

Tribologické vlastnosti modifikovaných polymerů

Jaroslav Novotný

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: **Jaroslav NOVOTNÝ**

Osobní číslo: **T09451**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Tribologické vlastnosti modifikovaných polymerů**

Zásady pro vypracování:

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

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. David Mañas, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

13. února 2012

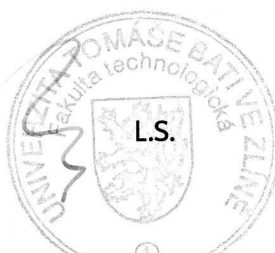
Termín odevzdání bakalářské práce:

25. května 2012

Ve Zlíně dne 13. února 2012



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno:Novotný' Jaroslav.....

Obor:PI.....

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 ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ 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 Zlíně25.5.2012.....

.....Jaroslav Novotný'.....

¹⁾ 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 nevydávalečně 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.

²⁾ 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).

³⁾ 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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1

ABSTRAKT

Bakalářská práce s názvem Tribologické vlastnosti modifikovaných polymerů se zabývá tribologií a to především třením, mazáním a opotřebením. Cílem praktické části bylo měření třecích vlastností modifikovaného polypropylenu. Vzorky byly připraveny z neplněného polypropylenu a následně ozářeny dávkami záření 0, 33 a 66 a 99 kGy. Tribologické vlastnosti byly měřeny mikrovrypovým testem.

Klíčová slova: tribologie, tření, opotřebením, mazání, polypropylen, mikrovrypový test

ABSTRACT

Bachelor thesis named tribological properties of modified polymers deals with tribology especially with friction, lubrication and wear. The goal of practical part was modified polypropylene friction properties measurement. Specimens were prepared of non – filled polypropylene and subsequently irradiated by doses of 0, 33, 66, 99 kGy. Tribological properties were measured by micro scratch test.

Keywords: tribology, friction, wear, lubrication, polypropylene, micro scratch test

Děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D., za odborné vedení bakalářské práce, poskytování rad a materiálních podkladů k práci. Rovněž děkuji panu Ing. Martinu Ovsíkovi za pomoc při praktické části.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jen uvedené literatury a elektronických zdrojů.

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

Ve Zlíně

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 HISTORIE OBORU	12
2 TRIBOLOGIE	14
2.1 TRIBOLOGICKÝ PROCES	14
2.2 KONTAKTNÍ PROCES	15
3 TŘENÍ	16
3.1 ROZDĚLENÍ TŘENÍ	16
3.1.1 Podle druhu pohybu	17
3.1.2 Podle stavu kontaktních ploch	17
3.1.3 Podle místa působení třecích ploch	17
3.2 KLASIFIKACE VNĚJŠÍHO TŘENÍ	17
3.2.1 Smykové tření	18
3.2.2 Valivé tření	20
3.2.3 Tření opásáním	21
4 OPOTŘEBENÍ	23
4.1 TYPY OPOTŘEBENÍ.....	24
4.1.1 Adhezivní opotřebení	24
4.1.2 Abrazivní opotřebení	26
4.1.3 Erozivní opotřebení	28
4.1.4 Kavitační opotřebení	30
4.1.5 Únavové opotřebení	32
4.1.6 Vibrační opotřebení	34
4.2 INTENZITA OPOTŘEBENÍ	36
5 MAZÁNÍ	39
5.1 KLASIFIKACE MAZIV	40
5.2 ROZDĚLENÍ MAZIV	41
5.2.1 Plynná maziva	41
5.2.2 Kapalná maziva	42
5.2.3 Plastická maziva	45
5.2.4 Tuhá maziva	47
II PRAKTICKÁ ČÁST	49
6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	50
7 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A PRINCIP MĚŘENÍ	51
7.1 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	51
7.2 PRINCIP MĚŘENÍ	51
8 MATERIÁLY	54
8.1 MODIFIKOVANÉ POLYMERY	55
8.2 POLYPROPYLEN (PP).....	55
9 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ	59

9.1	SÍŤOVÁNÍ IONIZAČNÍM ZÁŘENÍM	60
9.2	SÍŤOVACÍ ČINIDLO POLYPROPYLENU	62
10	NAMĚŘENÉ A ZPRACOVANÉ HODNOTY	63
11	DISKUSE VÝSLEDKŮ	78
	ZÁVĚR	85
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	86
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	88
	SEZNAM OBRÁZKŮ	90
	SEZNAM TABULEK.....	93

ÚVOD

Tribologie jako věda a technologie o vzájemném působení povrchů při jejich relativním pohybu se čím dál více dostává do podvědomí techniků, konstruktérů a inženýrů, kteří se setkávají s problémy tření strojů a zařízení, s jejich opotřebením a mazáním.

Současný stav rozvoje vědy a techniky je charakterizován novými rysy vědeckotechnické revoluce a pokračuje vzrůstajícím tempem. Dochází ke změnám, jak ve sféře výrobní, kde se požadují stále vyšší výkony od strojů a zařízení, tak i ve výrobních technologiích rostou požadavky na zpracování nejrůznějších surovin a hmot. Je požadován dlouhodobý bezpečný ekonomický provoz. Je samozřejmé, že moderní strojní zařízení musí umožňovat v případě potřeby i snadnou údržbu.

Hlavní úlohou tribologie je tedy zajistit, aby vzájemný pohyb povrchů v přítomnosti i nepřítomnosti maziva se děl s nejmenší ztrátou energie a materiálů. Tato úloha je v současné době velmi aktuální, kdy ceny energie a materiálů rostou.

Tribologie má v současnosti velké uplatnění u polymerů. Její využití neustále roste s rozvojem používání těchto materiálů. Při zpracování polymerů se zvyšuje užívání plniv a zušlechťování vlastností pro větší uplatnění. Avšak tato plniva způsobují problémy u zpracovatelských strojů.

Bakalářskou práci jsem rozdělil do dvou základních částí a ty do několika menších kapitol a podkapitol.

První část je teoretická a přináší poznatky z oblasti tribologie, jejichž znalost je pro správné pochopení a vyhodnocení měření nezbytná. Tato část se skládá z 5 kapitol.

Druhá část je praktická a zaměřuje se na měření tribologických (třecích) vlastností modifikovaného polypropylenu. Při měření byly porovnávány vzorky ozářeného a neozářeného polypropylenu. Tato část se skládá z 6 kapitol.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE OBORU

Tření je jedním z nejstarších jevů, pozorovaných člověkem. Za významný mezník ve vývoji prehistorického člověka můžeme považovat využití tepla, vznikajícího třením dřev k rozdělování ohně.

Lidé již v nejstarších dobách hledali způsob, jak zmenšit námahu potřebnou k tažení nebo smýkání těžkých předmětů. Povšimli si, že menší sílu lze vynakládat při vlhkém povrchu, jaký se vyskytoval po dešti, a odtud byl již jen krok k použití jiných kapalin jako maziv.

Vznik kola a vozu představoval ve vývoji lidstva nový vyšší stupeň techniky, jímž člověk znásobil své síly a možnosti, avšak problém tření a opotřebení zůstal. Bylo totiž třeba použít maziva ke snížení tření náboje kola na hřídeli a hledat zároveň způsob, jak snížit opotřebení samotného kola ve styku s terénem. [1]

S projevy a účinky tření se člověk v průběhu vývoje civilizace a techniky vyrovnával neustále. Historicky prvním známým badatelem v oblasti tření byl Leonardo da Vinci počátkem 16. století. Zjistil, že třecí síla nezávisí na velikosti styčné plochy a je úměrná kolmému zatížení. Koncem 17. století francouzský inženýr Amontons (1699) použil pro třecí sílu a normálovou přítláčnou sílu poměr, který je pro stejné podmínky konstantní a který je později označován jako součinitel tření. Tento princip byl doložen řadou experimentů, které provedl a popsal Coulomb (1799), a je dnes označován jako Coulombův zákon [2]:

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

kde, třecí síla F_t působí proti směru pohybu, přítláčná síla F působí ke směru pohybu a μ je součinitel tření. V době rozvoje klasické mechaniky byl Coulombův zákon doplňován dalšími poučkami. Podle první z nich tření (třecí síla) nezávisí na velikosti styčné plochy těles, podle druhé je tření za klidu větší než za pohybu. První poučka spolu s Coulombovým zákonem platí pro ideální tuhá tělesa bez opotřebení a deformací. [2]

V celé své historii člověk řeší neustále problémy nežádoucího tření a nadměrného opotřebení, aby mohl lépe, rychleji a ve větším rozsahu získávat a vyrábět předměty své denní potřeby. Ve všech obdobích vývoje lidstva bychom našli doklady o tom, že tření a opotřebení svým způsobem limitovalo rozvoj pracovních a výrobních nástrojů i zařízení a nutilo člověka k ohledání nových a konstrukčně výhodnějších řešení. [1]

Přesto, že se člověk setkává se třením doslova na každém kroku, a přibližně jedna třetina energie na světě vyrobená se ztrácí třením, není objem vědeckých prací, věnovaný tomuto důležitému jevu za posledních pět století, příliš rozsáhlý.

Obdobné problémy jako se třením měl člověk již v nejstarších dobách i s opotřebením, a to při získávání různých přírodních surovin a jejich zpracování pro svou potřebu. Odolnost materiálu proti opotřebení je totiž v úzké souvislosti s obtížností při jeho přetváření do žádaného tvaru, ať již to je nástroj nebo jiný užitný předmět.

Ke tření bez výrazného opotřebení dochází jen výjimečně, např. v podmínkách hydrodynamického mazání funkčních povrchů, oddělených za ustálených podmínek souvislou vrstvou maziva. Obdobně je tomu i u ložisek hydrostatických, kde je hřídel před uvedením do rotace nadzdvížena tlakem média a nedotýká se při funkci prakticky vůbec povrchu ložiska.

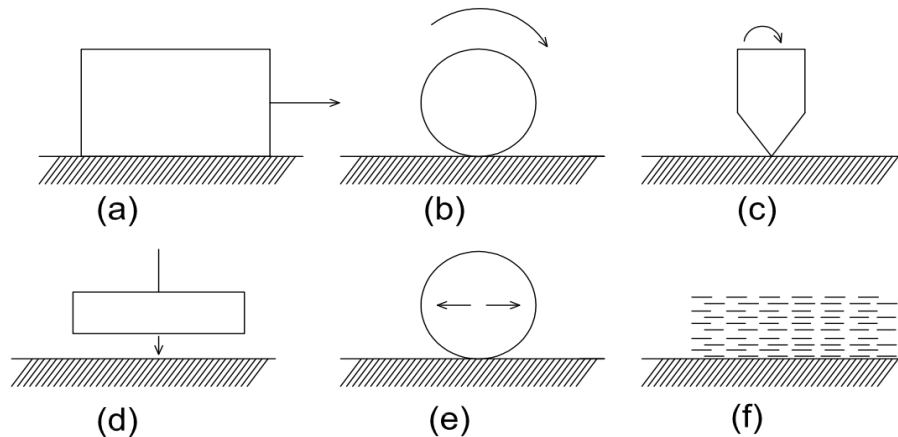
Naopak známe případy, kdy k opotřebení funkčních povrchů dochází bez výrazného účinku tření, jako je tomu např. při únavovém opotřebení ložisek v oblasti hydrodynamického mazání, v oblasti kavitace v čerpadlech a vodních turbínách, nebo u erozivního porušování lopatek koncových stupňů parních turbín účinkem vodních kapiček obsažených ve vlhké páře.

V převážné většině případů však tření a opotřebení na sebe velmi úzce navazují. Řešení životnosti a spolehlivosti součástí, strojů a zařízení musí obvykle zahrnovat oba vlivy. Snížení opotřebení lze zpravidla dosáhnout snížením tření, k čemuž se nejčastěji používá mazání strojních součástí vhodnými mazivy. Mazání tedy představuje třetí okruh otázek, s nimiž se musí každý konstruktér, výrobce i uživatel strojů zabývat. [1]

Intenzivní výzkum tření a opotřebení se rozvíjí až v druhé polovině dvacátého století. Rychle vzniká interdisciplinární nauka o vzájemném působení povrchů při jejich vzájemném pohybu, která je nazývána tribologií. [2]

2 TRIBOLOGIE

Tribologie je vědní obor, jenž se zabývá chováním dotýkajících se povrchů ve vzájemném pohybu anebo při pokusu o vzájemný pohyb. Tento pohyb může být kluzný, valivý, rotační, nárazový nebo kmitavý (Obr. 1). Současně se mohou uplatňovat dva i více druhů pohybu. [3]



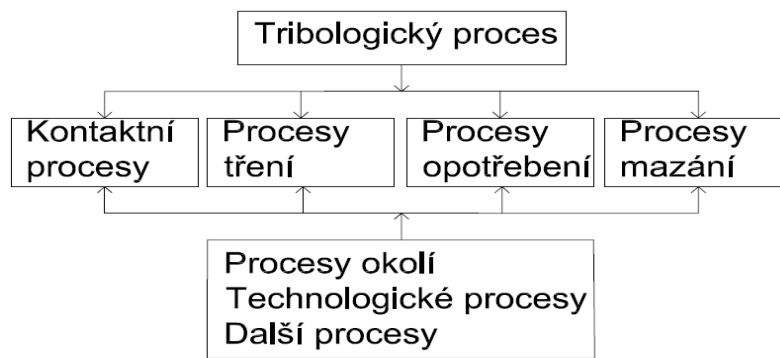
Obr. 1. Znázornění možného vzájemného pohybu třecích povrchů: a) kluzný, b) valivý, c) rotační, d) nárazový, e) kmitavý, f) tok

Konkrétněji je tribologie nauka zabývající se současně probíhajícími procesy tření, opotřebení a mazání. Každému procesu bude věnována samostatná kapitola. Jejím úkolem je zkoumání vlastností a chování přírodních ale i umělých třecích systémů k jejich dalšímu užitečnému využití v praxi. Tribologie jako věda stojí na pomezí mezi strojírenstvím, chemií a fyzikou. Název je odvozen od řeckého tribos, jenž znamená v překladu tření. [4]

2.1 Tribologický proces

Tribologický proces charakterizují materiální interakce třecích těles, mezilátky a okolí, které probíhají v prostoru a čase, přičemž se časově zařazují tribologické stavy v tribologickém systému. [5]

Vazby mezi jednotlivými částmi tribologického procesu jsou znázorněny na Obr. 2 [6]:



Obr. 2. Vzájemné vazby v tribologickém systému

Při tribologických procesech se řeší především otázky [5]:

- Jaké jsou mechanismy přeměny užitečných veličin v systému a jaké jsou skutečné fyzikální procesy přeměny energie (práce).
- Jaké jsou procesy vedoucí všeobecně ke ztrátám v systému (energetické ztráty třením, materiálové ztráty, vznik a mechanismus opotřebení).
- Jaké jsou možnosti pozitivního působení na systém s ohledem na minimalizaci ztrát.

2.2 Kontaktní proces

Kontakt (dotyk) mezi jednotlivými členy tribologického systému je základním znakem chování tribologického systému. Při kontaktních procesech je třeba uvažovat se základními tvarově-rozměrovými a materiálovými vlastnostmi dotýkajících se částí, jejich vzájemnou vazbou a reakcemi mezi nimi. Tyto interakce mohou být materiálové, fyzikální, chemické atd. Vzhledem k velkému počtu kontaktních situací je třeba zvažovat řadu vlivů [6]:

- počet těles zúčastňujících se na kontaktním procesu
- makrogeometrii a mikrogeometrii kontaktních těles
- fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti těles tvořících tribologický systém
- charakteristický druh deformace mezi jednotlivými tělesy
- typ a rychlost vzájemného relativního pohybu

3 TŘENÍ

Tření je přírodní jev, který má charakter procesu a jako takový se váže na vzájemný relativní pohyb dvou dotýkajících se prvků tribologického systému. V závislosti na hloubce zkoumání třecích procesů rozeznáváme výzkum na úrovni makromodelu a mikromodelu. Při zkoumání na úrovni mikromodelu se nahlíží na tření jako na elementární proces, při makromodelu zohledňujeme celý funkční projev sledovaného modelu, vyplývající ze vzájemného působení elementárních procesů. Makroskopický přístup lze také charakterizovat tím, že získáváme údaje z vnějších měřitelných veličin tribotechnického systému vyšší úrovně. Mezi tyto veličiny patří měření velikosti třecí síly při tangenciálním pohybu, třecího momentu při rotačním průběhu pohybu, popř. třecí práce – energie při třecím procesu se zvětší s cílem určit velikost součinitele tření. [5]

Jedna z neznámějších obecných definic tření říká, že tření je odpor proti relativnímu pohybu mezi dvěma k sobě přitlačovanými tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů v tangenciálním směru. Tato definice platí pro vnější tření a nepostihuje celkem přesně vnitřní tření. Z tohoto důvodu se dá tření definovat jako ztráta mechanické energie na začátku, v průběhu nebo při ukončení relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálových oblastí. [5]

Praktické studie, zabývající se třením, vycházejí zpravidla z jednoho, ze dvou možných přístupů. Buď je tření posuzováno jako užitečné, jako je tomu v brzdových mechanismech, při styku hnacích kol s kolejnicí nebo vozovkou, u transmisí a třecích tlumičů, nebo je tření nežádoucí, což je častějším případem, ať již jde o ložiska, ozubená kola, válce a písty nebo mechanické ucpávky. Tření je zde škodlivé nejen proto, že energie vynakládaná na jeho překonávání přichází nazmar, ale také proto, že jeho důsledkem je opotřebení, omezující životnost strojních součástí. [1]

3.1 Rozdělení tření

Tření lze dělit z více hledisek a postupem času se každá teorie o tření vyvíjela. Nejčastěji vyskytující rozdělení je:

- podle druhu pohybu
- podle stavu kontaktních ploch
- podle místa působení třecích ploch

3.1.1 Podle druhu pohybu

- Tření kluzné (smykové) - tělesa kloužou po sobě a vzájemný styk se děje trvale na velké nebo na celé smykové (kluzné) ploše.
- Tření valivé - rotační těleso se odvaluje po rovinné nebo zakřivené ploše a styk těles je jen bodový, případně přímkový po krátkou dobu.
- Tření opásáním - nazýváme též jako tření Eulerovo. [3]

3.1.2 Podle stavu kontaktních ploch

- Tření suché (tuhých těles) - třecí plochy jsou v tuhém skupenství, bez maziv, přičemž se alespoň jedno těleso pohybuje.
- Tření kapalinové - třecí plochy jsou od sebe odděleny vrstvou kapalného maziva. U kapalných látek probíhá spíše vnitřní tření, které na povrchu látky nepozorujeme.
- Tření plynné - třecí plochy jsou od sebe odděleny vrstvou plynu. Plynné tření je velice podobné kapalnému tření.
- Tření plazmatické - třecí proces má vlastnosti plazmy jako druhu vysoce ionizovaného plynu. [5]

3.1.3 Podle místa působení třecích ploch

- Vnější tření - třecí mechanismy probíhají mezi dvěma tělesy, přičemž se alespoň jedno pohybuje. Můžeme zde pozorovat opotřebení, které se dá ovlivnit mazáním.
- Vnitřní tření - třecí mechanismy probíhají mezi materiálovými vrstvami jednoho tělesa. Vnitřní tření charakterizuje fyzikální veličina - viskozita. [7]

Jednotlivé třecí stavy se vyskytují samostatně výjimečně. V praxi nastává kombinace jednotlivých druhů tření.

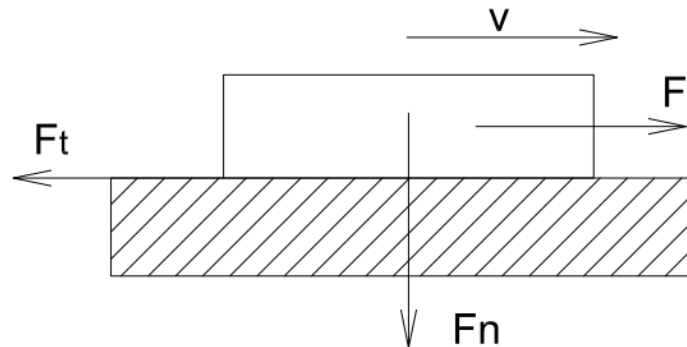
3.2 Klasifikace vnějšího tření

Pro úroveň makromodelu je vnější tření chápáno jako odpor proti pohybu, vznikající mezi dvěma tělesy v oblasti styku jejich povrchů v tečném směru k povrchům. Dělí se na [2]:

- smykové (kluzné, vlečné)
- valivé
- opásáním = Eulerovo

3.2.1 Smykové tření

Jeho původ je především v nerovnosti obou styčných ploch, kterými se tělesa vzájemně dotýkají. Nerovnosti povrchů při posouvání těles na sebe vzájemně narážejí, deformují se a obrušují. Tak vzniká třecí síla F_t , jejíž působíště je na stykové ploše obou těles a jejíž směr míří vždy proti směru rychlosti tělesa. [8]



Obr. 3. Smykové tření na vodorovné podložce

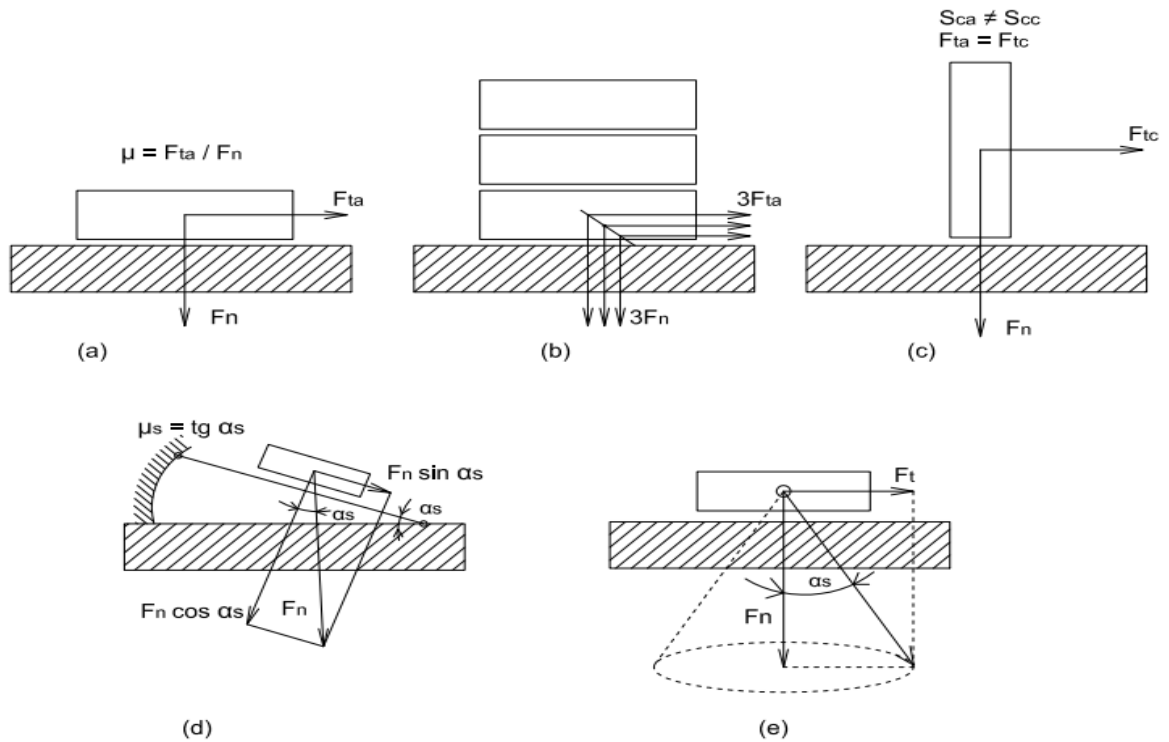
Vlastnosti třecí síly lze určit pokusem: vezmeme dřevěný kvádr, na který připevníme siloměr. Potáhneme-li za siloměr silou $F \geq F_t$, uvedeme kvádr do pohybu. Bude-li velikost působící síly přesně rovna velikosti třecí síly, bude výslednice sil působících na kvádr rovna nule a kvádr se bude tedy pohybovat rovnoměrným přímočarým pohybem. V případě, že velikost působící síly bude větší než velikost síly třecí, bude se kvádr pohybovat rovnoměrně zrychleným pohybem. [8]

Z pokusu lze odvodit následující vlastnosti třecí síly [8]:

- velikost třecí síly nezávisí na obsahu styčných ploch
- její velikost podstatně nezávisí na rychlosti
- její velikost je přímo úměrná velikosti tlakové (normálové) síly F_n kolmé k podložce, po níž se těleso pohybuje: $F_t = f \cdot F_n$, kde f je součinitel smykového tření.

