obr. 1) [1] je tribologie průnikem těmito vědními obory:

- tribochemie – popisuje chemické působení mezi povrchy v kontaktu a chemicky aktivním médiem
- tribofyzika – popisuje fyzikální aspekty vzájemného působení povrchů v kontaktu při jejich vzájemném pohybu
- tribotechnika – je oblastí techniky, která usiluje o technické a ekonomické ovládnutí procesu tření a opotřebení třecích uzlů vědecky zdůvodněnými opatřeními zasahující do konstrukce, dimenzování, přes výrobu, provoz až údržbu. Dále je nezastupitelnou součástí především technika mazání a technika ochrany proti opotřebení. [2]

Hlubší vztah tribologie nám zobrazuje následující obrázek (Obr. 2). [1]



Obr. 2. Vztah tribologie, vědních oborů a výroby

### 3 EKONOMICKÝ VÝZNAM TRIBOLOGIE

Požadavky maximálního využití surovin a zdrojů energie spolu s poznáním, že tření a opotřebení znamená kromě koroze, stárnutí, překročení pevnostních hranic a zmetkové výroby hlavně důvody pro novou produkci výrobků a náhradních součástí, bezprostředně spojuje technické stránky tribologie s jejím ekonomickým vlivem.

Z rozborů možností úspor v několika zemích především v USA, Kanadě, Německu, Velké Británii a Japonsku vyplývá, že nesprávné používání tribologických poznatků znamená asi 40 až 45 % ztráty energie ročně. Dále bylo zjištěno, že okolo 30 % analyzovaných strojů a technologických zařízení má tribologické nedostatky závažnějšího charakteru a 80 % všech tribologických problémů z analyzovaného spektra strojírenství se vztahuje zejména na kluzné vedení, valivé ložiska, kluzné ložiska, těsnění, ozubená kola, pístní kroužky a válce.

Příčiny musíme hledat především v:

- nevhodných tribotechnických konstrukčních normách
- nevhodné volbě materiálu třecích dvojic
- nevhodných metodách mazání
- nevhodné volbě maziva
- v zanedbávání vlivu okolí (prach a znečištění)

Ekonomický význam tribologie je především v zabránění nebo alespoň zmenšením uvedených ztrát a škod. [2]



## 4 VOLBA MATERIÁLŮ

Tribologické materiály jsou všechny materiály, ze kterých se zhotovují tribologické uzly. Existuje široká škála materiálů určená pro tribologické použití, proto je volba materiálů třecích dvojic důležitá a odvíjí se od ní spolehlivost celého zařízení a ekonomický provoz. [2]

### 4.1 Polymer jako materiál odolný proti opotřebení

Polymery se používají na kluzné kontakty kvůli jejich specifickým vlastnostem, které kovy ani keramika neobsahují:

- odolnost proti některým chemikáliím
- relativně malá tendence pro vznik zadírání
- schopnost mazání při vysokých teplotách (PTFE)
- samomazná schopnost (polymery s nízkou kohezní energií – PA)
- nízké moduly pružnosti

Velikost opotřebení o kovové prvky bývá relativně malá. Polymery jsou cenově dostupné a vyrábějí se z nich kluzné ložiska, součásti převodovek, těsnění apod.

Z termoplastů se uplatňují PE, PA díky nízkému součiniteli tření. Od termoplastů se vyžaduje vysoký modul pružnosti plniv, které přenášejí vysoké zatížení.

Reaktoplasty se používají v prostředí vysokých teplot nebo tam, kde je vyžadován vysoký modul pružnosti či relativně vysoká tvrdost polymerů. Zde patří fenoplasty a epoxidy.

Přez (vulkanizovaný kaučuk) je rozšířený polymer používaný v automobilovém průmyslu při výrobě pneumatik. Přez a polyuretanové elastomery se používají jako abrazivně odolný materiál pro vysokou elasticitu. Lze ji použít i pro kluzné kontakty nebo v místech působení erozivního opotřebení. [2]

## 4.2 Třecí a kluzné materiály

### 4.2.1 Třecí materiály

Třecí materiály se uplatňují v případě nutnosti změny mechanicko-kinetické energie na tepelnou energii formou třecího tepla. Tyto materiály musí snášet tepelné namáhání při zachování svých třecích vlastností, s nízkým opotřebením a především u spojek a brzd s poměrně konstantním průběhem součinitele tření, který nezávisí na velikosti kluzné rychlosti a teploty v širším rozsahu.

V minulosti tolik škodlivé azbesty nyní nahrazují materiály z kaučukových a fenolických pryskyřic, různé kompozice a kovo - keramické materiály. [2]

### 4.2.2 Kluzné materiály

Kluzné materiály se používají v kluzných uzlech mazaných i nemazaných strojů, především ve všech druzích kluzných ložisek a vedení, kde potřebujeme zachytit a přenést zatěžující síly a zaručit při relativním pohybu polohu jedné části vůči druhé s co nejmenší ztrátou tření. Kluzný materiál má z hlediska zatížení snášet vysoké tlaky v rozsahu pracovních teplot, být necitlivý proti nečistotám v oleji a nečistotám vznikajících při opotřebení. Dále odolnost proti únavovému namáhání, korozi, mít dobrou tepelnou vodivost, malou teplotní roztažnost a v neposlední řadě by měl být cenově i technologicky dostupný.

Kluzné materiály můžeme dle jejich složení rozdělit na:

- kompozice
- materiály ze slitin mědi
- materiály ze slitin hliníku
- šedou litinu
- samomazné materiály (zahrnující kombinace vynikajících kluzných vlastností PTFE s plnivem naneseným na ocel, která zmírňuje nevýhodu nízké teplotní vodivosti. [2])

## 5 TRIBOLOGIE

Tribologie je nauka o vědeckém výzkumu a technickém použití zákonitostí a poznatků pro vědní obory jako jsou tření, opotřebení a mazání. Jde o vědu zabývající se určováním a změnou struktur nebo chování všech možných reálných přírodních a umělých tribologických systémů.

Přírodní tribologické systémy – jsou to tribologické uzly, například u člověka a zvířat ve formě kloubů, pohybového aparátu atd., u rostlin ve formě kořenů, kmenů a větví.

Umělé tribologické systémy – jsou součástí technických systémů, tedy systémů vytvořených člověkem a jeho cílevědomou činností, zaměřenou na ulehčení namáhavé práce, zvýšení výkonu či účinnosti pro uspokojování osobní a společenské potřeby. [2]

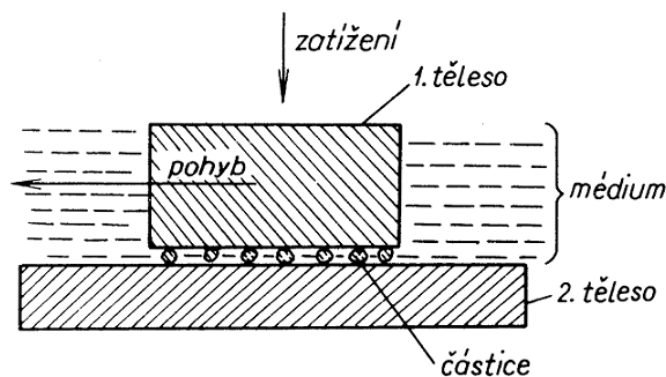
### 5.1 Tření

Tření je odpor proti relativnímu pohybu, vznikající mezi dvěma tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů, v tečném směru k nim.

Tato definice platí v plné míře pro vnější tření, nevystihuje celkem ale vnitřní tření, a proto bylo nutné zavedení nové definice:

Tření je ztráta mechanické energie v průběhu, na začátku nebo ukončení relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálových oblastí. [2]

Na obrázku (Obr. 3) [1] vidíme základní schéma charakterizující proces tření a opotřebení těles.

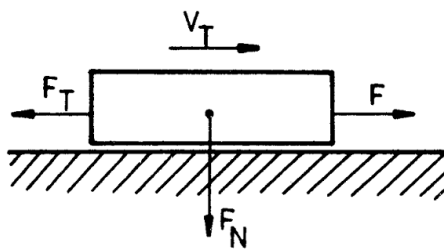


Obr. 3. Základní schéma tření a opotřebení těles

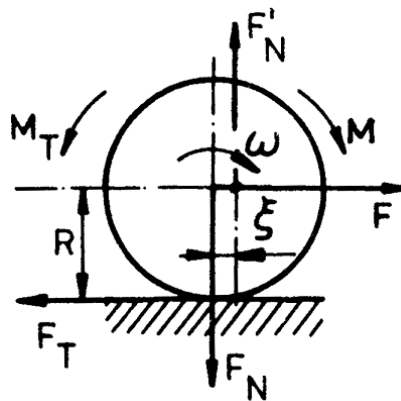
Tření je potřebný jev plnící technickou funkci zařízení, např. u brzd, třecích spojek, převodů či třecích dvojic (silnice – pneumatika). Tření má ale také svou špatnou stránku, je nám nepotřebné tehdy, kdy snižuje účinnost technických jednotek, jako jsou ozubené převody, kluzné a valivé ložiska, třecí dvojice (válec – píst, vačka – vahadlo).

Tření se projevuje svými účinky a můžeme jej podle jejich působení kvantifikovat formou:

- sil vyskytujících se v oblastech dotýkajících se těles při všeobecném translačním pohybu (Obr. 4)
- momentů vyskytujících se v oblastech dotýkajících se těles při rotačním pohybu (Obr. 5)
- procesu, kdy mechanická práce (třecí práce, třecí energie) přechází na jiné formy energie. [2]



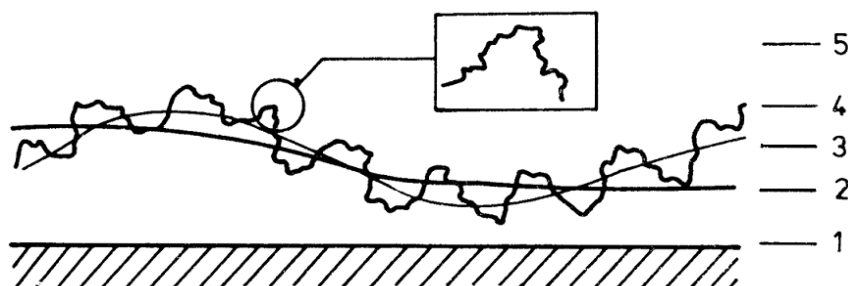
Obr. 4. Tření formou třecí síly  $F_T = \mu F_N$



Obr. 5. Tření formou třecího momentu  $M_T = FR$ ,  $M_T = F'_N \xi$

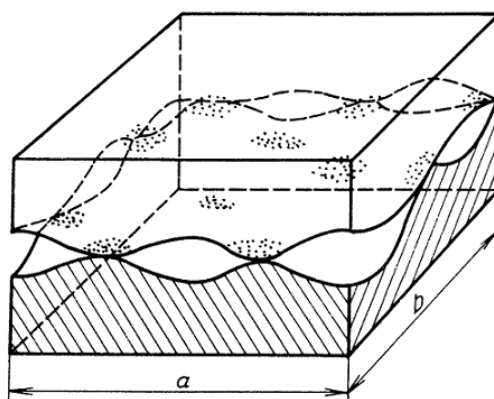
### 5.1.1 Geometrie povrchů třecích těles

V současnosti není technicky možné a často ani technologicky potřebné vyrobit ideálně rovné povrchy, vyrobené povrchy mají vždy odchylky tvaru, polohy a drsnost (Obr. 6). [2]



Obr. 6. Schematické znázornění geometrie povrchu: 1 – ideálně rovný povrch, 2 – odchylky tvaru a polohy, 3 – vlnitost povrchu, 4 – mikroskopické drsnosti, 5 – submikroskopické nerovnosti

Podle klasické teorie tření je odpor proti pohybu způsobován tím, že pohybující se těleso je zapotřebí vyzvedávat do úrovně nejvyšších výčnělků na povrchu drsné podložky. Za stavu klidu jsou pak obě tělesa do sebe zaklíněna nerovnostmi na povrchu. Toto konstatování nám přináší existenci nerovného povrchu a z toho vyplývající rozdíl mezi obrysovou plochou styku  $S_C$  ( $S_C = ab$ ) a skutečnou plochou styku  $S_R$  v místech, kde se setkávají výčnělky povrchů dvou dotýkajících se těles (Obr. 7). [1]



Obr. 7. Schematické znázornění geometrie povrchu v plošném znázornění rozdílu mezi obrysovou plochou styku  $S_C$  a skutečnou plochou styku  $S_R$

### 5.1.2 Rozdělení tření

Dle stavu kontaktních ploch:

- tření tuhých těles (stav, při kterém má dotyková materiálová oblast vlastnosti základního materiálu tuhého tělesa)
- kapalinové (stav, při kterém má vrstva materiálu, ve které probíhá tření, vlastnosti kapaliny)
- plynové (je obdobou kapalinového tření s tím rozdílem, že vrstva materiálu, ve které probíhá tření, má vlastnosti plynu)
- plazmatické (stav, při kterém má charakteristická vrstva, ve které probíhá tření, vlastnosti plazmy jako druhu vysoce ionizovaného plynu)

Kromě těchto základních třecích stavů se v praxi velmi často používá vzájemná kombinace označovaná jako smíšené tření. Smíšené tření je stav, kdy existují vedle sebe současně dva nebo více základních třecích stavů v jednom třecím uzlu.

Dle místa působení kontaktních ploch:

- vnější tření (charakterizuje styk dvou třecích těles)
- vnitřní tření (probíhá v materiálových vrstvách patřících ke stejnému třecímu tělesu)

Dle druhu pohybu:

- valivé tření (vzniká u rotačního pohybu třecího tělesa se zaobleným profilem po rovině nebo jiném všeobecně zakřiveném tělese se současným posunem rovnoběžně s rovinou)
- kluzné tření (tření se vyhodnocuje pomocí součinitele tření jako bezrozměrné veličiny. Součinitel tření je daný poměrem třecí tangenciální síly k zatěžovací normálové síle) [2]
- tření opásáním (tření opásáním tělesa kruhového průřezu) [3]

### 5.1.2.1 Kluzné tření

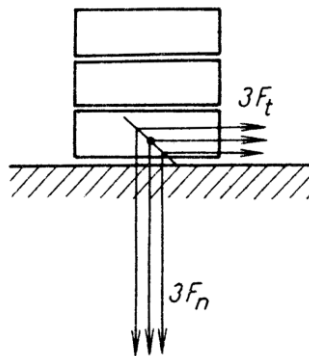
V inženýrsko-technické praxi se tření vyhodnocuje pomocí součinitele tření jako bezrozměrné veličiny. Součinitel tření je daný poměrem třecí tangenciální síly k zatěžovací normálové síle. Samotné tření se skládá z energie potřebné k překonání vzájemných překrytí (deformační teorie tření) a energie potřebné k oddělení materiálových spojení, které vznikly v důsledku dotyku (adhezní teorie tření). [2]

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

Rovnici (1) považujeme za vyjádření prvního zákona tření:

- velikost třecí síly je přímo úměrná působícímu zatížení

Tento první zákon tření je názorně dokumentován na obrázku (Obr. 8), který demonstruje, že např. třikrát větší zatížení vyžaduje zvýšit třikrát i sílu k překonání tření.

