

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015

Lukáš KLOUČEK

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

Opotřebení kovových materiálů

diplomová práce

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

Autor: Bc. Lukáš Klouček

Praha 2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Klouček Lukáš

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Opotřebení kovových materiálů

Anglický název

Wear of metallic materials

Cíle práce

- shromáždit informace o opotřebení kovových materiálů a jeho hodnocení,
- experimentálně posoudit odolnost proti opotřebení vybraných kovových materiálů,
- provést technicko-ekonomické zhodnocení.

Metodika

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

Osnova práce

1. Úvod.
2. Podstata opotřebení, rozdělení opotřebení.
3. Možnosti zvýšení odolnosti proti opotřebení funkčních povrchů.
4. Metody zkoušení odolnosti materiálů proti opotřebení.
5. Experimentální zhodnocení odolnosti proti opotřebení vybraných kovových materiálů.
6. Závěr.

Rozsah textové části

cca 60 stran

Klíčová slova

opotřebení, abraze, kovy, odolnost proti opotřebení

Doporučené zdroje informací

BROŽEK, M. - NOVÁKOVÁ, A.: Porovnání odolnosti proti abrazivnímu opotřebení vybraných návarových materiálů. Zeměd. Techn., 37, 1991, č. 1.
Friction and Wear Testing. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA 1987.
HAVLÍČEK, J. aj.: Provozní spolehlivost strojů. 2. přepr. vyd. Praha, SZN 1989.
CHRUČŠOV, M. M. – BABIČEV, M. A.: Issledovanija iznašivaniija metallov. Moskva, Izdat. AN SSSR 1960.
IGRAMOV, U. – MACHKAMOV, K. CH.: Berechnung und Bewertung des abrasiven Verschleisses. Berlin, Technik 1987.
RABINOWICZ, E.: Friction and wear of materials. New York, Wiley 1965.
TENENBAUM, M. M.: Iznosostojkost' konstrukcionnyh materialov i detalej mašin při obrazivnom iznašivanii. Moskva, Mašinostrojenije 1966.
VOCEL, M. - DUFEK, V. aj.: Tření a opotřebení strojních součástí. Praha, SNTL 1976.
Časopisy: Manufacturing technology, Strojírenská technologie, Strojárstvo - Strojírenství, Zváranie - Svařování, MM Průmyslové spektrum, Dělení spojování svařování materiálů, Technik.
Návary prodlužují životnost dílů. In.: Informace ESAB Vamberk, č. 2/1997.
Repair and Maintenance Welding Handbook. ESAB AB.
ČSN 01 5050. Opotřebení materiálu. Názvosloví. 1969.
Normy ČSN, ČSN ISO, ČSN EN, DIN, BS, ASTM, ASME, GOST, ...
Firemní literatura: katalogy, prospekty, prezentace.

Vedoucí práce

Brožek Milan, prof. Ing., CSc.

Termín zadání

listopad 2012

Termín odevzdání

duben 2014

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Vedoucí katedry



prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan fakulty

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne:

Jméno a příjmení:

Poděkování

Děkuji panu Prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc. za odborné vedení, metodickou pomoc, užitečné rady v průběhu výzkumu a tvorby diplomové práce a celkovou korekturu tohoto souboru. Děkuji rovněž paní Alexandře Novákové a panu Miroslavu Markovi za jejich pomoc při zhotovení vzorků k provedení výzkumu. Dále mé poděkování patří společnosti Kovošrot Group CZ a.s., jakožto poskytovateli potřebného materiálu k dané problematice.

Abstrakt: Cílem práce je porovnat velikost opotřebení námi známých druhů kovů a jejich slitin (mosaz Ms58, oceli 11 373, 19 133 a 19 436, slinutý karbid TSM 20, šedá litina s lupínkovým grafitem), s kovovými materiály, běžně používanými ve stavebním, důlním a zemědělském průmyslu, kde při své činnosti podléhají výraznému abrazivnímu opotřebení. Vzorky materiálů jsou podrobeny laboratornímu zkoušení abrazivního opotřebení, metodou vázaného abraziva na brusném plátně, dle ČSN 01 5084, o zrnitostech 60, 120 a 240. Vyhodnocení opotřebení je provedeno na základě porovnávání objemových úbytků. V první části práce je rozebrána teorie druhů poškození, opotřebení kovových materiálů s bližší specifikací jednotlivých druhů opotřebení a jejich zkoušení. V druhé části je proveden vlastní výzkum a již zmíněná laboratorní zkouška. Vlivem údajů, získaných provedeným výzkumem, je možné vyvodit důležitost a smysl správné volby použitého materiálu, s ohledem na jeho odolnost degračním procesům při pracovní činnosti nástroje a jeho ekonomickou výhodností.

Klíčová slova: odolnost, abrazivní opotřebení, kovové materiály, brusné plátno

Wear of metallic materials

Summary: Aim of the study is to compare the amount of wear us known species of metals and their alloys (brass Ms58, steels 11 373, 19 133 and 19 436, carbide TSM 20, gray cast iron), with incompletely specified metallic materials commonly used in construction, mining and agricultural industries, where in its activities are subject to substantial abrasive wear. Samples of materials subjected to laboratory testing abrasive wear, the tying abrasives, abrasive cloth according to CSN 01 5084, grit 60, 120 and 240. Evaluation of wear is done by comparing the volume decreases. In the first part of document discusses the theory types of damage and wear of metallic materials with detailed specification of the different types of wear. The second part is own research and the already mentioned laboratory test. With the data obtained conducted research, it is possible to infer the importance of a sense correct choice of material used, with respect to resistance to degradation processes at work tools and its economic advantage.

Key words: resistance, abrasive wear, metallic materials, abrasive cloth

OBSAH

1.	Úvod.....	3
1.1	Cíl práce	4
1.2	Metodika zpracování.....	4
2.	Podstata opotřebení, rozdělení opotřebení.....	6
2.1	Tribologie	6
2.2	Tření	6
2.2.1	Druhy tření.....	7
2.2.1.1	Valivé tření	7
2.2.2	Smykové (kluzné) tření	8
2.3	Druhy poškození strojních součástí	9
2.3.1	Koroze.....	10
2.3.2	Deformace.....	11
2.3.3	Otlačení.....	11
2.3.4	Trhlíny a lomy	12
2.3.5	Opotřebení	13
2.3.5.1	Klasifikace opotřebení	13
2.3.5.2	Adhezivní opotřebení.....	14
2.3.5.3	Abrazivní opotřebení	15
2.3.5.4	Erozivní opotřebení.....	16
2.3.5.5	Kavitační opotřebení.....	17
2.3.5.6	Únavové opotřebení.....	18
2.3.5.7	Vibrační opotřebení	19
2.3.5.8	Kombinované opotřebení.....	20
2.3.6	Analýza opotřebení strojních součástí.....	21
3.	Významné faktory působící na abrazivní opotřebení	22
3.1.1	Velikost abraziva	22
3.1.2	Množství abraziva.....	23
3.1.3	Tvar abraziva	23
3.1.4	Pevnost abraziva	24
3.1.5	Tvrдость abraziva	24
4.	Metody zkoušení odolnosti materiálů proti opotřebení.....	26
4.1	Zkoušky odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení.....	26
4.1.1	Přístroje pro laboratorní zkoušku s volným abrazivem.....	26
4.1.1.1	Přístroje s brusnou nádobou.....	27
4.1.1.2	Přístroje s pružným kotoučem	27
4.1.1.3	Bubnové přístroje.....	28
4.1.2	Přístroje pro laboratorní zkoušku s vázaným abrazivem.....	28
4.1.2.1	Přístroj s brusným plátnem	29
4.1.2.2	Přístroj s brusným pásem	29
4.1.2.3	Přístroj s brusným kotoučem	30
4.1.2.4	Provozní zkoušky abrazivního opotřebení.....	31
4.2	Zkoušky odolnosti materiálu proti adhezivnímu opotřebení	31
4.2.1	Zkoušení bodovým dotykem	31
4.2.2	Zkoušení čárovým dotykem	32
4.2.3	Zkoušení plošným dotykem.....	32
4.3	Zkoušky odolnosti materiálu proti erozivnímu opotřebení.....	33

4.3.1	Přístroje s brusnou nádobou	33
4.3.2	Tryskací přístroje	33
4.3.3	Přístroje s oběhovou soustavou	33
4.3.4	Experimentální turbíny	34
4.3.5	Přístroje na principu volného pádu a odstředivé síly.....	34
4.3.6	Přístroje s proudem plynu, páry nebo vody	34
4.4	Zkoušky odolnosti materiálu proti kavitačnímu opotřebení	34
4.4.1	Rotační diskový přístroj.....	35
4.4.2	Rotační nárazový přístroj.....	35
4.4.3	Magnetostrikční přístroj	36
4.4.4	Dýzový přístroj	36
4.5	Zkoušky odolnosti materiálu proti únavovému opotřebení	37
4.6	Zkoušky odolnosti materiálu proti vibračnímu opotřebení.....	37
5.	Experimentální zkoušky abrazivního opotřebení	38
5.1	Zkoušené materiály	38
5.1.1	Specifikované materiály	38
5.1.2	Nespecifikované materiály	41
5.1.3	Měření hustoty zkoušených materiálů	43
5.2	Příprava zkušebních materiálů	44
5.3	Laboratorní zkouška.....	45
5.3.1	Metodika laboratorní zkoušky	45
5.3.2	Zkušební přístroj s brusným plátnem	47
5.3.3	Brusné plátno	48
6.	Výsledky laboratorní zkoušky a diskuze	50
6.1	Výsledky abrazivního opotřebení zkoušených materiálů	50
6.2	Výsledky opotřebení brusného plátna.....	52
6.3	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	53
7.	Závěr	56
8.	Seznam použité literatury	57
9.	Seznam Příloh	60

1. Úvod

Spolehlivost stroje je podmíněna dobrým technickým stavem všech strojních součástí. Ten je závislý především na optimální konstrukci, pravidelné údržbě a efektivní opravě umožňující stroji plně vykonávat požadovanou činnost, při výhodných ekonomických a technických parametrech.

Mnoho součástí pracuje za pohybu s dalšími součástmi. S tím je nutné, při jejich návrhu a výrobě, počítat. Proto je více než žádoucí využívat poznatků tribologie, která se problematikou styku více funkčních povrchů přímo zaobírá. Vzájemným pohybem součástí vzniká tření mezi jejich funkčními povrchy a tím dochází k jejich opotřebením, které je příčinou degradace povrchu a zhoršení požadované funkce součásti a celého systému.

Z ohledu na požadavek stále vyššího absolutního i měrného výkonu často roste složitost a stupeň vzájemné vazby zařízení v technologických procesech a v průmyslu obecně. Trendem je zvýšení automatizace procesů s klesajícími počty obsluhujících pracovníků. V mnoha případech se navyšují pracovní otáčky, tlaky, provozní teploty a rychlosti. Ovšem s navýšením těchto parametrů pro vyšší produktivitu vznikají i negativní účinky působící na strojní součásti a okolí. Takovými účinky mohou být např. vibrace, zvýšená hluchost, více exhalací a větší množství odpadního materiálu. To vše má za následek nadměrné opotřebením funkčních povrchů dílů.

Stále vyšší požadavky na výkonnost strojů jsou příčiny hledání nových kvalitnějších a odolnějších materiálů a vhodnějších konstrukčních variant, jelikož s vyšším výkonem roste i intenzita opotřebením funkčních materiálů. Požadavky na nové materiály a konstrukce jsou hlavně bezporuchový a dlouhodobý provoz, jednoduchá a finančně nenáročná údržba a opravy.

1.1 Cíl práce

Cílem diplomové práce je zkoumání a vyhodnocení velikosti abrazivního opotřebení šesti kovových materiálů, běžně používaných v nástrojích stavební a zemědělské techniky vykonávající práci spojenou s úpravou půdy a horniny. Odolnost zkušebních vzorků proti abrazivnímu opotřebení je vztažena k nám známým kovovým materiálům (mosaz, ocel 11 373, 19 133 a 19 436, slinutý karbid TSM 20, šedá litina s lupínkovým grafitem), je zkoumána pomocí vázaného abraziva na brusném plátně dle ČSN 01 5084, o třech různých zrnitostech (60, 120 a 240) a s přítláčnou silou 0,32 MPa.

Tento způsob testování bude vyhodnocen na základě objemových úbytků a poměrné objemové odolnosti proti abrazivnímu opotřebení při prováděné laboratorní zkoušce metodou vázaného abraziva. Získaná data z laboratorní zkoušky budou vyhodnocena a porovnána. Ze získaných výsledků bude zřetelná vhodnost každého materiálu pro užití do pracovních nástrojů stavební a zemědělské techniky. U vybraných materiálů a výrobků bude vypracován posudek technické a ekonomické výhodnosti.

Vlivem tohoto zkoumání bude dále vyhodnoceno postupné opotřebení plátna v průběhu prováděné zkoušky ve formě jeho poměrné účinnosti abrazivity vzhledem k novému stavu.

1.2 Metodika zpracování

První část práce zabývající se teoretickými informacemi je zpracována formou literární rešerže z informačních a literárních zdrojů (knižní výtisky, technické periodické tiskoviny a internetové zdroje) s prvky analyticko–syntetické metody vycházející z rozčlenění problematiky na základní procesy a jevy s vyloučením nepodstatných informací. Literární rešerže je sepsaná s cílem získat přehled problematiky pro vyhotovení praktické části. Pojednává o principu tření, základním rozdělení typů opotřebení s významějším zaměřením na opotřebení abrazivního charakteru s rozбором působících faktorů a vlivů na jeho proces. Druhy laboratorních zkoušek, zkoumající veškeré druhy opotřebení, jsou v této části rozebrány teoreticky.

Praktická část, zaobírající se samotným výzkumem, nejprve charakterizuje zkoumané materiály podrobené abrazivnímu opotřebení, měření a výpočet jejich hustot a jednotlivé fáze výroby a přípravy zkušebních vzorků. Dále jsou uvedeny použité výpočty

a charakteristika použitého laboratorního přístroje dle normy ČSN 01 5084 a také použítá brusná plátna o různých zrnitostech. Za tím následuje grafická i číselná interpretace výsledků zkoušek odolnosti materiálů proti abrazi a průběh opotřebení brusných pláten společně s jejich hodnocením použitých materiálů a to jak z technického tak i z ekonomického hlediska.

2. Podstata opotřebení, rozdělení opotřebení

Opotřebení je podstatnou částí vědního oboru nazývaného Tribologie.

2.1 Tribologie

Snaha o komplexní spojení vědy s praxí v oblasti opotřebení, tření a mazání dala vznik novému oboru – tribologii. Interdisciplinární charakter tribologie neumožňuje její jednoznačné zařazení do některého z aktuálně existujících vědních oborů. Tribologie má styčné oblasti s fyzikou, chemií a dalšími vědními obory a vlivem rozvoje nových poznatků v současnosti, se stala samostatným vědním oborem.[1]

Se zaváděním nové techniky s neustále se stupňujícím nárokem na její výkon rostou problémy s třením a opotřebením, což má mimo jiné i vliv na ekonomickou stránku provozu. Globálně se uplatňuje trend včasného předcházení poruchám a haváriím techniky. Stav strojů, vzhledem k opotřebením, které vede ke zhoršení výkonu a případné havárii stroje, musí být pravidelně kontrolován. Tato procedura, obvykle spojená s demontáží stroje je však časově náročná a snižuje jeho produktivitu práce. Proto se v praxi začaly uplatňovat metody bezdemontážní technické diagnostiky.[1]

Tření a opotřebení spolu z hlediska tribologie velmi úzce souvisí. Vztahem mezi nimi se rozumí odstraňování materiálu z třecích povrchů v přímém styku, ve vzájemném pohybu a nebo ve styku s proudícím médiem různými formami mechanického účinku nebo korozním působením maziva či prostředí.[1]

2.2 Tření

Tření je následek kontaktního pohybu jednoho tělesa na druhém. Představuje ztrátu mechanické energie v určité fázi relativního pohybu kontaktních ploch dvou těles. Tento proces má za důsledek nežádoucí opotřebení vnějších vrstev. Z hlediska přítomnosti média mezi třecími povrchy, se tření nejčastěji rozděluje na: suché (bez média mezi povrchy), tekutinové (s mazivem, vzduchovým polštářem nebo jiným médiem mezi povrchy), polosuché (z vrstvy média vystupují vrcholy nerovností kontaktních ploch).[2,3]

Z hlediska fáze procesu dělíme tření na statické a kinematické. Odpor statického tření je nutno překonat, aby v soustavě těles nastal žádaný pohyb. Statické tření je větší než

kinematické, vlivem většího odporu uvádění nepohybujícího se tělesa do pohybu. Tření, které figuruje při již probíhajícím pohybu soustavy je tření kinematické. Kinematické tření je menší vlivem setrvačnosti.[4]

2.2.1 Druhy tření

Podle tvaru třecích ploch, podoby jejich dotyků a druhu relativního pohybu je tření děleno na valivé tření a smykové tření. Vzniklé tření může být i jejich kombinací. Místo, kde tření vzniká, je nazýváno třecí jednotka.[4]

2.2.1.1 Valivé tření

Doprovází pohyb valivého tělesa, které se pohybuje po rovné či zakřivené ploše. Valivé tření na rovné ploše principiálně znázorňuje obr. 1. Styk valivého tělesa s plochou bývá bodový nebo přímkový. Vlivem této relativně malé stykové ploše bývá třecí síla (1) menších hodnot. V případě zatížení valivého tělesa, je znik deformací vzhledem k malé stykové ploše tělesa s povrchem typický. Koeficient valivého tření je dán poloměrem valivého tělesa.[4]

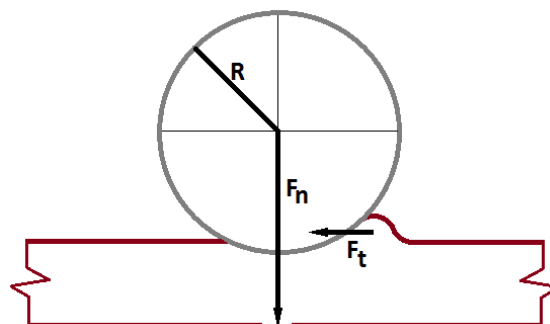
$$F_t = \xi \cdot F_n / R \quad (1)$$

F_t – třecí síla (valivý odpor),

ξ (ksí) – rameno valivého odporu (součinitel valivého tření),

F_n – kolmá tlaková síla mezi tělesy,

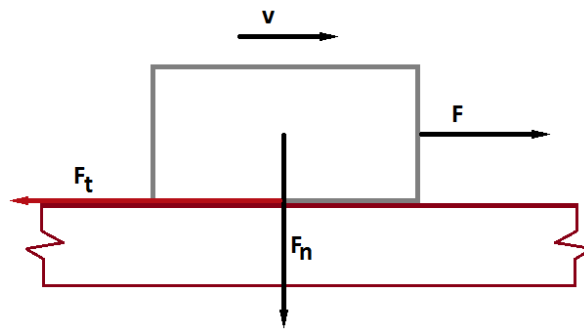
R – poloměr průřezu valivého tělesa.[5]



Obr. 1 – Princip valivého tření

2.2.2 Smykové (kluzné) tření

Jedná se o tření, které je charakterizováno jako „klouzání“ dvou těles na sobě navzájem. K působení smykového tření dochází na celém stykovém povrchu obou těles. Při vzniku smykového tření vzniká třecí síla (2) působící v opačném směru než je pohyb. Kluzné tření je zobrazeno na obr. 2.[4]



Obr. 2 – Princip smykového tření

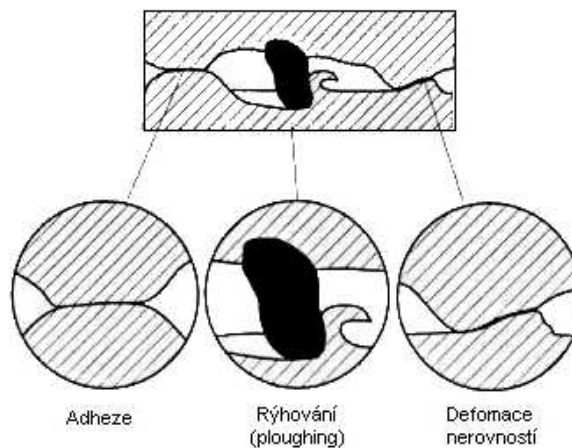
$$F_t = f \cdot F_n \quad (2)$$

F_t – třecí síla,

f – součinitel smykového tření,

F_n – kolmá tlaková síla mezi tělesy.[6]

Smykové tření se skládá ze tří složek, znázorněné na obr. 3, kterými jsou: tření vlivem deformace nerovností povrchu, tření vlivem adheze mezi nerovnostmi povrchu, tření vlivem rýhování, zapříčiněném abrazivními částicemi mezi povrchy.[7]



Obr. 3 – Složky kluzného tření [7]

V jakém poměru jsou jednotlivé složky v kluzném tření obsaženy závisí na vlastnostech a struktuře materiálů, na typu vzájemného pohybu těles a na časovém stádiu vzájemného pohybu. Samotný proces smykového tření nezůstává neměnný. Je obecně známo 5 stádií tření s lišícím se mechanismem procesu. V prvním stádiu se nejvíce projevuje rýhování povrchu ostrými nerovnostmi, které se postupně otupují a deformují. Adheze probíhá ve velmi malém měřítku vlivem přítomnosti cizích částic (oxidy aj.). Během druhého stádia adhezní síly narůstají vlivem průběžného vzájemného očišťování povrchů od cizích částic. Začíná docházet k adhezním spojením. Ve třetím stádiu roste koeficient tření. Způsobuje to vznik abrazivních částic vlivem opotřebení. Tření, vyvolané rýhováním povrchů abrazivem, dosahuje maximálních hodnot v případě stejné tvrdosti obou materiálů. Vzniká plastická deformace nerovností a aktivovaná plocha, podléhající adheznímu tření, roste. Ve čtvrtém stádiu je úroveň tření konstantní. Míra adhezního tření, množství abrazivních částic a deformace nerovností jsou konstantní. K pátému stádiu dochází pouze tehdy, je-li výrazný rozdíl ve tvrdostech obou ploch. V takovém případě je povrch měkčího materiálu zarovnan a vyleštěn do zrcadlového lesku. Koeficient tření se snižuje. V závěrečném stádiu je dosaženo zrcadlového lesku obou kontaktních povrchů, je to fáze konstantní úrovně tření.[7,8,16]

2.3 Druhy poškození strojních součástí

V případě dvou součástí přibližujících se k sobě vlastní hmotností nebo působením vnější síly, dochází k dotyku jejich povrchů ve třech bodech. Vzhledem k velkému měrnému tlaku v bodech dotyku, může dojít jak k plastické deformaci, tak i k odlomení částí vnějších vrstev součástí. Vlivem toho se do kontaktu dostávají další povrchová místa, na nichž probíhá stejný děj a to do té doby, než je kontaktní plocha tak velká, že měrný tlak nepůsobuje další plastickou deformaci. Tento rovnovážný stav je závislý na více činitelích, nejvíce na: vlastnostech povrchů obou těles, zatížením, přítomnosti média mezi povrchy a jeho vlastnostech, parametrech vzájemného pohybu těles (rychlost, směr a časové změny).[9]

Povrchy, které přicházejí do kontaktu kov na kov, porušují svou absorpční a oxidovou vrstvu. Vytvářejí se mikrospoje, které jsou vlivem dalšího vzájemného pohybu těles zase rozrušeny a dochází k oddělování částic a jejich přemísťování z povrchu jednoho tělesa na druhé.[9]

Vlastnosti materiálů strojních součástí, charakteristika provozního namáhání a řada dalších procesů a vlivů určují případný výskyt a proces degradace strojních součástí, kterými mohou být koroze, deformace, otláčení, opotřebení, trhliny a lomy.[9]

2.3.1 Koroze

Jedná se o nežádoucí přeměnu materiálu na povrchu. Příčinou jsou vlivy okolního prostředí a podle nich se koroze dělí na chemickou korozi a elektrochemickou korozi.[9]

Koroze způsobená chemickou reakcí není tak obvyklá, jelikož k ní dochází pouze v nevodivém prostředí. Vznik okují, za tepelné úpravy oceli, je tomu dobrým příkladem.

Koroze způsobená elektrochemickou reakcí je mnohem běžnější. Elektrochemická reakce probíhá na místech, kde se vyskytuje elektrolyt i třeba jen ve formě vzdušné nebo kondenzační vlhkosti, za přítomnosti různých kovů. Vznik a průběh koroze významně ovlivňuje vodivost přítomného elektrolytu.

S ohledem na postup koroze v průběhu procesu dělíme korozi na rovnoměrnou a nerovnoměrnou korozi.[9]

Rovnoměrná koroze probíhá stejně intenzivním výskytem koroze v závislosti na čase a rovnoměrně po celé ploše napadeného povrchu.

