

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta
Katedra materiálů a strojírenské technologie



Opotřebení plastů
Diplomová práce

Autor práce: Bc. Nikola Ješinová

Obor studia: OPTN

Vedoucí práce: prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

© 2017 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Nikola Ješinová

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Opotřebenění plastů

Název anglicky

Wear of plastics

Cíle práce

shromáždit informace o odolnosti plastů proti opotřebenění,
na základě provedeného experimentu posoudit odolnost vybraných plastů proti abrazivnímu opotřebenění,
včetně ekonomického zhodnocení.

Metodika

současný stav řešeného problému (literární rešerše),
cíl práce a metody jejího zpracování,
výsledky experimentů a jejich diskuse,
závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

makromolekulární látky; opotřebenění materiálů; technicko-ekonomické zhodnocení

Doporučené zdroje informací

- BLAU, P. J.: ASM Handbook, Volume 18 – Friction, Lubrication, and Wear Technology. ASM International 1992. [Online]. Available at:
<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASMHVFL2/asm-handbook-volume-18>.
- BROWN, R. (Ed.): Handbook of Polymer Testing: Physical Methods. New York, Dekker 1995.
- BROŽEK, M.: Selected plastics wear resistance to bonded abrasive particles compared to some ferrous materials. Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun. 2015, 63 (2), 387–393. ISSN 1211-8516; doi: 10.11118/actaun201563020387
- BUDINSKI, K. G.: Resistance to particle abrasion of selected plastics. Wear, 1997, 203-204: 302-309. Časopisy, firemní literatura, normy.
- Friction and Wear Testing: West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials. 1987.
- KINNEY, G. F.: Engineering properties and applications of plastics. New York, Wiley 1957.
- LEVER, A. E., RHYS, J. A.: The properties and testing of plastic materials. 3rd Edition. Bristol, Wright Temple Press Books 1968.
- NOVÁKOVA, A., BROŽEK, M.: Selected plastics wear resistance. In: 13th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Latvia University of Agriculture 2014. 29-30 May. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 187-193.
- VOCEL, M.: Experimentální metody hodnocení tření a opotřebenění (Experimental Methods of Friction and Wear Evaluation). Kovové materiály, 1983, 21(6): 711-722.
-

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 10. 1. 2016

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 20. 1. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jen prameny, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne 31. března 2017

Bc. Nikola Ješinová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala především vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc. za předávání cenných rad, zkušeností a za ochotu při spolupráci na mé diplomové práci.

Také bych chtěl poděkovat celé katedře materiálu a strojírenské technologie za možnost využívání laboratoří a strojů.

Abstrakt: Cílem této diplomové práce je porovnat velikost opotřebení vybraných druhů plastů. Všechny vzorky jsou podrobeny laboratorní zkoušce s vázanými částicemi na přístroji s brusným plátnem o zrnitostech 60, 120, 240 a 400. Opotřebení je vyhodnoceno na základě hmotnostních, objemových a délkových úbytků. První část diplomové práce je věnována literární rešerši, ve které jsou popsány druhy poškození, opotřebení a jednotlivé zkoušky odolnosti proti opotřebení. V druhé části jsou popsány materiály, které byly použity pro experimentální výzkum. Dále je popsána laboratorní zkouška abrazivního opotřebení. Další část diplomové práce se zabývá vyhodnocením výsledků z provedené laboratorní zkoušky. Výsledky zkoušek jsou statisticky vyhodnoceny a graficky interpretovány. Na základě získaných údajů je možné vyvodit důležitost správné volby materiálů s ohledem na odolnost proti abrazivnímu opotřebení a jeho ekonomickou výhodností.

Klíčová slova: makromolekulární látky, opotřebení materiálů, technicko-ekonomické zhodnocení.

Wear of plastics

Summary: The aim of this diploma thesis is to compare the weariness of selected kinds of plastics. All samples are put to the laboratory test with bound particles carried out on the machine with grit 60, 120, 240 and 400. The weariness is evaluated on the basis of weight, volume and length loss. The first part of this thesis is based on a literature review where are described various kinds of damages, weariness and particular tests of wear resistance. The second part is dealing with the materials used for an experimental research. Further, there is a detailed description of the abrasive weariness laboratory test. Following part is dedicated to the evaluation of results of the conducted laboratory test. The results of tests are statistically evaluated and graphically interpreted. On basis of gained data, it is possible to deduce the importance of the right choice of materials with regards to durability against abrasive weariness and its economic advantage.

Keywords: macromolecular substances, wear materials, technical-economic evaluation

OBSAH

1. Úvod.....	1
1.1 Cíl práce	2
1.2 Metodika	2
2. Plasty	3
2.1 Příprava, výroba a použití plastů	3
2.2 Polyreakce.....	5
2.3 Rozdělení plastů	6
2.4 Vlastnosti plastů	7
3. Tribologie.....	9
3.1 Tření, druhy tření.....	9
3.1.1 Smykové tření.....	10
3.1.2 Valivé tření	10
3.2 Druhy poškození.....	11
3.2.1 Opotřebení	12
3.2.2 Koroze polymeru, chemická odolnost.....	19
3.2.3 Otláčení.....	20
3.2.4 Deformace	20
3.2.5 Trhliny a lomy	20
3.2.6 Ostatní poškození	21
3.3 Vliv abrazivních částic na intenzitu abrazivního opotřebení.....	24
3.3.1 Vliv velikosti abrazivních částic	24
3.3.2 Vliv množství abrazivních částic.....	24
3.3.3 Vliv tvaru abrazivních částic	25
3.3.4 Vliv pevnosti abrazivních částic.....	25
3.3.5 Vliv tvrdosti abrazivních částic	25
4. Zkoušky odolnosti materiálu proti opotřebení.....	26
4.1 Zkoušky odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení.....	26
4.1.1 Přístroje s volnými částicemi.....	27
4.1.2 Přístroje s vázanými částicemi	29
4.1.3 Přístroje s vrstvou volných částic mezi stykovými povrchy	32
4.2 Zkoušky odolnosti proti adhezivnímu opotřebení	32
4.3 Zkoušky odolnosti proti erozivnímu opotřebení	33
4.4 Zkoušky odolnosti proti kavitačnímu opotřebení	34
4.5 Zkoušky odolnosti proti vibračnímu zařízení.....	35
5. Experimentální zkoušky abrazivního opotřebení	36
5.1 Zkušební vzorky	36
5.2 Příprava zkušebních vzorků	41

5.3	Laboratorní zkouška.....	42
5.3.1	Použitá zařízení	43
5.3.2	Brusné plátno	46
6.	Výsledky práce a diskuse.....	48
6.1	Výsledky abrazivního opotřebení plastů.....	48
6.2	Technicko–ekonomické zhodnocení	53
7.	Závěr	56
8.	Seznam literatury	57
9.	Seznam obrázků	60
10.	Seznam tabulek.....	62
11.	Seznam příloh	63

1. Úvod

Současný vývoj konkurenčního prostředí nutí výrobce strojních součástí produkovat, vyvíjet stále nové, dokonalejší, a hlavně levné výrobky. Cena výrobku se odráží nejen na spotřebě materiálu, ale do určité míry je ovlivněná i režijními vstupy výrobního zařízení. Režijní vstupy jsou určeny mírou funkčnosti, přesnosti, spolehlivosti, a zejména mírou opotřebení výrobního zařízení. A právě opotřebení je následkem různých odstávek a oprav všech zařízení a strojů.

Některé součásti výrobních zařízení jsou namáhaný více než ostatní, a proto je velmi důležité tyto součásti během jejich životnosti opravovat a měnit. Tak aby mohla být provedena výměna nebo oprava bez finančních, materiálových a časových ztrát je potřeba se neustále seznamovat s novými výzkumy, testovat různé odolnější materiály a technologie. Mnoho součástí pracuje ve vzájemné pohybu a dochází ke styku funkčních ploch, a proto je potřeba využívat poznatků tribologie, která se touto problematikou zabývá. Tření, které vzniká vzájemným pohybem součástí zapříčiní opotřebení a zhoršení funkce celého zařízení.

Neustále v dnešní době roste trend snižovat náklady na opravy, a to je hlavní důvod pro hledání odolnějších materiálů. V poslední době vzrůstá i potřeba ekologických součástí, které nezatěžují životní prostředí. Zákazníci kupující výrobek raději volí nekvalitní a levnější variantu, který se po opotřebení stane odpadem, místo toho, aby volili kvalitnější výrobek. Velmi důležitou položkou celkových nákladů jsou vstupní investiční náklady zařízení, strojů a nástrojů. Provozní náklady, které zásadně ovlivňují opotřebení tvoří velkou část celkových nákladů. S rostoucím opotřebením na funkčním povrchu materiálu narůstají třecí momenty a síly, které mají za následek zvýšení příkonu strojů. Právě zvýšení příkonu má za následek růst spotřeby energie.

Stále zvyšující se nároky na výkonnost zařízení, zapříčiní neustálé hledání odolnější, kvalitnějších a levnějších konstrukčních variant. Zákazník od nových materiálů očekává především dlouhý, bezporuchový provoz a především jednoduché a finančně nenáročné opravy a údržby.

1.1 Cíl práce

Cílem diplomové práce na téma „**Opotřebení plastů**“ je zkoumání a vyhodnocení velikosti abrazivního opotřebení běžně používaných plastů. Odolnost plastů proti opotřebení byla zkoumána u pěti druhům polymeru (PTFE, PVC, POM-C, PA 66 a PA 6) na přístroji za pomoci vázaného abraziva upevněného ve formě brusného plátka na desce přístroje. Opotřebení bylo změřeno na plátcích o zrnitosti 400, 240, 120, 60 a přítlačnou silou 0,1 MPa. Výsledky měření na základě hmotnostních, objemových a délkových úbytků a poměrného objemového opotřebení odolnosti plastů proti abrazivnímu opotřebení budou dále vyhodnoceny a porovnány.

1.2 Metodika

První část diplomové práce je založena na shromáždění dostupných zdrojů (odborné literatury, článků, dostupných prospektů specializovaných firem a internetu). Všechny materiály bylo nutné prostudovat a použít přiměřený obsah, který problematiku nejlépe vystihne. Pro pochopení a lepší orientaci v problematice opotřebení jsou v diplomové práci použity obrázky a fotografie.

Druhá část, je věnovaná samotnému výzkumu. Nejprve jsou popsány samotné zkoušené materiály, následuje popis přípravy, provedení a vyhodnocení zkušebních vzorků a popis laboratorní zkoušky. Dále jsou uvedené použité výpočty, charakteristika použitých brusných plátek. Následuje grafické a slovní zhodnocení výsledků zkoušek odolnosti proti abrazi. Nakonec je uvedeno technicko-ekonomické zhodnocení.

2. Plasty

Plasty patří mezi konstrukční materiály, které lze rozdělit podle látkové podstaty a podle vlastnosti do tří základních skupin: kovové materiály, nekovové materiály a kompozitní materiály (obr. 1). Základní skupiny lze dále rozdělit na podskupiny, jako např. neželezné kovy, které zahrnují těžké a lehké kovy nebo syntetické materiály, zahrnující sklo, plasty a keramiku. [1]



Obr. 1 Rozdělení konstrukčních materiálů [1]

O plastech můžeme říci, že jsou uměle vyrobené organické látky polymerní povahy. Makromolekulární látky tvořené řetězci molekul uhlovodíků nebo látek z nich odvozených. Základní surovinou pro výrobu plastů představují většinou jednoduché uhlovodíky získané z ropy nebo zemního plynu. [1, 2]

Historie plastů je relativně nová, na rozdíl od jiných materiálů např. skla, kovových materiálů. Plasty byly poprvé vyvinuty v první polovině 19. století. Avšak dynamický růst výroby a použití plastů přišel až v polovině minulého století. Od této chvíle výroba a vývoj plastů roste velmi dynamicky. V některých případech plasty nahrazují běžně používané materiály, jako dřevo nebo ocel. [3]

2.1 Příprava, výroba a použití plastů








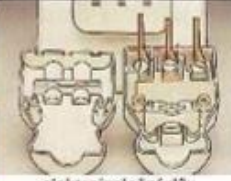




Polymery jsou látky vyráběny z monomerů, získávané převážně z ropy a zemního plynu. Jedná se o jednoduché chemické reakce, kde nízkomolekulární sloučenina monomer přechází

ve vysokomolekulární látku nazývanou polymer. Vlastnosti (chemické a fyzikálně chemické) polymeru jsou dány chemickým složením merů a vazbami mezi nimi. [4]

Spojování monomerů do makromolekul může probíhat polymerací, polykondenzací nebo polyadicí. Druh polyreakce má vliv na uspořádání plastů. Plasty jsou tvořeny převážně uhlovodíky. Kromě atomů uhlíku a vodíku dále plasty obsahují kyslík, dusík, chlor a fluor [5]

Z polymeru se plast stane po smíchání nezbytných přísad a převedením do vhodné formy pro další technické zpracování (tablety, prášky, granule, atd.). Přísady usnadňují technologické zpracování, zlepšují vlastnosti a vzhled výrobků. [4,5]

Plasty zaujímají velmi významné místo v oblasti moderní techniky. Toto místo zaujímají nejen pro jejich mnohostranné použití, ale hlavně díky možnosti vyrábět plasty s velmi rozdílnými vlastnostmi. [6]

<p>Nízká hustota: 0,9 až 1,4 kg/dm³ (výjimka PTFE: $\rho = 2,2 \text{ kg/dm}^3$)</p>	<p>nádoby díly automobilů díly letadel</p>	 <p>nádoby, kanystry</p>	 <p>lopatková kola ventilátorů</p>	 <p>přístrojové desky</p>
<p>Od tvrdých a pevných až po měkké a elastické. Dobře tvářitelné a obrobitelné, odlévatelné</p>	<p>části strojů pryžové elastické konstrukční díly kryty strojů</p>	 <p>části převodovek</p>	 <p>pneumatiky automobilů</p>	 <p>součásti nářadí</p>
<p>Elektroizolační, tepelně izolační vlastnosti</p>	<p>rukojeti nástrojů elektrické konstrukční součásti tepelně izolační materiály</p>	 <p>rukojeti nástrojů</p>	 <p>elektroizolační díly</p>	 <p>izolační desky</p>
<p>Korozní odolnost proti mnoha chemikáliím a agresivním vlivům prostředí</p>	<p>nádoby na chemikálie trubky armatury povlaky</p>	 <p>kryty stroje</p>	 <p>vložky trubek</p>	 <p>povlaky</p>

Obr. 2 Příkladů použití plastů [4]

Přísady

Polymery se jen velmi zřídka využívají v čistém stavu, většinou obsahují přísady, pomocí kterých lze připravit materiály s požadovanými vlastnostmi. Přísady mohou ovlivňovat zpracovatelnost polymeru, snižovat jejich cenu, nebo zpomalovat degradační procesy. Mezi přísady mohou patřit:

- Plniva
- Stabilizátory (tepelné, světelné)
- Barviva, pigmenty
- Maziva
- Změkčovadla
- Nadouvadla
- Tvrdidla
- Antistatika
- Modifikátory
- Antioxidanty
- Atd. [7]

2.2 Polyreakce

- Polymerace

Při polymeraci dochází ke skládání řetězové makromolekuly, vycházející z malých molekul (monomerů), které mají alespoň jednu dvojnou vazbu. Po rozštěpení dvojně vazby se naváže velké množství těchto molekulových stavebních jednotek v jednu velkou molekulu (makromolekulu). Takto vytvořené polymery, se nejčastěji nazývají podle monomeru přidáním předpony poly-, (polyvinylchlorid, polyethylen, polystyren apod.). [6]

- Polykondenzace

Při polykondenzaci rovněž dochází ke spojení monomerů do dlouhých řetězců, ale při každém připojení další monomerní jednotky dojde k odštěpení nízkomolekulárního produktu.

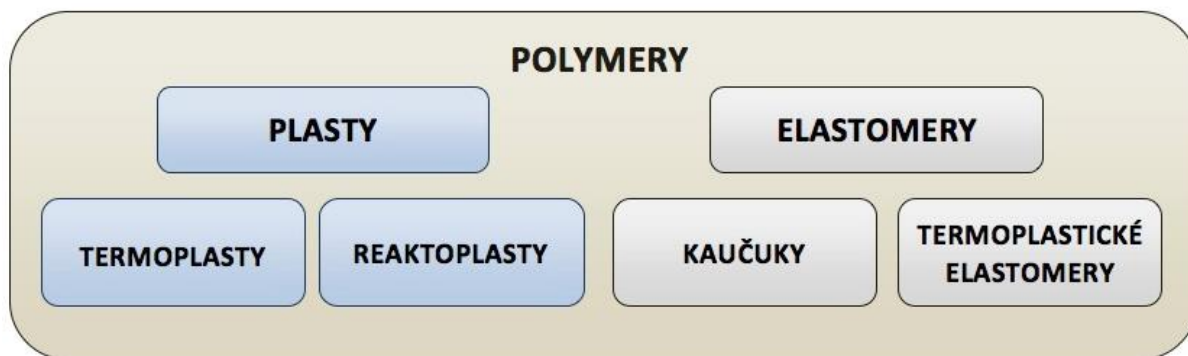
Chemické složení výsledného polymeru se liší od výchozích sloučenin. Polymery vytvořené polykondenzací dostávají jména podle chemických skupin (polyamidy, polyestery apod.). [6]

- **Polyadice**

Polyadici dochází k reakci dvou odlišných monomerů, obsahující v molekule reaktivní atomové skupiny. Nevzniká žádný štěpný produkt, jako u polykondenzace. Ale dochází k přesouvání vodíkového atomu z jedné reaktivní skupiny na jinou, čímž probíhá slučování. Polyadice mění strukturu základního článku polymeru. Polymery vytvořené polyadici se nazývají polyuretany a epoxidové pryskyřice. [6]

2.3 Rozdělení plastů

Termoplasty, reaktoplasty a elastomery jsou základní tři skupiny plastů, které jsou rozděleny podle vnitřní struktury. Každá skupina plastů má svou typickou vnitřní strukturu, která je příčinou vlastností a chování při zvyšování teploty. [4]



Obr. 3 Rozdělení polymerů [7]

- **Termoplasty**

Termoplasty se skládají z dlouhých řetězců (spojení molekul) tvaru tenkých vláken., která jsou mezi sebou propojena chemickými vazbami. Jednotlivé řetězce jsou hustě propleteny, tím je způsobena jejich soudržnost a pevnost. Při zvyšování teploty roste elasticita termoplastů, která se dále mění na plasticitu a poté na tekutý stav. Při opětovném ochlazení se

vlastnosti termoplastu vrací do původního stavu. Při zahřívání termoplastů neprobíhá chemická reakce a ani chemická struktura se při zpracování nemění. Termoplasty jsou dobře recyklovatelné. Mezi známé termoplasty můžeme zařadit PVC (polyvinylchlorid), POM (polyoxymethylen), PP (polypropylen) atd. [1, 8]

- **Reaktoplasty**

Reaktoplasty jsou složeny z dlouhých molekul tvaru tenkých vláken. Vlákná jsou mezi sebou propojena chemickými vazbami. Reaktoplasty jsou tavitelné a tvarovatelné jen určitou dobu po zahřátí. Při dalším zahřívání dochází k chemické změně. Pokud dojde k překročení kritické teploty, Reaktoplast se rozpadne, aniž by vůbec předtím změknu. Tento proces je již nevratný a materiál nelze znovu tvarovat, svařovat a ani převést do taveniny. Reaktoplasty mají vysokou tepelnou i chemickou odolnost dobrou tuhost a tvrdost. V nevytvrzeném stavu se nazývá pryskyřice např.: EP (epoxidová pryskyřice), UP (polyesterová pryskyřice) apod. [1]

- **Elastomery**

Elastomery jsou složeny z dlouhých molekul tvaru tenkých vláken, která jsou mezi sebou řídko propojena chemickými vazbami. Vlákná elastomerů se dají natáhnout, aniž by se po uvolnění tahu projevila tato deformace na změně původních rozměrů. Nejsou tvařitelné ani svařitelné, ale jsou pružné. Při zvýšení teploty se elastomery stávají pružnější a měkčí, naopak při klesající teplotě se stávají tvrdšími a tužšími. [1]

2.4 Vlastnosti plastů

Při výběru polymeru je velmi důležitá znalost všech jeho vlastností (mechanických, tepelných, elektrických, fyzikálních apod.).

