

Studie tribologických vlastností povrchu dutiny formy

Jakub Vašíř

Bakalářská práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub VAŠÍŘ**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Studie tribologických vlastností povrchu dutiny formy**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte studii dané problematiky
2. Zhodnoťte metody měření součinitele tření
3. Provedte experimentální určování součinitele tření
4. Vyhodnoťte experimenty

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1) VOCEL, M. – DUFEK, V.: **Tření a opotřebení strojních součástí**. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1976.

2) MOORE, D. F. **Principles and Applications of Tribology**. 1st ed., Oxford: Pergamon Press, 1975.

3) BEČKA, J.: **Tribologie**. Praha, Vydavatelství ČVUT, 1997.

4) MENNING, G. aj.: **Tribologie**, München, 1984.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Bílek**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **14. února 2006**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2006**

Ve Zlíně dne 11. ledna 2006


prof. Ing. Josef Šimóník, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Práce se zabývá objasněním pojmů souvisejících se třením a opotřebením. Uvádí příklady možností zvyšování odolnosti exponovaných dílů jenž přicházejí do styku s polymerními materiály a popis základních tribologických měřících metod. V praktické části byly provedeny měření na laboratorním zařízení, pracujícím na principu rotujícího disku. Sledoval se vliv tribologických vlastností dutiny formy a možnosti užití daného zařízení k intenzivním testu opotřebení pryží. Pro dané zařízení byl proveden návrh formy na výrobu zkušebních vzorků vstřikováním.

Klíčová slova: tribologie, polymery, koeficient tření, opotřebení

ABSTRACT

Presented bachelor work deals with definitions related to friction and abrasion. There are shown results of abrasion resistance for parts subjected to the contact with polymeric materials as well as description of fundamental tribological measurement methods. In the practical part experiment measurement were done for defining usability the tribological experimental method pin on disk to testing cavity surface mold and for a intensive testing attrition of elastomers. For this tribological method injection mold for experimental samples was also created.

Keywords: tribology, polymer, friction coefficient, abrasion.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto chci poděkovat za odborné vedení, cenné rady, užitečné podněty a dobré připomínky při vypracování bakalářské práce mému vedoucímu Ing. Ondřejovi Bílkovi.

Touto formou bych také rád poděkoval i ostatním lidem, kteří mě jakýmkoliv způsobem při vypracování bakalářské práce podpořili.

MOTTO

Per aspera ad astra - „ Po drsných cestách ke hvězdám“ (latinský citát)

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 TRIBOLOGIE	10
1.1 TŘENÍ.....	10
1.1.1 Rozdělení tření	11
1.1.2 Tření kluzné	12
1.1.3 Tření valivé	15
1.1.4 Tření opásáním.....	17
1.2 ZÁVISLOST SOUČINITELE TŘENÍ NA RYCHLOSTI	18
1.2.1 Stribeckova křivka.....	18
1.2.2 Statické tření a Break – Away Force.....	22
1.3 OPOTŘEBENÍ.....	23
1.3.1 Hlavní typy opotřebení.....	24
1.3.2 Intenzita opotřebení.....	28
1.3.3 Snižování abrazivního opotřebení v plastikářské technologii.....	30
1.3.4 Materiály a povrchy používané u zpracovatelských zařízení pro polymerní materiály.....	31
2 TRIBOLOGICKÉ MĚŘÍCÍ METODY	32
2.1 METODA ROTUJÍCÍHO DISKU	32
2.2 ZAŘÍZENÍ S VNĚJŠÍM NEBO VNITŘNÍM BUBNEM.....	33
2.3 ZAŘÍZENÍ S PLOCHÝM ŘEMENEM	34
2.4 MĚŘENÍ POMOCÍ NAKLONĚNÉ ROVINY.....	35
2.5 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ ABRAZÍ	36
2.6 ZAŘÍZENÍ NA OPĚTOVNÉ ZATĚŽOVÁNÍ FILMU.....	37
2.7 NÁRAZOVÉ NEBO DYNAMICKÉ ZKOUŠENÍ	38
2.8 ZAŘÍZENÍ S MĚŘENÍM KŘÍŽENÝMI VLÁKNY	39
2.9 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ PITTINGŮ A TRHLINEK	40
2.10 INTERFERENČNÍ ZAŘÍZENÍ.....	41
2.11 DALŠÍ MOŽNOSTI MĚŘENÍ	43
2.12 ZHODNOCENÍ TRIBOLOGICKÝCH METOD MĚŘENÍ	44
3 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	46
II PRAKTICKÁ ČÁST	47
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	48
4.1 POPIS ZAŘÍZENÍ A PRINCIP MĚŘENÍ.....	48
4.2 POUŽITÉ VZORKY	49
4.2.1 Abrazivo ve formě granulí	49
4.2.2 Tyčinky k testování opotřebení pryží	50

4.2.3	Ocelový vzorek mezikružší	50
4.2.4	Vzorky pryží.....	50
4.2.5	Vyhodnocení hmotnostního úbytku	51
4.2.6	Aplikovaný měrný tlak	51
4.3	NAMĚŘENÉ HODNOTY A ZÁVISLOSTI	52
4.3.1	Výsledky při abrazivním působení plastu na kalenou ocel ČSN 19856.4.....	52
4.3.2	Výsledky opotřebení pryží.....	58
4.4	NÁVRH ZAŘÍZENÍ NA VÝROBU VZORKŮ PRO TRIBOLOGICKÉ ZKOUŠKY.....	60
4.4.1	Charakteristika vzorků	60
4.4.2	Postup výroby.....	62
4.5	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI	63
ZÁVĚR		64
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		65
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		67
SEZNAM OBRÁZKŮ		69
SEZNAM TABULEK.....		71
SEZNAM GRAFŮ		72
SEZNAM PŘÍLOH.....		73

ÚVOD

Tribologické kontakty představují ve strojích často kritická místa, a proto jim musí být věnována zvýšená péče, jak už při vývoji a konstrukci, tak při výrobě a vlastním provozu. Tato kritická místa jsou často zahrnována do kontrolních míst, kterým je věnována pozornost při technických prohlídkách a opravách. Proto je potřeba již při navrhování výrobků uvažovat s tribologickými jevy, jako tření a vznik opotřebení. Daná problematika je neustále řešena a zdokonalována se zvyšujícími se požadavky na stroje a zařízení. Především je pak řešen bezporuchový provoz v závislosti na ekonomické stránce výroby a provozu.

Tribologie má dnes, mimo jiné, uplatnění u polymerních materiálů. Její využití neustále roste s dalším rozvojem používání těchto materiálů. Například při zpracování polymerů se zvyšuje užívání plniv. Tato plniva působí problémy u zpracovatelských strojů.

V mé práci se snažím přiblížit hlavní principy, jenž je nutné znát, při řešení tribologických problémů, například: popis jevu tření, opotřebení, druhy opotřebení, řešení ochrany před opotřebením a metody zkoušení tribologických vlastností.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TRIBOLOGIE

Tribologie je věda a technologie zabývající se vzájemným působením povrchů při jejich relativním pohybu. Konkrétněji je tribologie nauka o tření, mazání a opotřebením. Název je odvozen od řeckého slova tribos, jenž znamená v překladu tření.

1.1 Tření

Třením se zabývali lidé pravděpodobně už od nejranější historie lidstva, kdy zkoušeli přemísťovat různá tělesa a snažili se ulehčit si práci tím, že nejrůznějšími postupy a metodami snižovali třecí odpor.

Za významný mezník ve vývoji prehistorického člověka lze jistě považovat využití tepla vznikajícího třením dřev k rozdělání ohně. [14]

Základní popis tření, jako jevu, je přičítán ovšem až Leonardu da Vincimu (1452-1519). Vinciho skici, které vytvořil během svého života byly inspirací pro francouzského technika Amontonsa k provádění pokusů vedoucích k formulaci zákonů tření. Ze skic Vinciho a prací Amontonsa následně formuloval Coulomb svůj klasický zákon tření tímto způsobem:

- třecí síla je úměrná zátěži;
- koeficient tření zřejmě nezávisí na stykové ploše;
- klidový koeficient je větší než koeficient za pohybu;
- koeficient tření nezávisí na rychlosti pohybu [9];

Základní tři zákony vycházející z poznatků Vinciho, Amontonsa a Coulomba, jsou i dnes všeobecně přijímány, i když byly nalezeny odchylky od jejich přesné platnosti. [14]

Výzkum tření se dále pozvolna rozvíjel, avšak o zintenzivnění výzkum tření a opotřebením se dá mluvit až v druhé polovině dvacátého století. Rychle vzniká interdisciplinární nauka o vzájemném působení povrchů při jejich vzájemném (relativním) pohybu, která je nazývána tribologií. Kromě oblastí základního výzkumu, jako je tribofyzika, tribochemie a další nauky, tvoří důležitou oblast tribologie obor zvaný tribotechnika. Tribotechnika je zaměřená na přípravu podkladů pro konstrukci, výrobu, montáž, provoz a údržbu třecích uzlů. Uplatňování pravidel tribotechniky má vést zejména ke snížení třecích odporů, ke zpoma-

lení opotřebení nebo zpřesnění jeho prognózování, k použití vhodných materiálů a vhodných technologií.[1]

1.1.1 Rozdělení tření

Obecně lze najít několik různých druhů rozdělení tření, nejčastěji se vyskytující základní rozdělení je:

- dle druhu pohybu;
- dle stavu kontaktních ploch;
- dle místa působení třecích mechanismů;

Dle druhu pohybu:

- kluzné tření (popřípadě smykové), je vyhodnoceno součinitelem tření jako bezrozměrné veličiny, dané poměrem tangenciální třecí síly a zatěžovací normálové síly (podíl energie potřebné na vyrovnání třecích ztrát z celkové energie přivedené do systému);
- valivé tření, jde o tření při rotačním pohybu tělesa se zakřiveným profilem po rovině nebo jiné obecně zakřivené ploše;
- tření opásáním – nazýváme též jako tření Eulerovo;

Dle stavu kontaktních ploch:

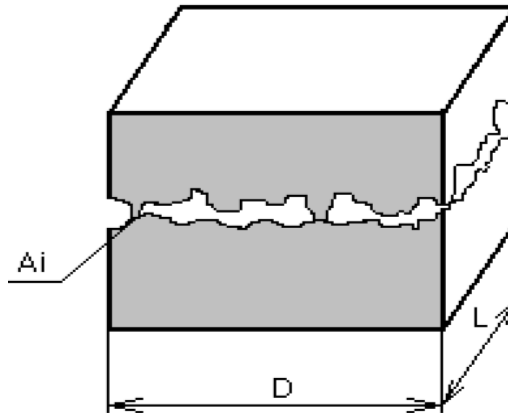
- tření tuhých těles, dotykové materiálové plochy jsou v tuhém skupenství;
- kapalinové tření, kontaktní vrstvy, ve kterých probíhá tření, mají vlastnosti kapaliny;
- plynné tření, viz. kapalinové, jen charakteristické vrstvy mají vlastnosti plynu;
- plazmatické tření, třecí proces má vlastnosti plazmy, tedy vysoce ionizovaného plynu;

Dle místa působení třecích ploch:

- vnější tření, třecí mechanismy působí mezi dvěma tělesy;
- vnitřní tření, třecí mechanismy působí mezi materiálovými vrstvami jednoho tělesa;

1.1.2 Tření kluzné

Názory na podstatu kluzného tření prošly složitým vývojem. Snahou teoretických přístupů bylo zejména vysvětlení základních makroskopických zákonů kluzného tření a vlivů povrchů třených materiálů.



Obr. 1. Mikroskopické dotykové plochy.

kde, A_i – plocha mikroskopické plošky, D, L – délky jednotlivých stran.

Základním poznatkem teorie tření je, že dotyk reálných těles se neuskutečňuje v celé makroskopicky pozorovatelné ploše dotyku, nýbrž jen v řadě mikroskopických plošek A_i vznikajících v místech styku výčnělků podle (Obr. 1). Tyto mikroskopické plošky vytvářejí skutečnou plochu dotyku, která je mnohem menší než zdánlivá dotyková plocha. [17]

Při dotyku čistých kovových povrchů se nerovnosti plasticky deformují do té míry, až vzniká skutečná styčná plocha S , která je definována jako součet všech mikroskopických dotykových plošek A_i , v nichž se tělesa dotýkají. Styčná plocha S je schopna unést kolmou tlakovou sílu N . Teorie předpokládá, že střední napětí v tlaku σ_D na skutečné styčné ploše S je stálé a velikost středního tečného napětí τ potřebného k usmýknutí spojů závisí na velikosti adheze v celé styčné ploše. Potom jsou kolmá tlaková síla a celková síla tření dány vztahy:

$$N = \sigma_D \cdot S \quad (1)$$

kde, N – kolmá tlaková síla, σ_D – střední napětí v tlaku, S – skutečná styčná plocha

$$T = \tau \cdot S \quad (2)$$

kde, T – celková síla tření, τ - velikost středního tečného napětí, S – skutečná styčná plocha

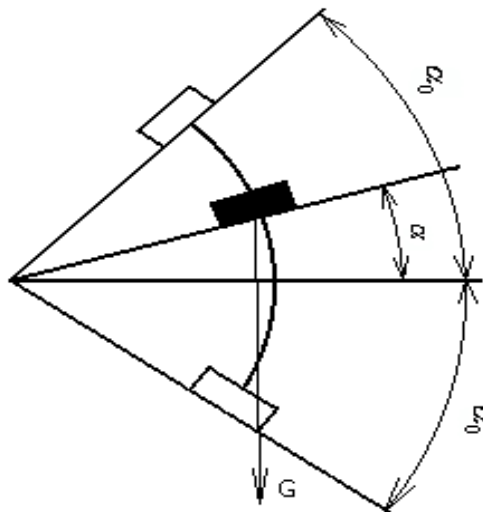
Takže součinitel smykového tření μ je definován jako poměr tečné síly ke kolmé tlakové síle. Po úpravě vztahů pak:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_D} \quad (3)$$

Pokud je adheze velmi značná, klade se obvyčejně τ rovno napětí na mezi pevnosti ve smyku měkkého povrchu, avšak dosud není jasná představa o tom, jaký je vztah kolmého napětí σ ve styčných ploškách k mechanickým vlastnostem materiálu jako celku. Lze předpokládat, že bude záviset na pružném a plastickém chování materiálu. Nelze tedy dosud předem spolehlivě určit součinitele smykového tření z mechanických vlastností třených materiálů. Uvedená představa vysvětluje skutečnost zjištěnou v širokém rozsahu experimentálních podmínek, že součinitel smykového tření nezávisí na velikosti kolmé tlakové síly, a tudíž, že síla tření je přímo úměrná kolmé tlakové síle a nezávisí na zdánlivé velikosti dotkových ploch.

$$T = \mu \cdot N \quad (4)$$

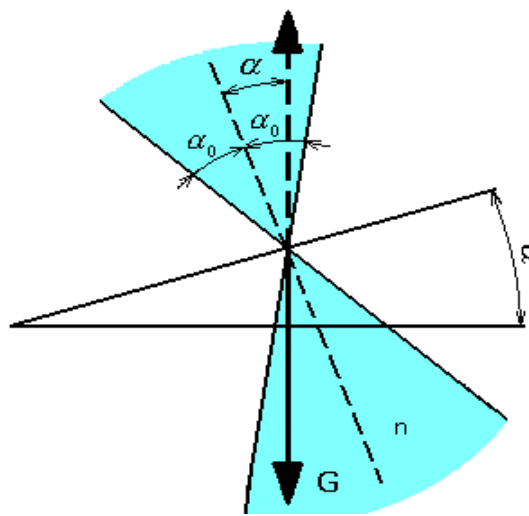
Položíme-li na šikmou rovinu nějaké těleso, pozorujeme, že těleso zůstává na rovině v klidu, má-li úhel sklonu α vhodnou velikost. Dle (Obr. 2) je patrné, že těleso nezůstává v klidu pouze při určité hodnotě úhlu, ale i v celém oboru úhlů.



Obr. 2. Úhly nakloněné roviny.

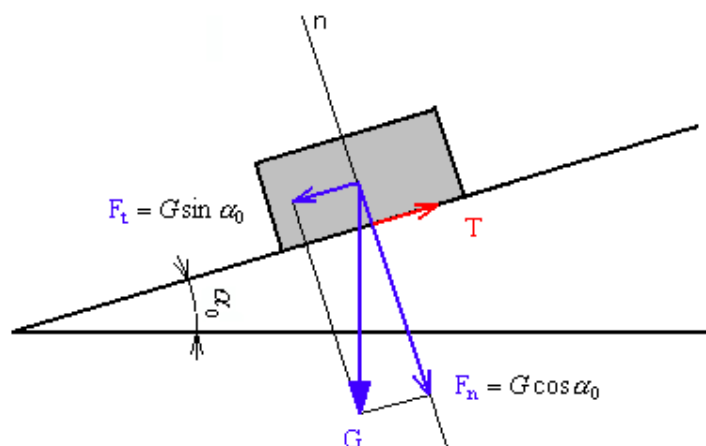
Pokud je úhel α menší než jistá mezní hodnota úhlu α_0 , tak se těleso nepohybuje. Jakmile však úhel α tuto mezní hodnotu překročí, dá se těleso do pohybu. Úhel α_0 závisí na povrchu obou stýkajících se těles a vhodně charakterizuje smykové tření, nazývá se úhlem tření v klidu. Jelikož je váha G tělesa, tak reakce roviny svírající s normálou roviny stejný úhel jako nakloněná rovina s vodorovným směrem (Obr. 3), bude těleso na rovině v klidu tak dlouho, dokud úhel α mezi váhou G nebo reakcí roviny a normálou n nepřekročí hodnotu α_0 , čili podmínka lpění je vyjádřena nerovností:

$$\alpha \leq \alpha_0 \quad (5)$$



Obr. 3. Podmínka lpění na nakloněné rovině.

Pokud se nepatrně zvětší úhel α sklonu nakloněné roviny nad hodnotu α_0 úhlu tření za klidu, dá se těleso na rovině do pohybu (Obr. 4).



Obr. 4. Reakce na nakloněné rovině.