Bylo získáno mnoho podkladů a vytvořena řada teorií vysvětlujících tribologický proces. Z hlediska mikromodelu je kluzné tření dvou tuhých těles možné buď jako čisté tření mezi plochami těchto těles, nebo jako tření v adhezních vrstvách. Čisté tření tuhých těles může nastat především ve vakuu. V tomto případě vyleštěné čisté rovinné povrchy kovových

těles k sobě přilnou velkou silou. Difúze atomů na povrchu do druhého tělesa vede k vytvoření spojů s pevností svárů. [2]



Obr. 4. Znázornění zákonů tření, kde je (a), (b) síla tření úměrná zatížení, (c) síla tření nezávisí na velikosti obrysových ploch S_{ca} , S_{cc} , (d) sklonný tribometr k určení součinitele tření jako $\text{tg } \alpha_s$, (e) kužel tření [1]

Poměr síly tření F_t k normálové síle F_n - Obr. 4a je stálý a příslušnou konstantu úměrnosti nazýváme součinitelem tření [1]:

$$\mu = F_t / F_n \quad (2)$$

Rovnici (2) považujeme za vyjádření prvního zákona tření, znějícího: Velikost síly tření je přímo úměrná působícímu zatížení. Názorně je tento zákon dokumentován na Obr. 4b, který ukazuje, že např. třikrát větší zatížení vyžaduje zvýšit třikrát i sílu k překonání tření. Síla potřebná k rovnoměrnému pohybu tělesa na Obr. 4a je stejná, ať leží těleso kteroukoliv ze svých stěn na téže podložce - Obr. 4c. Tento poznatek označujeme jako druhý zákon tření, jehož slovní vyjádření zní: Velikost síly tření je nezávislá na celkové ploše společného styku. [1]

Nakloní-li se rovina, na níž těleso leží, pak při určitém úhlu sklonu α_s se dá těleso do pohybu. Jak vyplývá z Obr. 4d, platí pro tento úhel vztah [1]:

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \mu_s \quad (3)$$

Z podrobných měření na „sklonném tribometru“ vyplynulo, že síla F_t udržující rovnoměrný, přímočarý pohyb tělesa po podložce je poněkud menší než síla F_s nutná k uvedení tělesa do pohybu ze stavu klidu. Tento poznatek se uvádí jako třetí zákon tření, který lze vyjádřit nerovností [1]:

$$\mu_s > \mu \quad (4)$$

kde, μ_s nazýváme součinitelem tření za klidu (statickým), přesněji limitním součinitelem klidového tření. [1]

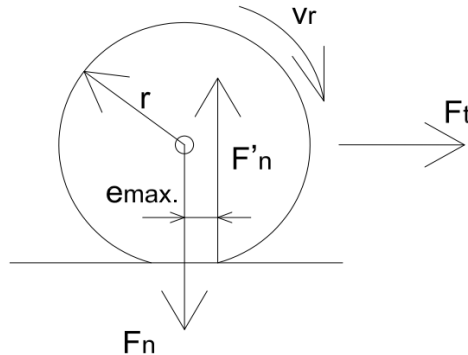
Myšleným otáčením kosinové složky normálové síly na Obr. 4d kolem osy, mající směr gravitační síly působící v těžišti tělesa, vzniká plášť kužele tření, který lze obdobně získat i v případě vodorovné podložky - Obr. 4e. Uvnitř tohoto kužele leží všechny úhly klidového tření. [1]

3.2.2 Valivé tření

Valivé tření je z hlediska makromodelu charakterizované podle vzdálenosti, která bývá označována jako rameno valivého odporu. Valivý odpor lze vysvětlit deformací kola a podložky. Při nestejných deformacích povrchu kola a roviny musí při vzniku deformace a při zpětném vypružení vzniknout rozdíl mezi uběhlou vzdáleností na povrchu kola a roviny. Dochází tak k malým prokluzům. Cestou ke snižování odporů při pohybu je nahrazování kluzného tření valivým. Ve strojích jsou používána valivá ložiska, valivá vedení a i některé mechanismy jsou řešeny s valivými kontakty – kuličkový šroub. Kontakt valivých elementů nastává v malé plošce, kde dochází při zatěžování ke koncentraci napětí. [2]

Vznikají při tom deformace drah a valivých elementů a při odlehčení a odeznění deformací se silové účinky působící deformaci nevracejí zpět do pohybové energie, ale část energie zůstává v materiálu a mění se v teplo. Při pohybu valivých tělísek vzniká rozdílná deformace před a za teoretickým místem kontaktu ve směru pohybu a posun výsledné reakce o vzdálenost ramene valivého odporu. Malá kontaktní ploška s vysokou koncentrací namáhání znamená nebezpečí v případě rázového přetížení. Valivá uložení jsou choulostivá na

rázy, a proto oblast rázových silových účinků zůstává z hlavních oblastí používání kluzných ložisek. [2]



Obr. 5. Schéma rovnovážného stavu při valivém tření, kdy reakce F'_n na zatížení F_n , působí mimo střed koule (válce), určuje maximální výstřednost e_{max} , právě postačující k valivému tření

Při studiu pohybu koule nebo válce na rovině - Obr. 5 byl pro součinitel valivého tření odvozen vztah [1]:

$$\mu_r = \frac{e_{max}}{r} = \frac{v_m}{v_r} \mu_m \quad (5)$$

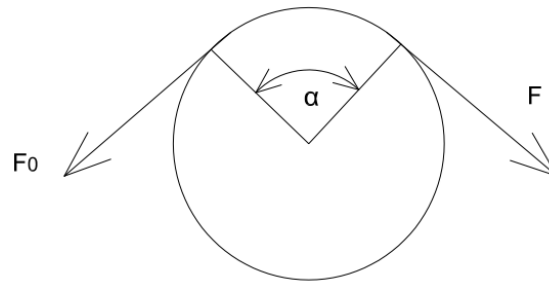
kde je e_{max} - výstřednost vystačující k valivému pohybu koule nebo válce, r - poloměr koule nebo válce, v_r - rychlost valení, v_m - rychlost prokluzu, μ_m - součinitel prokluzu.

3.2.3 Tření opásáním

Tření opásáním můžeme také nazývat jako Eulerovo tření - Obr. 6. Při tření opásaných předmětů kruhového průřezu aplikujeme Eulerův vztah [9]:

$$F = F_0 \cdot \exp(f_\alpha) \quad (6)$$

kde je F - třecí síla za třecím tělesem, F_0 - napínací síla před tělesem, α - úhel opásání, f_α - součinitel tření opásáním.



Obr. 6. Rovnováha sil opásaného tření

Tření opásáním bývá někdy nazýváno taky třením vláknovým. Typickým příkladem je smýkání lana nebo pásů po válcové ploše. Tento druh tření vzniká při spouštění nebo zvedání kbelíku s maltou při stavbě domu pomocí lana, které je vedeno přes vodorovnou válcovou trubku, kterou zedníci umístili v okně domu. S vláknovým třením se setkáváme i u videorekordéru a promítačky. Při vložení kazety do videorekordéru je páska vytažena z kazety a přivedena k čtecí resp. záznamové hlavě videa. Vytažení pásky realizují „kolíčky“ ve tvaru válců. Kolem nich je páska ovinuta a postupně tažena z kazety. Ačkoliv se kolíčky mohou otáčet kolem vlastní osy, čím snižují vláknové tření mezi nimi a páskou, může se páska po kolíčku i smýknout.

Tohle tření se využívá u kladkových strojů a jiných zařízení, kde je důležité dosahovat většího součinitele tření. Z praxe lze říci, že čím větší bude úhel opásání, tím větší bude třecí síla. Tření opásáním se využívá v technologických zpracovatelských metodách, speciálně v odtahu gumových pásů nebo textilií. [10]

4 OPOTŘEBENÍ

Opotřebení je nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává. Projevuje se jako odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z funkčního povrchu mechanickými účinky, nebo chemickými a elektrickými vlivy. [1]

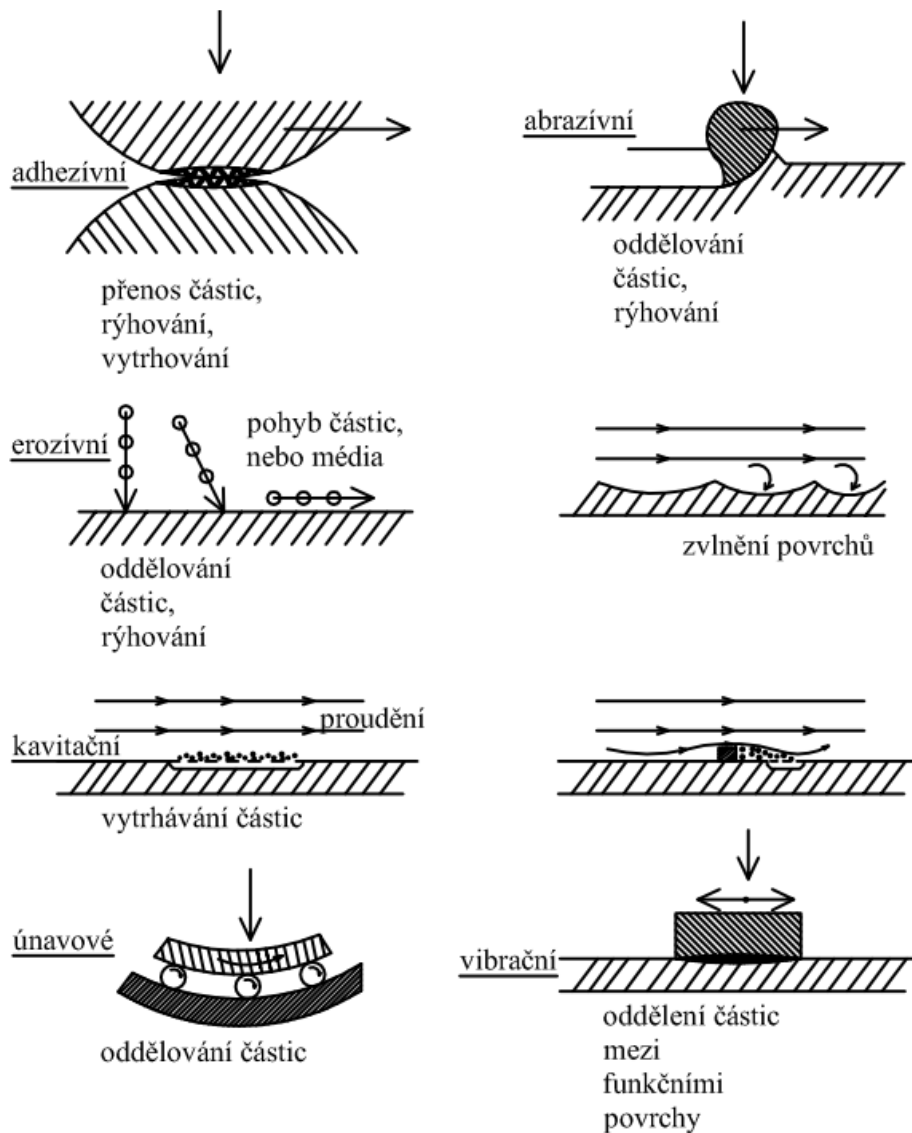
Mění se rozměry i tvar a zhoršuje se kvalita povrchu. Problematika opotřebení je v posledních letech čím dál více aktuální, z důvodu zvyšování požadavků na kvalitu výrobků.

Odhaduje se, že 50 až 80 % všech poruchových prostojů strojů a zařízení je zapříčiněno právě opotřebením. [11]

Namáhání při opotřebením může vést k těmto změnám v povrchových vrstvách [11]:

- Mikroplastické deformace vyvolané zatlačováním tvrdých částic do měkčího povrchu druhého členu, přičemž mezním případem může být až odřezávání třísek.
- Únavovému poškození povrchových vrstev při opakovaném namáhání.
- Vzniku oxidů, který je podporován mikroplastickou deformací a zvýšením teploty v místech dotyku.
- Změně mikrostruktury, např. v důsledku fázové přeměny.
- Aktivací povrchových vrstev.

4.1 Typy opotřebení



Obr. 7. Schematicky znázorněny hlavní druhy opotřebení [1]

4.1.1 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení je charakterizováno oddělováním a přemísťováním částic z míst, kde při relativním pohybu funkčních povrchů došlo k jejich dotyku, k porušení povrchových vrstev a ke kovovému styku obou materiálů. Adhezivním opotřebením se označuje případ porušování mikrospojů, vzniklých následkem interakce povrchových nerovností, zpravidla vedoucí k přenosu materiálu z jednoho funkčního povrchu na druhý. [1]

Adhezní síly způsobují vytrhávání částic z funkčního povrchu. Je-li mezi funkčními povrchy mazivo, může dojít k oddělení kovových povrchů a tím k zastavení procesu opotřebení. [12]

Na vznik adhezivního opotřebení mají vliv zejména tyto faktory [1]:

- hloubka vniku a poloměr zakřivení mikronerovností
- zatížení a rychlost relativního pohybu
- schopnost materiálu vytvářet adhezivní spoje

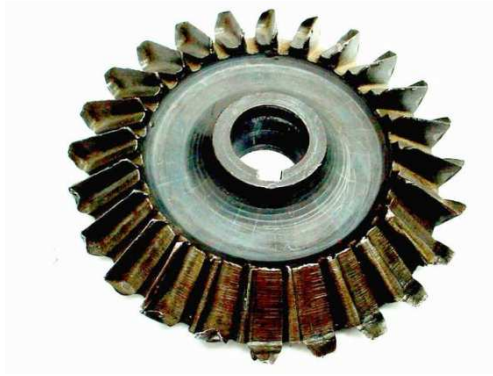
Intenzitu adhezivního opotřebení může významně ovlivnit médium přítomné mezi funkčními povrchy. Například mazivo může částečně oddělit stykové povrchy a zmenšit tak interakci povrchových mikronerovností. Naopak ve vakuu nemohou vznikat na kovech ochranné oxidické vrstvy a podmínky pro vznik adhezivních mikrospojů jsou tak velmi usnadněny. [1]

Vlivem podmínek a intenzity působících faktorů můžeme v praxi rozlišit různou intenzitu vlastního opotřebení, a to od mírné formy až po formu intenzivní, „zadírání“.

V prvním případě tzv. mírného opotřebení jde o děj, při němž rychlost vzniku oxidických ochranných vrstev na povrchu kovu je větší než rychlost jejich porušování při vzájemném relativním pohybu funkčních povrchů.

Ve druhém případě jde o výrazné a relativně hluboké rozrušování funkčních povrchů, provázené vznikem četných částic, jejich oddělováním a přenosem mezi funkčními povrchy a velkými změnami funkčních povrchů následkem plastické deformace mikrooblastí i makrooblastí. V podmínkách intenzivního adhezivního opotřebení vzrůstá velmi silně odpor proti relativnímu pohybu, což může vést až k jeho přerušení (zablokování součástí). [1]

Příklady adhezivního opotřebení [13]:



Obr. 8. Talířové kolo



Obr. 9. Přítlačný kotouč

4.1.2 Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení je definováno normou ČSN 01 5085 jako trvalá nežádoucí změna povrchu tělesa způsobená vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a abrazivního média, projevující se zejména rýhováním a odřezáváním částic exponovaného tělesa. [11]

U abraze rozlišujeme v zásadě dva případy. Opotřebovávají-li tvrdé částice jeden funkční povrch, jde o interakci dvou těles – částic a součásti. Jako příklad lze uvést opotřebení zubů rýpadel nebo plužních ostří. [1]

Druhým případem je abrazivní opotřebení částicemi, které jsou mezi dvěma funkčními povrchy. Jde tedy o interakci 3 těles, ke které prakticky dochází u všech pohybových mechanismů, do nichž vnikají nebo mohou vniknout částice nebo nečistoty z okolního pro-

středí. Tak je tomu při opotřebení vodících ploch obráběcích strojů, opotřebení čepů a ok článků pásových podvozků nebo korečkových pásů, ale i pístních kroužků a vložek válců u pístových strojů, pracujících s nedostatečně čistým médiem. [1]

Tvrdé částice mohou narušovat povrch funkčních ploch mikrořezáním, rýhováním a podpovrchovými trhlinkami. Při procesu mikrořezání odebírají příznivě orientované částice z povrchu těles drobné třísky. Abrazie mikrořezáním je ovlivněna materiálem tělesa, druhem a tvarem zrn abraziva i změnami na povrchu opotřebovávané součásti. Čím větší bude tvrdost a počet výstupků zrn abraziva, tím více se bude uplatňovat proces mikrořezání, přičemž se odhaduje, že procesu mikrořezání se zúčastňuje asi 10 % z celkového počtu zrn abraziva. Typickým poškozením povrchu jsou rýhy u 90 % případů. [11]

Při opotřebení čepů kluzných ložisek účinkem abrazivních částic, obsažených jako nečistoty v mazivu, dochází často k paradoxnímu jevu v tom, že je podstatně více opotřebován tvrdý čep než poměrně měkká výstelka ložiska. Je to dáno tím, že tvrdé částice se mohou zamáčknout do měkčího ložiskového kovu a svými vyčnívajícimi výstupky pak rýhují tvrdý čep. [1]

Intenzivnímu abrazivnímu opotřebení jsou vystaveny součásti různých typů drtičů, mlýnů, rýpadel, pneumatických kladiv, vrtacích korunek aj., kde kromě rýhování dochází následkem silných rázů a tlaků k výrazné plastické deformaci povrchových vrstev materiálu. Často právě tyto deformace rozhodují o tom, zda součást je či není způsobilá k dalšímu provozu. [1]

Odolnost proti abrazi lze u řady kovových materiálů zvýšit jejich legováním, tepelným zpracováním anebo povrchovou úpravou. V případě oceli se osvědčilo legování karbidotvornými prvky (chrómem, wolframem a vanadem) spolu s kalením, s cementací či nitridací. [11]

Příklady abrazivního opotřebení [13]:



Obr. 10. Brzdový kotouč



Obr. 11. Píst

4.1.3 Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení je normou ČSN 01 5050 definováno jako trvale nežádoucí změna povrchu (rozměru) součástí, která je způsobena vzájemným působením funkčního povrchu a média. Projevuje se oddělováním materiálu a poškozováním povrchu působením částic nesených proudem kapaliny nebo vzduchu. Erozivní opotřebení se vyskytuje u průtočných částí hydraulických strojů, potrubí pro dopravu hydrosměsí, u pneumatických zařízení, ventilátorů, míchacích lopatek. Objevuje se rovněž u koncových stupňů parních turbín, kde lopatky pracují i ve vlhké páře a u lopatek proudových motorů, u kterých dochází k poškozování prachovými částicemi, vodou, krystalky ledu apod. [11]

Intenzita erozivního opotřebení je ovlivněna řadou faktorů, zejména [13]:

- relativní rychlostí opotřebovaných částic
- teplotou a chemickými vlastnostmi nosného média
- druhem, velikostí a tvarem částic
- kinetickou energií a úhlem dopadu částic
- vlastnostmi opotřebovaného materiálu

Všechny uvedené vlivy působí současně, ovšem v různé míře a podle konkrétní situace.

Pro erozivní opotřebení je jedním z typických jevů nerovnoměrné porušení funkčního povrchu a často jeho výrazné zvlnění. Je to způsobeno vlivem turbulence proudícího média, při níž mohou být oddělovány částice materiálu v určitých exponovaných místech i z nejnižších míst povrchu. U jiných typů opotřebení, zejména abrazivního a adhezivního, se opotřebovávají především vrcholy mikronerovností. Následkem nerovnoměrného erozivního opotřebení se často vyřazují z provozu součásti, u nichž došlo k nadměrnému opotřebení v místě, které ohrožuje nebo znemožňuje správnou funkci stroje. [1]

Příklady erozivního opotřebení [13]:



Obr. 12. Ventil



Obr. 13. Šoupátko

4.1.4 Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním povrchu součástí v oblasti zanikání kavitačních dutin v kapalině. [1]

Základní podmínkou vzniku kavitační dutiny je pokles tlaku v kapalině pod tlak nasycených par kapaliny při dané teplotě. Kavitace tedy vznikají všude tam, kde vznikají náhlé změny v rychlosti proudění kapaliny, nebo v kapalinách vystavených vysokému podtlaku. Kavitační bubliny vznikají v zúžených profilech, kde výrazně vzrůstá rychlost proudění kapaliny a naopak zanikají v místech, kde se průřez opět rozšíří. Experimentálně bylo prokázáno, že doba zániku bubliny (imploze) je asi 10^{-5} až 10^{-3} sekundy a rychlost hydrodynamických rázů je vyšší než 300 m/s. Objem kavitačních dutin se pohybuje od několika mm^3 až do několika m^3 . Na základě výpočtů se předpokládá, že velikost implozního tlaku je větší než 10^3 MPa. [11]

Kavitační opotřebení se zpravidla objevuje na povrchu oběžných kol čerpadel, vodních turbín, na ostříkovacích tryskách, kluzných ložiscích. [11]

Setkáme se s ním i u řady dalších strojů nebo součástí, např. v hydraulických systémech, v redukčních ventilech. Bylo zjištěno i u spalovacích motorů, a to na vnějších plochách vložek válců chlazených vodou, nebo u ultrazvukových průmyslových praček. [1]

Mechanismus kavitačního opotřebení vysvětlují dvě teorie. Podle první z nich je poškození povrchu vyvoláno rázovými vlnami, které se šíří kapalinou od místa, kde zanikla kavitační dutina až k povrchu těles. Podle druhé vniká do dutiny velikou rychlostí proud kapaliny, takže povrch těles je namáhán hydrodynamickými rázy. [11]

Intenzita kavitačního opotřebení je proměnlivá s časem. V první fázi se kumulují poruchy v povrchových vrstvách materiálu, aniž dochází k oddělování částic (období latence). Na povrchu materiálu je patrné pouze zmatnění, které v dalším období přechází až ke vzniku povrchových a podpovrchových trhlinek. [1]

Hlavní faktory, které ovlivňují intenzitu kavitačního opotřebení [13]:

- obsah plynů v kapalině
- teplota a tlakové poměry
- povrchové napětí a viskozita kapaliny

Kromě tlakových účinků se na rozrušení materiálu při kavitaci mohou podílet i další faktory, zejména chemické a elektrochemické. Samozřejmě chemické a elektrochemické působení média může výrazně ovlivnit průběh kavitačního opotřebení. V některých případech mají poškozené plochy výrazné stopy těchto doprovodných účinků. Jsou známy případy, kdy změnou chemického prostředí nebo zavedením elektrického napětí na části hydraulických strojů bylo možno částečně omezit účinky kavitace. [1]

Kavitace je často doprovázena korozí, která může kavitační poškození výrazně urychlit. Pokud jsou v proudících kapalinách i tvrdé částice (zpravidla nečistoty), objevuje se na součástech vedle kavitace i eroze, resp. hydroeroze.

Nejspolehlivější ochranou proti kavitačnímu poškození je takové konstrukční řešení, které kavitační poškození neumožní, nebo výrazně potlačí. Materiály zcela odolné proti kavitaci zatím nejsou k dispozici. Vysokou odolnost proti kavitačnímu opotřebení vykazují martenzitické nerezavějící oceli s nízkým obsahem uhlíku, dobré zkušenosti jsou i s některými druhy bronzů a mosazí. [11]

Příklady kavitačního opotřebení [13]:



Obr. 14. Lopatkové kolo



Obr. 15. Rotor turbíny

4.1.5 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení je charakterizováno postupnou kumulací poruch v povrchové vrstvě materiálu při opakovaných stykových napětích v určitých oblastech funkčních povrchů. [1]

Na vzniku únavového opotřebení mají kromě provozních podmínek vliv také [13]:

- tvrdost povrchové vrstvy
- nečistoty a vměstky
- drsnost povrchu

V důsledku působících proměnlivých elastických nebo elasto-plastických deformací může docházet v povrchových vrstvách k lokální vysokocyklové nebo nízkocyklové únavě. Časovým projevem únavového opotřebení strojních částí je tvorba povrchových důlků (pitting), které vznikají v důsledku lokálního vyčerpání plasticity, vzniku a šíření podpovrchových

trhlin a následného vytrhávání či vydrolování kusů materiálu z funkčního povrchu. Vysoká opakovaná smyková napětí vyvolaná kontaktním tlakem mohou vést k odlupování povrchové vrstvy u povrchově tvrzených strojních částí (cementace, nitridace). V tomto případě se únavové trhliny šíří pod tvrzenou vrstvou, která se následně prolamuje a odlupuje. [11]

Nejčastější případy únavového opotřebení jsou známy u valivých ložisek, ozubených kol, nákolků železničních dvojkolí, kolejnic, zdvihátek ventilů i u jiných strojů, pracujících s vibracemi či se silnými rázy (pneumatická kladiva, vrtací tyče, vrtací korunky). Při vysoké úrovni smykových namáhání v povrchové vrstvě může dojít u materiálů málo plastických či křehkých k oddělování částic mechanismem křehkého lomu. [1]

Únavové opotřebení, jako děj vázaný převážně na povrchové vrstvy materiálu, může iniciovat i únavové lomy, které zasáhnou část nebo celý průřez součásti.

