

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta

Odolnost návarových materiálů proti abrazivnímu opotřebení volnými částicemi

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Hrabě, Ph.D.
Autor práce: Bc. Karel Hájek

Praha 2011

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Akademický rok 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Karel Hájek

obor Silniční a městská automobilová doprava

Vedoucí katedry Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu ČZU v Praze čl. 17 odst. 2 určuje tuto diplomovou práci.

Název práce: **Odolnost návarových materiálů proti abrazivnímu opotřebení volnými částicemi**

Osnova diplomové práce:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Zkušební zařízení pro stanovení odolnosti materiálu proti opotřebení
4. Laboratorní zkoušky návarových materiálů proti opotřebení
5. Závěr
6. Seznam literatury
7. Přílohy

Rozsah hlavní textové části: 40 - 60 stran

Doporučené zdroje:

- [1] Friction and Wear Testing. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1987. pp. 186.
- [2] HAVLÍČEK, J. aj.: Provozní spolehlivost strojů. 2. přepr. vyd. Praha, SZN 1989. 616 s.
- [3] KUNCIPÁL, J. - PILOUS, V. - DUNOVSKÝ, J.: Nové technologie ve svařování. Praha, SNTL 1984. 292 s.
- [4] PLUHAR, J. aj: Nauka o materiálech. Praha, SNTL 1989. 552 s.
- [5] POŠTA, J.: Technologie údržby a oprav. Praha, ČZU 1995. 198 s.
- [6] VOCEL, M. - DUFEK, aj.: Tření a opotřebenění strojních součástí. Praha, SNTL 1976. 376 s.
- [7] Repair and Maintenance Welding Handbook. ESAB AB. 120 s.
- [8] ČSN 01 5050. Opotřebenění materiálu. Návosloví. 1969.
- [9] časopisy: Strojárstvo - Strojírenství, Zváranie - Svařování, MM Průmyslové spektrum, Dělení spojování svařování materiálů, Technik.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Hrabě, Ph.D.**

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání diplomové práce: duben 2011

L.S.


.....
Vedoucí katedry




.....
Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Odolnost návarových materiálů proti abrazivnímu opotřebení volnými částicemi**, vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v přiloženém soupisu literatury.

Poděkování

Děkuji panu Ing. Petru Hraběti, Ph.D., vedoucímu diplomové práce, za metodické vedení a cenné rady, které mi během řešení této diplomové práce vždy ochotně poskytoval.

V Praze dne:.....

Podpis:.....

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá tématem odolnosti návarových materiálů proti abrazivnímu opotřebení volnými částicemi. V práci jsou uvedena a popsána zkušební zařízení pro stanovení odolnosti materiálu proti různým typům opotřebení a jejich výhody a nevýhody. Dále jsou popsány základní druhy opotřebení, zejména abrazivní opotřebení a vlivy faktorů na proces tohoto opotřebení. V praktické části je popsán postup měření abrazivního opotřebení volnými částicemi, vyhodnocení a zhodnocení celého experimentu.

Klíčová slova

abrazivní opotřebení, abrazivní částice, zatížení, návarový materiál, ANOVA

Three body abrasion test of hardfacing materials

This thesis deals with the resistance of weld materials to abrasive wear loose particles. The paper lists and describes the test equipment for determining the material resistance to various types of wear and their advantages and disadvantages. The following describes the basic types of wear, particularly the abrasive wear and the impact of factors in the process of wear. The practical part describes the procedure for measuring the abrasive wear loose particles, the assessment and evaluation of the experiment.

Key words

Abrasive wear, abrasive particles, load, weld material, ANOVA

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl a metodika práce.....	3
2.1	Cíle práce.....	3
2.2	Metodika práce.....	3
3	Zkušební zařízení pro stanovení odolnosti materiálu proti opotřebení.....	4
3.1	Opotřebení materiálů.....	4
3.2	Zkoušení odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení	4
3.2.1	Přístroje s vázanými částicemi ke zkoušení odolnosti kovových materiálů	6
3.2.2	Přístroje s volnými částicemi ke zkoušení odolnosti kovových materiálů.....	7
3.2.3	Abrazivní opotřebení.....	9
3.2.3.1	Modely abrazivního opotřebení	12
3.2.3.2	Opotřebení abrazivními částicemi mezi stykovými povrchy	15
3.2.3.3	Vliv abrazivních částic na proces opotřebení	18
3.2.3.4	Vliv poměru tvrdostí abraziva a opotřebovaného materiálu	18
3.2.3.5	Vliv tvaru abrazivních částic	19
3.2.3.6	Vliv velikosti abrazivních částic	20
3.3	Zkoušení odolnosti materiálů proti adhezivnímu opotřebení	21
3.3.1	Přístroje s bodovým dotykem	21
3.3.2	Přístroje s čárovým dotykem	21
3.3.3	Přístroje s plošným dotykem.....	22
3.3.4	Adhezivní opotřebení.....	23
3.4	Zkoušení odolnosti materiálů proti erozivnímu opotřebení	24
3.4.1	Přístroje na zkoušení odolnosti materiálů v proudu kapaliny s částicemi	24
3.4.2	Erozivní opotřebení.....	26
3.5	Zkoušení odolnosti materiálů proti kavitačnímu opotřebení	27
3.5.1	Kavitační opotřebení.....	29
3.6	Zkoušení odolnosti materiálů proti únavovému opotřebení	30