Nerovnoměrná koroze probíhá nepředvídatelným způsobem. Napadá různá místa kovového materiálu. Může být těžko odhalitelná, jelikož povrch materiálu může jevit i jen minimální známky působení koroze. Koroze může napadnout jen konkrétní strukturní složky. Postup nerovnoměrné koroze může být různého typu:

- Laminární koroze prorůstá v jednotlivých vrstvách materiálu, který se poté odděluje v šupinách. Děje se tak např. u vrstveného nebo válcovaného materiálu.
- Bodová koroze se nerozrůstá plošně, ale napadá materiál do hloubky.
- Interkrystalická koroze prostupuje hranicemi mezi jednotlivými zrny krystalické struktury do hloubky materiálu a často vede k jeho úplnému rozpadu.
- Transkrystalická koroze probíhá totožně jako mezikrystalická koroze, ale navíc prostupuje i napříč jednotlivá zrna.[9]

Z hlediska okolního prostředí rozeznáváme koroze probíhající v půdě, ve vodě, v plynech a v atmosféře. Koroze v atmosféře je z nich nejrozšířenější. Významě ji ovlivňuje vlhkost, minerální soli v atmosféře, přítomnost vzdušného kyslíku a dalších plynů (H_2S , SO_2 , Cl), sluneční záření a prachový spad (změny teplot).[9]

2.3.2 Deformace

Nežádoucí změny geometrického tvaru materiálu. Deformace vzniká v případě, kdy namáhání v určitém průřezu tělesa překročí mez kluzu. Tuto hraniční hodnotu určují vlastnosti materiálu. U křehkého materiálu je deformace velmi neobvyklá, spíše vzniká lom z důvodu překročení meze pevnosti.[9]

Trvalá deformace jako poškození materiálu je změna, která se nedokáže navrátit do původního tvaru bez případného vnějšího vlivu. Například ohnutí hřídele či zvlnění plechu. Pružné deformace, které se po skončení působení sil vytratí a materiál je zpět ve svém původním tvaru, se za poškození nepovažují.[9]

Síla, která zapříčiní vznik deformace, může být vnějšího nebo vnitřního charakteru. Vnější síly jsou příčinou zejména ohybových a torzních momentů. Vnitřní síly neboli vnitřní napětí vznikají již při výrobním procesu, nebo jsou otláčením či přehřátím v provozu vnesená zvenčí. Deformaci dále vyvolávají změny ve vnitřním pnutí zapříčiněné stárnutím materiálu, opotřebením materiálu při kterém je odstraněna vrstva materiálu s koncentrovaným vnitřním napětím, nebo v důsledku změn teplot.[9]

2.3.3 Otláčení

Jedná se o trvalou změnu povrchu, způsobenou vlivem vnějších sil. K této změně dochází v případě, kdy je skutečný kontaktní tlak větší než mez kluzu materiálu povrchových vrstev. Jelikož technické kovy nemají téměř žádnou stlačitelnost, tak působení kontaktního tlaku vyvolává tok materiálu z namáhaného místa do okolí. V takovém případě se objem materiálu nemění a materiálu je pořád stejné množství, jedná se pouze o přesun materiálu s typickou tvorbou valů v okolí působení síly. Tyto strukturální změny s sebou v praxi nesou změnu vůlí v daném spojení, což má za následek např. lomy v důsledku rázů nebo zvýšené opotřebení. Otláčení v uvedeném smyslu je označováno jako místní povrchová deformace.[9]

Za deformaci materiálu je považováno otláčení v makroskopických rozměrech. K mikroskopickému otláčení dochází vždy a je to součástí procesu opotřebení při přibližování se dvou povrchů.[9]

2.3.4 Trhliny a lomy

Trhlinou rozumíme porušení celistvosti materiálu v části jeho průřezu. Lomem je porušení celistvosti materiálu v celém jeho průřezu.

Důvody vzniku trhliny nebo lomu jsou stejné jako tomu je u deformací a otláčení, tj. působení vnitřních nebo vnějších sil vyvolávající napětí, které v části nebo v celém průřezu překoná mez pevnosti nebo mez únavy namáhaného materiálu. V případě, že je materiál křehký, tak pod napětím praskne a vytvoří se trhlina či lom. Vlivy, které tyto deformace zapříčiňují, mohou být různé. Vliv na to má zejména: nevhodná konstrukce (nevhodný rozměr či tvar), nesprávně zvolený materiál (nedostatečně pevný nebo nedostatečně houževnatý), nesprávná výrobní technologie (vruby a zbytková pnutí), degradace materiálu v závislosti na čase (stárnutí, únava materiálu, koroze) a nesprávný provoz (zanedbání údržby, přetěžování).[9]

Trhliny patří do nejčastějších poškození a to zejména u odlitků, svařenců a u tepelně zpracovávaných výrobků. Trhliny narušují pevnost materiálu, způsobují netěsnosti a u součástí, které jsou namáhány dynamicky, vedou ke vzniku únavových lomů.

Lomy rozdělujeme na statické a únavové.[9]

Statický lom vzniká při překročení meze pevnosti materiálu v některém průřezu. Dle vlastností samotného materiálu a způsobu jeho namáhání se mění vzhled lomové plochy. Statický lom se nejčastěji vyskytuje u ohybového namáhání. Lomová plocha takového statického lomu je zhruba rovinná a kolmo ke směru napětí. Povrch lomové plochy je drsný, zrnitý a buď jemnější nebo hrubší v závislosti na velikosti jednotlivých zrn použitého materiálu. Vzhled celé plochy lomu by měl být stejný. Statický lom, který je vyvolaný namáháním v krutu, má u houževnatého materiálu lomovou plochu šroubovitou a u tvrdšího materiálů je jehlicovitě roztržena. Kombinace namáhání (jako např. ohyb a krut dohromady) mají vzniklé lomové plochy komplikovanějšího tvaru, ve kterém se dá rozlišit převládající typ namáhání, jelikož se plocha lomu blíží k jeho

typickému lomovému vzhledu více, než k vzhledu lomové plochy ostatních působících namáhání.[9]

Únavový lom vzniká v případě, kdy je překročena mez únavy materiálu. Po určitém počtu cyklů působení napětí v konkrétním místě povrchu součásti vzniká zárodek trhliny. Při pokračování v míjivém působení proměnlivého zatížení se trhlina v cyklu otevírání a zavírání postupně zvětšuje a “roste“ směrem do hloubky materiálu. Tímto procesem otevírání a zavírání se povrch uvnitř trhliny vyhladí až vyleští, a nabývá charakteristického lasturovitého vzhledu. Vlivem postupného rozšiřování únavového lomu se zmenšuje nosný průřez součásti a to až do doby, kdy působící napětí přesáhne mez pevnosti materiálu a zbytek původního průřezu se zlomí statickým lomem. Tento jev má za následek typický vzhled lomové plochy, rozdělené na plochu s lasturovitě vyhlazeným povrchem (únavový lom) a plochu s typicky drsným povrchem křehkého lomu (statický lom).[9]

2.3.5 Opotřebení

Jedná se o nežádoucí změnu na struktuře povrchu nebo rozměrů pevných těles konajících vzájemný pohyb nebo úbytek povrchového materiálu tělesa při vzájemném pohybu s volným či vázaným médiem, které se procesu účastní. V místě v němž dochází ke styku povrchů těles nebo tělesa s médiem vzniká pružná i plastická deformace povrchových nerovností, což s sebou nese i narušení oxidické ochranné vrstvy a tvorbu tzv. adhezních spojů – mikrosvarů, studených spojů. Tyto spoje jsou usmýkávány vzájemným pohybem těles a dochází k uvolňování částic nebo k přenosu částic mezi tělesy. Čím jsou povrchy těles drsnější, tím více se uplatňuje zaklínění nerovností a jejich postupné odřezávání či vyrývání rýh do měkčích materiálů. Tomuto fenoménu se říká abraze a síla tření je zde součtem adhezní smykové síly a abrazivní rycí síly. Rycí síla vzniká při vnikání ostrohranných částic mezi funkční povrchy a nebo při poškození povrchu těles např. únavou či korozí. U strojních součástí, které jsou od výroby určeny k vzájemnému pohybu, se rycí síla vyskytuje velmi ojediněle.[10]

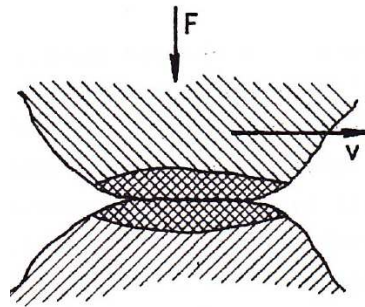
2.3.5.1 Klasifikace opotřebení

Zdrojem samotného procesu opotřebení nemusí být pouze mechanický účinek, ale ku příkladu také chemické nebo elektrické vlastnosti. V provozu se obecně jedná o kombinace těchto vlivů. Opotřebení dle ČSN 01 5050 rozdělujeme na několik druhů, a to: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové, vibrační.[1,10]

2.3.5.2 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení můžeme popsat jakožto oddělování částic v místě dotyku funkčních ploch při relativním pohybu, čímž dochází k narušování povrchových ploch a ke kovovému dotyku obou materiálů. Adhezivním opotřebením je označováno i mikrospojové porušování, vzniklé vzájemným působením povrchových nerovností, obvykle vedoucí k přenosu materiálu mezi funkčními povrchy navzájem. Princip adhezivního opotřebení je znázorněn na obr. 4.[1,7]

Na výskyt adhezivního opotřebení mají převážně vliv tyto vlastnosti: schopnost materiálu vytvářet spoje, zatížení a rychlostrelativního pohybu, poloměr zakřivení nerovností a hloubka vniku.[1]



Obr. 4 – Princip adhezivního opotřebení [11]

V případě přítomnosti média mezi funkčními plochami může být adhezivní opotřebení významně ovlivněno. Například ve vakuu kov neoxiduje (nevznikají tedy ochranné oxidické vrstvy na povrchu materiálu) a tím je větší šance pro tvorbu adhezivních mikrospojů.[1]

Intenzitu vlastního opotřebení rozlišujeme od mírné formy až po formu intenzivní „zadírání“. Určit intenzitu opotřebení můžeme dle panujících podmínek a intenzity faktorů, které mají na opotřebení vliv.[1]

U mírného opotřebení se jedná o děj, kdy je rychlost vzniku ochranných oxidických vrstev na povrchové vrstvě kovu větší než rychlost jejich porušování při vzájemném působení funkčních ploch.[1]

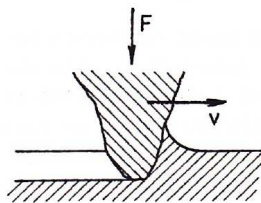
U druhého extrému, čili u velmi hlubokého narušování funkčních ploch jde o opotřebení provázené vznikem četných částic, jejich separací a přenosem mezi povrchy

navzájem a změnu struktury funkčních povrchů vlivem plastické deformace. Odpor proti vzájemnému pohybu je velmi vysoký a hrozí, že se pohyb zcela zastaví, tzv. zadření.[1,7]

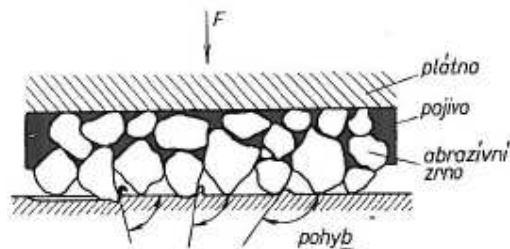
2.3.5.3 Abrazivní opotřebení

Jedná se o oddělování částic z funkčního povrchu jednoho tělesa působením obvykle drsnějšího a tvrdšího povrchu tělesa druhého, nebo působením tzv. abrazivních částic. Typický vzhled abrazivního poškození materiálu jsou rýhy na jeho povrchu. Princip tohoto jevu je zřetelný z obr. 5. Rozlišujeme zde obecně dva způsoby rýhování abrazivem.

První je opotřebení funkčního povrchu tvrdými částicemi, interakce částic a součástí. Jinak se to nazývá také opotřebení materiálu vázaným abrazivem, kdy je abrazivo původně spojené určitým médiem. Děje se tak například u nástrojů užívaných pro zemní práce, jakožto plužní čepel nebo zub rypadla. Tento jev znázorňuje obr. 6.[1,8]

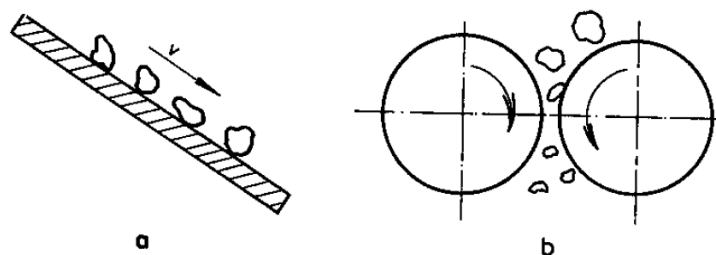


Obr. 5 – Princip abrazivního opotřebení [11]



Obr. 6 – Abrazivní opotřebení vázanými částicemi [12]

Druhý případ je opotřebení dvou funkčních ploch, mezi kterými se nacházejí volné abrazivní částice. Jedná se o interakci 3 těles, která se vyskytuje u všech pohybových mechanismů do nichž vnikají částice z okolí. Děje se tak například u vodících ploch obráběcího stroje nebo u pohybujícího se pístu s nečistým médiem. Schéma tohoto procesu je zobrazeno na obr. 7. [1,7]



a – interakce dvou těles, b – interakce tří těles

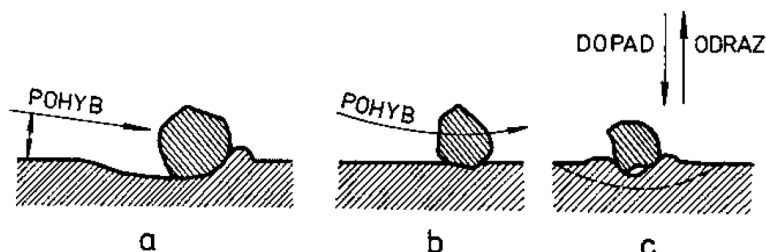
Obr. 7 – Abrasivní opotřebení s volnými částicemi [13]

Jako zvláštní jev můžeme uvést abrasivní opotřebení kluzných ložisek a čepů vlivem abrasiva obsaženého v nečistém mazivu. Tvrdý čep se opotřebuje více než měkkší výstelka ložiska. Děje se tak vlivem zamáčknutí abrasivních částic do výstelky, které poté rýhují tvrdý čep.[1]

Abrasivní opotřebení ve větší míře podstupují pracovní součásti drtičů, mlýnů, rýpadel, vrtacích korunek a pneumatických kladiv. U nich kromě rýhování dochází i k plastické deformaci povrchu vlivem rázů a vysokého tlaku. Právě tyto plastické deformace často rozhodují, zda-li je součást schopna dalšího pracovního cyklu.[1]

2.3.5.4 Erozivní opotřebení

Pro erozivní opotřebení je charakteristické oddělování částic a poškozování funkčního povrchu: částicemi unášenými proudem kapaliny (např. trysky, vodní turbíny, aj.), částicemi unášenými proudem plynu (např. tryskače, práškovody, ventilátory), proudem kapaliny, páry, kapek nebo plynu. Způsoby poškození povrchu erozivním opotřebení jsou znázorněny na obr. 8.[1]



a – částice nesené proudem plynu, b – částice nesené proudem kapaliny, c – částice nesené proudem kapaliny, kapek, páry a nebo plynu

Obr. 8 – Mechanismy erozivního opotřebení [13]

Intenzitu erozivního opotřebení ovlivňují faktory, vztahující se jak k opotřebované vnější vrstvě tělesa, tak k nosnému médiu a částicím v něm obsaženým. Jedná se především o chemické složení působícího média, teplotu, relativní rychlost a typ, tvar, tvrdost a velikost částic. Úhel, pod kterým částice dopadají na povrch tělesa, významně ovlivňuje sílu a intenzitu erozivního opotřebení.[1,2]

Typické, u tohoto druhu opotřebení, je nerovnoměrné narušení funkčního povrchu a mnohdy i značné povrchové zvlnění. To je následkem vlivu turbulentního proudu média, při čemž se části materiálu oddělují i v nejnižších místech exponovaného povrchu. Oproti tomu například u adhezivního či abrazivního opotřebení je typickým jevem opotřebení především nejvyšších vrcholů nerovností povrchu materiálu.[1]

Nerovnoměrné opotřebení vlivem eroze má za následek vyřazování součástí strojů, které vlivem tohoto opotřebení ohrožují provoz systému, nebo nejsou schopny správně vykonávat svou funkci. Součásti strojů, které podléhají erozivnímu opotřebení, jsou například oběžná kola čerpadel, hrany lopatek parních turbín nebo různé ohyby, kolena a změny průměrů potrubí, kde proud média mění směr, rychlost a kde vznikají turbulence.[1,2]

2.3.5.5 Kavitační opotřebení

Proces kavitačního opotřebení je definován jako oddělování částic a poškozování povrchu tělesa v oblasti zanikání kavitačních dutin v kapalině.

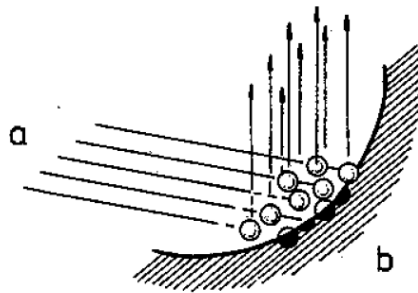
Vznik kavitačních dutin je zapříčiněn snížením tlaku v určité oblasti kapaliny vlivem změny rychlosti proudění nebo jeho podmínek. Děje se tak, když se při dané teplotě dosáhne tlaku nasycených par. V kapalině se poté objevují malé dutinky, vyplněné parami kapaliny. V médiu v oblastech s vyšším tlakem vzniklé dutiny zmenšují svůj objem až zcela zanikají. Pohyb kapaliny ke středu kavitačních dutin, vede v momentu jejich zániku ke vzniku hydrodynamických rázů, čímž je povrch těles, nalézajících se v jejich těsné blízkosti, namáhán. Čas mezi vznikem a zánikem jednotlivých dutin je řádově od 10^{-2} až 10^{-3} sekundy.[1,7]

Krom účinků tlaku se na průběhu kavitačního rozrušování materiálu mohou podílet chemické, elektrochemické a další faktory. Při předpokladu, že hlavním a největším vlivem na kavitační opotřebení jsou opakované tlakové účinky, je možné průběh opotřebení

porovnat s únavovým opotřebením. Potvrzuje to i fakt, že intenzita kavitace je v čase proměnlivá. Nejprve se kumulují poruchy na povrchu tělesa, ale k oddělování částic nedochází. Na materiálu je pouze opticky rozeznatelné povrchové zmatnění, které až později přechází ke vzniku trhlin.[1,7]

Kavitační opotřebením může být ovlivněno chemickými a elektrochemickými vlastnostmi média. Dopad a stopy těchto účinků mohou být i opticky rozeznatelné. Existují i případy, kdy se podařilo omezit účinky kavitace pomocí změny chemického prostředí nebo působením elektrického napětí na části hydraulických mechanismů.[1,2]

Kavitačním opotřebením jsou nejčastěji zasaženy vodní turbíny a čerpadla. Dále se toto opotřebením vyskytuje například u kluzných ložisek, vložek válců chlazených vodou ve spalovacích motorech, v redukčních ventilech, v hydraulických systémech atd. Proces kavitačního opotřebením je uveden na obr. 9.[1,2]



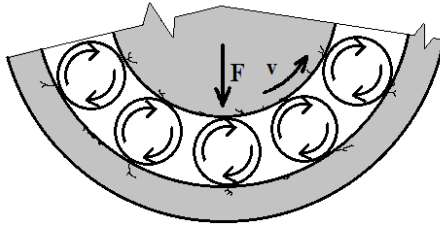
a – proud tekutiny, b – povrch tělesa

Obr. 9 – Princip kavitačního opotřebením [13]

2.3.5.6 Únavové opotřebením

Únavové opotřebením můžeme popsat jako postupnou kumulaci poruch v povrchu tělesa při intenzivním stykovém napětím na povrchu tělesa. Zde je velmi významné, zda je napětím působícím na povrch pod mezí kluzu nebo nad ní. Jedná-li se o napětím pod mezí kluzu, tak jde o vysokocyklovou únavu. V opačném případě mluvíme o únavě nízkocyklové.[1]

Strojní součást, která na únavové opotřebením trpí nejvíce jsou valivá ložiska (obr. 10), nákolky železničních dvojkolí, ozubená kola, kolejnice a další díly, které pracují s rázy nebo vibracemi.[1]



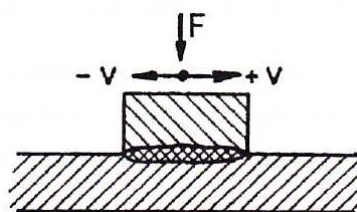
Obr. 10 – Mechanismus únavového opotřebení s cyklickým pohybem

Materiály málo plastické nebo křehké mohou trpět na oddělování částic povrchové vrstvy mechanismem křehkého lomu a to zejména při vysokých úrovni smykového namáhání.[1]

Efekt únavového opotřebení se projevuje zejména na povrchu těles, ale vlivem tohoto jevu dochází až ke vzniku únavového lomu vedeného skrz celý průřez tělesa. To znamená, že ze zdánlivě nepatrného poškození povrchu únavovým opotřebením, které by vedlo jen ke zhoršení funkce stroje či k vyšší hlučnosti nebo vyšším vibracím, se těleso může nenávratně poškodit únavovým lomem, čímž by došlo k poruše stroje nebo k jeho havárii. Z toho důvodu je žádoucí únavovému opotřebení předcházet volbou správného materiálu na výrobu součástí a volbou správné konstrukce, případně již existující únavové opotřebení pečlivě sledovat a správnými kroky jej eliminovat.[1,7,8]

2.3.5.7 Vibrační opotřebení

Opotřebení, pro které je charakteristická separace povrchových částic a poškozování obalových vrstev tělesa vlivem kmitavých tangenciálních posunů funkčních povrchů těles za přítomnosti normálového zatížení. Tento jev je znázorněn na obr. 11. Vibrace jsou obvykle malé a jejich amplitudy se pohybují v hodnotách 0,1 až 100 μm . Vzniká tak nepatrný relativní pohyb a částice, vznikající mezi funkčními povrchy, se stěží odstraňují. Případné mazivo mezi funkčními plochami tak může být znehodnoceno či dokonce zcela vytlačeno.[1,10]



Obr. 11 – Princip vibračního opotřebení [11]

Tento druh opotřebení se velmi často špatně rozeznává od napadení korozí. Příčinou je i zbarvování místa opotřebení. Například litiny či oceli při vibračním opotřebení produkují oxidy železa, které mají zabarvení v odstínech hnědé barvy.[1]

Vibrační opotřebení ale nemá oxidaci jako podmínku pro jeho vznik. Nicméně přítomnost oxidace průběh tohoto opotřebení významně ovlivňuje.

Reálně se vibrační opotřebení vyskytuje poměrně běžně. Nejvýznaměji jím trpí pohyblivá uložení, na která působí kmity od vnějšího zdroje nebo svoje vlastní. Jsou to například různé čepy, náboje kol, pohybové šrouby, valivá ložiska, spojky a hřídele.[1]

Rozlišujeme dva případy vibračního opotřebení:

- 1) Prvním případem je poškozování povrchu materiálu působením vibrací v konstantním směru nebo místě.
- 2) Druhým případem je poškozování pevných uložení nebo spojů. To vzniká například poddajností nedostatečně pevných hřídelů kol, což vede k jejich ohybu. Mnohdy je spoj náboje kola s hřídelí vlivem opotřebení ztíženo rozebrat a je i zhoršena kvalita styčných povrchů. Dalším nežádoucím produktem takového vibračního opotřebení je vznik volných částic, které mívají abrazivní vlastnosti. Při rozebírání nalisovaného spoje mohou takové abrazivní částice výrazně poškodit povrch součástí kombinací abrazivního a adhezivního opotřebení. Zvýší se i odpor při demontáži, který může být i vyšší než pevnost materiálu a tak je zde riziko poškození součástí.

Vibrační opotřebení narušuje povrch i velmi kvalitních materiálů s vysokou trdotí. Tím je umožněno vzniku únavového opotřebení či únavového lomu.[1,2]

2.3.5.8 Kombinované opotřebení

S výskytem čistě jednoho opotřebení se setkáváme ojediněle. Obecně vzato se setkáváme jen s kombinací více typů opotřebení. V určitých případech jde i o vyvolávání jednoho opotřebení opotřebením jiného typu.[1]

2.3.6 Analýza opotřebení strojních součástí

Analýza důvodů opotřebení je často velmi složitá záležitost, která je ovlivňována nejrůznějšími faktory a vlivy, o kterých je pojednáno u jednotlivých typů opotřebení.