Zatímco únavové poškození povrchu součástí vede obvykle jen ke zhoršení funkce stroje, ke zvýšení vibrací, hlučnosti, eventuálně k většímu odporu proti pohybu, pak přechod k únavovým lomům vede bezprostředně k náhlé poruše nebo havárii stroje. Proto je třeba předcházet tomuto typu opotřebení vhodnými konstrukčními zásahy a volbou materiálu, resp. věnovat plnou pozornost systematickým preventivním kontrolám a včasné indikaci vznikajících poruch. [1]

Vyšší životnosti součástí namáhaných kontaktní únavou lze dosáhnout především zpevněním povrchové vrstvy (povrchové kalení, cementování, nitridace apod.). Strukturální heterogenity v povrchových vrstvách, zejména oxidické a sulfidické vměstky, působí jako koncentrátoři napětí, zkracují etapu iniciace povrchových mikrotrhlin. [11]

Příklady únavového opotřebení [13]:



Obr. 16. Kroužek ložiska



Obr. 17. Ojnice

4.1.6 Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním povrchu materiálu vzájemnými kmitavými tangenciálními posuny funkčních povrchů těles při působení normálního zatížení. V běžných případech vibračního opotřebení jsou amplitudy vibrací poměrně malé a dosahují hodnot 0,1 až 100 μm . Při tak malých relativních pohybech je odstraňování částic vznikajících mezi funkčními povrchy značně ztíženo. V místech styku mikronerovností může dojít i k vytlačení nebo k znehodnocení maziva, které mohlo být mezi nimi původně obsaženo. Uvolněné částice zůstávají v kontaktu a podílejí se dále na zintenzivnění opotřebení. [1]

Na průběh a intenzitu vibračního opotřebení působí řada faktorů, zejména [13]:

- amplituda pohybu
- frekvence pohybu
- měrný tlak ve styku součástí
- vlastnosti materiálu

Kromě mechanické složky se při vibračním opotřebení významně uplatňuje i korozní působení okolního prostředí, neboť zkorodované částice vzniklé adhezí způsobují abrazi vlastního funkčního povrchu. Charakteristické je zbarvení opotřebovaného povrchu. U ocelí a litin jsou produkty vibračního opotřebení oxidy železa, které mají světle hnědé, hnědočervené nebo hnědočerné zbarvení. [1]

Povrchové důlky a trhliny, které vznikají v důsledku vibračního opotřebení, působí u cyklicky namáhaných součástí jako koncentrátoři napětí a mohou vést ke snížení meze únavy o 30 až 50 %. [11]

K vibračnímu opotřebení dochází v praxi poměrně často. Jde zejména o různá pohyblivá uložení, do nichž se přenášejí kmity vlastní nebo buzené cizím zdrojem. Nejčastěji jde o valivá ložiska, čepy, hřídele a spojky. Četné jsou případy porušení nalisovaných spojů, např. nábojů kol a hřídelů, nebo setrvačnicků u pohybových šroubů na mechanických lisech.

V prvním případě jde o poškození funkčních povrchů, zejména tehdy, působí-li vibrace stále v jednom místě nebo směru. [1]

V druhém případě jde o poškození nalisovaných spojů či nepohyblivých uložení, která vznikají např. ohybem nedostatečně tuhých hřídelů na okraji náboje kola. Vibrační opotřebení, vzniklé v takovém spoji, značně zhoršuje kvalitu styčných povrchů a mnohdy znemožňuje rozebrání spoje při nutných opravách. Částice vzniklé při vibračním opotřebení jsou často silnější. Mohou proto při rozebírání nalisovaného spoje výrazně zvýšit součinitel kluzného tření, popř. iniciovat poškození povrchu kombinovaným abrazivním a adhezivním mechanismem. Odpor při demontáži součástí může přitom stoupnout nad pevnost materiálu, přičemž může dojít k porušení povrchu a rozměru součástí tak, že nejsou již dále použitelné. [1]

Při vibračním opotřebení se narušují povrchové vrstvy, a to často i u velmi tvrdých a kvalitních materiálů. Tím může dojít i k iniciaci únavových lomů hřídelů, čepů, nebo k iniciaci únavového opotřebení valivých uložení nebo ozubených kol. [1]

Vysokou odolnost proti vibračnímu opotřebení budou vykazovat materiály s vysokou odolností proti abrazi a oxidaci funkčních povrchů v daném prostředí, např. dvojice rozdílných nástrojových ocelí, anebo u kombinace PTFE – nástrojová ocel. Naopak malou odolnost vykazují dvojice těchto kovů či slitin (Ni-ocel, Al-ocel, Al-Al, Sn-ocel).

Negativní účinky vibračního opotřebení na funkční povrchy strojních částí lze snížit, či potlačit, zpevněním povrchu plastickou deformací za studena anebo povlakováním (např. mědí, chromem, Al_2O_3). [11]

Příklady vibračního opotřebení [13]:



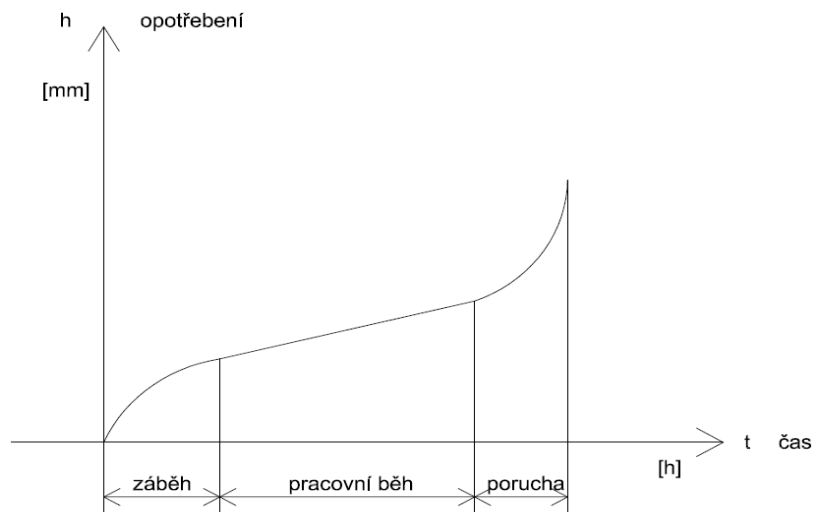
Obr. 18. Drážková hřídel



Obr. 19. Ložisko

4.2 Intenzita opotřebení

V tribologických systémech je opotřebení považováno za kvantifikovanou veličinu. Lze ho vyjadřovat jako objem nebo hmotu odebraného materiálu z kluzné plochy (snadno se zjistí vážením), ale nejvýstižnější je definice opotřebení jako tloušťky odebrané vrstvy v určitém místě třecí plochy. V tomto případě se velikost opotřebení stanoví proměřením součástí tribologického uzlu. Opotřebení při stálém zatížení a neměnicích se podmínkách narůstá s časem podle Obr. 20 [2]:



Obr. 20. Nárůst opotřebení s časem při stálých podmínkách

Počáteční fáze časového průběhu opotřebení představuje dobu záběhu. V průběhu této fáze se odstraňují některé mikronerovnosti a dosahuje se rovnovážné drsnosti povrchu. Další fáze časového průběhu představuje ustálený děj, kdy se opotřebení s časem lineárně zvětšuje. Snahou konstruktéra je omezit opotřebení v průběhu této fáze na minimum. Proto se snažíme dosáhnout kapalného tření, které probíhá s nulovým opotřebením.

Opotřebení však může nastat při rozběhu a doběhu stroje, když v tuto dobu není docíleno kapalného tření. Zcela vyloučit opotřebení je možno použitím hydrostatických nebo hybridních ložisek, která zaručí i v době rozběhu a doběhu stroje kapalně tření. Podobně funguje i uložení s plynným třením (aerostatická a aerodynamická ložiska).

Po určité době provozu (pracovní běh), po kterou se opotřebení pomalu lineárně s časem zvětšovalo, začne opotřebení progresívně narůstat. Může to být způsobeno odebráním tvrdé vrstvy z povrchu součásti a zvýšením opotřebení měkčího materiálu pod touto vrstvou. Stejně tak se může projevit kumulace drobných poškození, zvláště projevů povrchové únavy.

Únavové opotřebení, spolu s abrazivním účinkem uvolňovaných částic, bývá příčinou rychlé degradace tribologického uzlu. Vzhledem k progresívnímu charakteru poškození lze hovořit o poruše nebo havarijním stavu. S růstem opotřebení se zvětšují vůle ve styku a dochází ke zvyšování dynamických účinků a ke vzniku rázů. Tato situace ještě zvyšuje progresívní charakter děje. Stav se navenek projevuje chvěním a hlukem a roste přitom namáhání jednotlivých součástí. [2]

Intenzita opotřebení závisí na mnoha činitelích a bývá s časem proměnlivá. Lze ji zjišťovat experimentálně. Patří k hodnotám, s nimiž musíme počítat při návrhu soustav součástí a nástrojů. Intenzitu opotřebení lze klasifikovat obecně jako přírůstek opotřebení na čas. Zařízení na zkoušení intenzity opotřebení je více druhů. Měřené materiály jsou namáhány nejčastěji abrazí. [12]

Výpočet intenzity opotřebení je vzhledem k uplatňujícím se vlivům obtížný a dosud nespolehlivý. Řada ovlivňujících faktorů je spojena s náhodným výskytem či náhodnou velikostí účinků. [2]

Intenzitu opotřebení lze tedy vypočítat jako závislost přírůstků opotřebení na čase

$$I = \frac{\Delta VB}{\Delta T} \quad (7)$$

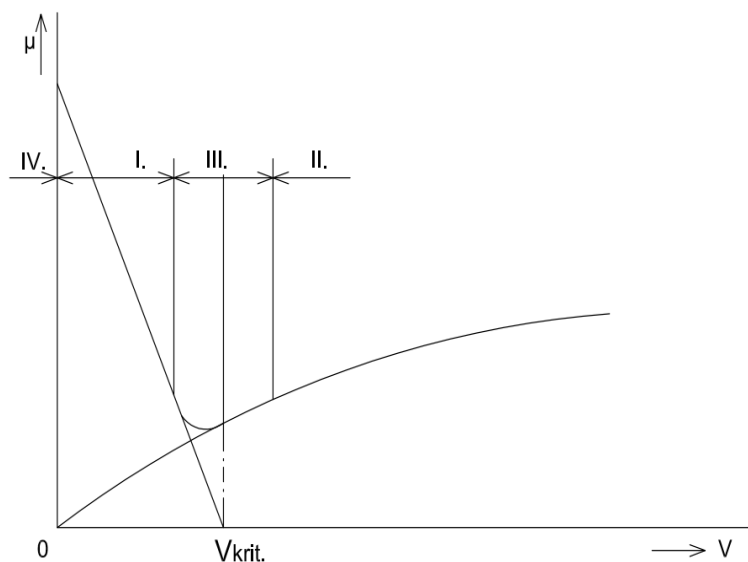
kde je, ΔVB – je přírůstek opotřebení, ΔT – je přírůstek času, I – je intenzita opotřebení. [14]

5 MAZÁNÍ

Mazání je samostatný tribologický proces, který je významově rovnocenný s procesy tření a opotřebení. Zabývá se mazivy, mazacími zařízeními, způsoby přívodu a odvodu maziva k třecím plochám, úpravami maziva po průtoku mazacími soustavami a postupy ke snížení tření a opotřebení. Při mazání je potřeba dosáhnout takového stavu, kdy se ve třecím uzlu oddělí pohybující se povrchy tuhých třecích těles od sebe pomocí vrstvy maziva, ve kterém probíhá proces tření. [5]

Vývoj mazání můžeme charakterizovat [5]:

- Zdokonalováním a vznikem nových teorií vysvětlujících působení mazání z hlediska chemicko-fyzikálních a mechanických pohybových účinků.
- Výzkumem a vývojem nových maziv s požadovanými vlastnostmi na univerzální i vysokospecifické použití.
- Vývojem nových účinnějších technických prostředků umožňujících aplikaci maziv.



Obr. 21. Oblasti mazání v Stribeckově diagramu

Podle oblasti tření v Stribeckově diagramu na Obr. 21 se rozlišuje [5]:

- I. Mazání s přerušovanou vrstvou kapalného maziva (suché tření $\mu_f = 0,1$) obvykle při smíšeném tření.
- II. Mazání s vytvořenou celistvou nosnou vrstvou kapalného maziva, obvykle při kapalném tření ($\mu_h = 0,005$).
- III. Mazání s vrstvou kapalného maziva (mezní tření $\mu_m = 0,005 - 0,1$), kdy se vlastnosti v důsledku místního vysokého zatížení výrazně odlišují od původních vlastností maziva, obvykle při přechodu z kapalného tření do smíšeného tření.
- IV. Mazání tuhými mazivy.

5.1 Klasifikace maziv

Maziva jako mezilátky úmyslně používané v tribologických systémech jsou pro chod strojů a zařízení nevyhnutelné a zaručují při správném použití bezpečnost, ekonomičnost, spolehlivost a projektovanou životnost třecích uzlů a tím i celého zařízení po dobu jeho provozu v technické praxi. [5]

Maziva jsou záměrně vpravována mezi funkční plochy těles. Měla by mít schopnost vytvořit mezi povrchy souvislou mazací vrstvu s dobrou přilnavostí a malým vnitřním třením a zabránit tak bezprostřednímu styku povrchů ve vzájemném pohybu a zmenšit tření mezi nimi a jejich opotřebení.

Maziva musí být chemicky stálá, nepůsobit korozivně na třecí plochy ani na ostatní části, (např. na pryžová těsnění). [2]

K dalším požadavkům, které mají maziva splňovat, patří [5]:

- snížení ztrát mechanické energie a zlepšení mechanické účinnosti systému
- snížení nebo potlačení opotřebení a jeho škodlivých účinků na tribologický systém
- zlepšení odvodu tepla a dostatečné chlazení
- dostatečná ochrana proti korozi a chemická neutralita
- ochrana proti nečistotám, které se mohou vnášet do systému zvenku a schopnost zbavovat třecí plochy vytvořených nečistot
- působení maziva jako těsnícího prostředku

V řadě případů je výhodné použít jako mazivo přímo to médium, které je zařízením přepravováno, zpracováváno nebo je v bezprostředním okolí. Příkladem může být mazání pryžových ložisek rozrušovací frézy sacího bagru vodou nebo mazání ložisek elektromotoru a čerpadla vodního vytápění vodou. [2]

5.2 Rozdělení maziv

V současné době existuje celá řada maziv. S vývojem společnosti se budou vyrábět stále nová maziva pro speciální účely (atomová energetika, kosmonautika, letecký průmysl, výpočetní technika atd.).

Maziva můžeme klasifikovat podle různých hledisek [5]:

V technické praxi se maziva dělí na:

- plynná
- kapalná
- plastická
- tuhá

Z hlediska chemického složení rozdělujeme maziva na:

- organická
- anorganická

Podle původu dělíme maziva na:

- přírodní
- syntetická

5.2.1 Plynná maziva

Plynná maziva se užívají omezeně při aerostatickém nebo aerodynamickém mazání kluzných ložisek a uložení hřídelů s velmi vysokou rychlostí otáčení při malých zatíženích, pro podobné podmínky za vysoké teploty (hraniční teplota se udává $t = 300 \text{ }^\circ\text{C}$) nebo v podmínkách nebezpečného záření či chemické agresivity. [2]

V uvedených uloženích se využívají vlastnosti plynů a jejich směsí, jako jsou [5]:

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

Mazání plynem může být výhodné u čerpadla, kompresoru či vývěvy, je-li k mazání použito přepravované či zpracovávané plynné médium (zkapalňovací nebo chladící zařízení). Plyny mají malou hustotu a malou viskozitu. Jejich viskozita s teplotou vzrůstá. Použití plynného maziva vyžaduje vysokou přesnost a pečlivé provedení třecích uzlů a vysokou úroveň konstrukčního řešení. Vyžaduje také velmi dokonalé odloučení nečistot a vlhkosti užitého plynu, obvykle atmosférického vzduchu. [2]

Nedostatky plyných maziv jsou především nestabilita a vznik turbulentního proudění, dále vysoké nároky na přesnost výroby i montáže kluzné dvojice a možnost výskytu tření tuhých těles při porušení existence podmínek aerostatického nebo aerodynamického mazání. [5]

5.2.2 Kapalná maziva

Kapalná maziva jsou v současné době nejrozšířenějším druhem maziv, jejichž hlavní výhodou je široký sortiment, umožňující použití v celé oblasti kapalného a smíšeného tření, tj. při hydrodynamickém, hydrostatickém, elastohydrodynamickém mazání a při mazání v podmínkách smíšeného tření. [5]

Jako kapalná maziva se užívají [2]:

- a) Chemicky jednoznačné látky – sloučeniny jako voda, glycerin, které jsou určeny pro některé specifické podmínky; voda pro pryžová ložiska v zavodněném prostoru, kyselina sírová H_2SO_4 pro mazání kompresoru stlačujícího chlór.
- b) Homogenní směsi – rostlinné, minerální a syntetické mazací oleje.

- c) Kapalně disperze – rozptýlení částic jedné či více látek v jiné látce; emulze (disperze minerálního oleje ve vodě), suspenze (disperze pevných látek v kapalinách, koloidní grafit nebo sirník molybdeničitý MoS_2 v minerálním oleji).

Nejdůležitějším a nejrozšířenějším kapalným mazivem jsou maziva ze skupiny homogenních směsí – oleje získané z ropy. Vzhledem k chemické nestálosti nejsou užívány jako maziva rostlinné oleje a tuky živočišného původu.

Oleje dělíme na 2 základní skupiny [5]:

- Ropné oleje – získávají se z ropy destilací, rafinací a odparafinováním a jsou homogenní směsí. Jejich vlastnosti jsou upravovány malým množstvím přísad.
- Syntetické oleje – svým složením jsou určeny na mazání ve sťažených podmínkách, kde nevyhovují minerální oleje (vysoké teploty, agresivní prostředí apod.).

Vlastnosti minerálních olejů se mohou měnit a zlepšovat různými zušlechťujícími přísadami (aditivy). Zušlechťující přísady mají zejména způsobit [2]:

- 1) Zvýšení pevnosti mazací vrstvy, tzn. zvýšení přilnavosti oleje k povrchu kluzných ploch, čehož lze dosáhnout mastnými přísadami ve formě mastných kyselin, případně rostlinných nebo živočišných tuků (tzv. maštěné oleje), což však vede ke snížení chemické stálosti a trvanlivosti.
- 2) Zvýšení viskozitního indexu vlivem přísad polymerů (menší změny viskozity s teplotou v důsledku přidání tzv. modifikátorů viskozity).
- 3) Snížení bodu tuhnutí použitím přísad metylmetakrylátů (depresantů).
- 4) Zlepšení chemické stálosti přidáním antioxidačních aditiv (oxidačních inhibitorů).
- 5) Uvolnění usazenin produktů stárnutí a chemických změn oleje docílené přidáním detergentů a diverzantů pro rozptýlení těchto usazenin.
- 6) Zabránění koroze některých ložiskových materiálů vytvořením absorbovaného filmu na kovovém povrchu a neutralizací kyselých látek (antioxidanty).
- 7) Odstranění pění olejů přidáním srážeců pěny, tzn. některého silikonového oleje.
- 8) Zvýšení přilnavosti mazací vrstvy i za vyšších teplot přísadami, které chemicky reagují s povrchem kluzných ploch a vytvářejí sloučeniny zabraňující vzniku mikro-

svarů (jsou to síra a její sloučeniny s Cl, P, Pb, Zn); tyto přísady jsou označovány EP = Extreme Pressure.

Z technického hlediska jsou rozhodující především funkční vlastnosti maziv, zejména viskozita, hustota, kompresibilita, tepelná vodivost a specifická tepelná kapacita. Mazací oleje, jako reálné kapaliny, se odlišují od ideální kapaliny tím, že závisí na teplotě a tlaku.

Viskozita je parametrem maziva, funkčně závisí na teplotě a tlaku. Na rozdíl od plynů, u kapalin dynamická viskozita, se stoupající teplotou klesá a se stoupajícím tlakem vzrůstá.

Hustota je hmotnost definovaného objemu látky, při vztažené teplotě a tlaku (20 °C a 0,1 MPa).

Kapalná maziva mají malou míru kompresibility, přičemž pod kompresibilitou rozumíme vlastnost kapaliny zmenšit svůj objem působením tlaku. Rozlišujeme adiabatickou a izotermickou kompresibilitu.

Většina mechanických ztrát se při procesu tření mění na třecí teplo. Tepelná vodivost jako specifická tepelná kapacita použitých maziv má tedy velký význam při navrhování systému chlazení. Tepelná vodivost vyjadřuje schopnost vést teplo. [5]

Další vlastností je maznost, což je pevnost a přilnavost mezní vrstvy maziva, čili schopnost zmenšit tření a zabránit opotřebení. Oleje jsou z tohoto hlediska hodnoceny různými způsoby. U nás se nejčastěji setkáváme s porovnáním pomocí hodnoty označované ČKS, která vyjadřuje pevnost mazacího filmu. [2]

U mazacích olejů se uvádí i bod tuhnutí, tzn. nejvyšší teplota, při které olej ztrácí tekutost a mění se v mazlavou polotuhou hmotu. Dále se udává bod vzplanutí v otevřeném kelímku, tj. nejnižší teplota, při které páry nad hladinou oleje vzplanou při přiblížení plamene. Chemická agresivita oleje, především vůči pryži, užívané na různá těsnění je charakterizována anilinovým bodem. To je teplota, při níž se rozdělí (zakalí) stejnorodá směs oleje a anilinu. Oleje přicházející do styku s pryžovými těsněními mají mít anilinový bod minimálně 70 °C.

Chemické působení oleje jako slabé kyseliny udává neutralizační číslo. Je to množství hydroxidu draselného KOH a Mg potřebné pro neutralizaci kyselých složek v 1 g oleje. Obdobná zkouška udává tzv. číslo zmýdelnění. [2]

Vlastnosti olejů můžeme posuzovat z rozdílných hledisek. Při zohlednění požadavků kladených na oleje se mohou jejich vlastnosti komplexně rozdělit na [5]:

- funkční
- elektrické
- termické
- životnostní
- povrchové
- fyziologické - ovlivňují kvalitu oleje

Kromě olejů určených k mazání strojů jsou vyráběny oleje řezné a emulgační, které se používají při obrábění kovů, kde kromě funkce mazání a snižování odporu plní funkci chladiwa. Pro oblasti použití jsou vyráběny mazací oleje např. letecké, automobilové, průmyslové. Pro použití olejů v některých případech je zapotřebí určit tzv. karbonizační zbytek a stanovit obsah popela.

V provozu minerální oleje stárnou, mění se chemicky vlivem přítomnosti chemicky aktivních látek ve vzduchu a v dalších hmotách, s nimiž se oleje stýkají, mění se účinkem provozní teploty a světla. Oleje jsou znehodnocovány pevnými částicemi opotřebením a dalšími úsadami. Minerální oleje mění do určité míry při dlouhodobém hnětení a mechanickém namáhání své fyzikální vlastnosti. Děje se tak v důsledku změn molekulární struktury mechanickými vlivy. Z tohoto důvodu se může viskozita a mazací schopnost oleje změnit oproti původní hodnotě až o 25 % či případně i o 50 %. [2]

Kromě mazání slouží oleje i k odvádění tepla, které vzniká třením.

5.2.3 Plastická maziva

Plastická maziva (mazací tuky) jsou koloidní soustavy podskupiny gelů, zředka rosolů. Makroskopicky jsou máslovité, vláknité, houbovitě nebo zrnité. Skládají se z kapalně fáze, kterou vytváří mazací olej a z tuhých částic disperzní látky. [5]

Vyrábějí se smícháním a vařením mazacího oleje se zahušťovadlem. Jako zahušťovadlo jsou přidávána mýdla, anorganické látky (bentonit, silikagel), organické polymery (poly-močovina, polyamidy aj.), pigmenty, uhlovodíky (parafiny, vosky).

Plastická maziva jsou používána s výhodou v některých případech, kde by použití mazacího oleje značně komplikovalo konstrukci a prodražilo provoz. [2]

Použití plastického maziva je výhodné např.[2]:

1. U těžko přístupných ložisek, kde je třeba zajistit mazání alespoň částečně na delší dobu.
2. V prašném, vlhkém nebo chemicky agresivním prostředí, kde plastické mazivo utěsní ložisko proti vnikání látek z okolí.
3. Je-li třeba vytvořit odstříkovaní oleje, neboť olej by mohl znehodnotit výrobek nebo narušit funkci některé části zařízení.
4. Při malých kluzných rychlostech a velkých tlacích a teplotách.

Všeobecně jsou určena na krátkodobé mazání s delšími mazacími intervaly, s výjimkou valivých ložisek, neboť v tomto případě je ložisko při montáži naplněno plastickým mazivem a někdy není tato náplň obnovena po celou dobu technického života ložiska. [5]

Plastická maziva zůstávají na kluzných plochách stále a chrání kluzné plochy před korozi.