3.6.1	Únavové opotřebenění	31
3.7	Zkoušení odolnosti materiálů proti vibračnímu opotřebenění	33
3.7.1	Vibrační opotřebenění	34
4	Laboratorní zkoušky návarových materiálů proti opotřebenění ...	36
4.1	Návarové materiály	36
4.1.1	Laboratorní návarové materiály	37
4.1.1.1	Návarový materiál PZ 6159	37
4.1.1.2	Návarový materiál OK TUBRODUR 14.70	38
4.2	Abrazivní částice pro laboratorní zkoušku	39
4.2.1	Umělý korund	39
4.2.2	Ostrohanný písek	40
4.2.2.1	Stroj pro analytické třídění HAVER EML digital plus	42
4.3	Laboratorní zkouška návarových materiálů proti abrazivnímu opotřebenění ...	44
4.3.1	Příprava laboratorní zkoušky	44
4.3.2	Laboratorní zkouška	46
4.3.2.1	Zařízení s brusným žlabem	46
4.3.2.2	Měření	48
4.4	Vyhodnocení laboratorní zkoušky návarových materiálů proti abrazivnímu opotřebenění	51
4.4.1	Vyhodnocení abrazivních částic	51
4.4.2	Vyhodnocení hmotnostních úbytků návarových materiálů	56
5	Závěr	63
6	Seznam literatury	65
7	Seznam obrázků	67
8	Seznam tabulek	69
9	Přílohy	I

1 Úvod

Spolehlivost strojů a zařízení znamená pro lidstvo jednu z nejdůležitějších potřeb v technické praxi. Fungování zařízení a strojů závisí především na pravidelné údržbě, optimální konstrukci a kvalitní opravě umožňující činnost při požadovaných ekonomických a technických parametrech. Pokud stroj nebo zařízení správně funguje, má pozitivní vliv na kvalitní výrobu součástí.

Je nesmírně důležité využívat poznatky tribologie při všech úsecích konstruování, výroby i údržby strojních zařízení a strojů. Jelikož tribologie probíhá při vzájemném pohybu dvou nebo více materiálů, je nutné při konstruování strojních zařízení s touto skutečností počítat. Je celá řada součástí umístěná na strojích, u kterých dochází k vzájemnému pohybu. Vzájemným pohybem součástí, resp. vzájemným pohybem povrchů vzniká tření a opotřebení, které má za následek postupnou degradaci povrchových vrstev a tím zhoršení funkčních vlastností součástí.

Trend rozvoje současné techniky a výroby lze charakterizovat růstem absolutních i měrných výkonů strojů a zařízení spojených se změnou jejich rozměrů, růstem automatizované výroby zároveň s klesající tendencí obsluhujících pracovníků a také zvětšováním složitosti a stupně vzájemné vazby strojů a zařízení v průmyslových odvětvích i v technologických procesech. V řadě případů se v důsledku uvedených trendů zvyšují otáčky strojů, zvětšují se jejich rozměry, rostou provozní teploty, tlaky a rychlosti. Jakmile dochází k růstu provozních parametrů, vznikají negativní účinky, které působí na okolí. Jde hlavně o růst vibrací, nárůst hladiny zvuku a také zvýšení průmyslového odpadu a množství exhalací, zejména při provozu, kdy dochází k nadměrnému opotřebení funkčních povrchů strojních součástí. Typickým příkladem je ložisko, u kterého dochází k nadměrné hlučnosti a vibraci při nerovnoměrném opotřebení.

Pokud se zvýší výkon určitého stroje nebo zařízení, rostou problémy zejména s třením a opotřebením. Ty mají za následek hledání nových konstrukčních variant, které umožňují další rozvoj zařízení s dosavadními materiály, nebo hledání nových kvalitnějších a odolnějších materiálů.

Nová zařízení a stroje musí zajišťovat bezporuchový a dlouhodobý provoz z hlediska funkce jednotlivých součástí a jejich skupin. V případě potřeby musí umožňovat rychlou a snadnou údržbu a to jak v rámci soustavné prevence, tak i při havárii a odstraňování nahodilých provozních poruch.

2 Cíl a metodika práce

2.1 Cíle práce

Diplomová práce se zabývá tématem odolnosti návarových materiálů proti abrazivnímu opotřebení volnými částicemi.

Hlavním cílem diplomové práce je podle statisticky navrženého experimentu určit a vyhodnotit jednotlivé vlivy vstupních faktorů v procesu opotřebení v závislosti na výstupní naměřenou veličinu, kterou představuje hmotnostní úbytek návarového materiálu. Vstupní faktory v procesu abrazivního opotřebení představují druh návarového materiálu, druh abrazivních částic, velikost zatížení během opotřebení a velikost abrazivních částic.

Dalším cílem je na základě navrženého experimentu vyhodnocení abrazivních částic před a po procesu abrazivního opotřebení a určení jejich velikosti.

2.2 Metodika práce

Teoretická část diplomové práce je zpracována formou literární rešerše různých informačních a literárních zdrojů. Literární rešerše umožňuje získat přehled současných znalostí pro splnění praktické části. V první kapitole jsou uvedena zkušební zařízení pro stanovení odolnosti materiálu proti různým typům opotřebení, jejich základní rozdělení a výhody a nevýhody použití. V následujících podkapitolách jsou detailně rozvedeny informace o základních druzích opotřebení, zejména o abrazivním opotřebení a působení jednotlivých vlivů a faktorů na proces tohoto opotřebení.

Praktická část diplomové práce popisuje nejprve použití a složení návarových materiálů použitých pro laboratorní zkoušky. Dále zahrnuje charakteristiku abrazivních částic a metodiku roztřídění na jednotlivé frakce. Dalším krokem je možné na základě roztříděných abrazivních částic uskutečnit naplánovaný experiment. Poslední fází je vyhodnocení naměřených veličin pomocí statistického softwaru Statistica a analýzy rozptylu (ANOVA) a objektivní interpretace zjištěných výsledků.