Čekali bychom, že se těleso bude velmi z volna a prakticky rovnoměrně pohybovat po nakloněné rovině dolů, neboť tečná složka $G\sin\alpha$ váhy bude jen zcela nepatrně větší než síla tření $\mu_0 N = \mu_0 G\sin\alpha$. Ve skutečnosti zpravidla zjistíme, že nastane zřetelně zrychlený pohyb. Při němž je zrychlení větší, než by mělo být podle zrychlující síly $G\sin\alpha - \mu_0 G\sin\alpha$. Tuto skutečnost je možné vysvětlit jen tím, že jakmile se těleso dá do pohybu, zmenší se součinitel tření a zůstává pak za pohybu prakticky na nižší hodnotě. Součinitel tření μ , který působí mezi povrchy vzájemně se pohybujících se těles, se nazývá dynamický koeficient tření. Bývá tedy zpravidla menší než statický koeficient tření:

$$\mu < \mu_0 \quad (6)$$

Zrychlující síla působící na těleso v rovině bude pak $(G\sin\alpha - \mu \cdot G\sin\alpha)$ a zrychlení tělesa a , značí-li m jeho hmotu, bude:

$$a = \frac{G}{m} (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) = g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \quad (7)$$

kde, a – hodnota relativního zrychlení, g – hodnota gravitačního zrychlení, α - úhel sklonu nakloněné roviny, μ – součinitel tření [17]

1.1.3 Tření valivé

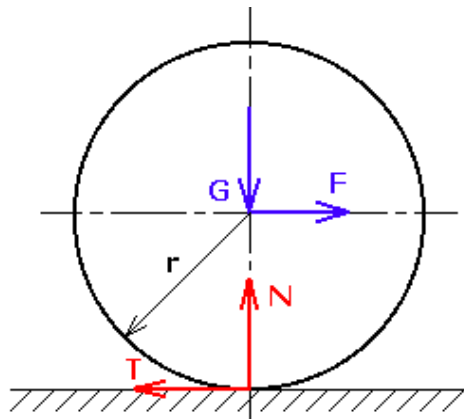
Při pohybu pevného oblého tělesa po jiném tělese, ke kterému je první těleso tlačeno určitou silou, odporuje tomuto tělesu tzv. valivé tření. Tento odpor je jiného druhu než odpor při smykovém tření. [17]

Odpor proti valení bývá zpravidla mnohem menší než třecí síla při smykovém tření. [3]

Dle následujícího (obr. 5) a úvahy, že na válec váhy G na vodorovné drsné rovině působí malá tažná síla F . Působení roviny na válec je dáno reakcemi N a T v přímce dotyku. Pokud má být válec v klidu, musí platit podmínky rovnováhy:

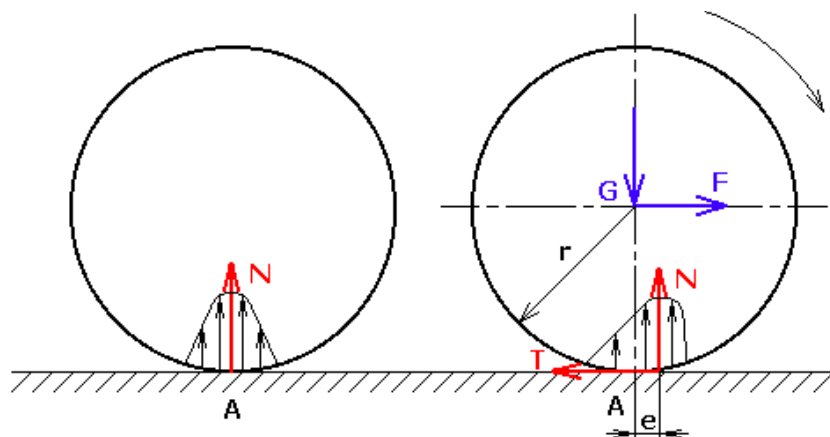
$$N - G = F - T = r \cdot F = 0 \quad (8)$$

Z daných podmínek plyne že tažná síla F a reakce T jsou nulové. Vzniklá reakce N je velikostí shodná se zatížením G . Působí-li tedy nějaká sebemenší síla F , nemůže být válec v klidu a bude se valit. Pokusy však ukazují, že u skutečných těles může působit malá síla F , aniž se těleso dá do pohybu. Musí tu tedy existovat nějaký odpor který brání tělesu v pohybu.



Obr. 5. Valivé tření.

Tento valivý odpor vzniká zřejmě tím, že se rotační těleso a podložka při dotyku nepatrně deformují, takže dotyk nenastává v bodě nebo přímce, ale v ploše. Jsou-li tělesa navzájem v klidu, je rozložení měrných tlaků v dotykové plošce zhruba souměrné kolem osy tělesa (Obr. 6.). To znamená, že výslednice N prochází ideálním bodem dotyku A a leží v ose. Z (Obr. 6) vidíme snadno, že pokud má válec vlivem tažné síly F a síly tření T snahu se valit, vznikne nesouměrné rozložení měrných tlaků tak, že na běžné straně budou tlaky větší než na straně opačné. Proto neprochází výslednice N těchto měrných tlaků ideálním bodem dotyku A . [17]



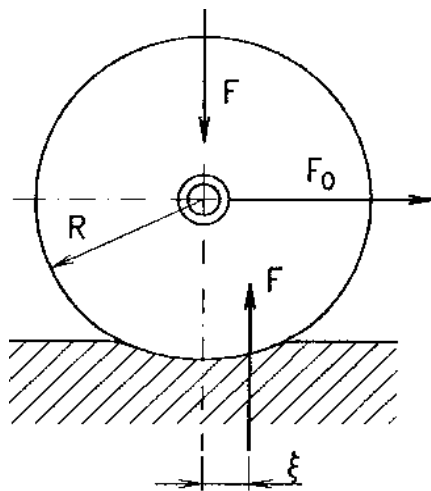
Obr. 6. Rozložení měrných tlaků u valivého tření.

Následné vzniklé deformace valením nemusí být pouze pružné, ale často dochází i k plastickému přetvoření. Vzhledem k vnitřnímu tření v materiálu se část přivedené energie při vzniku a zpětném vypružení pružných deformací změní na teplo (hystereze). Energie vynaložená na plastické deformace rovněž představuje ztráty a stejně tak doprovodné smykové tření při prokluzu kola a podložky. Proto se v technických řešeních používají často valivé kontakty s tvrzeným povrchem, kdy deformace a ztráty jsou poměrně malé (Tab. 1.).

Zůstávají malé hysterezní ztráty, které přítomnost maziva ovlivňuje jen nepatrně určitou změnou v rozložení povrchového zatížení tlakem kapaliny. Pro sílu F_0 potřebnou k pohybu valením existuje vztah:

$$F_0 = F \cdot \frac{\xi}{R} \quad (9)$$

kde, F – zátěžná síla od podložky, ξ – rameno valivého odporu, R – rádius valeného elementu. [1]



Obr. 7. Určení potřebné síly.
k pohybu valením

Tab. 1. Příklady velikostí ramen valivých odporů pro některé materiály valení. [1]

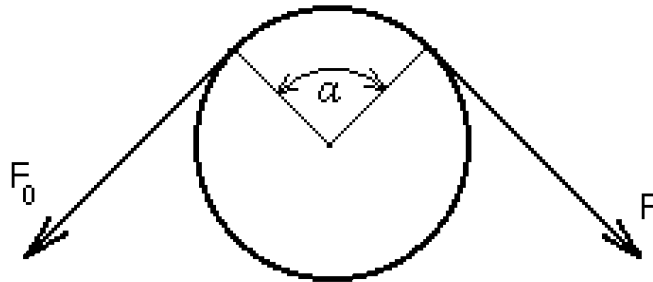
Materiály kola (válec) / podložka	poloměr R [mm]	rameno ξ [mm]
měkká ocel / měkká ocel	30	0,5
tvrdá ocel / tvrdá ocel	30	0,03
gumová kola plná / asfalt	30	1,6
ocelové kolo / ocelová kolej	30	0,4

1.1.4 Tření opásáním

Tření opásáním nazýváme také jako tření Eulerovo (Obr. 8). Například při tření opásaných předmětů kruhového průřezu používáme Eulerův vztah:

$$F = F_0 \cdot \exp(f_\alpha) \quad (10)$$

kde, F - třecí síla za třecím tělesem, F_0 - napínací síla před tělesem, f_α - součinitel tření opásáním pro daný úhel a danou třecí dvojici. [17]



Obr. 8. Rovnováha sil opásaného tření.

Tření opásáním bývá taky někdy nazýváno třením vláknovým. Zřejmě nejčastěji vzniká při smýkání lan a pásů po válcové ploše. Často se s výhodou využívá u kladkových strojů a jiných zařízení, kde je důležité dosahovat většího součinitele tření.

Zřejmě je, že obecně lze říci, že čím větší je úhel opásání tím větší je pak třecí síla.

Použití tření opásáním lze najít v různých technologických zpracovatelských metodách, speciálně pak při odtahu gumových pásů a textilií.

1.2 Závislost součinitele tření na rychlosti

Je známo, že za klidu je odpor proti relativnímu pohybu největší. Jakmile pohyb nastane, součinitel tření se vzrůstající rychlostí prudce klesá.

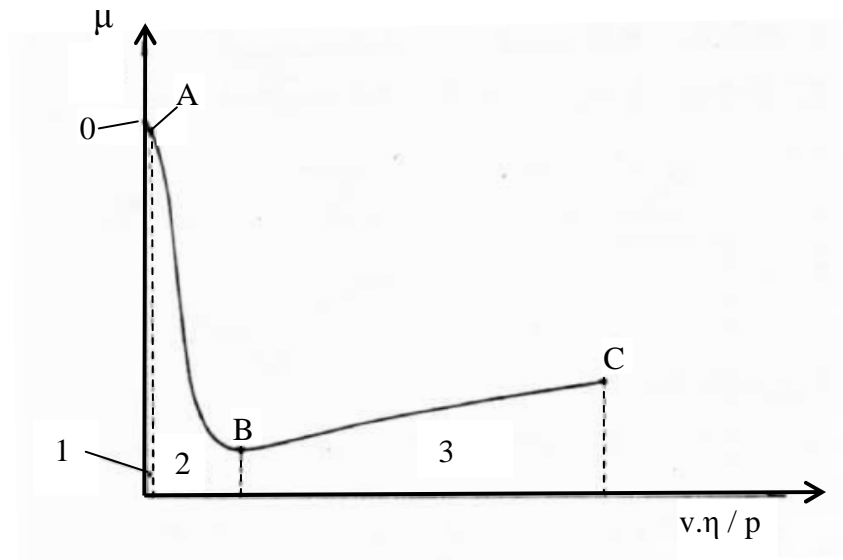
Je-li mezi stykovými plochami přítomno mazivo, vzniká v něm za pohybu tlak p , který působí oddělení styčných ploch od sebe. Při velmi malé vzájemné rychlosti vzniká suché tření - povrchy se stýkají vrcholky svých mikronerovností. Při větších rychlostech nastává tření smíšené, při němž dochází ještě k dotyku vrcholků nerovností, ale část zatížení je přenášena tlakem média uzavřeného mezi nerovnostmi ploch. Kapalinné tření nastane tehdy, když tlak p již unese celé zatížení. [3]

1.2.1 Stribeckova křivka

Závislosti velikosti součinitele tření na rychlosti vyjadřuje Stribeckova křivka. Byla nazvána podle autora článku pana Stribeck, jenž v něm popis tření zobecnil. Ve stejném článku je tlumení třecí síly při nízkých rychlostech nazýváno Stribeckovým efektem. [6]

Získaná charakteristika změny součinitele tření na rychlosti je silně závislá na aplikaci a mění se podle použitého materiálu, teploty, atd. [11]

Na následujícím (Obr. 9) je Stribeckova křivka, platící pouze pro jednu konkrétní hodnotu zatížení a jemu odpovídající hodnotu tlaku p .



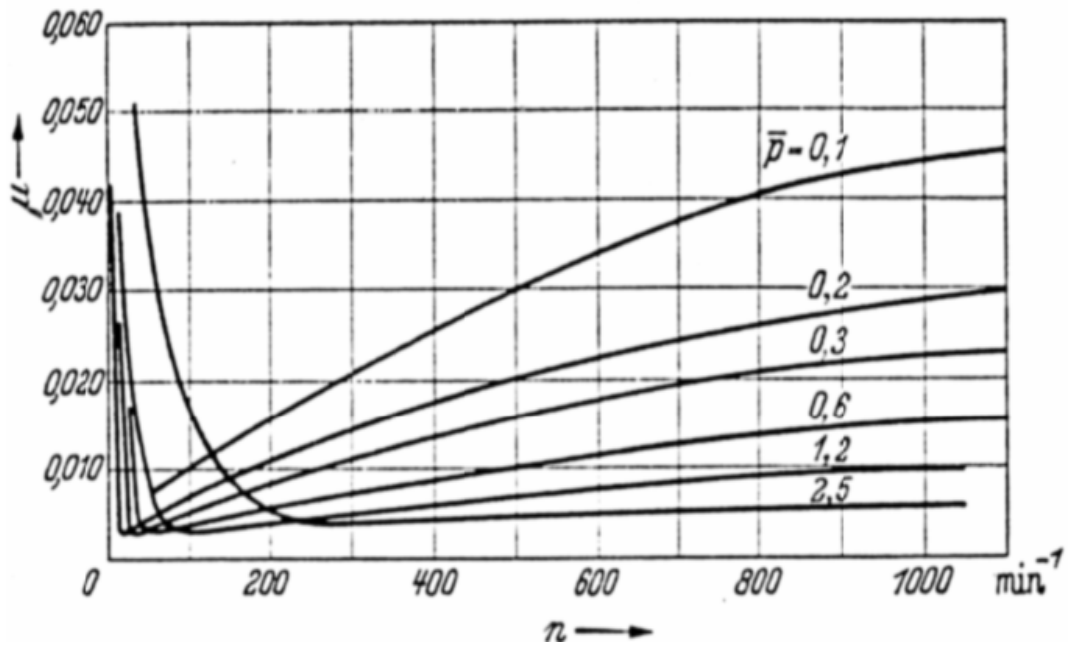
Obr. 9. Stribeckova křivka – závislost součinitele tření na rychlosti.

kde, v – rychlost, η - dynamická viskozita maziva, p – tlak v mazivu, μ – součinitel tření

Danou křivku je možné rozdělit do oblastí:

- 0, oblast statického tření μ_0 ;
- 1, oblast suchého tření $\mu > 0,1$;
- 2, oblast smíšeného tření $\mu = 0,1$ až $0,005$;
- 3, oblast kapalinového tření $\mu > 0,005$;

Kolmann prováděl zajímavé experimenty při různých hodnotách středního tlaku maziva p . Z výsledků na následujícím (Obr. 10) je zřejmé, že při větším tlaku v mazivu součinitel tření s otáčkami ložiska tolik nevzrůstá. [3]



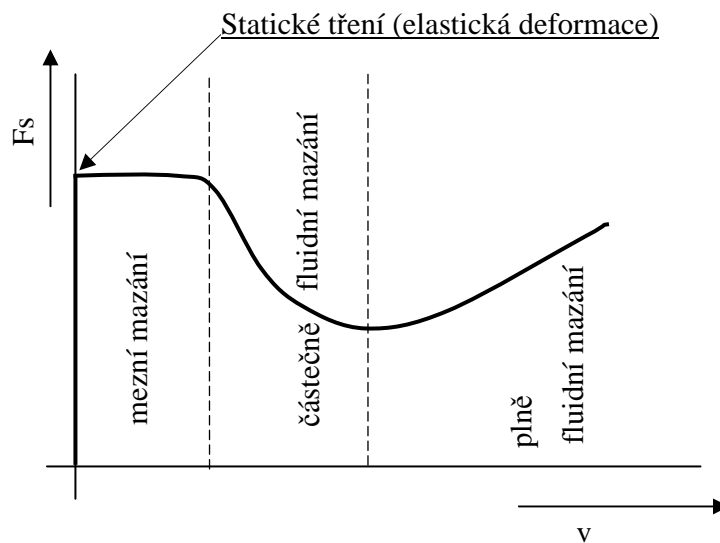
Obr. 10. Stribeckovy křivky pro čep $\varnothing 70$ mm pro různé hodnoty středního tlaku p .

kde, n – otáčky, p – tlak v mazivu, μ – součinitel tření. [3]

Pro obecný pohled se uvádí zobecněná podoba Stribeckovy křivky (Obr. 11)

Zobecněná Stribeckova křivka vyjadřuje závislost třecí síly na relativní rychlosti pohybujícího se tělesa po podložce. Tuto funkci lze rozdělit do čtyř režimů, jak je patrné z následujícího (Obr. 11), každý z těchto režimů platí pouze pro určitý úsek rychlostí a pro velikost třecí síly v jednom konkrétním režimu jsou významné vždy jiné fyzikální principy.

[11]



Obr. 11. Zobecněná Stribeckova křivka.

kde, F_s – třecí síla, v – velikost relativní rychlosti tělesa po podložce.

Oblasti zobecněné Stribeckovy křivky:

- statické tření – v této oblasti dochází k deformacím drsností povrchů styčných ploch;
- mezní mazání – při velmi malých rychlostech nedojde k vytvoření tekutého filmu mezi povrchy těles, proto také v tomto režimu dochází ke kontaktu tělesa na těleso, dochází ke značnému opotřebování povrchů;
- částečné fluidní mazání – mazivo je vtáhnuto do kontaktní zóny a mezi tělesy vzniká vrstva tekutého filmu, ale i zde dochází k pevnému kontaktu, třecí vlastnosti v této oblasti jsou určeny rychlostí pohybu, geometrií kontaktních ploch a potažmo použitým mazivem a jeho viskozitou;
- plně fluidní mazání – při pohybu je mezi povrchy dvou těles vytvořena vrstva tekutého filmu, která je dostatečně silná na to, aby nedocházelo k pevným kontaktům, opotřebením je tedy v tomto případě minimální;

Vzrůstající hodnota součinitele tření při větší rychlosti je způsobena turbulencí v mazací vrstvě. Položme si otázku: Proč je klidové tření výrazně větší než tření za pohybu?

Odpověď nalezneme, když si uvědomíme, že stýkající se vrcholy mikronerovností mají velmi malou plochu, takže v nich od vnějšího zatížení vzniká velký tlak. Tím vznikají místní mikroplastické deformace a adheze, tedy přilnutí obou povrchů k sobě.

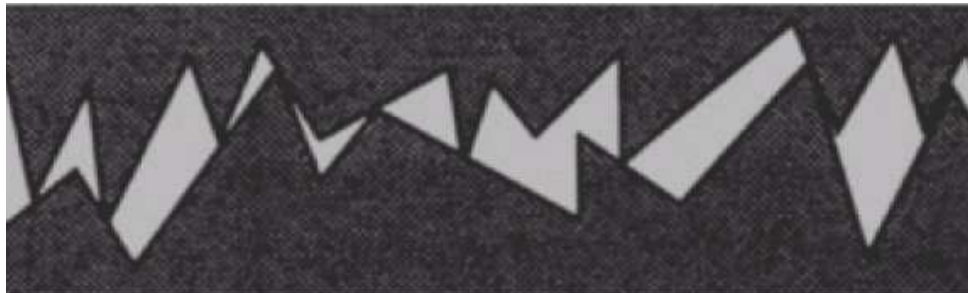
Tření způsobuje energetické ztráty a opotřebení funkčních povrchů. Tím limituje jak možnost zatěžování kontaktních ploch, tak i velikost relativní rychlosti. Při rozvoji techniky však vzniká požadavek zvyšování rychlostí a tlaků a navíc ještě rostou nároky na spolehlivost. To jsou zřejmé protikladné tendence.

Pro dosažení vyšší spolehlivosti za náročnějších podmínek je nutný základní výzkum zaměřený na hlavní směry rozvoje maziv, mazacích postupů, výpočetních metod pro optimalizaci třecích dvojic, vývoj nových materiálů a hledání nových konstrukčních řešení. [3]

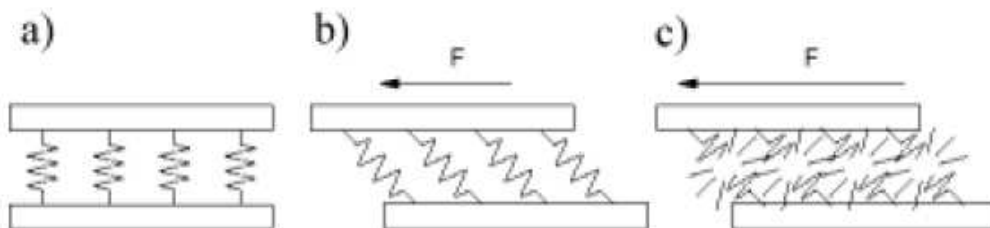
1.2.2 Statické tření a Break – Away Force

Síly působící na těleso v klidu se nazývají síly statického tření. Začne-li působit vnější síla, dojde k deformaci drsností povrchů styčných ploch viz. (Obr. 12).