V případě, že se nepodaří správně analyzovat zdroj a důvod vzniku opotřebení, bývají následující kroky ohledně nápravy opotřebení značně obtížné. Z toho důvodu musí být analýza systematická a komplexní. Hodnocení konkrétního případu může velmi zrychlit a usnadnit specializace zkoumajícího pracovníka a praktické zkušenosti v oboru. Při analýze věnujeme svou pozornost vlivům na průběh opotřebení, kterými jsou:

- 1) Vnitřní podmínky: volba technologie výroby součástí, volba materiálu, vznik vad negativně ovlivňující provoz součástí v systému, volba stroje pro danou funkci.
- 2) Vnější podmínky: pracovní prostředí (tlak, vlhkost, teplota, prašnost ...), dynamické zatížení funkčního povrchu, vlastnosti média (složení, rychlost proudění).
- 3) Provozní podmínky: shoda předepsaných podmínek s reálnými podmínkami, jak často jsou provozní podmínky překračovány, chyby lidského faktoru.[1]

Správná volba materiálu pro výrobu exponované součásti, je jeden z nejdůležitějších vlivů na opotřebení z výše uvedeného seznamu. Volba vhodného materiálu má za cíl najít ideální poměr nákladů na výrobu a údržbu součástí s ohledem na délku jejich životnosti v provozu. S hodnocením vhodnosti zvoleného materiálu, k účelu vyrobené součásti, je řešeno v praktické části této práce.[1,10]

3. Významné faktory působící na abrazivní opotřebení

Na procesu abrazivního opotřebení kovových materiálů se podílejí zejména zatížení a vlastnosti abraziva, kterými jsou pevnost, tvrdost, velikost a tvar.

U plastického materiálu se opotřebení především projevuje tvorbou rýh v povrchu a oddělováním částic v podobě třísek. Poloha abrazivních částic je také klíčová, jelikož exponovaný materiál je oddělován pouze v případě vhodné orientace abrazivního zrna. Působení abrazivních zrn na opotřebovaný povrch obecně rozdělujeme na tři typy:

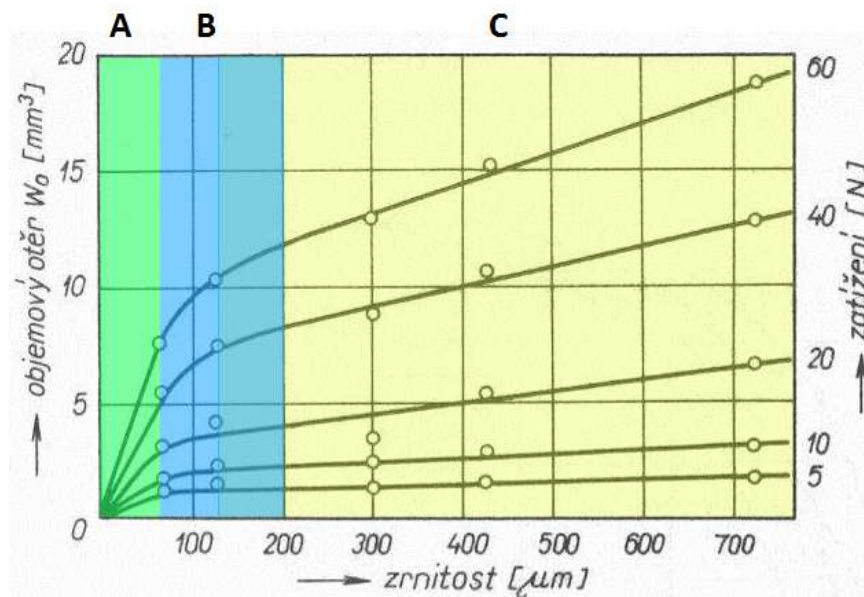
- tvorba valu kolem vznikající rýhy,
- tvorba nárůstku před zrnem,
- tvorba třísky před hranou abrazivního zrna.[12,14]

Počty rýh na povrchu materiálu rostou v přímé úměře s narůstajícím zatížením. Šíře vzniklé rýhy je dána tvarem a velikostí abrazivní částice a zpravidla nepřesahuje 20 % jejího rozměru. K plastické deformaci v místě kontaktu povrchu a abraziva dochází i při menším zatížení. Počet částic abraziva, které se dostanou do kontaktu s exponovaným povrchem, roste s nárůstem zatížení.[12,14]

3.1.1 Velikost abraziva

Vlivem provedených studií víme, že závislost opotřebení materiálu na zatížení a velikosti částic není lineárního charakteru. Typický průběh této závislosti při konstantní dráze je zobrazen na obr. 12, u kterého jsou zřetelné tři fáze průběhu.

- A – oblast velmi malého abraziva, přímá úměra objemového úbytku a velikosti abraziva.
- B – oblast přechodu mezi lineárními závislostmi.
- C – oblast většího abraziva, závislost úbytku materiálu a velikosti zrna je lineární.



Obr. 12 – Závislost objemového úbytku opotřebením na velikosti abraziva a zatížení [1]

Velikost abrazivních částic v nelineární fázi B, kde se mění závislost opotřebením na velikosti abraziva, je označována jako takzvaná kritická velikost abrazivních zrn s velikostním rozmezím 70 až 200 μm .

Informace o kritické velikosti abrazivního zrna je v praxi velmi významná. Spolu se zmenšováním velikosti abraziva pod kritickou velikost strmě klesá i hodnota abrazivního účinku. Tohoto jevu se využívá u řešení nežádoucích účinků abraziva, které proniká do maziva.[1]

3.1.2 Množství abraziva

Při větším množství abraziva dochází k vrstvení či shlukování, vedoucím k abrazivnímu opotřebením i při menší velikosti abraziva než velikost vůle mezi povrchy. Zvyšuje se také pravděpodobnost výskytu ostrohranných částic, které výrazně přispívají k intenzitě opotřebením.[1,14]

3.1.3 Tvar abraziva

Abrazivní vlastnosti jsou ovlivněny i tvarem částic který lze charakterizovat:

- množstvím hran a výčnělků z roviny (makroskopické hledisko),
- hladkostí povrchu hran a výčnělků (mikroskopické hledisko),
- poloměrem výčnělků.

Na vliv těchto faktorů není jednotný názor, je to způsobeno komplikovaným měřením, obtížným hodnocením tvaru abrazivních částic, jejich chemickým složením a různorodými vlastnostmi.[1]

Co lze ale s jistotou určit je, že pravděpodobnost oděru exponovaného materiálu abrazivem stoupá spolu s odlišností abrazivní částice od kulového tvaru.[12]

3.1.4 Pevnost abraziva

Pevnost abrazivních částic je důležitým vlivem na průběh opotřebení a jeho intenzitu. Při vzájemném pohybu abrazivního materiálu a funkčního povrchu dochází jak k rýhování a oddělování exponovaného materiálu, tak k otupování a odlamování hran abraziva.[12,14]

Vocel a Dufek [1] ve své publikaci prokázali, že se průměrná velikost abrazivních zrn při působení malé síly nemění. Co se ale mění, je mikrogeometrie částic. Jejich zkouška spočívala ve zkoumání abrazivního účinku částic křemenného písku (SiO_2) o velikosti zrna 1 – 2 mm. Částice byly uloženy v brusné nádobě společně s válcovými vzorky z oceli 12 050 o tvrdosti 200 – 210 HV, které byly za rotace nádoby vystaveny abrazi. Po ukončení zkoušky byly abrazivní částice prosety skrze síta a zjistilo se, že průměrná velikost zrn abraziva klesla maximálně o 10 %, ale jejich účinnost při opotřebení klesla až o 60 %.[1,12]

3.1.5 Tvrdost abraziva

Abrazivní efekt je způsoben tvrdými, většinou minerálními částicemi. Zhruba polovina všech případů opotřebení strojního vybavení je způsobeno právě abrazí. Tvrdost je nejdůležitější vlastností abrazivních částic. Význam této hodnoty se uplatňuje ve vztahu k tvrdosti exponovaného materiálu.[13,15]

Úbytek materiálu abrazivním opotřebením je nepřímo úměrný k jeho tvrdosti. Úbytek materiálu je velký v případě, že tvrdost materiálu je menší než tvrdost abraziva. V opačném případě je větší odolnost proti opotřebení a svého maxima dosahuje když platí vztah (3):

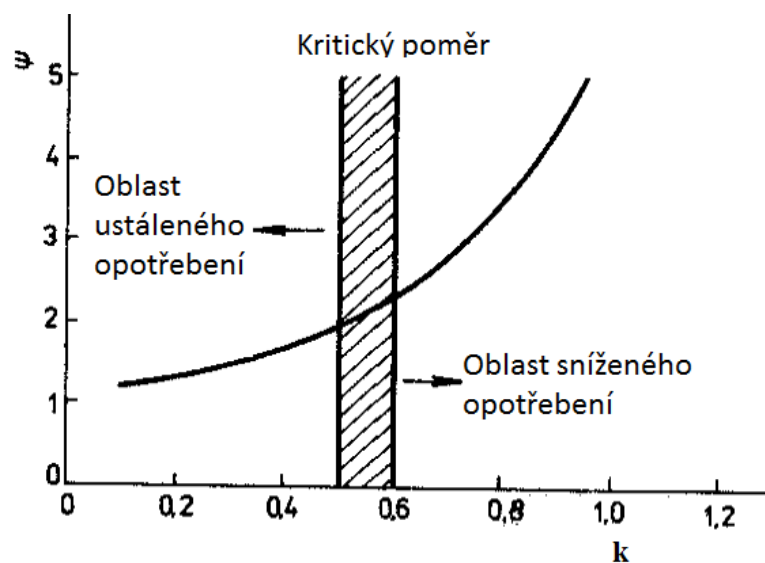
$$H_m = \frac{H_a}{k} \quad (3)$$

H_m – tvrdost materiálu,

H_a – tvrdost abraziva,

k – koeficient tvrdosti.[12]

Hodnota koeficientu tvrdosti v rozmezí 0,5 – 0,6 byla zjištěna jako zlomová s ohledem na charakteristiku odolnosti proti opotřebení ψ . Pokud tuto hodnotu koeficient přesahuje, můžeme hovořit o prudkém zrůstu odolnosti. Tuto závislost znázorňuje obr. 13.



Obr. 13 – Závislost koeficientu tvrdosti na poměrnou odolnost proti opotřebení [13]

4. Metody zkoušení odolnosti materiálů proti opotřebení

Kapitola pojednává o metodách a nejčastěji používaných přístrojích pro zjištění odolnosti materiálu vůči jednotlivým druhům opotřebení.

4.1 Zkoušky odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení

V průběhu laboratorních zkoušek je žádoucí udržet stále stejnou hodnotu intenzity opotřebení a získat co nejmenší rozptyl výsledných hodnot. Existuje celá škála laboratorních zkoušek abrazivního opotřebení a přístrojů k tomu určených. Od zkoušení kluzné abraze bez rázového zatížení až po čelistový drtič modelující procesy opotřebení při drcení. Takové zkoušky mají mnoho výhod, jako např. cena, jednoduchost řízení volených parametrů, časová náročnost při zkoušení různých materiálů za sebou. Volba druhu zkoušení a zkušebního zařízení závisí na: stavu abraziva (zda-li je abrazivo volné nebo vázané), velikosti abrazivních částic, tvaru a tvrdosti, směru a rychlosti relativního pohybu.[12,16]

Je žádoucí najít společné prvky laboratorních a provozních zkoušek. Komplikace vznikají v odlišnosti mechanismu opotřebení, v absenci rázového zatížení a odlišném abrazivu.[17]

Zkušební přístroje se rozdělují dle podmínek v oblastech kontaktu abraziva a exponovaného povrchu na:

- přístroje s volnými částicemi,
- přístroje s vázanými částicemi,
- přístroje s vrstvou volných částic mezi stykovými povrchy.

4.1.1 Přístroje pro laboratorní zkoušku s volným abrazivem

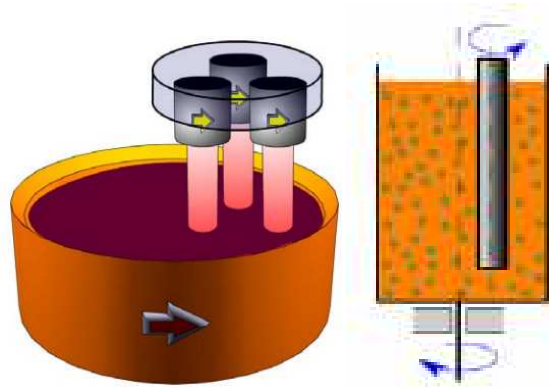
Používané přístroje se dělí na:

- přístroje s brusnou nádobou,
- přístroje s pružným kotoučem,
- bubnové přístroje.

4.1.1.1 Přístroje s brusnou nádobou

Hlavním prvek přístroje je nádoba, do které je nasypáno abrazivo. Zkušební vzorky jsou uchyceny do rotujících hlavic, takže se otáčejí kolem své osy a zároveň jsou “ponořeny“ do abraziva. Nádoba s abrazivem také rotuje a tudíž vzniká kombinovaný vzájemný relativní pohyb abraziva a vzorku, čímž se vzorek rovnoměrně opotřebuje. Tento proces je znázorněn na obr. 14.[18]

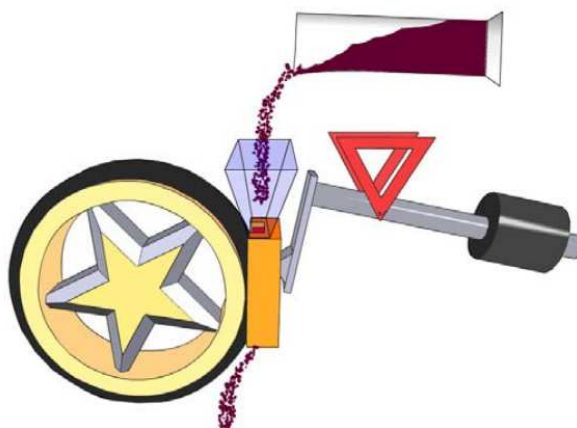
Výhodou přístrojů s brusnou nádobou je velká podobnost zkušebních podmínek podmínkám provozním. Další výhodou je možnost zvolit jakékoliv abrazivo a zkoušet jakýkoliv materiál při velkém rozsahu teplot. Nevýhodou je postupný pokles abrazivity částic vlivem jejich interakce s povrchem zkoušeného materiálu, což si žádá výměnu abraziva ve vhodných časových intervalech.[18]



Obr. 14 – Přístroj s brusnou nádobou [18]

4.1.1.2 Přístroje s pružným kotoučem

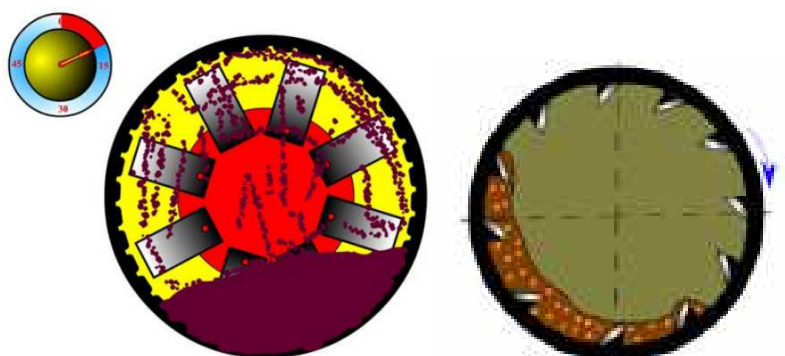
Tyto přístroje pracují s abrazivním účinkem částic sypaných do mezery mezi vzorkem a rotujícím kotoučem. Podmínky panující při tomto procesu se blíží provozním podmínkám nástrojů a těles pracujících v zemině. Nevýhodou tohoto typu zkoušení je snížená reprodukovatelnost výsledků zkoušek při volbě nestandardního abraziva s různě velikými částicemi. Tento typ přístrojů je zobrazen na obr. 15.[18]



Obr. 15 – Příklad s pružným kotoučem [18]

4.1.1.3 Bubnové přístroje

Bubnové přístroje vynikají svou jednoduchostí a spolehlivostí v provozu. Umožňují měření hned několika vzorků v jednom cyklu. Výhodou je možnost volby druhu abraziva (např. písek, půda, kamenná drť apod.). Schéma funkční části bubnového přístroje je uvedeno na obr. 16.[18]



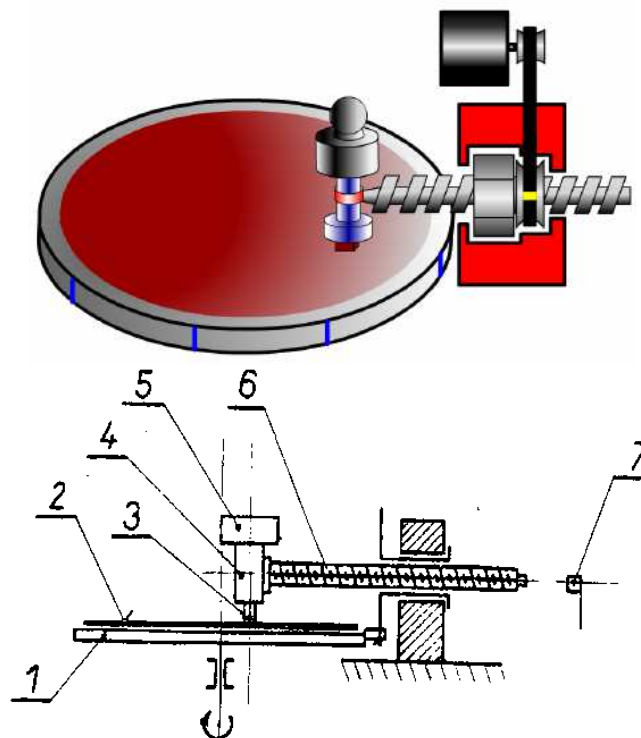
Obr. 16 – Bubnový přístroj [18]

4.1.2 Přístroje pro laboratorní zkoušku s vázaným abrazivem

Vázané abrazivní částice mohou být ve formě buď brusného kotouče nebo brusného plátna. Přístroje s brusným plátnem se používají ke zkouškám kovových materiálů nejvíce. Jejich výhodou je spolehlivost a jednoduchost. Rozptyl výsledků je poměrně malý. Nevýhodná je zejména proměnná kvalita použitého brusného plátna, která se musí průběžně kompenzovat etalony.[18]

4.1.2.1 Příklad s brusným plátnem

Brusné plátno je upevněno na vodorovné desce, která se otáčí konstantní rychlostí okolo své osy. Zkoušený materiál je upnut v hlavici ramene a je k brusnému plátnu přitlačován silou vyvozenou závažím. V průběhu zkoušky je zkoušený materiál posouván od středu brusného plátna k jeho okraji a to za pomoci zařízení zajišťujícího radiální posuv, aby částí svého povrchu přicházelo neustále do kontaktu s nepoužitým brusným plátnem. Po ujetí předepsané dráhy se přístroj vypne. Tento přístroj znázorňuje obr. 17.[19]



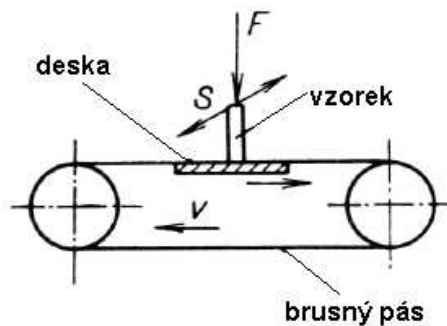
Obr. 17 – Příklad s brusným plátnem [19,20]

Legenda: 1.otáčející se vodorovná deska, 2.brusné plátno, 3.zkušební těleso, 4.upínací hlavice, 5.závaží k vyvození přitlačné síly, 6.zařízení radiálního posuvu, 7.koncový spínač

4.1.2.2 Příklad s brusným pásem

Předností tohoto přístroje je jeho spolehlivost a jednoduchost. Rozsah výsledků je poměrně malý (průměrně v rozmezí 5 %). Nevýhodou je klesající kvalita abrazivity brusného pásu v průběhu zkoušky. Vázané abrazivní částice se postupně odlupují, otupují

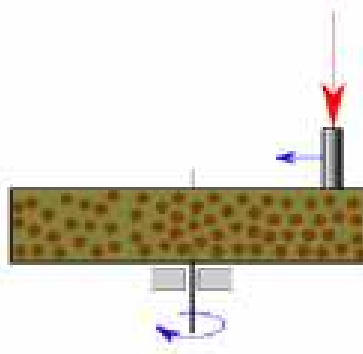
a povrchové nerovnosti se vyplňují částicemi otěru. Jak přístroj pracuje je zobrazeno na obr. 18.[19]



Obr. 18 – Přístroj s brusným pásem [1]

4.1.2.3 Přístroj s brusným kotoučem

Brusný kotouč tvořený velkým množstvím tvrdých zrněk, která jsou pojivem spojené dohromady. Zrnka jsou vyrobená z brusných materiálů, kterými jsou např. karbid křemíku nebo umělý korund. Ostré hrany zrn odkrajují tenké třísky materiálu. Výhodou užití tohoto přístroje je možnost práce za vysokých teplot. Princip zkoušky s brusným kotoučem je znázorněn na obr. 19.[19]



Obr. 19 – Přístroj s brusným kotoučem [20]

Kromě přístrojů výše uvedených je známo i několik zkušebních zařízení provozního charakteru jako např. kladivové mlýny nebo laboratorní drtiče. Laboratorní zkoušky pomáhají modelovat jen některé základní parametry, tudíž jsou získané výsledky aplikovatelné až po precizní analýze skutečných provozních podmínek. Laboratorní metody jsou vhodné ke studiu vlivu jednotlivých faktorů na intenzitu a charakter opotřebení.[19]

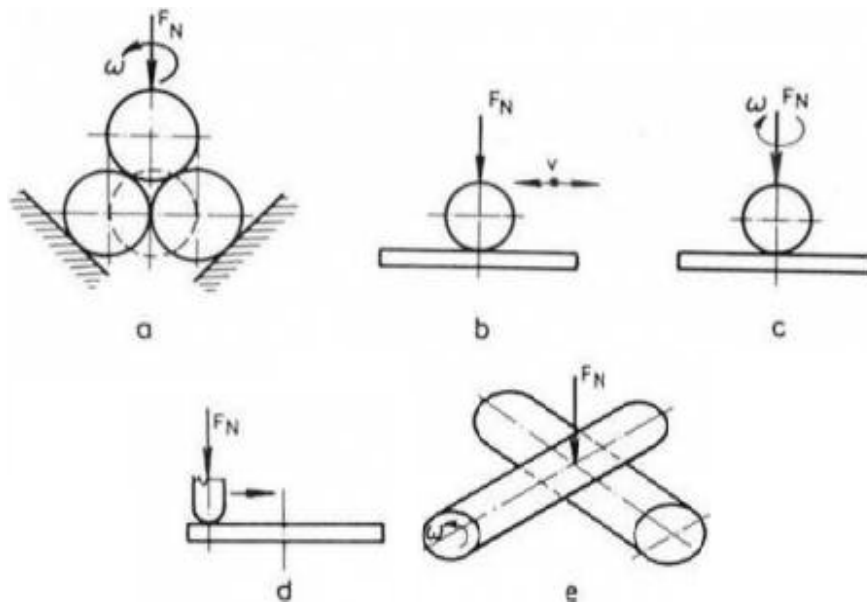
4.1.2.4 Provozní zkoušky abrazivního opotřebení

Za provozní zkoušky odolnosti kovového materiálu proti abrazivnímu opotřebení působí i jiné degradační procesy, okolní prostředí, nekonstantní zatížení atd. Provozní zkoušky musejí splňovat jeden podstatný požadavek a tím jsou stejné podmínky abrazivního opotřebení v provozu. Zkouška musí být zhotovena v relativně krátkém čase v porovnání s životností součásti. Výsledek provozní zkoušky je touto podmínkou často ovlivněn. Z tohoto důvodu je provozní zkouška významná jen pro součást či zařízení pracující ve stejných podmínkách.[12]

4.2 Zkoušky odolnosti materiálu proti adhezivnímu opotřebení

Geometrie třecího uzlu je hlavním aspektem k rozdělení zkoušek a přístrojů adhezivního opotřebení. Dotyk zkoušených těles je buď bodový, plošný a čárový.[1,21]