Volba druhu plastického maziva závisí od [5]:

- rozsahu teplotního použití
- stálosti proti hnětení
- odolnosti proti vodě
- ochranných schopností proti korozi
- provozní trvanlivosti v závislosti od teploty použití

Charakteristickou veličinou vyjadřující vlastnosti plastických maziv je penetrace, resp. konzistence, která vyjadřuje stupeň tuhosti plastických maziv a rozděluje se do devíti konzistenčních stupňů 00 až 7 (značí 00 tekuté, 0 velmi měkké, 1 měkké, 2 poloměkké, 3 střední, 4 polotuhé, 5 hutné, 6 velmi hutné a 7 tuhé). Penetrace je hloubka vniknutí normalizovaného zkušebního kužele vlivem vlastní hmotnosti do vzorku maziva při teplotě 25 °C za definovaný čas. Hloubka se měří v desetinách milimetrů. [5]

Odolnost teplotě udává bod skápnutí, teplota, při níž mazivo ztrácí konzistenci a stává se tekutým. Viskozita je závislá na teplotě a na gradientu rychlosti a bývá uváděna jen výjimečně. Plastické mazivo odvádí teplo, které třením vzniká, jen v malé míře. Proto se pro mazání přesných kluzných uložení při větších kluzných rychlostech plastické mazivo neupravuje. [2]

Podle stálosti se plastická maziva dělí na [5]:

- Tepelně stálá maziva – jejich struktura se vlivem teploty nerozruší nebo se po vychladnutí opět obnoví.
- Mechanicky stálá maziva – jejich reologické vlastnosti se v roztroušeném i neroztroušeném stavu málo odlišují.
- Koloidně stálá maziva – rozpadají se na viskózní fázi a nerozpustný koloid – xerogél.

Dále se plastická maziva dělí podle typu zahušťovadla (zpevňovadla), které obvykle výrazněji ovlivňuje vlastnosti maziva na oleje, na [5]:

- mýdlová
- nemýdlová
- uhlovodíková
- halogenová

Při použití plastických maziv je potřeba zohlednit skutečnost, že plastická maziva různých druhů se mohou navzájem nesnášet a způsobit vážné poškození zařízení.

5.2.4 Tuhá maziva

Tuhá maziva jsou používána jako složky plastických maziv nebo mazacích olejů, anebo jsou používána v podmínkách smíšeného tření, kde nelze použít kapalně nebo plynně mazivo a není vhodné mazání plynem. Taková situace nastává při velkých zatíženích kluzných kontaktů za vysokých teplot, ve velmi prašném prostředí, při nedostatečné ochraně před působením atmosférických vlivů. [2]

Tuhá maziva můžeme rozdělit na 2 skupiny [2]:

- Anorganická – jsou to přírodní produkty jako grafit, sirník molybdenu MoS_2 , obě maziva se uplatňují jako maziva nebo jako přísady do olejů a plastických maziv. Ve speciálních případech byly použity i sirníky dalších kovů (Ti, Zn, W), fluorid uhlíku, některé halogenidy a měkké kovy (Pb, Sn, In).
- Organická – jsou polymerní látky, pro praktické využití je nejdůležitější plast tetrafluoretylen (teflon). Patří sem i mýdla, mastné kyseliny, tuky a vosky.

Tuhá maziva se obvykle aplikují ve formě prášku (krystalický grafit, technický MoS_2) nebo ve formě pasty či plastického maziva s přídavkem oleje nebo plastického maziva. Tuhá maziva mají malou tvrdost a smykovou pevnost a vysokou afinitu ke kovům. Snášejí vysoké teploty a nemění své vlastnosti s tlakem a teplotou (bod tání grafitu je $3500\text{ }^\circ\text{C}$, molybden-disulfidu $1180\text{ }^\circ\text{C}$). [2]

Nevýhodou tuhých maziv je poměrně nízká tepelná vodivost – špatně odvádí vznikající teplo při tření.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem praktické části bakalářské práce bylo měření tribologických (třecích) vlastností modifikovaného polypropylenu. Zkušební tělesa byla připravena vstřikováním z neplněného polypropylenu a následně ozářena dávkami záření 0, 33, 66, 99 kGy (ionizačním elektronovým zářením beta). Měření třecích vlastností bylo na každém zkušebním tělese provedeno 9x. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

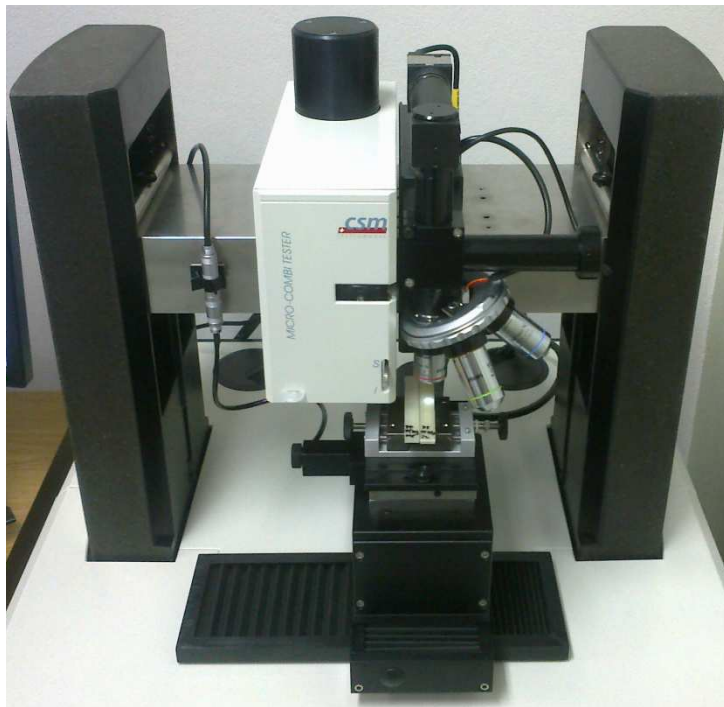
Cíle bakalářské práce byly následující:

- 1) Vypracování literární studie z oblasti tribologie
- 2) Příprava zkušebních vzorků na experimentální část
- 3) Provedení experimentu
- 4) Vyhodnocení naměřených hodnot

7 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A PRINCIP MĚŘENÍ

7.1 Měřicí zařízení

Měření probíhalo pomocí mikro-vrypového testu na Micro Combi testeru od firmy CSM Instruments. Toto měřicí zařízení se používá k určení životnosti samomazných povrchů a chování tření a opotřebení pevných materiálů nebo tvrdých povrchů s měnícím se časem, tlakem kontaktu, rychlostí, teplotou, vlhkostí a mazivy. Je to stolní přístroj, který je kompaktní a může být na libovolném stabilním stole. S jeho kombinovaným ovládním z počítače a softwarem TriboX představuje snadno použitelný nástroj pro všechny laboratoře, které mají zájem o provádění vrypových testů. [15]



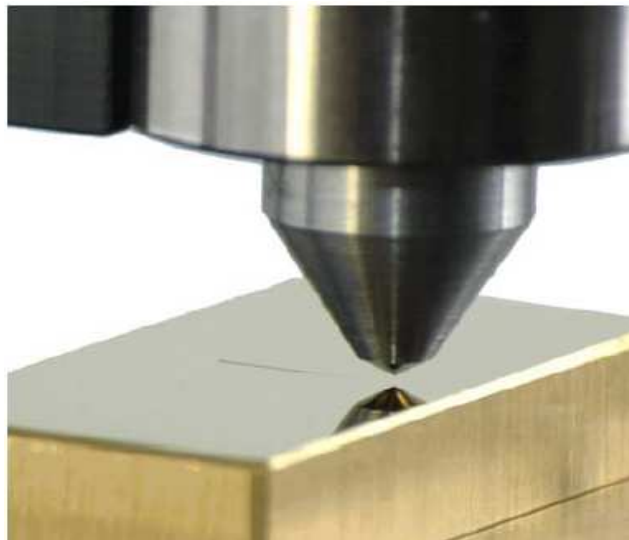
Obr. 22. Mikro-vrypový tester

7.2 Princip měření

Mikro-vrypový tester slouží k určení koeficientu tření a otěru zkoumaných vrstev. Princip spočívá v přímočarém pohybu indentoru (Rockwellův kužel) po zkušební vzorku. Indentor je používán na tuhé páce a navržen pro přenos síly bez tření. Je zatížen přesně definovanou silou a vzorek se otáčí konstantní rychlostí. Při pohybu indentoru se výsledná třecí síla působící mezi vzorkem a indentorem měří pomocí velmi malých odklonů páky na sen-

zoru LVDT. Přímým výsledkem měření je graf závislosti koeficientu tření na vzdálenosti (resp. počtu otáček). Po přiblížení optickým mikroskopem lze po testu zjistit velikost a charakter opotřebení indentoru. Rychlost opotřebení vrstev se určuje s pomocí profilometru, na kterém se měří velikost vytvořené vrypové stopy na vzorku. [15]

Tato jednoduchá metoda umožňuje stanovení a zkoumání tření a opotřebení pro téměř každou kombinaci pevných materiálů. [15]



Obr. 23. Vrypový princip

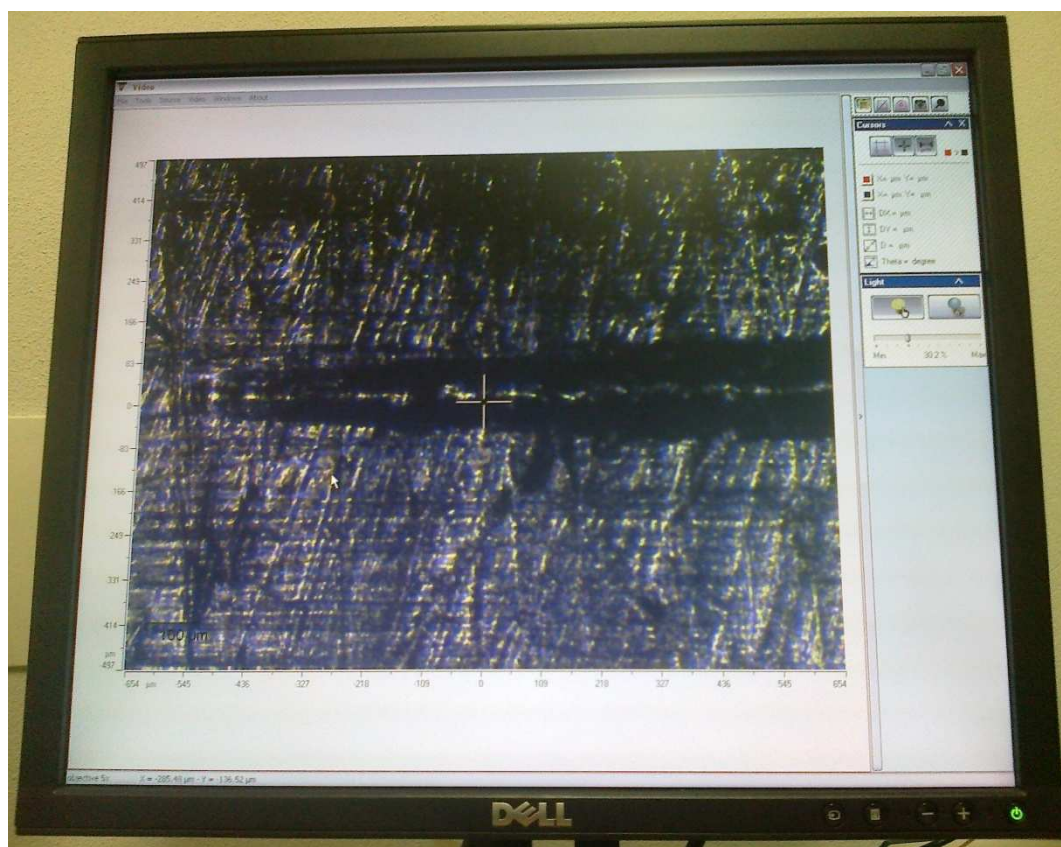
Kompletní sestava tribometru zahrnuje [15]:

- CSM tribometr
- rozhraní k PC
- počítač
- kompletní software pro provoz a analýzu dat (Win XP)
- příslušenství (držák kolíku, držák kuličky, nádobku na mazivo, závaží, kalibrační sadu)

Rozměry tribometru [15]:

Tribometr: 500 x 320 mm, výška 550mm

PC rozhraní: 500 x 300 mm, výška 50mm



Obr. 24. Zaostrěný vryp ve vzorku po přiblížení mikroskopem

8 MATERIÁLY

Pro praktickou část bakalářské práce bylo nutné zajistit vhodné zkušební tělesa, jejich výrobu provedla německá firma PTS Plastic Technologie Service, Hautschenmühle 3, Adelshofen, Deutschland. Pro měření je použit modifikovaný polypropylen. Jedná se o neplněný polypropylen. Zkušební vzorky byly připraveny vstříkáním následně ozářeny dávkami záření 0, 33, 66 a 99 kGy (ionizačním elektronovým zářením beta). Připravená tělesa podstoupila následně sérii měření.

Polymery jsou přírodní nebo syntetické látky. Syntetické polymery se vyvinuly v první polovině 20. století a v současné době jsou používány ve všech oborech lidské činnosti. Polymery jsou chemické látky, které ve svých velkých molekulách označovaných jako (makromolekuly), obsahují atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku, chloru a jiných prvků. Výrobky z polymerů se nacházejí většinou v tuhém stavu. Jemu předchází stav kapalný, který je pro zpracování polymerů charakteristický. Pro zpracování polymerních materiálů je typické využití vyšších teplot a tlaků, které umožňují zpracovat taveninu do požadovaného tvaru, který je i tvarem konečného výrobku. [16]

Polymery se dělí na [16]:

- Elastomery – jsou vysoce elastické polymerní materiály, které je možné s použitím poměrně malých sil značně deformovat, aniž by došlo k jejich porušení. Deformace je vratná. Typickým příkladem je pryž vyrobená z kaučuku.
- Termoplasty – jsou za běžných podmínek houževnaté, tvrdé a křehké. Při zvýšených teplotách se stávají plastickými a tvarovatelnými a jejich změny jsou vratné a opakovatelné. Typickým příkladem je polyethylen, polypropylen nebo polystyren.
- Reaktoplasty – jsou za běžných teplot tuhé, tvrdé a křehké a nejsou schopny tvarování při zvýšených teplotách. Typickým příkladem je epoxidová pryskyřice.

8.1 Modifikované polymery

Modifikace polymerů zahrnuje velký počet způsobů fyzikálních a chemických přeměn polymerů. Jedná se o záměrnou přeměnu polymerů prováděnou za účelem získání nového polymerního materiálu s odlišnými vlastnostmi. Vzhledem ke stále stoupajícím nárokům na vlastnosti polymerů v souvislosti se stále se rozšiřujícími oblastmi jejich použití význam modifikace polymerů neustále vzrůstá. [17]

K získání modifikovaných polymerů se používá těchto základních způsobů [17]:

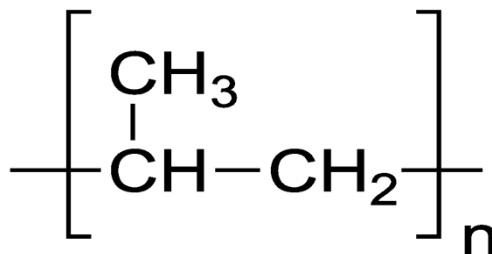
- Fyzikální modifikace - mechanickým smíšením dvou a více polymerů vznikají směsi s vynikajícími mechanickými vlastnostmi.
- Mechanochemické modifikace – mechanickou cestou, např. intenzivním hnětením, za podmínek a přítomnosti látek usnadňujících destrukci, vzniknou reaktivní úseky polymerních řetězců, které se buď navzájem propojí, nebo zreagují s přítomným monomerem schopným polymerace.
- Chemické modifikace – na základě chemických reakcí účinných látek s reaktivními skupinami polymerních řetězců.

8.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen (PP) je jeden z ekonomicky nejdůležitějších termoplastických polymerů ze skupiny polyolefinů. Prodává se pod obchodním názvem *Triplen*, *Tatren*, *Mosten* atd. Polypropylen je bezbarvý polymer, fyziologicky nezávadný, bez zápachu a plave ve vodě. Výborné mechanické vlastnosti polypropyleny souvisejí s jeho pravidelnou strukturou. Vyznačuje se velkou tvrdostí, pevností a tepelnou odolností, jeho hustota je $0,90 \text{ g/cm}^3$. Snáší i krátkodobé ohřátí na teplotu $140 \text{ }^\circ\text{C}$. Za zvýšených teplot má polypropylen sklon k autooxidaci, a musí se proto stabilizovat. Polypropylen má malou propustnost pro vzduch, plyny a páry, proto je tento materiál výhodný pro použití v obalové technice. [18]

Polypropylen je krystalický polymer o stupni krystalinity 60 až 75 %. Vzhledem ke své krystalinitě je neprůhledný. Bod tání je $176 \text{ }^\circ\text{C}$. Při teplotě $90 \text{ }^\circ\text{C}$ se rozpouští v chlorovaných a aromatických uhlovodících. [19]

Polypropylen má hlavní řetězec tvořen uhlíkovými atomy, přičemž na každém druhém uhlíku je vázána methylová skupina [20]:



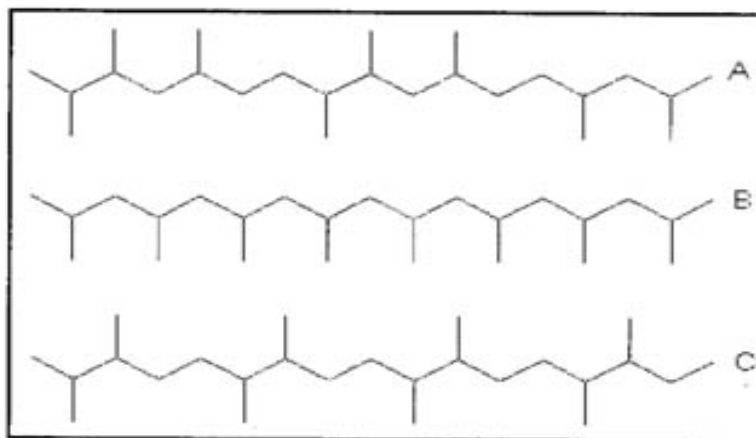
Obr. 25. Struktura polypropylenu

Výchozí surovinou pro výrobu polypropylenu je nenasycený uhlovodík propylen $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$, který se polymeruje. Zdrojem propylenu je propan, obsažený jak v zemním plynu, tak v rafinačním plynu při zpracování ropy. Tepelným krakováním při teplotě $750\text{ }^\circ\text{C}$ se převádí v propylen. [18]

Výrobní postup se skládá z vlastní polymerace propylenu, z extrakce podílu ataktického polymeru, filtrace extrahovaného polymeru, následujícího odstranění zbytku katalyzátorů a sušení. V další části se vyčištěný polymer homogenizuje s přísadami (stabilizátory, antioxydanty, barvivy) a po granulaci se balí a expeduje. Polymerace propylenu probíhá v polymerátoru při nízkém tlaku, mírně zvýšené teplotě (50 až $100\text{ }^\circ\text{C}$) a za iniciačního účinku stereospecifických katalyzátorů v reakčním prostředí vhodných rozpouštědel. Stereospecifické polymerační katalyzátory tvoří zpravidla systém dvou nebo tří složek, obsahující chlorid titanitý jako katalyzátor, alkylaluminium (triethylaluminium) jako aktivátor a někdy ještě vhodnou přísadu ovlivňující řetězení a molekulovou hmotnost polymeru. Tyto složky jsou rozpouštěny nebo suspendovány ve vhodném rozpouštědle. Katalyzátor a rozpouštědlo ovlivňují výtěžek izotaktického podílu i všechny vlastnosti polymeru. V praxi je důležité, aby podíl izotaktické složky byl alespoň 90% , v případě vláken $95 - 97\%$. [18]

Podle podmínek, za nich polymerace probíhá, mohou vzniknout tři různé typy polymerů, které Natta nazval ataktický, izotaktický a syndiotaktický polymer. U ataktického polymeru jsou methylové skupiny propylenu uloženy nepravidelně, podél hlavního uhlíkatého řetězce makromolekuly. U izotaktického polymeru jsou methylové skupiny propylenu pra-

videlně seřazeny podél téže strany hlavního uhlíkatého řetězce. U syndiotaktického polymeru se methylové skupiny pravidelně střídají po obou stranách tohoto řetězce. [18]



Obr. 26. Molekulární struktura polypropylenu [21]

- A) ataktický polypropylen
- B) izotaktický polypropylen
- C) syndiotaktický polypropylen

Tab. 1. Porovnání vlastností izotaktického, syndiotaktického a ataktického PP [19]

Vlastnosti	Ataktický	Izotaktický	Syndiotaktický
Hustota [g/cm^3]	0,85 - 0,90	0,92 - 0,94	0,8 - 0,91
Bod tání [$^{\circ}\text{C}$]	-	165	135
Rozpustnost v uhlovodíku při 20 $^{\circ}\text{C}$	vysoká	nerozpouští se	střední
Pevnost	velmi nízká	vysoká	střední

Často se polypropylen plní vyztužujícím plnivem, hlavně skleněnými vlákny, které zlepšují jeho mechanické vlastnosti. Pro své mimořádné vlastnosti se polypropylen uplatňuje v řadě technicky náročných aplikací i při výrobě spotřebního zboží. Vstřikované výrobky mají nejrůznější použití. Pro svou tuhost, mechanickou pevnost a dobré elektroizolační vlastnosti jsou vhodným materiálem zejména na technické výlisky v automobilovém průmyslu. Dobrá tekutost polypropylenu při zpracování umožňuje výrobu velmi komplikovaných, technicky náročných výlisků, vhodných pro elektrotechniku. Výborná tepelná odolnost i proti sterilizačním teplotám je výhodná pro zdravotnické výrobky. Vyrábí se z něho dílce

injekčních stříkaček, hadiček, součásti přístrojů, mísy pro nemocné apod. Významné je také jeho uplatnění při výrobě spotřebního zboží. Dělají se z něho hračky, kbelíky, součásti vysavačů, ventilátorů aj. Fólií se používá k balení potravin i textilních výrobků. Tuhost fólie je výhodná při balení na balících automatech. Svůj význam mají tyto fólie i jako izolační materiály v elektrotechnice. Desky se používají v chemickém průmyslu k vykládání chemických zařízení. Polypropylenových trubek se využívá na vedení kapalin, vody nebo chemikálií za vyšších teplot. Jako technická vlákna se polypropylen uplatňuje při výrobě technických tkanin (pytle). Pro svou vynikající odolnost proti oděru jsou tato vlákna vhodná pro výrobu koberců. [18]

9 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ

Síťování polymerů patří mezi chemické modifikace polymerů. Chemická struktura polymerů se mění působením účinných chemických látek nebo reakčního prostředí. Pod tímto pojmem si můžeme představit reakci nízko nebo vysokomolekulárních látek neboli vzájemné spojování polymerních řetězců. Při tom vzniká trojrozměrná prostorová síť neboli gel, protože makromolekulární řetězce jsou ohromně dlouhé, stačí přidat jen velmi malé množství síťovacího činidla, aby molekulová hmotnost polymeru vzrostla nekonečně. Takto zasíťovaný polymer je netavitelný, nerozpustný (v rozpouštědle pouze bobtná, tj. zvětšuje svůj objem) a ztrácí termoplasticitu. Naopak získává tvarovou stálost za zvýšených teplot a má vyšší odolnost vůči chemikáliím. Velkou roli hraje také hustota zasíťování. Čím je hustota větší, tím obtížněji do něj pronikají nízkomolekulární látky. Ke vzniku prostorové sítě polymeru dochází různými způsoby [17]:

- Polykondenzací nebo polyadící tři a více funkčních monomerů.
- Kopolymerací monomerů, z nichž alespoň jeden má vyšší funkčnost než 2.
- Zabudováním příčných vazeb mezi lineární nebo rozvětvené makromolekulární řetězce.
- Vzájemnou reakcí makromolekulárních řetězců s vhodnými reaktivními skupinami.
- Pomocí ionizačního záření.

Síťování lineárních polymerů je charakteristické především pro kaučuky, mluvíme o tzv. vulkanizaci (procesu poskytující pryž). V poslední době se síťování průmyslově uplatňuje i u jiných lineárních polymerů (polyethylenu, polypropylenu a polyvinylchloridu), kterým tento proces dává tvarovou stálost za zvýšených teplot a zlepšení fyzikálně-chemických vlastností. [17]

Tento chemický proces síťování může být u mnohých plastů spuštěn beta nebo gama zářením. Energie ze záření je materiálem absorbována a vznikají radikály, které spolu reagují a při následné chemické reakci vytváří očekávané spojení. Jelikož jsou pro síťování polymerních materiálů potřebné relativně vysoké dávky záření, používá se v současné době převážně ionizační elektronové - beta záření. [22]

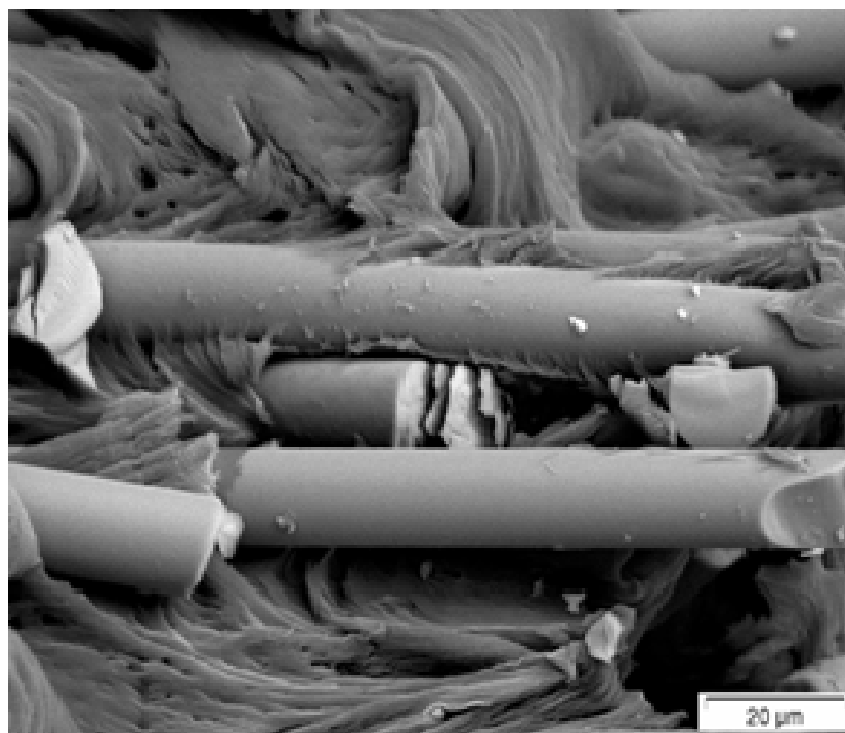
9.1 Síťování ionizačním zářením

U tohoto síťování je základní předpoklad, že se materiál při působení ionizačního záření síťuje a ne degraduje. Jedná se o fyzikální metodu a není většinou potřeba používat chemické přísady (například u PP se používá síťovací činidlo TAIC). Hlavním předpokladem je přítomnost tří a více funkčních monomerů. Interakcí záření s polymerem vznikají polymerní radikály (rozpad vazeb C-H), ty pomocí rekombinace v řetězci vytvoří síť a to spojením dvou volných radikálů mezi sousedními řetězci za vzniku vazby C-C.