Kontakt mezi tělesem a podložkou se pak chová jako pružina. Tento stav je znázorněn na (Obr. 13a)



Obr. 12. Schématické zakreslení kontaktu dvou povrchů znázorněno Gäfvertem v roce 1996.



Obr. 13. Statické tření a break – away force.

Stav tělesa v klidu je znázorněn na (Obr. 13a). Působením vnější síly na těleso u (Obr. 13b) ještě nedochází k utržení tělesa. V případě kdy vnější působící síla dosáhne hodnoty větší než je hodnota sil statického tření, dojde k utržení tělesa viz. (Obr. 13c). Název vnější síly jenž zapříčinila utržení tělesa se nazývá break-away force. [11]

1.3 Opotřebení

Opotřebení je nežádoucí změna povrchu nebo rozměru tuhých těles, způsobena buď vzájemným působením funkčních povrchů a média, které opotřebování vyvolává a nebo se projevuje jako odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z funkčního povrchu mechanickými účinky popřípadě doprovázenými i jinými vlivy, např. chemickými nebo elektrochemickými. [12]

Procesem opotřebení se zabývá věda tribologie, problém opotřebení řeší volbou materiálu požadovaných kvalit, speciálními prostředky a technologickými postupy zpracování.

Rozdělení uvedené v následující kapitole představuje jen základní zjednodušené schéma. V praxi se často jednotlivé typy kombinují, vzniká tak řada variant.

Jako příklad můžeme uvést opotřebení pouzdra vytlačovacího stroje pro plasty plněné skleněnými vlákny účinkem abrazivních skleněných částic v kombinaci s korozivním působením polymeru. [12]

Problematika opotřebení je v posledních letech čím dál více aktuální, z důvodu zvyšování požadavků na produkci polymerních výrobků se zvýšenými mechanickými vlastnostmi, jenž se docilují přidáním plniv.

Dále pak v plastikářském průmyslu dochází ke zvyšování tlaků a smykových rychlostí a tím také ke zvyšování abrazivního opotřebení v součástech zpracovatelských zařízeních. Typickými projevy opotřebení abrazí u plastikářských strojů jsou rýhy. [12]

Velikost opotřebení je určována:

- druhem a povahou tření;
- velikostí měrného tlaku mezi stýkajícími se plochami a povahou, jakou má působící zatížení;

- rychlostí, s jakou se po sobě přemisťují třecí dvojce a způsobem jak se rychlost mění v čase;
- způsobem přívodu, množstvím a jakostí maziva;
- teplotními podmínkami;
- korodujícími účinky;
- přítomností brusných látek, jejich jakostí a rozměry;
- stupněm a způsobem, jak se odstraňují zplodiny opotřebení;
- tvarem a rozměry třecích dvojic, jimiž jsou určovány podmínky tření, chlazení, přívodu maziva;
- počátečním stavem povrchů;
- fyzikálně – mechanickými, chemickými a fyzikálně – chemickými vlastnostmi třecích dvojic;

Obvykle dochází k opotřebení takovým způsobem, že nelze jednoznačně považovat jeden druh opotřebení za jediný probíhající proces, ale současně probíhá více druhů opotřebení. Podle typických projevů lze probíhající opotřebení charakterizovat podle druhu, který se na procesu nejvýrazněji podílí. Přitom v průběhu procesu opotřebení se může měnit podíl jednotlivých druhů opotřebení na procesu. Nejrozsáhlejší poruchy třecích ploch jsou spojeny s neúnosným zvýšením teploty v kontaktu. [1]

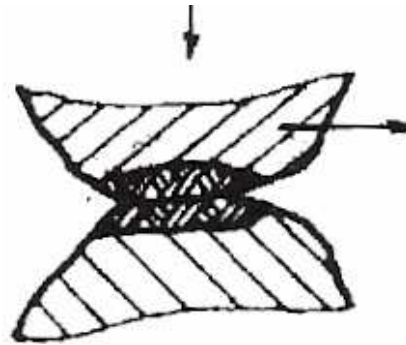
1.3.1 Hlavní typy opotřebení

Adhezivní opotřebení

Adheze způsobuje těsné přilnutí a vznik mikrosvárů, které při pohybu vznikají a vzápětí se porušují. Adhezní síly způsobují vytrhávání částic z funkčního povrchu. Je-li mezi funkčními povrchy mazivo, může dojít k oddělení kovových povrchů, čímž se proces opotřebení zastaví. [3]

Příklad výskytu je například při nízkých teplotách u obrábění. Vyskytuje se na čele břitu nástroje. Může vzniknout jak u obrábění ocelí s tvorbou dlouhé třísky, tak i u materiálů s krátkou třískou. [4]

Charakteristickou vlastností adhezivního opotřebení je přenos materiálu z jednoho povrchu na druhý a naopak. Intenzivní forma adhezivních účinků je nazývána zadírání. [1]



Obr. 14. Adhezivní opotřebení.

Abrazivní opotřebení

Oddělování částic z funkčního povrchu je způsobeno účinkem tvrdého a drsného druhého tělesa nebo tvrdých částic, které se dostaly mezi funkční povrchy. [3]

Typickým poškozením jsou rýhy na povrchu. Mnohdy se volné částice zamáčknou do měkkého povrchu a rýhují tvrdší povrch. [1]

Abrazivní opotřebování se vyskytuje často u zpracovatelských strojů na zpracování polymerů. U těchto strojů dochází vlivem plniv často k silným abrazivním účinkům.

Abrazivní otěr je také rozšířeným mechanismem při obrábění, lze jej připodobnit k operaci broušení kdy se tvrdé částice dostávají do prostoru mezi povrch obrobku a povrch nástroje.

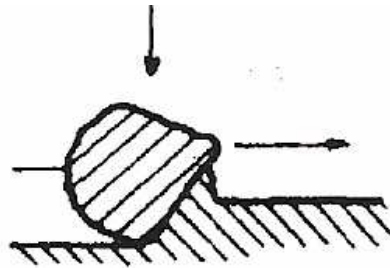
Výskyt je významný především při nízkých řezných rychlostech, kdy se oba materiály stýkají na vrcholcích mikronerovností. Otěr je tedy významný především při obrábění nástrojů z nástrojových a rychlořezných ocelí. [4]

U abraze rozlišujeme prakticky dva případy:

- opotřebovávají-li tvrdé částice jeden funkční povrch, jde o interakci dvou těles (částic) a součástí;
- abrazivní opotřebení částicemi, které jsou mezi dvěma funkčními povrchy; [12]

U druhého bodu jde tedy o interakci tří těles. Dochází k tomu obecně prakticky u všech pohybových mechanismů do nichž vnikají částice z okolí. Tak je tomu i při opotřebení

vodících ploch šnekových strojů pracujících s plněnými plasty, kde dochází k výrazné plastické deformaci povrchových vrstev materiálu.[5]



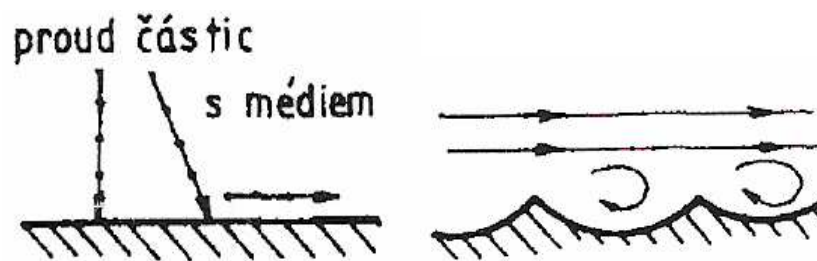
Obr. 15. Abrázivní opotřebení.

Erozivní opotřebení

Poškozování povrchu se děje účinkem částic, které jsou unášeny proudem nějakého média (kapalina, plyn). [3]

Problémy erozivního opotřebení jsou obvykle vyvolány malými částicemi, které však mohou mít vlivem vlastní rychlosti či rychlosti nosného média velkou nárazovou energii, a tedy i velký účinek v mikroobjemech na funkčním povrchu. Pro erozivní opotřebení je typické obvykle nepravidelné erozivní zvrásnění. [15]

Tento druh opotřebení může vzniknout například v tekutinových mechanismech. [3]

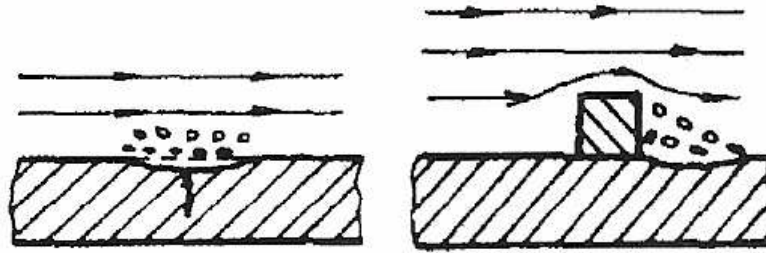


Obr. 16. Erozivní opotřebení.

Kavitační opotřebení

Vzniká rovněž v tekutinových mechanismech a to v místech s náhlou změnou průřezu. V zúženém průřezu vzrůstá rychlost proudění a současně klesá tlak. Pokles tlaku kapaliny má za následek uvolňování bublinek páry a nebo rozpouštěných plynů. Za překážkou ve zvětšeném průřezu tlak opět vzroste a bublinky zanikají, což způsobuje rázy a tím poškozování povrchu. [3]

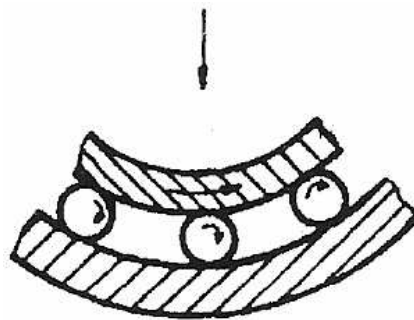
Dané opotřebení je spojeno s vytrháváním částic z povrchu. [1]



Obr. 17. Kavitační opotřebení.

Únavové opotřebení

Vzniká u součástí s cyklickým zatěžováním povrchu velkými tlaky. Jsou to např. funkční plochy valivých ložisek a boků zubů ozubených kol. Proces únavy materiálu v povrchové vrstvě vede ke vzniku trhlin pod povrchem a postupně k oddělování částic materiálu, takže na kontaktní ploše vznikají dolíčky. Tento jev se nazývá pitting. [3]

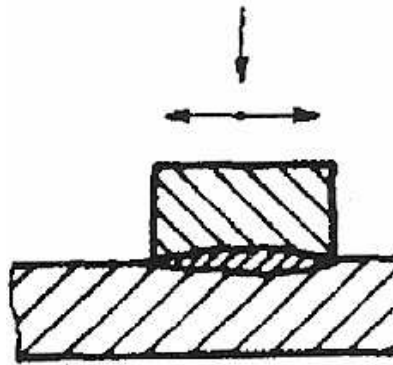


Obr. 18. Únavové opotřebení.

Vibrační opotřebení

Je charakterizováno oddělováním částic vzájemnými kmitavými tangenciálními posuny funkčních povrchů s amplitudou několik desítek mikrometru při působení normálového zatížení. Při tak malých posuvech je odstraňování opotřebovaných částic značně ztíženo. [8]

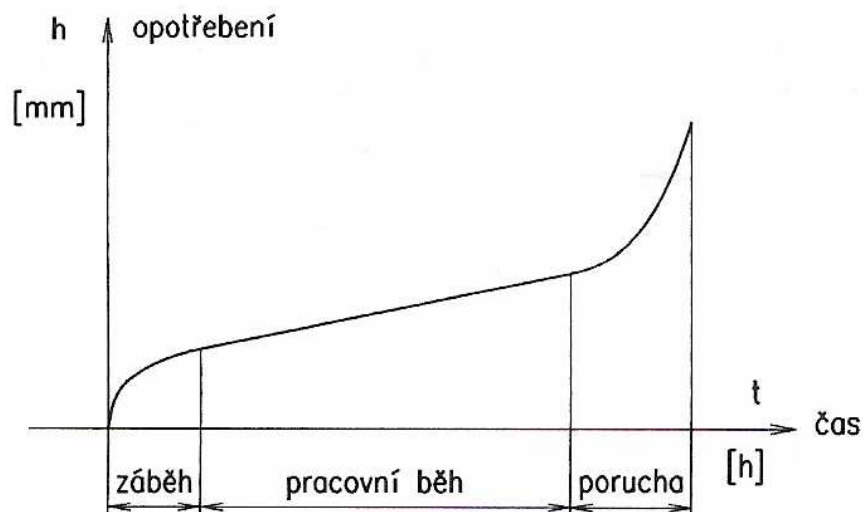
Vibračním opotřebováním tedy vznikají částice, které svým vzhledem připomínají produkty koroze. Tyto částice působí silně abrazivně a jejich působením dochází k poruchám velmi tvrdých povrchových vrstev. [1]



Obr. 19. Vibrační opotřebení.

1.3.2 Intenzita opotřebení

Opotřebení je v tribologických systémech definováno jako kvantifikovaná veličina. 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.



Obr. 20. Možný nárůst opotřebení s časem při stálých podmínkách.

kde, h – je tloušťka opotřebením odebrané vrstvy, t – je čas v provozu.

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.

Po určité době provozu (pracovní běh), po kterou se opotřebení pomalu lineárně s časem zvětšovalo, začne opotřebení progresivně narůstat. Může to být způsobeno odebráním tvrzené vrstvy z povrchu součásti a zvýšením opotřebení měkčího materiálu pod touto vrstvou. Stejně se tak 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 progresivnímu charakteru poškození lze hovořit o poruše nebo havarijním stavu. S růstem opotřebení se zvětšují vůle ve styku a může docházet ke zvyšování dynamických účinků a ke vzniku rázů. Tato situace ještě zvyšuje progresivní charakter děje. Stav se navenek někdy projevuje chvěním a hlukem a roste přitom namáhání jednotlivých součástí. [1]

Intenzita opotřebení závisí na mnoha činitelích a bývá s časem proměnlivá. Lze ji zjišťovat experimentálně. Patří k hodnotám s nimiž musíme uvažovat 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. [3]

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. [1]

Intenzitu opotřebení lze tedy například vypočítat jako závislost přírůstku opotřebení na čase.

$$I = \frac{\Delta VB}{\Delta T} \quad (11)$$

kde, ΔVB – je přírůstek opotřebení, ΔT - je přírůstek času, I je intenzita opotřebení. [16]

1.3.3 Snížení abrazivního opotřebení v plastikářské technologii

Při zpracování polymerních materiálů je důležité, aby byla odolnost proti abrazi co největší, zvláště u použití abrazivních plniv. [5]

Zdůrazněním, že v praxi jde hlavně o setkávání se s kombinacemi několika druhů namáhání. Dochází i ke složitějším případům, kdy opotřebení jednoho typu vyvolá opotřebení druhého typu, které pak v celém ději převládne. [14]

Z důvodu potřeby co největší odolnosti a životnosti dílů strojů na zpracování polymerních látek přistupujeme k několika možnostem dosažení daných cílů:

- optimalizace složení plastu;
- optimalizace podmínek zpracování;
- optimalizace konstrukce strojů;
- výběr vhodných materiálů pro funkční části zpracovatelských strojů, nebo náhrada již aplikovaných materiálů za materiály z vyšší odolností proti abrazi; [5]

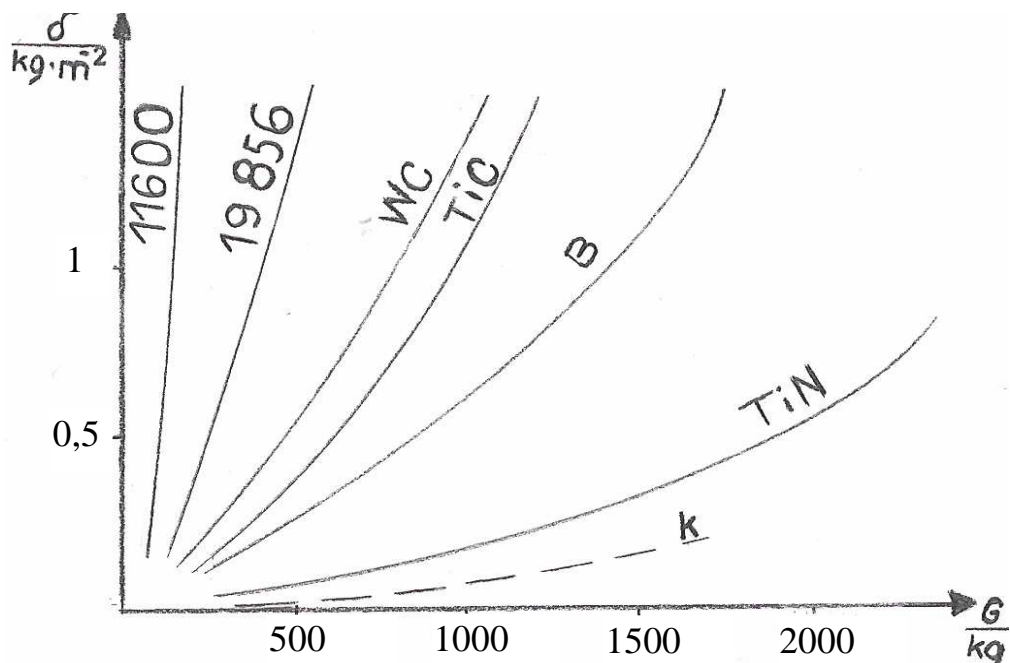
Po vyčerpání všech konstrukčních a provozních možností jsme často donuceni se zabývat volbou vhodného materiálu jenž by vedl ke zvýšení životnosti exponovaných dílů. [2]

U kovových materiálů zvyšujeme životnost zejména způsoby:

- náhradou měkkých, tepelně nezpracovaných ocelí ocelmi zušlechťenými na velkou tvrdost, nebo speciálními legovanými slitinami;
- vytvořením speciálních povrchových vrstev různými technologickými postupy – povrchovým kalením, tepelně chemickými úpravami (cementace, nitridace, sulfonitridace, boridování a jiné) nebo elektrogalvanickým nanášením vrstev (chromování);
- plátováním, pájením, navařováním nebo nástřiky speciálními materiály na funkční povrchy;
- náhradou materiálů neželeznými kovy nebo materiály práškové metalurgie (slinutých karbidů), technické keramiky (slinutého kordu); [5]

1.3.4 Materiály a povrchy používané u zpracovatelských zařízení pro polymerní materiály

Materiál šneku musí mít vysokou pevnost, vynikající odolnost vůči opotřebení, chemickou odolnost a přitom musí být snadno obrobitelný. Běžně se používají nitridační oceli s pevností v tahu mezi 850 až 1000 MPa, které se po opracování nitridují nebo ionizují na tvrdost přes 65 HRC. Některé nově vyvinuté povlaky zajišťují lepší vlastnosti než běžné způsoby tepelného zpracování. Pro zpracování PVC nejsou vhodné chromované šneky. Zvyšováním životnosti šneku lze docílit navařováním tvrdokovu (satelitu) na nejexponovanější místa. Takto upravené šneky jsou vhodné zejména pro vytlačování plněných polymerů.



Obr. 21. Vliv úprav pracovních povrchů na opotřebení plněnými polymery.

kde, δ – velikost opotřebení, G – velikost zátěže. [13]

Pro pracovní povrchy je tedy zřejmě důležité volit vhodný druh povrchové úpravy pro vhodnou dobu životnosti. Dle (Obr. 21) je zřejmé že největší opotřebení lze najít u materiálů bez povrchové úpravy.