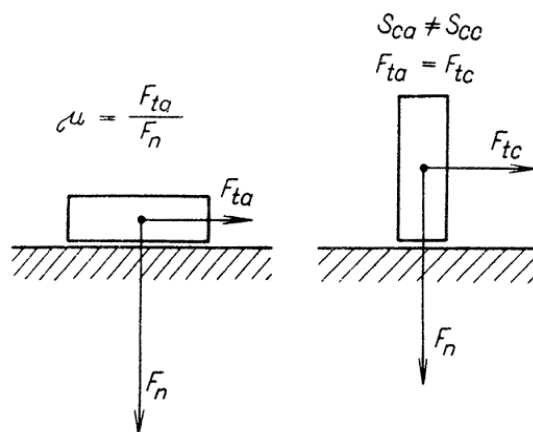


Obr. 8. Znárodnění zákonů tření – síla tření je úměrná zatížení

Síla potřebná k rovnoměrnému pohybu tělesa je shodná i v případě, že leží těleso kteroukoliv ze svých stran na téže podložce (Obr. 9). Tuto skutečnost označujeme jako druhý zákon tření:

- velikost třecí síly je nezávislá na celkové ploše společného styku

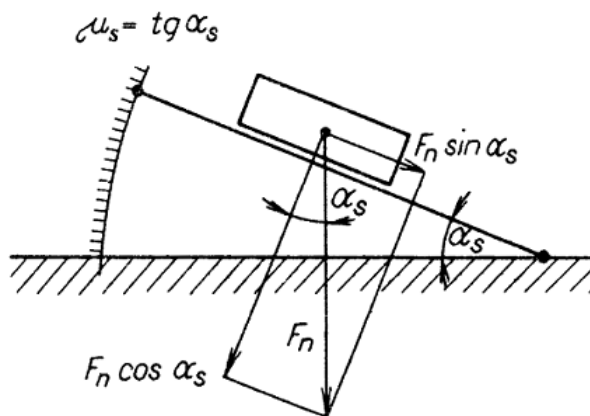




Obr. 9. Znárodnění zákonů tření – třecí síla nezávisí na velikosti obrysových ploch

Dojde-li k naklonění roviny, na níž těleso leží, pak při určitém úhlu sklonu  $\alpha_s$  je těleso uvedeno do pohybu (Obr. 10). Pro tento úhel platí tato rovnice:

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \mu_s \quad (2)$$



Obr. 10. Znárodnění zákonů tření – sklonný tribometr k určení součinitele tření jako  $\operatorname{tg} \alpha_s$

Detailní měření na sklonném tribometru dala vzniku třetímu zákonu tření:

- síla  $F_t$ , která udržuje rovnoměrný, přímočarý pohyb tělesa po podložce, je poněkud menší než síla  $F_s$ , nutná k uvedení téhož tělesa ze stavu klidu do pohybu

Třetí zákon tření lze vyjádřit nerovností (2), kde  $\mu_s$  nazýváme souč. tření za klidu. [1]

$$\mu_s > \mu \quad (3)$$

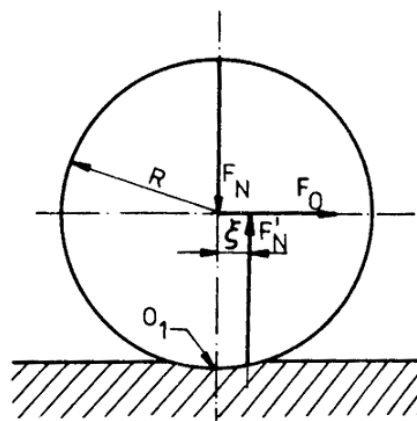
### 5.1.2.2 Valivé tření

Valivé tření vzniká, když-li třecí těleso se zaobleným profilem rotační pohyb po rovině či jiném všeobecně zakřiveném tělese se současným posunem rovnoběžně s rovinou nebo ve směru zakřivení.

Třecí síla je výrazně menší než při kluzném tření a v určitých případech může představovat 1/10 až 1/20 její hodnoty.

Stejně jako při kluzném tření rozlišujeme jeho dvě složky, adhezní a deformační. Na površích těles při valivém kontaktu působí adhezní síly a v jejich důsledku vznikají adhezní spojení – můstky. Ty nemají na samotnou velikost třecí síly výrazný vliv, jsou ale rozhodující při opotřebení. Deformační složka tření se skládá především z mikroskopických prokluzů, plastické deformace, elastické deformační hystereze, a hystereze. Vliv jednotlivých složek byl zkoumán v mnoha pracích, a to především v souvislosti s rozvojem valivých ložisek.

Valením ideálně tuhého válce po nepohyblivé tuhé rovině nastává valení bez prokluzu a samotný kontakt je charakterizován přímkovým stykem. Ve skutečnosti však vzniká kontakt na určité ploše, která je výsledkem deformací reálných pružných těles. Stejně jako v následujícím případě (Obr. 11) válec zatěžuje síla  $F_N$ , která působí ve směru osy kolmé na nepohyblivou rovinu, na válec musí zároveň působit i moment síly. Ten způsobuje nerovnoměrné valení s konstantní rychlostí.



Obr. 11. Valení válce po rovině

– výpočtové relace

Dotyková napětí vlivem hystereze materiálu jsou v přední části větší než-li v části odlehčené, a proto výslednice dotykových napětí se posouvá oproti kolmé ose o vzdálenost  $\xi$ .

Po sestavení momentové rovnováhy k bodu  $O_I$  vyplývá rovnice (4) a jeho úpravou získáme vztah (5), kde  $\xi$  je součinitel valivého tření. Na rozdíl od kluzného má rozměr délky. [2]

$$F_0 R = F'_N \xi \quad (4)$$

$$\xi = \frac{F_0}{F'_N} R \quad (5)$$

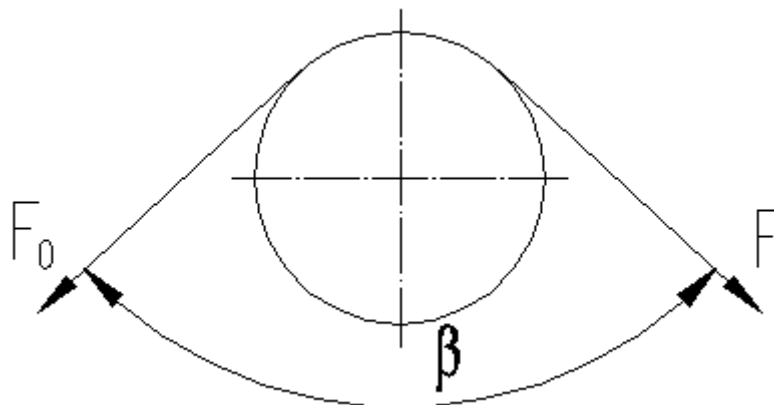
### 5.1.2.3 Tření opásáním

Tření opásáním (Obr. 12) se též nazývá jako Eulerovo tření. V případě tření opásaných předmětů kruhového průřezu tedy používáme Eulerův vztah:

$$F = F_0 \exp(f_\beta), \quad (5)$$

kde  $F$  je třecí síla za třecím tělesem,  $F_0$  je napínací síla před tělesem,  $\beta$  je úhel opásání a  $f_\beta$  je součinitel tření opásáním. [3]

Tření opásáním se využívá v aplikacích, kde je potřeba zvýšit tření v závislosti se zvětšeným úhlem opásání, např. u pohonů, zpracovatelských válcovacích linek, kladkostrojů apod.



Obr. 12. Znárodnění tření opásáním

## 5.2 Opotřebení

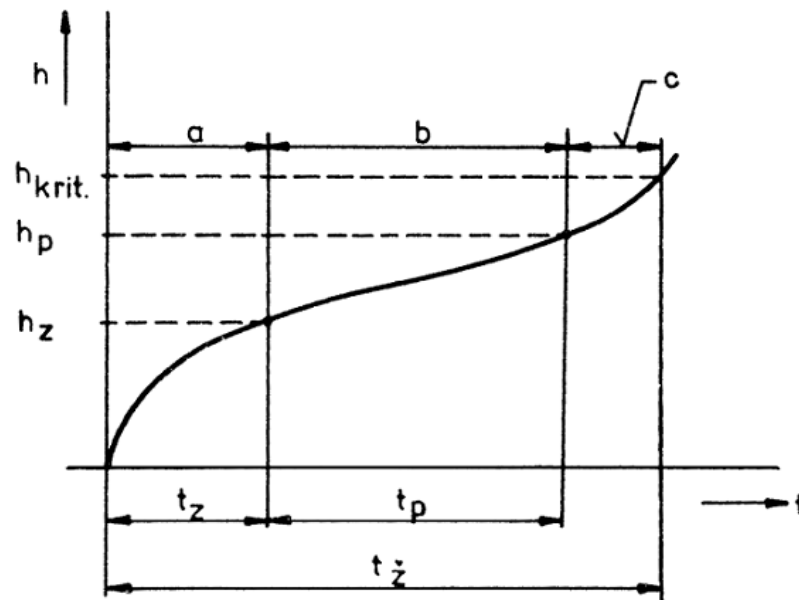
Opotřebení označujeme jako proces úbytku materiálu z povrchu jednoho nebo obou kontaktních povrchů tuhých těles probíhající u všech druhů jejich relativního pohybu. Řadíme jej k degradačním procesům.

Norma ČSN 01 5050 popisuje opotřebení jako trvale nežádoucí změnu povrchu (rozměrů), způsobenou vzájemným působením funkčního povrchu a opotřebovávajícího se média. Projevuje se odstraňováním či přemísťováním částic z opotřebovávaného povrchu mechanickými účinky a jinými vlivy (např. chemickými, elektrochemickými, elektrickými).

Existují dva základní mechanismy opotřebení:

- mechanický (zahrnuje procesy, které může způsobovat tření, abraze, koroze, únava)
- chemický (vychází z atakování povrchu reaktivními složkami)

Opotřebení má jistý časový průběh. Na obrázku (Obr. 13) je charakteristický průběh rozdělený na tři časové úseky, ve kterých se rychlost opotřebení navzájem odlišuje. Rozlišujeme tedy opotřebení při záběhu, během technického provozu a při havarijní situaci. [2]



Obr. 13. 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,  $t_z$  – celkový čas = havarijní situace

### 5.2.1 Rozdělení opotřebení

Rozlišujeme sedm základních druhů opotřebení [2]:

- adhezivní
- abrazivní
- erozivní
- únavové
- kavitační
- vibrační
- korozivní

#### 5.2.1.1 Adhezivní opotřebení

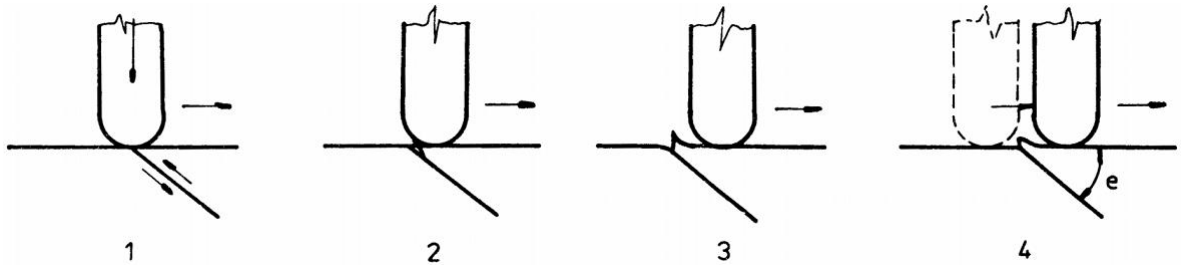
Z fyzikálního hlediska nejsou povrchy tuhých těles nikdy dokonale hladké. Dle použité technologie opracování povrchu se na nich vytváří charakteristický reliéf makronerovností, mikronerovností a submikronerovností. Z tohoto důvodu nedochází ke styku povrchů dvou součástí v celé obrysové ploše, ale na velkém množství dotykových plošek, jejichž vytváření je provázáno elastickou i plastickou deformací vrcholků nerovností. [1]

Mechanismus porušování povrchové vrstvy (Obr. 14) [2] lze vyjádřit těmito stádii:

- tvorba skluzových pásů
- začátek porušování
- tvorba výstupků na povrchu
- formování částic opotřebení vícenásobným třením po sobě

Konstruktor je nucen volit takovou dvojici materiálů, u které předpokládá minimální otěr. Doporučuje se tedy použít dva tvrdé materiály nebo použít materiály s nízkou interakcí (tzn. s nízkou vazebnou energií), např. dvojici kov – nekov a snížit jejich vazebnou energii použitím vhodného maziva.

Efektivnější je použití dvojice kov - nekov. Dobré výsledky byly například získány pro dvojici ocelový čep a pouzdro z PTFE. Důležité je také mazání, protože jím můžeme snížit hodnotu součinitele adhezivního opotřebení 10-1000 krát. [1]



*Obr. 14. Mechanismus porušování povrchové vrstvy a tvorba částic adhezivního opotřebení: 1 – tvorba skluzových pásů, 2 – začátek porušování, 3 – tvorba výstupků na povrchu, 4 – formování částic opotřebení vícenásobným třením po sobě*

Na následujícím obrázku je patrný vliv adhezivního opotřebení na ojniční pánvi (Obr. 15). [4]

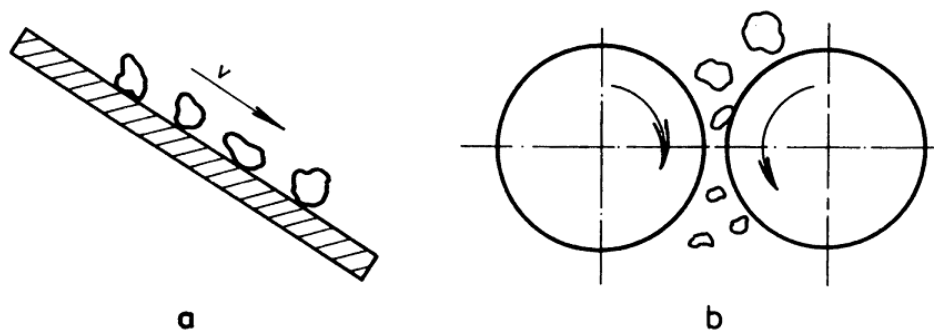


*Obr. 15. Adhezivní opotřebení - ojniční pánev*

### 5.2.1.2 Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení je charakterizováno oddělováním částic materiálu z funkčního povrchu účinkem tvrdšího a drsného povrchu jiného tělesa nebo účinkem abrazivních částic.

Podle charakteru vzájemných interakcí rozlišujeme dva základní modely (Obr. 16). U prvního z nich se jedná o opotřebení při interakci dvou těles, nejčastěji částic a funkčního povrchu. Typickým příkladem z praxe je opotřebení součástí při zpracování půdy, těžbě surovin apod. Druhý model představuje opotřebení částicemi, které jsou mezi dvěma funkčními povrchy, v této situaci jde tedy o interakci tří těles. V technické praxi se s tímto uspořádáním střetáváme v různých pohyblivých uloženíh, při vniknutí například nečistot či drcení nerostů.



Obr. 16. Základní modely abrazivního opotřebení: a – interakce dvou těles, b - interakce třech těles

Jednou z nejdůležitějších charakteristik procesu jsou provozní podmínky, během nichž opotřebení nastalo. Proces opotřebení by bez této specifikace nebylo možné analyzovat. Provozní podmínky se definují jako soubor často proměnlivých údajů a veličin, jejichž změna má za následek změnu intenzity a mechanismu abrazivního opotřebení. Patří k nim především vlastnosti abraziva, jeho způsob vazby, specifický tlak na opotřebovávaný povrch, délka dráhy, relativní rychlost pohybu, vlhkost a chemická agresivita prostředí.

Jednou z nejdůležitějších vlastností abraziva je tvrdost. Velmi důležitý je i vliv velikosti abrazivních částic. Bylo zjištěno, že abrazivnost se zvyšuje zvětšováním rozměru abrazivních částic. [2]



Na následujících obrázcích pozorujme vliv abrazivního opotřebení u pístu spalovacího motoru (Obr. 17) a uhlíku elektromotoru (Obr. 18). [4]



*Obr. 17. Abrazivní opotřebení - píst spalovacího motoru*

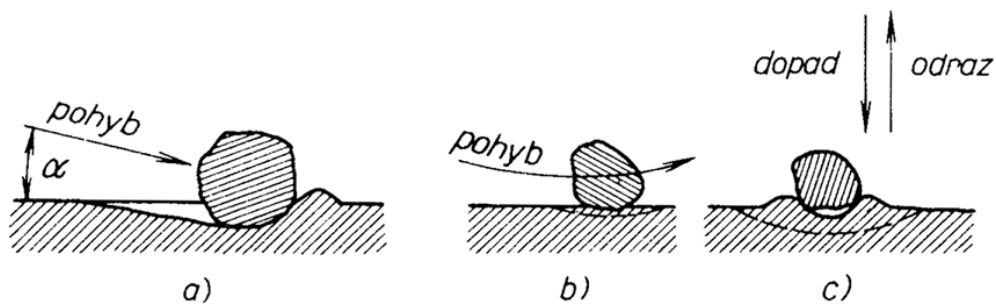


*Obr. 18. Abrazivní opotřebení - uhlík elektromotoru*

### 5.2.1.3 Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení (Obr. 19) [1] je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním povrchu [2]:

- částicemi nesenými proudem kapaliny
- částicemi nesenými proudem plynu
- proudem kapaliny, kapek, páry nebo plynu

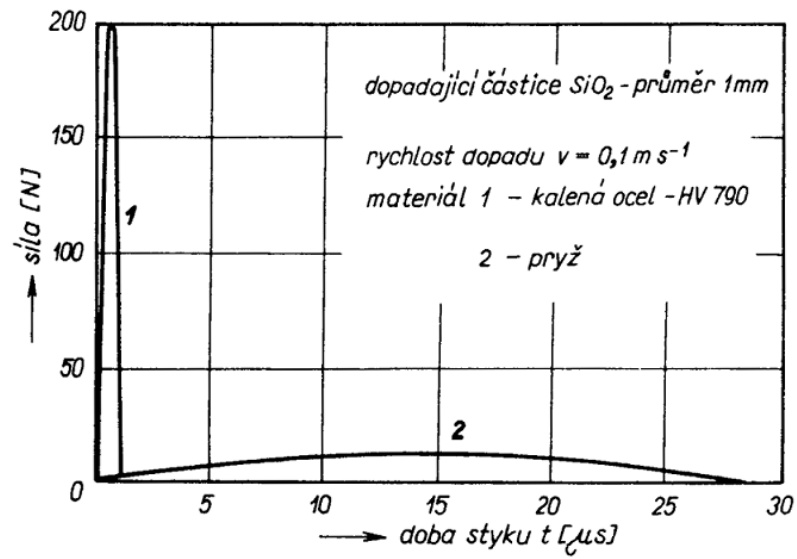


Obr. 19. Poměry při dopadu částice na exponovaný povrch: a – při šikmém dopadu, b – téměř rovnoběžně s povrchem, c – kolmo k povrchu