- **Mechanické vlastnosti**

Mezi mechanické vlastnosti můžeme zařadit pevnost, pružnost, plasticitu a houževnatost. Mechanické vlastnosti jsou silně závislé na teplotě a také na rychlosti deformace. Jsou to veličiny, ovlivněné přípravou a tvarem zkušebních těles a způsobem

namáhání. Pro experimentální určení jsou vyráběna zkušební tělesa, nebo jsou tělesa získávána přímo z hotových výrobků nebo polotovarů. [9]

- **Tepelné vlastnosti**

Do oblasti tepelných vlastností polymeru lze zařadit mnoho charakteristik polymerů. Všechny charakteristiky jsou značně závislé na teplotě. Mezi tepelné vlastnosti patří např.:

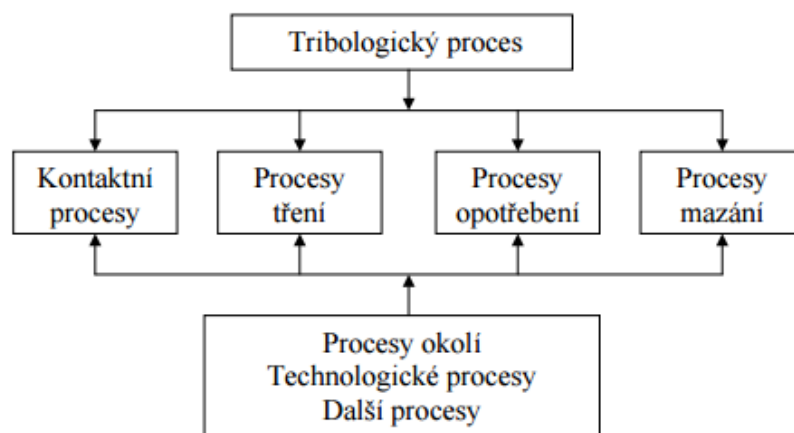
- Teplotní rozsah použitelnosti plastů
- Degradace polymerů
- Tepelná roztažnost
- Tepelná vodivost
- Hořlavost polymerů [7,9]

- **Elektrické vlastnosti**

Polymery jsou nevodivé materiály, a proto se používají jako elektrické izolanty. [9]

3. Tribologie

Vědní obor zabývající se chováním dotýkajících se povrchů ve vzájemném pohybu anebo při pokusu o vzájemný pohyb nazýváme tribologie. Tribologie má snahu o spojení vědy s praxí v oblastech tření, mazání a opotřebení. Pohyb dvou povrchů může být obecně valivý, kluzný, nárazový nebo kmitavý. Ve skutečnosti se uplatňují dva i více druhů pohybů současně. Jednotlivé části tribologických procesů a jejich vzájemné vazby jsou znázorněny na obr. 4. [11]



Obr. 4 Vazby v tribologickém systému [9]

Opotřebení a tření materiálů spolu z hlediska tribologie úzce souvisí. Spojitostí tření a opotřebení se rozumí odstraňování materiálu z třecích povrchů v přímém styku, ve vzájemném pohybu a nebo při styku s proudícím médiem. [11]

Kontaktní procesy

Základním znakem chování tribologického systému je kontakt mezi jednotlivými členy tohoto systému. Při dotýkání částí musíme uvažovat s materiálovými, tvarově-rozměrovými vlastnostmi a reakcemi mezi nimi (fyzikální, chemické, materiálové reakce, atd.). Plocha styku, která obstará přenos pohybu má význam při řešení tribologických problémů. [11]

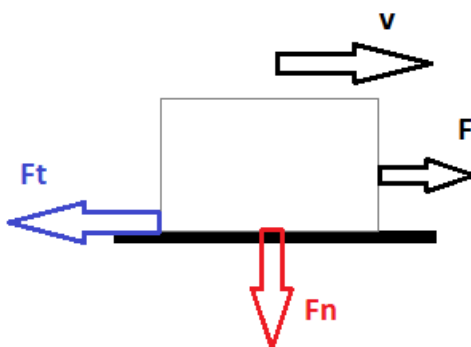
3.1 Tření, druhy tření

Tření lze jednoduše popsat jako následek pohybu jednoho tělesa na druhém. Kdy dochází k opotřebení vnějších vrstev stykových ploch. Při tření dojde ke ztrátě mechanické energie v určité fázi relativního pohybu. Tření lze rozdělit podle přítomnosti média na:

- Polosuché
- Suché
- Tekutinové [12]

3.1.1 Smykové tření

Smykové tření vzniká při posuvném pohybu dvou vzájemně na sebe působících těles. Ke smykovému tření dochází na povrchu stykových ploch těles. Tření je větší při uvádění tělesa do pohybu než u tělesa, které se již pohybuje. Při smykovém tření vzniká síla, která působí v opačném směru, než je pohyb tělesa. Tuto sílu nazýváme třecí. Na obr. 5 je zobrazeno smykové tření. [12, 13]

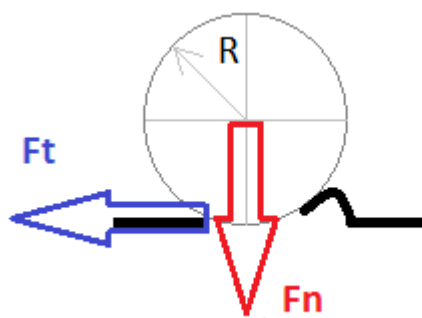


Obr. 5 Smykové tření [11]

- **F_t** – třecí síla
- **F_n** – tlaková síla mezi tělesem a podložkou (vždy kolmá)
- **F** – tahová síla
- **v** – rychlost [11]

3.1.2 Valivé tření

Valivé tření vznikne při posuvu valivého tělesa po rovné nebo zakřivené podložce. Valivé těleso má tvar válce, koule nebo kužele z toho vyplývá, že styková plocha je menších než při smykovém tření. A proto třecí síla nabývá menších hodnot. Princip valivého tření je zobrazen na obr. 6. [12]



Obr. 6 Valivé tření [11]

- F_t – třecí síla
- F_n – tlaková síla mezi tělesem a podložkou (vždy kolmá)
- R – poloměr [11]

3.2 Druhy poškození

V této kapitole je vysvětlena degradace strojních součástí obecně pro všechny druhy materiálů.

Při dotyku dvou součástí, které se k sobě přibližují (pomocí vlastní hmotnosti nebo působením vnějšího zatížení) dochází ke styku povrchových ploch ve třech bodech. Velký měrný tlak v bodech způsobí plastickou deformaci u plastických materiálů a odlamování mikroskopických částic povrchu součástí u křehkých materiálů. Následkem odlamování se dostávají do kontaktu i další místa povrchu, na kterých probíhá stejný děj, tak dlouho až kontaktní plocha je tak velká, že měrný tlak nevyvolá žádné plastické deformace. Rovnovážný stav je závislý na mnoha činitelích např.: na směru a rychlosti pohybu těles, vlastnostech těles, způsobu a velikosti zatížení a na přítomnosti media. [14]

Absorpční a oxidová vrstva jsou narušeny, pokud dojde k přímému kontaktu dvou součástí. Tím dojde k vytvoření malých mikrospojů. Při dalším vzájemném pohybu součástí jsou tyto mikrospoje rozrušeny a může docházet k oddělování částic a k přemísťování těchto částic z jedné součásti na druhou. Vlastnosti součástí, velikost zatížení, druh tělesa, médium a jeho vlastnosti, rychlost a směr pohybu to jsou nejdůležitější činitelé ovlivňující intenzitu uvedeného procesu. [14]

Dle autora [14] je možné degradaci strojních součástí rozdělit takto: opotřebení, otláčení, deformace, koroze, trhliny a lomy.

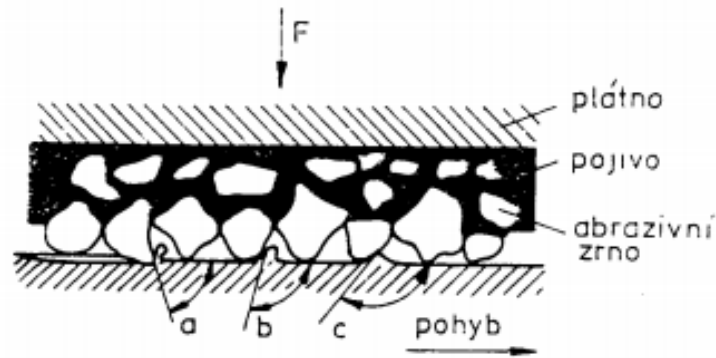
3.2.1 Opotřebení

Opotřebení je nevratná změna povrchu nebo rozměrů materiálu, vyvolaná oboustranným působením funkčních ploch povrchu materiálu nebo povrchu materiálu a média, které opotřebení způsobuje. Projevuje se odstraňováním nebo přemísťováním částic materiálu z povrchu součástí mechanickým účinkem (působení sil) , většinou doprovázeno chemickými nebo elektrochemickými vlivy. Opotřebení lze rozdělit podle vnějších změn a podmínek vzniku opotřebení na abrazivní, adhezivní, erozivní, kavitační, únavové, vibrační. V praxi se obvykle jednotlivé druhy kombinují, jeden druh předchází v jiný, uplatňují se další vlivy, takže vzniká řada variant. [9,14]

Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení můžeme charakterizovat, jako oddělování částí povrchů nerovnostmi z povrchu druhého. K oddělování také dochází pohybem tvrdších částic mezi třecími plochami. Abrazivní opotřebení je závislé na velikosti zatížení, tvrdosti opotřebovaného materiálu a délce kluzné dráhy. Nemůžeme zanedbat velikost, tvar a množství oddělených částic. Povrch odebíraného materiálu získává typicky ryhovaný vzhled. Jestliže se jedná o velmi intenzivní opotřebení, jsou rýhy hluboké a viditelné pouhým okem. Při mírnějším opotřebení jsou rýhy viditelné pouze při zvětšení a povrch materiálu je v počátečním stadiu spíše vyleštěný. [15]

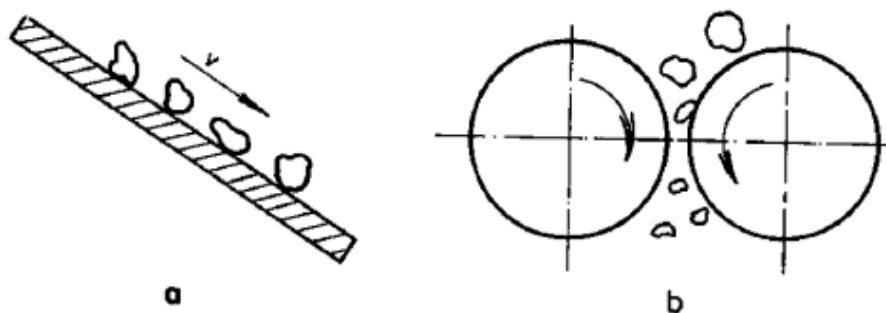
U abrazivního opotřebení rozeznáváme dva druhy ryhování abrazivem. Prvním druhem je opotřebení povrchu součástí vázaným abrazivem, které je spojeno určitým médiem. Dochází k opotřebení funkční plochy povrchu materiálu tvrdými částicemi, interakce částic a součástí. Schéma opotřebení je zobrazeno na obr. 7. [13,15]



Obr. 7 Schéma oddělování částic a) v podobě třísky, b) tvorba nárůstku, c) tvorba valu [15]

Oddělování částic z opotřebovaného povrchu je závislé na úhlu, jenž svírá hrana abrazivní částice s povrchem. Může dojít k rýhování a ke vzniku třísky, nebo částice může povrch materiálu rýhovat a tvořit podél dráhy val. [16]

U druhého případu je opotřebení dvou funkčních ploch způsobeno volnými abrazivními částicemi obr. 8. Dochází k interakci 3 těles, která se vyskytuje u jakýchkoli pohybových mechanismů, do nichž pronikají částice z okolí. [15,16]

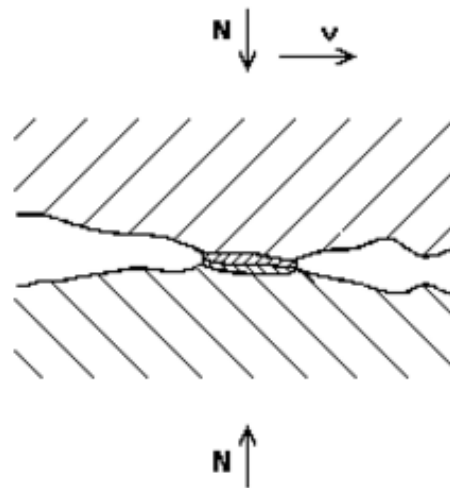


Obr. 8 Opotřebení abrazivní s volnými částicemi a) interakce dvou těles, b) interakce tří těles [16]

Adhezivní opotřebení

K adhezivnímu opotřebení nastane při smýkání dvou tuhých těles, které jsou k sobě přitlačovány normálovou silou. Při následném dotyku dojde k porušení adsorpčních a oxidových vrstev a ke vzniku adhezivních mikrospojů, které jsou poté rozrušovány. Velký

vliv na vznik adhezivního opotřebení má zejména schopnost materiálu vytvářet adhezní spoje, poloměr zakřivení mikronerovností, hloubka vnikání, velikost zatížení a rychlost relativního pohybu. Schéma adhezivního opotřebení je zobrazeno na obr. 9. [14]



Obr. 9 Schéma mechanismu adhezivního opotřebení [14]

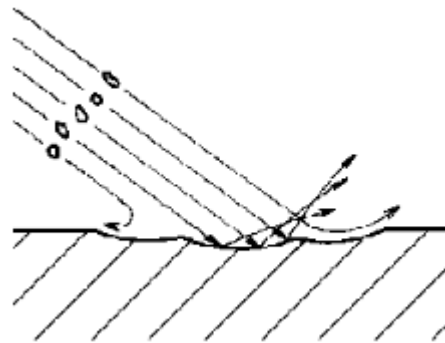
Při adhezivním opotřebení dochází ke dvěma případům. V prvním případě dochází jen k mírnému opotřebení. Tento případ nastane, když rychlost porušování oxidační a adsorpční vrstvy povrchu je menší než rychlost jejich obnovování. Při mírném opotřebení vrstvy oxidační i adsorpční působí, jako ochrana povrchů a brání tak vzniku adhezních spojů. Spoje se méně vyskytují a při dalším porušování nedochází k významnému přenosu materiálu mezi povrchy. Opotřebované plochy mají povrch lesklý, bez rýh a nejsou zde žádné stopy po zadírání. Na vzhledu adhezivního opotřebení má vliv přítomnost kvalitního a dobře zvoleného maziva mezi opotřebovanými povrchy. Pokud je zvolen vhodný materiál součástí, přítomno mazivo a dobrá kombinace ostatních faktorů opotřebení dochází u adhezivního opotřebení pouze k mikrodeformaci a vyhlazení mikrospojů. [13,14]

V druhém případě dochází ke vzniku adhezních mikrospojů, k jejich následnému rozrušování spojenému s přenosem materiálu mezi povrchy a ke vzniku ošetrových částic. Opotřebované plochy jsou rýhované a rozbrázděné. Částice, které zůstanou na površích materiálu jsou pouhým okem viditelné. V průběhu opotřebení dochází k růstu intenzity opotřebení a může vést až k úplnému zadření nebo poškození povrchů. Příčinou poškození či zadření často bývá špatné mazání. [14]

Erozivní opotřebení

Oddělování materiálu stykem částicemi unášenými proudem kapaliny nebo plynu. Mechanismus erozivního opotřebení je zobrazen na obr. 10. Opotřebení je složitý proces, který je ovlivňován mnoha faktory:

- podmínky dopadu částic – úhel a rychlost dopadu,
- vlastnosti unášeného media a částic – tvrdost, velikost, tvar a druh částic, rozložení částic v médiu, teplota, druh a teplota media),
- vlastnosti materiálu, který je opotřebován. [15]



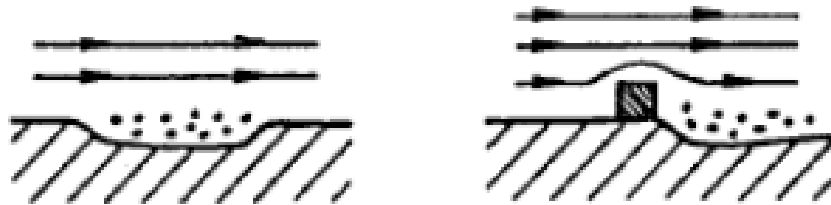
Obr. 10 Schéma erozivního opotřebení [14]

K porušení materiálu vlivem erozivního opotřebení dojde při opakovaných nárazech tvrdých částic s povrchem. Kinetická energie tvrdých částic se mění na deformační práci a na povrchu materiálu vzniká stopa po dopadu (nebo dojde k odloupení povrchové vrstvy). Opakované nárazy mají profil únavového zatěžování. [15]

Při dopadu částic na povrch s velkou hodnotou modulu pružnosti, jsou částice brzděny na krátké, nepatrné dráze a vznikající síly a teploty jsou velké. Vzniká tak větší opotřebení než u materiálu s nízkým modulem pružnosti, při kterém je opotřebení podstatně menší. Částice brzdí na dlouhé dráze a vznikající síly jsou malé. [14]

Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení je oddělování částic z povrchu materiálu, způsobeno zanikáním kavitačních dutin v kapalině. Kavitační opotřebení vzniká pouze na tom místě, kde se vyskytuje kavitace. Při kavitaci dochází k vzniku kavitačních dutin a při jejich zániku vznikají hydrodynamické rázy. Kavitační bubliny vznikají tam, kde dojde ke snížení tlaku pod hodnotu tlaku nasycených par v kapalině při dané teplotě. Při tomto procesu se v kapalině vytvoří dutiny, které jsou vyplněné parami kapaliny. Zánik dutin způsobí oblast vyššího tlaku, a tím dojde k poškození povrchu materiálu termodynamickými rázy. Schéma kavitačního opotřebení je zobrazeno na obr. 11.[13,14]



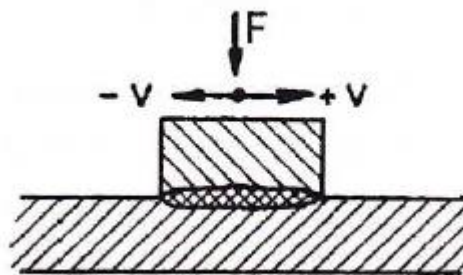
Obr. 11 Schéma kavitačního opotřebení [15]

Kavitační opotřebení má časový průběh rozdělen do tří částí. První částí je počáteční stádium, při kterém nedochází k měřitelnému úbytku materiálu, ale mohou vznikat mikrotrhliny. V druhé části stoupá rychlost opotřebení a dochází k oddělování částic materiálu. Při třetí části dojde k dosažení maximální rychlosti opotřebení a začíná klesat rychlost, která se ve čtvrté části ustálí na konstantní rychlost odpovídající pro dané podmínky. [15]

Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení bývá často nazýváno, jako vibrační koroze nebo třecí únava. Vibrační opotřebení vznikne následkem kmitavého pohybu o odlišné amplitudě, frekvenci nebo proměnlivém zatížení. Tento kmitavý vzájemný pohyb vyvolá deformaci nebo únavové napětí. Amplituda u vibračního opotřebení je omezená (max. 0,075 mm), pokud je amplituda větší vzniká opotřebení adhezivní. Hlavním znakem vibračního opotřebení je kombinace abraze, adheze a oxidace. Průběh je značně citlivý na prostředí, teplotu a reakční schopnosti.

Opotřebení probíhá stále v oxidačním prostředí. Oddělené drobné částice od povrchu opotřebeného materiálu vytváří přechod k abrazivnímu opotřebení. Třecí únavy je v silně oxidačním prostředí zrychlována a přechází na korozi třecí. Ke zrychlování třecí únavy dochází v silně oxidačním prostředí, vlivem lepšího oddělování oxidu. Závislost na teplotě souvisí se změnou kinetiky oxidace a s tloušťkou oxidů i jejich přilnavostí. Při vibračním opotřebení vznikají důlky a trhliny, které působí v dynamicky namáhaných materiálech, jako koncentrátoři a způsobují snížení meze únavy. Schéma vibračního opotřebení je zobrazeno na obr. 12. [14, 15]



Obr. 12 Princip vibračního opotřebení [15]

Únavové opotřebení

Opotřebení únavové je následek postupné kumulace poruch v povrchové vrstvě materiálů vzniklých při opakovaném působení kontaktních napětí (normálové a smykové síly). Pokud tato napětí dosahují nad hodnotu meze kluzu, jedná se o nízkocyklovou únavu. O vysokocyklovou únavu jde, pokud hodnota napětí je pod mezí kluzu. Intenzita, vznik a průběh poškození součásti je závislé na provozních podmínkách. Únavové opotřebení je zobrazeno na obr. 13. [14, 15]



Obr. 13 Schéma únavového opotřebení [15]

Opotřebení se projevuje při opakovaném styku dvou těles, kde může docházet k oddělování částic z povrchu materiálu a k následnému porušení geometrie tělesa. Nejvíce se opotřebení projevuje v místě dotyku zakřivených ploch, kde vzniká kontaktní únava nebo kontaktní únavové porušení. [15]

Při únavovém opotřebení nejprve vznikají trhliny v tenké povrchové vrstvě, které se postupně rozvíjejí a spojují a následně dojde k vylomení části materiálu. Často dochází k vytvoření důlku (okrouhlého, hranatého tvaru), na jejichž vzniku se podílí mazivo. Mazivo vlivem kontaktních tlaků vniká do povrchových trhlin, kde je postupně uzavíráno a jeho tlak je postupně zvyšován. Tento tlak napomáhá k dalšímu šíření trhlin. [14]

Analýza opotřebení

Analýza příčin opotřebení je velmi často složitou záležitostí, protože je ovlivněná nejrůznějšími vlivy a faktory, které jsou uvedeny u jednotlivých typů opotřebení. Jestliže se již při první analýze řešeného problému nepodaří správně analyzovat důvod a zdroj vzniku opotřebení, může tím být celá následující práce značně obtížná. Je proto velice důležité, aby základní metoda zkoumaného případu byla co nejvíce systematická a komplexní. Vhodná specializace a zkušenosti v oboru určitého pracovníka mohou být značným přínosem v usnadnění a urychlení řešeného problému, ať již při zkouškách, výrobě nebo provozu zařízení. [11]

Při analýze opotřebení je nutné věnovat pozornost těmto problémům:

- Vnitřní podmínky:
 - Vhodnost stroje k předpokládané funkci,
 - Vhodnost volby materiálu
 - Správnost technologie,
 - Výskyt vad, narušujících správnou funkci součásti.