Glaubitz dokázal, že opotřebení povrchu je funkcí jeho tvrdosti. Zvýšíme-li tvrdost z 650 HV na 750 HV, sníží se hodnota měrného opotřebení z 0,1 na 0,03 mg.cm², tj. asi třikrát.[5]

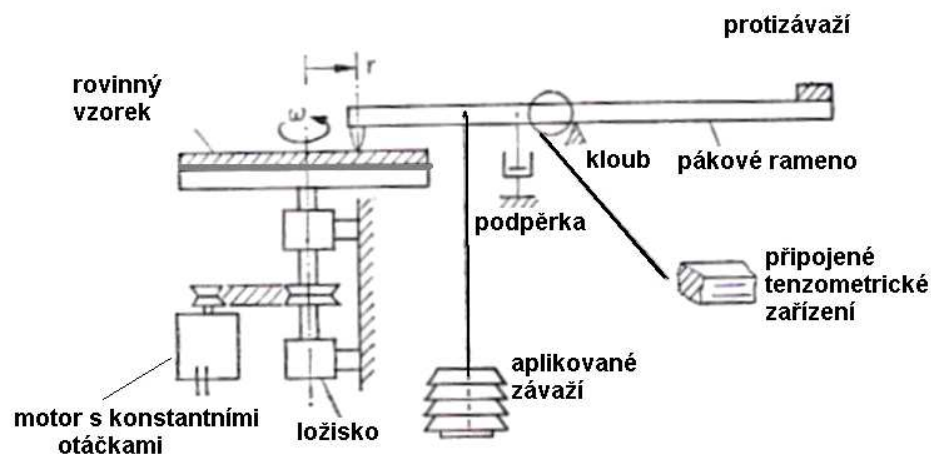
2 TRIBOLOGICKÉ MĚŘÍCÍ METODY

Metod zjišťování tribologických vlastností je více. Někdy jsou shlukovány metody měření součinitele tření a opotřebení. Je totiž zřejmě významné měření velikosti opotřebení na změně součinitele tření. Ovšem často jsou tribologické zkoušky rozděleny na zkoušky tření a zkoušky opotřebení. Obecně lze však říci, že u zkoušek při níž řešíme intenzitu opotřebení spadají do zkoušek dlouhodobých. V následujících bodech popisují některé s principů či metod tribologických zkoušek.

2.1 Metoda rotujícího disku

Jednoduché zařízení skládající se z disku se speciálně uloženým vzorkem obvykle ze železného nebo polymerního materiálu. Protějším koncem je obvykle kuželka, koule, nebo válcovitý hrot, který je vykonstruovaný z tvrdého materiálu a je připevněn k ramenu páky na jejíž druhé části je zatížen proti závažím. Normálová síla je vyvozována přidavným závažím.

Pohon obstarává motor s konstantními otáčkami. Ten pohání přes spojku držák zkušebního tělíška. Snímání velikosti třecí síly umožňuje rameno které je deformováno. [9]



Obr. 22. Metoda rotujícího disku pro měření tření a opotřebení.

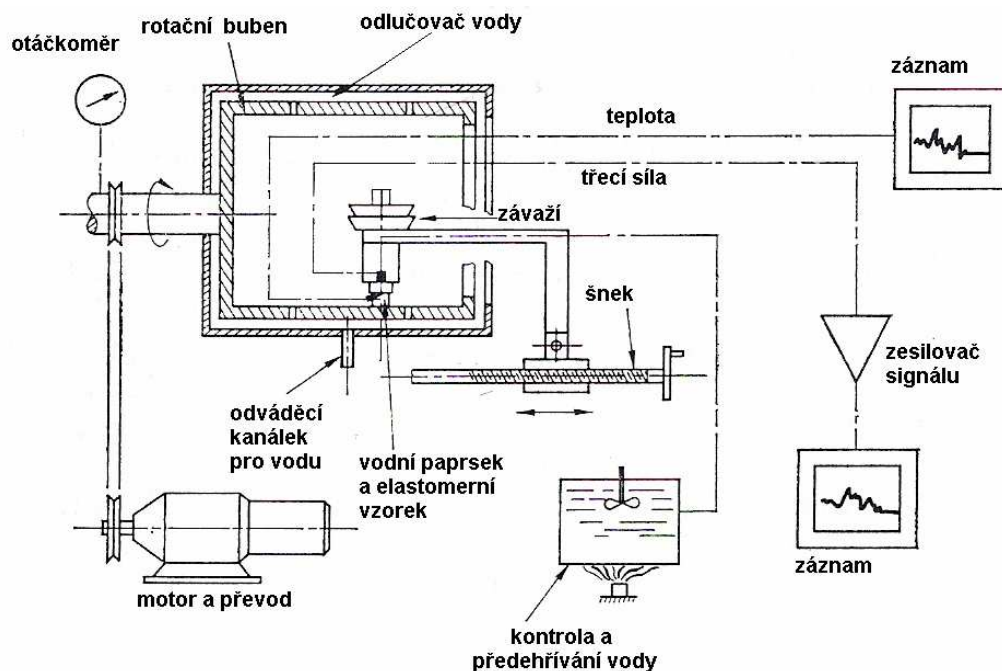
2.2 Zařízení s vnějším nebo vnitřním bubnem

Toto zařízení využívá jednoho vnějšího nebo jednoho vnitřního bubnu. Tyto bubnové zařízení slouží k zjišťování třecí síly. V daném zařízení je třecí síla reprezentovaná komplexem poněkud složitých přiblížení.

Oba typy zařízení vyžadují rychlostně variabilní pohon, pro zajištění možných změn kluzných rychlostí mezi testovaným vzorkem a povrchem bubnu.

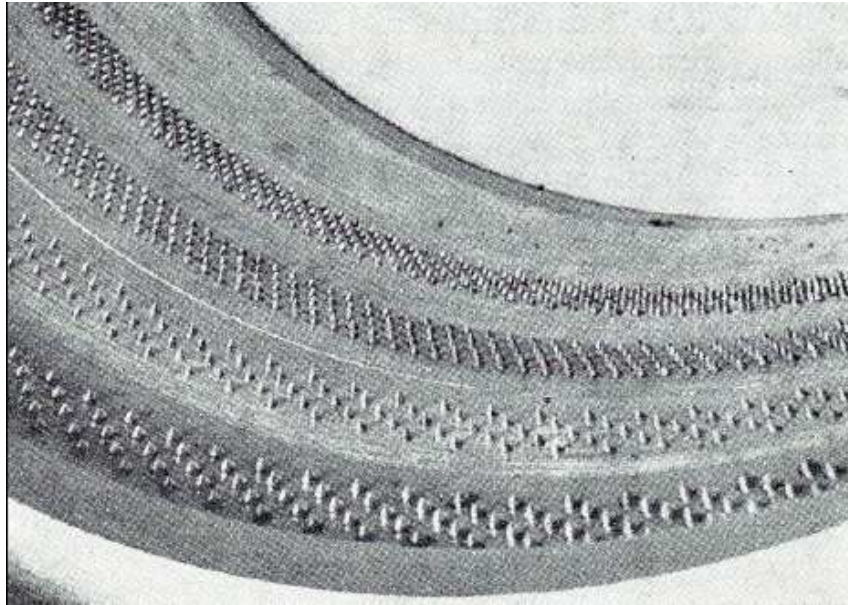
Na (Obr. 23) je ukázáno schématické sestavení zařízení s vnitřně bubnovým sestavením.

Dané zařízení může pracovat od pohybu pomalého v řádech pod 1 km/hod až po rychlosti kolem 180 km/hod. Teplota vody se může pohybovat od teploty okolí až po teplotu 80°C běžně. Teplota během měření u vzorků je zaznamenávána. Dále je zaznamenávána třecí síla. [10]



Obr. 23. Schéma zařízení na principu vnitřního bubnu.

Na daném bubnovém zařízení mohou být například na vnitřním povrchu bubnu rozdílné vzory povrchové textury získané skladbou hemisférických, cylindrických, nebo kuželových nerovností povrchů. Tyto nerovnosti mohou být v rozdílných velikostech a vzorech.



Obr. 24. Detail uspořádání nerovností na vnitřní válcové ploše.

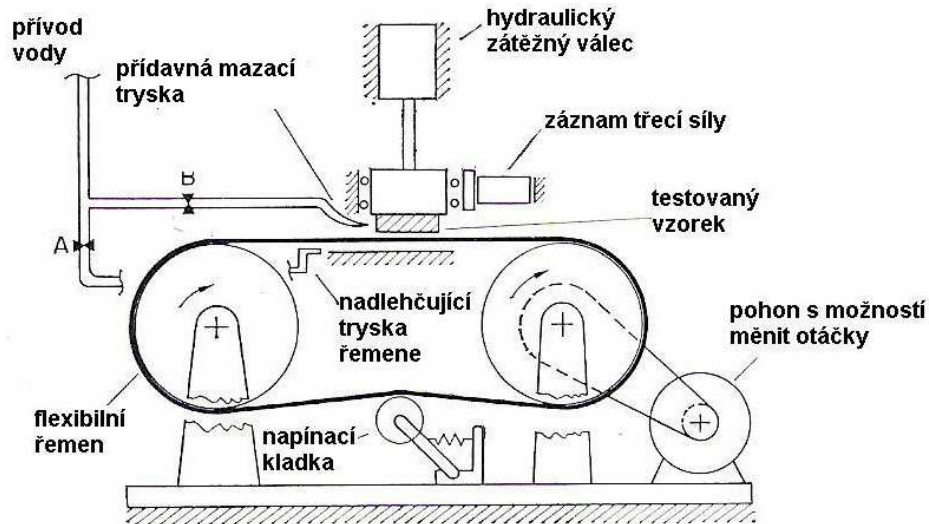
Na (Obr. 24) jsou kuželky s proměnným tvarem zkosení špičky a rozdílnou hustotou rozprostření. [9]

Vrcholky všech kuželových nerovností musí být zakulaceny z prevence z přehnaného opotřebení, nebo rozrušení soudržnosti třeného povrchu. Toto se musí provádět zvláště u elastomerních a plastických zkoušených materiálů.

2.3 Zařízení s plochým řemenem

Na (Obr. 25) je ukázáno schéma zařízení s plochým řemenem. Dané zařízení charakterizují dva válce opásané flexibilním plochým řemenem. Jeden z válců je hnaný a druhý hnací, přičemž ten poháněný je poháněn motorem s možností změny otáček. Popřípadě lze použít synchronní elektromotor s vloženým převodovým ústrojím. Plochý řemen je napínán pomocí kladky. Řemen může být z tkaniny, gumy, pásové oceli, nebo vyztužen kompozitními materiály. Povrch může být někdy tvořen nalepeným skelným papírem, nebo brusným papírem. Obvykle se podporuje řemen působením vody nebo vzduchu v místě kde působí zátěžná síla. Podporujeme z důvodů že deformace řemene je nežádoucí a tímto ji eliminujeme. Normálové zatížení na testovaný vzorek je vyvozováno hydraulickým válcem. Velikost třecí síly je zaznamenávána na záznamové zařízení. V případě určování teploty vzorku je připojeno přídatné zařízení na zjišťování teploty, toto zařízení bývá umístěno ve vhodné hloubce ve vzorku. Dalším přídatným zařízením na mazání lze dosáhnout rovnoměrného

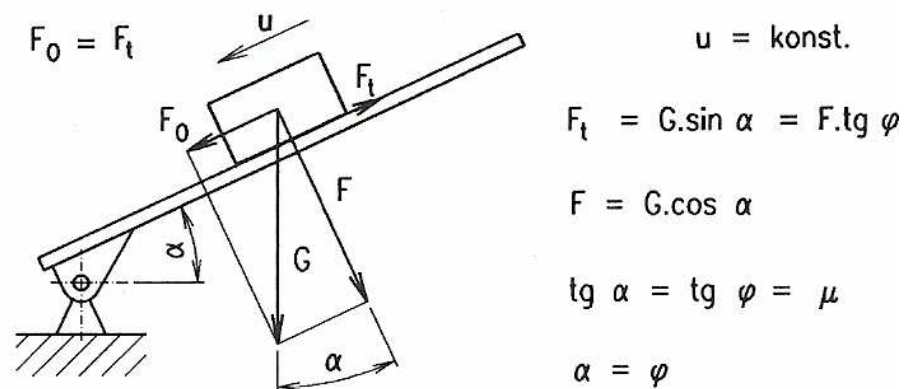
mazání povrchu před vzorkem. Dané zařízení je schopné dosáhnou velké relativní rychlosti mezi řemenem a testovaným vzorkem. Testované vzorky mohou být kvádry z různých materiálů, běžně pak z pryží kovů a plastů. Případně mohou mít vzorky i tvar kužele, koule, válce z nedeformujících se materiálů. [9]



Obr. 25. Obecné schéma zařízení s plochým řemenem.

2.4 Měření pomocí nakloněné roviny

Měřící zařízení pomocí nakloněné roviny (Obr. 26) slouží k přibližnému stanovení součinitele tření. Stanovení součinitele tření umožňuje nakloněná rovina, po které se musí vzorek pohybovat se stálou rychlostí. Protože je součinitel tření za klidu větší než za pohybu, je právě dodržení stálé rychlosti obtížné. Při zvětšování sklonu roviny se vzorek při určitém sklonu dá do pohybu, který však není rovnoměrný. Je třeba při nepatrně menším sklonu vzorek do pohybu uvést a sledovat jeho rychlost.



Obr. 26. Nakloněná rovina pro měření tření.

kde, u – je zrychlení, F_t – je třecí síla působící proti pohybu, F – je kolmá složka váhy tělesa na nakloněnou rovinu, F_o – je složka váhy tělesa ležící v rovině nakloněné roviny, G – síla způsobená váhou tělesa, α - úhel naklonění roviny, μ – součinitel tření. [1]

Například při zjišťování statického součinitele tření předpokládáme, že nakloněná rovina má právě sklon, který se rovná úhlu tření. Těleso umístěné na nakloněné rovině je v klidu. To znamená že, že síly F_o a F_t jsou v rovnováze. Síla F_t je silou tření. Pomocí rovnic je pak snadné najít vztah síly tření k statickému součiniteli tření.

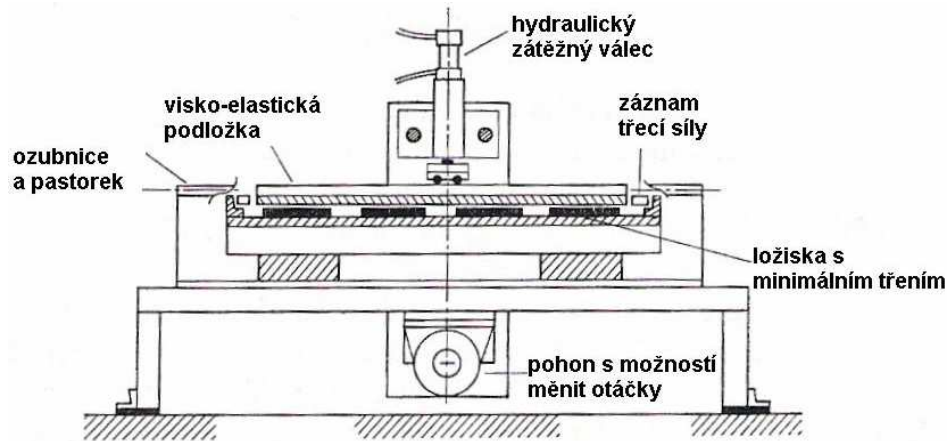
2.5 Zařízení pro měření opotřebení abrazií

Následující zařízení využívají jiný typ pohybu jako předcházející typy. Předcházející zařízení využívaly testovaných vzorků přitlačovaných na jiné těleso jenž vykonávalo pohyb oběžný kolem oblouku či oblouků při němž se relativní pohyb vzorku vůči pásu opakoval cyklicky v jednom směru.

Následující (Obr. 27) popisuje zařízení pro měření opotřebení abrazií. Princip spočívá v posunu pojízdné plošiny konstantní rychlostí. Tuto konstantní rychlost uděluje pohon s možností měnit otáčky.

Spodní díl je tvořen podstavcem obsahujícím plochu na níž jsou umístěna zpravidla kuličková ložiska s minimálním třením. Nad ložisky je deska jenž se pohybuje v omezeném prostoru v podélné ose, a je vedena pevným nebo pružným ozubeným vedením. Nad deskou je kolmě umístěn válec, jenž je schopen vyvodit zatížení od 0 do 50 kg na plunžr. Na konci plunžru mohou být připevněny různé druhy nerovností povrchu (půlkulové, kuželové atd.), často jsou pak v různých rozměrech. Zátěž může být přemístována postranně, a to při změně dráhy pohybu.

Zařízení je schopno měřit přesně v pomalých rychlostech, může se jednat o přilnavostní test kdy plošina projede jednou, nebo i o testy kdy dochází k testům v periodách. Vratný přepínač je umístěn na každém z obou konců dráhy. Tento přepínač umožňuje přepínat směr pohybu. Prostor mezi těmito dvěma přepínači je dráhou pohybu. Rychlost pohybu je možno měnit od 0 do 10 cm/s a taky vhodně indikovat zpětně na tachometru. Třecí sílu mezi zkoušeným vzorkem (pryží) a proti-povrchem (zdrsněným), zaznamenáváme přenesenou v rovině pohybu, pomocí čidla na zjištění síly v podélné dráze. [10]



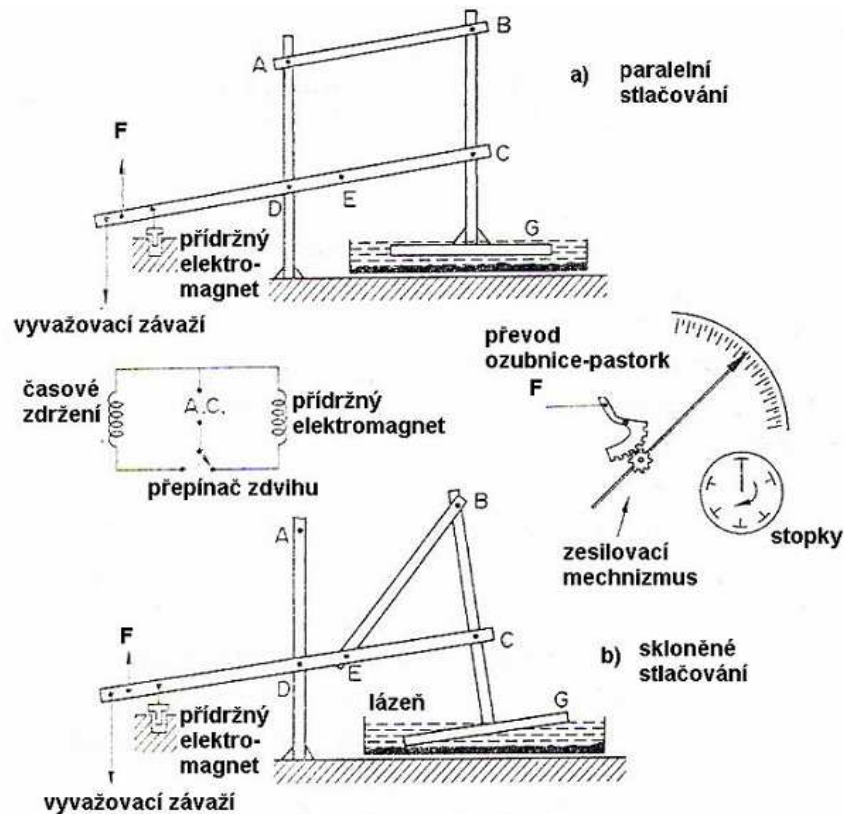
Obr. 27. Zařízení pro měření opotřebení ozubnic.