Při erozivním opotřebení patří k proměnlivým parametrům charakter částic a rychlost pohybu částic, které určují energii při srážce s povrchem tuhého tělesa. [2]

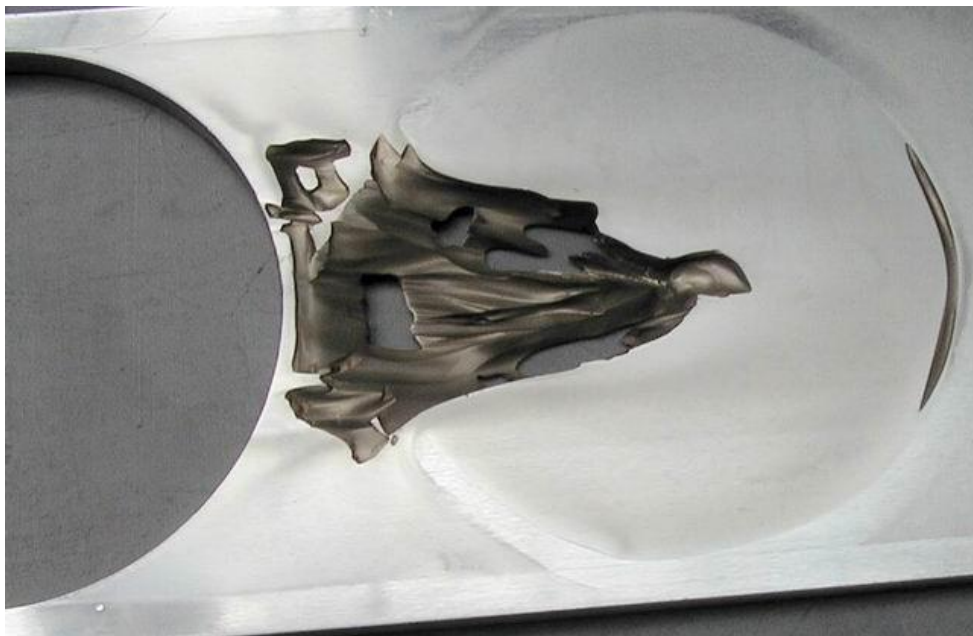
V místě dopadu částice na funkční povrch vzniká maximální napětí tehdy, budou-li moduly pružnosti obou materiálů velké, například při dopadu ocelových broků na ocelovou součást při otryskávání nebo kuličkování. Bude-li modul pružnosti jednoho materiálu malý, potom výrazně klesne i napětí v místě dotyku. Malý modul pružnosti mají pryže a jiné polymerní materiály, které se v podmínkách eroze často používají na nejrůznější obložení.

Na obrázku (Obr. 20) je zobrazen průběh síly a doby styku dopadající částice písku na povrch kalené oceli a pryže za předpokladu čistě pružných deformací. Z grafu můžeme odečíst skutečnost, že při dopadu částic na povrch materiálu s malým modulem pružnosti vznikají malé síly v důsledku relativně dlouhé dráhy, během níž se částice zbrzdí. [1]



Obr. 20. Grafické vyjádření závislosti síly na době styku při dopadu částice písku na povrch kalené oceli a pryže

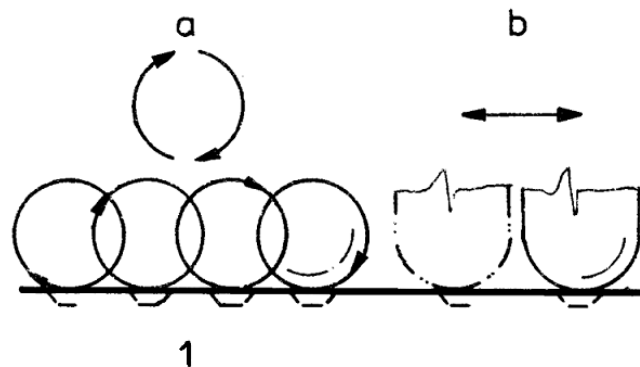
Příklad erozivního opotřebení je znázorněn na obrázku (Obr. 21) [4] u desky šoupátka.



Obr. 21. Erozivní opotřebení – deska šoupátka

#### 5.2.1.4 Únavové opotřebení

Mezi jeden z nejrozšířenějších mechanismů oddělování částic při porušování povrchové vrstvy při opotřebení patří únavový proces. Je podmínován opakujícím se kontaktním napětím (při rotačním nebo vratném pohybu), které iniciuje tvorbu zárodků povrchových či podpovrchových trhlin, které poté umožňují tvorbu částic opotřebení a porušování povrchové vrstvy (Obr. 22). [2]



Obr. 22. Mechanismus únavového opotřebení: a – cyklický pohyb, b – vratný skluz, 1 – zárodek částic opotřebení z povrchové či podpovrchové trhliny

S tímto procesem se můžeme setkat například u ložisek (Obr. 23) [4], kdy kulička, váleček nebo u kluzných ložisek čep či hřídel je neustále v kontaktu s jedním a tím samým povrchem kroužku. Po opakovaném namáhání dojde ke vzniku zárodku trhliny v podpovrchové nebo povrchové vrstvě. Podpovrchová trhlina postupně roste směrem k povrchu a odděluje částici opotřebení. Povrchová trhlina roste do hloubky materiálu, spojuje se sousedními trhlínami a opět dochází k vytváření částice opotřebení.

Obecně se s únavovým cyklem setkáme ve vícenásobných cyklech namáhání.

V homogenních materiálech tvoření únavových trhlin podmiňují dislokační procesy, které mohou mít vliv i na rozvoj trhlin, zejména při plastickém přetváření materiálu. [2]

K únavovému opotřebení dochází velmi často také na bocích zubů ozubených kol (Obr. 24). [4]



*Obr. 23. Únavové opotřebení - kroužek ložiska*



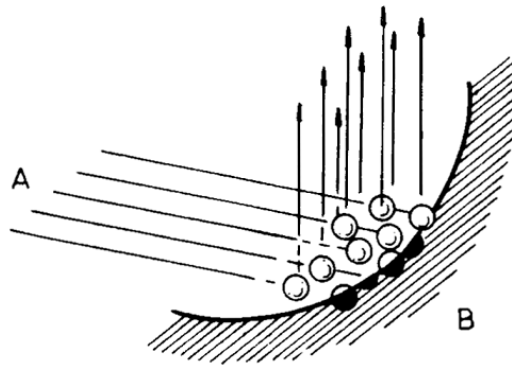
*Obr. 24. Únavové opotřebení – ozubené kolo*



### 5.2.1.5 Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení probíhá porušením povrchu materiálu nárazem proudu tekutiny obsahující plynové bublinky. Proud tekutiny s bublinkami mívá obvykle vysokou rychlost.

Bublinky při nárazu na povrch zanikají a podmiňují tvorbu nárazových vln na povrchu tuhého tělesa, přičemž dochází k oddělování materiálu z jeho povrchu (Obr. 25). [2]



Obr. 25. Mechanismus kavitačního opotřebení: A – proud tekutiny, B – povrch tuhého tělesa

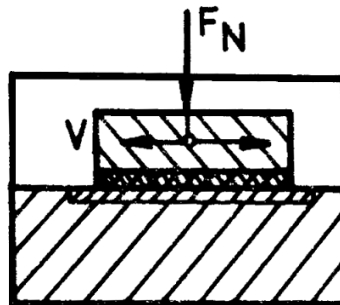
S kavitačním opotřebováním se můžeme běžně setkat na lopatkách oběžných kol čerpadel (Obr. 26) [4] či vodních turbín, ve vstřikovacích tryskách, míchacích zařízeních apod. [1]



Obr. 26. Kavitační opotřebení – lopatkové kolo

### 5.2.1.6 Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení vzniká u tribologické dvojice s vibračním nebo vratným pohybem a velmi malou amplitudou kmitání (Obr. 27).



Obr. 27. Schéma vibračního opotřebení

Toto opotřebení je charakterizováno dvoustupňovým charakterem. V prvním stupni je to začáteční tření, při kterém dochází k porušování povrchu adhezivním mechanismem opotřebení. Ve druhém stupni vznikají částice adhezivního opotřebení, které postupně oxidují v okolní atmosféře z důvodu vysoké hodnoty volné energie [2].

Vibrační opotřebení má tedy důsledky nejen poškození povrchu součásti, ale i další, jež mohou výrazně snížit životnost a spolehlivost strojů a zařízení. Mezi ty nejdůležitější patří snížení únavové pevnosti důsledkem trhlin a důlků, ztráta přesnosti rozměrů nebo změna tolerancí uložení následkem nahromadění produktů vibračního opotřebení.

K vibračnímu opotřebení dochází prakticky u všech materiálů a jejich odolnost se špatně hodnotí samostatně. Význam má tedy klasifikace odolnosti dvojic materiálů. Úspěšné je volit kombinaci zlato – ocel, PTFE - ocel, naopak dvojice hliník - ocel se nedoporučuje.

Mezi způsoby, jak nežádoucímu opotřebení předcházet, patří konstrukční řešení v podobě uložení součástí umožňující potřebnou pohyblivost, např. pomocí pryže nebo pružin. Další možnost nám nabízí povrchová úprava. Nejvíce se osvědčilo zpevňování původního materiálu za studena, z tepelně difúzních úprav pak kalením a nitridováním. Dobrých výsledků bylo také dosaženo chemickými úpravami při použití kombinace zlacení a vrstvené polymerní hmoty. [1]

Na obrázku (Obr. 28) [4] vidíme funkční část kříže zdegradovaného vibračním opotřebením.



*Obr. 28. Vibrační opotřebení – kříž*

#### **5.2.1.7 Korozivní opotřebení**

Korozivní opotřebení se velmi často vyskytuje v tribotechnické praxi zejména v případě výskytu třecí dvojice pracující v aktivním prostředí.

Mechanismus vzájemného působení prostředí může být různorodý. Při tření bez mazání napadá kontaktní povrchy kyslík ze vzduchu nebo jiné okolní atmosféry. Při tření s mazáním může takovéto opotřebení nastat za přítomnosti zbytkového množství přísad v mazivu. Dále nastává u běžných maziv za vysokých teplot vzájemným působením rozpustného kyslíku s třecím povrchem.

Příčinou koroze při tření mohou být zplodiny stárnoucího maziva, voda, kyseliny, chemicky aktivní zplodiny rozkladu přísad a nevhodně zvolené druhy či koncentrace přísad s obsahem síry, chlóru a fosforu.

Intenzita tohoto druhu opotřebení závisí na materiálech třecí dvojice a jejich korozní odolnosti. [2]



### 5.3 Mazání

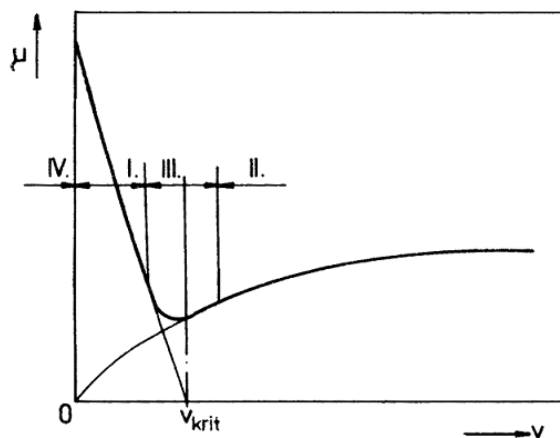
Dalším tribologickým procesem, který je významově rovnocenný s procesy tření a opotřebení, je mazání. Provoz technických zařízení s mazanými třecími uzly na úrovni vyžadující zachování rozvoje průmyslu a dopravy by byl nemožný bez uplatňování existujících poznatků o mazání.

Vývoj mazání lze charakterizovat:

- zdokonalováním a vznikem nových teorií, které vysvětlují působení mazání z hlediska chemicko - fyzikálních a mechanických pohybových účinků
- vývojem nových maziv s požadovanými vlastnostmi pro univerzální použití
- vývojem účinnějších technických prostředků, které by umožnily aplikaci maziv

Ve Stribeckově diagramu (Obr. 29) rozlišujeme oblasti tření na:

- mazání s přerušovanou vrstvou kapalného maziva (smíšené tření)
- mazání s vytvořenou celistvou nosnou vrstvou kapalného maziva (kapalné tření)
- mazání s vrstvou kapalného maziva (přechod z kapalného do smíšeného tření)
- mazání tuhými mazivy [2]



Obr. 29. Oblasti mazání ve Stribeckově diagramu

### 5.3.1 Klasifikace maziv

Maziva jsou pro chod strojů a zařízení nevyhnutelné při správném použití nám zaručují ekonomičnost, spolehlivost, bezpečnost a projektovanou životnost třecích uzlů, tedy celého zařízení během jeho provozu v technické praxi.

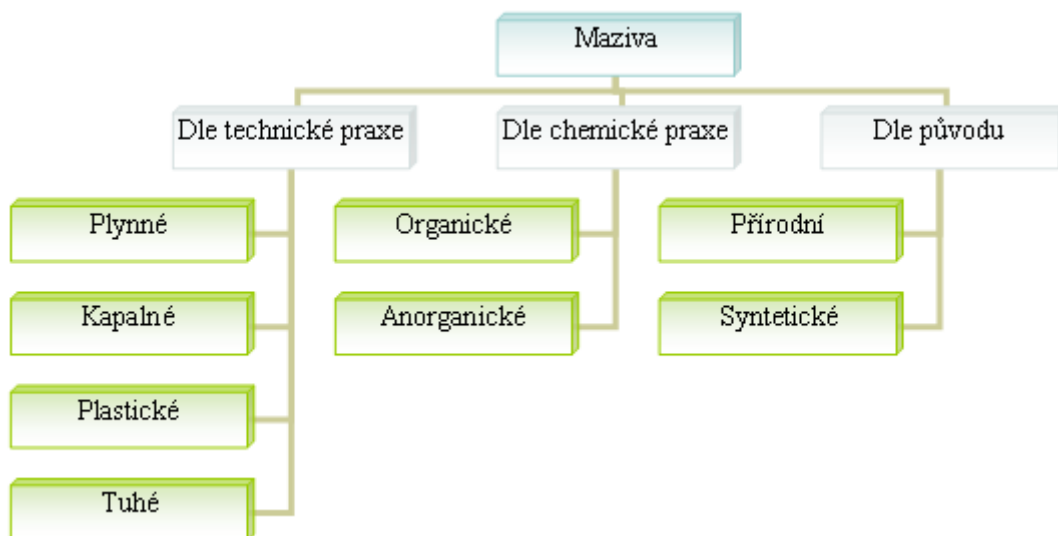
Základní vlastností maziva je jeho mazací schopnost. Ta je definována jako vlastnost přenášet síly v třecím uzlu vnitřním třením při současném vytvoření souvislých vrstev na povrchu třecích těles.

Mezi požadavky, které by maziva měla splňovat patří:

- snížení ztrát mechanické energie a zlepšení mechanické účinnosti systému
- snížení nebo potlačení opotřebení
- zlepšení odvodu tepla a dostatečné chlazení
- dostatečná ochrana proti korozi a nečistotám, chemická neutralita
- působení maziva jako těsnícího prostředku [2]

### 5.3.2 Rozdělení maziv

Rozdělení maziv nám dokládá následující obrázek (Obr. 30). [2]



Obr. 30. Rozdělení maziv

### 5.3.2.1 *Plynné maziva*

Plynné maziva jsou omezeně používána u aerostatického či aerodynamického mazání kluzných ložisek a uložení, kde se využívá vlastností některých plynů a jejich směsí, jako jsou:

- nízká dynamická viskozita stoupající s narůstající teplotou
- chemická stálost při vysokých teplotách
- schopnost pracovat v radioaktivním prostředí
- malé tlakové ztráty v uložení
- vyloučení kavitace

Hraniční teplota používání je 300 °C. Mezi nedostatky plynných maziv patří zejména nestabilita a vznik turbulentního proudění, vysoké nároky na přesnost výroby a montáže kluzné dvojice. Rozvoj tohoto druhu mazání můžeme očekávat v atomové energetice nebo u vysokootáčkových obráběcích strojů. [2]

### 5.3.2.2 *Kapalné maziva*

Kapalné maziva patří v současnosti mezi nejrozšířenější, mezi jejich hlavní výhody patří široký sortiment umožňující použití v celé oblasti kapalného a smíšeného tření.