4.2.1 Zkoušení bodovým dotykem



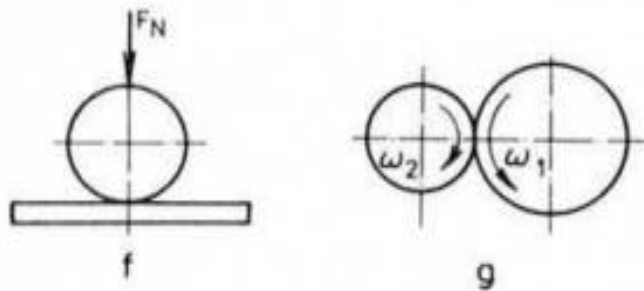
Obr. 20 – Typy třecích uzlů u bodového dotyku [22]

Užití těchto metod je převážně pro zkoušení maziva a výzkumu procesu opotřebení a tření. Klady přístrojů s bodovým dotykem jsou jednoduché konstrukce a vysoká rychlost kluzu s levným pohonným systémem. Zápory jsou obtížná výroba zkoušených vzorků materiálu a snižování hodnoty tlaku na ploše dotyku v průběhu opotřebení kulové plochy. Jednotlivé typy třecích uzlů u bodového dotyku jsou uvedené na obr. 20. Mezi nimi je

i metoda zkřížených válců, která dovoluje měnit zatížení i rychlost kluzu ve velkém rozsahu. Výhodou této metody je snadná výroba zkušebních válečků a nevýhodou je možný výskyt vibrací při vyšších kluzných rychlostech a nižším zatížení.[1,21]

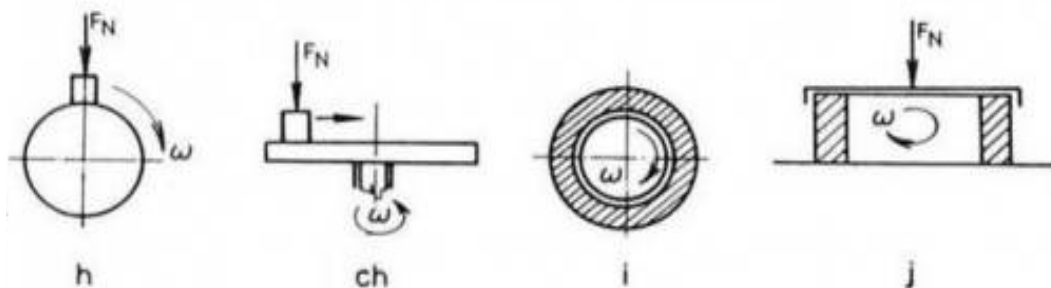
4.2.2 Zkoušení čárovým dotykem

Výhodami této metody jsou: tvar vzorků se snadnou výrobou, časově nenáročná zkouška a velký rozsah zkušebních parametrů. Nevýhodami je snížení měrného tlaku ve stykové oblasti v průběhu zkoušky. To je zapříčiněno postupným opotřebením zkušební vzorku. Zkušební přístroje se rozdělují na přístroje s kotoučkem a příložkou, s dvěma kotoučky a s kotoučkem a dvěma příložkami. Třecí uzly čárového dotyku jsou uvedeny na obr. 21.[1,21]



Obr. 21 – Typy třecích uzlů u čárového dotyku [22]

4.2.3 Zkoušení plošným dotykem



Obr. 22 – Typy třecích uzlů u plošného dotyku [22]

Nejběžnější typ přístrojů ke zkoumání a hodnocení odolnosti adhezivního opotřebením. Zkoušení je možno provádět za sucha i s mazivem. Výhodou této zkoušky je snadná výroba zkoušených vzorků materiálu a nevýhodou jsou omezené zkušební

podmínky, složitá konstrukce přístroje a jeho pohonného systému. Moderní zařízení dokážou zkoušku provést za extrémních teplot, v různých atmosférách a i ve vakuu. Konstrukce třecích uzlů jsou uvedeny na obr. 22.[1,21]

4.3 Zkoušky odolnosti materiálu proti erozivnímu opotřebení

Přístroje pro tyto zkoušky jsou realizovány s ohledem na typ eroze, která probíhá v kapalině, kapalině s částicemi, plynu, plynu s částicemi a v proudu páry a kapek. Druhy přístrojů: s brusnou nádobou, tryskací, experimentální turbíny, s principem volného pádu a odstředivé síly, s proudem plynu, páry nebo vody a s oběhovou soustavou.[1,21]

4.3.1 Přístroje s brusnou nádobou

Jako prostředek příčiny eroze tu figuruje kapalina s obsahem částic. Přístroj má velmi jednoduchou konstrukci a vysokou spolehlivost. Nevýhodou je omezení rozsahu zkušebních podmínek, neznámý úhel dopadu částic na materiál a jejich rychlost.[1]

4.3.2 Tryskací přístroje

Tyto přístroje používají metodu otryskávání materiálu částicemi, kapalinou, nebo jejich kombinací. Médium koluje v oběhovém systému. Zkoušecí přístroje jsou výhodné pro jejich jednoduchou konstrukci a intenzitu opotřebení. Průběh zkoušky je proměnlivý vlivem poměrně rychlého opotřebení funkčních částí přístroje. Nežádoucí je také postupně měnící se nárazový úhel média na exponovaný povrch materiálu, vlivem růstu lokálního opotřebení. Dále se mění schopnost abrazivity částic vlivem jejich “omýlání se“. Z toho důvodu se musí abrazivo v pravidelných intervalech měnit.[1]

Modifikované tryskače jsou použitelné pro otryskání výkovek nebo odlitků. Není však definované, jaké podmínky by zkouška měla mít, jako např. rychlost dopadu abraziva. Laboratorní tryskací přístroje mají zkušební podmínky nastavitelné.

4.3.3 Přístroje s oběhovou soustavou

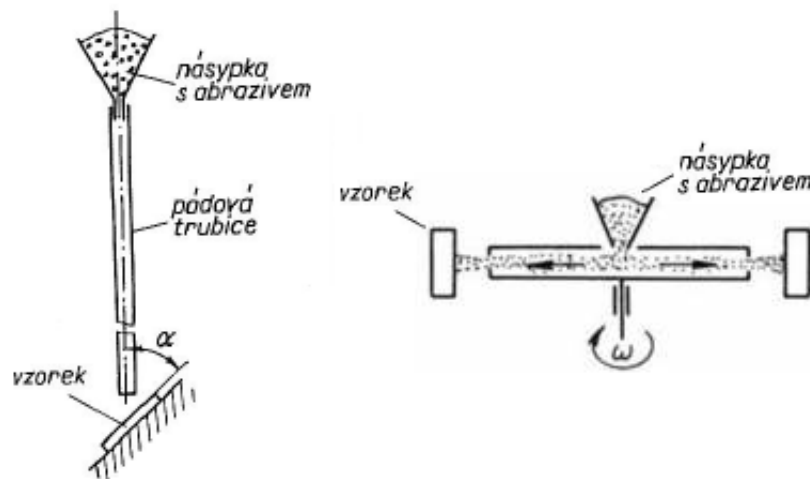
Mohou pracovat při velmi podobných podmínkách provoznímu nasazení. Ovšem pořízení přístroje je nákladné, je třeba velké plochy pro instalaci zařízení a zkoušení je časově náročné.

4.3.4 Experimentální turbíny

Užívají se pouze pro výzkum odolnosti proti opotřebení materiálů určených k výrobě turbínových lopatek.

4.3.5 Přístroje na principu volného pádu a odstředivé síly

Přístroje s principem volného pádu abraziva jsou vhodné ke studování mechanismu erozivního opotřebení. Nehodí se ke zkoušení materiálu, které by vyžadovalo nákladný vakuový systém. Přístroje s principem odstředivé síly urychlují abrazivní částice vlivem rotujícího kotouče, který částice vrhá odstředivou silou všemi směry. Pokud mají částice různou hmotnost a tvar, tak mají i různou rychlost nárazu na zkoušený materiál. Proto je žádoucí, aby částice měli jednotné vlastnosti. Oba výše uvedené přístroje jsou schématicky znázorněné na obr. 23.[1]



Obr. 23 – Schéma principu volného pádu a odstředivé síly [1,22]

4.3.6 Přístroje s proudem plynu, páry nebo vody

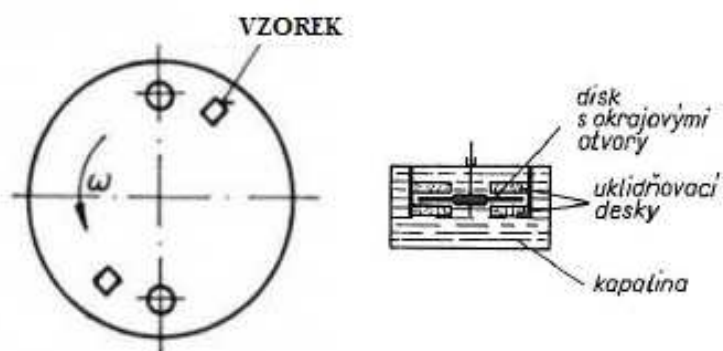
Jejich užití je vhodné zejména pro konkrétní provozní aplikace. Pracují ve velmi specifickém rozsahu zkušebních parametrů.

4.4 Zkoušky odolnosti materiálu proti kavitačnímu opotřebení

Ke zkoušení odolnosti proti kavitačnímu opotřebení existují 4 základní druhy přístrojů: rotační diskový, rotační nárazový, magnetostrikční a dýzový.

4.4.1 Rotační diskový přístroj

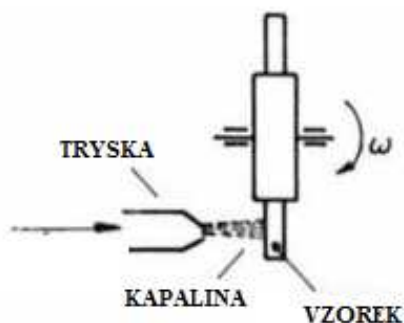
Vzorky jsou zkoušeny v kavitační oblasti vznikající za otvorem v rotačním disku. Kruhový disk rotuje v kapalině kolem své osy orientované buď horizontálně nebo vertikálně. Disk obsahuje díry sloužící ke vzniku kavitačních dutin, kolem otvorů nebo přímo v nich, v momentě rotace disku. Kavitační dutiny za otvory na povrchu disku zanikají. Přístroj má složitější konstrukci a obsluhu. Schéma tohoto přístroje je znázorněné na obr. 24.[1,21]



Obr. 24 – Rotační diskový přístroj [1,22]

4.4.2 Rotační nárazový přístroj

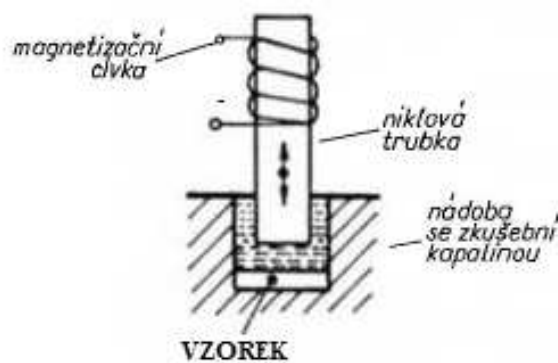
Vzorky jsou pomocí tohoto přístroje zkoušeny mnohonásobnými nárazy o vodní proud. Vzorek je umístěn na rotačním kotouči, který vzorek v určité sekci rotačního pohybu vystaví nárazu proudu kapaliny vytryskávající z trysek. Velkou výhodou je jednoduchá konstrukce a nenáročná ovladatelnost. Princip zkoušky a schéma přístroje jsou zobrazené na obr. 25.[1,21]



Obr. 25 – Rotační nárazový přístroj [22]

4.4.3 Magnetostrikční přístroj

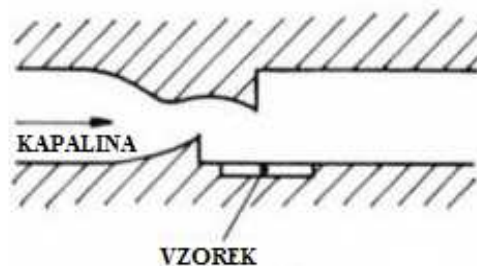
Vzorky jsou pomocí tohoto přístroje zkoušeny v kavitačním prostředí vytvořeným vibracemi. Pohyb vzorků kapalinou je poháněn magneticky, elektricky nebo mechanicky. Kavitační opotřebení vzniká při implozi kavitačních bublin, vznikajících v oblastech menšího tlaku na povrch vzorku. Tento přístroj je nejvíce užívaným pro zkoumání kavitačního opotřebení. Jsou výhodné vlivem jednoduché konstrukce. Ovšem naměřené hodnoty při zkoušce nejsou zcela totožné s hodnotami ve skutečném provozu. Schéma metody zkoušení odolnosti proti kavitačnímu opotřebení je uvedené na obr. 26.[1]



Obr. 26 – Magnetostrikční přístroj [1,22]

4.4.4 Dýzový přístroj

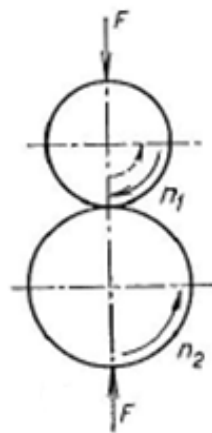
Vzorky jsou pomocí tohoto přístroje zkoušeny v kavitačním prostředí vytvořeným v kanálu proměnného průřezu. Kavitační poškození vzniká lokálním poklesem tlaku v zúžené oblasti. Přístroj je používán zejména pro studium principů kavitace a kavitačního opotřebení. Vlivem nízké intenzity působení kavitace je zkouška časově náročnější. Na obr. 27 je zobrazeno schéma tohoto přístroje.[1]



Obr. 27 – Schéma dýzového přístroje [22]

4.5 Zkoušky odolnosti materiálu proti únavovému opotřebení

Pro tento typ zkoušení materiálu se používají dva vzájemně se odvalující kotouče. Opotřebení je sledováno při “čistém“ valení nebo valení se skluzem. Speciální přístroje mají možnost simulovat i provozní podmínky u zkoušení ozubených kol. Materiály pro výrobu valivých ložisek jsou zkoušeny obdobně na válečkových analogonech. Zkoušení tohoto typu je časově náročné a finančně nákladné. Proces zkoušky ale může být automatizován a programově řízen moderními jednotkami. Princip zkoušky je uveden na obr. 28.[1,21]



Obr. 28 – Přístroj s dvěma odvalujícími kotoučky [1]

4.6 Zkoušky odolnosti materiálu proti vibračnímu opotřebení

K těmto zkouškám se užívají přístroje se schopností vzorky vzájemně rozkmitat. Dotyk vzorků při tom bývá bodový, čárový nebo plošný. Frekvence kmitání, zatížení vzorků, médium mezi stykovými plochami a amplituda kmitavého pohybu jsou regulovatelné. Konkrétní typy přístrojů k této zkoušce mohou být použity ke zkoumání kombinovaného účinku vibračního a únavového opotřebení. Schémata třecích uzlů jsou znázorněna na obrázcích 20, 21 a 22.[1,21]

5. Experimentální zkoušky abrazivního opotřebení

Praktické zkoušení odolnosti vybraných kovových materiálů vůči abrazi. Sledování průběhu opotřebení brusného plátna v průběhu zkoušek.

5.1 Zkoušené materiály

Odolnost proti abrazivnímu opotřebení byla zjišťována u celkem 12ti materiálů. Z toho šest kovových materiálů určených, kterými jsou ocel 11 373, 19 133 a 19 436, šedá litina s lupínkovým grafitem (42 2420), mosaz Ms58, slinutý karbid TSM 20 a kovové materiály nám neznámé, pojmenované Vzorek 1 až Vzorek 6, které byly použity k výrobě pracovních nástrojů stavební, důlní a zemědělské techniky, tudíž jsou používány pro práci, kde jsou vystaveny abrazivním účinkům.

5.1.1 Specifikované materiály

Ocel 11 373 (S 235 JRG1)

Neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti vhodná ke svařování. Součásti konstrukcí a strojů menších tluštěk, i tavně svařované, namáhané staticky i mírně dynamicky. Vtokové objekty vodních turbín, výtoky, hradidlové tabule, stavidla, méně namáhaná svařovaná potrubí a odbočnice, jezové konstrukce. Dna plochá, klenutá a lemovaná, vysokotlaká. Vhodná ke svařování. Směrné chemické složení je uvedeno v tab. 1.[23]

C	P	N	S
[%]			
do 0,2	do 0,05	do 0,007	do 0,05

Tab. 1 Směrné chemické složení – ocel 11 373 [23]

Ocel 19 133

Uhlíková nástrojová ocel. Na výrobu nářadí pro zámečníky, kováře (měkký a středně tvrdý kámen), pilníky. Směrné chemické složení této oceli je uvedeno v tab. 2.[24]

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
[%]						
do 0,75	do 0,45	do 0,035	do 0,035	do 0,35	do 0,25	do 0,25

Tab. 2 Směrné chemické složení – ocel 19 133 [25]

Ocel 19 436 (Poldi 2002)

Vysoce legovaná chromová ledeburitická ocel s vysokým obsahem uhlíku a chromu vyznačující se vysokou odolností proti otěru. Materiál 19 436 (X210Cr12, 1.2080) má dobrou rozměrovou stálost po zakalení. Vysoká odolnost řezné hrany. Vysoká pevnost v tlaku. Značně nízká houževnatost zejména v příčném směru, výrazná karbidická řádkovitost. Vhodná k nitridaci. Pevnost 800 – 850 MPa, tvrdost ve stavu žíhaném na měkko max. 250 HB.

Ocel 19 436 pro práci za studena a vysoce odolná vůči otěru je vhodná na razníky a matrice pro výkonné a tvarově náročné postupové a sdružené střížné nástroje. Zejména pro stříhání transformátorových plechů a dynamoplechů nad 2 mm tloušťky. Dále je vhodná na nože pro stříhání papíru, plastů (s velkým obsahem skla), oceli do tloušťky 3 mm. Je vhodná na nástroje pro hluboké tažení a protlačování, nářadí pro válcování závitů, lisovací nářadí pro keramický průmysl, vysoce namáhané nářadí na opracování dřeva, měřidla, formy na plasty. Směrné chemické složení oceli 19 436 je uvedeno v tab. 3.[26]

C	Si	Mn	P	S	Cr
[%]					
1,9 – 2,2	0,1 – 0,6	0,2 – 0,6	do 0,03	do 0,03	11 – 13

Tab. 3 Směrné chemické složení – ocel 19 436 [26]

Šedá litina s lupínkovým grafitem (42 2420)

Litina s lupínkovým grafitem (starší název je šedá litina) je slitina železa s uhlíkem plus základní přísadové prvky – křemík, mangan, fosfor a síra. Množství uhlíku přesahuje maximální hodnotu rozpustnosti v austenitu (2,14% – bez vlivu jiných prvků), přičemž převážná část uhlíku je vyloučena jako lupínkový grafit. Kromě grafitu obsahuje i kovovou matici, která obsahuje ferit, perlit nebo jejich směs. Může obsahovat řadu dalších prvků

ve stopovém množství a obsahuje vždy plynné prvky: vodík, kyslík, dusík. Směrné chemické složení je uvedeno v tab. 4.

P	S	C
[%]		
do 0,5	do 0,15	nad 2,14

Tab. 4 Směrné chemické složení – šedá litina s lupínkovým grafitem [27]

Mosaz Ms58

Mosaz je slitina mědi a zinku (binární mosaz), případně je část podílu zinku nahrazena jiným kovem (ternární mosaz). Má široké pole využití v jemné mechanice, elektrotechnice, při výrobě různého dalšího kovového zboží a také v modelářství. K přednostem mosazi patří dobrá obrobitelnost, korozivzdornost (pěkný vzhled) a elektrická vodivost. Pevnost není příliš vysoká, ale pro mnoho aplikací zcela dostačující. Mosazi se dobře spojují pájením a také pokovují. Nevýhodou je relativně vysoká cena, daná hlavně vysokým podílem mědi.

Ms58 je označení používané pro mosaz CuZn39Pb3 (EN: CW 614 N, W.Nr.: 2.0401, atd.). Je to běžný, mezinárodně rozšířený materiál s vynikající obrobitelností. Dobře se pájí a tváří za tepla. K tváření za studena se naopak příliš nehodí. Hustota 8450 kg/m³, pevnostní charakteristiky: R_m = 350 – 550 MPa, R_e = 270 – 500 MPa, tvrdost podle Brinella až 150 HB. Směrné chemické složení je uvedeno v tab. 5.[28,29]

Cu	Zn	Pb	Al	Fe	Ni	Sn	ostatní celkem
[%]							
57 – 59	39	2,5 – 3,5	do 0,05	do 0,3	do 0,3	do 0,3	do 0,1

Tab. 5 Směrné chemické složení – mosaz Ms58 [28]

Slinutý karbid TSM 20

Slinuté karbidy patří k nejdůležitějším výrobkům práškové metalurgie. Jejich využití je u materiálů pro nástroje a součásti extrémně odolné proti opotřebení. Používají se na břitové destičky nástrojů k obrábění a na činné plochy některých tvářecích nástrojů (průvlaky, protlačovací nástroje apod.) a součástí, kde se využívá jejich specifických

vlastností jako je vysoká tvrdost a tím spojena otěruvzdornost (drtiče, lisovací desky apod.).[30,31]

Hlavní složkou těchto materiálů je karbid wolframu (hexagonální mřížka), karbid titanu event. tantalu (mřížka kubická) o tvrdosti 2000 až 3200 HV a kobalt jako pojivo. Směrné chemické složení je uvedeno v tab. 6.[30,31]

karbid W	Co	karbid Ti
[%]		
92,2	7,4	0,4

Tab. 6 Směrné chemické složení – slinutý karbid TSM 20 [31]

5.1.2 Nespecifikované materiály

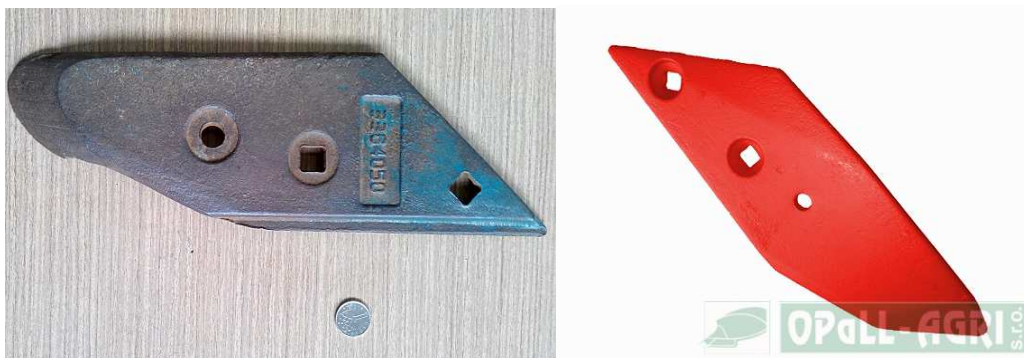
U těchto materiálu nemáme bližší informace, jelikož neznáme jejich chemické složení k jejich určení. Chemické zkoumání nebylo zhotoveno s ohledem na vysoké náklady realizace a omezené finanční možnosti katedry. Jejich zkoušení na odolnost abrazivního opotřebení je pro nás i přesto významná, jelikož se jedná o materiály které jsou užívané v provozu s praktickým výskytem abrazivního opotřebení.

Vzorek 1 – součást



Obr. 29 – Vzorek 1

Vzorek 2 – dláto z orebního tělesa



Obr. 30 – Vzorek 2 [32]

Vzorek 3 – součást



Obr. 31 – Vzorek 3

Vzorek 4 – těžební dvojzubec pro rypadla



Obr. 32 – Vlevo: vzorek 4, vpravo: ilustrační foto použití vzorku 4 [33]

Vzorek 5 – těžební zub pro rypadla



Obr. 33 – Vlevo: vzorek 5, vpravo: ilustrační foto použití vzorku 5 [34]

Vzorek 6 – těžební zub pro minibagry



Obr. 34 – Vzorek 6

5.1.3 Měření hustoty zkoušených materiálů

Ke zkoumání a vyhodnocení abrazivního opotřebení vybraných materiálů bylo nejprve potřeba zjistit jejich hustotu ρ , která byla následně změřena pomocí metody ponoru měřeného vzorku do nádoby s destilovanou vodou dle vztahu:

$$\rho = \frac{m}{m_k} (\rho_k - \sigma) + \sigma \quad [\text{g/cm}^3] \quad (4)$$

kde: ρ_k – hustota destilované vody za dané teploty (tabulková hodnota) $[\text{g/cm}^3]$

σ – hustota vzduchu za dané teploty a tlaku $[\text{g/cm}^3]$

m_k – hmotnost vytlačené kapaliny při ponoření vzorku do kapaliny [g]

m – hmotnost vzorku [g]

Materiál	Hustota
	[g/cm ³]
Vzorek 1	7,75
Vzorek 2	7,81
Vzorek 3	7,75
Vzorek 4	7,73
Vzorek 5	7,68
Vzorek 6	7,80
Mosaz Ms58	8,47
TSM 20	14,40
11 373	7,75
19 133	7,80
19 436	7,70
Šedá litina	7,25

Tab. 7 Hustoty materiálů

Naměřené hodnoty k výpočtu hustoty vzorků uvedených v tab. 7 jsou v příloze číslo 9.