- Vnější podmínky:
 - Prostředí, v němž stroj pracuje (teplota, vlhkost, chemické působení),
 - Pracovní medium (obsah částic, tvrdost, počet hmotnost),
 - Dynamické zatížení povrchu.

- Provozní podmínky:
 - Chyby obsluhy při provozu,
 - Soustavné nebo občasné překročení provozních podmínek. [11]

Na jednotlivých součástech je někdy velmi obtížné bez podrobné analýzy rozpoznat hlavní příčinu opotřebení. Cílem při volbě nejvhodnějšího materiálu je najít nejlepší poměr mezi náklady na údržbu a výrobu s ohledem životnost. [11]

3.2.2 Koroze polymeru, chemická odolnost

Korozí rozumíme postupné znehodnocování materiálu za působení okolního prostředí, nejčastěji ve stavu kapalném či plynném. Korozním prostředí může být nejen atmosféra, ale i půda, řeky či oceány. Odolnost plastů je především závislá na struktuře makromolekul. [9]

Plasty pro své velké použití často přichází do styku s různými chemikáliemi a ropnými produkty. Pokud dojde k působení těchto látek s polymery může dojít k absorpci chemické látky, která následně ovlivní fyzikální nebo chemické změny daného plastu. Nebo nejsou vyvolané žádné změny v polymeru a ani nedochází k absorpci chemické látky. Při chemické reakci dojde k trvalé změně vlastností určitého polymeru a k trvalému poškození polymeru. Při fyzikální změně polymer absorbuje chemikálii a způsobí bobtnání. Bobtnání může pokračovat až do doby kdy dojde k úplnému rozpuštění v chemikálii. [7,9]

Chemická odolnost polymerů může být ovlivněná především teplotou a koncentrací chemické látky, dobou působení, ale také podílem krystalické struktury. Ke korozi může dojít i při současném mechanickém namáhání. Důsledkem je vznik napět'ové trhliny i v prostředí ve kterém je plast bez napětí odolný. Tento jev nazýváme koroze při napětí. [7]

3.2.3 Otláčení

K otláčení dochází, pokud skutečný kontaktní tlak překročí mez kluzu materiálu. Otláčení je nevratná nežádoucí změna povrchu, která je způsobena vnějšími silami. Při otláčení dochází k působení kontaktního tlaku, který vyvolá tok materiálu z místa působení tlaku. Materiál neubývá a objem materiálu zůstává neměnný. Vznikají valy okolo místa působení kontaktního tlaku. Následkem je změna vůlí v daném spojení, které zapříčiní větší opotřebení materiálu nebo vznik lomů v důsledku rázů. [9,14]

3.2.4 Deformace

K deformaci dochází, pokud překročí napětí v některé části průřezu součásti mez kluzu materiálu. Deformace je nevratná nežádoucí změna geometrického tvaru součásti. Při deformaci záleží na vlastnostech materiálu, například u křehkých materiálu k deformaci dojde jen zřídka. Převážně vznikne lom, jelikož k překročení meze pevnosti začíná už u poměrně malých deformací. Napětí, které vede k deformaci materiálu může být způsobeno vnitřními či vnějšími silami. Vnější síly zpravidla vyvolávají torzní nebo ohybové momenty, vnitřní síly jsou nazývané zbytkové síly, v důsledku použitého výrobního postupu. [11,14]

3.2.5 Trhliny a lomy

Trhliny a lomy vznikají při působení vnitřních nebo vnějších sil, které v části nebo v celém průřezu součásti překročí mez pevnosti nebo mez únavy materiálu. Výskyt trhlin nebo lomů může dojít vlivem špatně zvoleného tvaru nebo rozměru, přetěžováním, špatnou či zanedbanou údržbou, změnou vlastností materiálu (únava materiálu, koroze, stárnutí) atd. [14]

Vlivem trhliny dojde k porušení homogenity materiálu v části průřezu. Trhliny jsou nejčastěji se vyskytujícím poškozením u součástí, způsobují netěsnost, snižují pevnost a vedou ke vzniku únavového lomu. [14]

Vlivem lomu dojde k porušení homogenity materiálu v celém průřezu. Dle mechanismu rozdělujeme lomy na statické a únavové. [14]

Statický lom vzniká, pokud dojde k překročení meze pevnosti materiálu v části jeho průřezu. Vzhled lomové plochy je závislý na způsobu namáhání a vlastnostech materiálu. Nejvíce se setkáváme s lomy, které vznikají při namáhání ohybem. Lomová plocha při namáhání ohybem je rovinná a kolmá na směr napětí. Povrch plochy lomu je závislý na velikosti zrn materiálu, může být jemnější nebo hrubší, zrnitý. Při namáhání v krutu získávají houževnatější materiály lomovou plochu šroubovitého průběhu a tvrdší materiály jehlicovitě roztříštěnou. Při kombinaci ohybu a krutu vznikají lomové plochy složitějších tvarů. [14]

Únavový lom vzniká, pokud dojde k překročení meze únavy materiálu. Při soustředění napětí v určitém místě povrchu, dojde k vytvoření tzv. zárodku trhliny. Zárodek se s proměnlivým zatížením postupně otevírá a zavírá a dochází k rozšíření do hloubky materiálu. Při otevírání a zavírání se vyhladí povrch materiálu. Postupným rozšiřováním únavového lomu se zmenšuje nosný průřez součásti a když okamžité napětí překročí mez pevnosti dojde k lomu statickému. Při únavovém lomu má plocha dvě části, které se od sebe vzhledově liší:

- Statickou
- Dynamickou [14]

3.2.6 Ostatní poškození

Mimo uvedené a nejčastěji se vyskytující druhy opotřebení dochází i k jiným méně zřetelným poškozením:

- Stárnutí materiálu,
- Tepelná degradace materiálu. [13]

Stárnutí polymerních materiálů

Při působení dlouhodobého vnějšího prostředí můžou polymery změnit své vlastnosti a dochází k stárnutí materiálu. Stárnutí materiálu se projevuje na ztrátě lesku, průhlednosti, povrchovým praskáním dílu nebo změně barvy polymerů, které je obvykle provázáno i poklesem mechanických vlastností. Nejdůležitějšími vlivy působící na stárnutí a degradaci

(nevratná změna struktury a vlastností) jsou teplota, voda, ozón, kyslík, světlo, atmosférické nečistoty a mikroorganismy. [7, 8, 9]

Vliv teploty

Teplota povrchu polymerů, která je vystavena slunečním paprskům může dosahovat vysokých hodnot (až 80 °C), avšak ani tato teplota k tepelné degradaci nepostačuje. Pouze urychlí chemické reakce. [7]

Vliv vody

Voda způsobí vymytí všech podílů polymeru, které se ve vodě rozpouští (včetně aditiv). U polymerů náchylných na navlhání může způsobit hydrolyzu (dělení makromolekul na části). Přítomnost vody způsobí změnu fyzikálních vlastností a změnu rozměrů polymerů. [7,9]

Vliv kyslíku

Při působení vzdušného kyslíku se polymery většinou nemění, ale pokud dojde ke kombinaci s dalšími vlivy, jako teplo světlo nebo mechanické zatížení, může dojít k oxidačním procesům. Tyto oxidační procesy mohou ovlivnit kvalitu polymerů. [7,9]

Vliv atmosférických nečistot

V atmosféře se vyskytují jak plynné, tak i tuhé nečistoty. Mezi tuhé nečistoty patří saze, písek, popílek a tyto nečistoty mohou poškozovat povrch polymerů mechanicky (obzvláště velmi účinné poškození nastane za větrných podmínek). Za plynné nečistoty lze považovat oxidy síry či dusíku a uhlovodíky, které snadno podlehnou hydrolyze a tím jsou pro polymery nebezpečné.

Zkoušení odolnosti polymerů proti povětrnosti může být hodnocena mnoha způsoby a podle různých hledisek. Některé metody jsou časově náročné např.: zkoušky přirozeného stárnutí polymeru v reálných podmínkách. Mezi další, ale rychlejší zkoušky, lze zařadit např.:

veterometry (napodobení přírodních podmínek teplo, světlo, vlhkost), xenotesty (simulace slunečního záření pomocí vzduchem chlazené výbojky). [7,9]

Vliv mikroorganismů

Běžně používané polymery jsou proti působení mikroorganismů, jako plísním, bakteriím i živočichům částečně odolné. Nejvíce napadány mohou být materiály přírodního původu nebo může dojít k porušení některých přísad polymerů. [7]

V současnosti je snahou vyvíjet takové polymery, které by se po svém upotřebení rozložily za pomoci speciálních organismů nebo působením UV zářením. Již byly vyvinuty speciální syntetické polymery u kterých dojde k porušení bakteriemi. Tyto polymery jsou uplatňovány především v obalovém průmyslu a jsou cenově velmi drahé. [7]

Vliv světla

Nejvýznamnější vliv na stárnutí polymeru má sluneční záření (ultrafialové záření). Ultrafialové záření je součástí světla slunečního. Při působení paprsků ultrafialového záření dojde k rozrušení vazby mezi dvěma atomy v řetězci. Rozpadají se makromolekuly a ty reagují se vzdušným kyslíkem, tento proces se nazývá fotooxidace. Oxidační reakce začnou na povrchu polymeru a postupně se dostávají do větší hloubky. Reakce způsobí značné změny chemické struktury polymerů, dojde k síťování, větvení makromolekul a materiál se stane méně pružný a křehčí. Při tepelném nebo mechanickém namáhání se objeví malé trhliny na povrchu polymeru, které následně způsobí destrukci (změna makromolekulárního řetězce, odštěpením nízkomolekulárních látek) polymeru. [7,9]

Pouze malé procento polymerů je odolné proti UV záření. Odolnost jednotlivých polymerů je uvedena na obr. 14. Běžně používané polymery a pryže nejsou odolné a při venkovní aplikaci je dobré chránit je proti UV paprskům. Jako ochrana se nejčastěji používají saze, které jsou tvořeny mikroskopickými částicemi uhlíku. Tyto částice působí proti propouštění UV paprsků dovnitř materiálu. Pro zabránění pronikání paprsků lze rovněž využít také různých chemických sloučenin. Sloučeniny mají schopnost přeměnit UV záření na energii nebo teplo, ale účinnost je nižší než u použití sazí. [7,9]

		PC/ABS	
		PPO	
		PET	
		PBT	
		PC	
	LCP	PA-12	POM
	PEI	PA-11	ABS
	PEEK	PA-6	PA-46
	PPS	PP	PA-66
PI			
excelentní	dobrá	nízká	špatná

Obr. 14 Odolnost plastů proti UV záření [7]

3.3 Vliv abrazivních částic na intenzitu abrazivního opotřebení

Poškození povrchu závisí na zatížení a především velikosti, tvaru, množství, pevnosti a tvrdosti abrazivních částic.

3.3.1 Vliv velikosti abrazivních částic

Vliv velikosti abrazivních částic na opotřebení materiálu je zřejmý. Při přítomnosti volných abrazivních částic mezi dvěma povrchy, dojde k abrazivnímu opotřebení pouze částicemi, které jsou větší než vůle mezi povrchy (popřípadě než tloušťka mazacího filmu). [17]

V praxi je velmi významná informace o kritické velikosti abrazivního zrna. Příčinou pokleku hodnoty abrazivního účinku je zmenšování velikosti abraziva pod kritickou hodnotu. Tohoto jevu se používá u řešení nežádoucích účinků abraziva, které vniká do maziva. [11, 17]

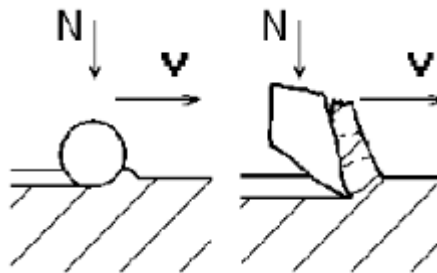
3.3.2 Vliv množství abrazivních částic

Vliv na intenzitu abrazivního opotřebení mezi dvěma povrchy má také množství abrazivních částic. Pokud je abrazivních částic mnoho, dojde k tzv. shlukování nebo vrstvení, které vede k abrazivnímu opotřebení i přes to, že většina částic má menší velikost, než je vůle mezi povrchy. Nastává větší pravděpodobnost výskytu velkého množství ostrých částic, který

je zřetelně nepříznivý z hlediska opotřebení abrazivního. Velké množství těchto částic opotřebovuje povrch součásti intenzivněji. [17]

3.3.3 Vliv tvaru abrazivních částic

Tvar abrazivních částic je výrazný při opotřebení. Jak je vidět na obr. 15 částice s ostrými hrany působí na opotřebovaný materiál mnohem intenzivněji, než částice s kulatým tvarem. Hloubka vnikání částice do povrchu součásti bude záležet na tvaru, ale i na síle která působí na částice v normálovém směru. [17]



Obr. 15 Vliv tvaru abrazivních částic na intenzitu opotřebení [17]

3.3.4 Vliv pevnosti abrazivních částic

Nízká pevnost částic způsobí jejich drcení a zároveň dochází k otupování částic při olamování hran. Avšak při rozdrcení částic dochází k tvorbě nových částic s ostrými hranami. Vznik nových ostrých částic a zmenšování, otupování na straně druhé na sebe působí protikladně. Při rostoucím zatížení abrazivní částice nedochází prakticky ke změně abrazivity částic. [17]

3.3.5 Vliv tvrdosti abrazivních částic

Vliv tvrdosti abrazivních částic je stejně důležitý, jako předešlé vlivy. Tvrdší abrazivní částice, než je tvrdost opotřebovaného povrchu materiálu, způsobí snazší pronikání abrazivních částic a opotřebení je intenzivnější. [17]

4. Zkoušky odolnosti materiálu proti opotřebení

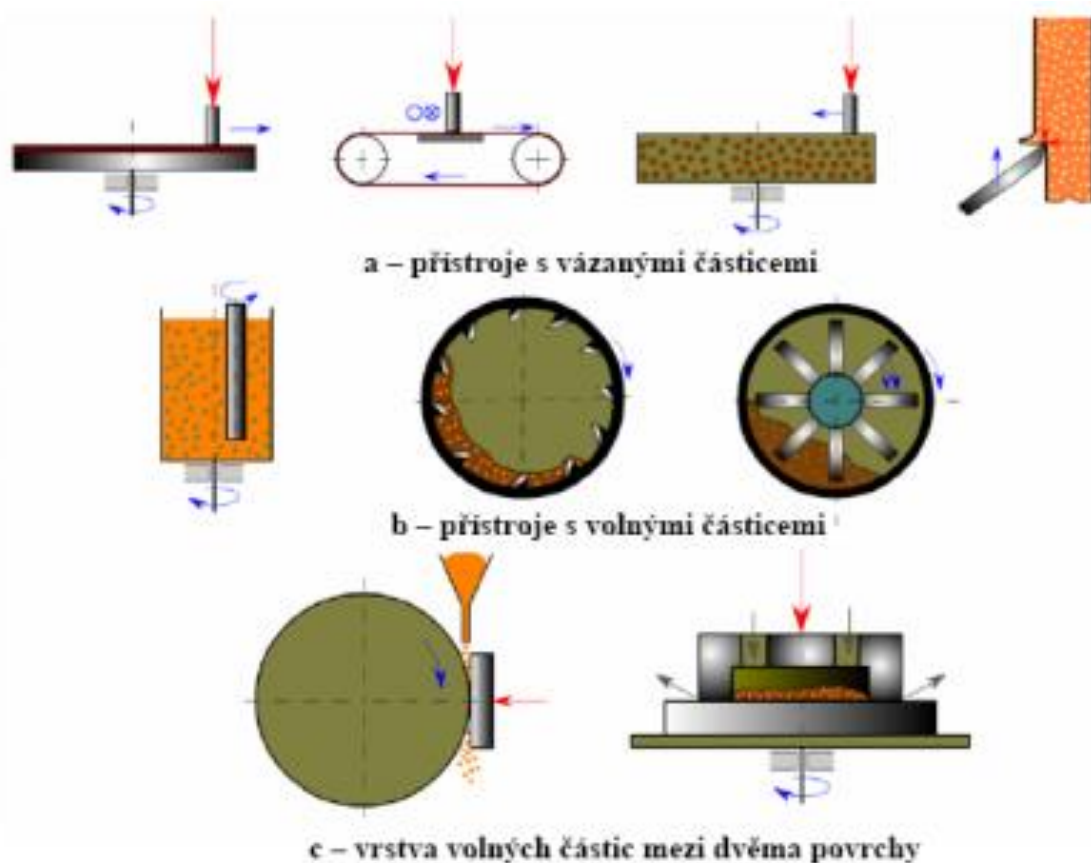
Zkoušky odolnosti proti opotřebení mají za úkol informovat o odolnosti materiálu vůči různým druhům opotřebení.

4.1 Zkoušky odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení

U laboratorních zkoušek je vždycky snaha o udržení konstantní intenzity opotřebení a zajistit co nejmenší rozptyl výsledků. Pro zkoušení odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení je celá řada. Ať už se jedná o laboratorní přístroje kluzné abraze bez rázového zatížení nebo přístroje zachycující procesy opotřebení při drcení materiálu. Laboratorní zkoušky odolnosti proti abrazivnímu opotřebení jsou relativně levné, umožňují v relativně krátké době vyzkoušet hodně různých materiálů. Při výběru zkušebního zařízení je nezbytné určit, jaký stav abraziva bude vhodný (volné nebo vázané částice), tvar, tvrdost, velikost abraziva, rychlost a směr relativního pohybu po dráze. [18]

Zkušební přístroje (obr.16) abrazivního opotřebení rozdělujeme podle podmínek v oblasti kontaktu povrchu materiálu s abrazivními částicemi:

- Přístroje s volnými částicemi,
- Přístroje s vázanými částicemi,
- Přístroje s vrstvou volných částic mezi stykovými povrchy. [11]



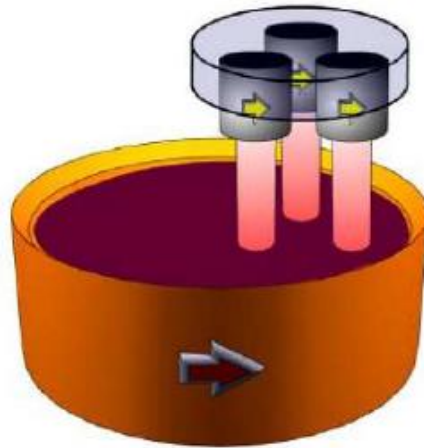
Obr. 16 Zkoušky odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení [18]

4.1.1 Přístroje s volnými částicemi

Používané metody zkoušení rozdělujeme na přístroje s brusnou nádobou, přístroje bubnové a přístroje s pryžovým kotoučem.