Kapalným mazivem může být každá kapalina, která splňuje podmínky mazivosti v závislosti na konkrétních provozních podmínkách. Kapalné maziva můžeme rozdělit na:

- chemicky jednoznačné látky (voda, glycerín)
- homogenní směsi (oleje živočišného a rostlinného původu, minerální a syntetické)
- kapalné disperze (rozptýlené částice jedné látky ve druhé, nejčastěji jako řezné kapaliny, technologické kapaliny a emulze)

Nejdůležitějším a nejrozšířenějším kapalným mazivem jsou maziva ze skupiny homogenních směsí a dělíme je na ropné a syntetické oleje. Základní vlastnosti mazacích olejů jsou funkční, elektrické, termické, povrchové a fyziologické. [2]

### 5.3.2.3 *Plastické maziva*

Plastické maziva jsou koloidní soustavy gelů nebo rosolů. Z pohledu makroskopického jsou to máslovité, vláknité, houbovitě nebo zrnité soustavy. Jsou složeny z kapalné fáze vytvářející mazací olej a z tuhých částic disperzní látky. Vyrábějí se z ropných olejů jejich zpevňováním kovovými a jinými látkami na požadovanou konzistenci. Všeobecně jsou plastické maziva určeny pro krátkodobé mazání s delšími mazacími intervaly.

Charakteristickou veličinou, která vyjadřuje vlastnosti plastických maziv, je penetrace. Ta vyjadřuje stupeň tuhosti plastických maziv a rozděluje se do devíti konzistenčních stupňů. Další důležitou vlastností je teplota odkápnutí, která určuje teplotu, při které plastické mazivo přechází do kapalného stavu. Plastické maziva se dělí podle typu zpevňovadla na:

- kovové
- nekovové
- uhlovodíkové
- halogenové [2]

### 5.3.2.4 *Tuhé maziva*

Tuhé maziva se uplatňují v případech, kdy ostatní zmíněná maziva jsou svými vlastnostmi již nedostačující. Pro tyto maziva jsou používány látky s nízkou tvrdostí, vysokou přilnavostí a vrstevnatou strukturou zaručující malou pevnost ve smyku. Zároveň odolávají velkému tlakovému zatížení a nemění svoje fyzikální vlastnosti při vysokých teplotách.

Tuhé maziva rozdělujeme na dvě skupiny:

- anorganické (hlavním představitelem je grafit a molybdendisulfid)
- organické (největší zastoupení mají zde polymerní látky, z nichž nejdůležitější je PTFE, který má ze všech tuhých maziv nejnižší hodnotu součinitele tření, a to  $\mu = 0,01$ ; dále jsou to PA, PUR a POM)

Nevýhodou tuhých maziv je poměrně nízká tepelná vodivost, kdy maziva špatně odvádějí teplo, dále vysoká cena z hlediska vysoké chemické čistoty, až 99 % a více. [2]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo měření třecích (tribologických) vlastností vybraných typů polymerních materiálů (HDPE - 0kGy, PA 66 - 0kGy, PA Duramid 30% TH7G6, PA Duramid 50% TH7G10, PA Duramid 60% TH7G12, PBT - 0kGy, PP - 0kGy, TPE - 0kGy) na speciálním zařízení Micro Combi Tester. Pomocí mikrovrypového testu byly stanoveny třecí vlastnosti u testovaných zkušebních vzorků jako jsou třecí síla, akustická emise, hloubka profilu před vrypem, hloubka profilu po vrypu, rozdíl hloubek profilu před a po vrypu, hloubka profilu či součinitel tření v závislosti na délkovém intervalu vrypu pro jednotlivé polymerní materiály. Mikrovrypový test probíhal při měnících se podmínkách, kdy došlo k diferenci v použité zatěžující síle, nejprve při 1 000 mN, 5 000 mN až 10 000 mN. Naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

- Vypracování literární studie na dané téma
- Příprava zkušebních vzorků
- Provedení experimentu
- Vyhodnocení naměřených výsledků

## 7 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A PRINCIP MĚŘENÍ

### 7.1 Měřicí zařízení

Měření bylo uskutečněno v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství na přístroji Micro Combi Tester (Obr. 31) od švýcarské společnosti CSM Instruments. Díky unikátní konstrukci nám přístroj umožňuje provádět několik typů měření:

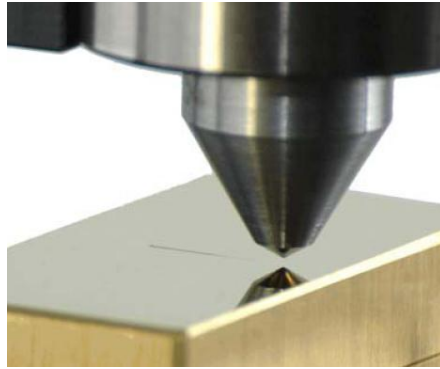
- mikrovrypový test
- nanovrypový test
- zkouška mikrotvrlosti či jejich kombinace (zkouška mikrotvrlosti a mikrovrypová)



Obr. 31. Měřicí zařízení Micro Combi Tester

Micro Combi Tester je určený pro popis povrchových mechanických vlastností tenkých vrstev, povlaků a měkkých materiálů, jimiž polymerní materiály oproti kovovým jsou.

Zkušební vzorek je upnut ve svěráku stolu, posuv stolu je tříosý řízený klávesnicí. Měřicí hlava umožňuje vyměnitelné upnutí zatěžujících těles - indentorů. Indentorem rozumíme diamantový kužel s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  a rádiusem na špičce  $100\ \mu\text{m}$  (Obr. 32). Indentor můžeme zatlačovat do povrchové vrstvy zkušební vzorku silou konstantní, přírůstkovou (má míjivý charakter) nebo progresivní (postupně zvyšující se).



Obr. 32. Indentor

Měřicí hlava dále obsahuje množství senzorů poskytujících rychlou odezvu, přesnost a flexibilitu k vyhodnocování jednotlivých žádaných parametrů. Mezi tyto senzory řadíme mimo jiné mikroskop a kameru. Veškerá data jsou řízena i analyzována počítačem a potřebným softwarem. Micro Combi Tester má zabudovaný kompresor, díky němuž je aplikován antivibrační systém.

Technické parametry měřícího zařízení Micro Combi Tester:

Rozměry (X, Y, Z):	600x600x1 200 mm
Celková hmotnost:	150 kg
Max. velikost vzorku (X, Y, Z):	300x300x120 mm

Technické parametry mikroskopu:

Zvětšení:	200x, 800x
Hrubé zaostřování:	5,2 mm.ot <sup>-1</sup>
Jemné zaostřování:	0,1 mm.ot <sup>-1</sup>

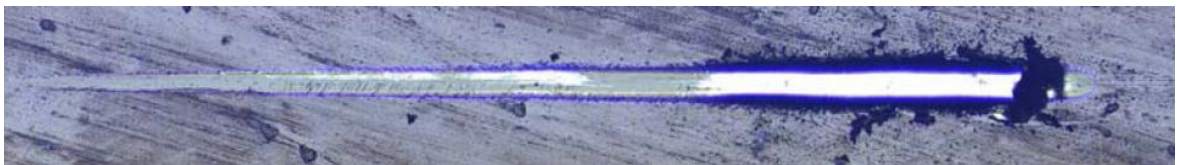
Technické parametry kamery USB 2.0:

Rozlišení:	768x582
Počet snímků za sekundu:	až 50 snímků.s <sup>-1</sup>
Snímač:	High Quality 1/2'' SONY CCD [5]



## 7.2 Princip měření

Před samotným vniknutím indentoru do materiálu indentor pouze přejede povrch snímací silou z důvodu inicializace měřícího zařízení. Po vniknutí indentoru do zkušebního vzorku normálovou silou  $F_n$  dochází k deformaci materiálu, vzniká vryp. Každý vryp je zaznamenáván panoramatickým režimem (Obr. 33) [5], který nám umožňuje detailní studii vrypu. Senzor snímá třecí sílu  $F_t$ , která je úměrná síle normálové, dále pak profil povrchu vzorku před vrypem  $P_d$  (penetration depth, tzv. prescan) a po vrypu  $R_d$  (residual depth, tzv. posts-can) z důvodu relaxace polymerního materiálu. Rozdíl hloubek profilu  $P_d - R_d$  nám umožňuje získat cenné informace o elastických a viskoelastických vlastnostech materiálu. Kritické zátěže jsou velmi přesně zjištěny prostřednictvím akustické emise  $AE$  a součinitele tření  $\mu$ .



Obr. 33. Ukázka vrypu

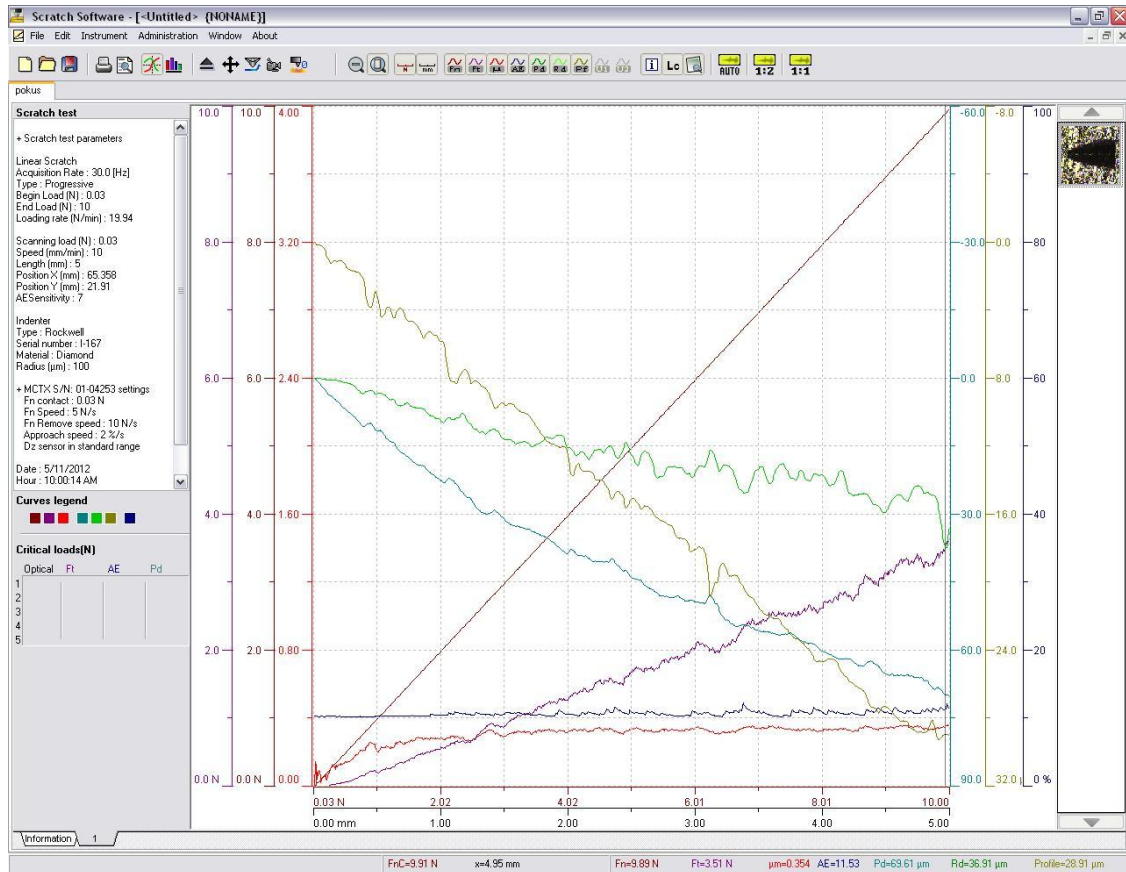
Před samotným měřením je nutno zadat jednotlivé specifikace:

Snímací síla:	30 mN
Normálová síla:	1 000, 5 000, 10 000 mN
Mirkrovrypová rychlost:	10 mm.min <sup>-1</sup>
Délka vrypu:	5 mm

Senzor akustické emise:

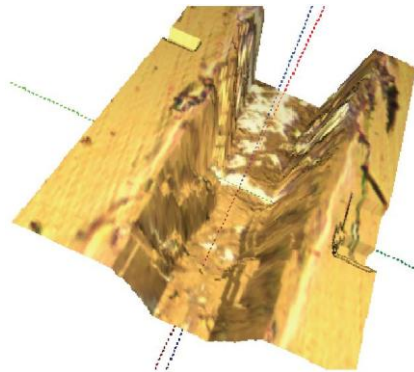
Střední frekvence:	150 kHz
Dynamický rozsah:	65 dBae
Maximální zesílení:	200 000x

Výsledky měření jsou zaznamenány a příslušným softwarem zobrazeny ve formě textové a grafické. Jednotlivé parametry zjištěné z mikrovrypového testu vyjádřené graficky můžeme pozorovat na následujícím obrázku (Obr. 34).



Obr. 34. Grafické schéma měření z programu Scratch software

Scratch software nám dále umožňuje zobrazení vrypu i ve formě 3D obrázku (Obr. 35). [5]



Obr. 35. Vryp jako 3D obrázek

## 8 POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI

Pro praktickou část byly zajištěny tyto druhy materiálů:

HDPE - 0kGy (vysokohustotní polyetylen neozářený) [6]

- Teplota tání (°C) 135
- Teplota skelného přechodu (°C) -122
- Modul pružnosti v tahu (MPa) 1 350
- Mez pevnosti v tahu (MPa) 8 ÷ 35
- Hustota (g.cm<sup>-3</sup>) 0,963

PA 66 - 0kGy (polyamid neozářený) [6]

- Teplota tání (°C) 260
- Teplota skelného přechodu (°C) 65
- Modul pružnosti v tahu (MPa) 1 100 ÷ 3 100
- Mez pevnosti v tahu (MPa) 77 ÷ 84
- Hustota (g.cm<sup>-3</sup>) 1,14

PA Duramid 30% TH7G6 (polyamid ozářený) [7]

- Teplota tání (°C) 256
- Teplota skelného přechodu (°C) 85
- Modul pružnosti v tahu (MPa) 9 800
- Mez pevnosti v tahu (MPa) 155
- Hustota (g.cm<sup>-3</sup>) 1,37

PA Duramid 50% TH7G10 (polyamid ozářený) [7]

- Teplota tání (°C) 304

- Teplota skelného přechodu (°C) 125
- Modul pružnosti v tahu (MPa) 17 500
- Mez pevnosti v tahu (MPa) 240
- Hustota ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 1,57

## PA Duramid 60% TH7G12 (polyamid ozářený) [7]

- Teplota tání (°C) 329
- Teplota skelného přechodu (°C) 148
- Modul pružnosti v tahu (MPa) 22 500
- Mez pevnosti v tahu (MPa) 285
- Hustota ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 1,68

## PBT - 0kGy (polybutylentereftalát neozářený) [8]

- Teplota tání (°C) 210
- Teplota skelného přechodu (°C) 30
- Modul pružnosti v tahu (MPa) 1 300
- Mez pevnosti v tahu (MPa) 50 ÷ 170
- Hustota ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 1,26

## PP - 0kGy (polypropylen neozářený) [9]

- Teplota tání (°C) 165
- Teplota skelného přechodu (°C) 0
- Modul pružnosti v tahu (MPa) 1 100 ÷ 1 600
- Mez pevnosti v tahu (MPa) 21 ÷ 37
- Hustota ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 0,904 ÷ 0,91

TPE - 0kGy (termoplastický elastomer neozářený) [9]

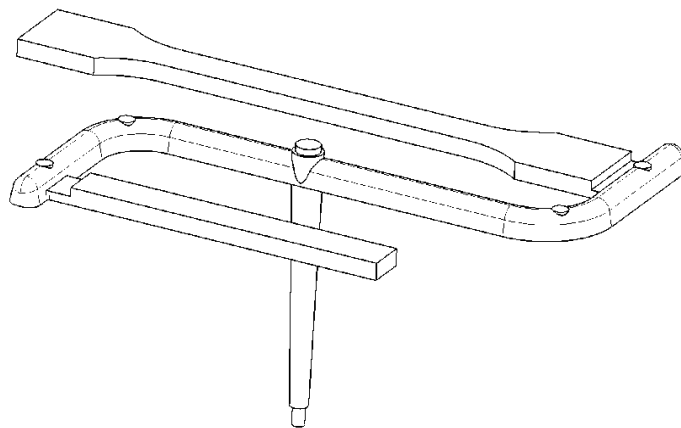
- Teplota tání (°C) 165
- Teplota skelného přechodu (°C) - 40
- Modul pružnosti v tahu (MPa)  $7 \div 230$
- Mez pevnosti v tahu (MPa)  $17,8 \div 19,5$
- Hustota ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )  $0,92 \div 0,96$

## 9 POUŽITÉ VZORKY

Zkušební vzorky (Obr. 36) pro provedení mikrovrypového testu byly vystříknuty na vstříkovacím stroji ARBURG 420 C Allrounder Advanced, jenž vidíme na obrázku (Obr. 37).