5.2 Příprava zkušebních materiálů

Pro podrobení materiálů laboratornímu zkoušení bylo potřeba materiály opracovat do zkušebních vzorků ve formě válečků s průměrem 10 mm a délce 30 až 70 mm.

Z každého materiálu byl na CNC řezačce s technologií vodního paprsku vyříznut vzorek (obr. 35), který byl následně opracován na obráběcím stroji do hrubé podoby potřebného válečku (obr. 36) a po finálním dobroušení na brusce byl připraven ke zkoušení.

Pracovní čelní plocha zkušebních těles se brousí na drsnost povrchu $R_a = 0,4 \mu\text{m}$, ostatní plochy na $R_a = 1,6 \mu\text{m}$. Hrany zkušebního tělesa musí být zaobleny poloměrem asi 0,2 mm.



Obr. 35 – Vyříznutý vzorek materiálu



Obr. 36 – Nahoře: Z poloviny opracovaný vzorek na váleček, dole: zcela opracovaný vzorek

5.3 Laboratorní zkouška

Laboratorní zkouška provedená v laboratořích tribologie, na katedře materiálu a strojírenské technologie technické fakulty.

5.3.1 Metodika laboratorní zkoušky

Opotřebení kovových materiálů

Abrazivní opotřebení kovových materiálu, plastů, dřeva se nejčastěji zjišťuje na přístrojích s vázanými částicemi, volnými částicemi nebo vrstvou volných částic mezi dvěma stykovými povrchy. Laboratorní zkouška opotřebení byla provedena na přístroji s vázanými částicemi. V důsledku malých hmotnostních úbytků u laboratorních zkoušek je velmi důležité zachovávat přesný postup měření a dbát na čistotu vzorků při vážení.

Toto stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazivnímu opotřebení na brusném plátně je předepsáno normou ČSN 01 5084.

Velikost opotřebení zkušebních vzorků byla vyhodnocena na základě hmotnostních úbytků v průběhu zkoušky podle vztahů (5) a (6):

$$\text{Objemové úbytky: } V = \frac{m_{un}}{\rho} \quad [\text{cm}^3] \quad (5)$$

kde: m_{un} – hmotnost při n-tém měření [g],

ρ – hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$].

$$V_{un} = V_0 - V_n \text{ [mm}^3\text{]} \quad (6)$$

kde: V_{un} – úbytek objemu při n-tém měření [mm³],

V_0 – objem nového vzorku [mm³],

V_n – objem vzorku při n-tém měření [mm³].

Dále byla vypočítána poměrná objemová odolnost proti abrazivnímu opotřebení ψ podle vztahu (7):

$$\psi = \frac{\frac{\Delta m_{et}}{\rho_{et}}}{\frac{\Delta m_{vz}}{\rho_{vz}}} \quad (7)$$

kde: Δm_{et} – hmotnostní úbytek etalonu [g],

Δm_{vz} – hmotnostní úbytek vzorku [g],

ρ_{et} – hustota etalonu [g.cm⁻³],

ρ_{vz} – hustota vzorku [g.cm⁻³].

Hodnoty poměrné objemové odolnosti proti abrazivnímu opotřebení mají středně kvadratickou chybu, nepřesahující obvykle 10 %.

Opotřebení plátna

Vlivem toho, že pro zkoušení každého vzorku za specifických podmínek bylo použito pro celou dráhu 500ti metrů opotřebení opakovaně to samé plátno, a to celkem 10 krát, lze pozorovat postupné snižování abrazivity v důsledku opotřebení samotného plátna formou odlamování, otupování a vyloupávání abrazivních částic vázaných na plátně při každém přejetí plochy plátna zkušebním vzorkem.

Rychlost a intenzita opotřebení brusného plátna byla vyhodnocena na základě jeho procentuální poměrné účinnosti při opakovaných cyklech zkoušení opotřebení kovových materiálů, za pomoci tohoto vztahu (8):

$$\eta_n = \frac{V_{un}}{\frac{V_{u1}}{100}} \quad [\%] \quad (8)$$

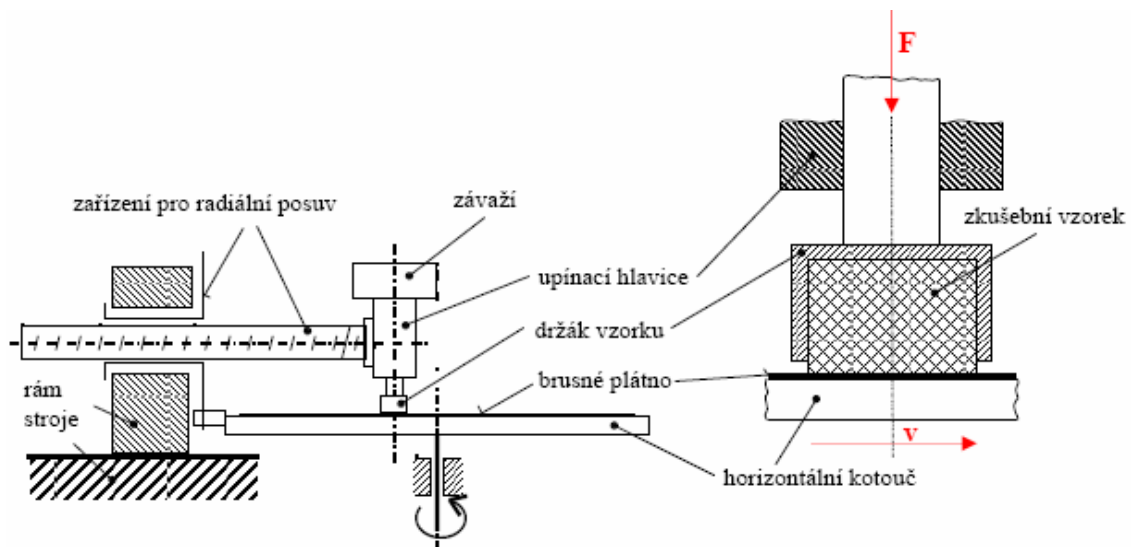
Kde: η_n – poměrná účinnost brusného plátna při n-tém cyklu použití (první cyklus 100 %),

V_{un} – úbytek objemu zkoušeného vzorku při n-tém cyklu [mm^3],

V_{u1} – úbytek objemu zkoušeného vzorku při prvním cyklu [mm^3].

5.3.2 Zkušební přístroj s brusným plátnem

Laboratorní zkouška opotřebení s vázaným abrazivem byla provedena na přístroji s brusným plátnem podle normy ČSN 01 5084. Schéma přístroje je znázorněno na obr. 37 a tab. 8 obsahuje technická data přístroje.



Obr. 37 – Schéma přístroje s brusným plátnem [35]

Délka třecí dráhy:	50 m
Průměr otáčející se desky:	480 mm
Max. kluzná rychlost zkušebního tělesa:	0,5 m.s ⁻¹
Měrný tlak:	0,1 MPa/0,32 MPa
Radiální posuv zkušebního tělesa:	3 mm.ot ⁻¹
Brusné plátno:	Korundové, zrnitost 240, 120, 60

Tab. 8 Specifikace přístroje s brusným plátnem [35]

Zkušební přístroj s brusným plátnem je tvořen z rovnoměrně otáčející se vodorovné desky, na kterou se připevňuje brusné plátno. Zkušební vzorek je uchycen v držáku a je přitlačován závažím k brusnému plátnu. Rozměr zkušební vzorku je $\phi 10 \times Y$ mm. Během zkoušky se horizontální kotouč s brusným plátnem otáčí, přitom se zkoušené těleso posunuje od středu k okraji brusného plátna nebo naopak. Po stanovené délce 50–ti metrů třecí dráhy koncový spínač stroj zastaví a zkoušené těleso se vrátí na okraj brusného plátna. Vzorky jsou po každých 50 metrech očištěny a zvážením na elektronických vahách (obr. 39) o rozlišení 0,001 g je stanoven hmotnostní úbytek. Poté se proces 10–krát opakuje až do požadované celkové vzdálenosti. Stejně brusné plátno je použito opakovaně až do 500–ti metrů celkové dráhy abrazivního opotřebení jednoho vzorku. Pro další vzorek je použito další plátno. Přítlak vzorků na brusné plátno byl 0,1 MPa a 0,32 MPa, přičemž se v průběhu výzkumu upustilo od přítlaku 0,1 MPa z důvodu velmi malých výsledných hodnot vzhledem k rozlišení použité váhy a jejich rozptylu.[35]



Obr. 38 – Přístroj s brusným plátnem při práci



Obr. 39 – Digitální Váha

5.3.3 Brusné plátno

Jako brusné plátno se užívá korundového kepru. Brusné plátno se dodává v cca 50 m rolích (obr. 40), ze kterých se postupně podle potřeby odřezávají a ve stejném pořadí spotřebovávají kotouče o daném průměru.[35]



Obr. 40 – Role brusného plátna

Dodavatel brusných pláten je firma Rekord s.r.o (dříve Alico Kolín s.r.o.).

Pro zkoušení abrazivních účinků brusného plátna a stanovení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení vybraných materiálů byla použita brusná plátna o třech zrnitostech a to: P60 (hrubé s měrnou velikostí zrn 250 až 316 μm), P120 (středně hrubé s měrnou velikostí zrn 100 až 125 μm), P240 (jemné s měrnou velikostí zrn 40 až 50 μm). Zrnitost jednotlivých brusných pláten je možno rozlišit na obr. 41. Charakteristika brusného plátna:

- brusné zrno: kvalitní korund,
- pojivo: pryskyřice,
- podklad: F– flexibilní,
- struktura: otevřená,
- použití: běžné druhy oceli, dřevo, nerez.[36]



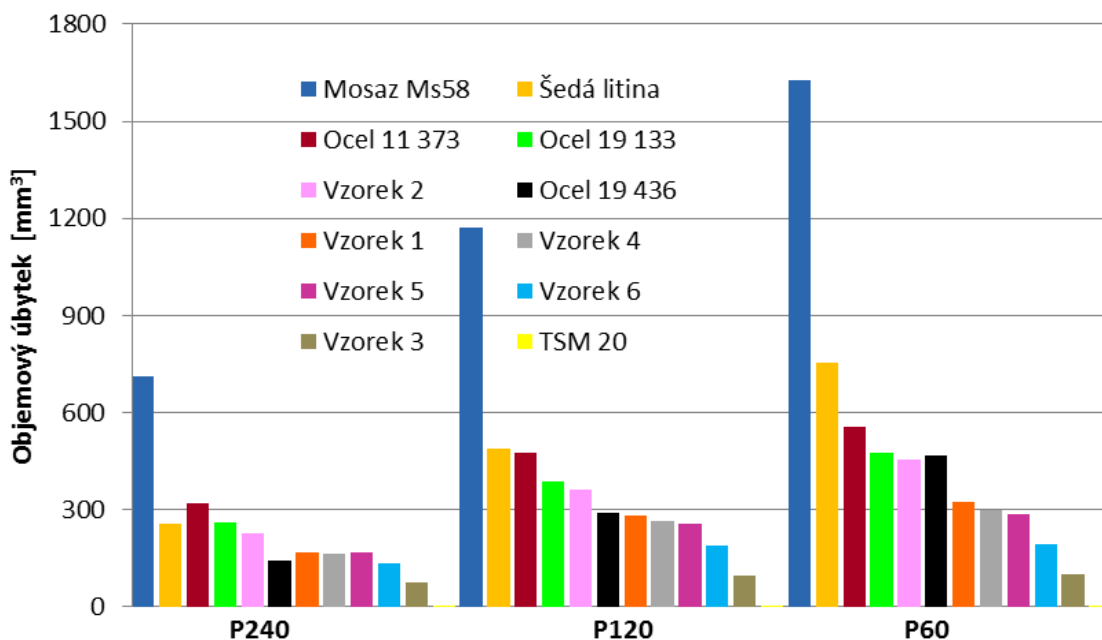
Obr. 41 – Zrnitost brusných pláten; zleva: P240, P120 a P60 (klíč použit jako měřítko)

6. Výsledky laboratorní zkoušky a diskuze

Souhrnné slovní a grafické zhodnocení.

6.1 Výsledky abrazivního opotřebení zkoušených materiálů

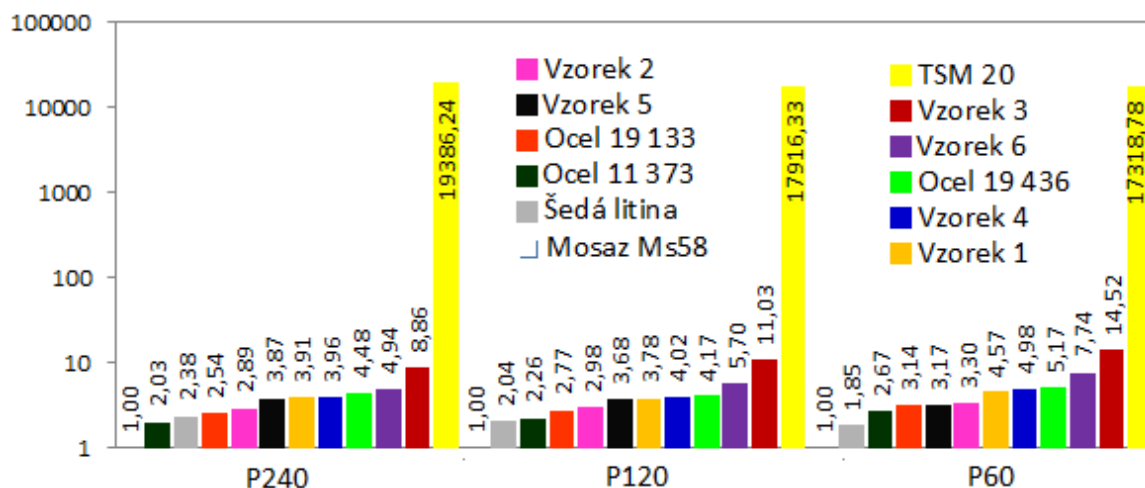
Objemové úbytky zkušebních vzorků v průběhu zkoušky s přtlakem 0,32 MPa jsou tabulkově uvedeny v příloze 3. Objemové opotřebení vzorků v průběhu ujeté dráhy 500 metrů jsou graficky znázorněny v příloze 4. Na obr. 42 jsou sloupcové grafy s hodnotami objemových úbytků všech zkoušených materiálů po celkových 500 metrech pro jednotlivé typy zrnitostí brusných pláten a za použití přtlaku 0,32 MPa.



Obr. 42 – Objemové opotřebení zkušebních vzorků na brusných plátnech zrnitostí P240, P120 a P60 po 500 metrech

Z výsledků měření se všemi třemi zrnitostmi brusných pláten je zřejmé, že největší objemové opotřebení má zkušební vzorek z Mosazi Ms58 a to ve všech případech. Například při opotřebení s brusným plátnem P60, Mosaz Ms58 dosáhla úbytku objemu 1627,06 mm³ po ujetí dráhy 500 metrů na brusném plátně při zatížení tlakem 0,32 MPa. Nejmenšího objemového opotřebení dosáhl vzorek materiálu slinutého karbidu TSM 20 a to také ve všech případech. Opotřebení tohoto vzorku, při použití brusného plátna P60 a zatížení tlakem 0,32 MPa, je pouze 0,16 mm³.

Na obr. 43 jsou uvedeny hodnoty poměrné objemové odolnosti vzorků proti abrazivnímu opotřebení vypočítané po ujetí 500 metrů na brusném plátně s přítlakem 0,32 MPa, vztažené k porovnávacímu vzorku (Mosaz Ms58=1).

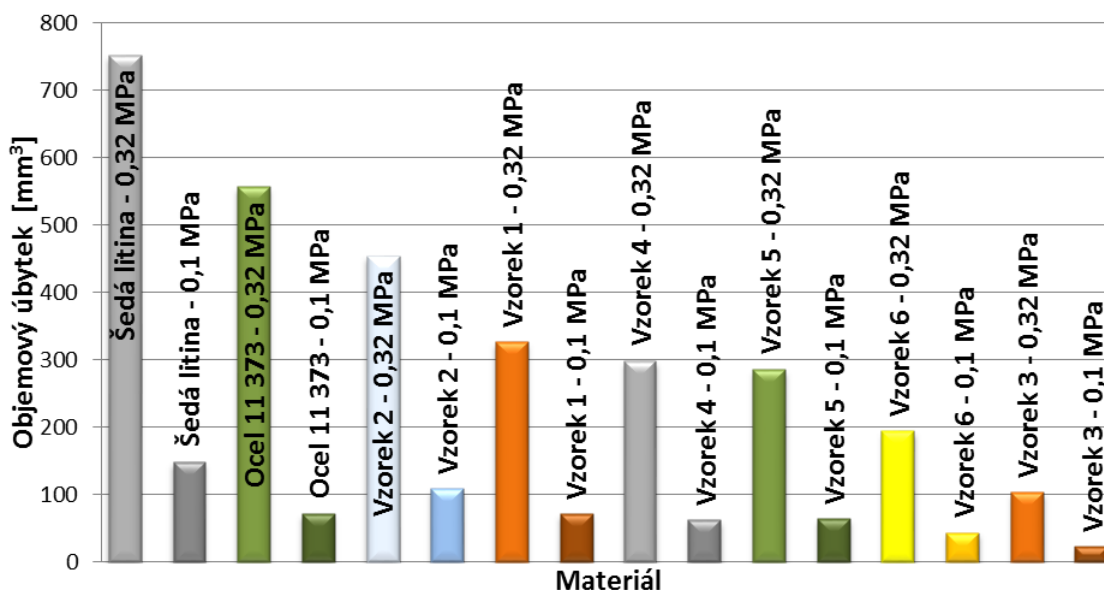


Obr. 43 – Poměrné objemové odolnosti proti abrazivnímu opotřebení na brusných plátnech zrnitostí P240, P120 a P60 po 500 metrech

Nejvyšší poměrnou objemovou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, za použití všech tří typů brusných plátén a za použití Mosazi Ms58 jako etalonu, má vzorek slinutého karbidu TSM 20.

Součástí výzkumu abrazivního opotřebení mělo původně být i zkoušení vzorků na přístroji s brusným plátnem s při tlaku 0,1 MPa. Toto zkoušení nakonec nebylo provedeno pro všechny vzorky, z důvodu výskytu “klouzání“ vzorku po plátně bez měřitelného abrazivního opotřebení způsobené malou přítláčnou silou. Naměřené hodnoty opotřebení byly obecně velmi malé a vyžadovaly citlivější přístroj na měření hmotnosti než kterým laboratoř disponovala (zejména při pokusu měření opotřebení nejodolnějšího a nejtvrďšího materiálu z vybraných vzorků, jímž je slinutý karbid TSM 20).

Obr. 44 znázorňuje poměření objemových úbytků všech zkoušených materiálů s přítlakem 0,32 MPa a přítlakem 0,1 MPa. Je z něj znatelné, že hodnoty naměřené při zatížení vzorku hodnotou 0,1 MPa jsou velmi malé. Vyžadují ideálně citlivější přístroje pro získání potřebných dat pro získání věrohodných grafických závislostí, než kterými toto zkoušení disponovalo. Grafické závislosti objemových úbytků jednotlivých vzorků s přítlakem 0,1 MPa jsou v příloze číslo 6. Veškeré naměřené a vypočítané hodnoty z měření s přítlakem 0,1 MPa jsou uvedeny v příloze 5.



Obr. 44 – Porovnání objemového opotřebení zkušebních vzorků na brusném plátně o zrnitosti P60 po 500 metrech za dvou různých zatížení (0,1 MPa a 0,32 MPa)

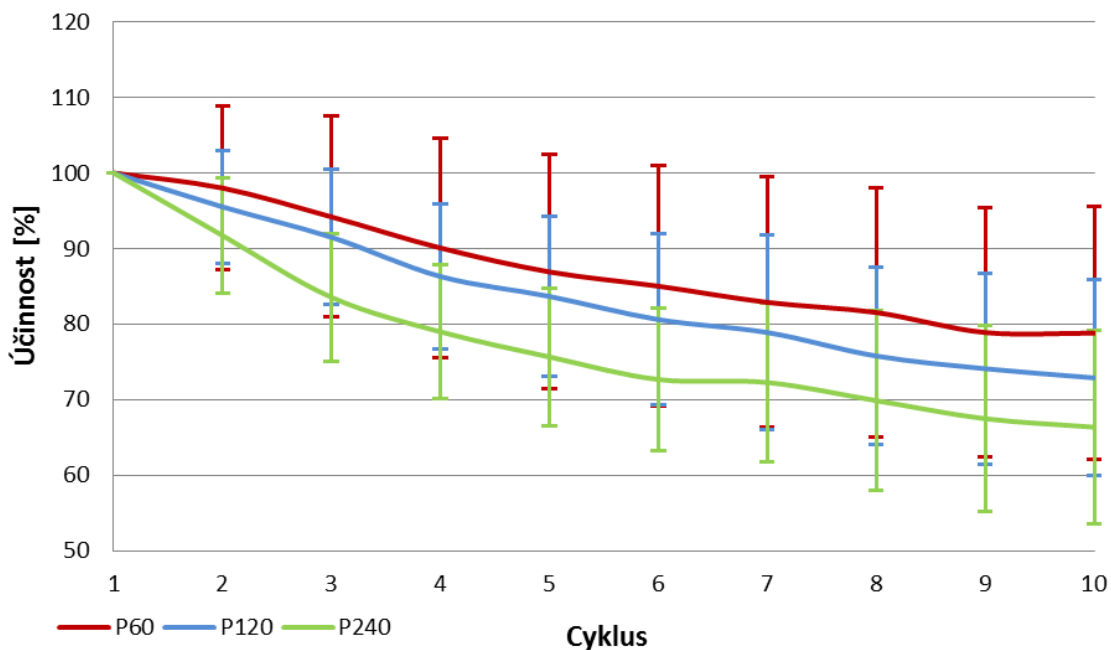
6.2 Výsledky opotřebení brusného plátna

Jelikož byly všechny vzorky vystaveny abrazivnímu účinku brusných pláten o třech různých zrnitostech a každý vzorek byl testován deseti cykly na jednom plátně, je možno velmi dobře vyhodnotit změnu abrazivity všech třech druhů pláten po každém cyklu jejich použití.

Vyhodnocení stavu plátna při každém cyklu použití, je realizováno procentuelním vyjádřením abrazivity plátna (pojmenované účinnost), vztažené vždy k prvnímu cyklu, kdy plátno mělo 100 % stav, čili ještě neopotřebované, neboli 100 % účinnost.

Tato vyhodnocení byla provedena pro zkoušky všech vzorků při zatížení 0,32 MPa a pro každý druh plátna byla vypočítána střední hodnota účinnosti konkrétního cyklu (1 až 10) z jejich použití ve zkoušení všech 12ti vzorků.

Veškeré potřebné hodnoty k tomuto zkoumání jsou uvedeny v příloze 7. V příloze 8 jsou uvedeny grafické průběhy klesající účinnosti pláten pro všechny provedené zkoušky vzorků na odolnost proti abrazi.



Obr. 45 – Porovnání klesající abrazivity pláten o zrnitostech P60, P120, P240 při jejich opakovaném užití

Z obr. 45 lze snadno vyčíst, že abrazivní účinek plátna si nejdéle zachovává plátno o zrnitosti P60. Což je ze zkoušených pláten to s největšími zrny korundového abraziva. Při desátém přejezdu vzorku po stejném plátně má plátno P60 v průměru 79 % své původní abrazivity, kdežto plátno P120 v průměru 73 % a plátno P240 v průměru 66 %.

6.3 Technicko-ekonomické zhodnocení

Ekonomicko-technická výhodnost volby konkrétního materiálu pro výrobu pracovní součásti je vyhotovena formou porovnání cen daných materiálů s jejich poměrnou odolností proti abrazivnímu opotřebení.

Avšak ani jednu cenu nemůžeme považovat za zcela objektivní, jelikož je cena rabatní dle počtu zakoupených kusů výrobků nebo množství materiálu. Hladina ceny je také ovlivněna silou naší měny na trhu a dalšími ekonomickými vlivy.

Pro ukázkou ekonomicko-technické výhodnosti materiálů byl vybrán vzorek 2, neboli dláto z orebního tělesa. Je tomu tak z důvodu nejnižší odolnosti vůči abrazi ze všech šesti testovaných výrobků z provozu, tudíž je větší prostor k nalezení vhodnějšího materiálu pro tento výrobek. Výhodou je také to, že je známá prodejní cena tohoto výrobku.