Přístroje s brusnou nádobou

Hlavní část přístroje tvoří brusná nádoba, uvnitř je nasypano abrazivo a umístěny zkušební vzorky (obr.17). Zkušební vzorky, které jsou uchyceny do rotujících hlavíc, se otáčejí kolem své osy a zároveň rotuje i nádoba s abrazivem. Vzájemný pohyb vzorku a abraziva způsobí opotřebení povrchu vzorků. [11,19]

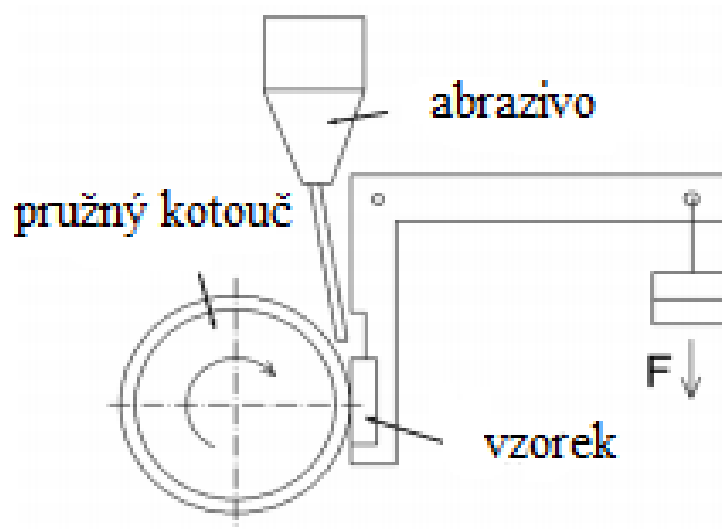


Obr. 17 Příklad přístroje s brusnou nádobou [19]

Výhoda zkoušky je použití různých druhů abrazivních částic a možností zkoušení materiálu i za zvýšených teplot. Nevýhodou je postupné klesání abrazivity volných částic způsobené otupováním a znečišťováním řezných hran. Postupné otupování lze vyřešit výměnou abrazivních částic. [11,19]

Přístroje s pružným kotoučem

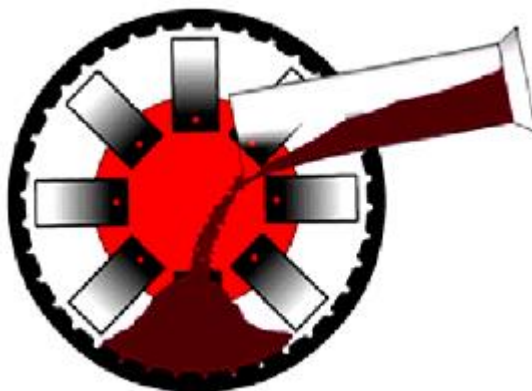
Přístroj s pružným kotoučem je metoda zkoušení, při kterém je abrazivum sypáno mezi zkoušený vzorek a pružný kotouč. Přístroj s pružným kotoučem je zobrazen na obr. 18. Při zkoušce dochází k zahřívání pryžového kotouče, na kterém více ulpívá abrazivum a tím se zvětšuje abrazivita. Se stoupající dobou zkoušky se snižuje měrné zatížení. [20, 21]



Obr. 18 Příklad přístroje s pružným kotoučem [21]

Bubnové přístroje

Konstrukčně jednoduché a velmi spolehlivé v provozu. Bubnové přístroje jsou používané hlavně pro jejich schopnost měřit několik vzorků v jedné fázi. Výhodou těchto přístrojů je použití různých druhů abrazivních částic, jako např. kamennou drť, písek, půdu. Schéma bubnového přístroje je zobrazeno na obr. 19. [19]



Obr. 19 Schéma bubnového přístroje [19]

4.1.2 Přístroje s vázanými částicemi

U zkušebních přístrojů s vázanými abrazivními částicemi mohou být částice ve formě brusného kotouče nebo plátna. Velkou výhodou je jednoduchost a spolehlivost těchto strojů a nevýhodou je proměnná jakost používaného brusného plátna. Přístroje s vázanými částicemi rozdělujeme podle pohybu na:

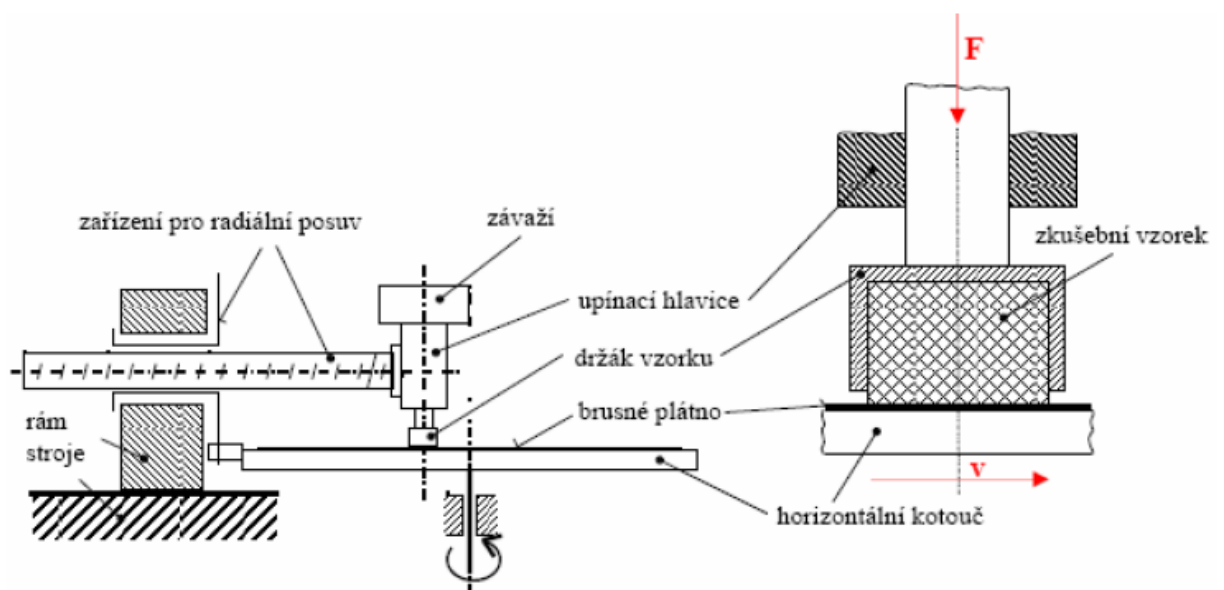
- Přístroje s rotačním pohybem,
- Přístroje s přímočarým vratným pohybem. [19,20]

Přístroj s brusným plátnem

Nejčastěji se využívá brusného plátna, na kterém jsou pevně fixované abrazivní částice. Tyto částice jsou mnohdy z korundu a k plátnu jsou připevněny pomocí lepidla. Značnou výhodou je možnost zkoušet materiály za vysokých teplot. Nevýhodou přístrojů s brusným plátnem je klesající abrazivita částic v průběhu zkoušek. Při opakování zkoušky na jednom

brusném plátně dochází k postupnému otupení a vylomení abraziva. Mimo jiné dochází i k znečištění plátna částicemi ořezu. [11, 19, 20]

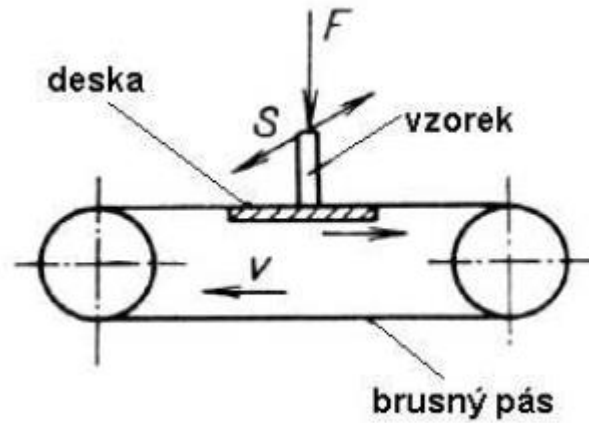
Na vodorovné desce je pevně upnuto brusné plátno, deska se otáčí kolem své osy konstantními otáčkami. Zkoušený vzorek je upnutý v hlavici ramene a přitlačován k plátnu silou vyvolanou závažím. Při zkoušce dochází k posuvu upnutého vzorku v hlavici od okraje brusného plátna do středu za pomoci zařízení vyvolující radiální posuv. Po ujetí určité dráhy je přístroj vypnut. Přístroj s brusným plátnem je znázorněn na obr. 20. [3, 11, 20, 23]



Obr. 20 Přístroj s brusným plátnem [22]

Přístroj s brusným pásem

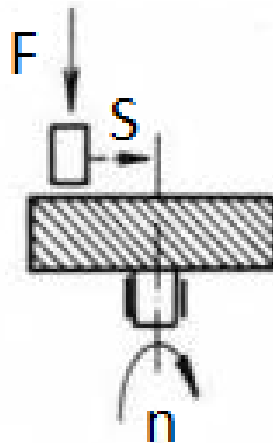
Přístroj s brusným pásem využívá přímočarý vratný pohyb. Nevýhodou, jako u všech zkoušek s vázaným abrazivem je klesající abrazivita způsobená postupným olupováním a otupováním zrn. Velkou výhodou přístroje je jednoduchost a spolehlivost. Schéma přístroje je zobrazeno na obr. 21. [11]



Obr. 21 Příklad přístroje s brusným pásem [11]

Přístroj s brusným kotoučem

Na brusném kotouči jsou pojivem připojena zrnka brusiva, na kterých ulpívají třísky z opotřebovaného materiálu. Předností přístrojů s brusným kotoučem je možnost zkoušet abrazivní opotřebení i za zvýšených teplot. Princip přístroje s brusným kotoučem je zobrazen na obr. 22. [11]



Obr. 22 Princip činnosti přístroje s brusným kotoučem [11]

4.1.3 Přístroje s vrstvou volných částic mezi stykovými povrchy

U přístroje s vrstvou volných částic mezi stykovými povrchy je velmi obtížné dosáhnout jeho rovnoměrnosti. Při odstraňování rozdrčených částic a dodávce nových částic dochází k mnoha potížím. [11]

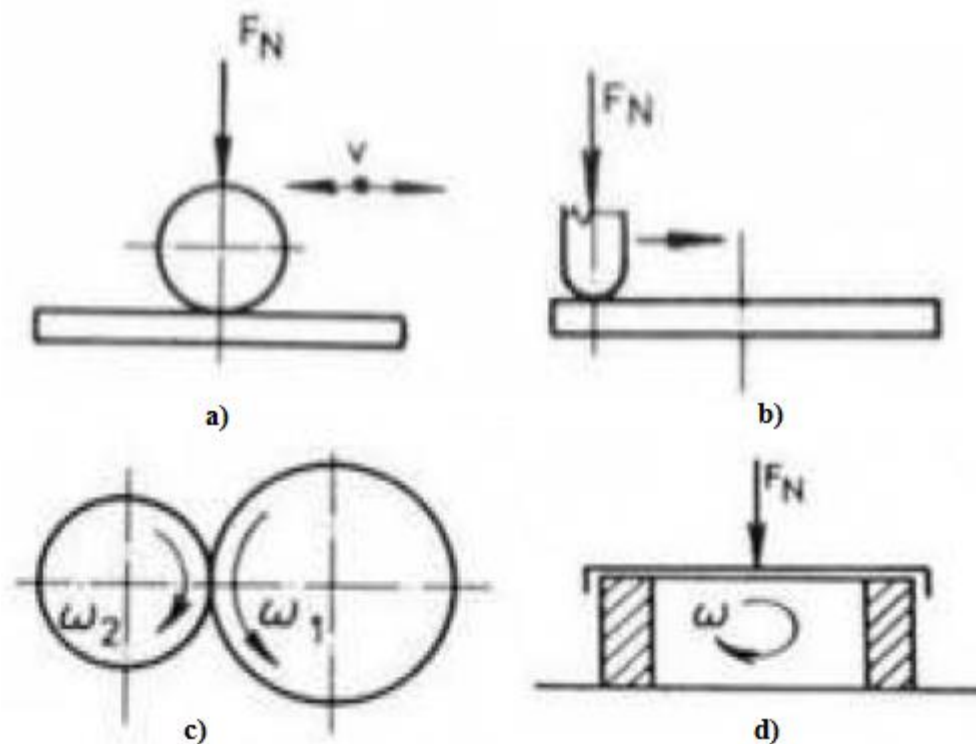
4.2 Zkoušky odolnosti proti adhezivnímu opotřebení

Přístroje pro zkoušení adhezivního opotřebení rozdělujeme dle dotyku třecího místa na bodový, čárový a plošný.

Zařízení pro zkoušení adhezivního opotřebení na bodovém přístroji je konstrukčně velmi jednoduché. Mají možnost dosáhnout vysokých kluzných rychlostí bez přítomnosti drahých pohonných systémů. Značnou nevýhodou je příprava zkušebních vzorků, které musejí mít kulový tvar nebo půlkulové zaoblení hrany. Další nevýhodou je pokles měrných tlaků na dotykové ploše při postupujícím opotřebení kulové plochy. [11]

Předností přístrojů s čárovým dotykem je jednoduchý tvar vzorků, umožňující snadnou a nenákladnou výrobu, krátkou dobu zkoušky a široké rozmezí zkušebních parametrů. Nevýhodou, jako u přístrojů s bodovým dotykem je pokles měrného tlaku v oblasti dotyku během zkoušky, následkem postupného opotřebení zkoušených vzorků. Zařízení s čárovým dotykem rozdělujeme na přístroje s kotoučkem, s kotoučkem a dvěma příložkami a dvěma kotoučky. [11]

Nejčastěji se pro hodnocení adhezivního opotřebení využívá přístroje s plošným dotykem. Výhodou těchto strojů je snadná výroba vzorků a možnost zkoušení za sucha i v kapalinách. Nevýhodou je složitá konstrukce, složitý pohonný systém a omezený rozsah zkušebních podmínek. Schéma vybraných přístrojů je uvedeno na obr. 23. [11]



Obr. 23 Schéma přístrojů s bodovým (a, b), čárovým (c), plošným (d) dotykem

4.3 Zkoušky odolnosti proti erozivnímu opotřebení

U zkoušek eroze rozdělujeme zkušební zařízení ke zkoušení odolnosti v proudu plynů a částic, kapalin a částic, v proudu plynu, kapalin, páry a kapek. Zkušební přístroje dále dělíme na tryskací přístroje, přístroje s oběhovou soustavou a přístroje s brusnou nádobou. [11]

U tryskacích přístrojů dochází k otryskání vzorků nejčastěji směsí kapaliny a částic, která cirkuluje v oběhovém systému. Výhodou u tohoto zkušebního zařízení je jednoduchá konstrukce, intenzivní vývoj eroze, který způsobí zkrácení doby zkoušky. V průběhu zkoušky dochází k opotřebení některých částí čerpadla a tím ke změně zkušebních podmínek. Za nevýhody se považuje postupné opotřebení abraziva, které se musí nahrazovat novými částicemi. [11,24]

Přístroje s brusnou nádobou jsou velmi podobné přístrojům pro zkoušení proti abrazivnímu opotřebení. Abrazivo je nahrazeno směsí kapaliny a částic. Výhodou je

spolehlivost a jednoduchost přístrojů. Nevýhod je celá řada, nedefinovatelný úhel nárazu, omezený rozsah zkušebních podmínek, neznáma rychlost dopadu částic na povrch vzorků. [11]

Přístroje s oběhovou soustavou jsou využívány jen zřídka, jsou drahé, prostorově rozměrné a časově náročné. [11]

4.4 Zkoušky odolnosti proti kavitačnímu opotřebení

K určení odolnosti materiálu proti kavitačnímu opotřebení slouží čtyři druhy přístrojů: rotační diskový přístroj, rotační nárazový přístroj, dýzový přístroj a magnetostrikční přístroj. [11]

U rotačních diskových přístrojů jsou vzorky umístěny na rotačním kruhovém disku, který se otáčí kolem osy horizontálním nebo vertikálním směrem. V rotačním disku jsou vyvrtané otvory pro průchod kapaliny. Při rotaci vznikají kavitační dutiny, které se vytvářejí v otvorech nebo blízko otvorů a zanikají hned za otvory na disku. Výhodou je možnost zkoušení materiálu v širokém rozmezí podmínek. Značným omezením je složitost přístroje a náročnost na obsluhu. [11, 24]

Rotační nárazové přístroje jsou velmi jednoduché a málo náročné na obsluhu zařízení. Vzorky upevněné na rotujících kotoučích jsou zkoušeny nárazem proudu kapalin, který tryská z vhodně umístěných trysek. [11, 24]

Dýzové přístroje využívají k měření kavitačního opotřebení poklesu tlaku ve zúžené části zkušebního kanálu. Přístroje jsou spíše vhodnější pro studium mechanismu kavitace. Nevýhodou je dlouhá doba zkoušky, způsobená nízkou intenzitou kavitace. [11, 24]

Díky své jednoduchosti se nejčastěji využívají přístroje magnetostrikční. U těchto strojů je relativní pohyb zkoušených vzorků vytvářen mechanicky, magneticky nebo elektricky. Ke kavitačnímu opotřebení vzorků dochází při implozi kavitačních bublin, vytvořených v oblasti sníženého tlaku na povrchu zkoušeného vzorku. [11, 24]

4.5 Zkoušky odolnosti proti vibračnímu zařízení

Zkoušet odolnost proti vibračnímu zařízení jde na přístrojích, které umožňují vzájemný kmitavý pohyb zkoušených vzorků. Vzorky se mohou dotýkat plošně, čárově nebo bodově. Na zařízeních lze měnit amplitudu a frekvenci kmitavého pohybu a také médium mezi stykovými plochy. U některých zařízeních lze zároveň s vibračním opotřebením zkoušet i únavové jevy. [11]

5. Experimentální zkoušky abrazivního opotřebení

Kapitola je věnována praktickému zkoušení odolnosti vybraných plastů proti abrazivnímu opotřebení.

5.1 Zkušební vzorky

Odolnost vůči abrazivnímu opotřebení byla zjišťována u pěti polymerních materiálu, kterými byly polyamid 6 (polykaproktam), polyamid 66 (polyhexamethylendiamindiapan), polyvinylchlorid, polyoxymethylen copolymer a polytetrafluorethylen. Všechny uvedené plasty patří do skupiny termoplastů. V tab.1 je pro každý použitý vzorek uvedeno několik obchodních názvů.

CHEMICKÝ NÁZEV	SYMBOL	PŘÍKLADY OBCHODNÍCH NÁZVŮ
POLYKAPROKTAM	PA 6	nylon, chemlon, silon
POLYHEXAMETHYLENDIAMINDIAPAN	PA 66	durethan, technyl, rilsan,
POLYVINYLCHLORID	PVC	slovinyl, vinidur, vestolit
POLYOXYMETHYLEN COPOLYMER	POM-C	ultraform, hostaform, delrin
POLYTETRAFLUORETHYLEN	PTFE	teflon, fluon, algoflon

Tab. 1 Polymery (příklady obchodních názvů)

Polyamid 6 (polykaproktam)

Charakteristika

Termoplastický materiál polyamid 6 bývá často označován obchodním názvem silon. Polyamid 6 je dobře obrobitelný materiál, který dobře snáší vysokou zátěž. Vyznačuje se vysokou pevností, tvrdostí, houževnatostí, vysokou odolností proti otěru a dobrými kluznými vlastnostmi. [25,26]

Použití

Pro svojí dobrou chemickou stálost a pro příznivé elektroizolační vlastnosti se polyamid 6 používá, jako univerzální materiál v oblasti strojírenství, hutnictví, elektrotechnického průmyslu, textilním průmyslu, dopravní techniky a také v potravinářském průmyslu. [25,26]



Obr. 24 Vzorek PA 6

Polyamid 66 (polyhexamethyldiamindiapan)

Charakteristika

Termoplastický materiál polyamid 66 je také obvykle nazýván nylon. Materiál se vyznačuje vyšší tuhostí, pevností a lepší odolností proti otěru než základní polyamid 6 a proto je jeho cena vyšší. Výhodou je vysoký bod tání, odolnost vůči stárnutí a klimatickým podmínkám. [25,26]

Použití

Polyamid 66 se nejčastěji používá pro výrobu vláken a folií, ozubených kol, třecích ložisek.



Obr. 25 Vzorek PA 66

Polyvinylchlorid

Charakteristika

Polyvinylchlorid je jedním z nejpoužívanějších plastů. PVC má řadu vhodných vlastností, jako tvrdost, odolnost vůči agresivním chemickým prostředím. Polyvinylchlorid je velmi špatně hořlavý. Nevýhodou je vysoká křehkost při nízkých teplotách. PVC je jeden z nejlépe prozkoumaných materiálů z hlediska vědeckých výzkumů. Při výrobě vzniká hodně nebezpečných toxických chemických látek (vinylchlorid, dioxin a kyselina chlorovodíková), které představují pro člověka určité zdravotní riziko. [25, 26]

Použití

PVC je hojně používaný materiál např.: části čerpadel a armatur, příruby, trubky pro kabely, rámy oken, střešní krytiny atd. [25,26]



Obr. 26 Vzorek PVC

Polyoxymethylen copolymer

Charakteristika

Polyoxymethylen je kvalitní konstrukční materiál. Vyznačuje se vysokou pevností, tuhostí, lepší odolností proti oděru a dobrou obrobiteľnosť. Pro jeho výhodné vlastnosti se používá nejvíce na přesné a tvarově složité strojírenské díly. POM-C má nízkou nasákavost a nižší tepelnou roztažnost. Jeho další vlastnosti jsou dobrá pružnost, odolnost proti tečení a není samozhášivý. [25,26]

Použití:

Využívá se pro výrobu ložisek, kluzných prvků, elektroizolačních prvků je vhodný i pro styk s potravinami. [26]



Obr. 27 Vzorek POM–C

Polytetrafluoretylen

Charakteristika

Polytetrafluorethylen je hojně používaný materiál, vyznačující se dobrými elektroizolačními vlastnostmi, vysokou odolností proti teplotě, vynikající chemickou odolností v agresivním prostředí, vysokou odolností proti stárnutí. Výhodou je nízký součinitel tření a téměř nulová nasákavost vody, odolává zásadám, kyselinám, rozpouštědlům i solím i za zvýšených teplot. Nevýhodou je velmi malá odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Velmi dobré vlastnosti umožňují použít PTFE všude tam, kde nemůžeme využít jiný plast. [25,26]

Použití

Používá se na lišty a vedení pro vysoké teploty, kluzná těsnění, pouzdra, kroužky, potrubí pro agresivní chemické potrubí, součásti potravinářských strojů a mnoho dalších. [26]



Obr. 28 Vzorek PTFE

Hustota polymeru

K vyhodnocení zkoušky všech uvedených materiálu bylo potřeba zjistit hustotu těchto materiálu. Zjištěné hustoty jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tab. 2.

Materiál	Hustota [g.cm⁻³]
PA 6	1,14
PA 66	1,14
PVC	1,38
POM-C	1,39
PTFE	2,16

Tab. 2 Hustota materiálů [3]

5.2 Příprava zkušebních vzorků

Pro samotnou zkoušku abrazivního opotřebení jednotlivých materiálu bylo potřeba nejdříve zajistit vzorky požadovaného průměru a délky. Průměr polymerních vzorků byl 10 mm a délka 70 mm.

5.3 Laboratorní zkouška

Zkouška odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení plastů ale i kovových materiálů a dřeva se zjišťuje na zařízeních které se podle kontaktu abraziva s povrchem materiálu rozdělují na přístroje s volnými částicemi, přístroje s vázanými částicemi a přístroje s vrstvou volných částic mezi stykovými povrchy.