Technické údaje vstříkovacího stroje:

Uzavírací síla:	1000 kN
Maximální rozměr formy:	420x420x500 mm
Průměr šneku:	40 mm
Maximální vstříkovaný objem:	$182 \text{ cm}^3$

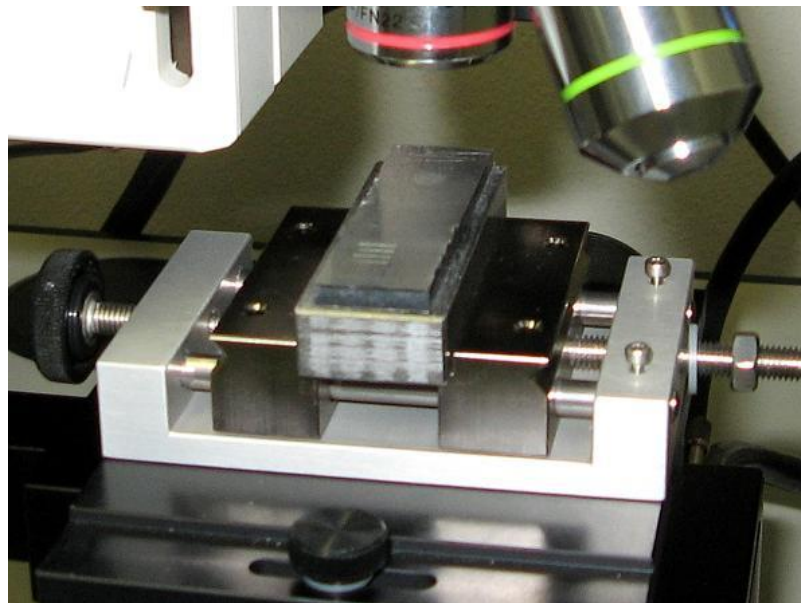


Obr. 36. Zkušební vzorky



*Obr. 37. Použitý vstřikovací stroj*

Z důvodu lepšího ustavení tenkého polymerního zkušební vzorku do svěráku byl přilepen k ocelové podložce, jak můžeme vidět na následujícím obrázku (Obr. 38).

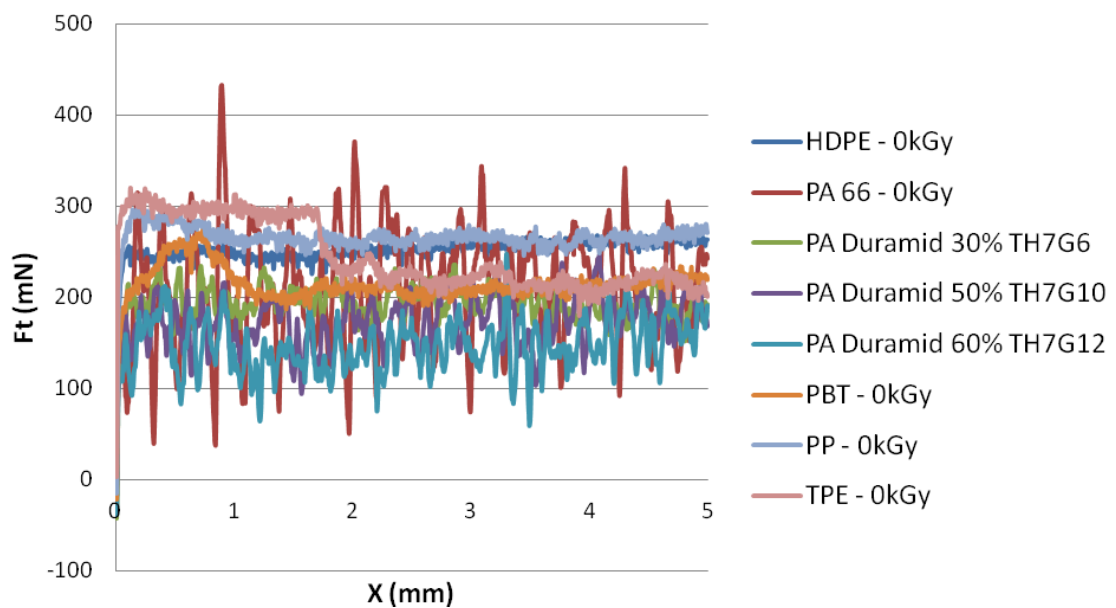


*Obr. 38. Zkušební vzorek již přilepený na ocelové podložce a ustavený ve svěráku*

## 10 VÝSLEDKY MĚŘENÍ MIKROVRYPOVÉHO TESTU

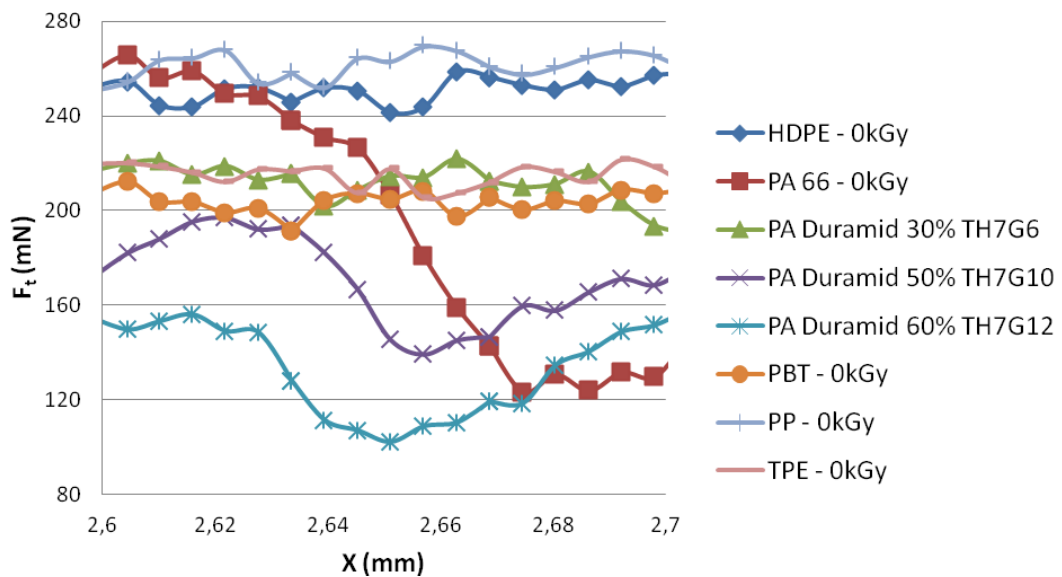
Zkouška mikrovrypového testu byla na každém zkušebním tělese provedena vždy 9x formou maticových vrypů. Výsledky měření mikrovrypového testu byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

### 10.1 Výsledky měření při aplikované zatěžující síle 1 000 mN



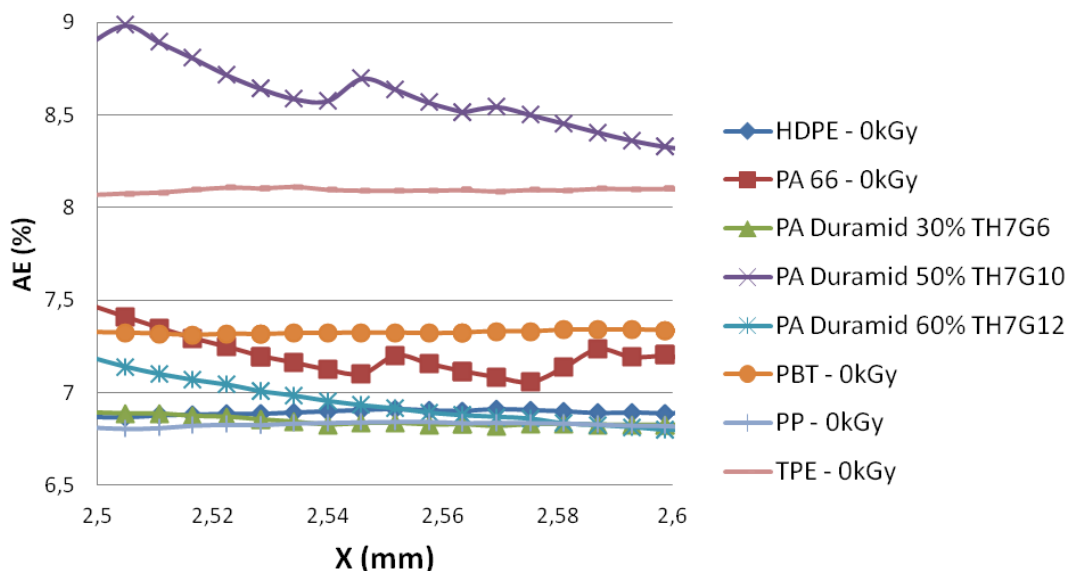
Obr. 39. Závislost  $F_t$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 1 000 mN

Měření se provádí na délce 5 mm. V tomto úseku měřicí zařízení tisíckrát zaznamená naměřenou hodnotu. Po vynesení těchto údajů do grafu nelze jednoznačně určit difference požadovaných vlastností materiálů. Tato skutečnost je znázorněna na obrázku (Obr. 39) a pro větší přehlednost vyhodnocuji měření z hodnot jednotlivých parametrů na délkovém úseku 0,1 mm.



Obr. 40. Závislost  $F_t$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 1 000 mN

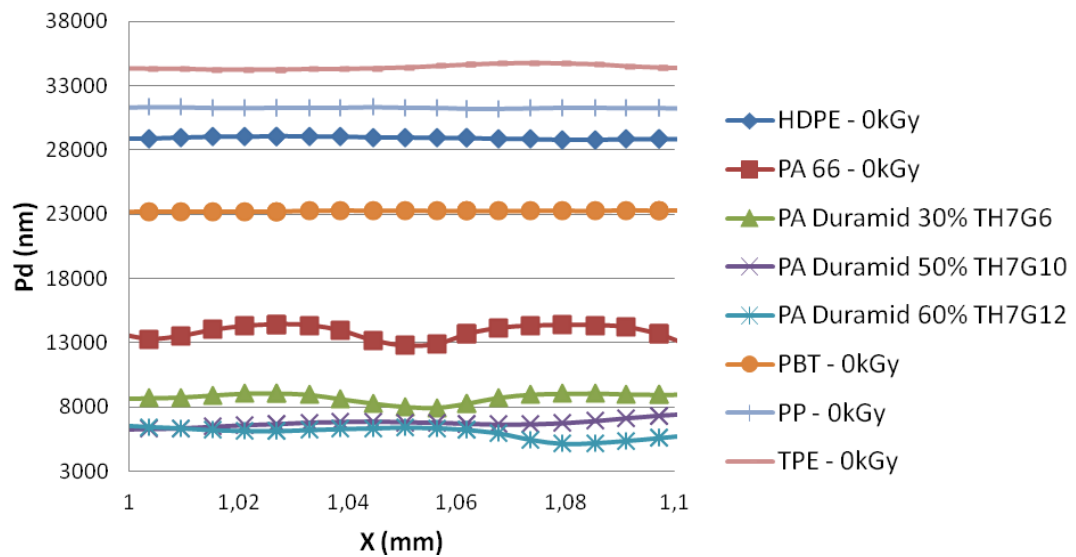
Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 1 000 mN byla nejvyšší průměrná hodnota třecí síly zjištěna při zatížení 265,54 mN u PP – 0kGy, zatímco nejmenší průměrné hodnoty bylo dosaženo při zatížení 147,70 mN u PA Duramid 60% TH7G12 (Obr. 40).



Obr. 41. Závislost AE na  $X$  při aplikované zatěžující síle 1 000 mN

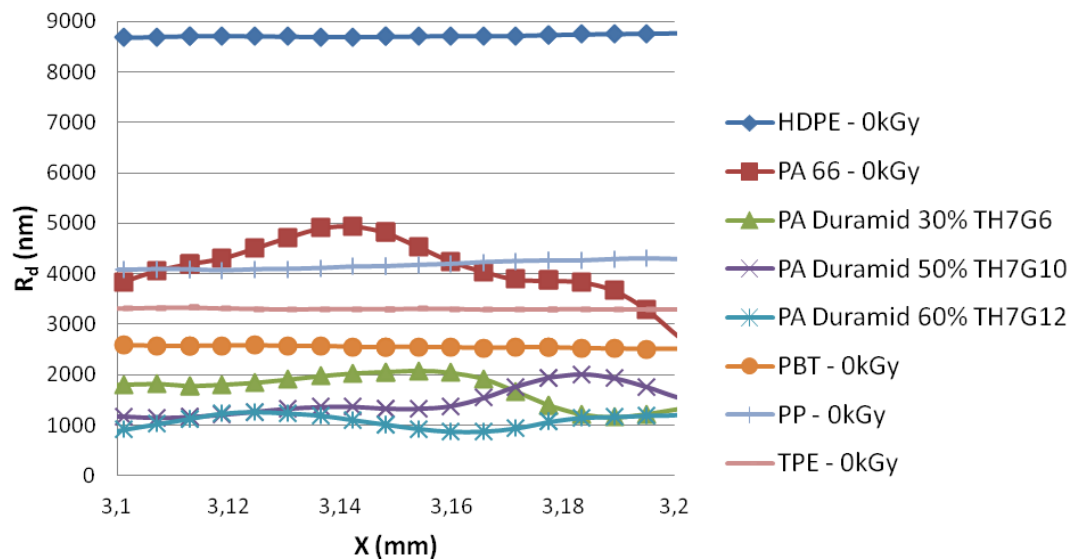
Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 1 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota akustické emise 8,18 % u PA Duramid 50% TH7G10, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 6,82 % u PA Duramid 30% TH7G6 (Obr. 41).





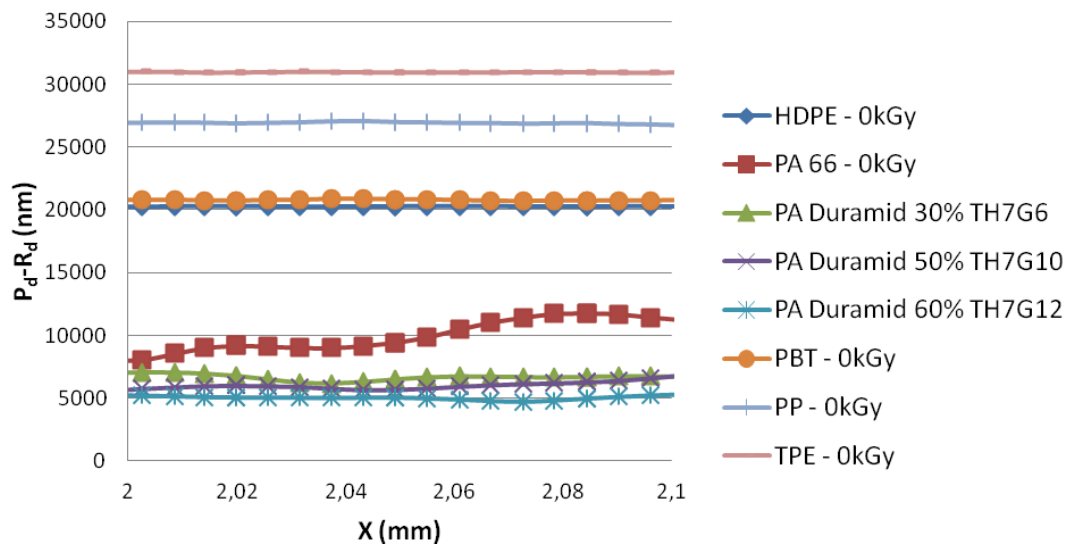
Obr. 42. Závislost  $P_d$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 1 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 1 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota hloubky profilu před vrypem 34 385,50 nm u TPE – 0kGy, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 6 896,1 nm u PA Duramid 60% TH7G12 (Obr. 42).



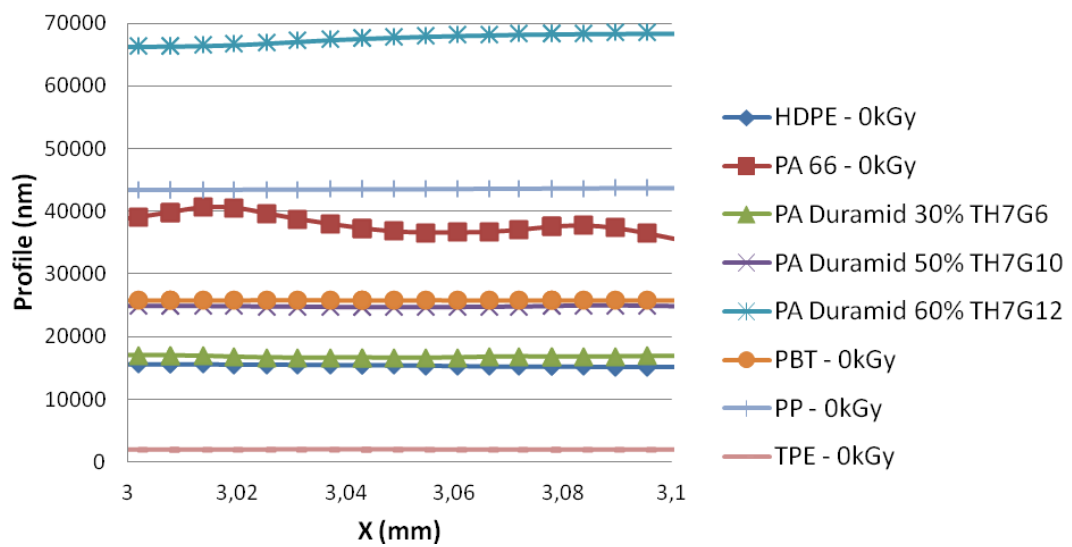
Obr. 43. Závislost  $R_d$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 1 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 1 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota hloubky profilu po vrypu 9 119,39 nm u HDPE – 0kGy, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 1 227,05 nm u PA Duramid 60% TH7G12 (Obr. 43).