2.6 Zařízení na opětovné zatěžování filmu

Všechny předešlé metody v této kapitole užívají relativní tangenciální pohyb mezi povrchy, následující metoda používá pohyb v normálové ose. Následující (Obr. 28) ukazuje jednoduché zařízení použitelné pro zjišťování významu drsnosti a úhlu sklonu ve vztahu s celistvostí mazání.

Zařízení se skládá s ramene rotačně uloženého v bodech C a D. Další základní částí je základní stojan jenž zajišťuje bod D proti osovým posunům a plocha G, která je koncem jenž přenáší zatížení. Pákové zařízení uvedené na vrchní části (Obr.28) je složeno tak aby zajistilo, že stlačení bude prováděno paralelně mezi povrchy. Jestliže změním body BA na novou pozici BE získáme tak nakloněné stlačování uvedené níže. Mazadlo jenž používáme je uloženo v průhledné vaničce. Velikost zdvihu plochy je zobrazováno přímo během měření pomocí ozubnice a pastorku s ukazatelem, jenž daný zdvih zvětšuje. Zdvih se převádí z přesností větší než 20 μm . Čas je měřen pomocí přesných stopek na setiny sekundy. Obě hodnoty jsou zaznamenávány souběžně pomocí kamery. První poloha je, když plocha balancuje v mazací lázni, při této poloze je elektromagnet zapnut. Druhou polohu představuje, když se elektromagnet vypne pak dojde ke stlačení. Při vypnutí elektromagnetu se sepnou stopky.

U daného zařízení je nutné, aby bylo přesně sestaveno a mělo velkou tuhost. Při definovaném opakovaném stlačení dochází ke smyku mazadla na styčných plochách. Setrvačné vlivy způsobené tímto pohybem jsou zanedbatelné. [10]

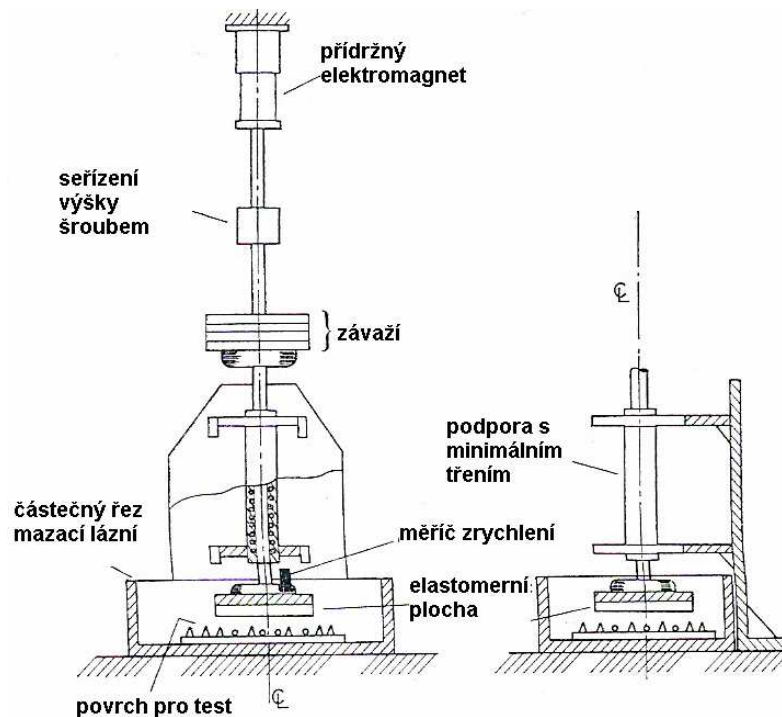


Obr. 28. Zařízení pro opětovné stlačování mazacího filmu.

2.7 Nárazové neboli dynamické zkoušení

Následující (Obr.29) ukazuje sestavení dynamického zkoušecího zařízení k vyšetřování chování filmu při podmínkách rychlého zatěžování.

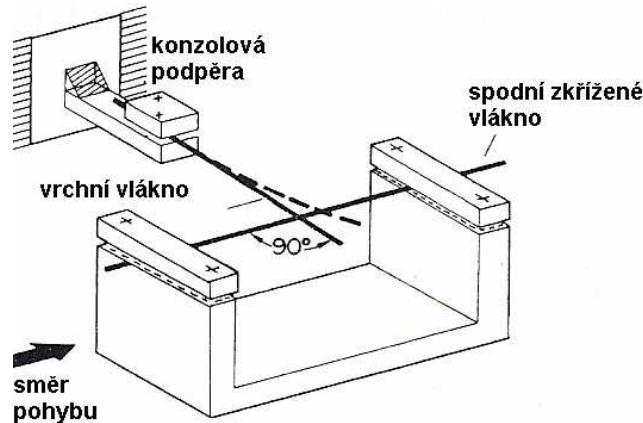
Zařízení se skládá ze svislého vřetene, jenž je podpůrně drženo elektromagnetem ve vrchní části. Ve spodní části zařízení je spodní plocha na níž je připevněn elastomerní vzorek s půdorysem čtverce. V mazací vaně, jenž je z průhledného materiálu je pak umístěn testovací povrch (může obsahovat nerovnosti tvaru půlkulového, kuželového atd.). Ve vaně může být a nebo nemusí být nalito mazadlo. Celková váha je aplikována pomocí vřetene když dojde k vypnutí elektromagnetu. Když je přidrzný elektromagnet zapnut dá se pomocí závitů nastavit výška mezi povrchy. Po uvolnění elektromagnetu vřeteno i se závažím elastomerní plochou dopadá na drsný povrch. Vřeteno je podpůrně vedeno trubkou s ložiskem. Na pohybové ploše je umístěn měřič zrychlení, výsledky jeho měření jsou zaznamenávány. K danému zařízení se často připojuje zařízení uvádějící hodnotu stlačení vzorku. [10]



Obr. 29. Zařízení pro dynamické zatěžování povrchů.

2.8 Zařízení s měřením kříženými vlákny

Následující zařízení používá buď vlákna nebo tyče jenž jsou zkřížené. U daného zařízení (Obr. 30) se dá měřit součinitel tření u polymerních materiálů. Spodní vlákno, či tyč je drženo napjaté držákem, jenž umožňuje prokluz. Spodní vlákno nebo tyč se může pohybovat směrem doprava v pomalých rychlostech kolem 2 mm/min. Vrchní vlákno je připevněno na pevné konzole a přitlačováno dolů k spodnímu vláknu díky pružnosti ve svislé rovině. Když se spodní držák začne pohybovat, vrchní tyč nebo vlákno je drženo se spodním vláknem, tyčí. Dochází k vychýlení jenž nám udává velikost třecí síly. Můžeme sledovat výchylku pomocí mikroskopu umístěného za skleněnou ochranou. Pohyb je obecně vyvozen opakovaně. Na daném zařízení se dají zjišťovat síly odtržení (break – away force). Při užití tenkého vrchního vlákna je zátěž relativně malá. Při použití různých vláken na různé povrchy lze pozorovat, že dochází k značnému prodloužení. Tedy pro velmi tenké vlákna je nejmenší zátěžná síla 10^{-6} g, ale pro větší průřezy vláken či tyčí může být 10 g. Pro oba povrchy se běžně dají použít vzorky z materiálů PE, PA, PTFE atd. Výsledky ukazují součinitele tření mezi vlákny v závislosti s nelineárně rostoucí zátěží. Kontaktní plochy mohou být válcové a plošné. Dané zařízení se může s výhodou použít při měření ve vakuu nebo ve speciální atmosféře. [10]

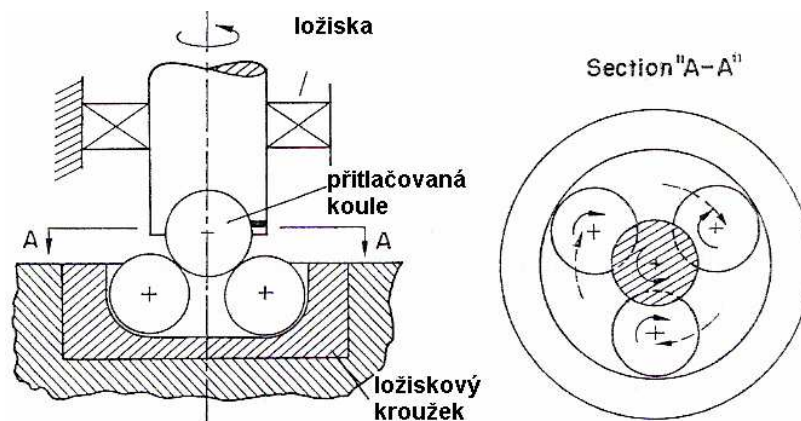


Obr. 30. Zařízení pro měření pomocí zkrřížených vláken.

2.9 Zařízení pro měření pittingů a trhlinek

Většina zde popsaných experimentálních metod slouží k měření tření užitím relativního tangenciálního pohybu v různých způsobech aplikací. Na rozdíl od toho toto čtyřkulové zařízení (Obr. 31) zjišťuje příčiny valení mezi povrchy. Nejběžnější poruchou při valení je tvorba pittingových vad (viz kapitola 1.3.1 Únavové opotřebení), které jsou dostatečně zkoumány na čtyřkulovém zařízení.

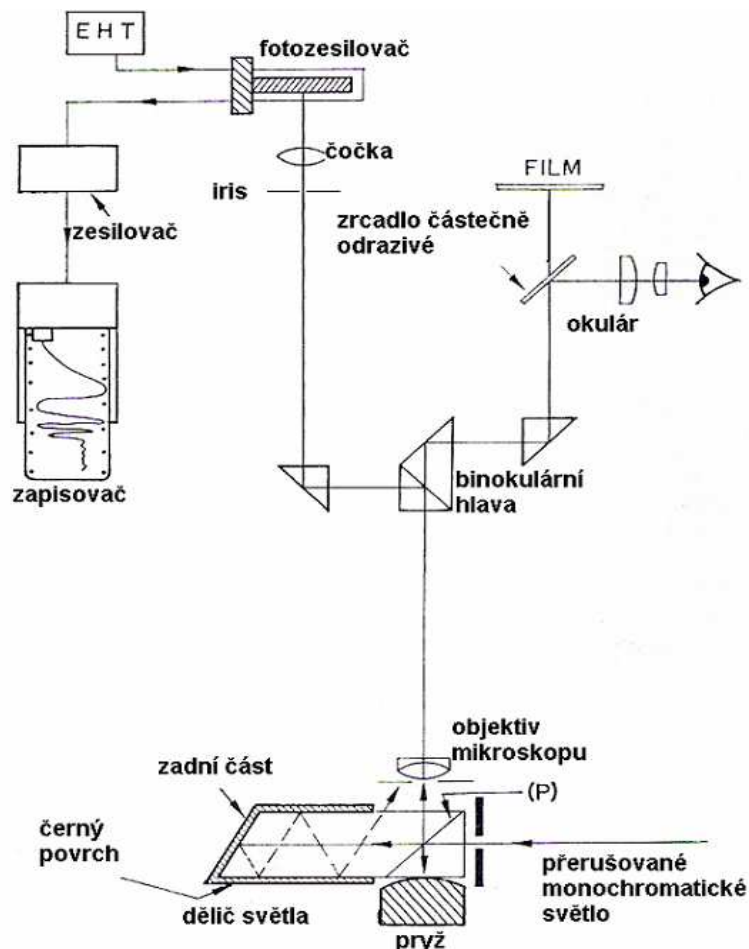
V nejjednodušší formě jej lze popsat jako zařízení skládající se ze tří koulí, jež se mohou volně otáčet a čtvrtá koule je držena v přidržovači a je zatěžována. Čtvrtá koule je tedy přitlačována proti třem koulím a otáčí se v opačném smyslu proti nim. Tři spodní koule se pohybují tedy v orbitu jak je vidět v průřezu vpravo (Obr. 31). Dané zařízení může být, nebo ne být mazáno. Lze zde zkoumat vliv tvorby dolíčků a trhlinek na životnosti. U zařízení lze přidat přídatné indukční ohřívání pro lepší simulaci reálného prostředí. [10]



Obr. 31. Zařízení pro měření dolíčků (pittingů), trhlinek.

2.10 Interferenční zařízení

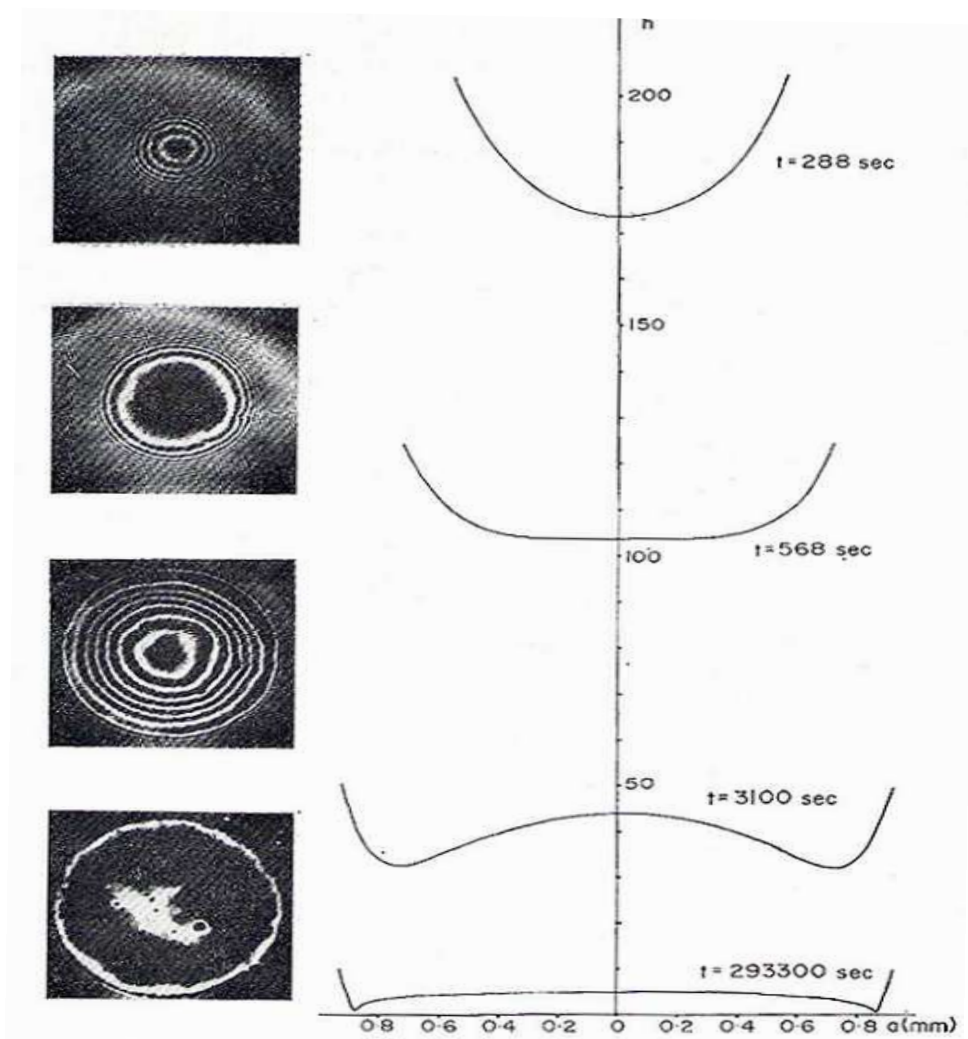
Vysoce přesná data o vrstvě mazacího filmu lze získat s použitím interferenčního zařízení (Obr. 32). Hlavní částí je opticky hladký pryžový povrch s kulovým zakřivením, jenž je pevně přichycen. Danou část je vidět ve spodní části schématu. Na vrstvě mazadla jsou ploché zrcadlové povrchy (jsou kolem prizmatického tělesa jako děliče světla). Mírná zátěž je přenášena pryží přes rameno (není ukázáno). Kontaktní plochu zkoumáme pomocí monochromatického světla, jenž je vrháno do mikroskopu. Při suchém kontaktu, jsou velmi viditelné Newtonské kruhy mezi pryží a sklem jejichž intenzita klesá s blízkostí mazadla. Dané zařízení zjišťuje proužky, které jsou viditelné v mazací vrstvě. Proto jsou záměrně úlomky vstupujícího monochromatického světla nesměrovány do kontaktní plochy, nebo jsou tyto alespoň minimalizovány na minimum. Zrcadlo použité v daném případě má index lomu roven 1,51 a polo-postříbřená plocha P pohlcuje neboli přijímá (50/50) přerušované monochromatického světla. Polovina nechtěných paprsků je postupně složena a ztracena díky odlesku.



Obr. 32. Interferenční zařízení.

Celková separace mezi sklem a pryžovým povrchem je určena sečtením počtu spojených kroužků, jenž se tvoří ve středu kontaktu během protlačovacího procesu pryží mazadlem. Počet je monitorován pomocí přenosu foto-násobičem a nahráván v elektronickém signálu, dále je kontaktní plocha průběžně snímána kamerou.

Na následujícím (Obr. 33) je viditelný vliv času na zatlačení do mazadla. Použitým mazadlem byl dimethyl silikon s indexem lomu 1,4 a dynamickou viskozitou 1000 [N.s.m⁻²]. Povrch měl kulový tvar s rádiusem 2 cm. Daný povrch byl přitlačován 5 g vahou přes pákový mechanismus. [10]



Obr. 33. Příklad ukázky výsledku z interferenčního zařízení.

2.11 Další možnosti měření

Měřících metod je velké množství. V následujících několika bodech přibližuji některé z dalších měřících principů.

Vytlačovací měřící metody

Tyto metody jsou založeny na principu opotřebení vzorků, které jsou vystaveny toku proudící taveniny polymerního materiálu. Většinou se používá různě upravených měřících vytlačovacích hlav. Hlavně se pak jedná o vzorky, umístěné tak aby tavenina byla vytlačována kolmo na ně, nebo vzorky tvoří štěrbinu.

Měření s využitím záření

Měřený vzorek se ozářením aktivuje, aby získal sekundární radioaktivitu. Potom se smontuje a uvede do provozu se zatížením. Za provozu se maže proudem kapaliny, která unáší částice uvolněné opotřebením. Registrační zařízení zaznamenává počty impulsů záření, z nichž lze stanovit objemové množství otěru, uvolněného z aktivované součásti. Na základě zjištěných údajů se stanoví křivka opotřebení. [3]

Daná metoda se hodí jen u součástí, jenž lze kvalitně ozářit. Metodu by zřejmě šlo použít s výhodou u většiny z předešlých metod (metoda rotujícího disku, vnitřní nebo vnější bubnové zařízení, zařízení s plochým řemenem, zařízení na opotřebení abrazí, zařízení na opakované stlačování filmu či u dynamického stlačovacího testování). Ovšem u daných zařízení se musí řešit odnos ozářených částic (tekutinou – mazadlem) a jejich registrace.