Pro zkoušku abrazivního opotřebení byla zvolena zkouška na přístroji s vázanými částicemi. Je velmi důležité dohlížet na čistotu vzorků při vážení, v důsledku malých hmotnostních úbytku.

Velikost opotřebení byla hodnocena na základě změřených a vypočítaných hmotnostních úbytku a dopočítaných objemových, délkových úbytků a poměrného objemového opotřebení každého měřeného materiálu.

Výpočet hmotnostních úbytků

Hmotnostní úbytek se stanoví podle vztahu (1):

$$\Delta m = m_1 - m_2 \text{ [g]} \quad (1)$$

kde: m_1 – hmotnost vzorku [g],
 m_2 – hmotnost vzorku při i-tém měření [g].

Výpočet objemových úbytků

Objemové úbytky se stanoví z hmotnostních úbytků a hustoty daného materiálu podle vztahu (2):

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \text{ [cm}^3\text{]} \quad (2)$$

kde: Δm – hmotnostní úbytek [g],
 ρ – hustota vzorku [g/cm³].

Výpočet poměrného objemového opotřebení

Poměrná objemová odolnost proti abrazivnímu opotřebení byla stanovena podle vztahu (3):

$$\Psi = \frac{\frac{\Delta m_{et}}{\rho_{et}}}{\frac{\Delta m_{vz}}{\rho_{vz}}} \quad (3)$$

kde: Δm_{et} – hmotnostní úbytek etalonu [g],
 Δm_{vz} – hmotnostní úbytek vzorku [g],
 ρ_{et} – hustota etalonu [g/cm³],
 ρ_{vz} – hustota vzorku [g/cm³].

Výpočet délkových úbytků

Délkové úbytky se stanoví z objemových úbytků a průměru vzorku podle vztahu (4):

$$\Delta l = \frac{4V}{\pi d^2} \quad [\text{cm}] \quad (4)$$

kde: V – objemový úbytek [cm³],
 d – průměr vzorku [cm].

5.3.1 Použitá zařízení

Laboratorní zkouška abrazivního opotřebení na přístroji s vázaným abrazivem byla provedena podle normy (ČSN 01 5084).

Princip zkušebního přístroje s brusným plátnem

Přístroj s vázaným abrazivem (s brusným plátnem) je tvořen rovnoměrně otáčející se deskou, na kterou je pomocí svorek připevněno brusné plátno. Zkušební vzorek je připevněn v držáku a k brusnému plátnu přitlačován závažím. Rozměry jednotlivých zkušebních vzorků byly 10 x 70 mm. Technická data přístroje s brusným plátnem jsou uvedena v tab. 3.

Délka třecí dráhy	50 m
Průměr otáčející se desky s brusným plátnem	480 mm
Měrný tlak	0,1 MPa
Brusné plátno o zrnitosti	400, 240, 120, 60

Tab. 3 Technická data přístroje s brusným plátnem

Při samotné zkoušce se vodorovný kotouč s brusným plátnem otáčí kolem své osy a dochází k posuvu zkoušeného materiálu od okraje ke středu brusného plátna. Zkoušený vzorek ujede dráhu o délce 50–ti metrů a dojde k vypnutí stroje. Závaží a upínací zařízení se vrátí na okraj brusného plátna. Vzorky jsou po každé ujeté dráze 50–ti metrů vyndány z upínacího zařízení, řádně očištěny a zváženy na elektronických vahách. Na elektronických vahách je zvážena hmotnost o rozlišení 0,0001 g. U každého vzorku je provedeno 10 měření na stejném brusném plátně a vzorek celkově ujede dráhu o délce 500 metrů. Pro každý další vzorek je použito nové plátno. Přítlak zkoušených materiálu na brusné plátno byl 0,1 MPa. Zkušebního přístroje s brusným plátnem je zobrazen na obr. 20, 29, 30. [23, 27]



Obr. 29 Příklad s brusným plátnem



Obr. 30 Detail upínací hlavice se závažím

Laboratorní váhy

Pokaždé ujeté dráze 50–ti metrů byl vzorek zvážen. Pro vážení vzorků byla využita analytická digitální váha ABS 220-4 od firmy Kern. Digitální váha je zobrazena na obr. 31. [28]



Obr. 31 Analytická digitální váha [28]

5.3.2 Brusné plátno

Brusné plátno je složeno z brusiva, pojiva a podkladu, charakteristika brusného plátna použitého na zkoušku abrazivního opotřebení je uvedena v tab. 4. Brusné plátno je dodáváno v rolích různých délek. Ze kterých jsou následně odřezány kotouče o potřebném průměru.

Brusné zrno	korund
Pojivo	pryskyřice
Podklad brusného plátna	F-flexibilní
Struktura	Otevřená

Tab. 4 Charakteristika brusného plátna

Pro zkoušku abrazivního opotřebení jednotlivých plastů bylo použito brusného plátna o čtyřech různých zrnitostech P400, P240, P120, P60. Velikost zrn v mikrometrech je uvedena v tab. 5. Zrnitost brusiva označuje velikost brusných částic (zrn) značí se číslem, které odpovídá desetinně měrného rozměru částice (zrna) v mikrometrech. Zrnitost jednotlivých pláten je zobrazena na obr. 32. [29]

Označení brusného plátna	Velikost zrn v mikrometrech
P60	210 až 315
P120	100 až 125
P240	40 až 50
P400	22 až 32

Tab. 5 Velikost zrn brusného papíru [29]



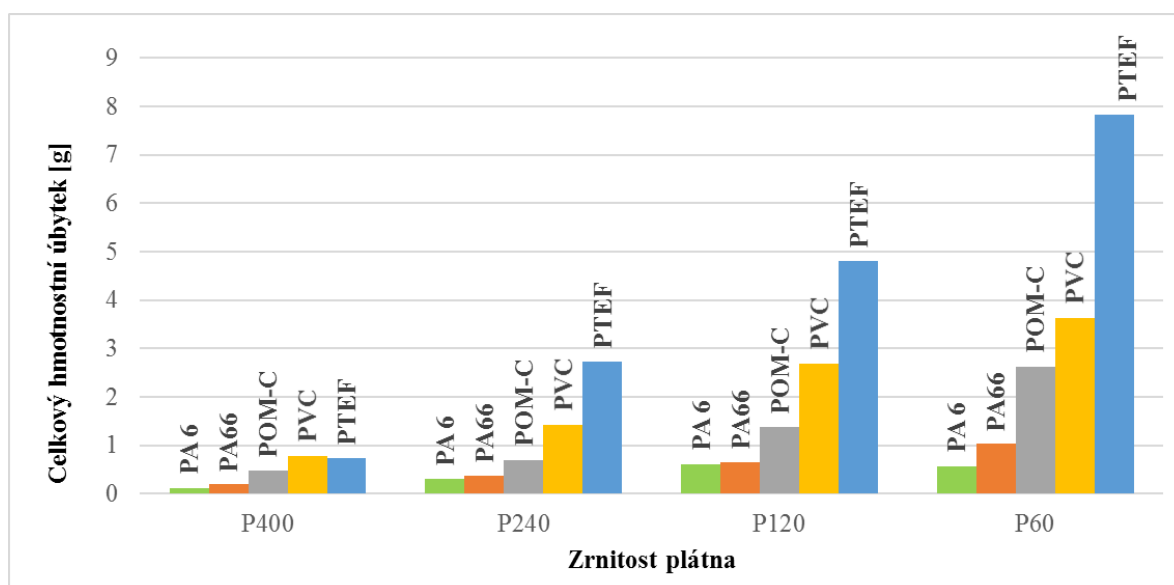
Obr. 32 Zrnitost jednotlivých pláten P400, P240, P120, P60

6. Výsledky práce a diskuse

V kapitole výsledky práce a diskuse bude uvedeno slovní a grafické vyhodnocení abrazivního opotřebení plastů.

6.1 Výsledky abrazivního opotřebení plastů

Celkové hmotnostní úbytky jednotlivých zkušebních vzorků plastů v průběhu zkoušky s přítlakem 0,1 MPa jsou uvedeny v tabulkách v příloze 1. Grafické znázornění celkových hmotnostních úbytků po ujetí 500 metrů jsou znázorněny v příloze 2. Na obr. 33 je pomocí sloupcových grafů znázorněn hmotnostní úbytek všech zkoušených vzorků po ujetí dráhy 500 metrů a pro jednotlivé zrnitosti brusných plátů.

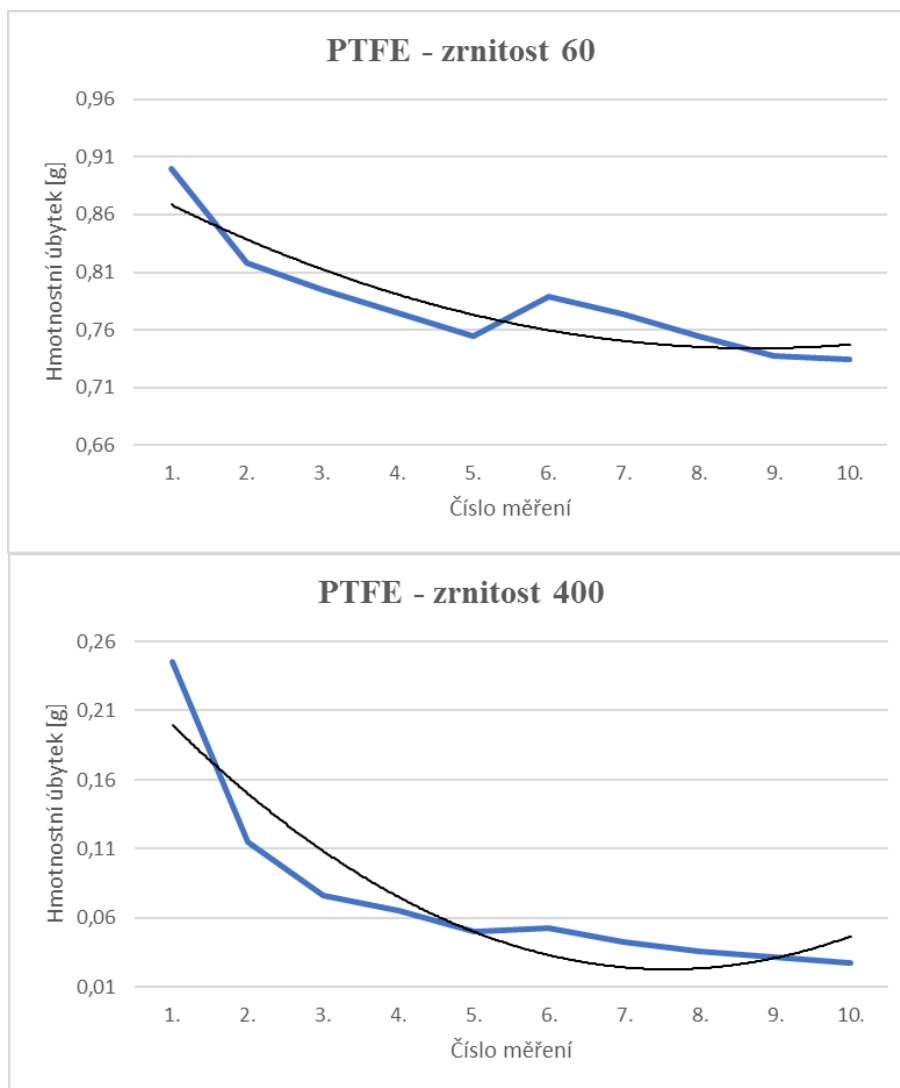


Obr. 33 Hmotnostní opotřebení jednotlivých materiálů na plátnech o zrnitosti P400, P240, P120, P60

Z grafu hmotnostního opotřebení jednotlivých materiálů při různé zrnitosti vyplývá, že největší hmotnostní opotřebení má zkušební vzorek PTFE ve všech případech, kromě brusného plátna o zrnitosti P400. Rozdíl celkového hmotnostního úbytku mezi PVC a PTFE není, tak velký jako v ostatních případech. Například při opotřebení o zrnitosti brusného plátna P60, dosahuje PTFE hodnoty hmotnostního úbytku 7,8301 g po ujetí dráhy o délce 500 metrů při zatížení tlakem 0,1 MPa. Naopak nejmenší hmotnostní úbytek dosahuje vzorek materiálu PA 6

a to u všech uvedených zrnitostech. Opotřebení PA 6 při zrnitosti brusného plátka P60 a zatížení 0,1 MPa, je pouze 0,5749 g.

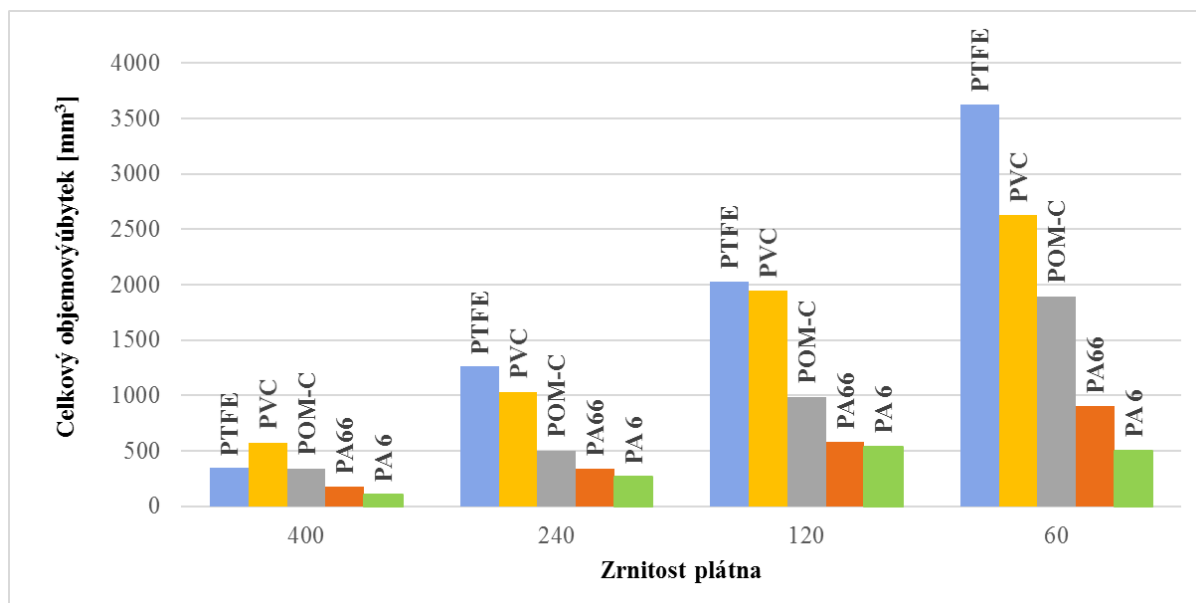
Na obr. 34 jsou zobrazeny hmotnostní úbytky nejvíce opotřebovaného materiálu (PTFE). Pro lepší rozlišení jsou uvedena plátka o zrnitosti P60 a P400.



Obr. 34 Hmotnostní úbytek PTFE při zrnitosti plátka P60 a P400

Z uvedeného obrázku je zřejmé, že se zvyšujícím počtem měření vzorků, dochází k menším hmotnostním úbytkům, které jsou způsobeny snižující se abrazivitou plátka. Ke snížení účinků abrazivity dochází při odlamování, otupování a vyloupávání abrazivních částic vázaných na plátně.

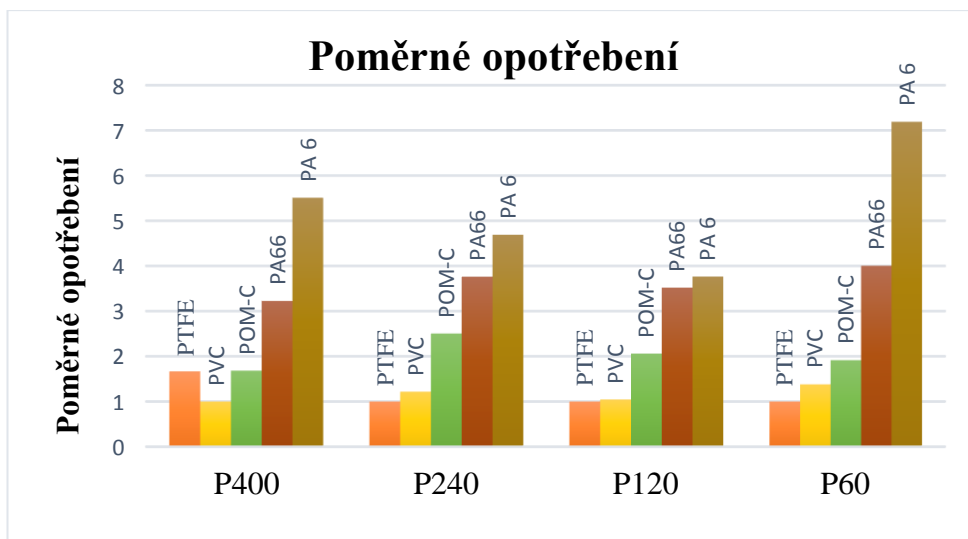
Objemový úbytek byl počítán na základě hmotnosti a hustotě jednotlivých materiálů při měrném zatížení 0,1 MPa. Objemové úbytky jsou tabulkově zobrazeny v příloze 3. Grafické znázornění celkových hmotnostních úbytků po ujetí 500 metrů jsou znázorněny v příloze 4. Na obr. 35 je pomocí sloupcových grafů znázorněn objemový úbytek všech zkoušených vzorků po ujetí dráhy 500 metrů a pro jednotlivé zrnitosti brusných plátén.



Obr. 35 Objemové opotřebení jednotlivých materiálů na plátnech o zrnitostech P400, P240, P120, P60

Z uvedeného grafu vyplývá, že největších objemových úbytku dosáhl materiál PTFE. Největší objemový úbytek tohoto materiálu je při zrnitosti brusného plátne P60 a to 3625 mm^3 . Naopak nejmenší objemový úbytek při zrnitosti brusného plátne P400 má materiál PA 6 a to pouhých $104,04 \text{ mm}^3$.

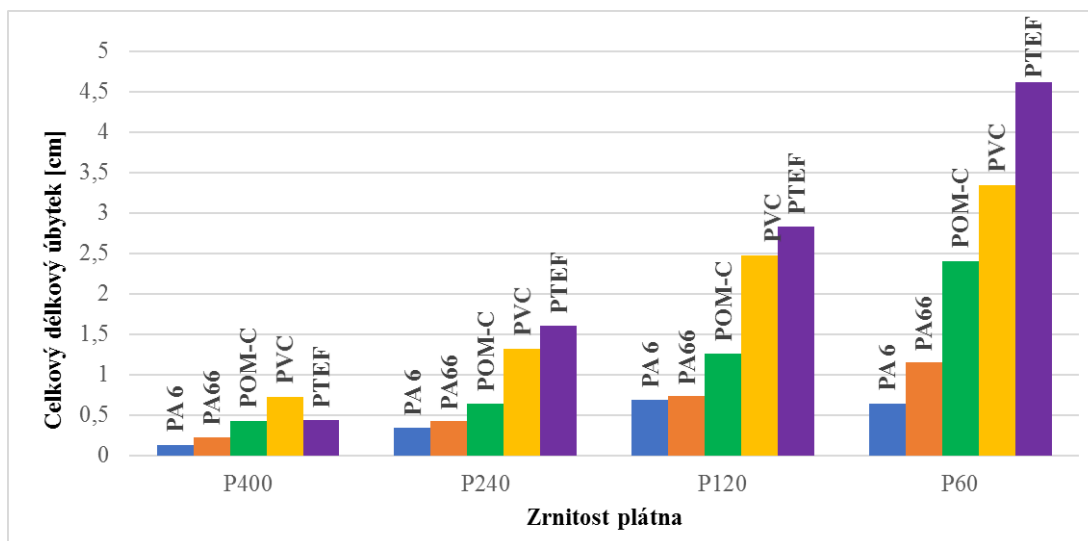
Na obr. 36 je znázorněno poměrné objemové opotřebení vzorků proti abrazivnímu opotřebení, které je vypočítáno až po ujetí dráhy 500 m na brusném plátně s přítlakem 0,1 MPa. Při zrnitosti P400 byly výpočty vztaženy k porovnávacímu vzorku PVC, jelikož materiál vykazuje větší opotřebení než ostatní zkoušené materiály. Při zrnitostech P240, P120, P60 byl, jako etalon zvolen PTFE. Tabulkově zobrazení poměrného upotřebení je zobrazeno v příloze 5.



Obr. 36 Poměrné opotřebení vůči vzorkům PVC (při P400) a PTFE (při P240, P120, P60) na brusném plátně

Z výsledku je patrné, že materiál PA s nejmenším úbytkem má 5,51krát menší opotřebení než PVC, při zrnitosti brusného plátna P400. U zrnitosti P60 má nejmenší úbytek opět materiál PA 6, a to znamená 7,18krát menší opotřebení než u PTFE.

Na (obr.37) jsou zobrazeny celkové délkové úbytky jednotlivých vzorků plastů. Délkové úbytky byly počítány na základě objemových úbytků. Tabulky délkových úbytků jsou zobrazeny v příloze 6. Grafické znázornění délkových úbytků po ujetí 500 metrů jsou znázorněny v příloze 7.