3 Zkušební zařízení pro stanovení odolnosti materiálu proti opotřebení

3.1 Opotřebení materiálů

Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, vyvolaná vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává. Opotřebení se projevuje odstraňováním nebo přemísťováním částic hmoty z povrchu součásti mechanickými účinky působících sil, doprovázenými někdy i jinými vlivy, např. chemickými nebo elektrochemickými. Procesy opotřebení se rozdělují dle ČSN 01 5050 na šest základních druhů: abrazivní, adhezivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační. Dnes norma není platná, neboť neexistuje žádný mezinárodní ekvivalent této normy. V provozních podmínkách konkrétních strojů a zařízení je možné se setkat se situací, kdy působí současně více druhů opotřebení najednou, nebo např. adhezivní opotřebení přechází v abrazivní. Mnohdy též působí další degradační procesy, které mohou modifikovat dominantní mechanismy opotřebení. Jelikož se práce zabývá abrazivním opotřebením návarových materiálů, je problematika abrazivního opotřebení více rozvedena. [1, 2]

3.2 Zkoušení odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení

Během provozních zkoušek odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení působí vyjma abraze i další degradační procesy, jako především okolní prostředí, proměnné zatížení a jeho frekvence apod. Podstatnými nezbytnostmi u provozních zkoušek jsou identické podmínky abrazivního opotřebení jako v provozu. Zkušební vzorek musí tvořit část skutečného zařízení, doba zkoušky v porovnání s celkovou životností dané součásti musí být relativně krátká a přítomnost zkušebních vzorků smí způsobovat jen velice malé rozdíly v provozních podmínkách. [1]

Mezi laboratorními a provozními zkouškami existuje odlišnost. Jedná se o faktory intenzity opotřebení a gradient procesu opotřebení. Úsilím v laboratorních zkouškách je udržet neměnnou intenzitu opotřebení, jako je stálá abrazivita částic

a statické zatížení. Na rozdíl od provozních zkoušek je intenzita opotřebení proměnná v čase i v místě. Z toho důvodu bude na jednotlivých místech funkčního povrchu gradient procesu opotřebení rozdílný. V řadě případů lze obtížně napodobovat podmínky provozních zkoušek, je proto nezbytné použít statistické metody pro hodnocení procesu opotřebení. Zvětšením počtu zkoušek nebo snížením hodnoty standardní odchylky, případně oběma postupy, může být zlepšená přesnost určení střední životnosti součásti či provozního uzlu. [1]

Je řada laboratorních zkoušek abrazivního opotřebení, které zahrnují širokou škálu testů na zkušebních zařízeních. Od přístroje s brusným plátnem, vyznačující se kluznou abrazí bez rázového zatížení až po laboratorní čelistový drtič, kde dochází k modelování procesů opotřebení při drcení. Tyto zkoušky se vyznačují řadou výhod: lze řídit jejich parametry, jsou levné, dovolují vyzkoušet v krátké době mnoho různých materiálů. Je důležité zvažovat při laboratorních zkouškách při volbě zkušebního zařízení a parametrů zkoušky stav abraziva (volné/pevně vázané), rychlost relativního pohybu během abraze, velikost sil působících v tribologickém systému a velikost částic abraziva, jejich tvar a tvrdost. Úsilí je nalézt korelaci mezi provozními a laboratorními zkouškami. Překážky spočívají v odlišném mechanismu opotřebení povrchových vrstev než v provozu, v absenci rázového zatěžování, a v rozdílných abrazech a laboratorních zkouškách v provozu. [1]

Experimentální zařízení modelující kluznou abrazi se rozdělují:

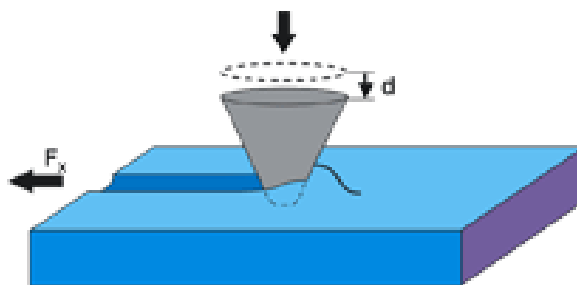
- a) Přístroje s vázanými částicemi.
- b) Přístroje s volnými částicemi.
- c) Přístroje s vrstvou volných částic mezi stykovými povrchy.
- d) Zařízení, které modelují procesy abraze v reálných podmínkách abraze.

Vázané částice se používají ve formě brusného plátna, brusného kotouče nebo ve formě hrotu definovaného tvaru. [1]

Ke studiu tribologických vlastností povlaků nebo jednotlivých strukturních složek se používají v první řadě přístroje s hrotem. Ke zjišťování adheze tvrdých PVD a CVD povlaků k podkladovému materiálu je typickým představitelem Scratch Tester, jehož princip je znázorněn na obr. 1. Diamantový hrot ve tvaru jehlanu nebo kužele je vtlačován rostoucí silou do povrchu vzorku, který se pomalu pohybuje. Cílem je zjistit zatížení, které má za následek tvorbu prvních trhlin v povlaku, resp. kdy dojde

k celkovému porušení povlaku. Dalším zařízením s hrotem je přístroj na základě kyvadla. Hrot je připevněn na kladivo Charpyho zařízení a pohybem kyvadla dochází k rýhování povrchu vzorku. Mezi výhody patří rychlost a jednoduchost zkoušky a velmi malý rozptyl výsledků. Ke studiu lokálního mechanismu abrazivního opotřebení lze oba tyto přístroje bez pochyby použít, ale experimentální údaje pro řešení praktických případů abrazivního opotřebení jsou omezené. [1]

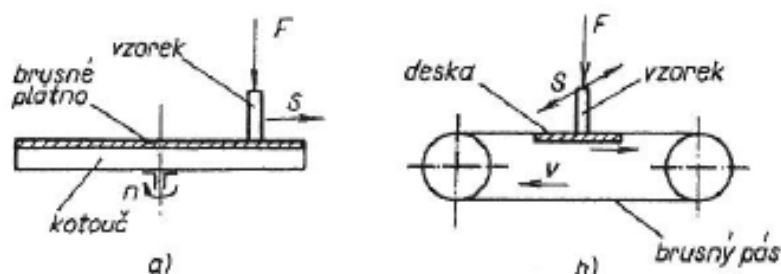
Obr. 1 Základní princip Scratch Testeru [6]