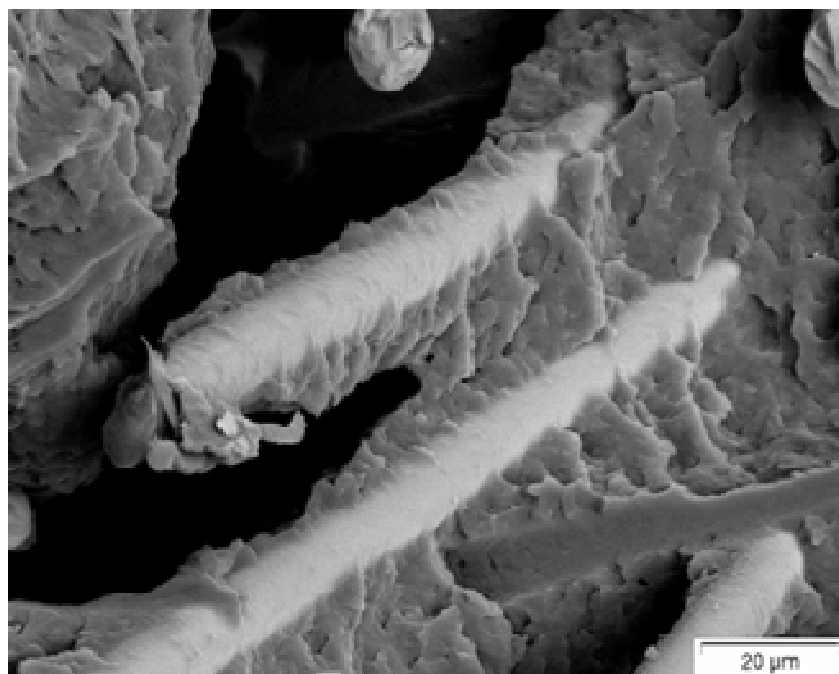
Ionizační záření způsobuje ionizaci látky (šíření energie prostorem) buď přímo, nebo prostřednictvím sekundárního záření. Při průchodu hmotou ztrácí záření svoji energii. Dělí se na elektromagnetické a korpuskulární záření. [22]

Elektromagnetické záření má tvar příčné vlny charakterizované dvěma na sebe navzájem kolmými vektory (intenzitou elektrického pole a magnetickou indukcí). Mezi toto záření patří například záření gama γ (radioaktivní záření), rentgenové záření, optické záření, sluneční záření, rádiové vlny aj.

Korpuskulární záření je druh částicového záření, které představuje proud částic s nenulovou klidovou hmotností (α , β , jaderné a neutronové záření). Záření α (proud heliových jader). Záření beta je tvořeno rychlými elektrony. Vzniká při přeměně mnoha přírodních i umělých radionuklidů. Částice β jsou mnohem lehčí než částice α , proto se při stejné energii pohybují rychleji, při průchodu prostředím daleko méně ionizují a mají větší dosah záření. [22]



Obr. 27. Struktura neozářeného materiálu [22]



Obr. 28. Struktura ozářeného materiálu [22]

9.2 Síťovací činidlo polypropylenu

Pro přípravu vzorků byl použit materiál polypropylen, který obsahoval speciální síťovací činidlo s označením TAIC. Toto činidlo umožní při ionizačním ozařování základního materiálu, aby se jednotlivé volné radikály polypropylénu chemicky navázaly na dané činidlo TAIC a vytvořil se tak určitý stupeň krystalizace (ten je závislý na dávce ozáření). Síťovací činidlo TAIC (ve formě granulí) bylo implementováno do polypropylénu v množství 3 - 5 objemových procent. Celkový proces přípravy prováděla firma PTS Plastic Technologie Service, Hautschmühle 3, Adelshofen, Deutschland. [22]

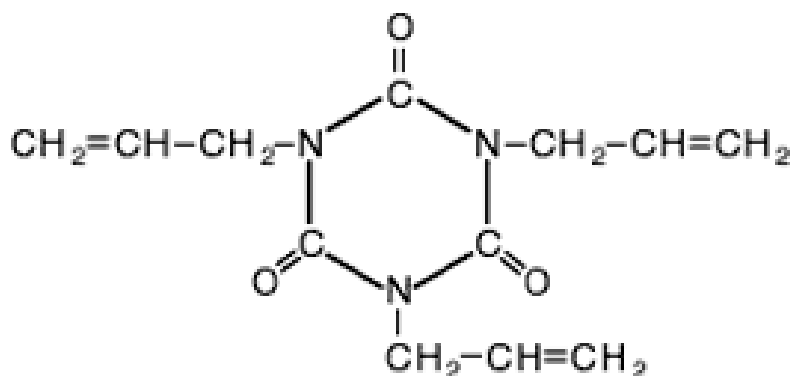
TAIC – Triallylisocyanurate [22]:

Tab. 2. Množství vazeb vyskytujících se v molekule TAIC – Triallylisocyanurat

Molární hmotnost	249 g/mol
Množství dvojných vazeb v molekule	3 g/mol
Množství dvojných vazeb ve 100 g (mol)	1,2 g/mol

Tab. 3. Chemicky – fyzikální vlastnosti TAIC – Triallylisocyanurat [23]

Chemický vzorec	$C_{12}H_{15}N_3O_3$
Vzhled	slabě nažloutlá kapalina nebo pevná látka
Viskozita	80 - 110 m Pa·s (30 °C)
Bod tání	23 - 27 °C
Vlhkost	Max 0,1 %



Obr. 29. Chemická struktura monomeru TAIC [23]

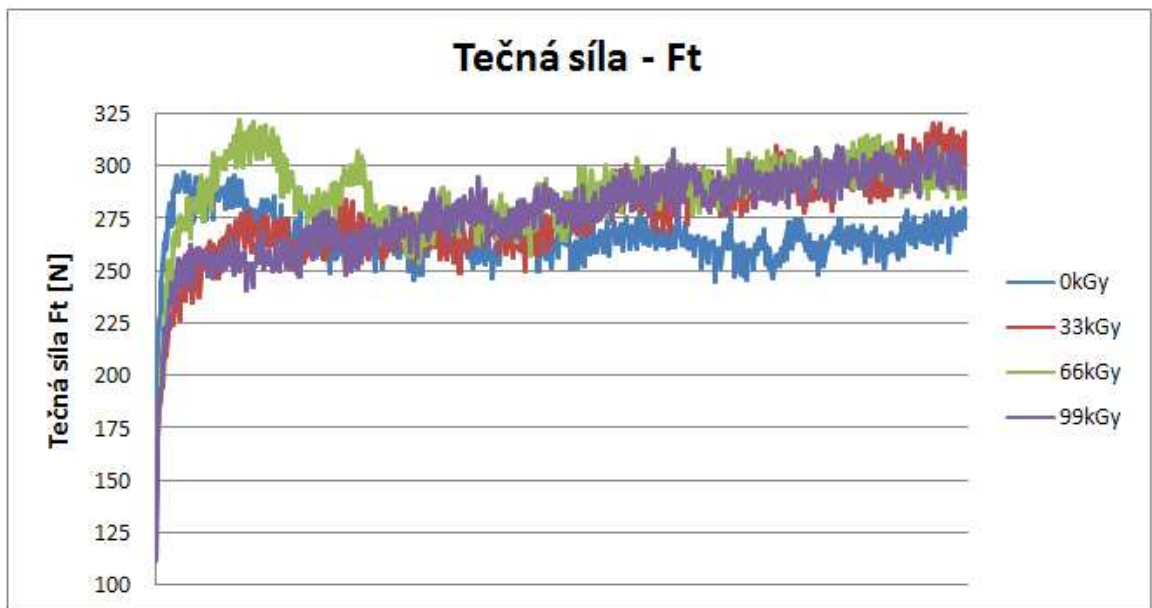
10 NAMĚŘENÉ A ZPRACOVANÉ HODNOTY

Dávka:

Absorbovaná energie záření/hmoty: Gy (Gray) $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg} = 100 \text{ rad}$

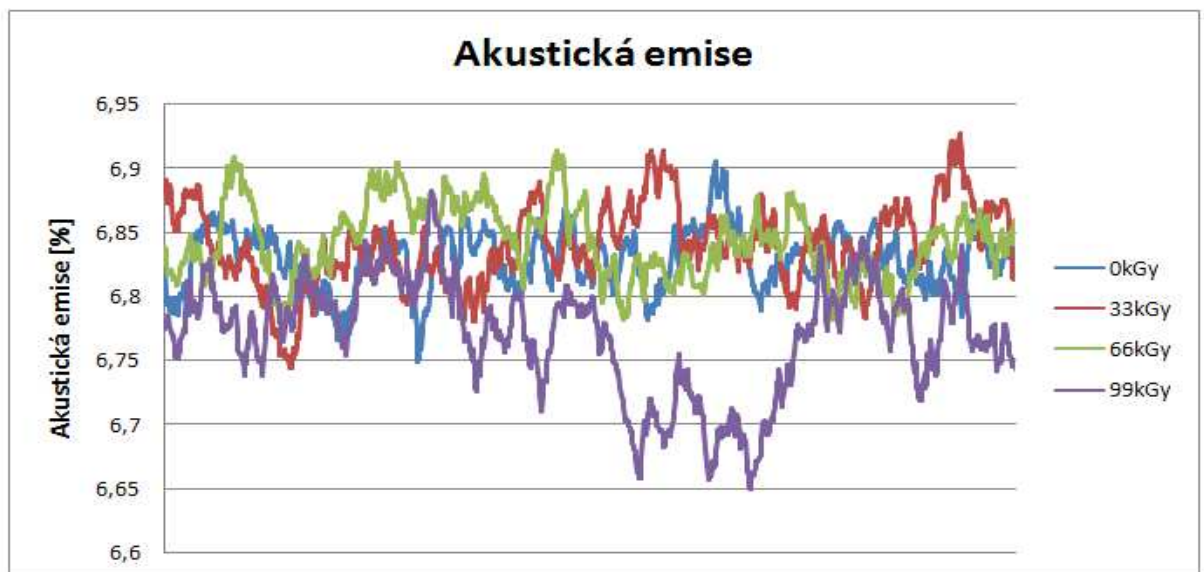
Dávková intenzita:

Absorbovaní energie záření za čas: Gy/s (Gray za sekundu) $1 \text{ Gy/s} = 1 \text{ Watt/kg}$



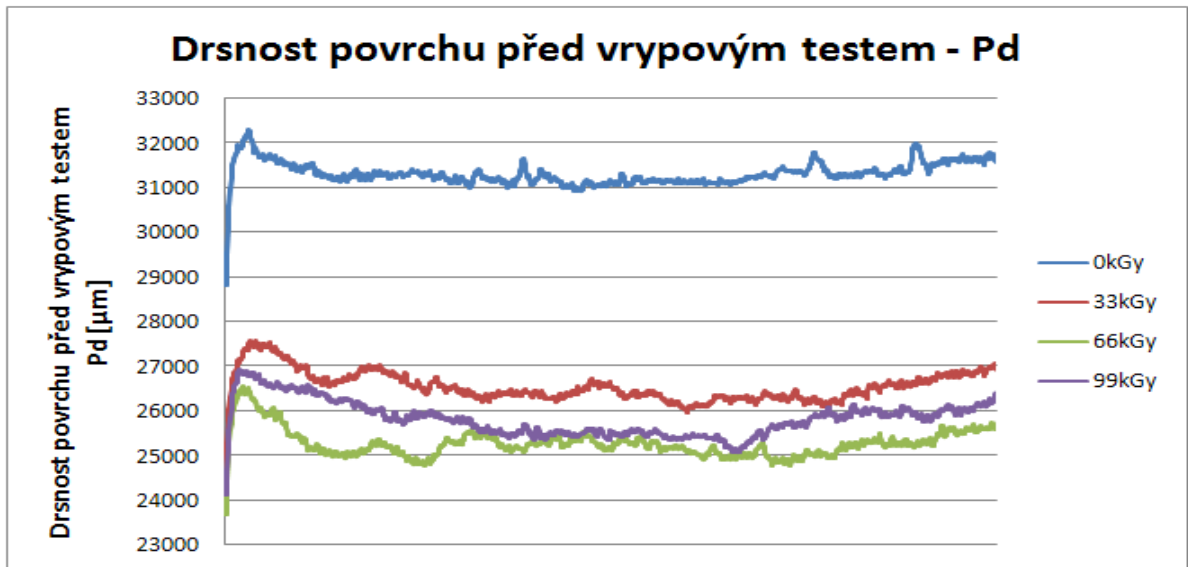
Obr. 30. Tečná síla při konstantní zatěžující síle $F = 1000 \text{ N}$

Z Obr. 30 jsou vidět velké hodnoty tečné síly F_t . Nejmenší hodnota tečné síly je u neozářeného PP. Naopak největší hodnota tečné síly je u PP ozářeného 66 kGy. Při konstantní zatěžující síle $F = 1000 \text{ N}$.



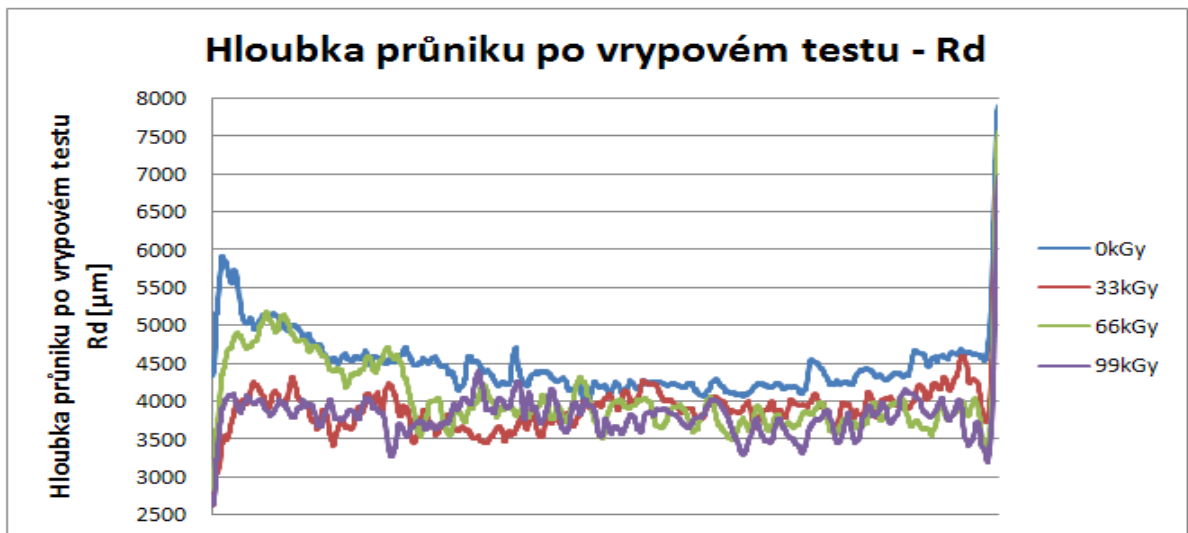
Obr. 31. Akustická emise při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$

Z Obr. 31 vidíme malé rozdíly akustické emise. Při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$. Nejmenší hodnota akustické emise je u PP ozářeného 99 kGy. Největší hodnota akustické emise je u PP ozářeného 33 kGy.



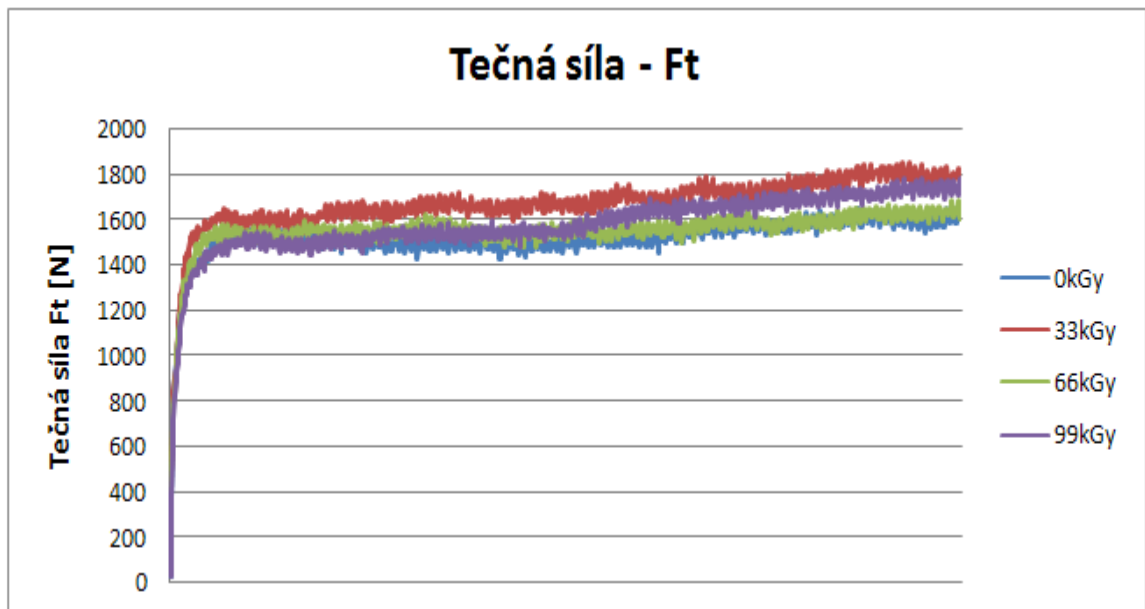
Obr. 32. Drsnost povrchu před vrypovým testem při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$

Z Obr. 32 je zřejmé, že nejmenší drsnost povrchu před vrypovým testem je u PP ozářeného 66 kGy. Největší drsnost povrchu před vrypovým testem je u neozářeného PP. Při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$.



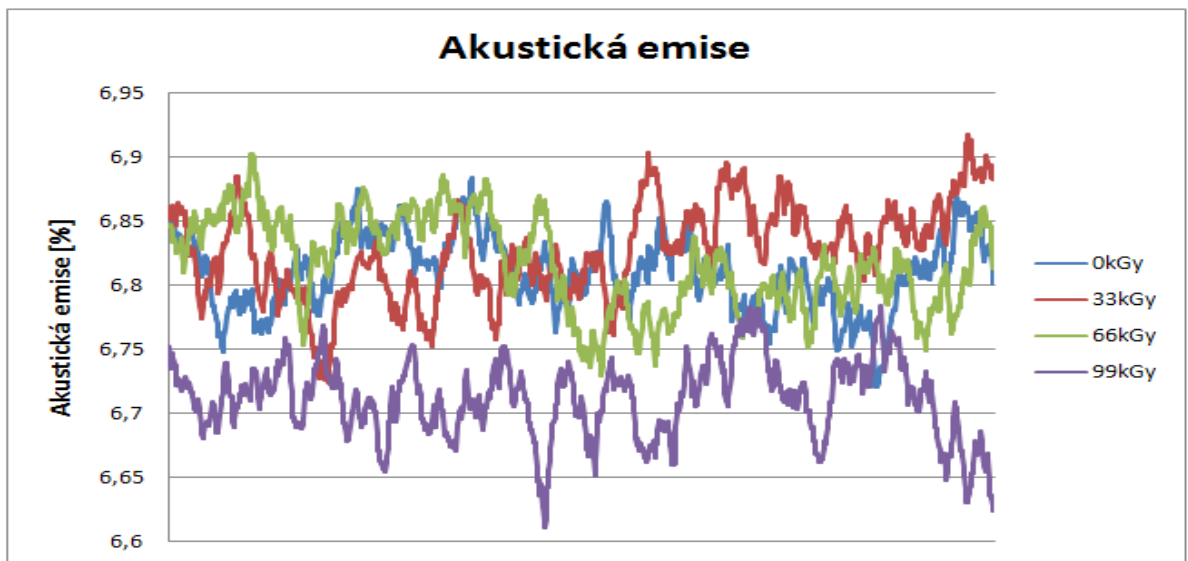
Obr. 33. Hloubka průniku po vrypovém testu při konstantní zatěžující síle
 $F = 1000\text{ N}$

Z Obr. 33 vyplývá, že nejmenší hloubka průniku po vrypovém testu je u PP ozářeného 99 kGy. Naopak největší hloubka průniku po vrypovém testu je u neozářeného PP. Při konstantní zatěžující síle $F = 1000 \text{ N}$.



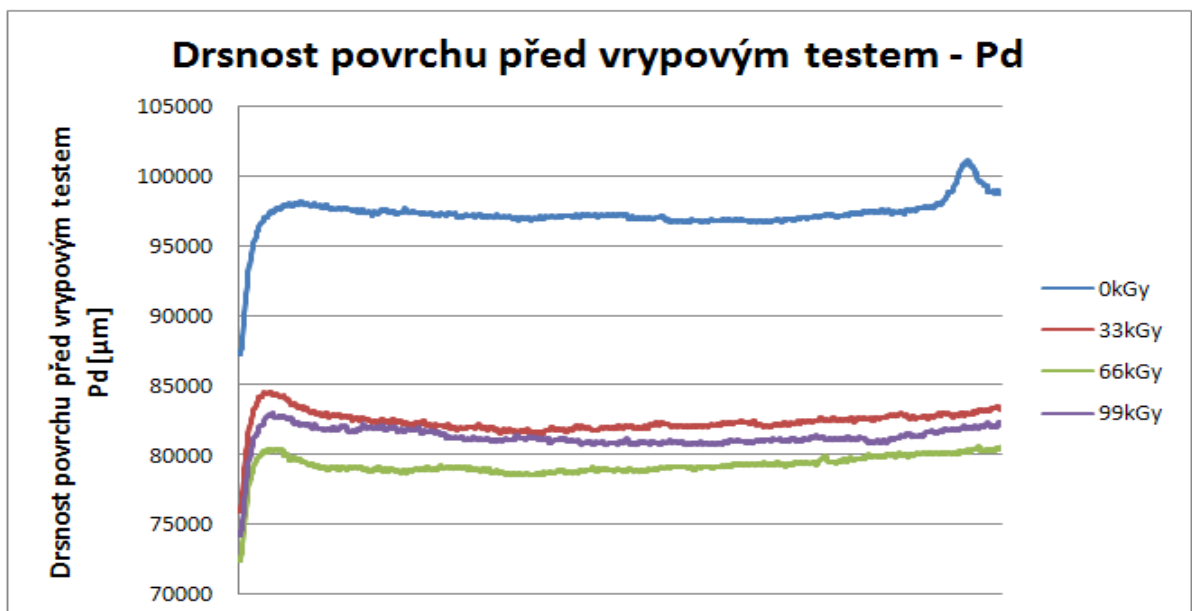
Obr. 34. Tečná síla při konstantní zatěžující síle $F = 5000 \text{ N}$

Z Obr. 34 jsou vidět velké hodnoty tečné síly F_t . Při konstantní zatěžující síle $F = 5000 \text{ N}$. Nejmenší hodnota tečné síly je u neozářeného PP. Naopak největší hodnota tečné síly je u PP ozářeného 33 kGy.