Obr. 37 Délkové opotřebení jednotlivých materiálů na plátnech o zrnitostech P400, P240, P120, P60

Při zrnitosti brusného plátna P60 největšího délkového úbytku dosáhl materiál PTFE a to 4,616 cm, naopak nejmenšího délkového úbytku 0,642 cm materiál PA 6. U brusného plátna zrnitosti P400 má největší délkový úbytek materiál PVC 0,730 cm a nejmenší PA 6 a to 0,132 cm.

6.2 Technicko–ekonomické zhodnocení

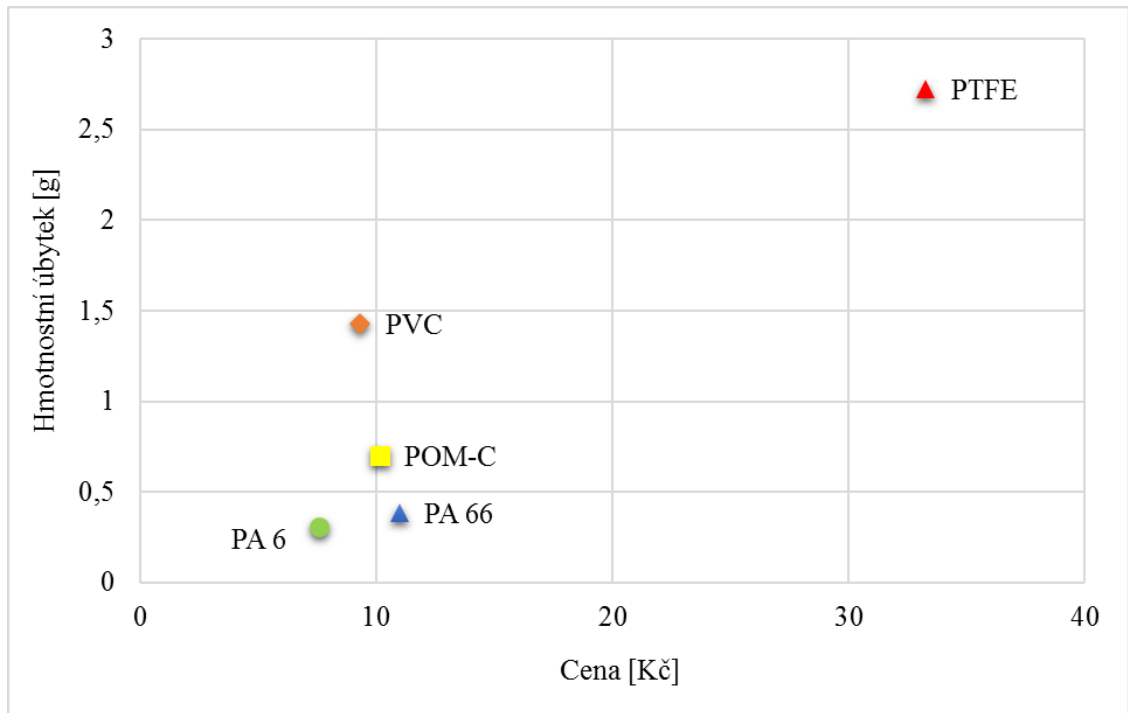
V této kapitole diplomové práce je ekonomické zhodnocení zkoumaných plastů.

Ekonomicko-technické zhodnocení složí k porovnání výhodnosti a následující volbě konkrétního materiálu. Zhodnocení je založeno na porovnání cen daných materiálů s jejich hmotnostním úbytkem. Jednotlivé ceny materiálu jsou ovlivněny ekonomickými vlivy, a to především silou české měny. Cena materiálu je závislá na počtu zakoupených kusů či na množství materiálu. Proto nemůžeme ani jednu z uváděných cen považovat za naprosto objektivní.

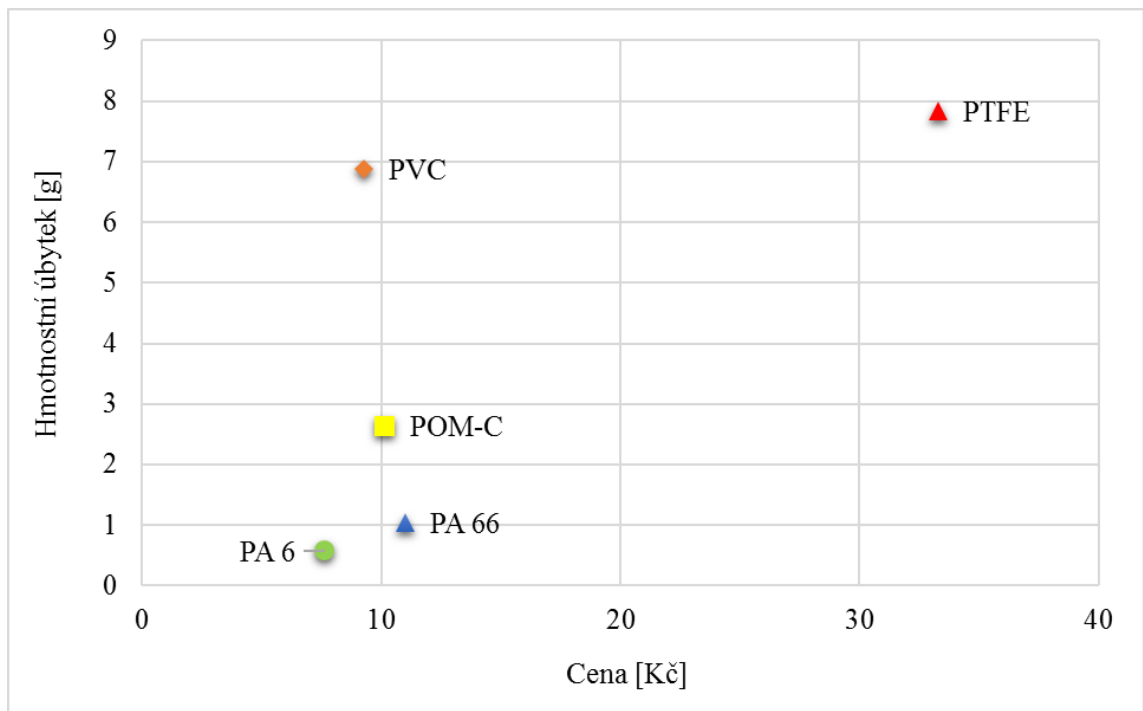
V tab. 6 jsou uvedeny celkové hmotnostní úbytky a ceny jednotlivých plastů při zrnitosti 240 a 400, které jsou použity pro vyhodnocení technicko-ekonomického zhodnocení. Uvedené ceny jsou orientační a vycházejí z telefonické poptávky od výrobců. Na obr. 38 a 39 je zobrazena závislost hmotnostních úbytků na ceně zkoušených plastů.

Materiál	Hmotnostní úbytek [g] Při P240	Hmotnostní úbytek [g] při P60	Cena [Kč]
PA 6	0,3061	0,5749	7,62
PA 66	0,3817	1,0323	11,01
POM-C	0,6994	2,6312	10,16
PVC	1,428	6,8749	9,32
PTFE	2,7208	7,8301	33,3

Tab. 6 Hmotnostní úbytky a jednotlivé ceny plastů při zrnitosti 240 a 60 [3]



Obr. 38 Vztah mezi hmotnostními úbytky a cenou materiálu při zrnitosti P240



Obr. 39 Vztah mezi hmotnostními úbytky a cenou materiálu při zrnitosti P60

Z uvedených grafů vyplývá, že materiály nacházející se v levém rohu dole (PA 6, PA 66 a POM-C) jsou ekonomicky ale i technicky výhodné. Dosahují malých hmotnostních úbytků a dobře odolávají opotřebení a dají se sehnat za velmi příznivé ceny. Materiál PA 6 ze všech

uvedených plastů má nejmenší hmotnostní opotřebení při zrnitosti 60 pouhých 0,5749 g a tento polyamid 6 o průměru 10 mm a délce 70 mm stojí okolo 8,- Kč za kus.

Naopak materiál PVC nabývá velkých hmotnostních úbytků při abrazivním opotřebení a to 6,8749 g po 10-ti měřeních. I přesto že cena PVC je 9,32,- Kč, je tento materiál spíše nevhodný. Materiál PTFE není vhodný při abrazivních podmínkách, hmotnostní úbytek je největší a cena je velmi vysoká.

7. Závěr

Opotřebení je trvale nežádoucí změna povrchu materiálu a právě opotřebení je jednou z příčin omezující životnost, spolehlivost zařízení a strojů. Zhoršení funkce zařízení a strojů může vést k jeho úplnému porušení nebo předčasnému vyřazení.

V teoretické části se diplomová práce věnuje základním informacím o plastech, které zahrnují vlastnosti a rozdělení. Práce je zaměřena na podstatu opotřebení a odolnost proti opotřebení. Dále jsou uvedeny druhy jednotlivých opotřebení a zkoušky odolnosti materiálu proti opotřebení. Výrazně je věnováno intenzitě abrazivního opotřebení, která je způsobena velikostí, množstvím, tvarem, pevností a tvrdostí abrazivních částic.

Náplní diplomové práce bylo vyhodnocení velikosti abrazivního opotřebení u pěti vybraných vzorků polymerů. Jako vzorky byly použity tyto materiály: polyamid 6 (polykaproktam), polyamid 66 (polyhexamethylendiapan), polyvinylchlorid, polyoxymethylen copolymer a polytetrafluorethyle. Laboratorní zkouška abrazivního opotřebení se uskutečnila pomocí přístroje s vázanými částicemi na zkušebním přístroji s brusným plátnem. Zkouška byla provedena na brusných plátnech o různé zrnitosti P400, P240, P120, P60. Při každém měření ujel vzorek stanovenou dráhu 50 metrů, poté byl vzorek očištěn a zvážen na laboratorních vahách. Velikost opotřebení byla vyhodnocena na základě hmotnostních, objemových a délkových úbytků.

Ze zkoušky abrazivního opotřebení na zkušebním přístroji s brusným plátnem byly zjištěny tyto výsledky. Největší hmotnostní, objemový a délkový úbytek vykazuje materiál PVC, a to pouze při nejmenší zrnitosti brusného plátna P400, následují materiály PTFE, POM-C, PA 66. Nejmenších úbytků při zrnitosti P400 dosahuje PA 6. Naopak u ostatních zrnitostí P240, P120 a P60 měl největší opotřebení materiál PTFE následoval PVC, POM-C, PA 66 a nejnižší opotřebení měl PA 6. U brusných papírů je zřejmé, že s většími abrazivními částicemi dojde k výraznějšímu opotřebení plastů.

K porovnání výhodnosti a následující volbě materiálu je uvedeno technicko-ekonomické zhodnocení, ze kterého vyšel nejlépe materiál PA 6, který má nejmenší hmotnostní opotřebení a nejnižší cenu ze všech zkoušených materiálů. Naopak PTFE má ze všech materiálů nejvyšší abrazivní opotřebení a vysokou cenu.

8. Seznam literatury

- [1] DILLINGER, J. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Vyd. 1. Praha: Europa Sobotáles, 2007, 608 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [2] Výroba pryže a plastů. *Vítej na zemi* [online]. 2013 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: http://vitejenazemi.cz/cenia/index.php?p=vyroba_pryze_a_plastu&site=spotreba
- [3] NOVÁKOVA, A., BROŽEK, M. *Selected plastics wear resistance*. In: 13th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Latvia University of Agriculture 2014. 29-30 May. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 187-193
- [4] Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. *Technologie II* [online]. 2016 [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [5] LOYDA, M. *Svařování termoplastů*. 2., dopl. a rozš. vyd. Praha: UNO Praha, 2011, 530 s. ISBN 978-80-904949-0-9
- [6] FISCHER, U. *Základy strojírenství*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2004, 290 s. ISBN 80-86706-09-5.
- [7] BĚHÁLEK, L.. *Polymery. Svitavy*. Elektronická učebnice, 2014. ISBN 978-80-88058-68-7
- [8] ASKELAND, Donald R; FULAY, Pradeep P; WRIGHT, Wendelin J. *Science and engineering of materials*. 6th ed. Toronto: Thomson, 2010. 863 s. ISBN 05-345-5396-6.
- [9] PLUHAŘ, J. aj. *Nauka o materiálech*. Praha: Nakladatelství technické literatury; Alfa, 1989, 552 s.
- [10] TUL V LIBERCI. *Tribologie* [online]. 2016 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf

- [11] VOCEL, M. DUFEK, V. aj. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha, STNL 1976. 376 s.
- [12] BRENDEL, H. aj. *Tribotechnika*, SNTL Praha, Praha, 1978, 297 s.
- [13] RABINOWICZ, E. *Friction and wear of materials*. 2nd ed. New York: Wiley, c1995, xv, 315 p. ISBN 04-718-3084-4.
- [14] POŠTA, J. VESELÝ, P. DVOŘÁK, M. *Degradace strojních součástí*. ISBN 80-213-0967-9. [Monografie]. Praha, ČZU, 2002, 67 s., ISBN 80-213-0967-9
- [15] KRAUS, V. *Tepelné zpracování a slinování*. Katedra materiálu a strojírenské metalurgie [online]. 2006 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z:
[http://tzs.kmm.zcu.cz/POUcelk.pdf?file:///C:/Users/okayokay/Downloads/zaverecna_prace%20\(7\).pdf](http://tzs.kmm.zcu.cz/POUcelk.pdf?file:///C:/Users/okayokay/Downloads/zaverecna_prace%20(7).pdf)
- [16] BLAŠKOVÍČ, P. BALLA, J. DZIMKO, M. *Tribológia*. Bratislava, ALFA 1990. 360 s.
- [17] Abrazivní opotřebení. *Údržba a opravy* [online]. 2012 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z:
http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3596&typ=html
- [18] SUCHÁNEK J., KUKLÍK V., ZDRAVECKÁ E., 2007: *Abrazivní opotřebení materiálu*. ČVUT, Praha, 162 s.
- [19] BŘEZINA, J. *The laboratory tests of abrasion* [online]. 2009 [cit. 2017-03-013]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/11574947-The-laboratory-tests-of-abrasion-laboratorni-zkousky-abrazivniho-opotrebeni.html>
- [20] VOCEL, M. aj. *Vybrané metody pro hodnocení opotřebení materiálu*. Praha: , 1987.
- [21] CHOTĚBORSKÝ, R. *Effect of heat treatment on the microstructure, hardness and abrasive wear resistance of high chromium hardfacing*. 2012, 59 (1), 23–28.

- [22] DOUBEK, P. *Abrazivní a erozivní opotřebení*. Brno, 2010. Diplomova práce. Mendelova univerzita v Brně. Agronomická fakulta. Vedoucí práce Josef FILIPEK.
- [23] BROŽEK, M.: *Selected plastics wear resistance to bonded abrasive particles compared to some ferrous materials*. Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun. 2015, 63 (2), 387–393. ISSN 1211-8516; doi: 10.11118/actaun201563020387
- [24] IŽDINSKÁ, Z. *MatNet virtuální inštitut: Výskumno-vývojová a inovačná sieť pre oblasť materiálov a technológií*. Strojnícka fakulta STU, Katedra materiálov a technológií. [online]. 2006 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=522>
- [25] MLEZIVA, J. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [26] Technické plasty. *Techplasty* [online]. 2014 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.techplasty.sk/material/polyamid/pa6-extrudovany-polyamid>
- [27] ČSN 01 5084. *Stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazivnímu opotřebení na brusném plátně: Československá státní norma*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1973.
- [28] Analytická digitální váha. *Servis a prodej vah* [online]. 2004-2006 [cit. 2017-03-08]. Obrázek ve formátu PNG. Dostupné z: <http://mujweb.cz/p.drahozal/digitalni-vahy/analyticke/analyticka-kern-abs-220-4.htm>
- [29] Tabulka velikosti brusných zrn dle ČSN a ISO. *Prodejbrusiva.cz* [online]. 2014 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://www.prodejbrusiva.cz/tabulka-velikosti-brusnych-zrn-dle-csn-a-iso>

9. Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení konstrukčních materiálů [1].....	3
Obr. 2 Příklady použití plastů [4]	4
Obr. 3 Rozdělení polymerů [7]	6
Obr. 4 Vazby v tribologickém systému [9].....	9
Obr. 5 Smykové tření [11]	10
Obr. 6 Valivé tření [11].....	11
Obr. 7 Schéma oddělování částic a) v podobě třísky, b) tvorba nárůstku, c) tvorba valu [15]	13
Obr. 8 Opotřebení abrazivní s volnými částicemi a) interakce dvou těles, b) interakce tří těles [16].....	13
Obr. 9 Schéma mechanismu adhezivního opotřebení [14]	14
Obr. 10 Schéma erozivního opotřebení [14].....	15
Obr. 11 Schéma kavitačního opotřebení [15]	16
Obr. 12 Princip vibračního opotřebení [15].....	17
Obr. 13 Schéma únavového opotřebení [15]	17
Obr. 14 Odolnost plastů proti UV záření [7]	24
Obr. 15 Vliv tvaru abrazivních částic na intenzitu opotřebení [17].....	25
Obr. 16 Zkoušky odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení [18].....	27
Obr. 17 Přístroj s brusnou nádobou [19].....	28
Obr. 18 Přístroj s pružným kotoučem [21]	28
Obr. 19 Schéma bubnového přístroje [19].....	29
Obr. 20 Přístroj s brusným plátnem [22]	30
Obr. 21 Přístroj s brusným pásem [11]	31
Obr. 22 Princip činnosti přístroje s brusným kotoučem [11].....	31
Obr. 23 Schéma přístrojů s bodovým (a, b), čárovým (c), plošným (d) dotykem	33
Obr. 24 Vzorek PA 6	37
Obr. 25 Vzorek PA 66	38
Obr. 26 Vzorek PVC.....	39
Obr. 27 Vzorek POM–C	40
Obr. 28 Vzorek PTFE	41
Obr. 29 Přístroj s brusným plátnem	45
Obr. 30 Detail upínací hlavice se závažím	45
Obr. 31 Analytická digitální váha [28]	46

Obr. 32 Zrnitost jednotlivých pláten P400, P240, P120, P60	47
Obr. 33 Hmotnostní opotřebení jednotlivých materiálů na plátnech o zrnitosti P400, P240, P120, P60	48
Obr. 34 Hmotnostní úbytek PTFE při zrnitosti plátna P60 a P400.....	49
Obr. 35 Objemové opotřebení jednotlivých materiálů na plátnech o zrnitostech P400, P240, P120, P60	50
Obr. 36 Poměrné opotřebení vůči vzorkům PVC (při P400) a PTFE (při P240, P120, P60) na brusném plátně	51
Obr. 37 Délkové opotřebení jednotlivých materiálů na plátnech o zrnitostech P400, P240, P120, P60	51
Obr. 38 Vztah mezi hmotnostními úbytky a cenou materiálu při zrnitosti P240	54
Obr. 39 Vztah mezi hmotnostními úbytky a cenou materiálu při zrnitosti P60	54

10. Seznam tabulek

Tab. 1 Polymery (příklady obchodních názvů)	36
Tab. 2 Hustota materiálů [3]	41
Tab. 3 Technická data přístroje s brusným plátnem	44
Tab. 4 Charakteristika brusného plátna	46
Tab. 5 Velikost zrn brusného papíru [29]	47
Tab. 6 Hmotnostní úbytky a jednotlivé ceny plastů při zrnitosti 240 a 60 [3]	53

11. Seznam příloh

Příloha 1 – Hodnoty hmotnostního úbytku vzorků se zatížením 0,1 MPa

Příloha 2 – Grafické znázornění hmotnostního úbytku vzorků se zatížením 0,1 MPa

Příloha 3 – Hodnoty objemových úbytku vzorků se zatížením 0,1 MPa

Příloha 4 – Grafické znázornění objemových úbytků se zatížením 0,1 MPa

Příloha 5 – Poměrné objemové opotřebení zkoušených materiálů

Příloha 6 – Hodnoty délkových úbytku vzorku se zatížením 0,1 MPa

Příloha 7 – Grafické znázornění délkových úbytků se zatížením 0,1 MPa

Hodnoty hmotnostních úbytků při zatížení 0,1 MPa

PA 6					
Zrnitost plátna		400		240	
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]
1.	50	0,0238	0,0238	0,055	0,055
2.	100	0,0137	0,0375	0,0396	0,0946
3.	150	0,0128	0,0503	0,0362	0,1308
4.	200	0,0123	0,0626	0,0321	0,1629
5.	250	0,0108	0,0734	0,0301	0,193
6.	300	0,0121	0,0855	0,0272	0,2202
7.	350	0,0099	0,0954	0,0235	0,2437
8.	400	0,0078	0,1032	0,0224	0,2661
9.	450	0,0079	0,1111	0,0206	0,2867
10.	500	0,0075	0,1186	0,0194	0,3061

PA 6					
Zrnitost plátna		120		60	
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]
1.	50	0,0744	0,0744	0,0638	0,0638
2.	100	0,0619	0,1363	0,0591	0,1229
3.	150	0,0622	0,1985	0,0574	0,1803
4.	200	0,0609	0,2594	0,0553	0,2356
5.	250	0,0595	0,3189	0,057	0,2926
6.	300	0,0679	0,3868	0,0577	0,3503
7.	350	0,0575	0,4443	0,0547	0,405
8.	400	0,0567	0,501	0,0564	0,4614
9.	450	0,0559	0,5569	0,0571	0,5185
10.	500	0,0584	0,6153	0,0564	0,5749