Skutečné ceny dláta P - 3364050 (Vzorek 2)		
Hmotnost: 2,07 kg		
	Cena bez DPH:	Cena s DPH:
Zdroj:	[Kč]	[Kč]
monsta.cz	201,76	244,13
duotip.cz	179	216,6
agrozetshop.cz	208	251
Průměrná cena dláta:	196,25	237,24
Cena za 1 kg dláta:	94,81	114,61

Tab. 9 Ceny dláta P - 3364050 z orebního tělesa (vzorek 2)

Tab. 9 určuje cenu dláta, kterou v následujících výpočtech bereme jako cenu materiálu, z kterého je dláto vyrobeno. Avšak tuto cenu musíme brát jako hrubý odhad, jelikož je vypočítána právě z ceny hotového výrobku, která je nepochybně navýšena o náklady vynaložené na výrobu odlitku. Skutečná cena materiálu by tedy měla být nižší.

Materiál	Poměrná objemová odolnost			Cena materiálu na výrobu dláta	
	Plátno P240	Plátno P120	Plátno P60	Cena [Kč]	Zdroje k cenám:
Vzorek 2	1,00	1,00	1,00	237,24	tab. 9
Mosaz Ms58	-2,89	-2,98	-3,30	404,09	http://www.stavobazar.eu/
TSM 20	6698,53	6010,54	5240,26	7060,79	http://www.pilanamarket.cz/
Ocel 11 373	-1,43	-1,32	-1,24	61,62	http://www.vykov.cz/
Ocel 19 133	-1,14	-1,08	-1,05	-	tajemství ceny - cena nezjištěna
Ocel 19 436	1,55	1,23	-1,04	1732,68	http://www.nastrojove-oceli.com/
Šedá litina	-1,22	-1,46	-1,79	90,68	http://www.c-n-c.cz/

pozn.: poměrná objemová odolnost se zápornou hodnotou značí nižší odolnost daného materiálu vzhledem k odolnosti etalonu, kladná hodnota značí vyšší odolnost vzhledem k odolnosti etalonu (vzorku 2)

Tab. 10 Poměrné objemové odolnosti materiálů a orientační ceny materiálů pro výrobu dláta

Jako etalon (vztažný materiál) je vybrán vzorek 2, jelikož právě k němu poměrujeme hodnoty odolnosti a ceny ostatních materiálů. Veškeré výpočty pro tab. 10 jsou uvedeny v přílohách 10 a 11.

Z hodnot v tab. 10 je zřejmé, že výroba dláta orebního tělesa z Mosazi Ms58 by byla vlivem vyšší ceny a nižší objemové odolnosti proti abrazivnímu opotřebení vysoce nevýhodná jak z technického, tak ekonomického hlediska. Pokud by opotřebení materiálu při práci v půdě probíhalo totožně s opotřebením na brusném plátně, dláto z Mosazi Ms58

by se na orebním tělese muselo měnit zhruba 3 krát častěji a materiál na dláto by byl o 170 Kč dražší než materiál původní.

Číselně se jako nejvýhodnější materiál jeví slinutý karbid TSM 20. Cena potřebného množství materiálu by byla 7 tisíc což je téměř 30 krát vyšší cena než za původní materiál. Dle naměřených hodnot z abrazivního zkoušení je ale více než 5000 krát odolnější. Nevýhodou výroby by v tomto případě byla nákladnější a složitější výroba z tohoto velmi tvrdého materiálu.

Ukazuje se, že z hlediska technického je reálné vyrobit součást odolnější proti opotřebení, než součást původní. Problémem je ale její vysoká cena vzhledem k vyšší ceně tohoto materiálu.

Ostatní materiály se dle vypočtených hodnot a cen nejeví jako prokazatelně výhodnější, než materiál vzorku 2, který je pro dláto orebního tělesa pracujícího v abrazivním prostředí využíván.

7. Závěr

Jednou z nejčastějších příčin omezující spolehlivost a životnost strojů a zařízení je opotřebení. Opotřebení způsobuje zhoršení funkce zařízení, což může vést k jeho předčasnému vyřazení nebo úplnému porušení. Takto způsobené škody jsou příčinou velkých ztrát a dají se přirovnat snad jen ke škodám vzniklých následky koroze.

Opotřebení je definováno jako trvalá nežádoucí změna povrchu materiálu součásti mechanickými vlivy, které mohou být doprovázeny účinky fyzikálními, chemickými nebo i elektrickými. Odhaduje se, že opotřebení má na svědomí až 80 % poruch strojů a jejich součástí.

Hlavní náplní diplomové práce bylo stanovení a vyhodnocení velikosti abrazivního opotřebení dvanácti materiálů, kterými jsou: mosaz Ms58, oceli 11 373, 19 133 a 19 436, slinutý karbid TSM 20, šedá litina s lupínkovým grafitem, a kovové materiály reálně používané u pracovních nástrojů stavební, těžební a zemědělské techniky.

Laboratorní zkouška opotřebení se uskutečnila pomocí přístroje s vázanými částicemi na přístroji s brusným plátnem, podle normy ČSN 01 5084. Velikost opotřebení byla dána změnou hmotnosti a objemu zkušebních vzorků v průběhu měření. Po ujetí stanovené dráhy 50 metrů byla zkouška zastavena, vzorky se očistily, následně zvažily na elektronických vahách na 0,001 g. Celková ujetá dráha je 500 metrů, pak bylo stávající brusné plátno nahrazeno novým plátnem a byl zkoušen další materiál. Získané údaje byly zaznamenány, zpracovány a vyhodnoceny. Významným výsledkem je např. zjištění hodnoty poměrné odolnosti zkušebního vzorku slinutého karbidu TSM 20 k ostatním materiálům, a také, že si brusná plátna po desátém přejezdu materiálem za přítlaku 0,32 MPa zachovávají kolem 73 % své původní abrazivity.

Ze získaných poznatků lze vyvodit důležitost správné volby materiálů, které odolávají degradačním procesům. Toto rozhodnutí může mít výrazný vliv nejen na životnost součástí a celého zařízení, ale i na ekonomiku provozu, což je nastíněno ve zpracovaném ekonomickém zhodnocení.

8. Seznam použité literatury

- [1] VOCEL, M. – DUFEK, V. a kol.: *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha, STNL 1976. 376 s.
- [2] BRENDEL, H. a kol.: *TRIBOTECHNIKA*, SNTL Praha, Praha, 1978, 297 s.
- [3] MILITKÝ, J. – VANÍČEK, J.: *Tření, Vlastnosti vláken* [online]. [cit. 2014–11–10]. Dostupné z: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/zvt_p_6.pdf
- [4] NOVOTNÝ, F.: *Chemie, paliva, maziva*. Vysoká škola zemědělská v Brně. 2.vyd. Brno, 1985. 172 s.
- [5] BUREŠ, J.: *ConVERTER, Převody jednotek, fyzikální tabulky, životopisy fyziků a Nobelova cena*. [online]. 2002 [cit. 2015-03-24]. ISSN 1214-7591. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/valive-treni.htm>
- [6] REICHL, J. – VŠETIČKA, M.: *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 - 2015 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/36-smykove-treni->
- [7] ŠIMŮNKOVÁ, Š. – ENŤL, E. – BLÁHOVÁ, O.: *Tření a odolnost proti opotřebení, Moderní technologie povrchových úprav* [online]. [cit. 2014–11–14]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/11.html#11>
- [8] RABINOWICZ, E.: *Friction and wear of materials*. 2nd ed. New York: Wiley, c1995, xv, 315 p. ISBN 04-718-3084-4.
- [9] POŠTA, J. – VESELÝ, P. – DVOŘÁK, M.: *Degradace strojních součástí*. [Monografie]. Praha, ČZU, 2002, 67 s., ISBN 80–213–0967–9
- [10] BEČKA, J.: *Tribologie*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1997, 212 s. ISBN 80-010-1621-8.
- [11] KLIMEŠ, P.: *Části a mechanismy strojů II.: Tribologie, ložiska, převody*. Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno, 2003, 70 s. EAN: 8021424222.
- [12] SUCHÁNEK, J. – KUKLÍK, V. – ZDRAVECKÁ, E.: *Abrazivní opotřebení materiálů*, Praha, 2007, 162 str., ISBN 978–80–01–03659–4
- [13] BLAŠKOVIČ, P. – BALLA, J. – DZIMKO, M.: *Tribológia*. Bratislava, ALFA 1990. 360 s.
- [14] CHRUŠČOV, M. M. – BABIČEV, M. A.: *Issledovanija iznašivaniija mettalov*. Moskva, Izdat. AN SSSR. 1960
- [15] ČERVENÝ, J.: *Abrazivní a erozivní opotřebení lopatek míchadel*. Povrcháři [online]. 2008 [cit. 2014–12–15]. Dostupný z WWW: http://www.povrchari.cz/kestazeni/200804_povrchari.pdf

- [16] BHUSHAN, B. – GUPTA B.: *Handbook of tribology: materials, coatings, and surface treatments*. New York: McGraw-Hill, c1991, 1 v. (various pagings). ISBN 0070052492.
- [17] DOUBEK, P.: *Abrazivní a erozivní opotřebení*. Brno, 2010. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně. Agronomická fakulta. Vedoucí práce Josef FILÍPEK.
- [18] ČERNÝ, M. – FILÍPEK, J. – BEZECNÝ, J.: *Mechanické vlastnosti materiálu – výuková prezentace MZLU*, 2006
- [19] RÁZKOVÁ, E.: *Posouzení vlastností plůtních čepelí*, [online]. [cit. 2014–11–17]. Dostupné z: josef.posta.sweb.cz/KONF/Razkova.doc
- [20] FILÍPEK J. – ČERNÝ M.: *Animace laboratorních zkoušek abrazivního opotřebení*. In: Conference of MEMD 2007, Smolenice: SUT in Bratislava, s. 1–7.
- [21] HAVLÍČEK, J. aj.: *Provozní spolehlivost strojů 2, přepracované vydání*, SZN, Praha, 1989, 616 str.
- [22] 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. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=522>
- [23] ČSN 11 373 – *plain carbon structural steel*. CZ FERRO - STEEL, spol. s r.o. CZ FERRO - STEEL [online]. iStudio.cz, 2011 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/en/trubky3-11373.pdf>
- [24] Archív kategorie ‘NÁSTROJOVÉ OCELI’. TumliKOVO: Metal cutting technologies [online]. 2010 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/nastrojovematerialy/page/2/>
- [25] KEY TO METALS AG. Total materia: *The world's most comprehensive materials database* [online]. 2015 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.keytometals.com/>
- [26] PRECIZ S.R.O. & G.CLAAS GRUPPE. Preciz s.r.o.: *1.2080 (X210Cr12, 19 436)* [online]. 2012 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.2080>
- [27] ČSN 42 2420. *LITINA 42 2420 s lupínkovým grafitem: Československá státní norma*. Praha: Vydavatelství norem, 1989.
- [28] *Mosaz*. Litomyský [online]. 2014 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.litomysky.cz/mat/ms.htm>
- [29] *Mosazná dutá tyč, EN 12168, rozměr 35x2: Specifikace výrobku*. FERONA A.S. Ferona a.s.: Velkoobchod hutním materiálem [online]. 2015 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/detail.php?id=30374>

- [30] KŘÍŽ, A.: *Vliv mikrostruktury slinutých karbidů na životnost nástrojů a strojních součástí*. Západočeská univerzita [online]. 2006 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z:http://ateam.zcu.cz/fraktografie_prednaska2.pdf
- [31] SCHWARZKOPF, P. – KIEFFER, R.: *Cemented carbides*. New York: Macmillan, 1960.
- [32] *Dláto P - těleso UN 350/400 (3364050)*. OPALL-AGRI S.R.O. OPaLL-AGRI s.r.o. [online]. 2013 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.opall-agri.cz/p/dlato-p-teleso-un-350-400-3364050>
- [33] *Twin type digging tooth for excavator*. In: Leading Edge Attachments Inc. [online]. 2002, 2015 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://www.leattach.com/images/DigNRip/LEA_DigNRip_W_ESCO_2.JPG
- [34] *Bucket teeth komatsu*. In: Jiangxi Aili Casting Co., Ltd. [online]. 2015 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://www.ailicasting.com/english/products/index.jsp?sort_no=01
- [35] ČSN 01 5084. *Stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazivnímu opotřebení na brusném plátně: Československá státní norma*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1973.
- [36] *Tabulka velikosti brusných zrn dle ČSN a ISO*. Prodejbrusiva.cz [online]. 2015 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z:<http://www.prodejbrusiva.cz/tabulka-velikosti-brusnych-zrn-dle-csn-a-iso>

9. Seznam Příloh

Příloha 1 – Seznam obrázků

Příloha 2 – Seznam tabulek

Příloha 3 – Hodnoty objemového úbytku vzorků se zatížením 0,32 MPa

Příloha 4 – Grafický průběh objemového úbytku vzorků se zatížením 0,32 MPa

Příloha 5 – Hodnoty objemového úbytku vzorků se zatížením 0,1 MPa

Příloha 6 – Grafický průběh objemového úbytku vzorků se zatížením 0,1 MPa

Příloha 7 – Hodnoty účinnosti brusných pláten

Příloha 8 – Grafický průběh střední hodnoty účinnosti brusných pláten

Příloha 9 – Výpočty hustot vzorků 1 až 6

Příloha 10 – Poměrné odolnosti zkoušených materiálů

Příloha 11 – Výpočty cen dláta z alternativních materiálů

- Obr. 1 – Princip valivého tření
- Obr. 2 – Princip smykového tření
- Obr. 3 – Složky kluzného tření
- Obr. 4 – Princip adhezivního opotřebení
- Obr. 5 – Princip abrazivního opotřebení
- Obr. 6 – Abrazivní opotřebení vázanými částicemi
- Obr. 7 – Abrazivní opotřebení s volnými částicemi
- Obr. 8 – Mechanismy erozivního opotřebení
- Obr. 9 – Princip kavitačního opotřebení
- Obr. 10 – Mechanismus únavového opotřebení s cyklickým pohybem
- Obr. 11 – Princip vibračního opotřebení
- Obr. 12 – Závislost objemového úbytku opotřebením na velikosti abraziva a zatížení
- Obr. 13 – Závislost koeficientu tvrdosti na poměrnou odolnost proti opotřebení
- Obr. 14 – Přístroj s brusnou nádobou
- Obr. 15 – Přístroj s pružným kotoučem
- Obr. 16 – Bubnový přístroj
- Obr. 17 – Přístroj s brusným plátnem
- Obr. 18 – Přístroj s brusným pásem
- Obr. 19 – Přístroj s brusným kotoučem
- Obr. 20 – Typy třecích uzlů u bodového dotyku
- Obr. 21 – Typy třecích uzlů u čárového dotyku
- Obr. 22 – Typy třecích uzlů u plošného dotyku
- Obr. 23 – Schéma principu volného pádu a odstředivé síly
- Obr. 24 – Rotační diskový přístroj
- Obr. 25 – Rotační nárazový přístroj

Obr. 26 – Magnetostrikční přístroj

Obr. 27 – Schéma dýzového přístroje

Obr. 28 – Přístroj s dvěma odvalujícími kotoučky

Obr. 29 – Vzorek 1

Obr. 30 – Vzorek 2

Obr. 31 – Vzorek 3

Obr. 32 – Vlevo: vzorek 4, vpravo: ilustrační foto použití vzorku 4

Obr. 33 – Vlevo: vzorek 5, vpravo: ilustrační foto použití vzorku 5

Obr. 34 – Vzorek 6

Obr. 35 – Vyříznutý vzorek materiálu

Obr. 36 – Nahoře: Z poloviny opracovaný vzorek na váleček, dole: zcela opracovaný vzorek

Obr. 37 – Schéma přístroje s brusným plátnem

Obr. 38 – Přístroj s brusným plátnem při práci

Obr. 39 – Digitální Váha

Obr. 40 – Role brusného plátna

Obr. 41 – Zrnitost brusných pláten; zleva: P240, P120 a P60 (klíč použit jako měřítko)

Obr. 42 – Objemové opotřebení zkušebních vzorků na brusných plátnech zrnitostí P240, P120 a P60 po 500 metrech

Obr. 43 – Poměrné objemové odolnosti proti abrazivnímu opotřebení na brusných plátnech zrnitostí P240, P120 a P60 po 500 metrech

Obr. 44 – Porovnání objemového opotřebení zkušebních vzorků na brusném plátně o zrnitosti P60 po 500 metrech za dvou různých zatížení (0,1 MPa a 0,32 MPa)

Obr. 45 – Porovnání klesající abrazivity pláten o zrnitostech P60, P120, P240 při jejich opakovaném užití

Tab. 1 Směrné chemické složení – ocel 11 373

Tab. 2 Směrné chemické složení – ocel 19 133

Tab. 3 Směrné chemické složení – ocel 19 436

Tab. 4 Směrné chemické složení – šedá litina s lupínkovým grafitem

Tab. 5 Směrné chemické složení – mosaz Ms58 [22]

Tab. 6 Směrné chemické složení – slinutý karbid TSM 20 [21]

Tab. 7 Hustoty materiálů

Tab. 8 Specifikace přisroje s brusným plátnem [31]

Tab. 9 Ceny dláta P - 3364050 z orebního tělesa (vzorek 2)

Tab. 10 Poměrné objemové odolnosti materiálů a orientační ceny materiálů pro výrobu dláta

Vzorek 1 – zátěž 0,32 MPa						
Zrnitost plátna:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	20,02	20,02	30,16	30,16	35,73	35,73
100 m	19,30	39,32	31,73	61,89	36,45	72,17
150 m	18,39	57,71	30,74	92,63	35,43	107,60
200 m	16,94	74,65	29,49	122,13	33,74	141,34
250 m	16,24	90,89	28,60	150,73	32,71	174,05
300 m	15,87	106,76	28,00	178,73	32,14	206,18
350 m	15,42	122,18	28,40	207,13	31,07	237,25
400 m	15,88	138,06	25,36	232,49	30,35	267,60
450 m	14,32	152,38	25,43	257,92	29,47	297,06
500 m	14,48	166,86	25,48	283,40	28,87	325,94
Celkem:	166,86		283,40		325,94	

Vzorek 2 – zátěž 0,32 MPa						
Zrnitost plátna:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]
0 m	0,00	0	0	0	0	0
50 m	28,29	28,29	40,45	40,45	46,76	46,76
100 m	27,10	55,39	42,18	82,63	50,32	97,08
150 m	25,32	80,71	39,25	121,87	47,11	144,18
200 m	23,19	103,90	37,98	159,85	46,72	190,90
250 m	22,85	126,75	36,16	196,01	45,65	236,55
300 m	21,11	147,86	34,57	230,59	45,68	282,24
350 m	20,15	168,00	34,73	265,31	45,01	327,24
400 m	19,84	187,85	32,74	298,06	43,34	370,58
450 m	20,07	207,92	32,28	330,34	41,24	411,83
500 m	19,21	227,13	31,98	362,31	42,25	454,08
Celkem:	227,13		362,31		454,08	

Vzorek 3 – zátěž 0,32 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	10,38	10,38	14,87	14,87	19,52	19,52
100 m	8,87	19,26	12,23	27,10	14,41	33,92
150 m	7,84	27,10	10,83	37,93	11,67	45,60
200 m	7,29	34,39	10,13	48,06	10,40	55,99
250 m	7,27	41,66	9,42	57,48	9,24	65,23
300 m	6,86	48,52	8,76	66,23	8,42	73,65
350 m	6,75	55,27	8,01	74,24	7,66	81,31
400 m	6,32	61,59	8,19	82,43	7,49	88,81
450 m	6,05	67,64	7,51	89,94	6,93	95,73
500 m	5,97	73,61	7,20	97,14	6,84	102,57
Celkem:	73,61		97,14		102,57	

Vzorek 4 – zátěž 0,32 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	21,08	21,08	30,63	30,63	31,78	31,78
100 m	19,51	40,59	28,29	58,92	33,14	64,92
150 m	17,45	58,04	29,36	88,28	32,21	97,12
200 m	17,62	75,65	26,81	115,09	31,42	128,54
250 m	15,66	91,32	26,44	141,53	29,70	158,24
300 m	14,45	105,77	26,24	167,77	28,29	186,53
350 m	16,75	122,52	25,61	193,38	28,86	215,38
400 m	15,16	137,67	25,38	218,76	29,88	245,26
450 m	13,37	151,05	24,12	242,88	26,02	271,29
500 m	13,12	164,16	23,10	265,98	26,81	298,10
Celkem:	164,16		265,98		298,10	

Vzorek 5 – zátěž 0,32 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	18,85	18,85	28,92	28,92	35,76	35,76
100 m	19,88	38,73	28,16	57,08	31,54	67,30
150 m	17,51	56,24	27,85	84,93	32,23	99,52
200 m	16,88	73,12	25,64	110,57	28,72	128,25
250 m	16,56	89,68	24,44	135,01	28,65	156,89
300 m	15,50	105,18	24,35	159,35	27,97	184,86
350 m	15,76	120,94	24,10	183,45	26,94	211,80
400 m	15,42	136,36	23,89	207,35	25,14	236,94
450 m	15,35	151,71	23,77	231,12	24,11	261,05
500 m	15,24	166,95	23,60	254,72	23,94	285,00
Celkem:	166,95		254,72		285,00	

Vzorek 6 – zátěž 0,32 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	17,49	17,49	24,26	24,26	24,21	24,21
100 m	15,38	32,87	21,94	46,19	22,17	46,37
150 m	14,26	47,13	20,71	66,90	20,87	67,24
200 m	13,29	60,42	18,82	85,72	19,68	86,92
250 m	12,92	73,35	18,67	104,39	18,62	105,54
300 m	12,74	86,09	17,94	122,32	18,51	124,05
350 m	12,29	98,39	17,31	139,63	17,97	142,03
400 m	11,74	110,13	16,91	156,54	17,54	159,57
450 m	11,41	121,54	16,41	172,95	17,10	176,67
500 m	11,32	132,86	16,18	189,13	17,01	193,68
Celkem:	132,86		189,13		193,68	

Mosaz Ms58 – zátěž 0,32 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	93,14	93,14	144,99	144,99	177,79	177,79
100 m	82,09	175,23	137,85	282,85	170,57	348,36
150 m	74,70	249,93	131,63	414,47	167,79	516,15
200 m	71,51	321,44	127,60	542,08	162,94	679,09
250 m	69,47	390,91	122,88	664,96	161,74	840,83
300 m	66,14	457,05	112,23	777,19	158,85	999,68
350 m	65,97	523,02	104,82	882,01	157,89	1157,57
400 m	64,85	587,87	99,96	981,97	156,38	1313,94
450 m	62,55	650,43	95,12	1077,10	156,58	1470,52
500 m	62,26	712,68	93,83	1170,92	156,54	1627,06
Celkem:	712,68		1170,92		1627,06	