3.2.1 Přístroje s vázanými částicemi ke zkoušení odolnosti kovových materiálů

Nejčastěji se používají ke zkoušení odolnosti kovových materiálů přístroje s brusným plátnem. Jsou známy přístroje s rotačním pohybem a s přímočarým vratným pohybem, eventuálně přístroje s brusným plátnem, které jsou znázorněny na obr. 2. Jejich výhoda je v jednoduchosti a ve spolehlivosti, rozptyl výsledků je poměrně malý ($\pm 5\%$). Nevýhodou jsou změny abrazivity brusných pláten, která se musí z tohoto důvodu předběžně kontrolovat pomocí etalonových vzorků s definovaným chemickým složením a mikrostrukturou. [1]

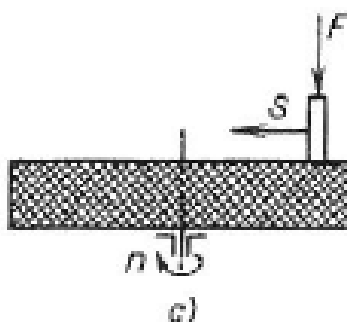
Obr. 2 Schema přístroje s brusným plátnem a brusným pásem [1]



Přístroje s brusným kotoučem umožňují zkoušet odolnost materiálů proti abrazivnímu opotřebení za normálních i vysokých teplot. Schema přístroje s brusným kotoučem je znázorněno na obr. 3. Mezi nevýhody všech přístrojů s vázanými

částicemi patří klesající abrazivita brusného kotouče i brusného plátna při opakovaném kontaktu jednotlivých abrazivních částic s opotřebovaným povrchem zkoušených vzorků. Abrazivní částice se postupně otupují a vylamují vlivem působících sil. V poslední řadě dochází ke znečištění abraziva částicemi otěru, které může vést ke změně mechanismu opotřebení. [1]

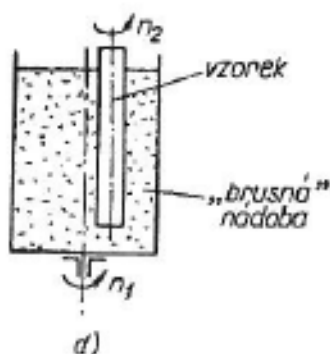
Obr. 3 Schema přístroje s brusným kotoučem [1]



3.2.2 Přístroje s volnými částicemi ke zkoušení odolnosti kovových materiálů

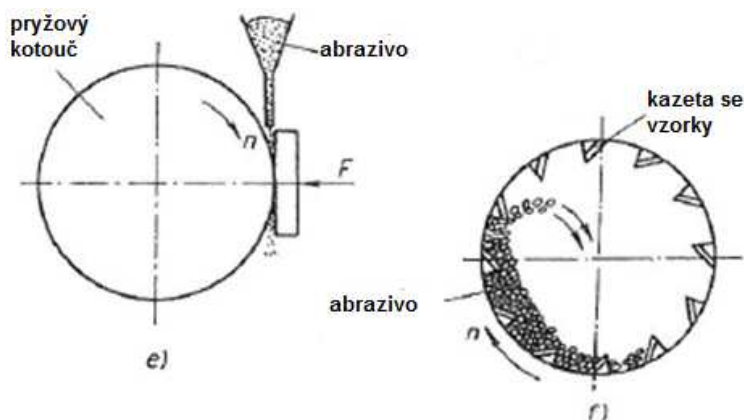
Rozdělit přístroje s volnými částicemi lze na přístroje s brusnou nádobou, bubnové přístroje a přístroje s pryžovým kotoučem. Podstatou přístroje s brusnou nádobou je umístění zkušebních vzorků ve zkušební nádobě s abrazivními částicemi. K opotřebování povrchu vzorků dochází vzájemným pohybem volných částic a vzorků, viz obr. 4. Výhodou přístroje je použití odlišných druhů částic abraze a možnost zkoušet materiály i za vysokých teplot. Mezi nevýhody patří malá intenzita procesu opotřebení a postupný pokles abrazivity volných částic vlivem otupování řezných hran a jejich znečišťování otěrem. Z tohoto důvodu se abrazivo musí periodicky vyměňovat. [1]

Obr. 4 Schema přístroje s brusnou nádobou [1]



Kluzná abraze u přístroje s pryžovým kotoučem je způsobena částicemi, které se sypou mezi rotující kotouč a vzorek. Dochází tak k modelaci podmínek blízké provozu strojních zařízení pracujících většinou v zemině. Nevýhodou je nižší opakovatelnost experimentálních výsledků při užití abraziva s rozdílnou velikostí částic. Poté se zúčastňují procesu abraze jenom velké částice a malé částice prochází oblastí kontaktu, aniž působí na opotřebovaný povrch. [1]

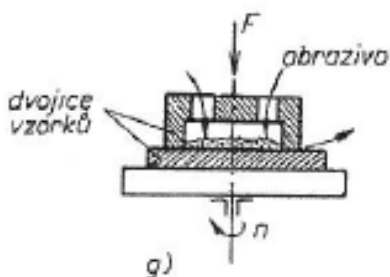
Obr. 5 Schema zařízení s pryžovým kotoučem a zařízení s bubnem [1]



U bubnových přístrojů jsou výhody především v jednoduchosti a spolehlivosti. Nedostatkem je časová náročnost zkoušek a omezená aplikovatelnost získaných experimentálních dat. Z tohoto důvodu jsou výsledky zkoušek použitelné zpravidla k hodnocení odolnosti materiálů pancéřů a mlecích elementů při rozmělnování nerostných surovin. Zařízení s pryžovým kotoučem a bubnové zařízení jsou znázorněny na obr. 5. [1]

Zařízení s vrstvou částic mezi dvěma stykovými povrchy slouží k modelování podmínek tzv. 3-body abraze. Nevýhodou je vyjmutí poničených částic abraziva z oblasti stykových povrchů a následná dodávka čerstvých částic mezi pracovní plochy vzorků. Schema přístroje s mezivrstvou abrazivních částic je znázorněno na obr. 6. [1]