Hodnoty hmotnostních úbytků při zatížení 0,1 MPa

PA 66					
Zrnitost plátna		400		240	
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]
1.	50	0,046	0,046	0,0821	0,0821
2.	100	0,0254	0,0714	0,0504	0,1325
3.	150	0,0287	0,1001	0,0399	0,1724
4.	200	0,0187	0,1188	0,0393	0,2117
5.	250	0,0155	0,1343	0,0325	0,2442
6.	300	0,0155	0,1498	0,0303	0,2745
7.	350	0,0137	0,1635	0,0302	0,3047
8.	400	0,0137	0,1772	0,0265	0,3312
9.	450	0,0138	0,191	0,027	0,3582
10.	500	0,0116	0,2026	0,0235	0,3817

PA 66					
Zrnitost plátna		120		60	
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]
1.	50	0,1076	0,1076	0,1162	0,1162
2.	100	0,0811	0,1887	0,1101	0,2263
3.	150	0,0761	0,2648	0,1071	0,3334
4.	200	0,066	0,3308	0,1035	0,4369
5.	250	0,0571	0,3879	0,0999	0,5368
6.	300	0,0509	0,4388	0,0986	0,6354
7.	350	0,0471	0,4859	0,103	0,7384
8.	400	0,0718	0,5577	0,0964	0,8348
9.	450	0,0522	0,6099	0,0986	0,9334
10.	500	0,0482	0,6581	0,0989	1,0323

Hodnoty hmotnostních úbytků při zatížení 0,1 MPa

POM-C					
Zrnitost plátna		400		240	
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]
1.	50	0,0768	0,0768	0,1312	0,1312
2.	100	0,0559	0,1327	0,0868	0,218
3.	150	0,0501	0,1828	0,069	0,287
4.	200	0,0473	0,2301	0,072	0,359
5.	250	0,0456	0,2757	0,061	0,42
6.	300	0,0435	0,3192	0,0661	0,4861
7.	350	0,0377	0,3569	0,056	0,5421
8.	400	0,0413	0,3982	0,055	0,5971
9.	450	0,0362	0,4344	0,0527	0,6498
10.	500	0,0394	0,4738	0,0496	0,6994

POM-C					
Zrnitost plátna		120		60	
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]
1.	50	0,1993	0,1993	0,3185	0,3185
2.	100	0,1469	0,3462	0,2882	0,6067
3.	150	0,1297	0,4759	0,2706	0,8773
4.	200	0,1401	0,616	0,2659	1,1432
5.	250	0,1381	0,7541	0,2624	1,4056
6.	300	0,1379	0,892	0,2421	1,6477
7.	350	0,122	1,014	0,2488	1,8965
8.	400	0,1275	1,1415	0,2516	2,1481
9.	450	0,1194	1,2609	0,243	2,3911
10.	500	0,1103	1,3712	0,2401	2,6312

Hodnoty hmotnostních úbytků při zatížení 0,1 MPa

PVC					
Zrnitost plátna		400		240	
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]
1.	50	0,1369	0,1369	0,2346	0,2346
2.	100	0,0922	0,2291	0,1606	0,3952
3.	150	0,0849	0,314	0,1517	0,5469
4.	200	0,0706	0,3846	0,1418	0,6887
5.	250	0,0775	0,4621	0,1326	0,8213
6.	300	0,0811	0,5432	0,1299	0,9512
7.	350	0,0692	0,6124	0,1216	1,0728
8.	400	0,0626	0,675	0,1243	1,1971
9.	450	0,059	0,734	0,1212	1,3183
10.	500	0,057	0,791	0,1097	1,428

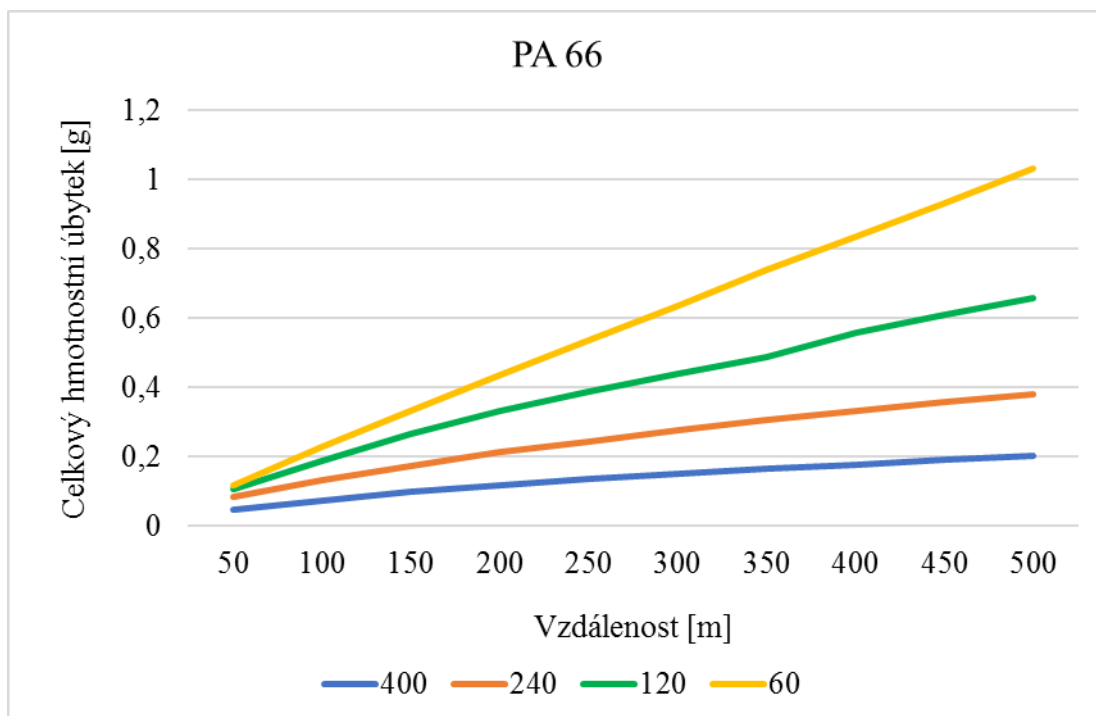
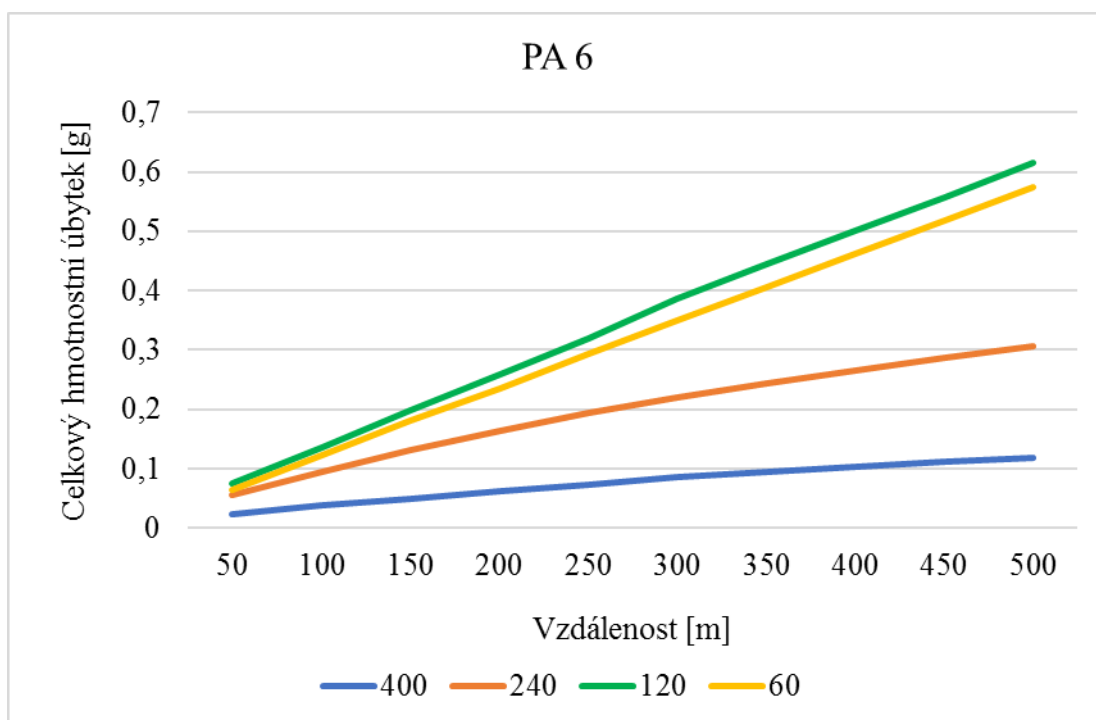
PVC					
Zrnitost plátna		120		60	
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]
1.	50	0,3694	0,3694	0,4117	0,4117
2.	100	0,2919	0,6613	0,3793	0,7712
3.	150	0,2774	0,9387	0,3595	1,1355
4.	200	0,2737	1,2124	0,3643	1,5007
5.	250	0,2583	1,4707	0,3652	1,8532
6.	300	0,2507	1,7214	0,3525	2,2133
7.	350	0,2412	1,9626	0,3601	2,5682
8.	400	0,2342	2,1968	0,3549	2,9204
9.	450	0,2386	2,4354	0,3522	3,2478
10.	500	0,2466	2,682	0,3274	6,8749

Hodnoty hmotnostních úbytků při zatížení 0,1 MPa

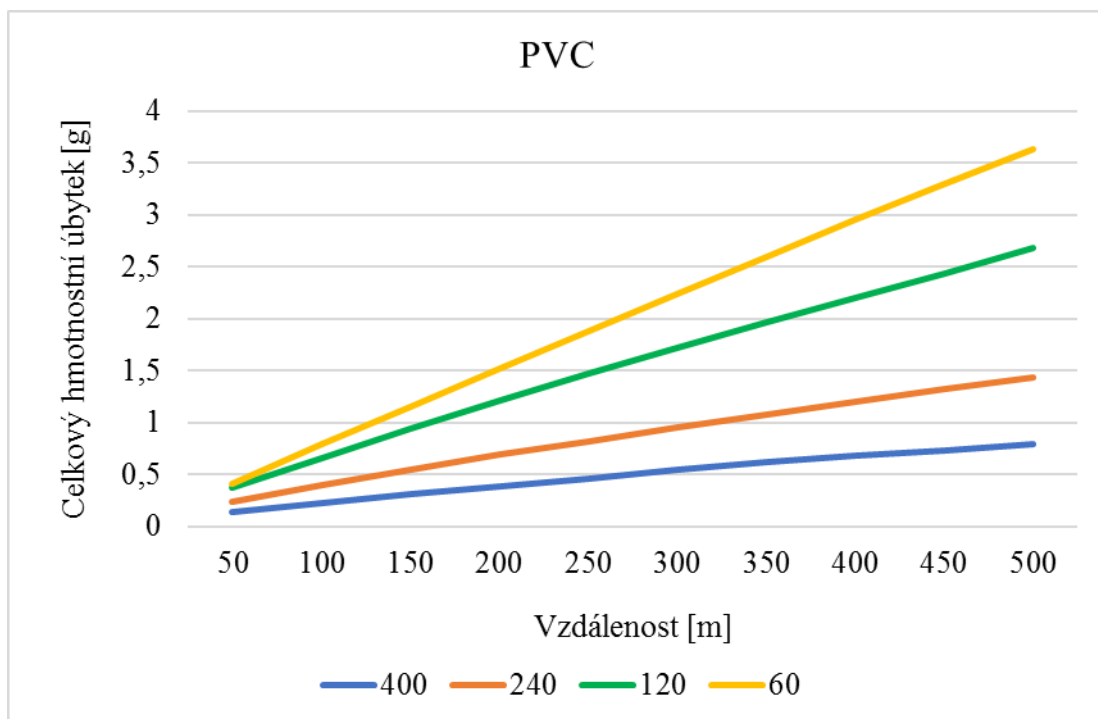
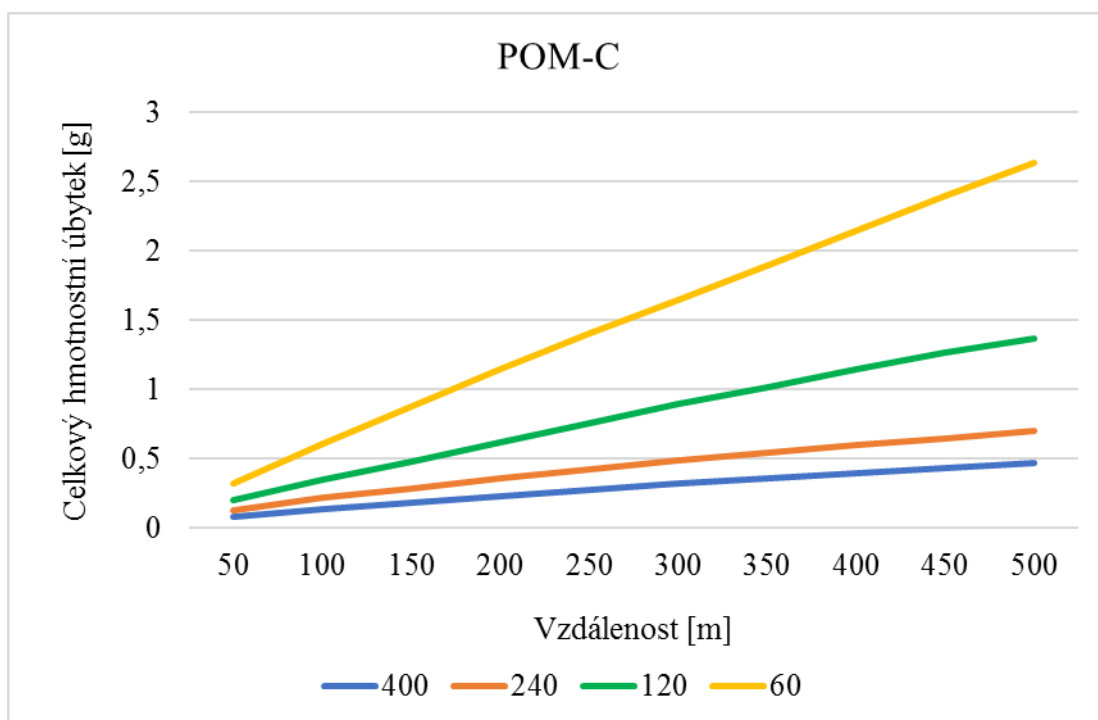
PTFE					
Zrnitost plátna		400		240	
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]
1.	50	0,245	0,245	0,5427	0,5427
2.	100	0,1146	0,3596	0,3682	0,9109
3.	150	0,0767	0,4363	0,3296	1,2405
4.	200	0,0654	0,5017	0,3018	1,5423
5.	250	0,0501	0,5518	0,235	1,7773
6.	300	0,0527	0,6045	0,2009	1,9782
7.	350	0,0431	0,6476	0,2095	2,1877
8.	400	0,0364	0,684	0,1794	2,3671
9.	450	0,0318	0,7158	0,1636	2,5307
10.	500	0,0274	0,7432	0,1901	2,7208

PTFE					
Zrnitost plátna		120		60	
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]	Hmotnostní úbytek [g]	Celkový hmotnostní úbytek [g]
1.	50	0,8253	0,8253	0,9	0,9
2.	100	0,5982	1,4235	0,8177	1,7177
3.	150	0,5159	1,9394	0,7946	2,5123
4.	200	0,4144	2,3538	0,7746	3,2869
5.	250	0,5677	2,9215	0,7545	4,0414
6.	300	0,4048	3,3263	0,789	4,8304
7.	350	0,3856	3,7119	0,7736	5,604
8.	400	0,3574	4,0693	0,7548	6,3588
9.	450	0,3474	4,4167	0,7373	7,0961
10.	500	0,386	4,8027	0,734	7,8301

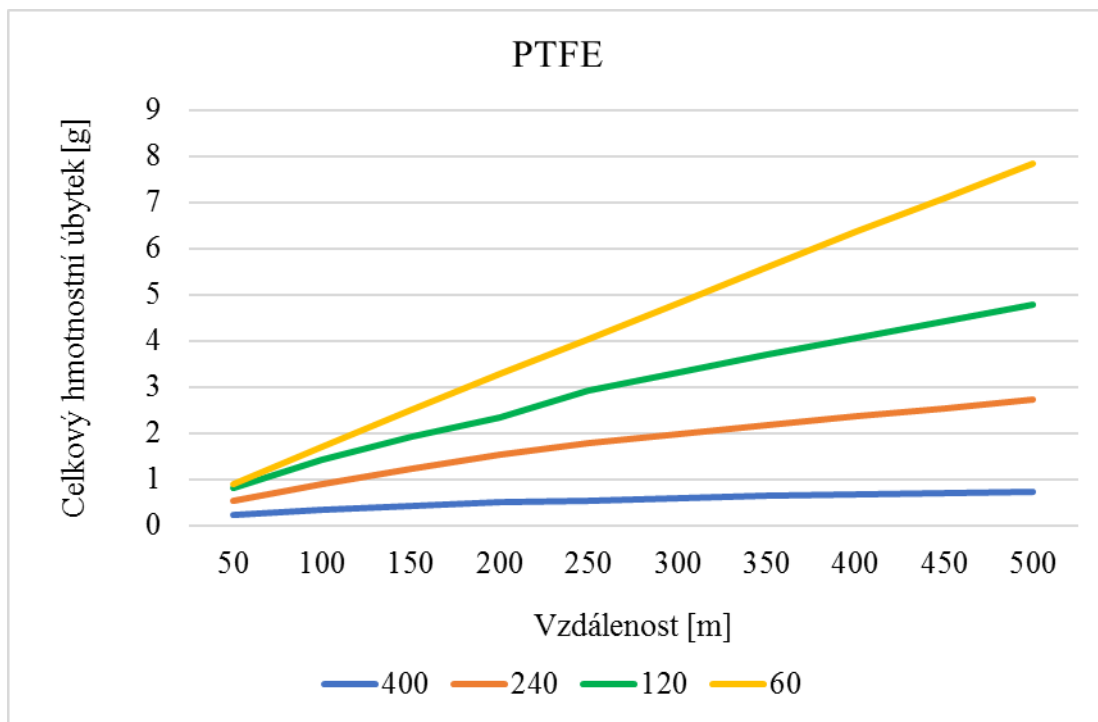
Grafické znázornění hmotnostního úbytku vzorků se zatížením 0,01 MPa



Grafické znázornění hmotnostního úbytku vzorků se zatížením 0,01 MPa



Grafické znázornění hmotnostního úbytku vzorků se zatížením 0,01 MPa



Hodnoty objemových úbytku vzorků se zatížením 0,1 MPa

PA 6 - hustota 1,14				
Zrnitost plátna	400		240	
Číslo měření	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]
1.	20,88	20,88	48,25	48,25
2.	12,02	32,89	34,74	82,98
3.	11,23	44,12	31,75	114,74
4.	10,79	54,91	28,16	142,89
5.	9,47	64,39	26,40	169,30
6.	10,61	75,00	23,86	193,16
7.	8,68	83,68	20,61	213,77
8.	6,84	90,53	19,65	233,42
9.	6,93	97,46	18,07	251,49
10.	6,58	104,04	17,02	268,51

PA 6 - hustota 1,14				
Zrnitost plátna	120		60	
Číslo měření	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]
1.	65,3	65,3	56,0	56,0
2.	54,3	119,6	51,8	107,8
3.	54,6	174,1	50,4	158,2
4.	53,4	227,5	48,5	206,7
5.	52,2	279,7	50,0	256,7
6.	59,6	339,3	50,6	307,3
7.	50,4	389,7	48,0	355,3
8.	49,7	439,5	49,5	404,7
9.	49,0	488,5	50,1	454,8
10.	51,2	539,7	49,5	504,3

Hodnoty objemových úbytku vzorků se zatížením 0,1 MPa

PA 66- hustota 1,14				
Zrnitost plátna	400		240	
Číslo měření	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]
1.	40,35	40,35	72,02	72,02
2.	22,28	62,63	44,21	116,23
3.	25,18	87,81	35,00	151,23
4.	16,40	104,21	34,47	185,70
5.	13,60	117,81	28,51	214,21
6.	13,60	131,40	26,58	240,79
7.	12,02	143,42	26,49	267,28
8.	12,02	155,44	23,25	290,53
9.	12,11	167,54	23,68	314,21
10.	10,18	177,72	20,61	334,82

PA 66 - hustota 1,14				
Zrnitost plátna	120		60	
Číslo měření	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]
1.	94,4	94,4	101,9	101,9
2.	71,1	165,5	96,6	198,5
3.	66,8	232,3	93,9	292,5
4.	57,9	290,2	90,8	383,2
5.	50,1	340,3	87,6	470,9
6.	44,6	384,9	86,5	557,4
7.	41,3	426,2	90,4	647,7
8.	63,0	489,2	84,6	732,3
9.	45,8	535,0	86,5	818,8
10.	42,3	577,3	86,8	905,5

Hodnoty objemových úbytku vzorků se zatížením 0,1 MPa

POM-C - hustota 1,39				
Zrnitost plátna	400		240	
Číslo měření	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]
1.	55,3	55,3	94,4	94,4
2.	40,2	95,5	62,4	156,8
3.	36,0	131,5	49,6	206,5
4.	34,0	165,5	51,8	258,3
5.	32,8	198,3	43,9	302,2
6.	31,3	229,6	47,6	349,7
7.	27,1	256,8	40,3	390,0
8.	29,7	286,5	39,6	429,6
9.	26,0	312,5	37,9	467,5
10.	28,3	340,9	35,7	503,2