Měření opotřebení při obrábění

Další metoda je založena na provádění zkoušek nástrojem např. břitem vrtáku jenž vrtá do zkušebního vzorku určitou řeznou rychlostí s konstantním posuvem po vhodně zvolený časový úsek. Pro následující časový úsek se vždy zvýší řezná rychlost, posuv zůstává stále konstantní jako při první řezné rychlosti. Pro každý časový úsek se změří přírůstek opotřebení na hřbetě a vypočte se intenzita opotřebení. [16]

2.12 Zhodnocení tribologických metod měření

Existuje široká řada měřících metod pro zjištění tribologických vlastností, ale vyhovují vždy jen pro určité aplikace. V následující (Tab. 2.) je shrnutí pro vybrané metody. Při uvádění konkrétních výsledků z měření je ovšem vždy významné uvádět jakou metodou se k danému výsledku došlo z důvodu porovnatelnosti jednotlivých výsledků.

Tab. 2. Zhodnocení tribologických metod měření.

Název metody	Výhody metod	Nevýhody metod	Vhodné materiály (povrchy)
Metoda rotujícího disku	měření závislosti opotřebení v čase a změně součinitele tření, jednoduchost zařízení;	problematické řešení mazání (odstředivé síly), nelze běžně dosahovat velkých relativních rychlostí;	pro různé dvojice (trojice) povrchů: plasty, pryže, kovy;
Zařízení s vnitřním nebo vnějším bubnem	velké rozsahy rychlostí a teplot při měření, přímé odměřování třecí síly, použití různých typů nerovností, vnější bubny dobře přístupné, vnitřní bubny mají výborné možnosti mazání;	relativně složitá zařízení, obtížná záměna a výroba proti-povrchu, vnější bubny odstředivý efekt při mazání, vnitřní bubny obtížná výměna vzorku a změna závaží;	vhodné na testování elastomerních látek, povrch bubny může mít na povrchu různé druhy nerovností;
Zařízení s užitím plochého řemene	dosažení velkých rychlostí a velkého relativního opotřebení užitím pásů (např. se skelným papírem, kompozitními materiály), možnost mazání;	nutnost podpěry řemene v místě přitlačování vzorku, hrozí deformace vzorku, nákladná výroba plochého řemene;	pryží, plastů či kovů, pásy mají funkci abraziva;
Měření na nakloněné rovině	nejjednodušší zařízení k měření statického i dynamického součinitele tření;	obtížné dodržení stálé relativní rychlosti, nevhodné k měření opotřebení;	různé materiály (př. užití zkoušky proti-skluznosti u dlažby);

Název metody	Výhody metod	Nevýhody metod	Vhodné materiály (povrchy)
Opětovné zatěžování filmu	jednoduché zařízení, zjištění vlivu drsnosti a úhlu sklonu ve vztahu k celistvosti mazání;	nutnost kvalitního sestavení, nutnost užití dostatečně velké tuhosti rámu;	možno testování širokého spektra různých materiálů (i pryží);
Dynamic-ké zkoušení filmu	lze provádět zkoušení filmu při velkých rychlostech, možnost zaznamenávat zrychlení;	složitější konstrukce případného přídavného měření velikosti stlačení;	především pro elastomerní materiály mazané kapalinou, plynem;
Zařízení s měřením kříženými vlákny	měření v různých podmínkách okolí (vakuum, plynné prostředí), šetření oblasti velikosti sil odtržení;	zařízení vhodné pro vzorky z relativně malými průřezy, metoda je vázaná na mikroskop a srovnávání;	na oba povrchy se běžně dají použít vzorky z PE, PA, PTFE;
Zařízení pro měření pittingu	možnost zjištění důsledků valení, možnost temperance;	jedná se o dlouhodobé zkoušení;	především kovy či plasty užívané pro výrobu ložisek;
Interferenční zařízení	ukazuje chování mazací vrstvy v závislosti z časem a zatížením;	nutností zkoušení pouze hladkých materiálů, malé zátěže;	užití různých druhů mazadel a materiálů (pryží);

3 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

V teoretické části jsem se zabýval studiem problematiky tribologie a to od základních teorií třecích sil až po studium vzniku opotřebení u namáhaných součástí a principů zamezení nebo alespoň částečné eliminace tohoto nežádoucího jevu. Dále jsem se zabýval metodami měření součinitele tření, potažmo zjišťování velikosti opotřebení a dalších tribologických měření. Zvláště pak zaměřené na možnosti měření při styku polymerních materiálů mezi sebou nebo s kovy (i jinými materiály). Vlivným faktorem rozhodujícím pro použití, či nepoužití daných metod je vhodnost daných metod k použití pro daný případ problematiky. Dalším činitelem je dostupnost dané měřicí metody potažmo ekonomické náklady na měření.

V dnešní době je důležitým činitelem cena a tak při minimálních nákladech se očekávají co možná nejlepší výsledky. Proto se hledá co nejvýhodnější řešení užitím odolných materiálů v kontrastu s nízkou cenou. Tento problém lze najít i u zpracovatelství polymerních látek, kde při použití vstřikovacích, vytlačovacích, válcovacích a jiných strojů dochází k opotřebení. Zřejmě je tedy nutné při výrobě daných strojů, obzvláště pak při výrobě dutin forem použít materiály, jenž mají ještě navíc výbornou obrobitelnost.

Daný problém je tedy významné řešit a problematiku simulovat. Pro měření se dají vhodně použít třecí a vytlačovací metody, kdy na vzorek ze zkoumaného materiálu (například z funkční části dutiny formy) je působeno abrazivem, které odpovídá zpracovanému materiálu. Tyto zkoušky jsou však dlouhodobějšího rázu a bylo by přínosem zkrátit dobu zkoušek právě zintenzivněním těchto zkušebních metod.

Vlastí praktická část bude spočívat v konstrukci zařízení na výrobu vzorků pro měření na laboratorním tribologickém zařízení. Toto laboratorní zařízení pracuje na principu rotačního disku na nějž je přitlačováno zatěžované tělísko (viz kapitola 2.1). Dané konstruované zařízení (forma) bude řešena tak, aby její výroba byla možná v rámci laboratoří UVI.

Dalším cílem praktické části je zjištění možností zkoušení na daném měřicím zařízení ve smyslu simulace kontaktu jenž vzniká při abrazivním opotřebením v dutinách forem a dalších plastikářských či gumárenských strojů.

Závěrečným cílem je pak odzkoušení možnosti použití daného zařízení na studium vlivu změny součinitele tření při opotřebením pryží.

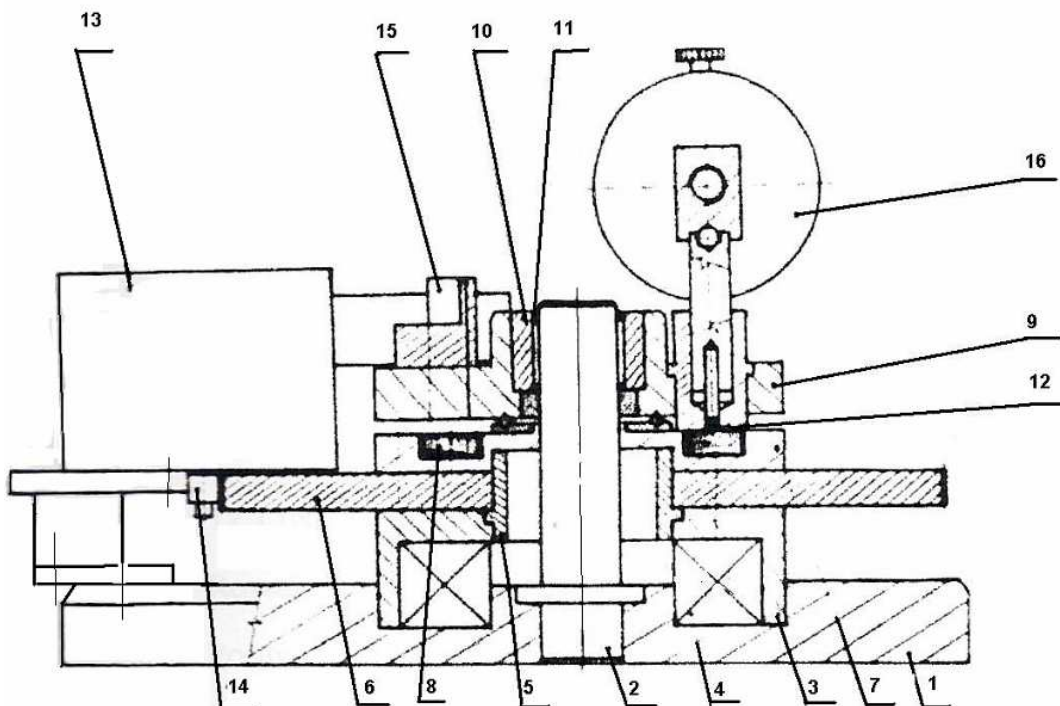
II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Ke zjištění tribologických vlastností při abrazivním opotřebením v dutinách forem a dalších plastikářských či gumárenských strojů byla použita metoda rotujícího disku. Tuto metodu jsem také testoval k využití pro zkoušky odolnosti pryží.

4.1 Popis zařízení a princip měření

Zařízení je principiálně shodné se zařízením na schématu (Obr. 29). V základní desce je nalisována hřídel a držák s ložiskem. Na tento držák je nasazen středící kroužek a ozubené kolo. Pak je zde přišroubován upínák vzorku. V tomto upínáku je pomocí čtyř šroubů uložen zkušební vzorek. Do krytu je nalisováno pouzdro, ve kterém je ložisko. Celá konstrukce je nasunuta na hřídel. Na zkušební vzorek je přitlačována zkušební tyčinka. Převodovka je přišroubována k zadní desce a na jejím výstupním konci je nasunut pastorek, který tvoří spolu s ozubeným kolem ozubený převod. Pomocí zařízení se měří jak vlastní opotřebení vzorku, tak i koeficient tření při vzájemném kontaktu tyčinky s mezikružím, kdy velikostí deformace přes zatěžující břit registrujeme třecí sílu.



Obr. 34. Sestavení měřícího zařízení.

kde, 1 – základní deska, 2 – hřídel, 3 – držák, 4 – ložisko, 5 – středící kroužek, 6 – ozubené kolo, 7 – upínák vzorku, 8 – zkušební vzorek, 9 – kryt, 10 – pouzdro, 11 – ložisko,

12 – zkušební tyčinka, 13 – převodovka, 14 – pastorek, 15 – břit, 16 – zatěžovací aparatura, 17 – deformační aparatura.

Tab. 3. Parametry pohonu.

Parametry pohonu	údaj
Typ motoru	asynchronní
Výkon	90W
Otáčky	1640 ot/min
Otáčky vzorku	58 ot/min
Přítlak	0-40 MPa

4.2 Použité vzorky

Byly použity ve formě mezikruží (Obr. 35) a nebo granulí či tyčinek (Obr. 36).

4.2.1 Abrazivo ve formě granulí

Při experimentech byly použity dva druhy plastových granulí, a to polyamid PA 6 v původním stavu a polyamid PA 6 plněný 30 % skleněných vláken (Silami 30 SV 13).

Tab. 4. Vlastnosti plastů použitých při zkoušení.

Parametr	PA 6	PA (s 30% skleněných vláken)
teplota tání	220 °C	218 °C
teplota zpracování	220 – 270 °C	220 – 270 °C
hustota dle ČSN 64 0111	1140 kg·m ⁻³	1370 kg·m ⁻³
ITT (230°C, 3.43 N) dle ČSN 64 0861	0.8 g / 10 min	0.74 g / 10 min

4.2.2 Tyčinky k testování opotřebení pryží

Na testovaný materiál ve formě mezikruží (Obr. 35) byla přitlačována mosazná tyčinka (ČSN 423212) o průměru 3 mm a délce 22 mm. Strana přitlačovaná k mezikruží měla zaoblené hrany o poloměru 0,2 mm.

4.2.3 Ocelový vzorek mezikruží

Pro danou zkoušku abrazí plastem jsem použil vzorek rychlořezné oceli zušlechtné kalením a následným popouštěním. Rozměry vzorku (Obr. 35). Složení rychlořezné oceli 19 856: 0,9 – 1% C, max. 0,45% Mn, max. 0,5% Mo, max. 0,035% P, max. 0,035% S. Povrch je kalený na tvrdost 850 HV a jádro má tvrdost 268 HV.

4.2.4 Vzorky pryží

Dané vzorky pryží jsem vylisoval z vyválnovaných polotovarů na ručním lisu. Hodnoty vulkanizace byly pro vzorek číslo 1 a 2 teplota 168°C a doba 15 minut a pro vzorek číslo 3 teplota 168°C a doba 22 minut. Následně byly dané vzorky vystřiženy a nalepeny na ocelový nosič. Tento nosič byl pak i se vzorkem pryže použit v zařízení (Obr. 34).

Tab. 5. Vzorky použitých pryží.

Číslo vzorku	obchodní označení	tvrdost SHORE A	drsnost povrchu
1	HT 4632	70,6±0,14	Ra 0,545±0,0038 Rz 4,27±0,0246
2	HT 5656	80,2±0,14	Ra 0,41±0,0084 Rz 3,44±0,0246
3	NBR 1354	63,5±0,10	Ra 0,36±0,0122 Rz 3,14±0,0130
4	T 778	57,6±0,27	Ra 0,39±0,0065 Rz 2,63±0,0229

4.2.5 Vyhodnocení hmotnostního úbytku

Vyhodnocení hmotnostního úbytku vzorků se provádí výpočtem. Před každým vážením vzorku je nutno tento vždy očistit, odmastit a vysušit.

Hmotnostní úbytek je pak definován jako:

$$w = (m_0 - m) \quad (12)$$

kde, m_0 – počáteční hmotnost vzorku, m – konečná hmotnost vzorku.

4.2.6 Aplikovaný měrný tlak

Dále je zjišťován měrný tlak na styku vzorku s odíracím prostředím, který je určen velikostí použité přitlačné síly realizované pomocí páky.

Aplikovaný měrný tlak je definován jako:

$$p_m = \frac{F}{S} \quad (13)$$

kde, F – přitlačná síla, S – styčná plocha, p_m – měrný tlak.

Tab. 6. Styčné plochy přitlačovaných vzorků, přitlačné síly a jejich měrné tlaky

Vzorek	styčná plocha [mm ²]	přitlačná síla [N]	měrný tlak [MPa]
granule PA6	7,069	190	27
	7,069	96	13,5
granule PA6 (+30%SV)	6,835	190	27,8
	6,835	96	14
mosaz	7,069	10,6	1,5

Délka odírací dráhy na jednu otáčku je pro každý přitlačovaný vzorek 177,5 mm. Tedy dráha vykonaná vzorkem za minutu je 10,295 m (58 ot/min).

4.3 Naměřené hodnoty a závislosti

4.3.1 Výsledky při abrazivním působení plastu na kalenou ocel ČSN 19856.4

Hodnoty naměřené při abrazivním působení plastu (viz kapitola 4.2.1) na ocel (viz kapitola 4.2.3). Hmotnostní úbytky byly způsobovány na zařízení pracujícím na principu rotačního disku (Obr. 34) a následně měřeny na analytických vahách. Měření probíhalo při teplotě 21°C a atmosférickém tlaku 1005 hPa. Vývoj průběhu opotřebení a třecí síly jsem proložil polynomickými křivkami druhého řádu z důvodů přehlednosti vývoje opotřebení, třecí síly na dráze.

Tab. 7. Hodnoty a materiály měření I.

Materiál granulátu	PA6 + 30% skelných vláken
Materiál mezikruží	Kalená ocel - ČSN 19856.4
Měrný tlak	27,8 MPa

Tab. 8. Závislost úbytku materiálu mezikruží, proti granulátu dle podmínek (Tab. 7).

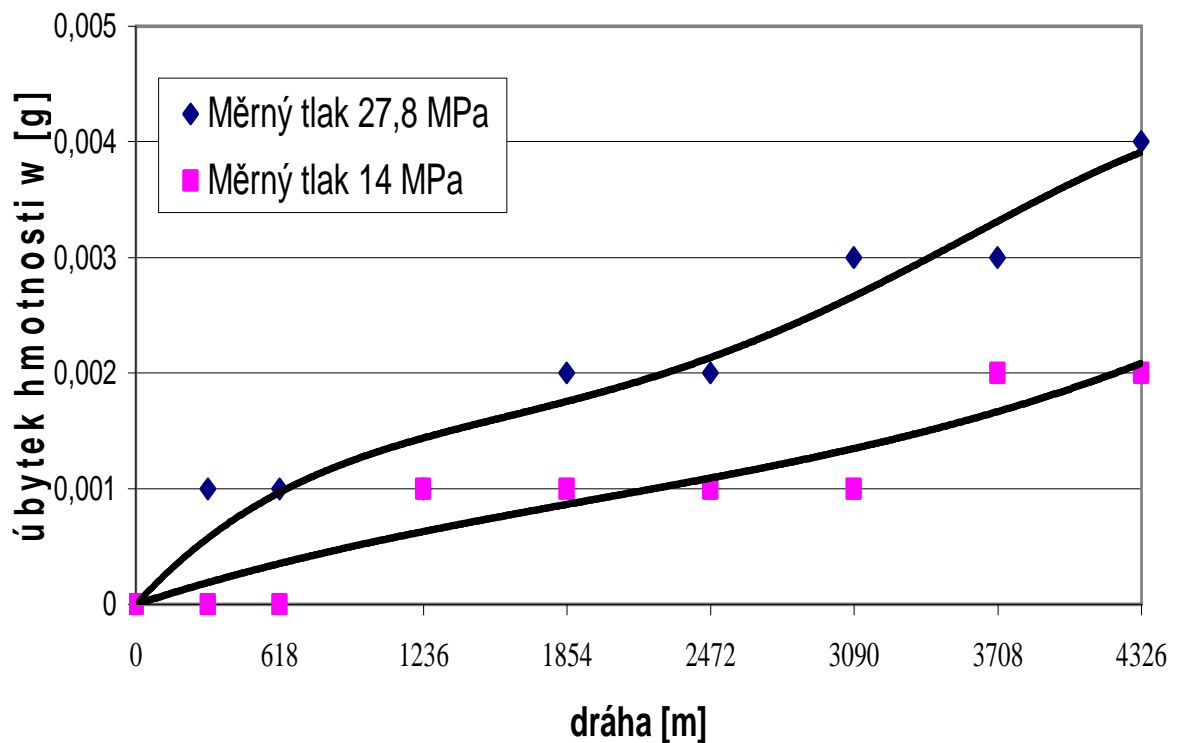
Doba otírání [min]	Dráha otírání [m]	Úbytek w [g]	Třecí síla [N]
0	0	0	21,3
30	309	0,001	25
60	618	0,001	26,7
120	1236	0,001	29,1
180	1854	0,002	29,5
240	2472	0,002	30,8
300	3090	0,003	29,5
360	3708	0,003	32
420	4326	0,004	32

Tab. 9. Hodnoty a materiály měření II.