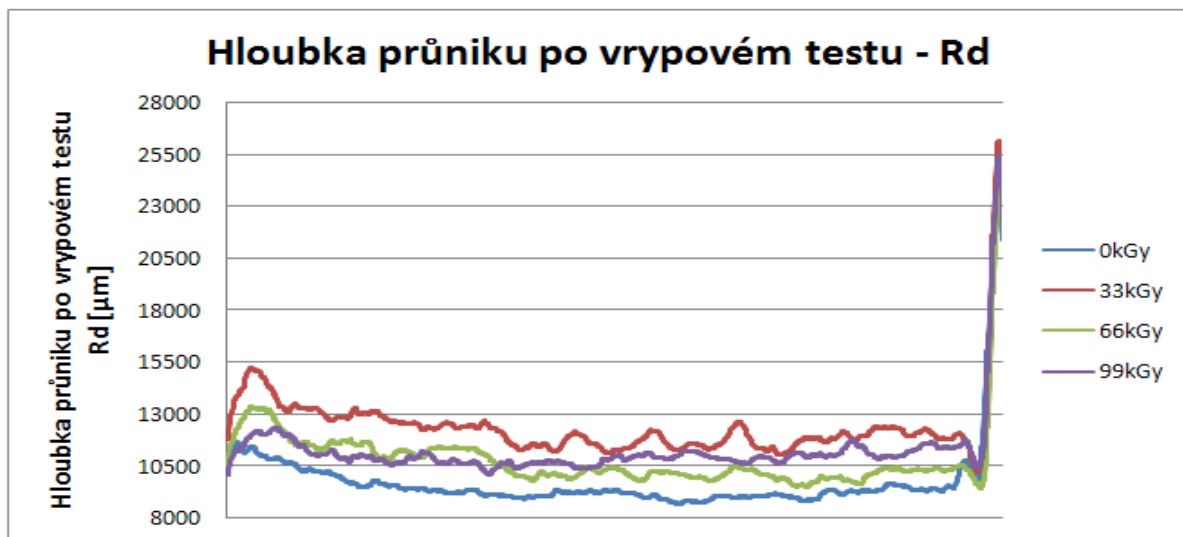
Obr. 35. Akustická emise při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$

Z Obr. 35 vidíme malé rozdíly akustické emise při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$. Nejmenší hodnota akustické emise je u PP ozářeného 99 kGy. Největší hodnota akustické emise je u PP ozářeného 33 kGy.



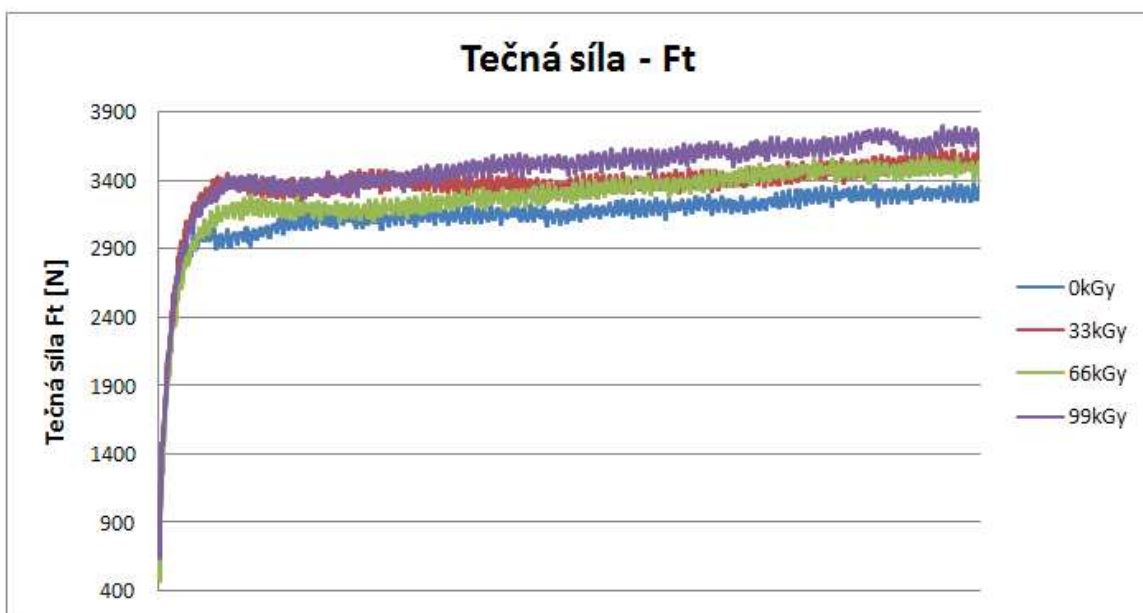
Obr. 36. Drsnost povrchu před vrypovým testem při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$

Z Obr. 36 plyne, že nejmenší drsnost povrchu před vrypovým testem je u PP ozářeného 66 kGy. Největší drsnost povrchu před vrypovým testem je u neozářeného PP. Při konstantní zatěžující síle $F = 5000 \text{ N}$.



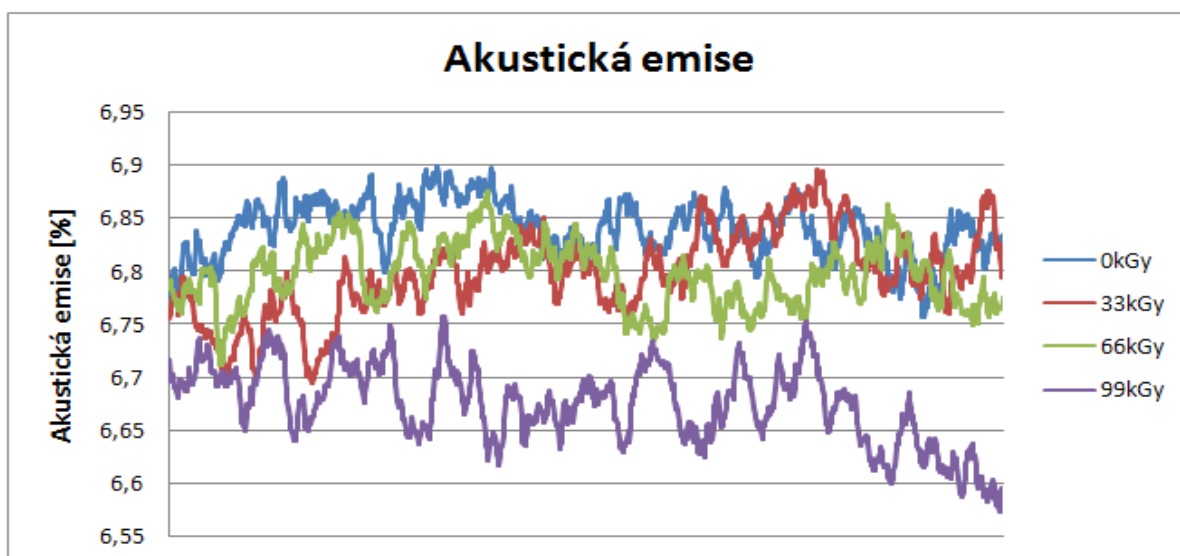
Obr. 37. Hloubka průniku po vrypovém testu při konstantní zatěžující síle $F = 5000 \text{ N}$

Z Obr. 37 vyplývá, že nejmenší hloubka průniku po vrypovém testu je u neozářeného PP. Naopak největší hloubka průniku po vrypovém testu je u PP ozářeného 33 kGy. Při konstantní zatěžující síle $F = 5000 \text{ N}$.



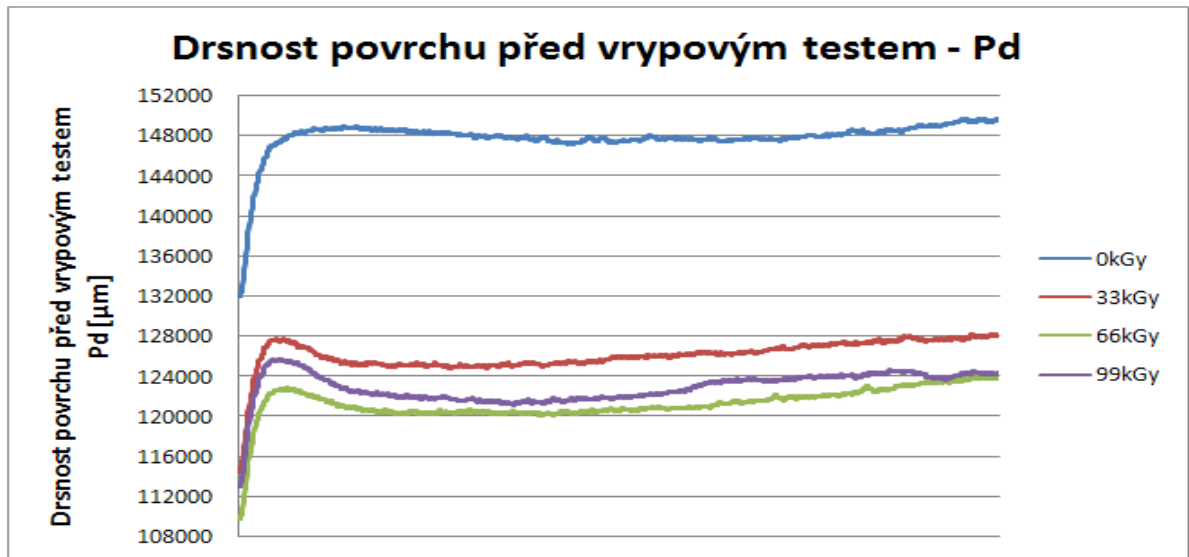
Obr. 38. Tečná síla při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$

Z Obr. 38 jsou viditelné velké hodnoty tečné síly F_t , při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$. Nejmenší hodnota tečné síly je u neozařeného PP. Naopak největší hodnota tečné síly je u PP ozařeného 99 kGy.



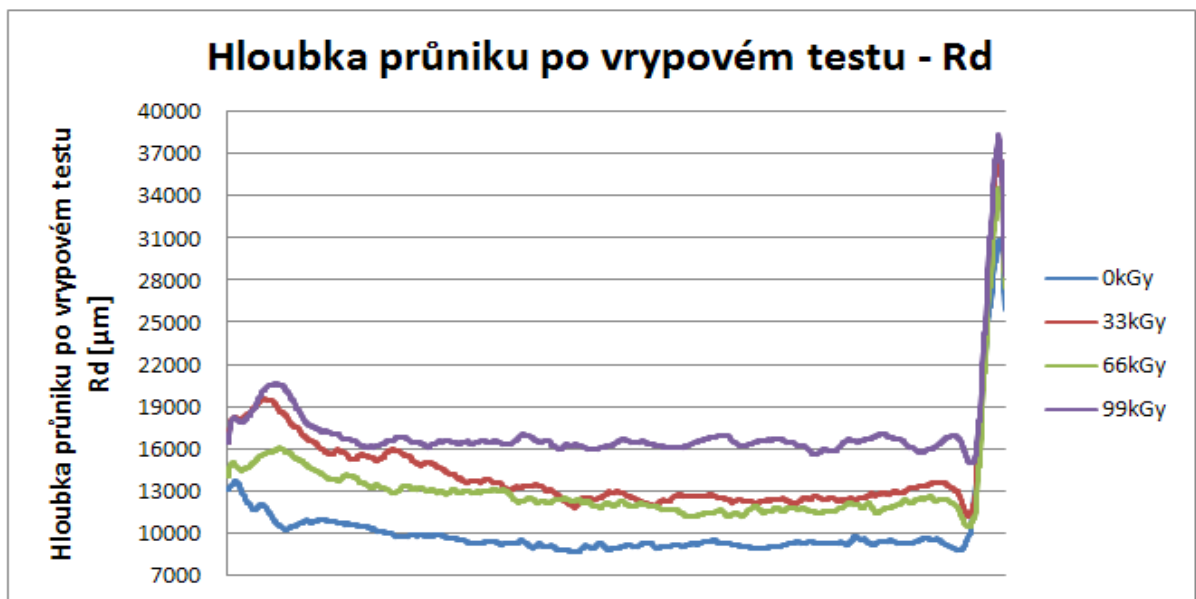
Obr. 39. Akustická emise při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$

Z Obr. 39 vyplývají malé rozdíly akustické emise. Nejmenší hodnota akustické emise je u PP ozářeného 99 kGy. Největší hodnota akustické emise je u neozářeného PP. Při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$.



Obr. 40. Drsnost povrchu před vrypovým testem při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$

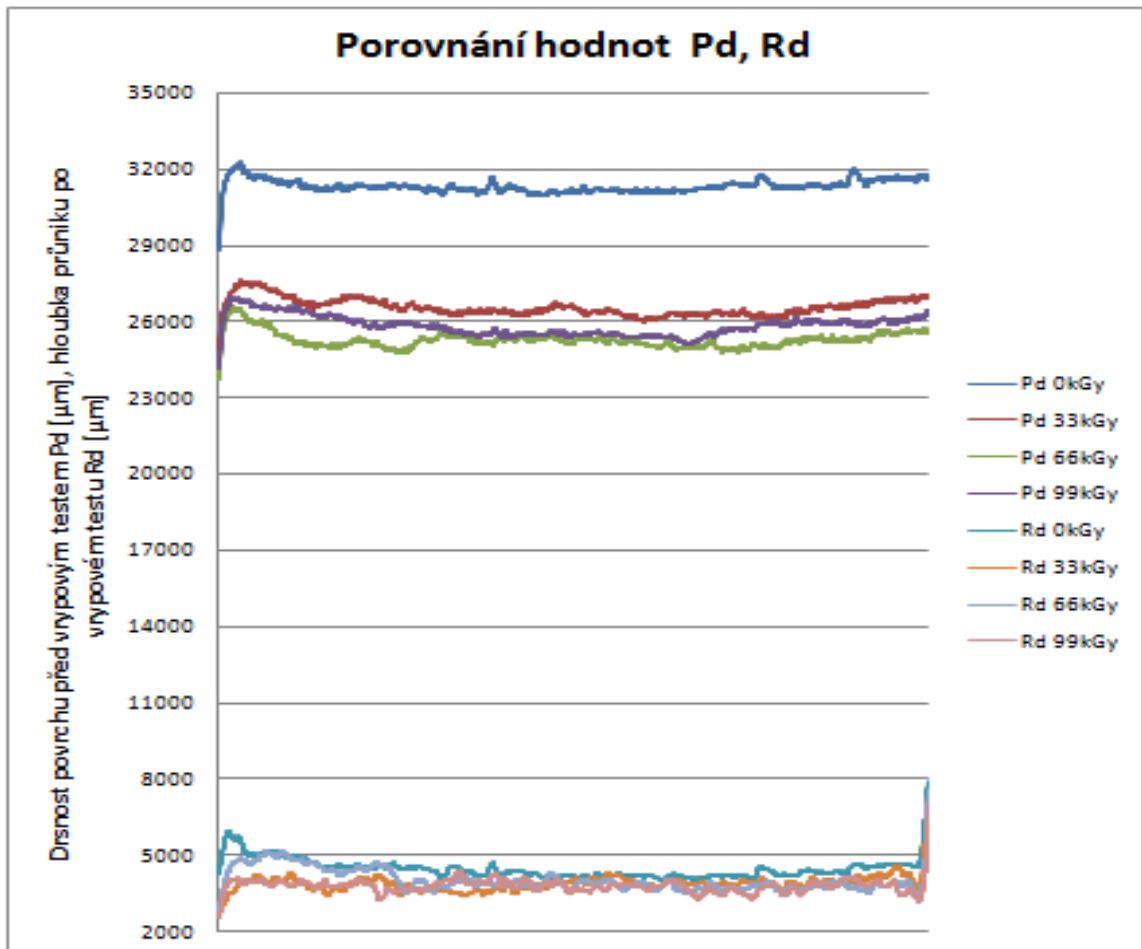
Z Obr. 40 je vidět, že nejmenší drsnost povrchu před vrypovým testem je u PP ozářeného 66 kGy. Největší drsnost povrchu před vrypovým testem je u neozářeného PP. Při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$.



Obr. 41. Hloubka průniku po vrypovém testu při konstantní zatěžující síle

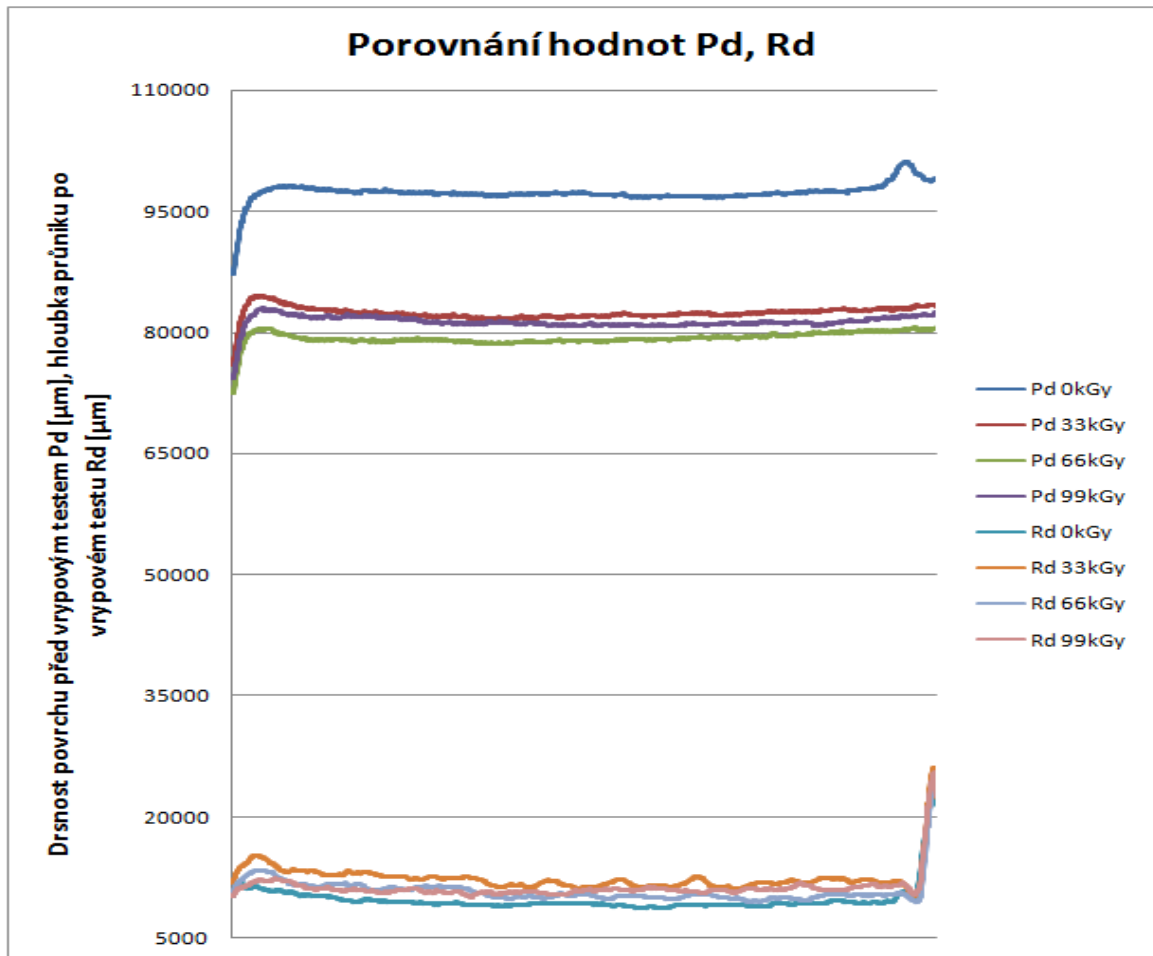
$$F = 10\,000\text{ N}$$

Obr. 41 vyjadřuje, že nejmenší hloubka průniku po vrypovém testu je u neozařeného PP. Naopak největší hloubka průniku po vrypovém testu je u PP ozářeného 99 kGy. Při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$.



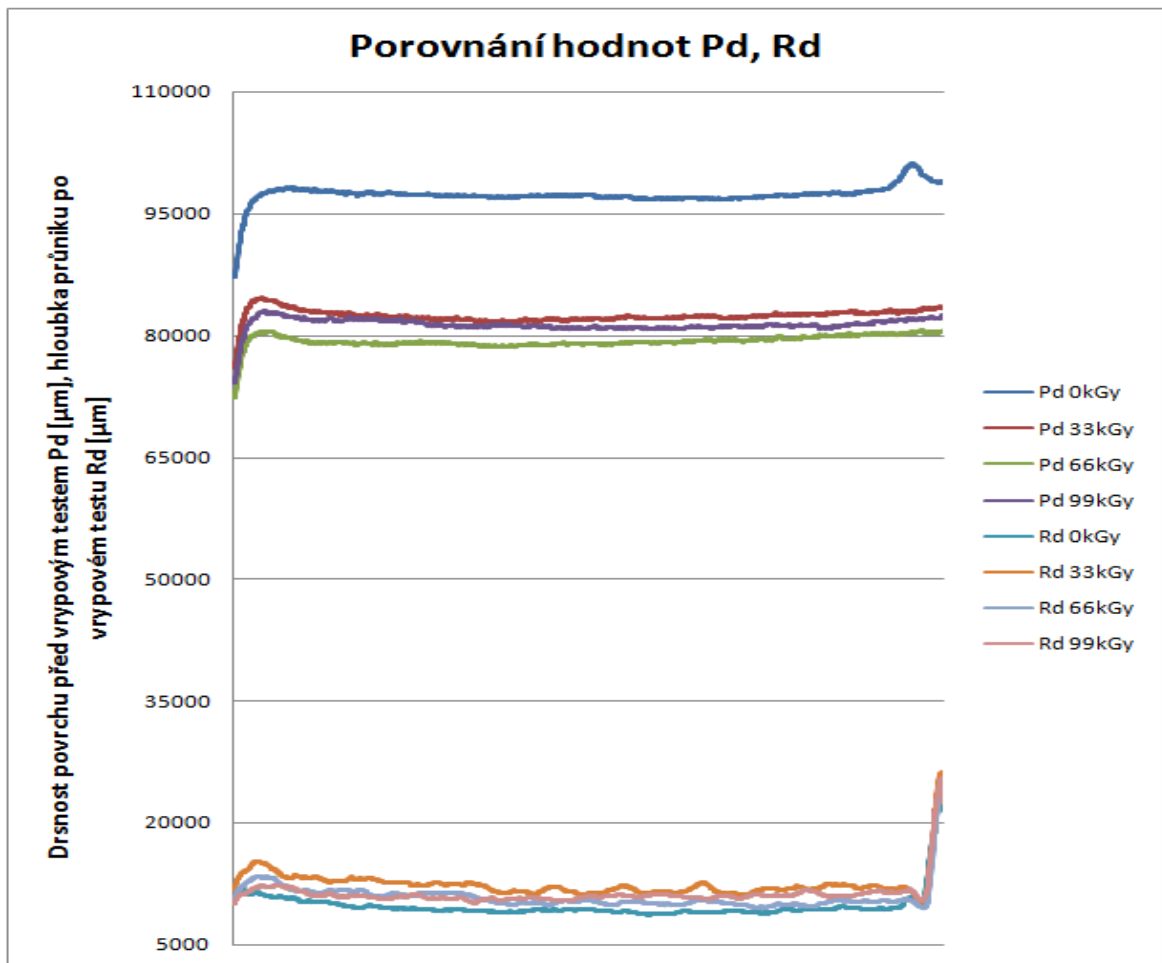
Obr. 42. Porovnání drsnosti povrchu před vrypovým testem Pd [μm] a hloubky průniku po vrypovém testu Rd [μm]. Při konstantní zatěžující síle $F = 1000 \text{ N}$

Z Obr. 42 vyplývá, že největší drsnost povrchu před vrypovým testem je u neozářeného PP. Nejmenší drsnost povrchu před vrypovým testem je u PP ozářeného 66 kGy. Největší hloubka průniku po vrypovém testu je u neozářeného PP. Naopak nejmenší hloubka průniku po vrypovém testu je u PP ozářeného 99 kGy. Při konstantní zatěžující síle $F = 1000 \text{ N}$.



Obr. 43. Porovnání drsnosti povrchu před vrypovým testem Pd [μm] a hloubky průniku po vrypovém testu Rd [μm]. Při konstantní zatěžující síle $F = 5000 \text{ N}$

Obr. 43 vyjadřuje, že největší drsnost povrchu před vrypovým testem je u neozářeného PP. Nejmenší drsnost povrchu před vrypovým testem je u PP ozářeného 66 kGy. Největší hloubka průniku po vrypovém testu je u PP ozářeného 33 kGy. Naopak nejmenší hloubka průniku po vrypovém testu je u neozářeného PP. Při konstantní zatěžující síle $F = 5000 \text{ N}$.