Obr. 6 Schema zařízení s mezivrstvou abrazivních částic [1]

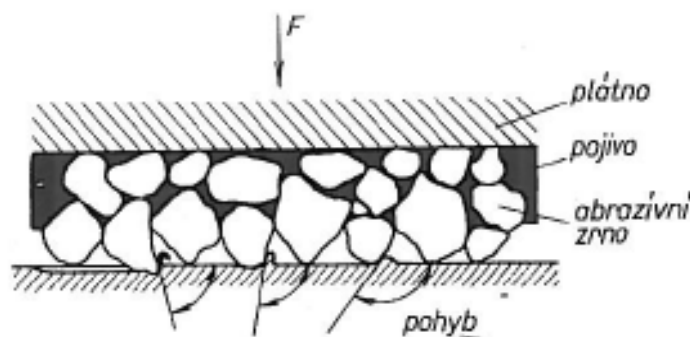


U tenkých povlaků lze zkoušet odolnost proti abrazivnímu opotřebení přístrojem typu Calo Test. Principem je rotující koule, která unáší do oblasti kontaktu jemné abrazivní částice a v průběhu abraze se vytváří sférická jizva. Z jejího průměru lze zjistit intenzitu abrazivního opotřebení a objemový otěr. Tyto přístroje se používají především na zkoušení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení kompozitních materiálů. Procesy kombinovaného účinku abraze a rázů je možné modelovat na laboratorních čelistových a kladivových drtičích. Často se používají pro zkoušení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení provozní a poloprovodní zařízení dovolující optimalizovat použití materiálů pro skutečné provozní podmínky.[1]

3.2.3 Abrazivní opotřebení

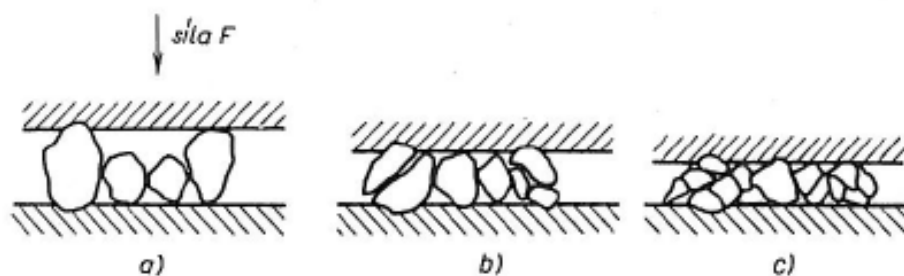
Je charakterizováno oddělováním a přemísťováním částic materiálu při rýhování a řezání tvrdými částicemi, které mohou být volné nebo určitým způsobem vázané. Na obr. 7 je znázorněno schema vzájemného působení vázaných abrazivních částic a opotřebovaného materiálu. [1]

Obr. 7 Působení pevně vázaných abrazivních částic na opotřebovaný materiál [1]



Druhý případ abrazivního opotřebení je takový, kdy tvrdé částice jsou přítomny mezi dvěma funkčními povrchy, které jsou v relativním pohybu. Schema postupného zatěžování a fragmentace abrazivních částic mezi funkčními povrchy je znázorněno na obr. 8. Tento případ je typický pro mletí a drcení hmot, ale není výjimkou i u kluzných dvojic, kde vznikají tvrdé nečistoty mezi nedostatečně utěsněné funkční povrchy. Tvrdé částice otěru mohou vznikat i u adhezivního opotřebení, které působí na jeden nebo oba kluzné povrchy abrazivně. [1]

Obr. 8 Postupné zatěžování a fragmentace abrazivních částic mezi funkčními povrchy [1]



Rozdělení případů abrazivního opotřebení se ujalo, i když procesy vzájemného působení abrazivních částic a opotřebovaných materiálů jsou daleko složitější. Do analýzy je důležité zahrnout časový průběh i charakter sil, které působí mezi opotřebovaným povrchem a částicemi abrasiva. Parametry jsou shrnuty v tab. 1, které mají vliv na průběhy abrazivního opotřebení. [1]

Tab. 1 Parametry při abrazivním opotřebení [1]

Opotřebovávaná součást při abrazi	Abrazivo	Parametry dotyku	Výsledné parametry
<ul style="list-style-type: none"> – Povrchová tvrdost – Tvrdost v jádře – Tvrdost deformované struktury – Mikrostruktura (velikost zrna, tvar) 	<ul style="list-style-type: none"> – Geometrie nerovnosti/částice: velikost, tvar, orientace – Rozdělení nerovnosti/částic: hustota, výšky, prostor pro částice otěru – Tvrdost 	<ul style="list-style-type: none"> – Nominální dotyková plocha – Relativní rychlost – Zatížení – Prostředí – Orientace systému 	<ul style="list-style-type: none"> – Koeficient opotřebení – Koeficient tření – Poměrný otěr – Koeficient odstraňování – Specifická energie – Průběh tvrdosti do hloubky – Topografie povrchu

Za důležitý nedostatek se považuje nejednotný přístup ke klasifikaci procesů abrazivního opotřebení. Roztřídění by mělo určit druhy abrazivního opotřebení podle zásadních charakteristik, které se dají rozdělit do tří skupin:

- a) Situace - inženýrský popis makroskopických podmínek působících při opotřebení: geometrie dotyku napětí, kluzné rychlosti apod.
- b) Mechanizmy - mikroskopické procesy, při kterých se vytváří částice otěru.
- c) Projevy - jedná se o pozorovatelné jevy jako je především rychlost opotřebení a změna rychlosti opotřebení, charakteristiky opotřebovaných povrchů, částice otěru apod. [1]

Abrazivní opotřebení se standardně dělí na tři části:

- 1) Gouging abrasion (rýhovací abraze)
- 2) High-stress (or grinding) abrasion (vysokonapěťová abraze)
- 3) Low-stress (or scratching) abrasion (nízkonapěťová abraze) [1]

Jiná klasifikace v odborné literatuře člení abrazivní opotřebení na: two-body abrasion (abrazivo – opotřebovaný povrch) a free - body abrasion (abrazivo mezi 2 povrchy). [1]

Další rozčlenění abrazivního opotřebení je následující:

- opotřebení při tření o upevněné abrazivní částice
- opotřebení při tření dvojic s mezivrstvou abraziva
- opotřebení při tření v abrazivu
- opotřebení abrazivy v kombinaci s rázy. [1]

Situaci při opotřebení v tribologickém systému vytváří suma vstupních faktorů. Jejich hlavní prvky zapadají do 6 skupin:

- Prvé těleso – opotřebované těleso.
- Druhé těleso – je v kontaktu s prvním tělesem, síly mohou působit na toto těleso a často opotřebovává prvé těleso.
- Prvky rozhraní neboli třetí těleso – jakýkoliv materiál mezi prvním a druhým tělesem – částice otěru, maziva, zachycené pevné částice a reaktivní chemické látky.
- Okolí prostředí.

- Dotykové síly.
- Relativní pohyb těles. [1]

Abrazivní opotřebení vznikající silovým působením abraziva na opotřebovaný povrch má za následek vyšší poměrný otěr až o několik řádů než abrazivní opotřebení s mezivrstvou částic mezi dvěma povrchy při totožném zatížení. Je známa i klasifikace abrazivního opotřebení podle intenzity porušování materiálu, ale v této klasifikaci nejsou kvantifikovány kritické hodnoty jednotlivých faktorů jako např. dotyková pnutí nebo velikost částice. Vysvětlením je, že tyto kritické hodnoty jsou silně závislé na četných dalších proměnných včetně znaků opotřebovaného materiálu. [1]

3.2.3.1 Modely abrazivního opotřebení

Případ dvou těles je nejjednodušší model pro abrazivní opotřebení plastických materiálů či kovů. Nerovnosti povrchu nebo pevně vázané tvrdé částice vnikají do povrchu a při relativním pohybu částic a měkčího opotřebovávaného povrchu kovu ho rýhují. K oddělování třísek opotřebovaného materiálu u tohoto průběhu může, ale také nemusí dojít. Jsou známy dva případy. [1]

V první situaci k plastické deformaci spojené s rýhováním povrchu dochází v případě, kdy vzniká nárůstek před abrazivní částicí a materiál je vytlačován do boků. To má za následek vznik valů kolem rýhy. Teoreticky nedochází k otěru, protože nevzniká částice otěru a přenos materiálu je nulový. Otěr bude ve skutečnosti způsoben delaminačním mechanismem po vyčerpání deformační schopnosti povrchových vrstev materiálu. [1]

V druhé situaci dochází k tvorbě rýh spojených s odstraňováním materiálu z povrchu mikrořezáním. V tomto případě je extrémem odstranění celého objemu materiálu rýhy, která je ve formě třísky bez tvorby valů po krajích rýhy. [1]

Na odlišných místech opotřebovávaného povrchu houževnatého materiálu může docházet v reálných podmínkách k porušování jeho povrchových vrstev vysokocyklovým kontaktním únavovým procesem. Jinak řečeno, do povrchu nevnikají abrazivní částice a způsobují jenom elastické deformace. Dále může docházet k porušování nízkocyklovým kontaktním únavovým procesem tj. plastická deformace při vnikání abrazivních částic do povrchu. A v poslední řadě rýhováním

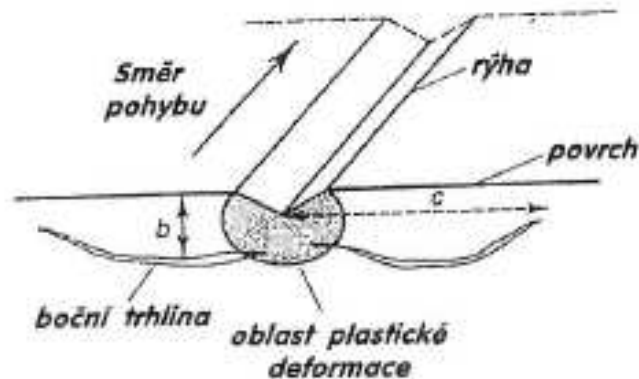
spolu s oddělováním částic opotřebovaného materiálu. Je důležité uvažovat při vysokých rychlostech relativního pohybu abrazivních částic vůči opotřebovávanému povrchu i o dalších degradačních mechanismech jako především tepelné ovlivnění materiálu (měknutí polymerních materiálů, popouštění ocelí), tribochemické reakce opotřebovaného materiálu s okolním prostředím a adsorpční porušování. [1]

Pokud nastává plastická deformace během abrazivního opotřebení křehkých materiálů, tak rychlost opotřebení často určuje křehký lom. Porušování křehkým lomem může nastat i při abrazivním opotřebení houževnatých materiálů a ovlivňovat tedy tvorbu částic a třísek. Tento defekt vznikne podle všeho u houževnatých materiálů těsně za abrazivní částicí, jelikož zde působí tahové napětí. Druh porušení závisí při vnikání hrotu do povrchových vrstev na tvaru hrotu, na působícím zatížení a na klouzavosti hrotu po povrchu. U křehkých materiálů odstraňování materiálu abrazí dochází tudíž spíše křehkým lomem než plastickou deformací. I u heterogenních materiálů obsahujících křehké a houževnaté fáze může nastat při abrazivním opotřebení porušování křehkým lomem. [1]