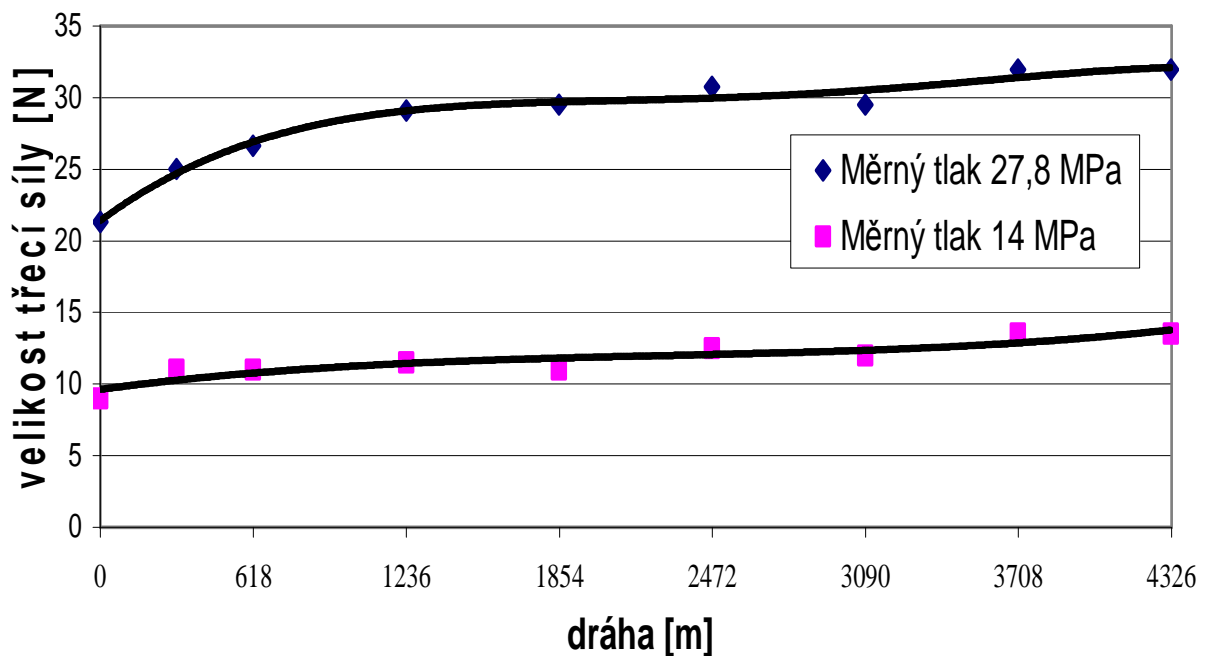
Materiál granulátu	PA6 + 30% skelných vláken
Materiál mezikruží	Kalená ocel - ČSN 19856.4
Měrný tlak	14 MPa

Tab. 10. Závislost úbytku materiálu mezikruží, proti granulátu dle podmínek (Tab. 9).

Doba otírání [min]	Dráha otírání [m]	Úbytek w [g]	Třecí síla [N]
0	0	0	9
30	309	0,001	11
60	618	0,001	11
120	1236	0,001	11,5
180	1854	0,001	11
240	2472	0,001	12,5
300	3090	0,002	12
360	3708	0,002	13,5
420	4326	0,003	13,5



Graf. 1. Závislost úbytku materiálu ČSN19856.4-kaleno, proti granulátu PA 6 (s aditivem 30% skelných vláken) při měrném tlaku 27,8 MPa a 14 MPa.



Graf. 2. Závislost změny velikosti třecí síly při opotřebení ČSN19856.4-kaleno, proti granulátu PA 6 (s aditivem 30% skelných vláken).

Tab. 11. Hodnoty a materiály měření III.

Materiál granulátu	PA6
Materiál mezikruží	Kalená ocel - ČSN 19856.4
Měrný tlak	27 MPa

Tab. 12. Závislost úbytku materiálu mezikruží, proti granulátu dle podmínek (Tab. 11).

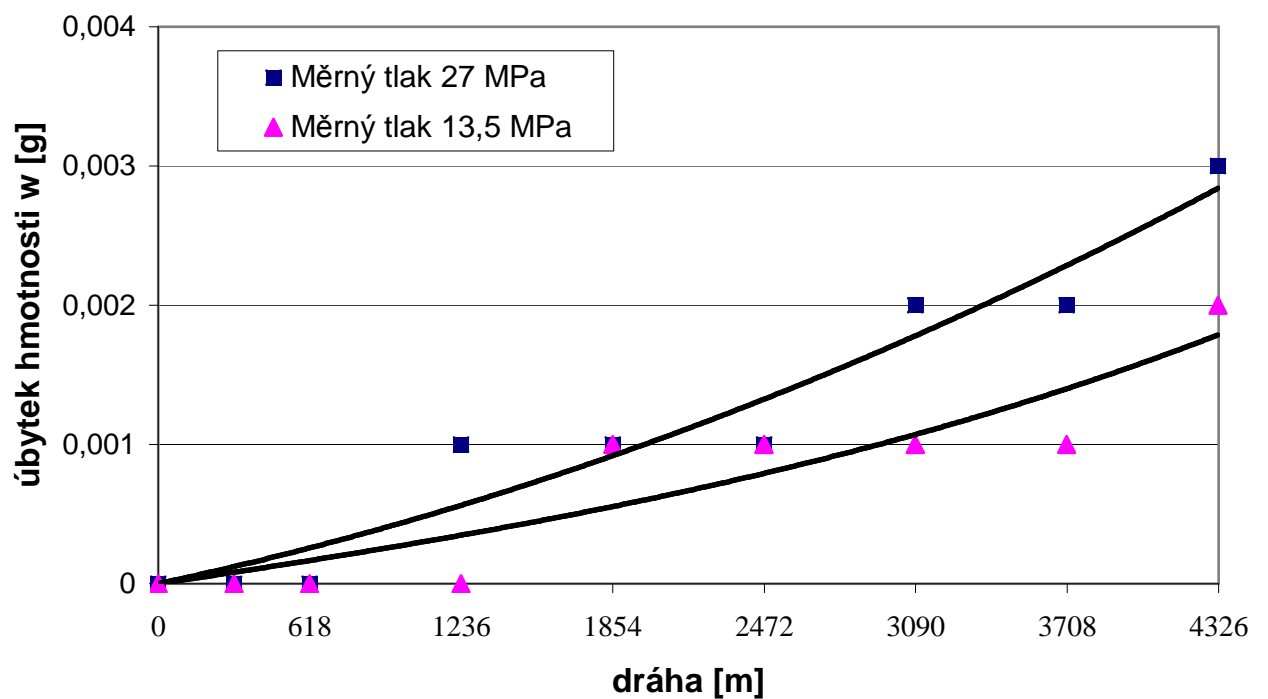
Doba otírání [min]	Dráha otírání [m]	Úbytek w [g]	Třecí síla [N]
0	0	0	21,3
30	309	0	25
60	618	0	26,7
120	1236	0,001	29,1
180	1854	0,001	29,5
240	2472	0,001	30,8
300	3090	0,002	29,5
360	3708	0,002	32
420	4326	0,003	32

Tab. 13. Hodnoty a materiály měření IV.

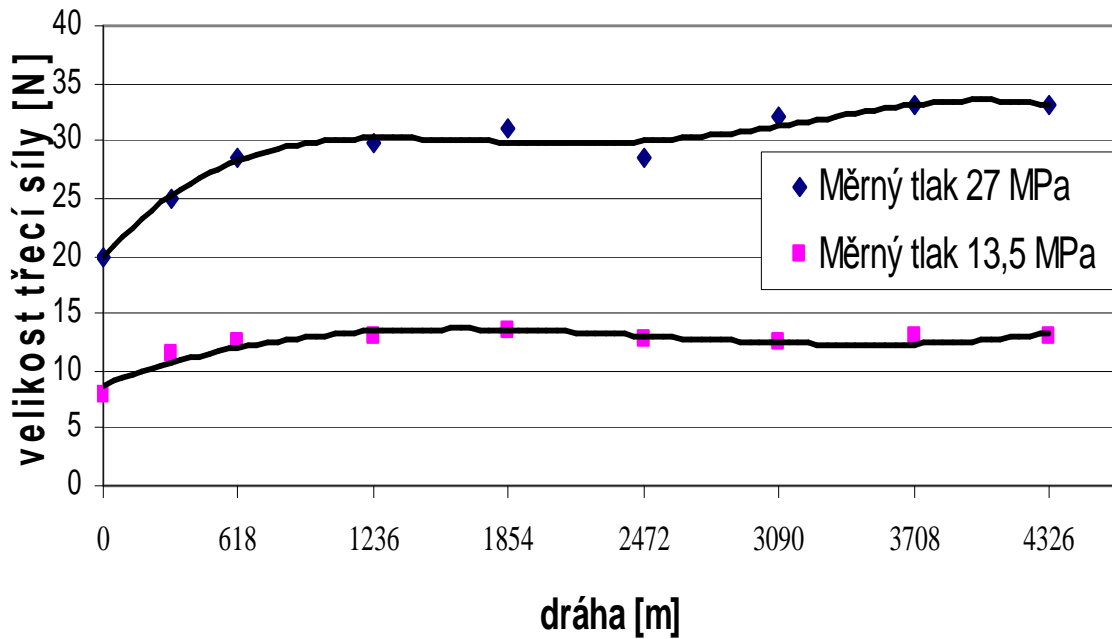
Materiál granulátu	PA6
Materiál mezikruží	Kalená ocel - ČSN 19856.4
Měrný tlak	13,5 MPa

Tab. 14. Závislost úbytku materiálu mezikruží, proti granulátu dle podmínek (Tab. 13).

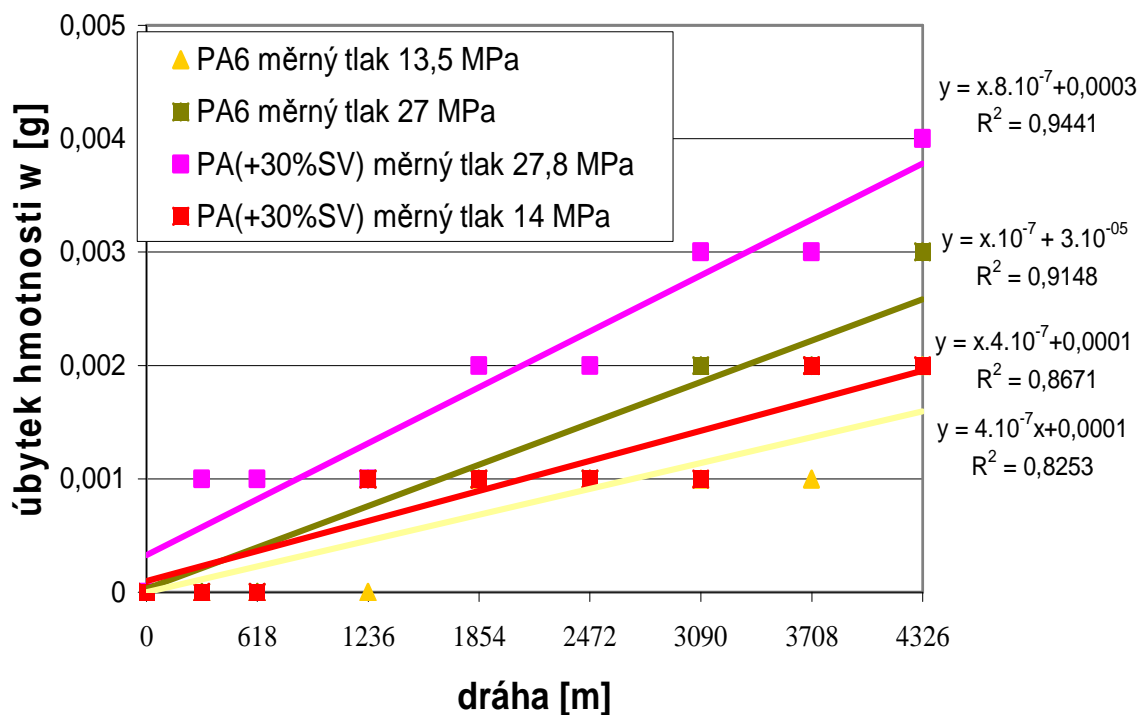
Doba otírání [min]	Dráha otírání [m]	Úbytek w [g]	Třecí síla [N]
0	0	0	9
30	309	0	11
60	618	0	11
120	1236	0	11,5
180	1854	0,001	11
240	2472	0,001	12,5
300	3090	0,001	12
360	3708	0,001	13,5
420	4326	0,002	13,5



Graf. 3. Závislost úbytku materiálu ČSN19856.4-kaleno, proti granulátu PA 6 při měrném tlaku 27 MPa a 13,5 MPa..



Graf. 4. Závislost změny velikosti třecí síly při opotřebení ČSN19856.4-kaleno, proti granulátu PA 6 při měrném tlaku 27 MPa a 13,5 MPa.



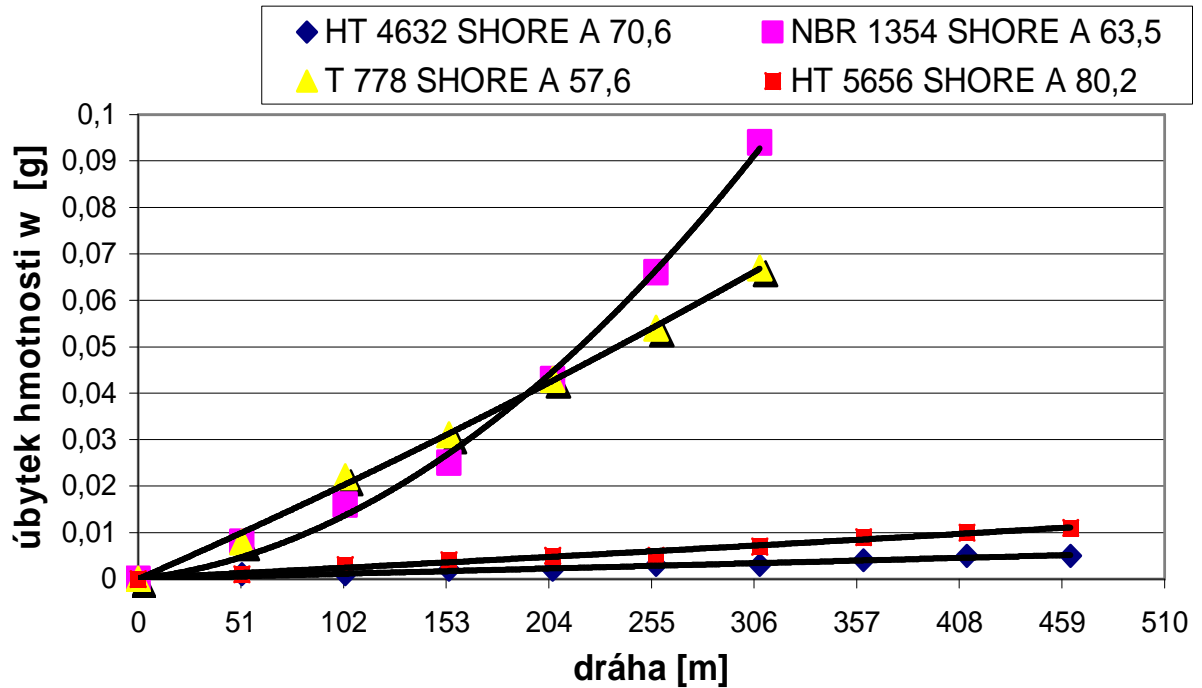
Graf. 5. Linearizace velikosti opotřebení ČSN19856.4-kaleno, proti granulátu PA 6 a PA6 (+30%SV) při srovnatelných měrných tlacích 27(27,8) MPa a 13,5(14) MPa.

4.3.2 Výsledky opotřebení pryží

V následující (Tab. 15) uvádím naměřené hodnoty zjištěné při intenzivním zkoušení opotřebení pryží (Tab. 5) mosaznou tyčinkou. Hmotnostní úbytky byly způsobovány na zařízení pracujícím na principu měření pomocí rotačního disku (Obr. 34) a následně měřeny na analytických vahách. Měření probíhalo při teplotě okolí 20°C a atmosférickém tlaku 1025 hPa. Vývoj Průběhu opotřebení a třecí síly jsem proložil polynomickými křivkami druhého řádu z důvodů přehlednosti vývoje opotřebení, třecí síly na dráze.

Tab. 15. Závislosti hmotnostních úbytků různých směsí pryží na čase při konstantním měřném tlaku 1,5 MPa.

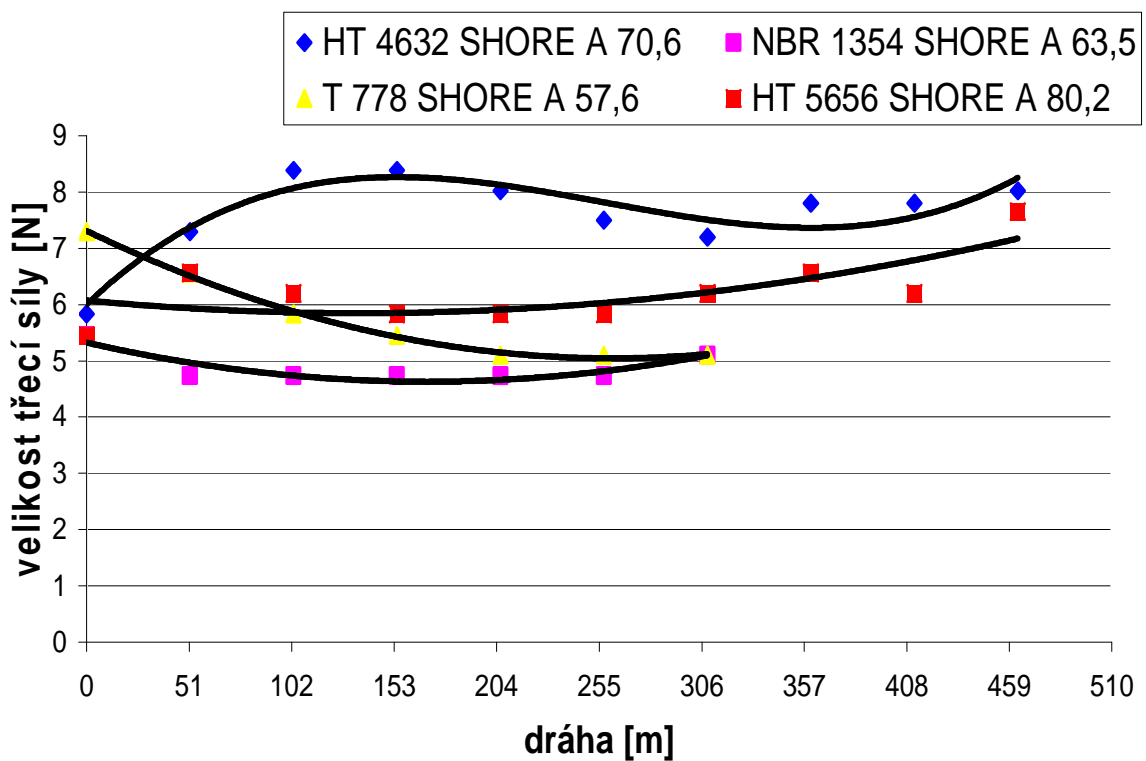
Doba otírání [min]	dráha otírání [m]	HT 4632 úbytek w [g]	HT 5656 úbytek w [g]	NBR 1354 úbytek w [g]	T 778 úbytek w [g]
5	51	0,001	0,001	0,008	0,008
10	102	0,001	0,003	0,016	0,022
15	153	0,002	0,004	0,025	0,031
20	204	0,002	0,005	0,043	0,043
25	255	0,003	0,005	0,066	0,054
30	306	0,003	0,007	0,094	0,067
35	357	0,004	0,009	-	-
40	408	0,005	0,01	-	-
45	459	0,005	0,011	-	-



Graf. 6. Závislosti hmotnostních úbytků různých směsí pryží na dráze při konstantním měrném tlaku 1,5 MPa.

Tab. 16. Závislost změny velikosti třecí síly na dráze při intenzivním opotřebení různých směsí pryží při konstantním měrném tlaku 1,5 MPa.