Obr. 44. Porovnání drsnosti povrchu před vrypovým testem Pd [μm] a hloubky průniku po vrypovém testu Rd [μm]. Při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$

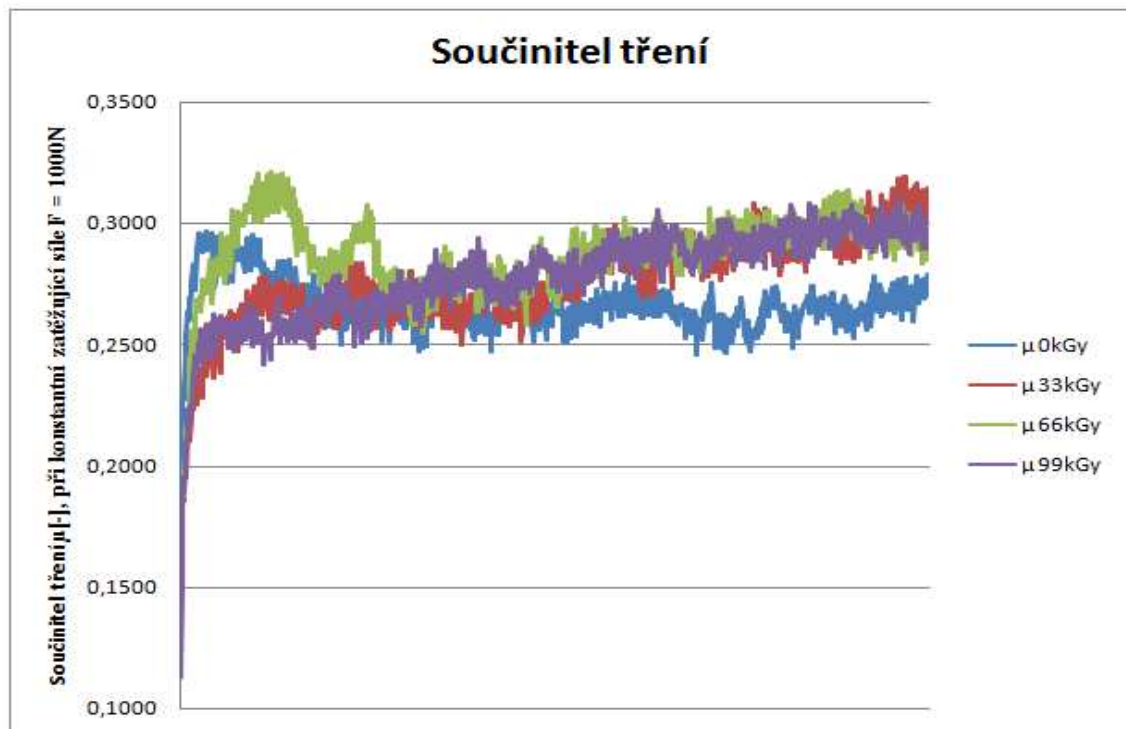
Obr. 44 ukazuje, že největší drsnost povrchu před vrypovým testem je u neozářeného PP. Nejmenší drsnost povrchu před vrypovým testem je u PP ozářeného 66 kGy. Největší hloubka průniku po vrypovém testu je u PP ozářeného 99 kGy. Naopak nejmenší hloubka průniku po vrypovém testu je u neozářeného PP. Při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$.

$$F_t = F_n \cdot \mu \rightarrow \mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (8)$$

F_t – tečná síla

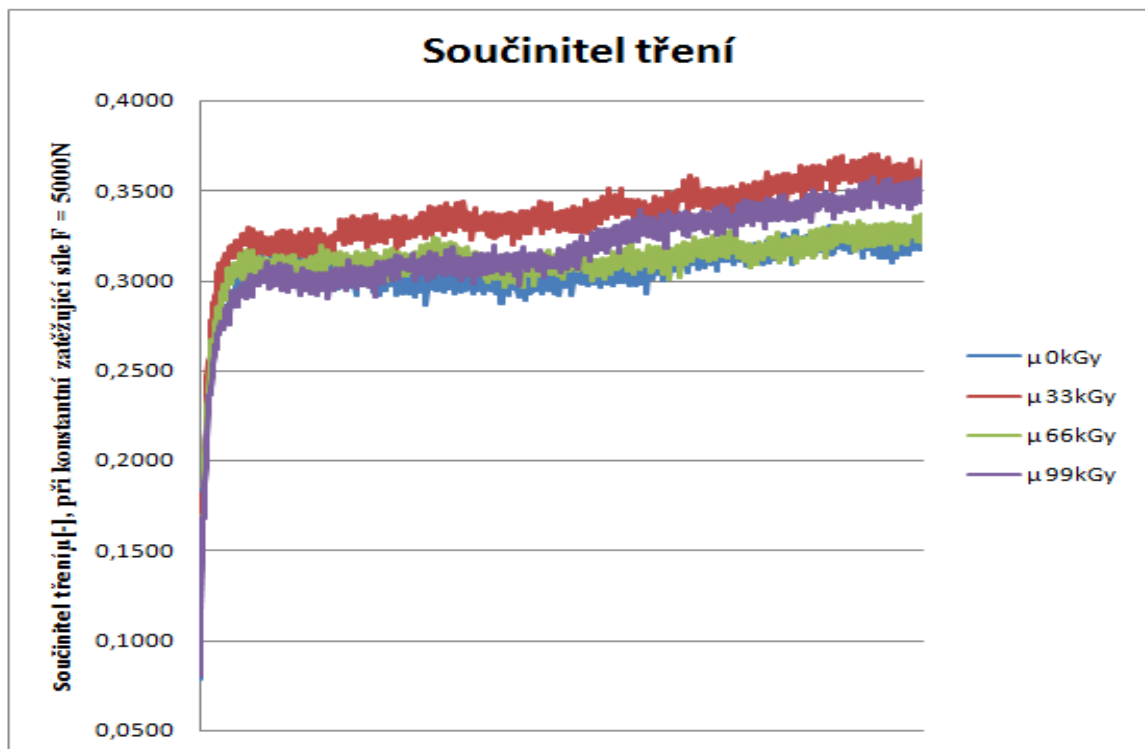
F_n – přítláčná síla

μ - součinitel tření



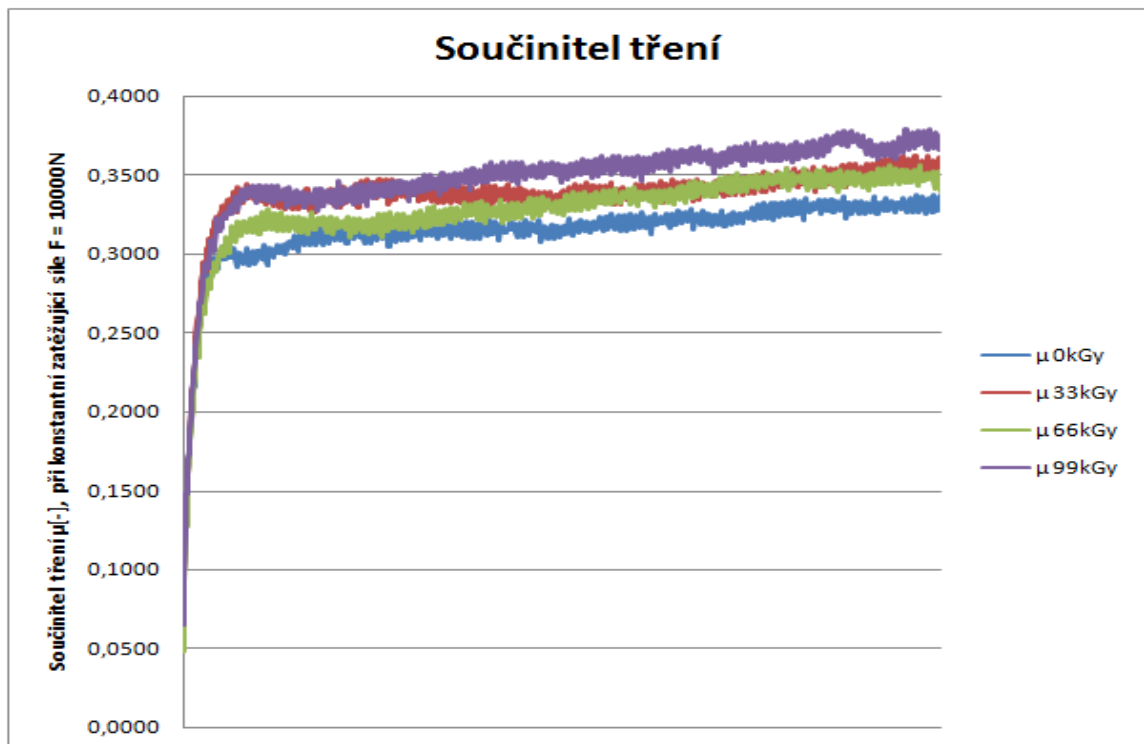
Obr. 45. Součinitel tření μ , při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$

Z Obr. 45 vyplývá, že největší součinitel tření je u PP ozářeného 66 kGy a naopak nejmenší součinitel tření je u PP ozářeného 99 kGy. Při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$.



Obr. 46. Součinitel tření μ , při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$

Obr. 46 vyjadřuje, že největší součinitel tření je u PP ozářeného 33 kGy a naopak nejmenší součinitel tření je u neozářeného PP. Při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$.



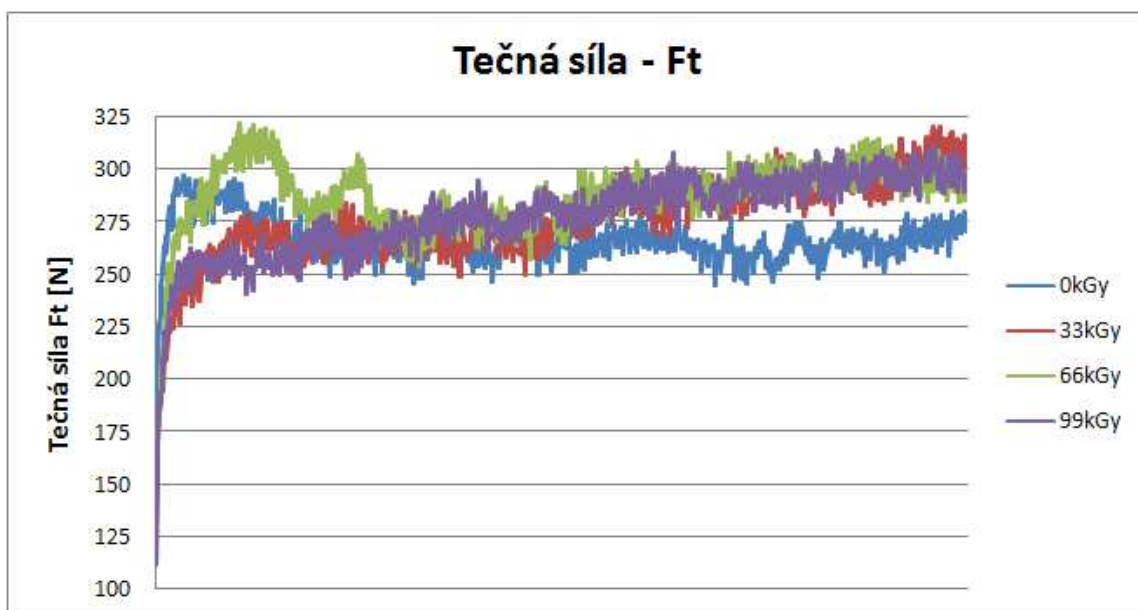
Obr. 47. Součinitel tření μ , při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$

Z Obr. 47 vidíme, že největší součinitel tření je u PP ozářeného 99 kGy a naopak nejmenší součinitel tření je u PP ozářeného 66 kGy. Při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$.

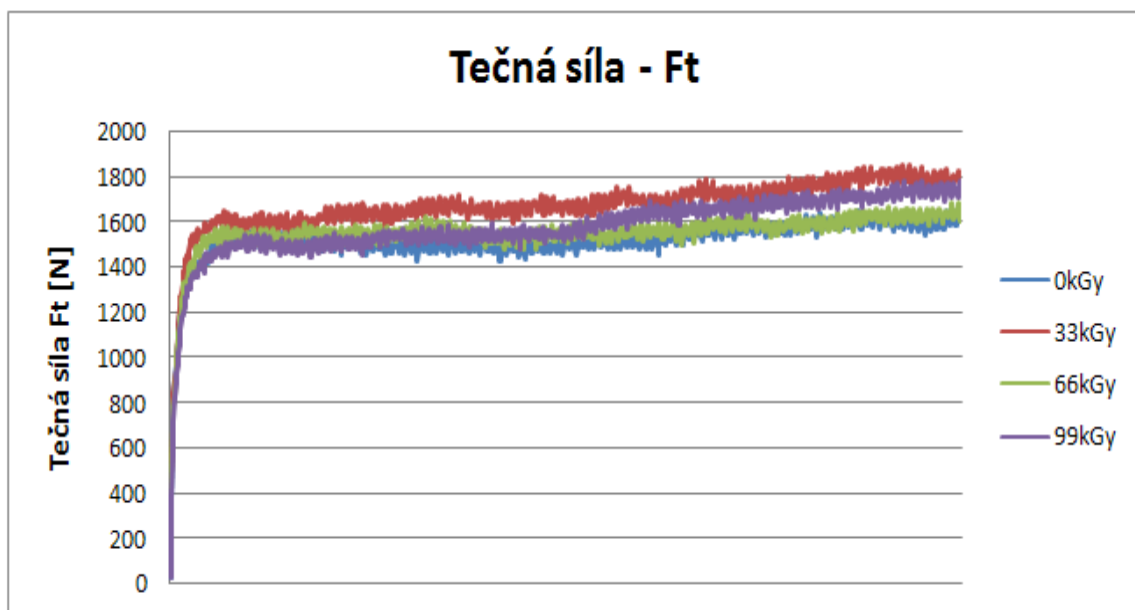
11 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Bakalářská práce řeší problém hodnocení tribologických (třecích) vlastností modifikovaného polypropylenu. Zkušební tělesa byla připravena vstřikováním a následně ozářena beta zářením v dávkách 0, 33, 66, 99 kGy. Třecí vlastnosti byly hodnoceny pomocí mikro-vrypového testu na Micro Combi testeru od firmy CSM Instruments. Měření proběhlo na každém zkušebním tělese vždy 9x. Aplikované zatížení měřícího hrotu bylo zvoleno 1000 mN, 5000 mN a 10 000 mN. V průběhu testu byly hodnoceny tečná síla, akustická emise a součinitel tření. Naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

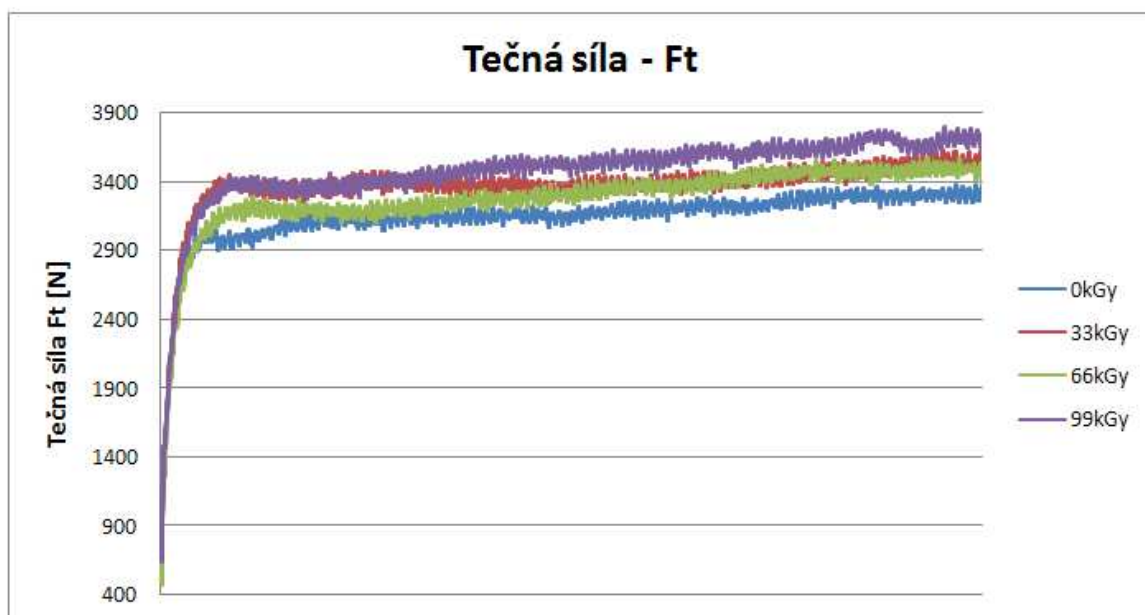
Z naměřených výsledků je patrné, že u tečné síly byla při aplikovaném zatížení 1000 mN zjištěna nejvyšší hodnota u PP ozářeného dávkou 66 kGy. Naopak nejmenší hodnota byla naměřena u neozářeného PP. Při použití aplikovaného zatížení 5000 mN byla nejmenší hodnota třecí síly zjištěna u neozářeného PP, naopak nejvyšší hodnota byla dosažena u PP ozářeného dávkou 33 kGy. U aplikovaného zatížení 10 000 mN byla nejvyšší hodnota třecí síly naměřena u PP ozářeného 99 kGy, naopak nejmenší hodnoty bylo dosaženo u neozářeného PP.



Obr. 48. Tečná síla při konstantní zatěžující síle $F = 1000 \text{ N}$

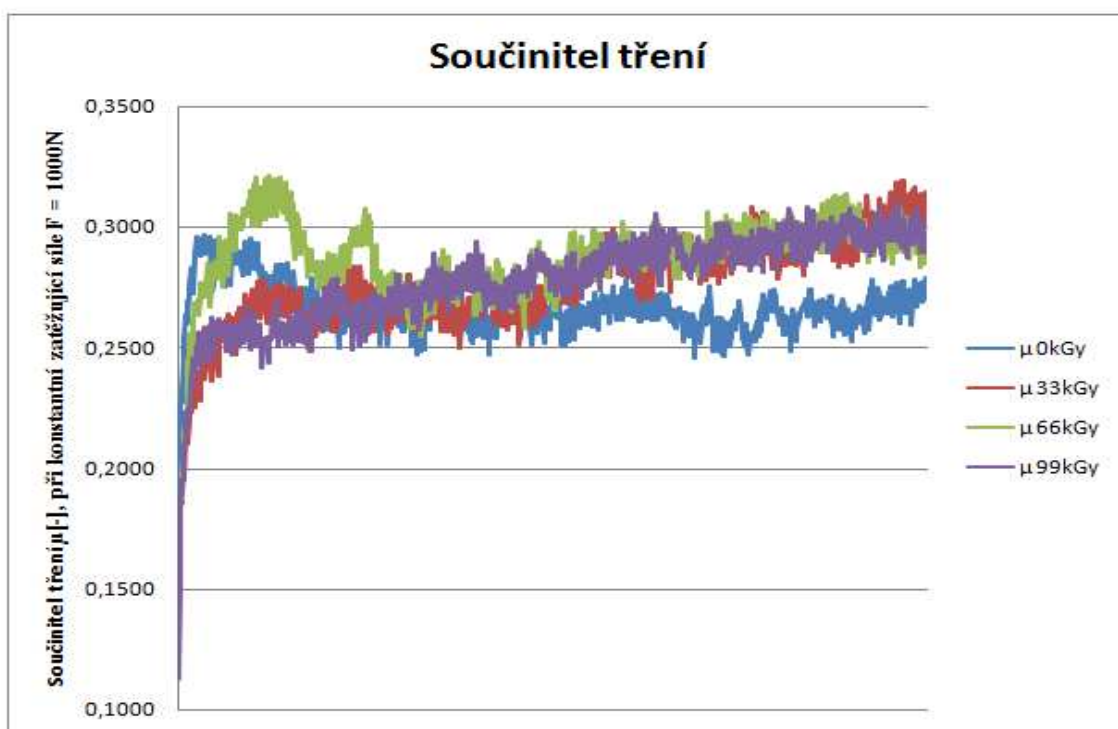


Obr. 49. Tečná síla při konstantní zatěžující síle $F = 5000$ N

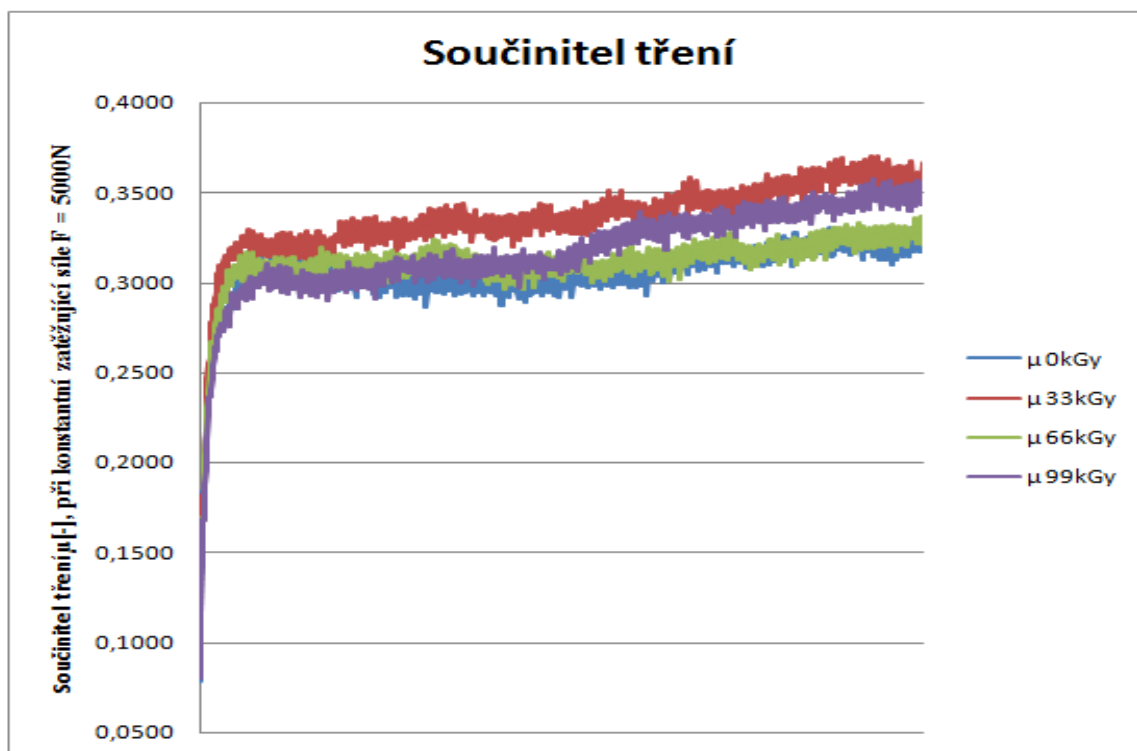


Obr. 50. Tečná síla při konstantní zatěžující síle $F = 10000$ N

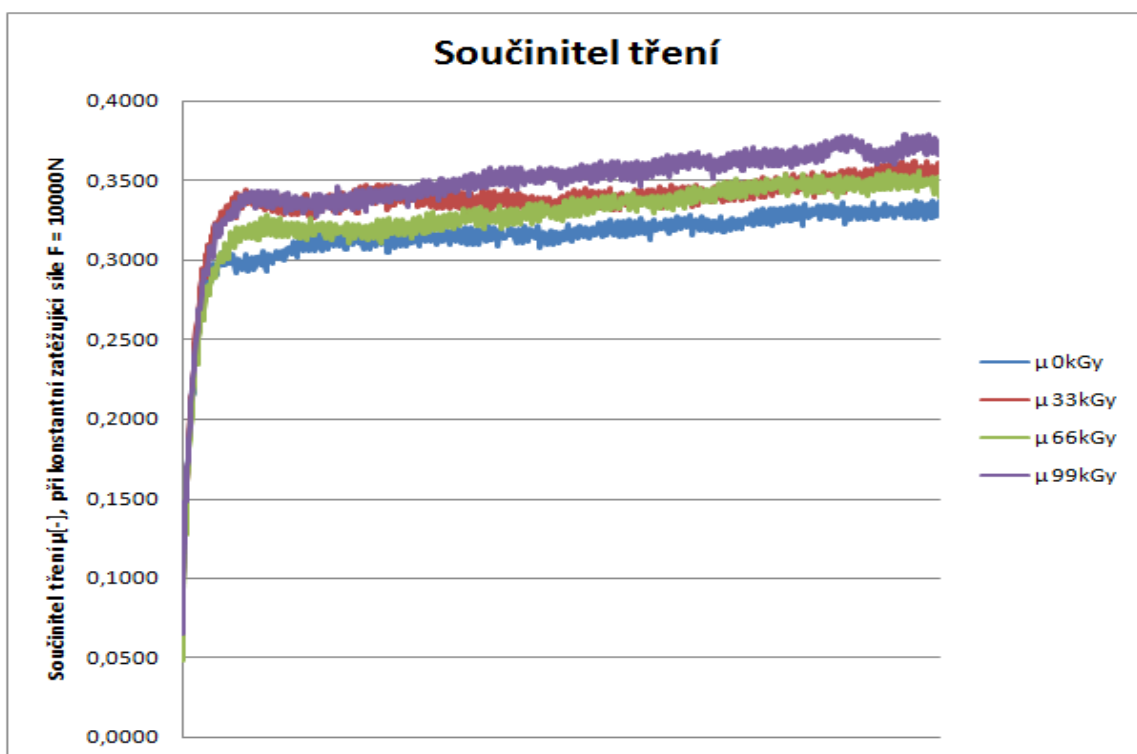
Z naměřených výsledků je patrné, že součinitel tření při aplikovaném zatížení 1000 mN měl nejvyšší hodnotu u PP ozářeného dávkou 66 kGy. Naopak nejmenší hodnota byla naměřena u PP ozářeného dávkou 99 kGy. Při použití aplikovaného zatížení 5000 mN byla nejmenší hodnota součinitele tření zjištěna u neozářeného PP, naopak nejvyšší hodnota byla dosažena u PP ozářeného dávkou 33 kGy. U aplikovaného zatížení 10 000 mN byla nejvyšší hodnota součinitele tření naměřena u PP ozářeného 99 kGy, naopak nejmenší hodnoty bylo dosaženo u PP ozářeného 66 kGy.