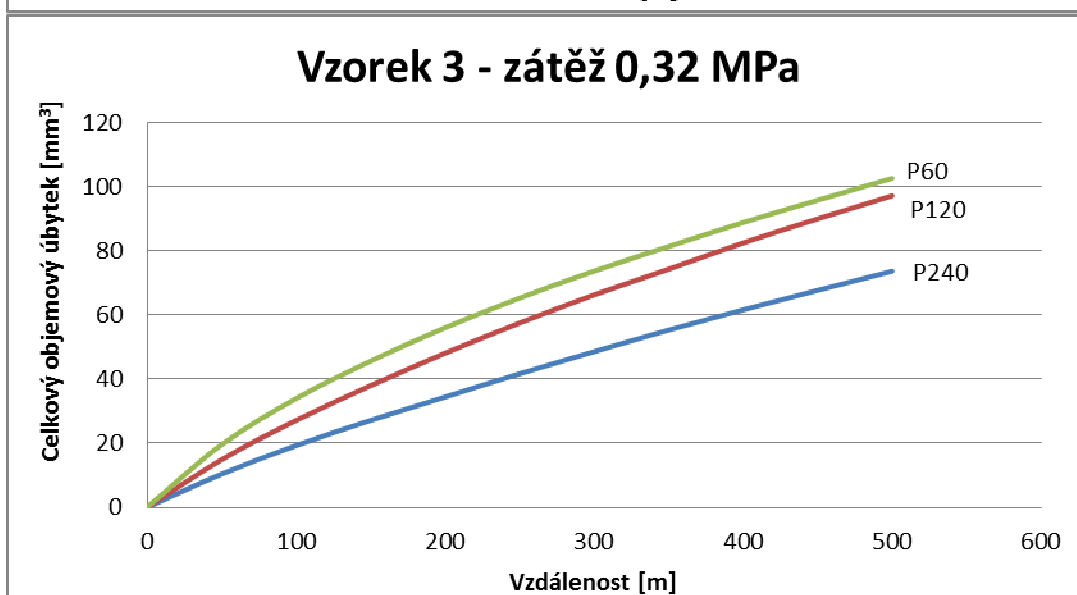
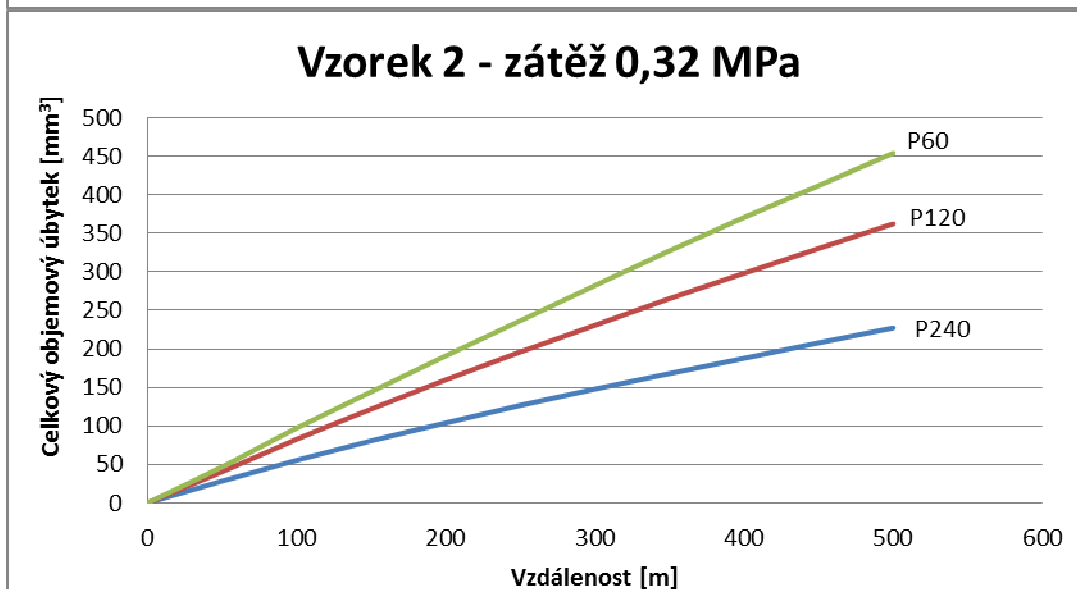
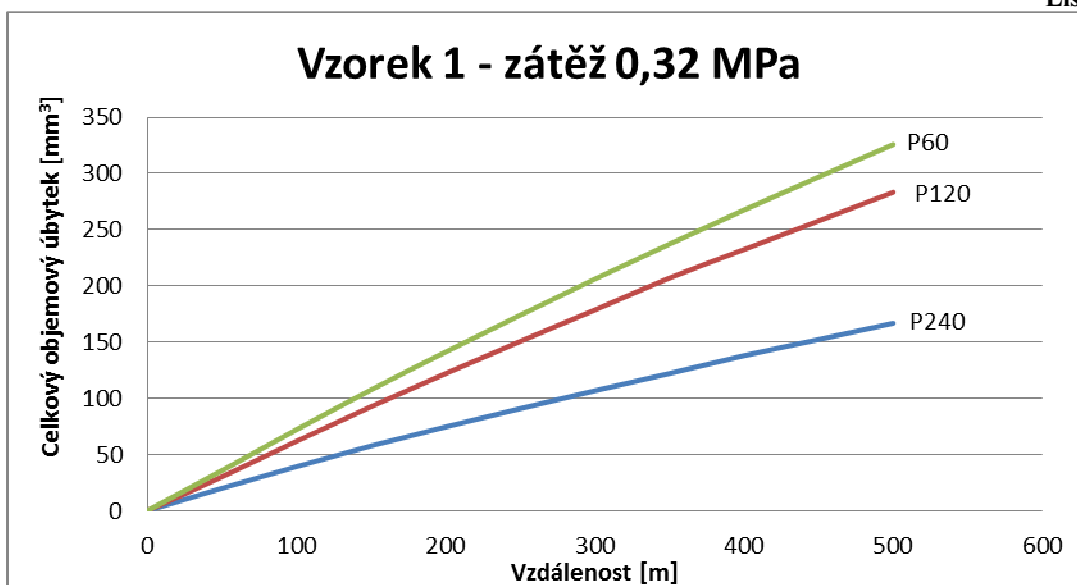
TSM 20 – zátěž 0,32 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05
100 m	0,01	0,03	0,00	0,05	0,06	0,10
150 m	0,01	0,03	0,01	0,06	0,01	0,11
200 m	0,00	0,03	0,01	0,06	0,01	0,12
250 m	0,01	0,04	0,01	0,08	0,01	0,13
300 m	0,01	0,05	0,01	0,08	0,01	0,14
350 m	0,00	0,05	0,00	0,08	0,01	0,15
400 m	0,01	0,06	0,01	0,09	0,01	0,15
450 m	0,00	0,06	0,00	0,09	0,01	0,16
500 m	0,01	0,06	0,02	0,11	0,00	0,16
Celkem:	0,06		0,11		0,16	

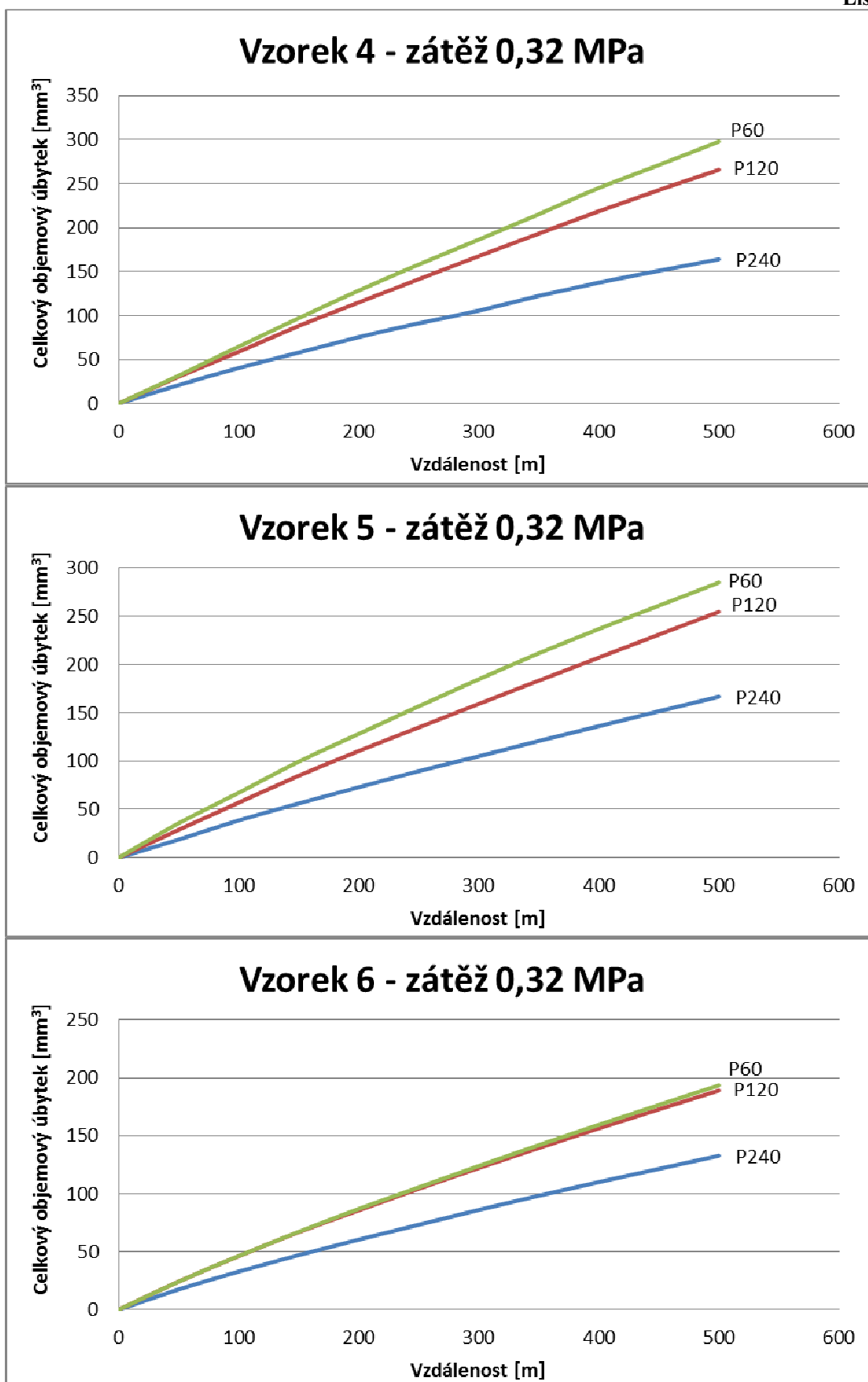
Ocel 11 373 – zátěž 0,32 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	40,37	40,37	52,89	52,89	60,80	60,80
100 m	35,99	76,36	50,48	103,37	60,39	121,19
150 m	33,81	110,17	49,77	153,14	58,92	180,10
200 m	31,81	141,97	47,43	200,57	56,57	236,67
250 m	30,76	172,74	47,99	248,55	55,47	292,14
300 m	30,65	203,38	46,15	294,71	54,66	346,80
350 m	29,79	233,17	46,17	340,88	53,16	399,96
400 m	29,57	262,75	43,95	384,83	53,08	453,05
450 m	29,63	292,37	44,99	429,82	52,08	505,12
500 m	28,75	321,12	43,88	473,70	51,45	556,57
Celkem:	321,12		473,70		556,57	

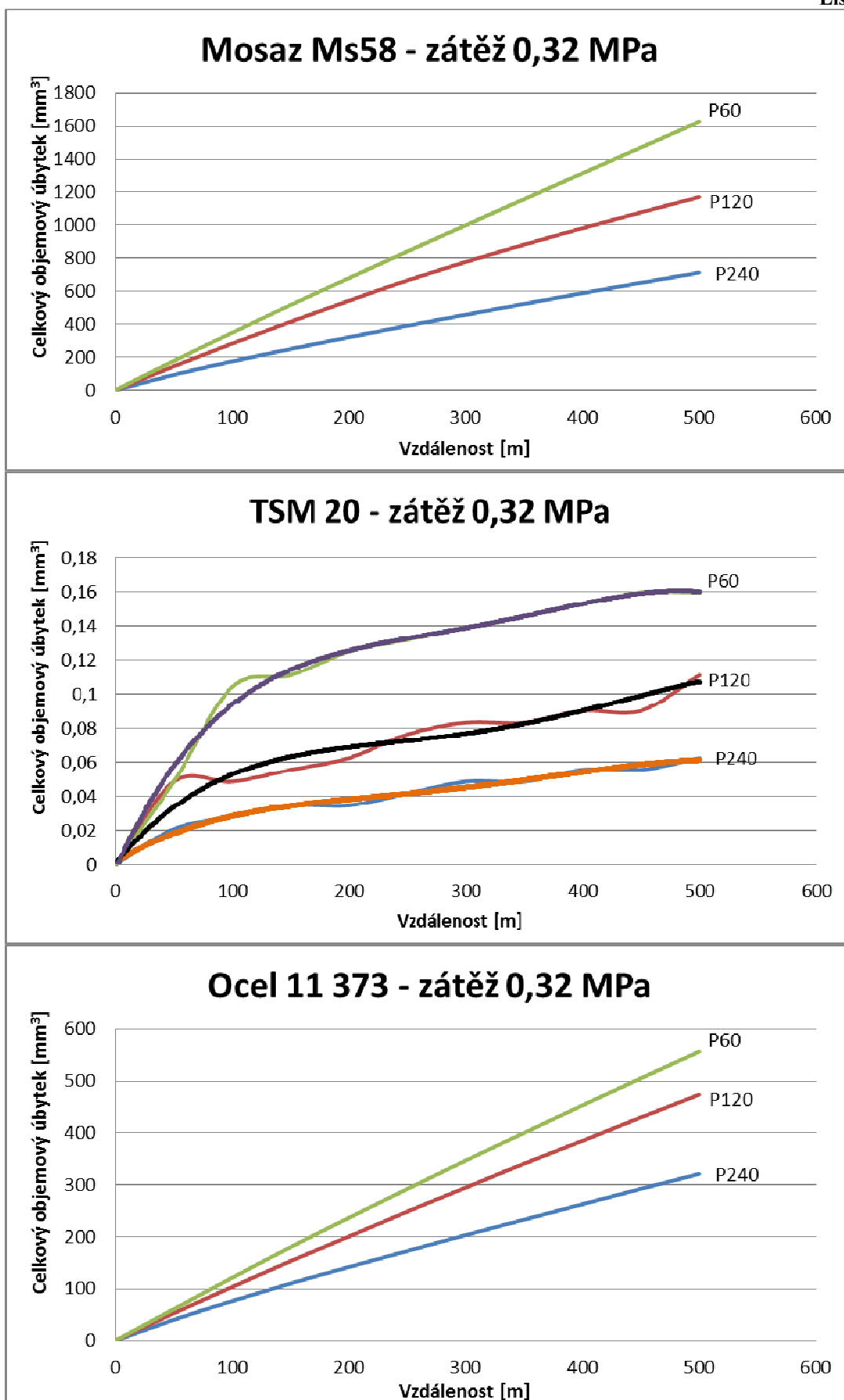
Ocel 19 133 – zátěž 0,32 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	29,94	29,94	42,44	42,44	55,06	55,06
100 m	29,05	58,99	43,69	86,13	52,73	107,79
150 m	26,76	85,74	41,26	127,38	50,59	158,38
200 m	26,41	112,15	39,96	167,35	49,69	208,08
250 m	24,88	137,04	38,87	206,22	45,59	253,67
300 m	24,72	161,76	37,78	244,00	45,54	299,21
350 m	24,56	186,32	36,88	280,88	43,41	342,62
400 m	24,27	210,59	36,41	317,29	44,67	387,28
450 m	24,03	234,62	35,95	353,24	44,91	432,19
500 m	24,26	258,87	35,86	389,10	44,73	476,92
Celkem:	258,87		389,10		476,92	

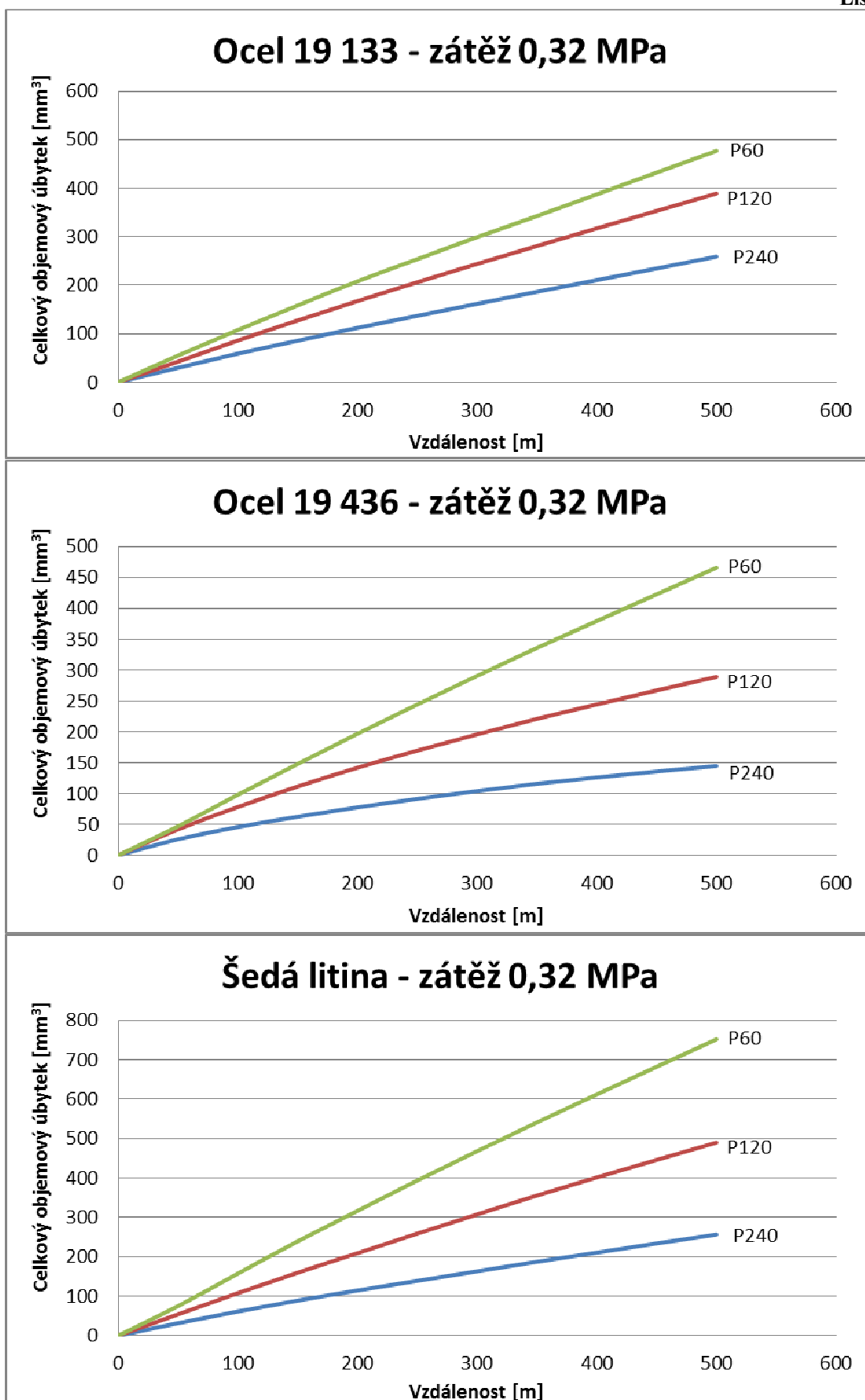
Ocel 19 436 – zátěž 0,32 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	26,08	26,08	42,21	42,21	46,99	46,99
100 m	19,90	45,97	36,12	78,32	51,21	98,19
150 m	16,62	62,60	33,21	111,53	49,75	147,95
200 m	15,16	77,75	30,47	142,00	48,97	196,92
250 m	13,70	91,45	27,73	169,73	47,36	244,29
300 m	12,75	104,21	26,10	195,83	46,53	290,82
350 m	11,82	116,03	25,29	221,12	45,14	335,96
400 m	10,22	126,25	23,35	244,47	43,58	379,55
450 m	9,55	135,79	22,77	267,23	43,34	422,88
500 m	8,94	144,73	22,09	289,32	43,12	466,00
Celkem:	144,73		289,32		466,00	

Šedá litina – zátěž 0,32 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Celk. úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	31,50	31,50	53,97	53,97	74,76	74,76
100 m	29,81	61,31	53,82	107,79	82,61	157,37
150 m	27,68	88,99	51,93	159,72	81,86	239,23
200 m	25,49	114,48	49,50	209,23	77,39	316,62
250 m	24,48	138,97	49,75	258,98	77,16	393,78
300 m	24,39	163,35	48,58	307,56	74,52	468,30
350 m	24,07	187,42	48,12	355,68	72,95	541,26
400 m	23,37	210,79	45,92	401,60	70,90	612,15
450 m	23,35	234,14	44,52	446,12	70,30	682,46
500 m	22,40	256,54	44,00	490,12	69,81	752,26
Celkem:	256,54		490,12		752,26	









Vzorek 1 – zátěž 0,1 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	6,62	6,62	7,83	7,83	7,70	7,70
100 m	5,77	12,39	8,23	16,06	7,66	15,37
150 m	5,86	18,24	8,26	24,32	7,48	22,85
200 m	5,60	23,84	7,87	32,19	7,33	30,18
250 m	4,66	28,50	7,50	39,69	7,15	37,32
300 m	5,44	33,94	7,62	47,31	6,68	44,01
350 m	5,26	39,21	7,50	54,81	7,08	51,09
400 m	5,26	44,47	8,26	63,06	6,85	57,94
450 m	4,72	49,19	7,61	70,68	6,88	64,82
500 m	4,59	53,79	7,39	78,07	6,22	71,04
Celkem:	53,79		78,07		71,04	

Vzorek 2 – zátěž 0,1 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	8,27	8,27	10,93	10,93	10,64	10,64
100 m	8,06	16,33	11,32	22,25	10,92	21,56
150 m	7,41	23,74	11,46	33,70	10,97	32,53
200 m	6,95	30,70	11,03	44,74	11,00	43,52
250 m	6,90	37,59	11,02	55,76	10,59	54,11
300 m	7,19	44,79	10,91	66,66	10,88	64,99
350 m	6,91	51,70	10,93	77,60	11,29	76,28
400 m	6,80	58,50	10,73	88,32	10,59	86,86
450 m	6,90	65,40	10,65	98,97	10,62	97,49
500 m	7,01	72,41	10,53	109,51	10,65	108,14
Celkem:	72,41		109,51		108,14	

Vzorek 3 – zátěž 0,1 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	2,90	2,90	3,74	3,74	3,82	3,82
100 m	2,30	5,20	2,76	6,50	2,93	6,75
150 m	2,35	7,55	2,61	9,11	2,50	9,25
200 m	2,12	9,66	2,58	11,69	1,99	11,23
250 m	1,97	11,63	2,12	13,80	2,06	13,30
300 m	1,75	13,39	2,08	15,88	2,00	15,30
350 m	1,84	15,23	1,84	17,72	1,73	17,03
400 m	1,79	17,03	1,97	19,70	1,77	18,79
450 m	1,61	18,64	1,79	21,49	1,84	20,64
500 m	1,57	20,21	1,73	23,22	1,68	22,31
Celkem:	20,21		23,22		22,31	

Vzorek 4 – zátěž 0,1 MPa						
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	6,22	6,22	6,16	6,16	8,38	8,38
100 m	6,14	12,37	9,58	15,74	6,91	15,29
150 m	5,59	17,95	7,75	23,49	6,86	22,14
200 m	4,04	21,99	7,44	30,93	6,89	29,04
250 m	5,35	27,34	7,24	38,17	6,54	35,58
300 m	5,61	32,96	6,88	45,05	6,17	41,75
350 m	4,98	37,94	6,89	51,94	5,33	47,08
400 m	5,35	43,29	6,95	58,89	4,99	52,07
450 m	5,94	49,23	6,75	65,64	4,99	57,07
500 m	5,28	54,51	6,66	72,30	4,99	62,06
Celkem:	54,51		72,30		62,06	

Vzorek 5 – zátěž 0,1 MPa

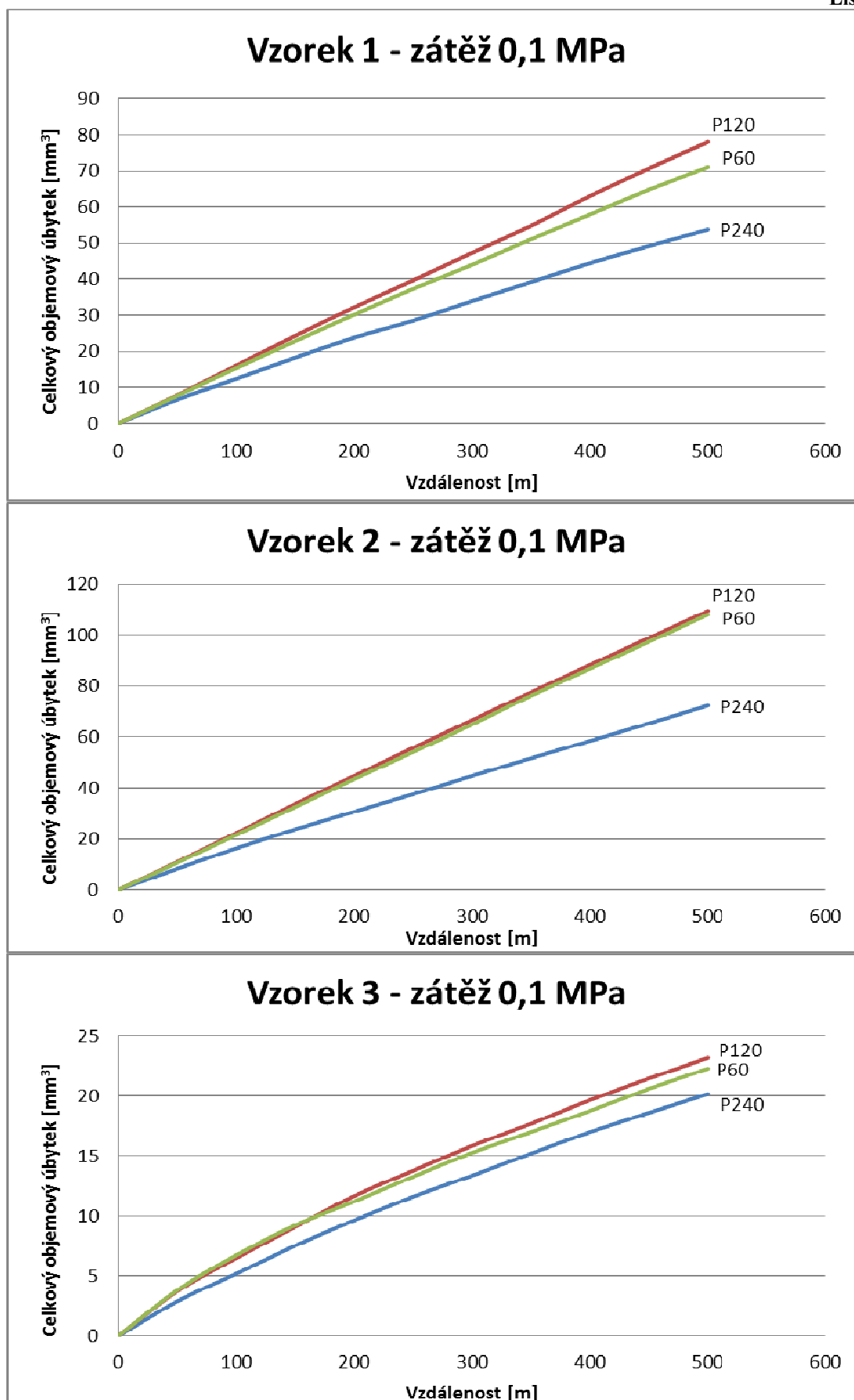
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	5,95	5,95	7,14	7,14	6,32	6,32
100 m	6,53	12,48	7,54	14,68	7,75	14,07
150 m	4,62	17,10	7,28	21,96	5,95	20,02
200 m	5,28	22,38	7,02	28,98	7,14	27,16
250 m	5,21	27,59	7,84	36,83	5,67	32,83
300 m	5,17	32,76	6,23	43,05	6,16	38,99
350 m	5,37	38,13	6,94	50,00	6,96	45,94
400 m	5,00	43,13	6,70	56,69	5,43	51,38
450 m	4,85	47,98	6,57	63,26	5,89	57,27
500 m	5,71	53,68	7,28	70,54	6,72	63,99
Celkem:	53,68		70,54		63,99	