Doba otírání [min]	dráha otírání [m]	HT 4632 třecí síla [N]	HT 5656 třecí síla [N]	NBR 1354 třecí síla [N]	T 778 třecí síla [N]
5	51	5,8317	5,45	5,45	7,29
10	102	7,29	6,56	4,738	6,56
15	153	8,38	6,196	4,738	5,83
20	204	8,38	5,8317	4,738	5,45
25	255	8,02	5,8317	4,738	5,1
30	306	7,5	5,8317	4,738	5,1
35	357	7,2	6,196	-	-
40	408	7,8	6,56	-	-
45	459	7,8	6,196	-	-



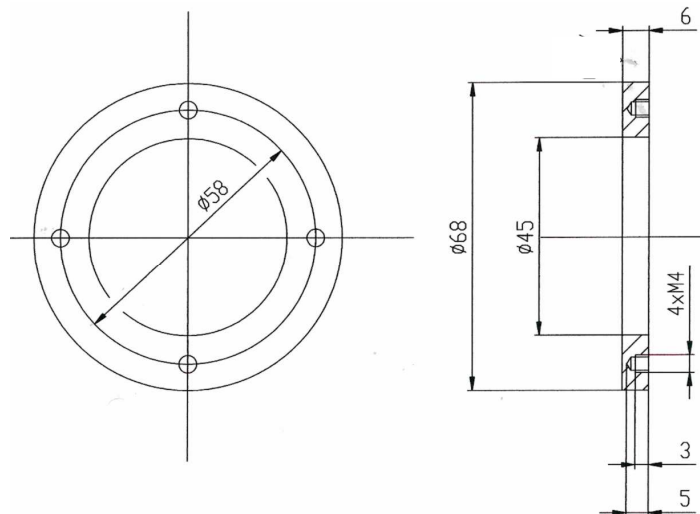
Graf. 7. Závislosti změny velikosti třecí síly při opotřebení různých směsí na dráze při konstantním měrném tlaku 1,5 MPa.

4.4 Návrh zařízení na výrobu vzorků pro tribologické zkoušky

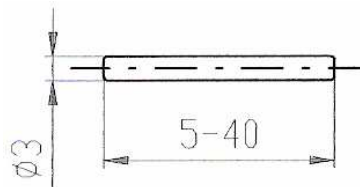
Pro vzorky, jenž jsou používány na zařízení, které pracuje na principu rotačního disku jsem provedl návrh formy. Daná forma je konstruovaná co možná s největší univerzálností použití pro případné další využití.

4.4.1 Charakteristika vzorků

Na daném zařízení se používají dvě tělesa a to buď mezikruží (Obr. 35) a nebo tyčinka o průměru 3 mm a délce v řádech od 5mm do 40 mm (Obr. 36).



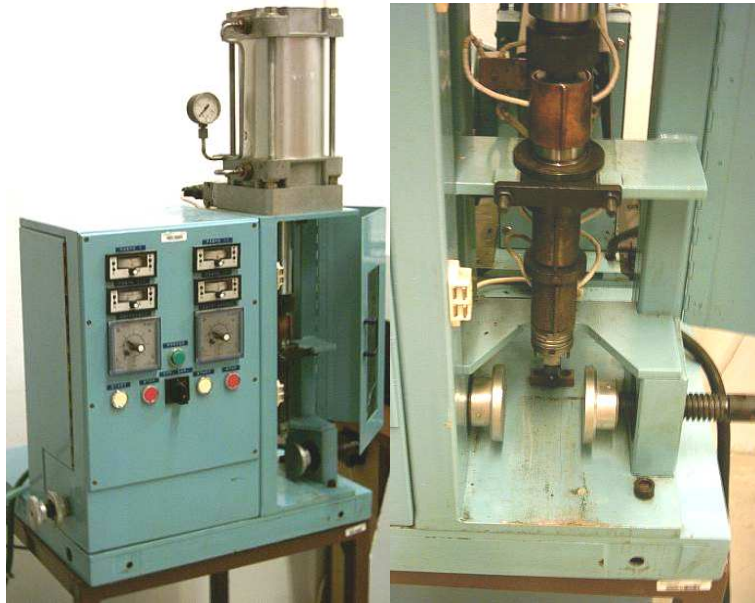
Obr. 35. Schéma vzorku mezikruží.

Obr. 36. Schéma vzorku
tyčinky.

Pro tyto dva vzorky jsem navrhl formu, jenž by sloužila k jejich výrobě na laboratorním ručním vstřikovacím stroji (Obr. 35).

Tab. 17. Parametry laboratorního vstřikovacího zařízení.

Parametr	Údaj
Výrobce, označení	Chemopetrol Litvínov
Označení, sériové číslo	MWS-1R, 015
Typ	ruční vstřikovací stroj
Způsob vyhazování a otvírání formy	manuální
Dělicí rovina	vstřik do dělicí roviny
Pracovní tlak	1,5 MPa



Obr. 37. Fotografie laboratorního vstřikovacího stroje.

4.4.2 Postup výroby

Pro dané součásti jsme zvolily pracovní postup dle osnovy:

- přebroušení desek dle požadavků (konvekční frézka);
- vyvrtání otvorů pro sešroubování (konvekční frézka);
- vyřezání závitů;
- předvrtání děr pro vodící čepy (konvekční frézka);
- výroba tvarových desek a děr pro vodící čepy a vyhazovače (na stroji FC 16 CNC);
- navrtání a následné stružení vtokových kanálů (konvekční frézka)
- dodělánání zahloubení pro vodící pouzdra (konvekční frézka);
- výroba kuželového zahloubení pro ukotvení vodících čepů, zahloubení pro hlavy šroubů, vyhazovačů;

Výkresová dokumentace a program pro výrobu vodících čepů a tvarových částí je přiložen v příloze (PI-PXX). Program je koncipován pro možnost obrábění na stroji FC 16 CNC. Daný program je napsán s ohledem na možnosti obrábění a nástrojové vybavení laboratoře UVI.

4.5 Vyhodnocení výsledků praktické části

Použité měřicí zařízení, na principu rotujícího disku, je vhodné ke studiu tribologických vlastností dutiny formy. Výsledné hodnoty měření při použití zkoušené nástrojové oceli ke zkouškám opotřebení byly výborné. Daná ocel velmi dobře odolávala abrazi polymerem. V grafu 5 uvádím srovnání závislostí pro různé měrné tlaky a materiály zjištěné měřením. Pro dokonalejší popis závislostí opotřebení, daných zkoušek, by bylo významné provést měření při více velikostech měrných tlaků.

Z odzkoušení zařízení na testování pryží lze říci, že na mosazné zkušební tyčince nebylo během všech testů zpozorováno běžně měřitelné opotřebení. Avšak výsledky testu ukazují, že pro zkoušku opotřebení pryží je daná metoda vhodná, významné by pak bylo zkoušení pryží při běžném zatížení a při zatížení zvýšeném a následném definování závislostí mezi těmito zkouškami.

Zřejmě významné k tribologickému studiu formy na daném zařízení je použití plastového vzorku ve tvaru mezikruží, na něž by byla přitlačována tyčinka z materiálu, jenž by byl ekvivalentním k materiálům používaných na exponované části. Dané mezikruží by mohlo být vyráběno z různou kvalitou povrchu.

Použitelnost měřicí metody je omezena na použití granulí, jenž je možné přitlačovat, ale které nemají adekvátní rozměry, a tak je důležité i mít možnost použít tyčinek jenž by měly přesněji definované vlastnosti a dalo se tak použít širšího množství různých materiálů.

Toto řeší navržená forma na výrobu tyčinek a mezikruží vycházející z materiálových, nástrojových a strojových možností laboratoře UVI. Programy na tvarové desky byly verifikované na FC 16 CNC a jsou přiloženy (PXIX-XX). Při konkrétní výrobě tvarových dutin ale nastaly problémy jenž se týkaly extrémního otupování nástrojů a přehřívání elektromotoru i při minimální technologické náročnosti na zatížení stroje. Z těchto důvodů jsem přešel ke konvenčnímu způsobu obrábění a to konkrétně vysoustružení dutiny ve tvaru mezikruží. Zakázka výroby tvarových částí forem nebyla splněna z důvodu nemoci technického pracovníka. Výkresová dokumentace je přiložena (PI-XVIII).

ZÁVĚR

Ve studijní části je věnován prostor pro vysvětlení pojmů související se třením a opotřebením. Byly i probrány možnosti zvyšování odolnosti exponovaných dílů přicházejících do styku s polymerními materiály. V práci jsou prezentovány základní tribologické měřicí metody.

V praktické části byly provedeny měření na zjištění možnosti použití daného laboratorního zařízení pracujícího na principu rotujícího disku ke zkoušení tribologických vlastností dutiny formy a k možnosti užití daného zařízení k intenzivním testům opotřebení pryží.

S ohledem na výsledky praktických zkoušek, lze toto zařízení užít s výhodou, jak pro simulaci tribologických jevů vznikajících uvnitř dutiny forem, či obecně při zpracování polymerních materiálů, tak i při srovnávacích testech opotřebení pryží.

Pro dané zařízení jsem provedl návrh formy na výrobu zkušebních vzorků vstřikováním (PI-PXVIII).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BEČKA, J. *Tribologie*. Praha: ČVUT , 1997. 212 s. ISBN 80-01-01621-8
- [2] HUGO, J., a kolektiv. *Konstrukční plastické hmoty*. 1.vyd. Brno: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 528 s.
- [3] KLIMEŠ, P. *Části a mechanismy strojů II*. Brno: VUT Brno, 2002. 69 s.
- [4] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno: Cerm , 2003. 270 s. ISBN 80-214-1996-2
- [5] KORDULIAK, D. *Výzkum nových metod zvyšování otěruvzdornosti technologických ploch*. Zlín: VUT Brno, Fakulta technologická, 1995.
- [6] KUNDERA, R. *Modelování a kompenzace tření*. Brno: VUT Brno, 1999.
- [7] LUKOVICS, I. *Konstrukční materiály a technologie*. Zlín: VUT Brno, Fakulta technologická, 1992.
- [8] LUKOVICS, I., SÝKOROVÁ, L. *Části strojů*. Zlín: VUT Brno, Fakulta technologická, 1991.
- [9] MOORE, D. F. *Principles and Applications of Tribology*. 1st ed. Oxford: Pergamon Press, 1975. 388 s. ISBN 0-08-019007-3
- [10] MOORE, D. F. *The Friction and Lubrication of Elastomers*. 1st ed. Braunschweig: Pergamon Press, 1972. 288 s. ISBN 0-08-016749-7
- [11] PŘÍBORSKÝ, P. *Potlačení tření v servomechanismu*. Brno: VUT Brno, 1999. 81 s.
- [12] ŠŮSTEK, P. *Výzkum metod určování intenzivního opotřebení technologických ploch*. Zlín: UTB Zlín, 2001. 63s
- [13] TOMIS, F., HELFŠTÝN, J., MAŇAS, M. *Výrobní stroje a zařízení : gumárenské a plastikářské stroje. Díl 2*. Brno: VUT Brno, 1990. 199 s. ISBN 80-214-0213-X
- [14] VOCEL, M., DUFEK, V. *Tření a opotřebení strojních součástí*. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1976. 376 s. ISBN ?
- [15] VOCEL, M., SUCHÁNEK, J. *Strojírenská výroba*. 1993, roč. 41, č. 7-8, s.13

- [16] *Materiálový výzkum ATeam: Zkoušky trvanlivosti ostří řezných nástrojů* [online]. [cit. 2006-01-09]. Dostupný z WWW:
<http://www.ateam.zcu.cz/trvanlivost.html>
- [17] *Speciální technologie a měření: tření* [online]. [cit. 2006-01-09]. Dostupný z WWW:
http://www.kod.vslib.cz/info_predmety/STE/ste.htm

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

HRC	Tvrdość dle Rockwella.
HV	Tvrdość dle Vickerse.
PVC	Polyvinylchlorid.
PA	Polyamid.
PE	Polyethylen.
PTFE	Polytetrafluorethylen.
UVI	Ústav výrobního inženýrství.
τ_s	Pevność materiálu ve stříhu. [MPa]
σ_D	Střední napětí v tlaku. [MPa]
τ	Velikost středního tečného napětí. [MPa]
μ	Součinitel smykového tření. [-]
ξ	Rameno valivého odporu. [mm]
f_α	Součinitel tření opásáním pro daný úhel a danou třecí dvojici. [-]
η	Dynamická viskozita maziva [N.m.s ⁻²]
v	Rychlość relativního pohybu [m.s ⁻²]
F_s	Třecí síla [N]
p	Hodnota středního tlaku [MPa]
h	Tloušťka vrstvy [mm]
t	Čas [s]
ΔVB	Přírůstek opotřebení [μm]
ΔT	Přírůstek času [s]
I	Intenzita opotřebení v [$\mu\text{m}/\text{min}$]
δ	velikost opotřebení [kg/m^2]
G	Velikost zátěže [kg]

ITT	Index toku taveniny [g/10min]
w	Hmotnostní úbytek [kg/m ²]
Ra	Průměrná aritmetická odchylka profilu [μm]
Rz	Nejvyšší výška profilu [μm]
SV	Podíl skelných vláken [%]
F	Přítlačná síla [N]
S	Styčná plocha [mm ²]
p _m	Měrný tlak [MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Mikroskopické dotykové plochy..	12
Obr. 2. Úhly nakloněné roviny	13
Obr. 3. Podmínka lpění na nakloněné rovině.....	14
Obr. 4. Reakce na nakloněné rovině	14
Obr. 5. Valivé tření	16
Obr. 6. Rozložení měrných tlaků u valivého tření	16
Obr. 7. Určení potřebné síly k pohybu valením	17
Obr. 8. Rovnováha sil opásaného tření	18
Obr. 9. Stribeckova křivka – závislost součinitele tření na rychlosti.....	19
Obr. 10. Stribeckovy křivky pro čep \varnothing 70 mm pro různé hodnoty středního tlaku p	20
Obr. 11. Zobecněná Stribeckova křivka	21
Obr. 12. Schématické zakreslení kontaktu dvou povrchů znázorněno Gáfvertem v roce 1996	22
Obr. 13. Statické tření a break – away force	22
Obr. 14. Adhezivní opotřebení	25
Obr. 15. Abrázivní opotřebení	26
Obr. 16. Erozivní opotřebení	26
Obr. 17. Kavitační opotřebení.....	27
Obr. 18. Únavové opotřebení	27
Obr. 19. Vibrační opotřebení	28
Obr. 20. Možný nárůst opotřebení s časem při stálých podmínkách	28
Obr. 21. Vliv úprav pracovních povrchů na opotřebení plněnými polymery	31
Obr. 22. Metoda rotujícího disku pro měření tření a opotřebení	32
Obr. 23. Schéma zařízení na principu vnitřního bubnu	33
Obr. 24. Detail uspořádání nerovností na vnitřní válcové ploše.....	34

Obr. 25. Obecné schéma zařízení s plochým řemenem	35
Obr. 26. Nakloněná rovina pro měření tření	35
Obr. 27. Zařízení pro měření opotřebení obrazí	37
Obr. 28. Zařízení pro opětovné stlačování mazacího filmu.....	38
Obr. 29. Zařízení pro dynamické zatěžování povrchů	39
Obr. 30. Zařízení pro měření pomocí zkřížených vláken	40
Obr. 31. Zařízení pro měření dolíčků (pittingů), trhlinek	40
Obr. 32. Interferenční zařízení	41
Obr. 33. Příklad ukázky výsledku z interferenčního zařízení	42
Obr. 34. Sestavení měřícího zařízení	48
Obr. 35. Schéma vzorku mezikruží	61
Obr. 36. Schéma vzorku tyčinky.....	61
Obr. 37. Fotografie laboratorního vstřikovacího stroje.....	62

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Příklady velikostí ramen valivých odporů pro některé materiály valení	17
Tab. 2. Zhodnocení tribologických metod měření	44
Tab. 3. Parametry pohonu	49
Tab. 4. Vlastnosti plastů použitých při zkoušení	49
Tab. 5. Vzorčky použitých pryží	50
Tab. 6. Styčné plochy přitlačovaných vzorků, přitlačné síly a jejich měrné tlaky	51
Tab. 7. Hodnoty a materiály měření I	52
Tab. 8. Závislost úbytku materiálu mezikruží, proti granulátu dle podmínek (Tab. 7)	52
Tab. 9. Hodnoty a materiály měření II	53
Tab. 10. Závislost úbytku materiálu mezikruží, proti granulátu dle podmínek (Tab. 9) ...	53
Tab. 11. Hodnoty a materiály měření III	55
Tab. 12. Závislost úbytku materiálu mezikruží, proti granulátu dle podmínek (Tab. 11) ..	55
Tab. 13. Hodnoty a materiály měření IV	55
Tab. 14. Závislost úbytku materiálu mezikruží, proti granulátu dle podmínek (Tab. 13) ..	56
Tab. 15. Závislosti hmotnostních úbytků různých směsí pryží na čase při konstantním měrném tlaku 1,5 MPa	58
Tab. 16. Závislost změny velikosti třecí síly na dráze při intenzivním opotřebení různých směsí pryží při konstantním měrném tlaku 1,5 MPa	59
Tab. 17. Parametry laboratorního vstřikovacího zařízení	61

SEZNAM GRAFŮ

Graf. 1. Závislost úbytku materiálu ČSN19856.4-kaleno, proti granulátu PA 6 (s aditivem 30% skelných vláken) při měrném tlaku 27,8 MPa a 14 MPa.....	54
Graf. 2. Závislost změny velikosti třecí síly při opotřebení ČSN19856.4-kaleno, proti granulátu PA 6 (s aditivem 30% skelných vláken)	54
Graf. 3. Závislost úbytku materiálu ČSN19856.4-kaleno, proti granulátu PA 6 při měrném tlaku 27,8 MPa a 14 MPa.....	56
Graf. 4. Závislost změny velikosti třecí síly při opotřebení ČSN19856.4-kaleno, proti granulátu PA 6	57
Graf. 5. Linearizace velikosti opotřebení ČSN19856.4-kaleno, proti granulátu PA 6 a PA6 (+30%SV) při srovnatelných měrných tlacích 27(27,8) MPa a 13,5(14) MPa.	57
Graf. 6. Závislosti hmotnostních úbytků různých směsí pryží na čase při konstantním měrném tlaku 1,5 MPa ...	59
Graf. 7. Závislosti změny velikosti třecí síly při opotřebení různých směsí na dráze při konstantním měrném tlaku 1,5 MPa	60

SEZNAM PŘÍLOH

- PI UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-001 Sestava univerzální formy s tvarovými deskami na výrobu mezikruží.
- PII UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-002 Sestava univerzální formy s tvarovými deskami na výrobu tyčinek.
- PIII UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-003 Seznam položek k sestavě formy mezikruží.
- PIV UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-004 Seznam položek k sestavě formy tyčinky.
- PV UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-005 Upínací deska levá univerzální.
- PVI UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-006 Upínací deska pravá univerzální.
- PVII UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-007 Tvarová deska pravá mezikruží.
- PVIII UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-008 Tvarová deska pravá s dutinou.
- PIX UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-009 Opěrná deska univerzální.
- PX UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-010 Kotevní deska univerzální
- PXI UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-011 Vyhazovač mezikruží.
- PXII UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-012 Vodící pouzdro.
- PXIII UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-013 Vodící čep.
- PXIV UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-014 Rozpěrka.
- PXV UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-015 Tvarová deska levá tyčinky.
- PXVI UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-016 Tvarová deska pravá tyčinky.
- PXVII UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-017 Tvarová vložka.
- PXVIII UTB-FT-UVI-BCPR-VASIR-018 Vyhazovač tyčinek.
- PXIX NC program na výrobu tvarových částí formy.
- PXX NC program na výrobu vodících čepů.