Obr. 51. Součinitel tření μ , při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$

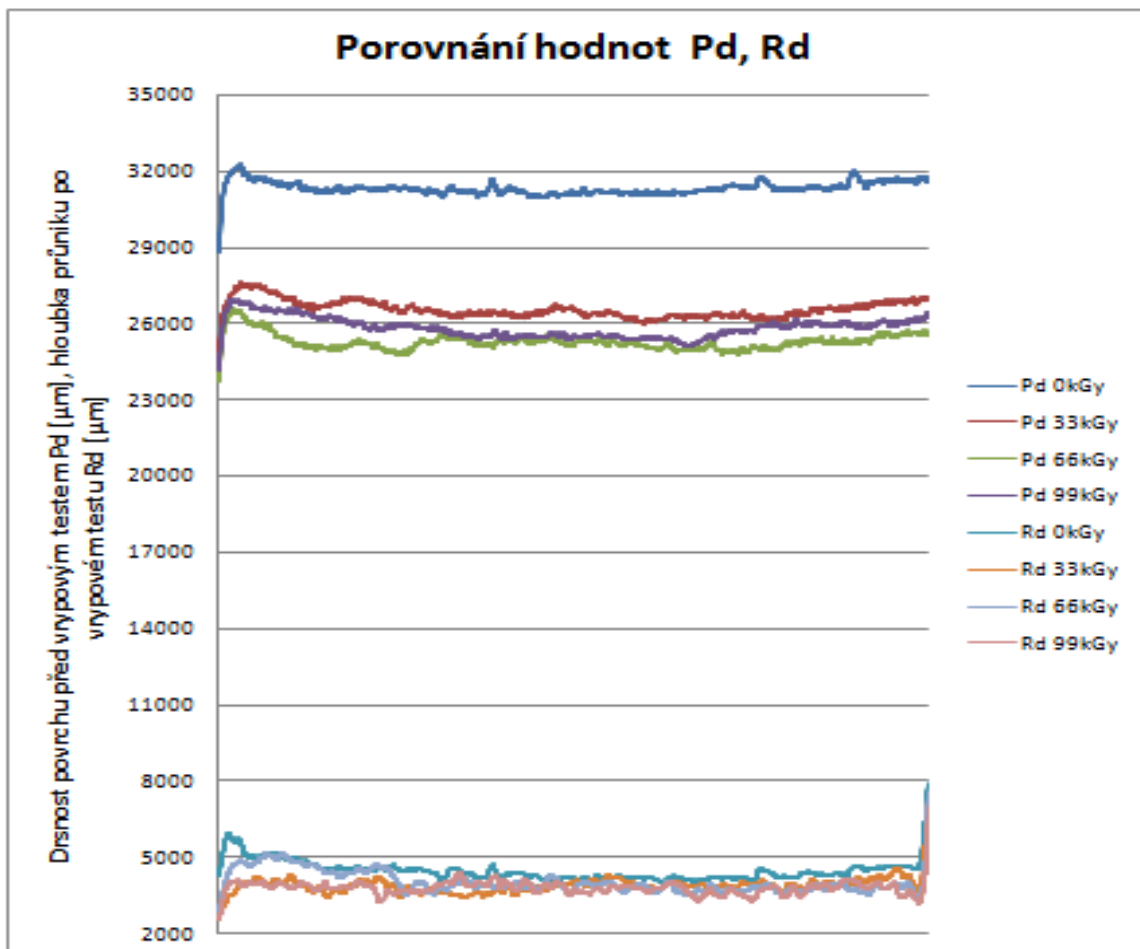


Obr. 52. Součinitel tření μ , při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$

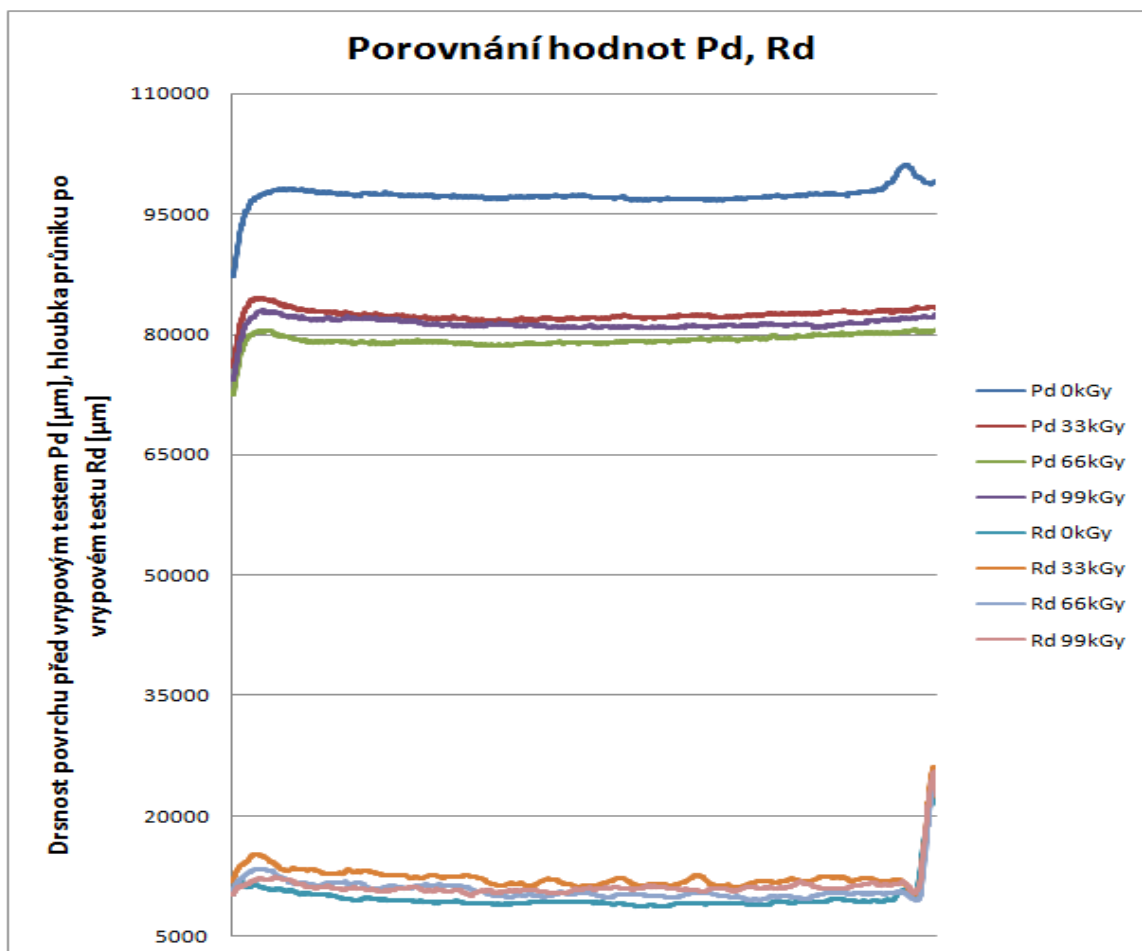


Obr. 53. Součinitel tření μ , při konstantní zatěžující síle $F = 10\ 000\text{ N}$

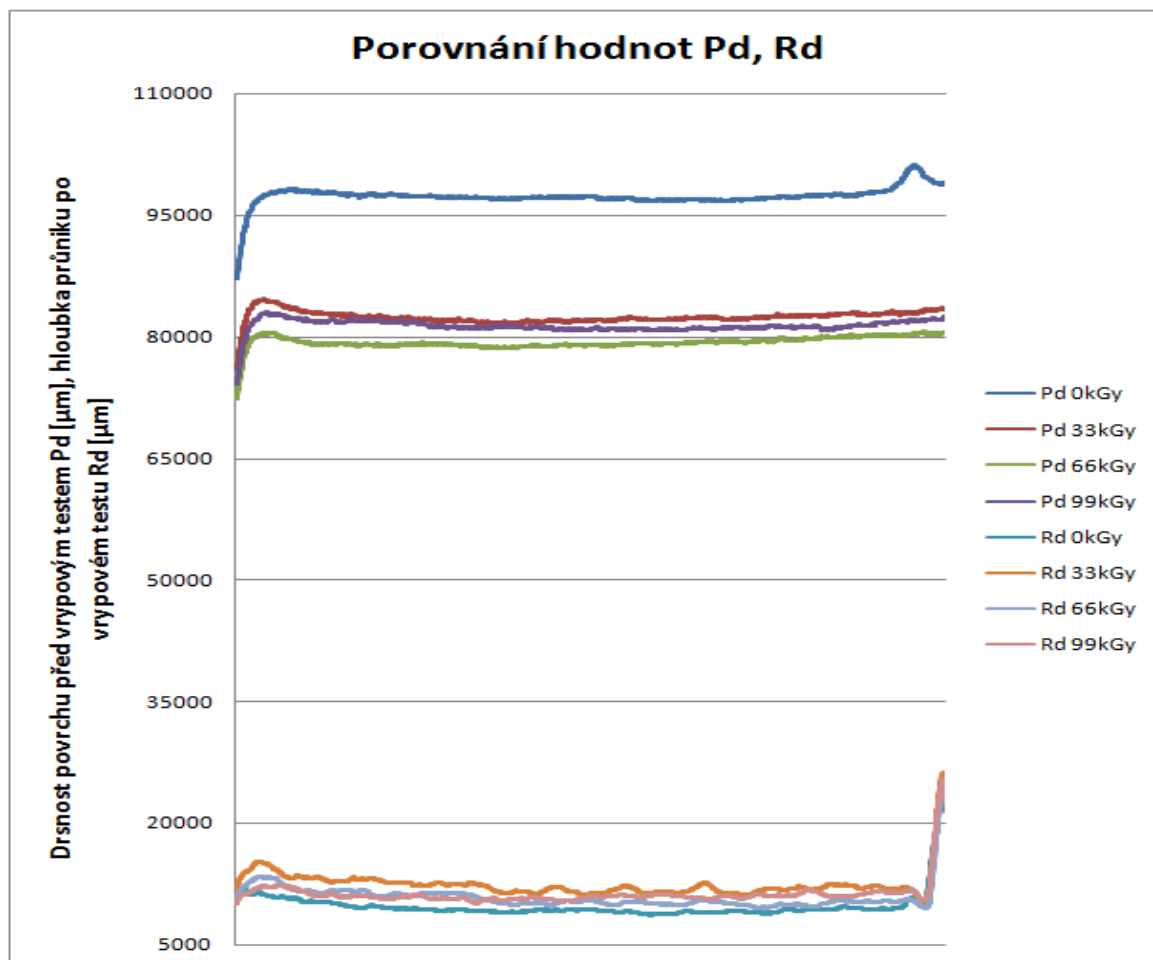
Z naměřených výsledků při aplikovaném zatížení 1000 mN je patrné, že největší drsnost povrchu před vrypovým testem je u neozářeného PP. Nejmenší drsnost povrchu před vrypovým testem je u PP ozářeného 66 kGy. Největší hloubka průniku po vrypovém testu je u neozářeného PP. Naopak nejmenší hloubka průniku po vrypovém testu je u PP ozářeného 99 kGy. Při použití aplikovaného zatížení 5000 mN byla největší drsnost povrchu před vrypovým testem u neozářeného PP. Nejmenší drsnost povrchu před vrypovým testem je u PP ozářeného 66 kGy. Největší hloubka průniku po vrypovém testu je u PP ozářeného 33 kGy. Naopak nejmenší hloubka průniku po vrypovém testu je u neozářeného PP. U aplikovaného zatížení 10 000 mN byla největší drsnost povrchu před vrypovým testem u neozářeného PP. Nejmenší drsnost povrchu před vrypovým testem je u PP ozářeného 66 kGy. Největší hloubka průniku po vrypovém testu je u PP ozářeného 99 kGy. Naopak nejmenší hloubka průniku po vrypovém testu je u neozářeného PP.



Obr. 54. Porovnání drsnosti povrchu před vrypovým testem Pd [μm] a hloubky průniku po vrypovém testu Rd [μm]. Při konstantní zatěžující síle $F = 1000 \text{ N}$



Obr. 55. Porovnání drsnosti povrchu před vrypovým testem Pd [μm] a hloubky průniku po vrypovém testu Rd [μm]. Při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$



Obr. 56. Porovnání drsnosti povrchu před vrypovým testem Pd [μm] a hloubky průniku po vrypovém testu Rd [μm]. Při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$

ZÁVĚR

Bakalářská práce je složena ze dvou částí. V teoretické části jsem se zabýval studiem problematiky z oblasti tribologie a následného přiblížení tohoto vědního oboru. Tribologie je nauka o tření, mazání a opotřebení. Jednotlivé obory této vědy byly popsány v samostatných kapitolách.

Cílem praktické části bakalářské práce bylo měření tribologických (třecích) vlastností modifikovaného polypropylenu. Nejprve však byla nutná výroba vzorků, kterou provedla německá firma PTS Plastic Technologie Service, Hautschennmühle 3, Adelshofen, Deutschland.

Zkušební tělesa byla připravena z polypropylenu neplněného a následně ozářena dávkami záření 0, 33, 66, 99 kGy (ionizačním elektronovým zářením beta). Měření třecích vlastností proběhlo na mikro-vrypovém testeru od firmy CSM Instruments a u každého vzorku bylo provedeno 9x. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny. Při měření byly porovnávány vzorky ozářeného a neozářeného polypropylenu.

Z naměřených výsledků vyplynulo, že nejvyšších třecích sil a součinitele tření bylo dosaženo u PP ozářeného dávkou 99 kGy. PP neozářený vykazoval nejmenší hodnoty třecí síly a součinitele tření. Při porovnání naměřených výsledků profilu povrchu před a po provedení mikro vrypu je patrné, že největších hodnot dosáhl v případě profilu před vrypem neozářený PP. Nejmenších hodnot dosáhl před vrypem PP ozářený dávkou 66 kGy. Po provedení vrypu dosáhl největší hodnoty PP ozářený 99 kGy, naopak nejmenší hodnoty bylo dosaženo u neozářeného PP.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VOCEL, M., DUFEK, V a KOLEKTIV *Tření a opotřebení strojních součástí*. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1976. 376 s. ISBN není.
- [2] BEČKA, J. *Tribologie*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997. 212 s. ISBN 80-01-01621-8.
- [3] ŠTĚPINA, V., VESELÝ, V. *Maziva v tribologii*. 1. vyd. Bratislava: VEDA, 1985. 408 s. ISBN není.
- [4] LUKOVICS, I., SÝKOROVÁ, L., VOLEK, F. *Části a mechanismy strojů*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta technologická ve Zlíně, 2000. 185 s. ISBN 8021415665.
- [5] BLAŠKOVIČ, P., BALLA, J., DZIMKO, M. *Tribológia*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990. 360 s. ISBN 80-05-00633-0.
- [6] TU v Liberci Katedra strojírenské technologie. *Tribologie* [online]. [cit. 2012-15-01]. Dostupný z WWW:
<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf >
- [7] ŠEDIVÁ, I. *Studie dynamického součinitele tření polymerních materiálu*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2008. 64 s. ISBN není.
- [8] REICHL, J., VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky - Smykové tření* [online]. 2006 – 2012 [cit. 2012-15-01]. Dostupný z WWW:
<<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/36-smykove-treni>>
- [9] MLSNOVÁ, M. *Tření* [online]. [cit. 2012-10-01]. Dostupný z WWW:
<http://www.kod.vslib.cz/info_predmety/STE/ste.htm>
- [10] REICHL, J., VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky - Vláknové tření* [online]. 2006 – 2012 [cit. 2012-15-01]. Dostupný z WWW:
<<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/216-vlaknove-treni>>
- [11] PTÁČEK, L. a KOLEKTIV *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [12] KLIMEŠ, P. *Části a mechanismy strojů II. - Tribologie, ložiska, převody*. 1. vyd. Brno: CERM, 2003. 70 s. ISBN 80-214-2422-2.

- [13] POŠTA, J., VESELÝ, P., DVOŘÁK, M.]. *Degradace strojních součástí* [online]. 2003 [cit. 2012-15-01]. Dostupný z WWW: <<http://degradace.tf.czu.cz>>
- [14] MATERIÁLOVÝ VÝZKUM ATEAM *Zkoušky trvanlivosti ostří řezných nástrojů* [online]. 2011 [cit. 2012- 15-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.ateam.zcu.cz/trvanlivost.html>>
- [15] CSM INSTRUMENTS, *CSM Technical Features Tribometer (TRB) PIN-ON DISK / BALL-ON-DISK*. 1. vyd. Switzerland: CSM Instruments, 2009. 21 s. ISBN není.
- [16] KROISOVÁ, D. *Biodegradovatelné polymery – úvod do problematiky*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci – Fakulta strojní, 2009. 78 s. ISBN 978-80-7372-468-9.
- [17] DUCHÁČEK, V. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. 280 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [18] DOLEŽAL, V. *Plastické hmoty*. 3. přep. a dopl. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1977. 385 s. ISBN není.
- [19] MLEZIVA, J., ŠŇUPÁREK, J. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přep. vyd. Praha: SOBOTÁLES, 2000. 537 s. ISBN 80-85920-72-7.
- [20] WIKIPEDIE *Polypropylen* [online]. 2012 [cit. 2012- 15-04]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>>
- [21] PETROLEUM.CZ *Polypropylen* [online]. 2007 - 2012 [cit. 2012- 15-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.petroleum.cz/vyrobky/polypropylen.aspx>>
- [22] VÁLEK, M. *Vliv ozařování na mechanické a termomechanické vlastnosti polypropylenů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2006. 134 s. ISBN není.
- [23] NIPPON KASEI CHEMICAL COMPANY LIMITED. *TAIC (Triallylisocyanurate)* [online]. 2012 [cit. 2012- 15-04]. Dostupný z WWW: <http://www.nkchemical.co.jp/ver_03/english/product_e/taic_e.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

μ	Součinitel tření.
F_t	Třecí síla.
F_n	Přítlačná (tlaková, normálová) síla.
f	Součinitel smykového tření.
α_s	Úhel sklonu, kdy se dá těleso do pohybu.
F_s	Síla, která uvede těleso do pohybu ze stavu klidu.
μ_s	Limitní součinitel klidového tření.
e_{\max}	Maximální výstřednost.
v_r	Rychlost valení.
v_m	Rychlost prokluzu.
μ_m	Součinitel prokluzu.
μ_r	Součinitel valivého tření.
F_0	Napínací síla před tělesem.
α	Úhel opásání.
f_a	Součinitel tření opásáním.
I	Intenzita opotřebení.
ΔVB	Přírůstek opotřebení.
ΔT	Přírůstek času.
μ_f	Suché tření.
μ_h	Kapalné tření.
μ_m	Mezní tření.
$V_{\text{krit.}}$	Kritická rychlost.
α	Alfa.
β	Beta.

γ	Gama.
δ	Delta.
Pd	Drsnost povrchu před vrypovým testem.
Rd	Hloubka průniku po vrypovém testu
1Gy	Absorbovaná energie záření / hmoty.
PP	Polypropylen.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Znázornění možného vzájemného pohybu třecích povrchů: a) kluzný, b) valivý, c) rotační, d) nárazový, e) kmitavý, f) tok</i>	14
<i>Obr. 2. Vzájemné vazby v tribologickém systému</i>	15
<i>Obr. 3. Smykové tření na vodorovné podložce</i>	18
<i>Obr. 4. Znázornění zákonů tření, kde je (a), (b) síla tření úměrná zatížení, (c) síla tření nezávisí na velikosti obrysových ploch S_{ca}, S_{ce}, (d) sklonný tribometr k určení součinitele tření jako $\text{tg } \alpha_s$, (e) kužel tření [1]</i>	19
<i>Obr. 5. Schéma rovnovážného stavu při valivém tření, kdy reakce F'_n na zatížení F_n působí mimo střed koule (válce), určuje maximální výstřednost e_{max}, právě postačující k valivému tření</i>	21
<i>Obr. 6. Rovnováha sil opásaného tření</i>	22
<i>Obr. 7. Schematicky znázorněny hlavní druhy opotřebení [1]</i>	24
<i>Obr. 8. Talířové kolo</i>	26
<i>Obr. 9. Přítlačný kotouč</i>	26
<i>Obr. 10. Brzdový kotouč</i>	28
<i>Obr. 11. Píst</i>	28
<i>Obr. 12. Ventil</i>	29
<i>Obr. 13. Šoupátko</i>	30
<i>Obr. 14. Lopatkové kolo</i>	32
<i>Obr. 15. Rotor turbíny</i>	32
<i>Obr. 16. Kroužek ložiska</i>	33
<i>Obr. 17. Ojnice</i>	34
<i>Obr. 18. Drážková hřídel</i>	36
<i>Obr. 19. Ložisko</i>	36
<i>Obr. 20. Nárůst opotřebení s časem při stálých podmínkách</i>	37
<i>Obr. 21. Oblasti mazání v Stribeckově diagramu</i>	39
<i>Obr. 22. Mikro-vrypový tester</i>	51
<i>Obr. 23. Vrypový princip</i>	52
<i>Obr. 24. Zaostrěný vryp ve vzorku po přiblížení mikroskopem</i>	53
<i>Obr. 25. Struktura polypropylenu</i>	56
<i>Obr. 26. Molekulární struktura polypropylenu [21]</i>	57
<i>Obr. 27. Struktura neozářeného materiálu [22]</i>	61

<i>Obr. 28. Struktura ozářeného materiálu [22].....</i>	61
<i>Obr. 29. Chemická struktura monomeru TAIC [23]</i>	62
<i>Obr. 30. Tečná síla při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$.....</i>	63
<i>Obr. 31. Akustická emise při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$.....</i>	64
<i>Obr. 32. Drsnost povrchu před vrypovým testem při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$</i>	65
<i>Obr. 33. Hloubka průniku po vrypovém testu při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$</i>	65
<i>Obr. 34. Tečná síla při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$.....</i>	66
<i>Obr. 35. Akustická emise při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$.....</i>	67
<i>Obr. 36. Drsnost povrchu před vrypovým testem při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$</i>	67
<i>Obr. 37. Hloubka průniku po vrypovém testu při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$</i>	68
<i>Obr. 38. Tečná síla při konstantní zatěžující síle $F = 10\ 000\text{ N}$.....</i>	69
<i>Obr. 39. Akustická emise při konstantní zatěžující síle $F = 10\ 000\text{ N}$.....</i>	69
<i>Obr. 40. Drsnost povrchu před vrypovým testem při konstantní zatěžující síle $F = 10\ 000\text{ N}$</i>	70
<i>Obr. 41. Hloubka průniku po vrypovém testu při konstantní zatěžující síle.....</i>	71
<i>Obr. 42. Porovnání drsnosti povrchu před vrypovým testem P_d [μm] a hloubky průniku po vrypovém testu R_d [μm]. Při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$</i>	72
<i>Obr. 43. Porovnání drsnosti povrchu před vrypovým testem P_d [μm] a hloubky průniku po vrypovém testu R_d [μm]. Při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$</i>	73
<i>Obr. 44. Porovnání drsnosti povrchu před vrypovým testem P_d [μm] a hloubky průniku po vrypovém testu R_d [μm]. Při konstantní zatěžující síle $F = 10\ 000\text{ N}$</i>	74
<i>Obr. 45. Součinitel tření μ, při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$</i>	75
<i>Obr. 46. Součinitel tření μ, při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$</i>	76
<i>Obr. 47. Součinitel tření μ, při konstantní zatěžující síle $F = 10\ 000\text{ N}$</i>	77
<i>Obr. 48. Tečná síla při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$.....</i>	78
<i>Obr. 49. Tečná síla při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$.....</i>	79
<i>Obr. 50. Tečná síla při konstantní zatěžující síle $F = 10\ 000\text{ N}$.....</i>	79
<i>Obr. 51. Součinitel tření μ, při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$</i>	80
<i>Obr. 52. Součinitel tření μ, při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$</i>	81

- Obr. 53. Součinitel tření μ , při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$ 81
- Obr. 54. Porovnání drsnosti povrchu před vrypovým testem P_d [μm] a hloubky
průniku po vrypovém testu R_d [μm]. Při konstantní zatěžující síle $F = 1000\text{ N}$ 82
- Obr. 55. Porovnání drsnosti povrchu před vrypovým testem P_d [μm] a hloubky
průniku po vrypovém testu R_d [μm]. Při konstantní zatěžující síle $F = 5000\text{ N}$ 83
- Obr. 56. Porovnání drsnosti povrchu před vrypovým testem P_d [μm] a hloubky
průniku po vrypovém testu R_d [μm]. Při konstantní zatěžující síle $F = 10\,000\text{ N}$ 84

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Porovnání vlastností izotaktického, syndiotaktického a ataktického PP [19].....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 2. Množství vazeb vyskytujících se v molekule TAIC – Triallylisocyanurat.....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 3. Chemicky – fyzikální vlastnosti TAIC – Triallylisocyanurat [23].....</i>	<i>62</i>