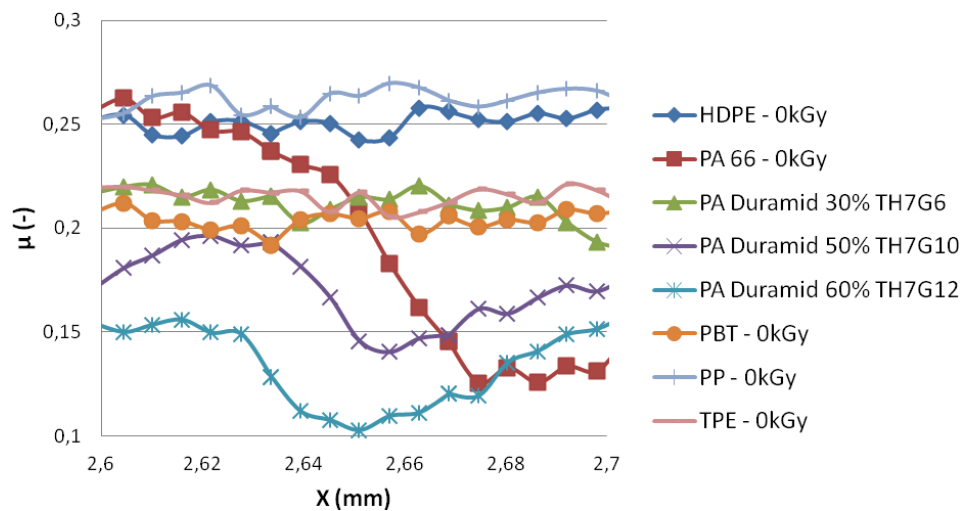
Obr. 44. Závislost  $P_d - R_d$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 1 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 1 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota rozdílu hloubek před a po vrypu 30 761,68 nm u TPE – 0kGy, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 5 669,55 nm u PA Duramid 60% TH7G12 (Obr. 44).



Obr. 45. Závislost hloubky profilu na  $X$  při aplikované zatěžující síle 1 000 mN

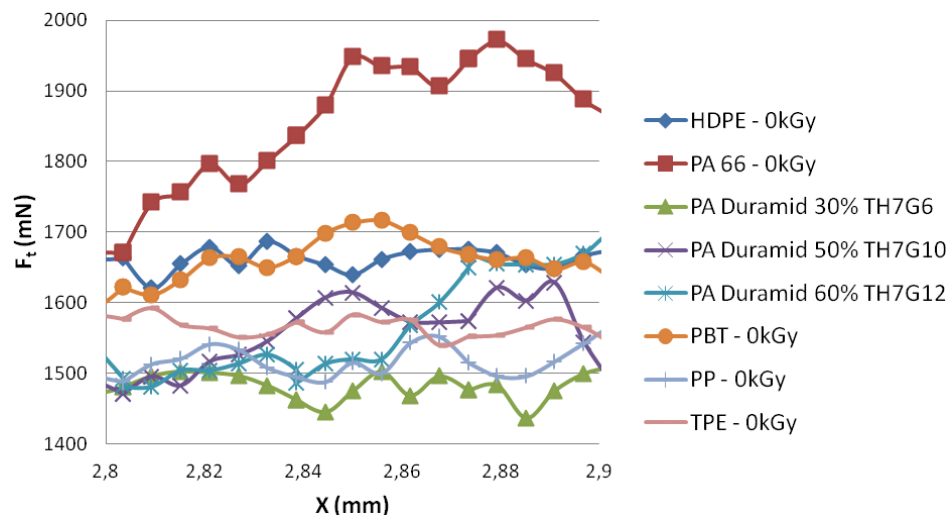
Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 1 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota hloubky profilu vrypu 53 145,85 nm u PA Duramid 60% TH7G12, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 1 515,49 nm u TPE – 0kGy (Obr. 45).



Obr. 46. Závislost  $\mu$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 1 000 mN

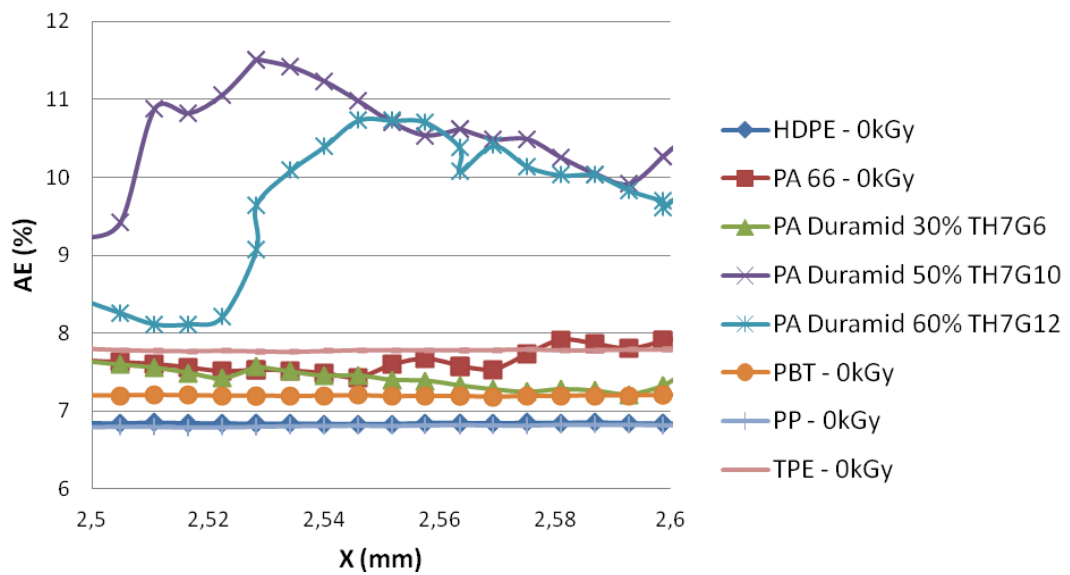
Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 1 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota součinitele tření 0,27  $\mu\text{m}$  u PP – 0kGy, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 0,15  $\mu\text{m}$  u PA Duramid 60% TH7G12 (Obr. 46).

## 10.2 Výsledky měření při aplikované zatěžující síle 5 000 mN



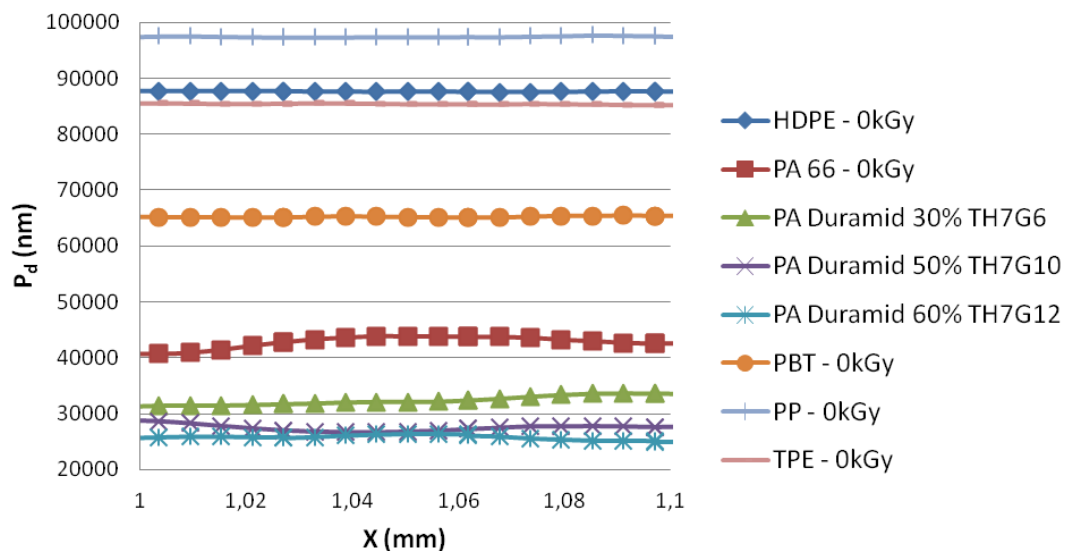
Obr. 47. Závislost  $F_t$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 5 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 5 000 mN byla nejvyšší průměrná hodnota naměřené třecí síly zjištěna při zatížení 1 732,35 mN u PA 66 – 0kGy, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 1508,16 mN u PA Duramid 30% TH7G6 (Obr. 47).



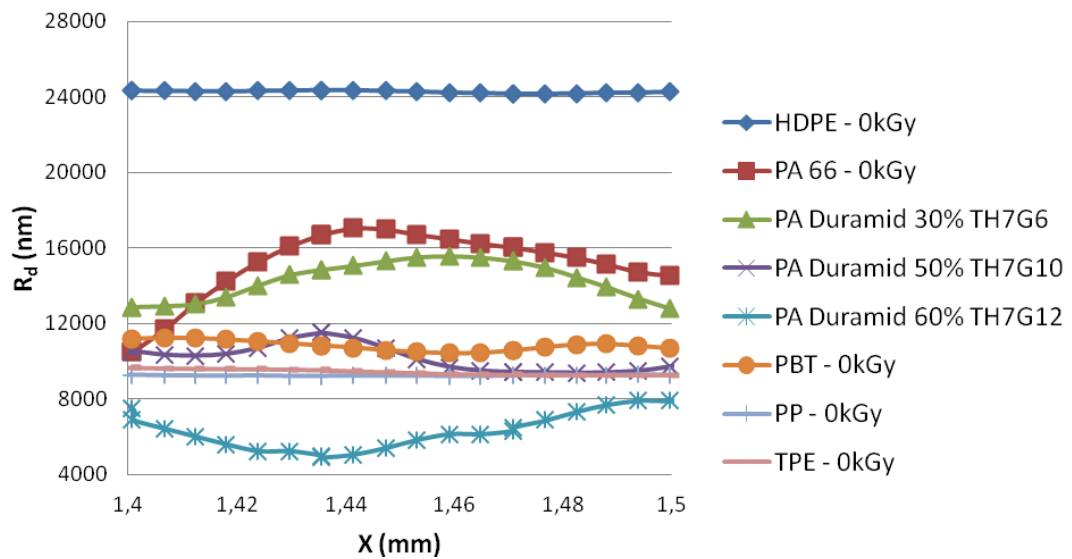
Obr. 48. Závislost AE na  $X$  při aplikované zatěžující síle 5 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 5 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota akustické emise 9,70 % u PA Duramid 50% TH7G10, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 6,81 % u PP - 0kGy (Obr. 48).



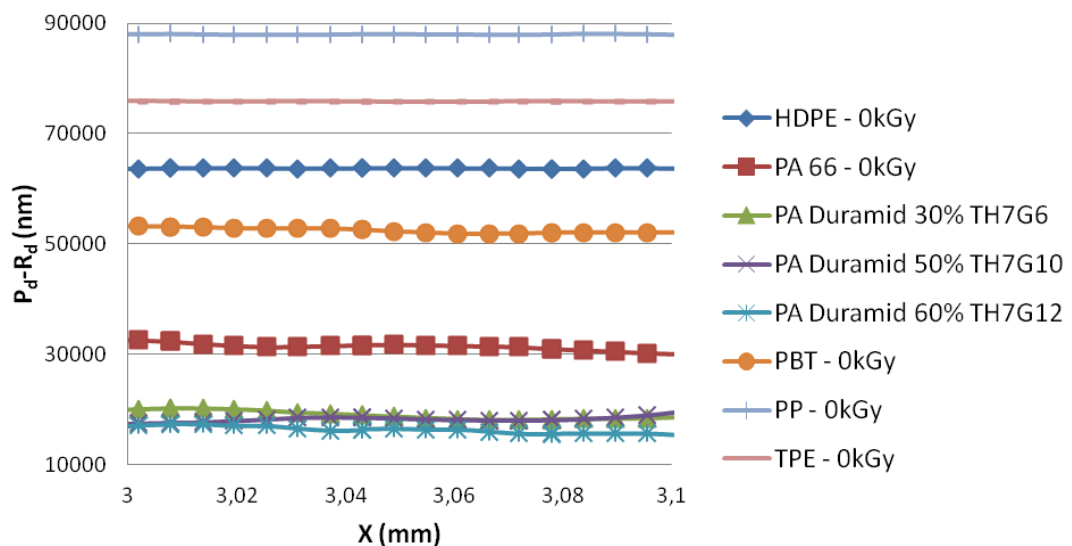
Obr. 49. Závislost  $P_d$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 5 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 5 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota hloubky profilu před vrypem 97 304,71 nm u PP - 0kGy, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 25 133,48 nm u PA Duramid 60% TH7G12 (Obr. 49).



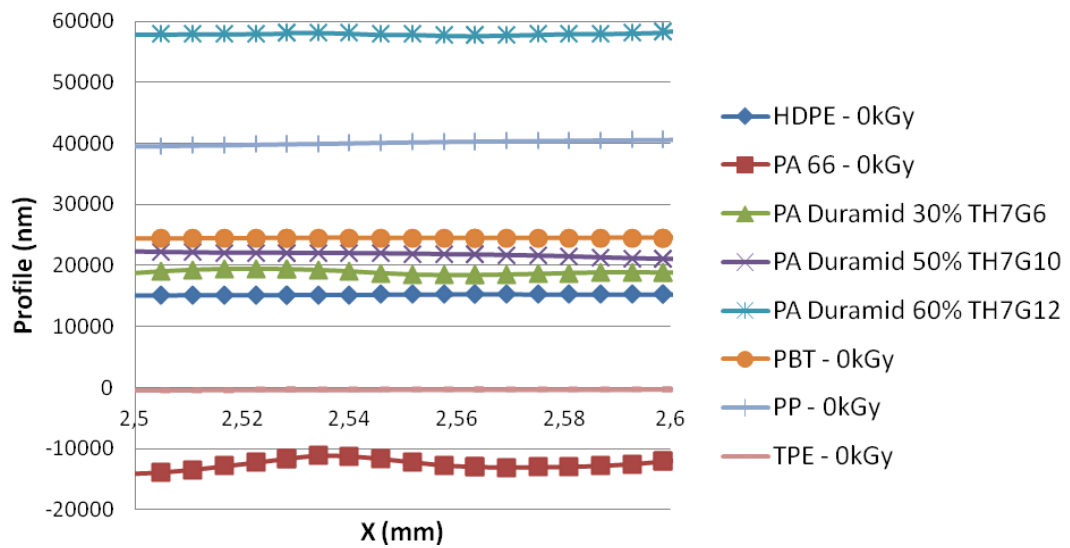
Obr. 50. Závislost  $R_d$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 5 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 5 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota hloubky profilu po vrypu 24 904,07 nm u HDPE – 0kGy, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 7 853,74 nm u PA Duramid 60% TH7G12 (Obr. 50).



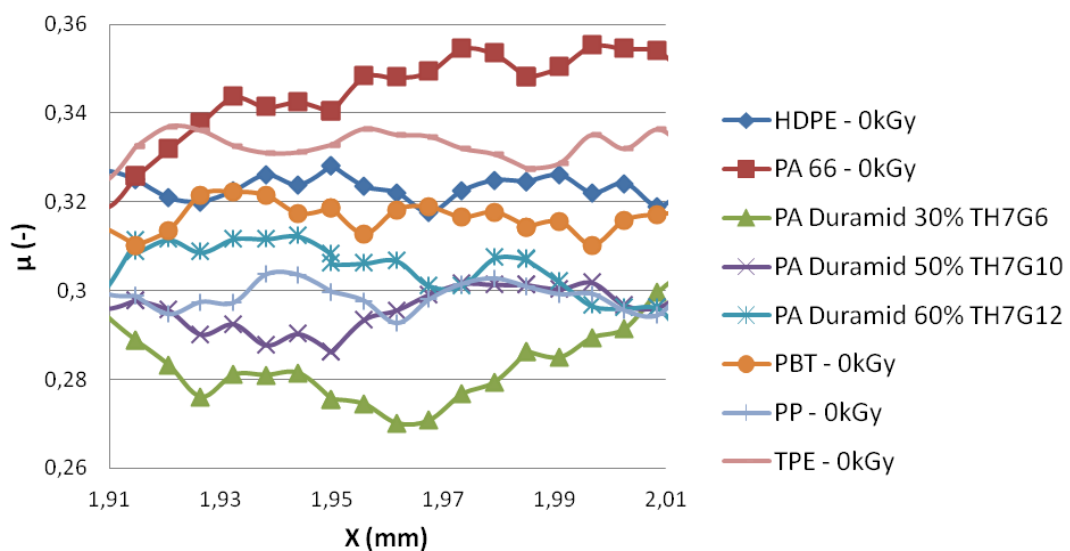
Obr. 51. Závislost  $P_d - R_d$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 5 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 5 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota rozdílu hloubek před a po vrypu 87 546,99 nm u PP - 0kGy, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 17 279,74 nm u PA Duramid 60% TH7G12 (Obr. 51).