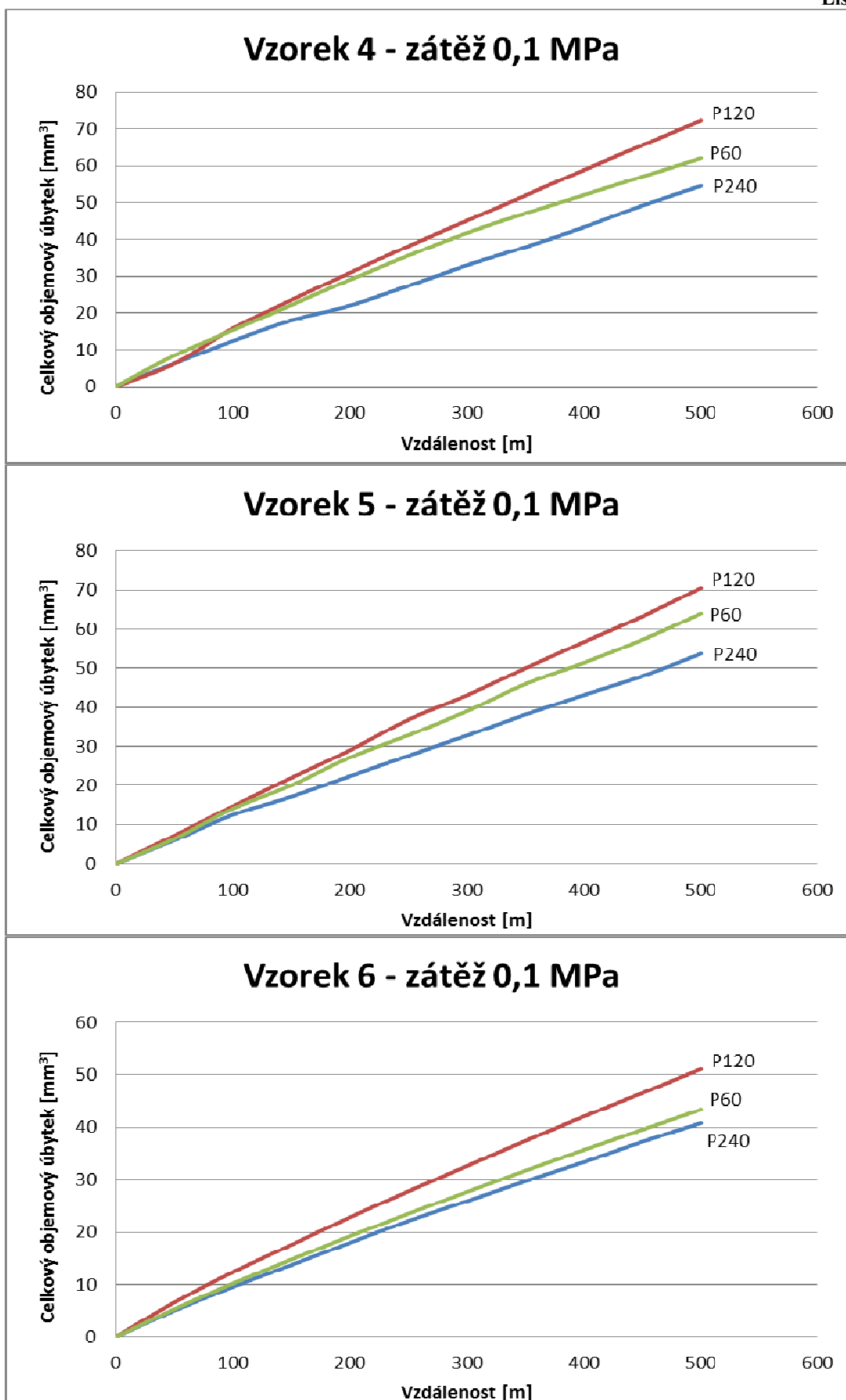
Vzorek 6 – zátěž 0,1 MPa

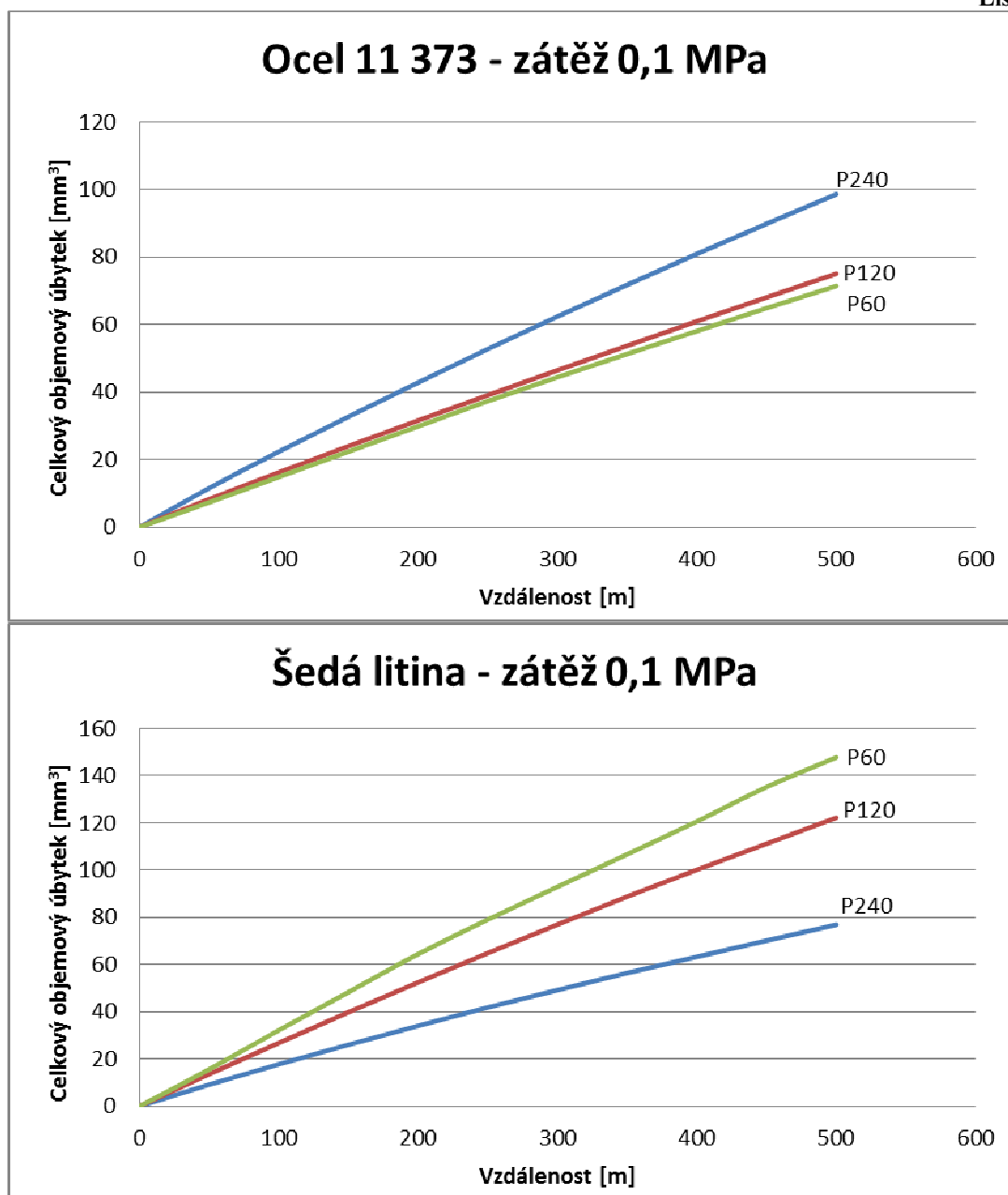
Zrnitost plátina:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	5,01	5,01	6,59	6,59	5,31	5,31
100 m	4,54	9,55	5,78	12,37	4,88	10,19
150 m	4,19	13,74	5,21	17,58	4,59	14,78
200 m	4,22	17,96	5,24	22,82	4,45	19,23
250 m	4,18	22,14	4,96	27,78	4,29	23,53
300 m	3,77	25,91	4,82	32,60	4,14	27,67
350 m	3,81	29,72	4,82	37,42	4,06	31,73
400 m	3,64	33,36	4,65	42,08	3,95	35,68
450 m	3,90	37,26	4,47	46,55	3,87	39,55
500 m	3,56	40,82	4,54	51,09	3,83	43,38
Celkem:	40,82		51,09		43,38	

Ocel 11 373 – zátěž 0,1 MPa						
Zrnitost plátna:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	11,57	11,57	8,29	8,29	7,35	7,35
100 m	10,79	22,36	7,92	16,21	7,51	14,86
150 m	10,37	32,74	7,80	24,01	7,53	22,39
200 m	10,10	42,84	7,60	31,60	7,49	29,88
250 m	9,94	52,77	7,51	39,12	7,47	37,35
300 m	9,61	62,39	7,37	46,49	7,09	44,44
350 m	9,39	71,78	7,26	53,74	6,85	51,30
400 m	9,14	80,92	7,24	60,99	6,78	58,08
450 m	8,93	89,85	7,08	68,06	6,79	64,87
500 m	8,76	98,61	7,01	75,07	6,56	71,42
Celkem:	98,61		75,07		71,42	

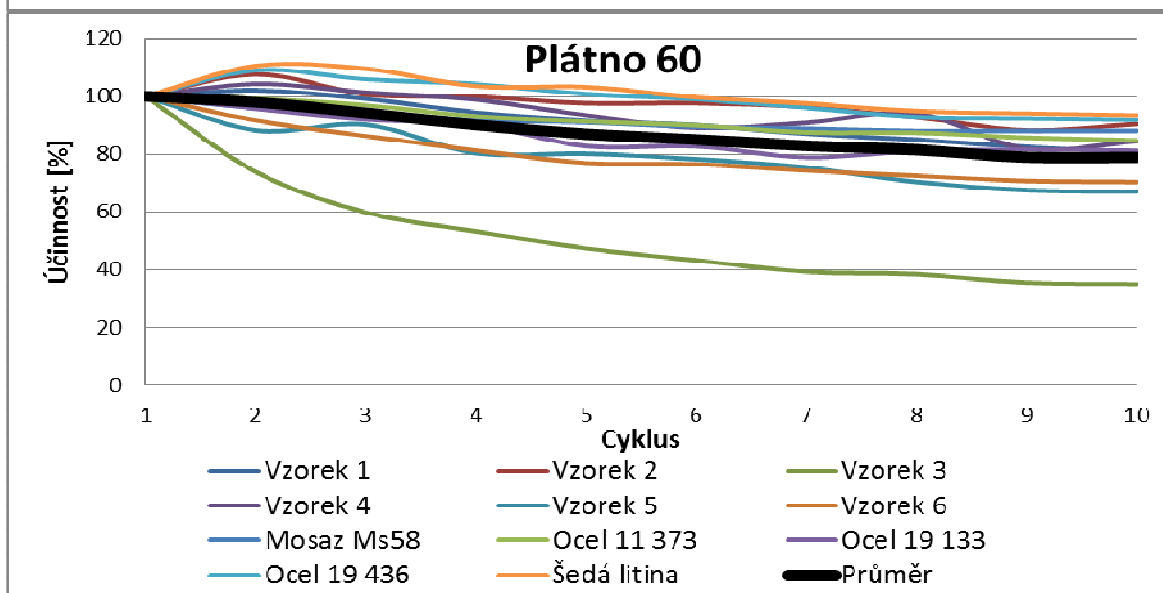
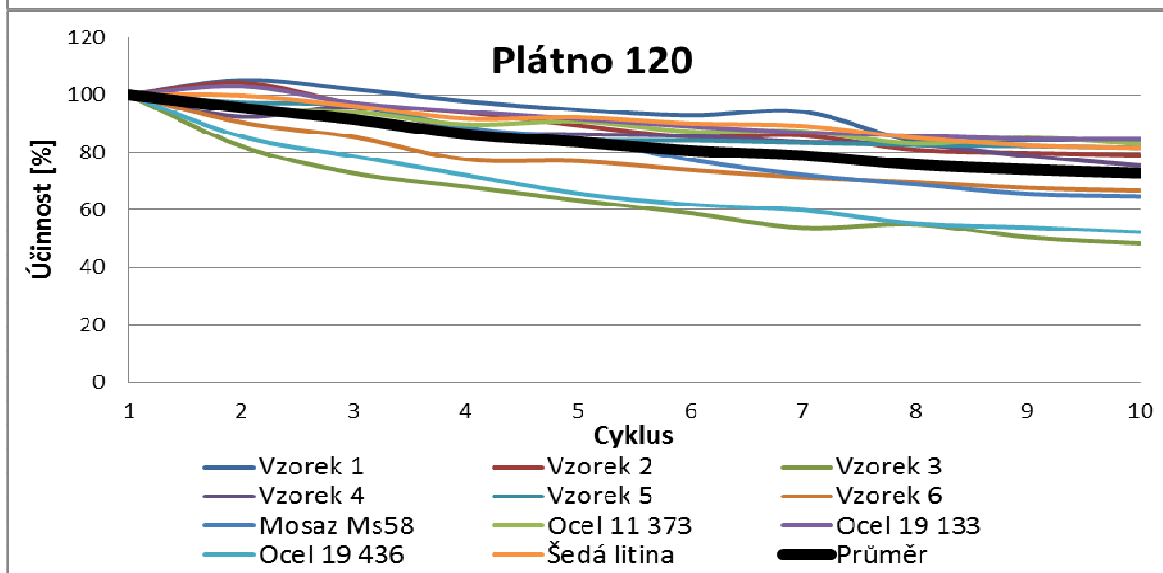
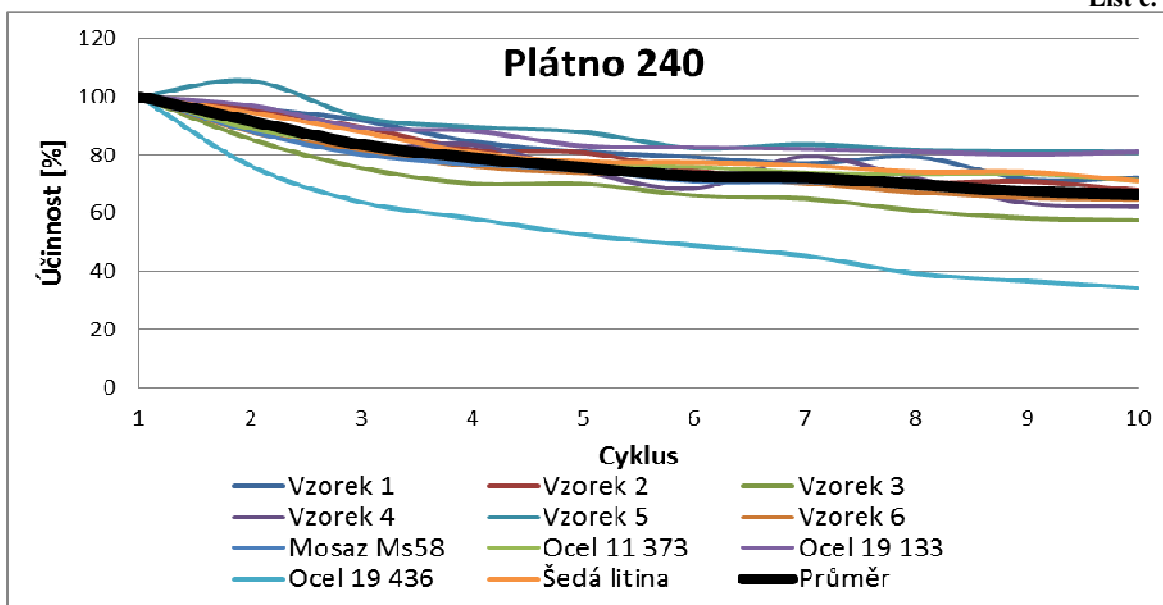
Šedá litina – zátěž 0,1 MPa						
Zrnitost plátna:	240		120		60	
Vzdálenost opotřebení:	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]	Objemový úbytek [mm ³]	Průběžný úbytek objemu [mm ³]
0 m	0	0	0	0	0	0
50 m	9,16	9,16	13,60	13,60	15,60	15,60
100 m	8,65	17,81	13,23	26,83	16,62	32,22
150 m	8,28	26,08	13,01	39,83	16,11	48,33
200 m	8,00	34,08	12,65	52,48	16,17	64,50
250 m	7,79	41,88	12,43	64,91	14,62	79,12
300 m	7,37	49,24	12,11	77,02	13,86	92,98
350 m	7,24	56,48	11,85	88,87	13,78	106,76
400 m	6,86	63,34	11,32	100,19	13,93	120,69
450 m	6,86	70,19	11,08	111,27	14,61	135,30
500 m	6,72	76,91	10,99	122,26	12,54	147,83
Celkem:	76,91		122,26		147,83	







Účinnost plátna 240 [%]													
Cyklus	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5	Vzorek 6	Mosaz Ms58	Ocel 11 373	Ocel 19 133	Ocel 19 436	Šedá litina	Průměr	Směrodat. odchylka
1.	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0
2.	96	96	85	93	105	88	88	89	97	76	95	92	7,6
3.	92	90	76	83	93	82	80	84	89	64	88	84	8,5
4.	85	82	70	84	90	76	77	79	88	58	81	79	8,9
5.	81	81	70	74	88	74	75	76	83	53	78	76	9,1
6.	79	75	66	69	82	73	71	76	83	49	77	73	9,5
7.	77	71	65	79	84	70	71	74	82	45	76	72	10,5
8.	79	70	61	72	82	67	70	73	81	39	74	70	11,9
9.	72	71	58	63	81	65	67	73	80	37	74	67	12,3
10.	72	68	58	62	81	65	67	71	81	34	71	66	12,8
Účinnost plátna 120 [%]													
Cyklus	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5	Vzorek 6	Mosaz Ms58	Ocel 11 373	Ocel 19 133	Ocel 19 436	Šedá litina	Průměr	Směrodat. odchylka
1.	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0
2.	105	104	82	92	97	90	95	95	103	86	100	96	7,5
3.	102	97	73	96	96	85	91	94	97	79	96	91	8,9
4.	98	94	68	88	89	78	88	90	94	72	92	86	9,5
5.	95	89	63	86	85	77	85	91	92	66	92	84	10,6
6.	93	85	59	86	84	74	77	87	89	62	90	81	11,4
7.	94	86	54	84	83	71	72	87	87	60	89	79	12,8
8.	84	81	55	83	83	70	69	83	86	55	85	76	11,7
9.	84	80	50	79	82	68	66	85	85	54	82	74	12,7
10.	84	79	48	75	82	67	65	83	85	52	82	73	13,0
Účinnost plátna 60 [%]													
Cyklus	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5	Vzorek 6	Mosaz Ms58	Ocel 11 373	Ocel 19 133	Ocel 19 436	Šedá litina	Průměr	Směrodat. odchylka
1.	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0
2.	102	108	74	104	88	92	96	99	96	109	110	98	10,8
3.	99	101	60	101	90	86	94	97	92	106	110	94	13,3
4.	94	100	53	99	80	81	92	93	90	104	104	90	14,5
5.	92	98	47	93	80	77	91	91	83	101	103	87	15,5
6.	90	98	43	89	78	76	89	90	83	99	100	85	15,9
7.	87	96	39	91	75	74	89	87	79	96	98	83	16,6
8.	85	93	38	94	70	72	88	87	81	93	95	82	16,5
9.	82	88	35	82	67	71	88	86	82	92	94	79	16,5
10.	81	90	35	84	67	70	88	85	81	92	93	79	16,7



Výpočty hustot vzorků 1 až 6**Příloha č. 9****List č. 1**

Vzorek:	m	m _k	$\rho_{\text{vzorku}} [\text{g}/\text{cm}^3]$
1	42,868	5,516	7,75
2	40,777	5,206	7,81
3	41,416	5,33	7,75
4	41,305	5,32	7,74
5	42,204	5,482	7,67
6	41,308	5,278	7,80
$\rho_k [\text{g}/\text{cm}^3]$	996,7859		

Plátno P240			
Hmotnostní úbytek etalonu [g]:		227,13	
Hustota etalonu [g.cm ⁻³]:		7,81	
Materiál	Hmotnostní úbytek vzorku [g]	Hustota vzorku [g.cm ⁻³]	Poměrná objemová odolnost
Vzorek 2	227,13	7,81	1,00
Mosaz Ms58	712,68	8,47	-2,89
TSM 20	0,06	14,40	6698,53
Ocel 11 373	321,12	7,75	-1,43
Ocel 19 133	258,87	7,80	-1,14
Ocel 19 436	144,73	7,70	1,55
Šedá litina	256,54	7,25	-1,22
Plátno P120			
Hmotnostní úbytek etalonu [g]:		362,31	
Hustota etalonu [g.cm ⁻³]:		7,81	
Materiál	Hmotnostní úbytek vzorku [g]	Hustota vzorku [g.cm ⁻³]	Poměrná objemová odolnost
Vzorek 2	362,31	7,81	1,00
Mosaz Ms58	1170,92	8,47	-2,98
TSM 20	0,11	14,40	6010,54
Ocel 11 373	473,70	7,75	-1,32
Ocel 19 133	389,10	7,80	-1,08
Ocel 19 436	289,32	7,70	1,23
Šedá litina	490,12	7,25	-1,46
Plátno P60			
Hmotnostní úbytek etalonu [g]:		454,08	
Hustota etalonu [g.cm ⁻³]:		7,81	
Materiál	Hmotnostní úbytek vzorku [g]	Hustota vzorku [g.cm ⁻³]	Poměrná objemová odolnost
Vzorek 2	454,08	7,81	1,00
Mosaz Ms58	1627,06	8,47	-3,30
TSM 20	0,16	14,40	5240,26
Ocel 11 373	556,57	7,75	-1,24
Ocel 19 133	476,92	7,80	-1,05
Ocel 19 436	466,00	7,70	-1,04
Šedá litina	752,26	7,25	-1,79

Výpočty ceny dláta z alternativních materiálů

Příloha č. 11

List č. 1

Materiál	Hustota [g/cm ³]	Cena materiálu [Kč/kg]	Hmotnost dláta [kg]	Objem dláta [cm ³]	Cena materiálu na dláto [Kč]
Vzorek 2	7,81	114,61	2,07	265,04	237,24
Mosaz Ms58	8,47	180,00	2,24	265,04	404,09
TSM 20	14,4	1 850,00	3,82	265,04	7060,79
Ocel 11373	7,75	30,00	2,05	265,04	61,62
Ocel 19133	7,8	-	-	265,04	-
Ocel 19436	7,7	849,00	2,04	265,04	1732,68
Šedá litina	7,25	47,19	1,92	265,04	90,68