POM-C - hustota 1,39				
Zrnitost plátna	120		60	
Číslo měření	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]
1.	143,4	143,4	229,1	229,1
2.	105,7	249,1	207,3	436,5
3.	93,3	342,4	194,7	631,2
4.	100,8	443,2	191,3	822,4
5.	99,4	542,5	188,8	1011,2
6.	99,2	641,7	174,2	1185,4
7.	87,8	729,5	179,0	1364,4
8.	91,7	821,2	181,0	1545,4
9.	85,9	907,1	174,8	1720,2
10.	79,4	986,5	172,7	1892,9

Hodnoty objemových úbytku vzorků se zatížením 0,1 MPa

PVC - hustota 1,38				
Zrnitost plátna	400		240	
Číslo měření	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]
1.	99,2	99,2	170,0	170,0
2.	66,8	166,0	116,4	286,4
3.	61,5	227,5	109,9	396,3
4.	51,2	278,7	102,8	499,1
5.	56,2	334,9	96,1	595,1
6.	58,8	393,6	94,1	689,3
7.	50,1	443,8	88,1	777,4
8.	45,4	489,1	90,1	867,5
9.	42,8	531,9	87,8	955,3
10.	41,3	573,2	79,5	1034,8

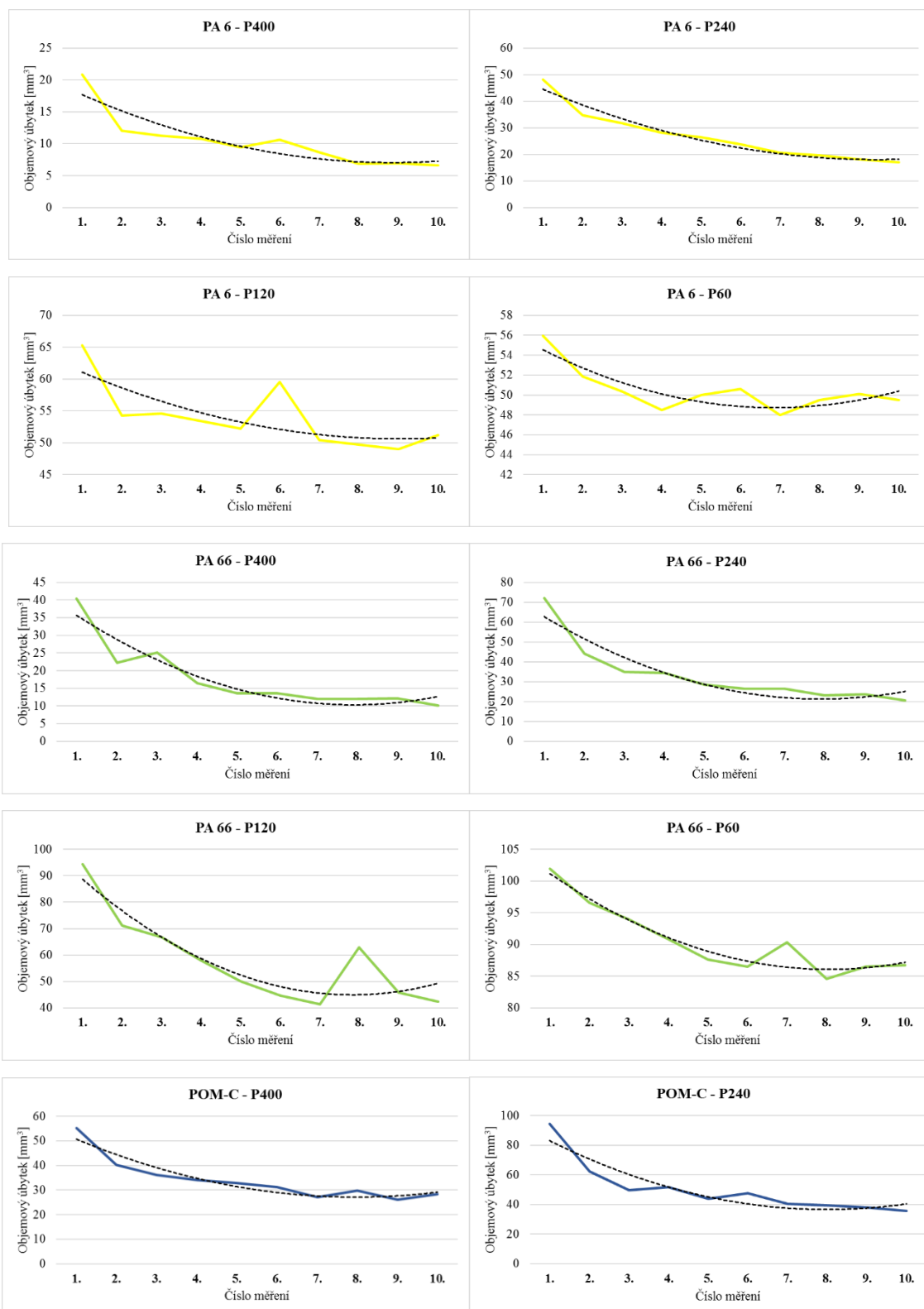
PVC - hustota 1,38				
Zrnitost plátna	120		60	
Číslo měření	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]
1.	267,7	267,7	298,3	298,3
2.	211,5	479,2	274,9	573,2
3.	201,0	680,2	260,5	833,7
4.	198,3	878,6	264,0	1097,7
5.	187,2	1065,7	264,6	1362,3
6.	181,7	1247,4	255,4	1617,8
7.	174,8	1422,2	260,9	1878,7
8.	169,7	1591,9	257,2	2135,9
9.	172,9	1764,8	255,2	2391,1
10.	178,7	1943,5	237,2	2628,3

Hodnoty objemových úbytku vzorků se zatížením 0,1 MPa

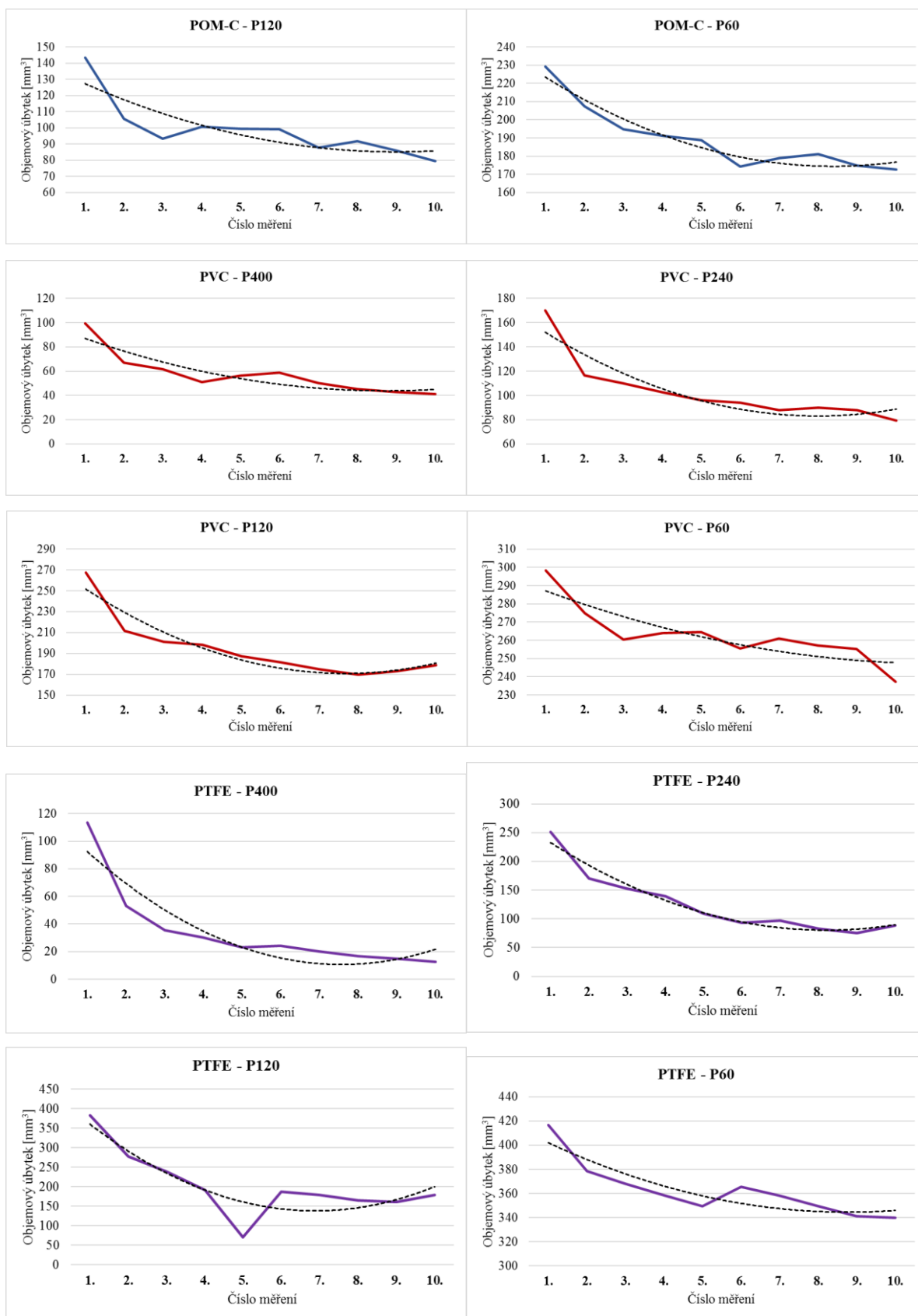
Teflon - hustota 2,16				
Zrnitost plátna	400		240	
Číslo měření	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]
1.	113,4	113,4	251,3	251,3
2.	53,1	166,5	170,5	421,7
3.	35,5	202,0	152,6	574,3
4.	30,3	232,3	139,7	714,0
5.	23,2	255,5	108,8	822,8
6.	24,4	279,9	93,0	915,8
7.	20,0	299,8	97,0	1012,8
8.	16,9	316,7	83,1	1095,9
9.	14,7	331,4	75,7	1171,6
10.	12,7	344,1	88,0	1259,6

Teflon - hustota 2,16				
Zrnitost plátna	120		60	
Číslo měření	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celkový úbytek objemu [mm ³]
1.	382,1	382,1	416,7	416,7
2.	276,9	659,0	378,6	795,2
3.	238,8	897,9	367,9	1163,1
4.	191,9	1089,7	358,6	1521,7
5.	71,0	1160,7	349,3	1871,0
6.	187,4	1348,1	365,3	2236,3
7.	178,5	1526,6	358,1	2594,4
8.	165,5	1692,1	349,4	2943,9
9.	160,8	1852,9	341,3	3285,2
10.	178,7	2031,6	339,8	3625,0

Grafické znázornění objemových úbytků se zatížením 0,1 MPa



Grafické znázornění objemových úbytků se zatížením 0,1 MPa



Poměrné objemové opotřebení zkoušených materiálů

P400			P240		
Objemový úbytek etalonu [mm ³]		573,2	Objemový úbytek etalonu [mm ³]		1259,6
Materiál	Objemový úbytek vzorku [mm ³]	Poměrné opotřebení	Materiál	Objemový úbytek vzorku [mm ³]	Poměrné opotřebení
PTFE	344,1	1,665886648	PTFE	1259,6	1
PVC	573,2	1	PVC	1034,8	1,217289138
POM-C	340,9	1,68157848	POM-C	503,2	2,503410331
PA66	177,72	3,225245719	PA66	334,82	3,762058627
PA 6	104,04	5,50956815	PA 6	268,51	4,691204762

P120			P60		
Objemový úbytek etalonu [mm ³]		2031,6	Objemový úbytek etalonu [mm ³]		3625,0
Materiál	Objemový úbytek vzorku [mm ³]	Poměrné opotřebení	Materiál	Objemový úbytek vzorku [mm ³]	Poměrné opotřebení
PTFE	2031,6	1	PTFE	3625,0	1
PVC	1943,5	1,045352763	PVC	2628,3	1,379218629
POM-C	986,5	2,059475142	POM-C	1892,9	1,915025217
PA66	577,28	3,519293758	PA66	905,5	4,003247872
PA 6	539,74	3,764094299	PA 6	504,3	7,188298448

Hodnoty délkových úbytku vzorků se zatížením 0,1 MPa

PA 6					
Zrnitost plátna		400	240	120	60
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Délkový úbytek [cm]			
1.	50	0,027	0,061	0,083	0,071
2.	100	0,015	0,044	0,069	0,066
3.	150	0,014	0,040	0,069	0,064
4.	200	0,014	0,036	0,068	0,062
5.	250	0,012	0,034	0,066	0,064
6.	300	0,014	0,030	0,076	0,064
7.	350	0,011	0,026	0,064	0,061
8.	400	0,009	0,025	0,063	0,063
9.	450	0,009	0,023	0,062	0,064
10.	500	0,008	0,022	0,065	0,063
Celkový úbytek		0,132	0,342	0,687	0,642

PA 66					
Zrnitost plátna		400	240	120	60
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Délkový úbytek [cm]			
1.	50	0,051	0,092	0,120	0,130
2.	100	0,028	0,056	0,091	0,123
3.	150	0,032	0,045	0,085	0,120
4.	200	0,021	0,044	0,074	0,116
5.	250	0,017	0,036	0,064	0,112
6.	300	0,017	0,034	0,057	0,110
7.	350	0,015	0,034	0,053	0,115
8.	400	0,015	0,030	0,080	0,108
9.	450	0,015	0,030	0,058	0,110
10.	500	0,013	0,026	0,054	0,110
Celkový úbytek		0,226	0,426	0,735	1,153

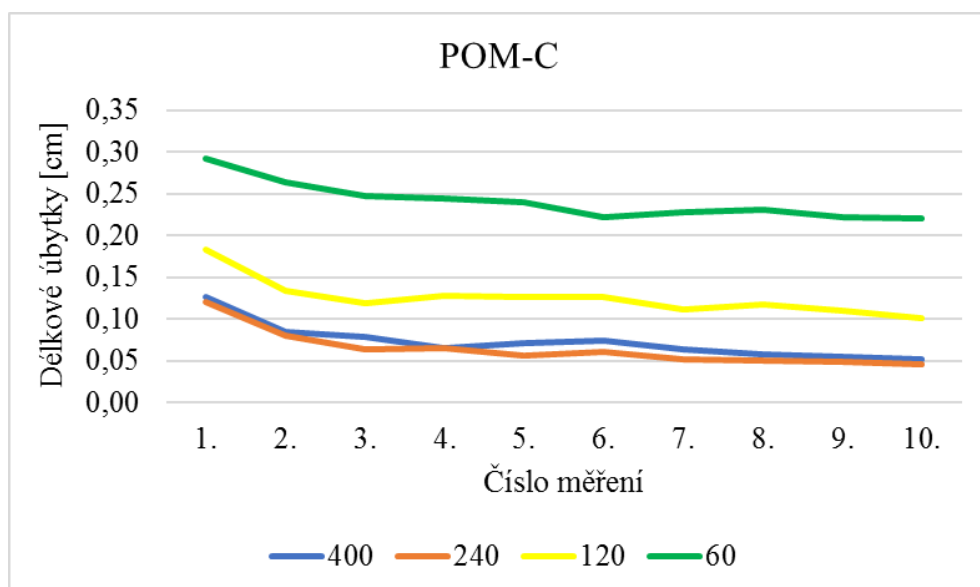
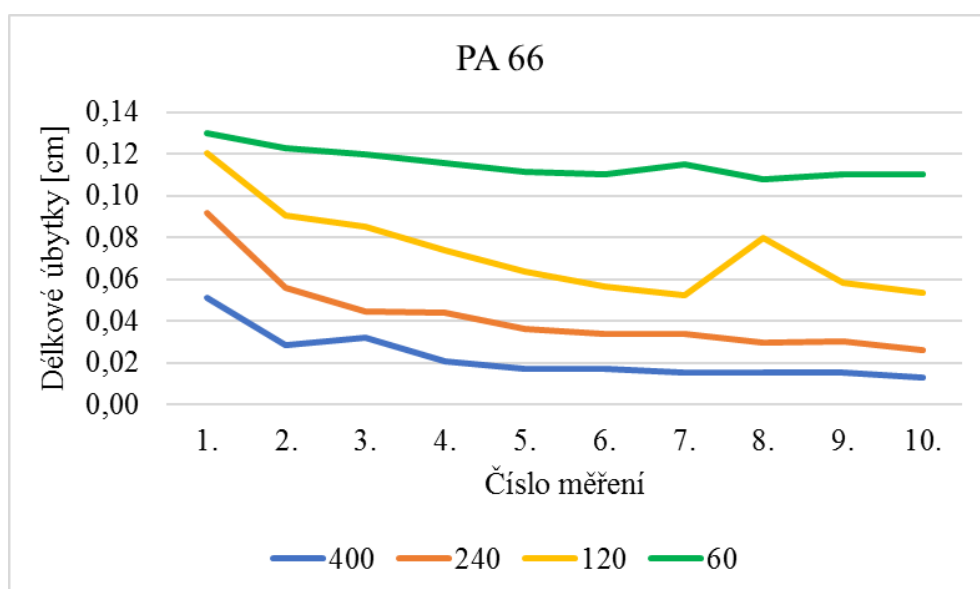
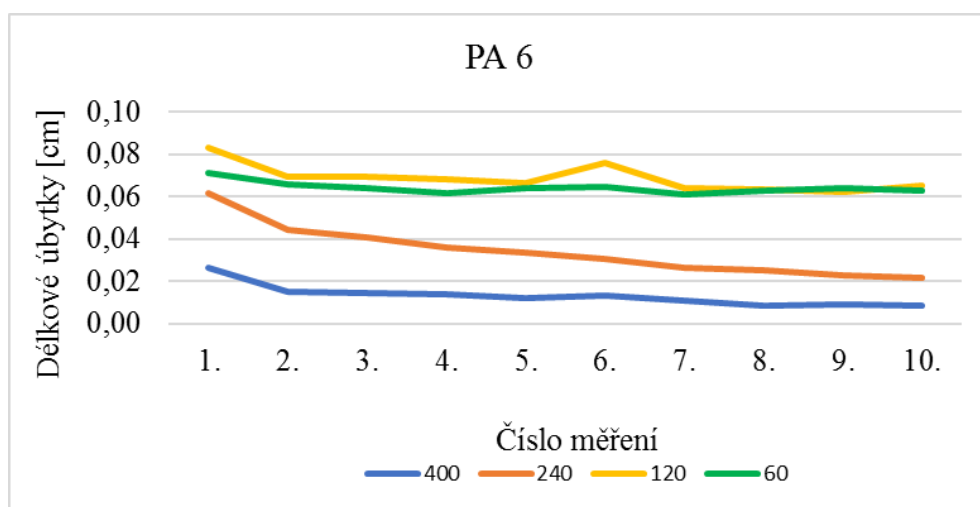
POM-C					
Zrnitost plátna		400	240	120	60
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Délkový úbytek [cm]			
1.	50	0,070	0,120	0,183	0,292
2.	100	0,051	0,080	0,135	0,264
3.	150	0,046	0,063	0,119	0,248
4.	200	0,043	0,066	0,128	0,244
5.	250	0,042	0,056	0,126	0,240
6.	300	0,040	0,061	0,126	0,222
7.	350	0,035	0,051	0,112	0,228
8.	400	0,038	0,050	0,117	0,230
9.	450	0,033	0,048	0,109	0,223
10.	500	0,036	0,045	0,101	0,220
Celkový úbytek		0,434	0,641	1,256	2,410

Hodnoty délkových úbytku vzorků se zatížením 0,1 MPa

PVC					
Zrnitost plátna		400	240	120	60
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Délkový úbytek [cm]			
1.	50	0,126	0,216	0,341	0,380
2.	100	0,085	0,148	0,269	0,350
3.	150	0,078	0,140	0,256	0,332
4.	200	0,065	0,131	0,253	0,336
5.	250	0,072	0,122	0,238	0,337
6.	300	0,075	0,120	0,231	0,325
7.	350	0,064	0,112	0,223	0,332
8.	400	0,058	0,115	0,216	0,327
9.	450	0,054	0,112	0,220	0,325
10.	500	0,053	0,101	0,228	0,302
Celkový úbytek		0,730	1,318	2,475	3,346

PTFE					
Zrnitost plátna		400	240	120	60
Číslo měření	Vzdálenost [m]	Délkový úbytek [cm]			
1.	50	0,144	0,320	0,486	0,531
2.	100	0,068	0,217	0,353	0,482
3.	150	0,045	0,194	0,304	0,468
4.	200	0,039	0,178	0,244	0,457
5.	250	0,030	0,139	0,335	0,445
6.	300	0,031	0,118	0,239	0,465
7.	350	0,025	0,123	0,227	0,456
8.	400	0,021	0,106	0,211	0,445
9.	450	0,019	0,096	0,205	0,435
10.	500	0,016	0,112	0,228	0,433
Celkový úbytek		0,438	1,604	2,831	4,616

Grafické znázornění délkových úbytků se zatížením 0,1 MPa



Grafické znázornění délkových úbytků se zatížením 0,1 MPa