Obr. 52. Závislost hloubky profilu na  $X$  při aplikované zatěžující síle 5 000 mN

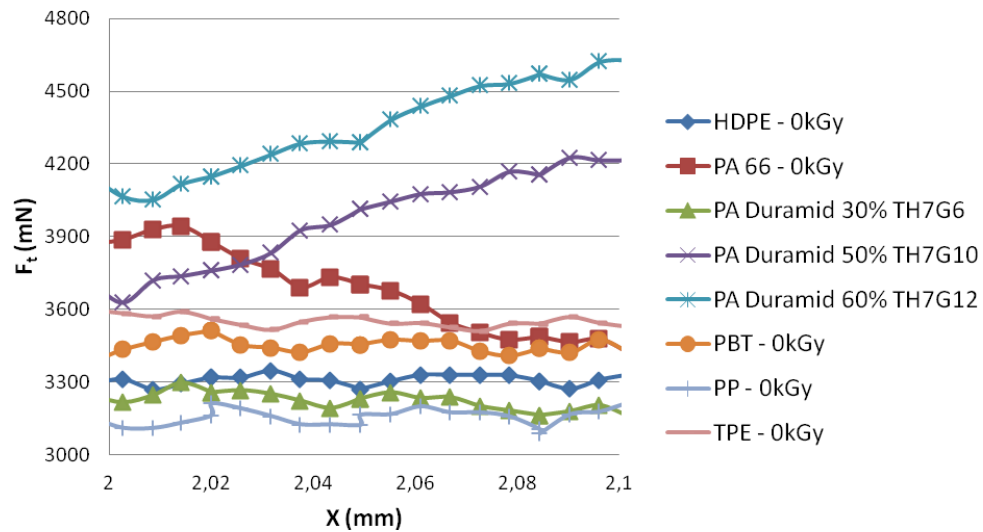
Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 5 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota profilu vrypu 52 067,18 nm u PA Duramid 60% TH7G12, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla - 17 732,97 nm u PA 66 - 0kGy (Obr. 52).



Obr. 53. Závislost  $\mu$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 5 000 mN

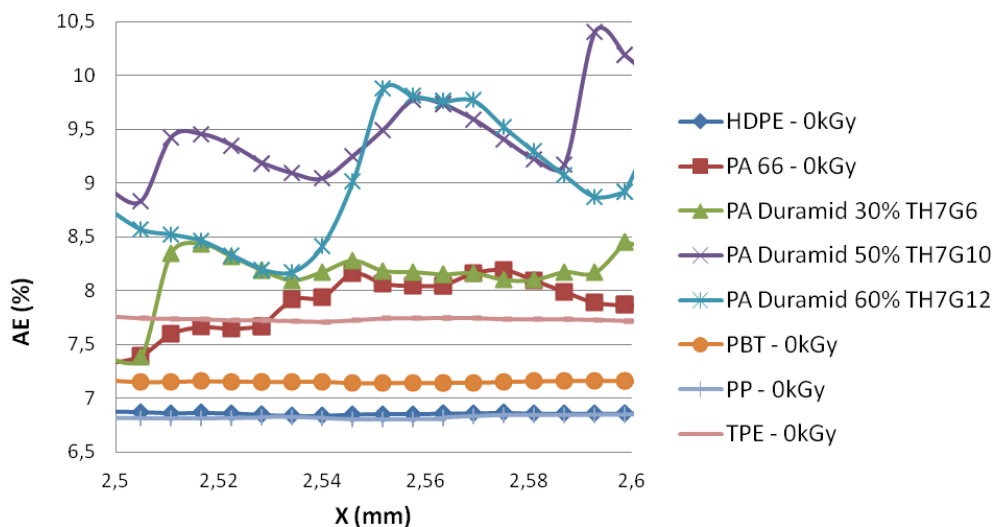
Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 5 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota součinitele tření 0,35 u PA 66 – 0kGy, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 0,3 u PA Duramid 30% TH7G6 (Obr. 53).

### 10.3 Výsledky měření při aplikované zatěžující síle 10 000 mN



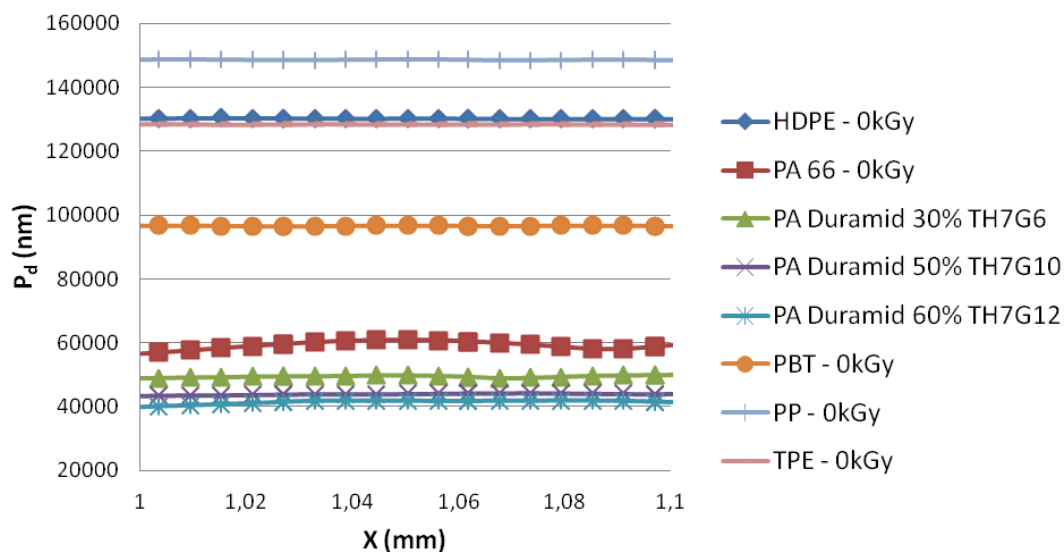
Obr. 54. Závislost  $F_t$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 10 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 10 000 mN byla nejvyšší průměrná hodnota naměřené třecí síly zjištěna při zatížení 3 879,59 mN u PA Duramid 60% TH7G12, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 3 135,46 mN u PP - 0kGy (Obr. 54).



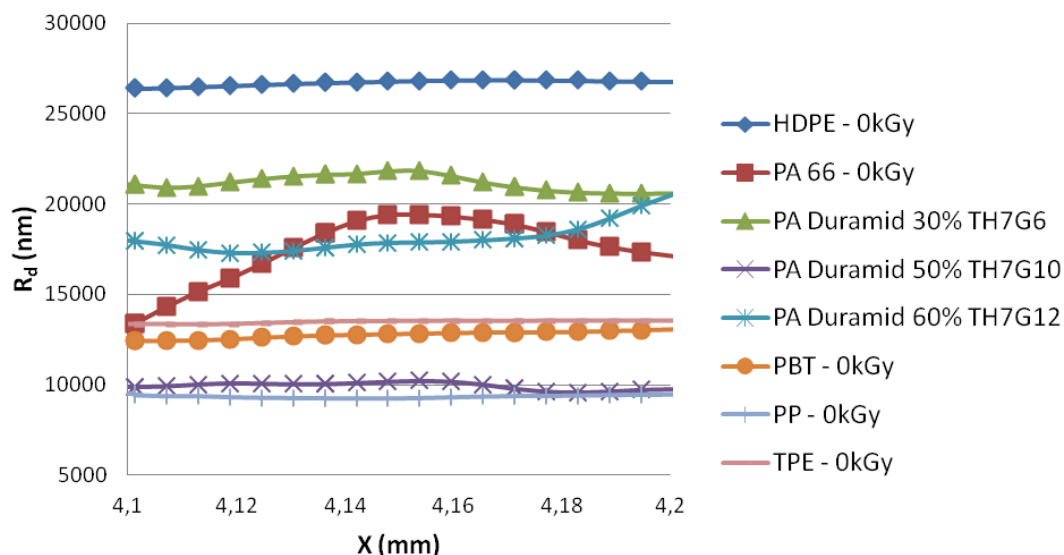
Obr. 55. Závislost AE na  $X$  při aplikované zatěžující síle 10 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 10 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota akustické emise 9,97 % u PA Duramid 50% TH7G10, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 6,84 % u PP - 0kGy (Obr. 55).



Obr. 56. Závislost  $P_d$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 10 000 mN

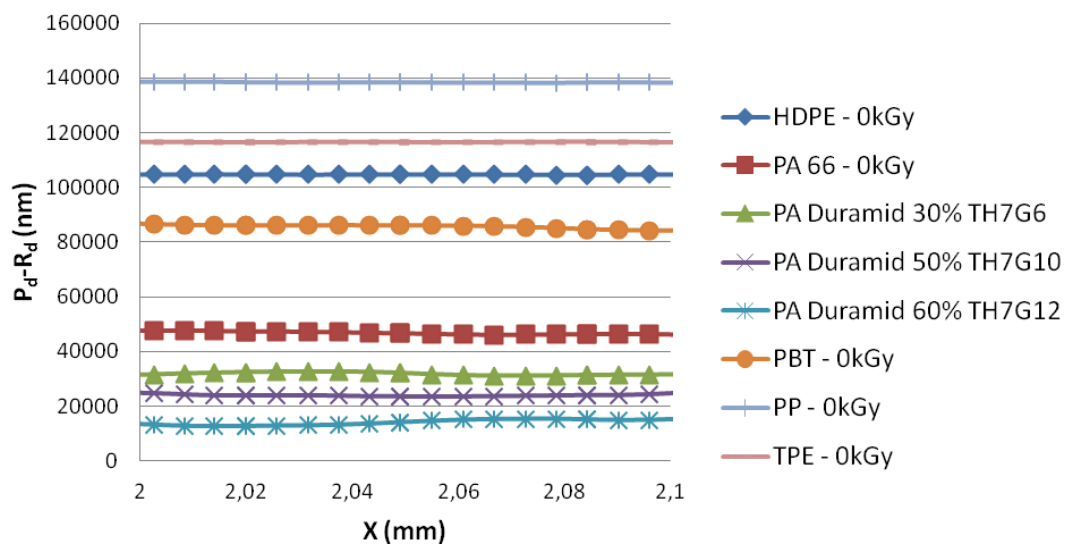
Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 10 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota hloubky profilu před vrypem 147 869 nm u PP - 0kGy, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 39 743,49 nm u PA Duramid 60% TH7G12 (Obr. 56).



Obr. 57. Závislost  $R_d$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 10 000 mN

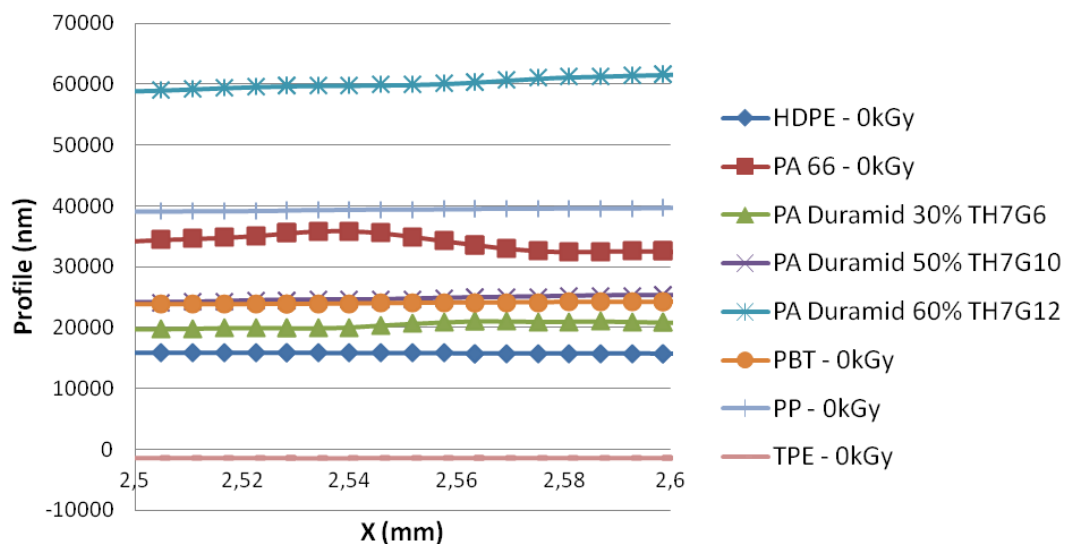
Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 10 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota hloubky profilu po vrypu 27 101,12 nm u HDPE – 0kGy, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 10 315,44 nm u PP - 0kGy (Obr. 57).





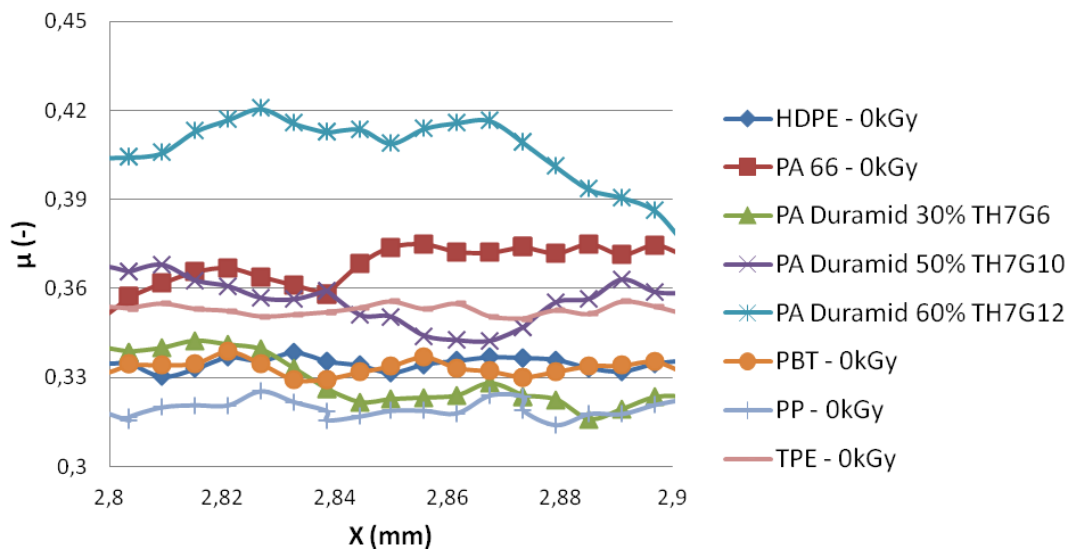
Obr. 58. Závislost  $P_d - R_d$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 10 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 10 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota rozdílu hloubek před a po vrypu 137 553,60 nm u PP - 0kGy, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 21,361,60 nm u PA Duramid 60% TH7G12 (Obr. 58).



Obr. 59. Závislost hloubky profilu na  $X$  při aplikované zatěžující síle 10 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 10 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota profilu vrypu 52 482,52nm u PA Duramid 60% TH7G12, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla – 1 403 nm u TPE - 0kGy (Obr. 59).



Obr. 60. Závislost  $\mu$  na  $X$  při aplikované zatěžující síle 10 000 mN

Při mikrovrypové zkoušce u aplikovaného zatížení 10 000 mN byla zjištěna nejvyšší průměrná hodnota součinitele tření 0,39 u PA Duramid 60% TH7G12, zatímco nejmenší průměrná hodnota byla 0,31 u PP - 0kGy (Obr. 60).

## 10.4 Diskuze výsledků

Pro praktickou část bakalářské práce byly použity vybrané typy polymerních materiálů (HDPE - 0kGy, PA 66 - 0kGy, PA Duramid 30% TH7G6, PA Duramid 50% TH7G10, PA Duramid 60% TH7G12, PBT - 0kGy, PP - 0kGy, TPE - 0kGy), u kterých byly měřeny třecí (tribologické) vlastnosti. Zkoušky třecích vlastností byly realizovány na zařízení Micro Combi tester při aplikovaném zatížení 1 000 mN, 5 000 mN a 10 000 mN. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny a jsou přehledně uvedeny v tabulce (Tab. 1). V tabulce jsou uvedeny polymerní materiály vykazující extrémy, tj. maxima a minima jednotlivých požadovaných parametrů vzešlých z měření mikrovrypového testu v závislosti na měnícím se aplikovaném zatížení.

Z naměřených výsledků vyplynulo, že pro aplikované zatížení 1 000 mN byla nejvyšší hodnota třecí síly zjištěna u PP - 0kGy a nejmenší hodnota byla zjištěna u PA Duramid 60% TH7G12. Ten také vykázal nejnižší naměřené hodnoty u ostatních sledovaných parametrů kromě hloubky profilu. Z těchto výsledků plyne, že PA Duramid 60% TH7G12 měl při aplikovaném zatížení 1 000 mN nejlepší třecí vlastnosti ze všech sledovaných materiálů. Naopak nejhorších třecích vlastností bylo dosaženo u PP - 0kGy a TPE - 0kGy.

Při aplikaci zatížení 5 000 mN bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty třecí síly bylo dosaženo u PA 66 - 0kGy, naopak nejmenší hodnota byla zjištěna u PA Duramid 30% TH7G6. U akustické emise bylo nejlepších výsledků dosaženo u PA Duramid 30% TH7G6, nejmenší hodnoty pak byly naměřeny u PP - 0kGy. U hloubek profilu vykázaly nejvyšší hodnoty polyolefiny (PP - 0kGy, HDPE - 0kGy), nejmenší hodnoty byly zaznamenány u PA Duramid 60% TH7G12. U součinitele tření vykázal nejmenší hodnoty materiál PA 66 - 0kGy, nejvyšší hodnoty byly zjištěny u materiálu PA Duramid 30% TH7G6. Jako velmi zajímavý se jeví rozdíl hloubek před a po provedeném mikrovrypovém testu. Docházelo zde k relaxaci polymeru po aplikovaném zatížení, z čehož lze získat řadu důležitých informací (podíl amorfni a semikrystalické fáze, úroveň vnitřních pnutí apod). Zde vykázal nejmenší hodnoty materiál PA Duramid 60% TH7G12, naopak největší podíl relaxace byl zjištěn u PP - 0kGy.

Při aplikaci zatížení 10 000 mN bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty třecí síly vykazoval PA Duramid 60% TH7G12, zatímco nejmenší hodnotu vykazoval materiál PP - 0kGy. U parametrů jako akustická emise, hloubka profilu před vrypem, rozdíl hloubek profilu před a

po vrypu byly naměřené výsledky shodné s předchozím aplikovaným zatížením. Nejvyšší hodnotu hloubky profilu po vrypu vykazoval HDPE - 0kGy, zatímco PP - 0kGy se projevil hodnotou nejnižší. Nejvyšší součinitel tření byl naměřen u PA Duramid 60% TH7G12 a nejnižší byl zaznamenán u PP - 0kGy.

Tab. 1. Porovnání výsledků mikrovrypového testu

		Aplikované zatížení		
		1 000 mN	5 000 mN	10 000 mN
Třecí síla	Max	PP - 0kGy	PA 66 - 0kGy	PA Duramid 60% TH7G12
	Min	PA Duramid 60% TH7G12	PA Duramid 30% TH7G6	PP - 0kGy
Akustická emise	Max	PA Duramid 50% TH7G10	PA Duramid 50% TH7G10	PA Duramid 50% TH7G10
	Min	PA Duramid 30% TH7G6	PP - 0kGy	PP - 0kGy
Hloubka profilu před vrypem	Max	TPE - 0kGy	PP - 0kGy	PP - 0kGy
	Min	PA Duramid 60% TH7G12	PA Duramid 60% TH7G12	PA Duramid 60% TH7G12
Hloubka profilu po vrypu	Max	HDPE - 0kGy	HDPE - 0kGy	HDPE - 0kGy
	Min	PA Duramid 60% TH7G12	PA Duramid 60% TH7G12	PP - 0kGy
Rozdíl hloubek profilu před a po vrypu	Max	TPE - 0kGy	PP - 0kGy	PP - 0kGy
	Min	PA Duramid 60% TH7G12	PA Duramid 60% TH7G12	PA Duramid 60% TH7G12
Hloubka profilu	Max	PA Duramid 60% TH7G12	PA Duramid 60% TH7G12	PA Duramid 60% TH7G12
	Min	TPE - 0kGy	PA 66 - 0kGy	TPE - 0kGy
Součinitel tření	Max	PP - 0kGy	PA 66 - 0kGy	PA Duramid 60% TH7G12
	Min	PA Duramid 60% TH7G12	PA Duramid 30% TH7G6	PP - 0kGy

## ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce se zabývá studiem třecích (tribologických) vlastností vybraných polymerních materiálů.

V teoretické části jsem se zabýval studiem, popisem a objasněním oblasti tribologie. Dále jsou zde v jednotlivých kapitolách zpracovány informace týkající se tohoto vědního oboru, od historie počátku tření, popisu třecích a kluzných materiálů, přes samotnou problematiku tření a opotřebení až k mazání. Zmínil jsem se taktéž o ekonomickém významu tribologie.

Pro praktickou část bakalářské práce byly použity vybrané typy polymerních materiálů (HDPE - 0kGy, PA 66 - 0kGy, PA Duramid 30% TH7G6, PA Duramid 50% TH7G10, PA Duramid 60% TH7G12, PBT - 0kGy, PP - 0kGy, TPE - 0kGy), u kterých byly měřeny třecí (tribologické) vlastnosti jako jsou třecí síla, akustická emise, hloubka profilu před vrypem, hloubka profilu po vrypu, rozdíl hloubek profilu před a po vrypu, hloubka profilu či součinitel tření v závislosti na délkovém intervalu vrypu. Zkoušky třecích vlastností byly realizovány na zařízení Micro Combi Tester při aplikovaném zatížení 1 000 mN, 5 000 mN a 10 000 mN.

Z naměřených výsledků vyplynulo, že nejlepších třecích vlastností bylo dosaženo u materiálu PA Duramid 60% TH7G12, naopak nejhorších vlastností bylo dosaženo u PP - 0kGy. Rozdílné chování sledovaných polymerních materiálů bylo způsobeno odlišnými vlastnostmi a jejich strukturou.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Vocel, M., Dufek, V. *Tření a opotřebení strojních součástí*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. 378 s.
- [2] Blaškovič, P., Balla, J., Ozimko, M. *Tribológiá*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990. 362 s. ISBN 80-05-00 633-0.
- [3] *Speciální technologie a měření: tření* [online]. [cit. 2012-01-28]. Dostupný z WWW:  
[http://www.kod.vslib.cz/info\\_predmety/STE/ste.htm](http://www.kod.vslib.cz/info_predmety/STE/ste.htm)
- [4] Pošta, J. Veselý, P., Dvořák, M. *Degradace strojních součástí* [online]. [cit. 2012-02-10]. Dostupný z WWW:  
<http://degradace.tf.czu.cz/>
- [5] *CSM Instruments SA* [online]. [cit. 2012-04-14]. Dostupný z WWW:  
<http://www.csm-instruments.com/>
- [6] *LPM s.r.o., Technické díly z plastů* [online]. [cit. 2012-03-20]. Dostupný z WWW:  
<http://www.lpm.cz/>
- [7] *Interní materiálové listy, Ústav výrobního inženýrství, UTB ve Zlíně*. [cit. 2012-04-16].
- [8] *Plastic Technologie Service Marketing & Vertriebs GmbH* [online]. [cit. 2012-03-20]. Dostupný z WWW:  
<http://www.sintef.no/project/ffs/dokumenter/seminar-juni2010/PTS2-FFS-2010.pdf>
- [9] Běhálek, L. *Přehled základních termoplastů, reaktoplastů a termoplastických elastomerů* [online]. [cit. 2012-03-20]. Dostupný z WWW:  
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/vip/VIP%20PLASTY.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/VIP%20PLASTY.pdf)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$O_I$	[-]	Bod.
$AE$	[%]	Akustická emise.
$f_\beta$	[-]	Součinitel tření opásáním.
$F$	[N]	Zatěžující síla.
$F_0$	[N]	Napínací síla před tělesem.
$F_t$	[N]	Třecí síla.
$F_{ta}$	[N]	Třecí síla.
$F_{tc}$	[N]	Třecí síla.
$F_T$	[N]	Třecí síla.
$F_n$	[N]	Normálová síla.
$F_N$	[N]	Normálová síla.
$F'_N$	[N]	Normálová síla.
$F_S$	[N]	Síla potřebná k uvedení tělesa ze stavu klidu do pohybu.
$h$	[-]	Hodnota opotřebení.
$h_{krit}$	[-]	Kritická hodnota opotřebení.
$h_p$	[-]	provozní hodnota opotřebení.
$h_z$	[-]	Záběhová hodnota opotřebení.
$HV$	[-]	Tvrdost podle Vickerse.
$M$	[N.mm]	Moment.
$M_T$	[N.mm]	Třecí moment.
$V_T$	[-]	Směr pohybu tělesa.
$P_d$	[nm]	Hloubka před vrypem.
$P_d - R_d$	[nm]	Rozdíl hloubek před a po vrypu.
$R$	[mm]	Rameno třecího momentu.

$R_d$	[nm]	Hloubka po vrypu.
$S_C$	[mm <sup>2</sup> ]	Obrysová plocha styku.
$S_R$	[mm <sup>2</sup> ]	Skutečná plocha styku.
$S_{CA}$	[mm <sup>2</sup> ]	Styčná plocha.
$S_{CC}$	[mm <sup>2</sup> ]	Styčná plocha.
$t$	[s]	Čas.
$t_p$	[s]	Doba provozu.
$t_z$	[s]	Doba záběhu.
$t_{\dot{z}}$	[s]	Celkový čas = havarijní situace.
$v$	[-]	Směr pohybu částic.
$X$	[mm]	Měřená délka.
$\alpha$	[°]	Úhel dopadu částic.
$\alpha_s$	[°]	Úhel sklonu.
$\beta$	[°]	Úhel opásání.
$\mu$	[-]	Součinitel tření.
$\mu_s$	[-]	Součinitel tření za klidu.
$\omega$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost.
$\zeta$	[-]	Součinitel valivého tření.
ČSN		Česká technická norma.
HDPE - 0kGy		Vysokohustotní polyetylen neozářený.
PA		Polyamid.
PA 66 - 0kGy		Polyamid neozářený.
PA Duramid 30% TH7G6		Polyamid ozářený.
PA Duramid 50% TH7G10		Polyamid ozářený.
PA Duramid 60% TH7G12		Polyamid ozářený.



---

PBT - 0kGy	Polybutylentereftalát neozářený.
PE	Polyethylen.
POM	Polyoxymethylen.
PP - 0kGy	Polypropylen neozářený.
PTFE	Polytetrafluorethylen.
PUR	Polyuretan.
$\text{SiO}_2$	Oxid křemičitý.
TPE - 0kGy	Termoplastický elastomer neozářený.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Souvislost tribologie se základními vědními obory: A – tribochemie, B – tribofyzika, C - tribotechnika .....	13
Obr. 2. Vztah tribologie, vědních oborů a výroby .....	14
Obr. 3. Základní schéma tření a opotřebení těles.....	18
Obr. 4. Tření formou třecí síly $F_T = \mu F_N$ .....	19
Obr. 5. Tření formou třecího momentu $M_T = FR$ , $M_T = F'_N \xi$ .....	19
Obr. 6. Schematické znázornění geometrie povrchu: 1 – ideálně rovný povrch, 2 – odchylky tvaru a polohy, 3 – vlnitost povrchu, 4 – mikroskopické drsnosti, 5 – submikroskopické nerovnosti.....	20
Obr. 7. Schematické znázornění geometrie povrchu v plošném znázornění rozdílu mezi obrysovou plochou styku $S_C$ a skutečnou plochou styku $S_R$ .....	20
Obr. 8. Znázornění zákonů tření – síla tření je úměrná zatížení .....	22
Obr. 9. Znázornění zákonů tření – třecí síla nezávisí na velikosti obrysových ploch.....	23
Obr. 10. Znázornění zákonů tření – sklonný tribometr k určení součinitele tření jako $tg \alpha_s$ .....	23
Obr. 11. Valení válce po rovině – výpočtové relace .....	24
Obr. 12. Znázornění tření opásáním .....	25
Obr. 13. 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, $t_z$ – celkový čas = havarijní situace.....	26
Obr. 14. Mechanismus porušování povrchové vrstvy a tvorba částic adhezivního opotřebení: 1 – tvorba skluzových pásů, 2 – začátek porušování, 3 – tvorba výstupků na povrchu, 4 - formování částic opotřebení vícenásobným třením po sobě.....	28
Obr. 15. Adhezivní opotřebení - ojnicí pánev.....	28
Obr. 16. Základní modely abrazivního opotřebení: a – interakce dvou těles, b - interakce třech těles .....	29
Obr. 17. Abrazivní opotřebení - píst spalovacího motoru .....	30
Obr. 18. Abrazivní opotřebení - uhlík elektromotoru .....	30

Obr. 19. Poměry při dopadu částice na exponovaný povrch: a – při šikmém dopadu, b – téměř rovnoběžně s povrchem, c – kolmo k povrchu.....	31
Obr. 20. Grafické vyjádření závislosti síly na době styku při dopadu částice písku na povrch kalené oceli a pryže .....	32
Obr. 21. Erozivní opotřebení – deska šoupátka .....	32
Obr. 22. Mechanismus únavového opotřebení: a – cyklický pohyb, b – vratný skluz, 1 – zárodek částic opotřebení z povrchové či podpovrchové trhliny .....	33
Obr. 23. Únavové opotřebení - kroužek ložiska .....	34
Obr. 24. Únavové opotřebení – ozubené kolo .....	34
Obr. 25. Mechanismus kavitačního opotřebení: A – proud tekutiny, B – povrch tuhého tělesa .....	35
Obr. 26. Kavitační opotřebení – lopatkové kolo.....	35
Obr. 27. Schéma vibračního opotřebení .....	36
Obr. 28. Vibrační opotřebení – kříž.....	37
Obr. 29. Oblasti mazání ve Stribeckově diagramu .....	38
Obr. 30. Rozdělení maziv .....	39
Obr. 31. Měřicí zařízení Micro Combi Tester .....	44
Obr. 32. Indentor.....	45
Obr. 33. Ukázka vrypu.....	46
Obr. 34. Grafické schéma měření z programu Scratch software .....	47
Obr. 35. Vryp jako 3D obrázek.....	47
Obr. 36. Zkušební vzorky .....	50
Obr. 37. Použitý vstřikovací stroj .....	51
Obr. 38. Zkušební vzorek již přilepený na ocelové podložce a ustavený ve svěráku.....	51
Obr. 39. Závislost $F_t$ na X při aplikované zatěžující síle 1 000 mN.....	52
Obr. 40. Závislost $F_t$ na X při aplikované zatěžující síle 1 000 mN.....	53
Obr. 41. Závislost AE na X při aplikované zatěžující síle 1 000 mN.....	53
Obr. 42. Závislost $P_d$ na X při aplikované zatěžující síle 1 000 mN .....	54
Obr. 43. Závislost $R_d$ na X při aplikované zatěžující síle 1 000 mN.....	54
Obr. 44. Závislost $P_d - R_d$ na X při aplikované zatěžující síle 1 000 mN.....	55
Obr. 45. Závislost hloubky profilu na X při aplikované zatěžující síle 1 000 mN.....	55
Obr. 46. Závislost $\mu$ na X při aplikované zatěžující síle 1 000 mN.....	56
Obr. 47. Závislost $F_t$ na X při aplikované zatěžující síle 5 000 mN.....	56

Obr. 48. Závislost AE na X při aplikované zatěžující síle 5 000 mN.....	57
Obr. 49. Závislost $P_d$ na X při aplikované zatěžující síle 5 000 mN .....	57
Obr. 50. Závislost $R_d$ na X při aplikované zatěžující síle 5 000 mN .....	58
Obr. 51. Závislost $P_d - R_d$ na X při aplikované zatěžující síle 5 000 mN .....	58
Obr. 52. Závislost hloubky profilu na X při aplikované zatěžující síle 5 000 mN .....	59
Obr. 53. Závislost $\mu$ na X při aplikované zatěžující síle 5 000 mN.....	59
Obr. 54. Závislost $F_t$ na X při aplikované zatěžující síle 10 000 mN .....	60
Obr. 55. Závislost AE na X při aplikované zatěžující síle 10 000 mN.....	60
Obr. 56. Závislost $P_d$ na X při aplikované zatěžující síle 10 000 mN .....	61
Obr. 57. Závislost $R_d$ na X při aplikované zatěžující síle 10 000 mN .....	61
Obr. 58. Závislost $P_d - R_d$ na X při aplikované zatěžující síle 10 000 mN .....	62
Obr. 59. Závislost hloubky profilu na X při aplikované zatěžující síle 10 000 mN .....	62
Obr. 60. Závislost $\mu$ na X při aplikované zatěžující síle 10 000 mN.....	63

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Porovnání výsledků mikrovrypového testu .....	65
---	----