Trhlina vzniká po obvodu dotykové oblasti vlivem přenášené síly v statickém dotyku kulové částice s křehkým povrchem. Do křehkého materiálu se tato trhlina šíří ve formě kužele. Řada neúplných konických trhlin vzniká při klouzání částice po povrchu. K oddělování materiálu nedochází okamžitě při tvorbě trhlin. K otěru dochází až opakovaným stykem částic s křehkým povrchem, kdy vzniká šíření trhlin a jejich spojování. Když nastane kontakt ostrohranných částic s křehkým materiálem, vzniká plastická deformace a tvorba bočních trhlin, které se šíří kolmo ke směru vzájemného pohybu částice a opotřebovaného materiálu. [1]

Je známa teorie, že u abrazivního opotřebení křehkých materiálů dochází k odstraňování materiálu tvorbou bočních trhlin. Trhliny vzniknou pokud normální zatížení na částici překročí kritickou hodnotu. Tato hodnota je závislá na lomové houževnatosti materiálu K_{1c} a na jeho tvrdosti H . Plastická rýha se tvoří při kluzu ostrého hrotu částice po povrchu, boční trhliny se šíří až k volnému povrchu. Vznikají v dolním místě podpovrchové deformované oblasti a šíří se účinkem zbytkových pnutí, viz obr. 9. [1]

Obr. 9 Schematické znázornění tvorby otěru křehkého materiálu šířením bočních trhlin z dolních partií plasticky deformované oblasti pod rýhou [1]



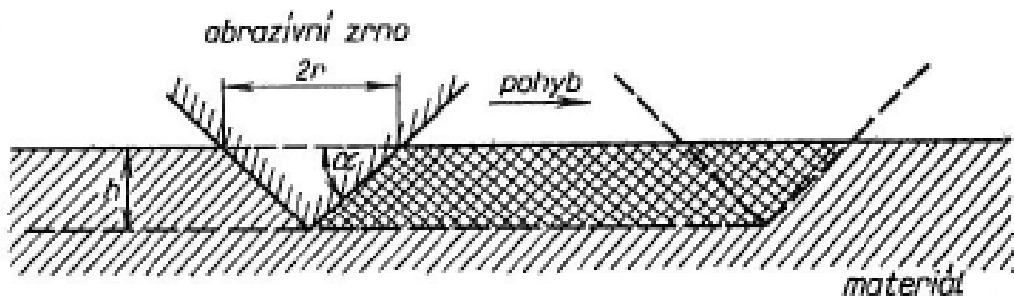
Zjednodušený model abrazivního opotřebení kuželovou nerovností je znázorněn na obr. 10 a pro rovnováhu sil platí vztah:

$$F = p_m \pi r^2$$

p_m – tvrdost povrchu (tlak potřebný k dosažení plasticity povrchových vrstev materiálu)

r – poloměr vtisku v úrovni původního povrchu. [1, 3]

Obr. 10 Zjednodušený model interakce abrazivní částice s opotřebovávaným povrchem [1,3]



Když se kužel pohybuje po dráze l , odstraňuje se objem materiálu

$$dW_0 = \frac{F \cdot \operatorname{tg} \alpha}{p_m \pi} dl$$

Hodnota p_m není konstantní, mění se s úhlem α . [1,3]

Objemový otěr W_0 , tj. celkový objem odstraněného materiálu je však výsledkem působení velkého množství abrazivních částic s různým úhlem α . Tudíž platí vztah:

$$W_0 = K_{abr} \cdot \frac{F \cdot l}{p_m}$$

K_{abr} – průměrný $tg\alpha$ všech abrazivních částic v daném případě. Hodnoty K_{abr} jsou zpravidla v mezích $2 \cdot 10^{-1} \div 2 \cdot 10^{-2}$. [1,3]

Deformace povrchu materiálu závisí v první řadě na poměru $\frac{h}{R}$, kde h – hloubka vniku nerovnosti tvrdého tělesa, R – poloměr vnikající nerovnosti. [1,3]

Objemový otěr u jednofázového materiálu je přímo úměrný zatížení a nepřímo úměrný odolnosti proti opotřebení. Kompozitní materiály obsahují fáze, které mají odlišné fyzikálně-mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu mají odlišné tribologické vlastnosti od vlastností jiných fází. U kompozitů může být otěruvzdornost zvýšena přítomností sekundárních fází v matici. Tribologické vlastnosti se mohou zjevně měnit při změně morfologie, mikrostruktury, objemového podílu a mechanických vlastností zpevňující fáze a podstaty rozhraní mezi zpevňující fází a maticí. [1,3]

3.2.3.2 Opotřebení abrazivními částicemi mezi stykovými povrchy

Komplikovanější případ než abrazivní opotřebení způsobené pevně vázanými částicemi abrasiva je opotřebení třecích dvojic a abrazivními částicemi mezi stykovými povrchy. Dochází k intenzivnímu porušování abrazivních částic i k opotřebení obou stykových povrchů. Z tohoto důvodu mají významnou úlohu strukturní a fyzikálně-mechanické charakteristiky opotřebovávaných povrchů i také pevnostní charakteristiky abrasiva, tvar a rozměry abrazivních částic, jejich koncentrace mezi třecími povrchy. Významnou roli hraje také vztah mezi velikostí abrazivních částic a vzdáleností povrchů součástí. Následujícími faktory jsou teplota třecích povrchů, zatížení, rychlost vzájemného pohybu třecích povrchů a abrazivních částic, přítomnost maziva a drsnost i kvalita třecích povrchů. [1]

Jsou známy 3 situace abrazivního opotřebení funkčních povrchů třecí dvojice vyvolané přítomností tvrdých částic:

1. Vlivem působícího zatížení způsobí opotřebení povrchů abrazivní částice, které projdou neporušeně prostorem mezi kontaktními povrchy. Mezi kontaktními povrchy je vzdálenost dána počáteční velikostí abrazivních částic a s rostoucím zatížením roste intenzita opotřebení lineárně. Tato situace je reálná jenom při malých vnějších zatížení a vysoké koncentraci abrazivních částic s vysokou pevností. [1]
2. Při určité hloubce se abrazivní částice porušují vniknutím do funkčního povrchu. K porušování částic dochází až do mezní velikosti d_{dr} , která je dána dynamickou rovnováhou vnějšího zatížení a lokálních tlaků přenášených částicemi. Velikost d_{dr} je dána vzdáleností mezi kontaktními povrchy. Lineární závislost otěru na zatížení se pozměňuje na klesající závislost. Situace je typická pro střední tlaky a jedná se o častý případ kluzných dvojic a málo zatížených valivých dvojic. [1]
3. V této situaci se abrazivní částice porušují do chvíle, kdy jejich rozměry dosáhnou hodnoty $\delta' + \Delta'$ a poté vniknou do oblasti kontaktu. Jedná se o součet velikostí nerovností povrchu a tloušťky mazací vrstvy. Tloušťkou mazací vrstvy je dána vzdálenost mezi kontaktními povrchy. Velikost otěru a hloubka vniknutí abrazivních částic je dána pevnostními charakteristikami abraziva, nikoli vnějším zatížením. Při situaci jsou charakteristické vysoké kontaktní tlaky při valení a při valení s prokluzem jako např. valivá ložiska, zatížené ozubené převody atd. [1]

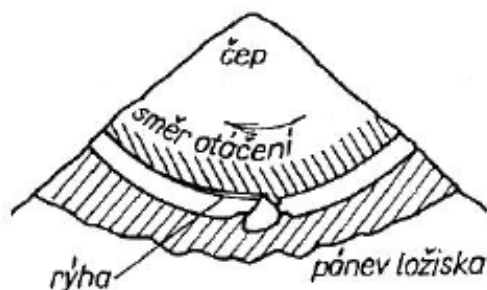
Tyto částice se mohou po povrchu při opotřebení abrazivními částicemi mezi kluznými povrchy odvalovat nebo klouzat. Při odvalování částic může vznikat na povrchu kráter neboli plastický deformační otěr, zato při kluzném pohybu abrazivních částic může docházet k rýhování povrchu. Pokud působí malé zatížení, nedochází k porušování částic abraziva, a z 90 % se částice mezi stykovými povrchy odvalují a nevytváří částice otěru, zbylých 10 % po povrchu klouže a poškozují ho rýhováním. Na průběhu opotřebení se přitom menší abrazivní částice než je vzdálenost mezi stykovými povrchy nepodílejí. Při abrazi vrstvou částic mezi stykovými povrchy je poměrný otěr nižší než při opotřebení pevně vázanými abrazivními částicemi, jelikož velikost otěru při odvalování částic po povrchu zřetelně klesá. V případě vrstvy částic pohybujících se nezávisle jedna na druhé je možné působení dvou nebo více mechanismů porušování povrchu působících současně. Dochází k porušování povrchové vrstvy nízkocyklovým únavovým mechanismem

a k rýhování abrazivními částicemi. Je znám experiment na oceli pro valivá ložiska, kdy při nižším zatížení vzniká poškození povrchu krátery, ale následně vzrůstajícím zatížením převládaly na povrchu rýhy. Z tohoto důvodu je potřeba počítat s oběma mechanismy, přitom jejich poměr závisí na zkušebních podmínkách. [1]

Je znám také experiment, kdy abrazivní otěr uhlíkové oceli je způsoben nejen mikrořezáním, ale i mikropittingem. Avšak při nižší tvrdosti (pod 400 HV) je otěr způsoben hlavně mikropittingem, kdežto při vyšší tvrdosti je dominantním procesem abrazivního opotřebení mikrořezání. [1]

Významným účinkem jsou tvrdosti obou kontaktních povrchů. Pokud povrch jednoho členu třecí dvojice je měkčí než povrch druhého členu, může docházet k intenzivnějšímu otěru. Abrazivní částice v tomto případě vniknou do měkčího povrchu a tvrdší povrch rýhují, jak je znázorněno na obr. 11. Pokud je přítomné mazivo, pod působící částicí nastane menší smyková deformace povrchových vrstev a tedy i menší otěr. [1]

Obr. 11 Opotřebení čepu částicemi abrasiva zakotvenými v ložiskové pánvi [1]



3.2.3.3 Vliv abrazivních částic na proces opotřebení

U plastického materiálu probíhá opotřebení povrchu v první řadě oddělováním částic ve formě třísek a tvorbou rýh. Rozhodující je u abrazivních částic i jejich poloha. Částice materiálu jsou oddělovány pouze vhodnou orientací abrazivního zrna. Jsou známy tři způsoby působení abrazivních částic na opotřebovaný povrch kovového materiálu:

- a) vytvářením nárůstku před zrnem,
- b) rýhováním a vytvářením valu podél rýhy,
- c) vytvářením třísky před břitem abrazivního zrna. [1]

Počet rýh na exponovaném povrchu roste lineárně se zvětšováním zatížení. Následující růst je typický pro každý průměr abrazivních částic. Šířka rýh je závislá na tvaru a velikosti částice a nepřesahuje zpravidla 10 – 20% jejího charakteristického rozměru. K plastické deformaci v oblasti kontaktu mezi opotřebovaným povrchem a abrazivem dochází i při malých zatíženích. Počet abrazivních částic, dostávající se do kontaktu s povrchem, roste s růstem zatížení. [1]

3.2.3.4 Vliv poměru tvrdostí abraziva a opotřebovaného materiálu

Otěr opotřebovaného materiálu je proporcionální přítláčné síle a délce dráhy, na které dochází k působení abraziva a nepřímo proporcionální tvrdosti opotřebovaného materiálu. Odolnost proti abrazivnímu opotřebení je malá, je-li tvrdost kovového materiálu H_m menší než tvrdost abraziva H_a . Pokud je tvrdost opotřebovaného kovového materiálu větší, větší je i odolnost proti opotřebení a dosahuje své maximální hodnoty ve chvíli, kdy platí vztah:

$$H_m = \frac{H_a}{k}$$

k – koeficient, který se pohybuje v rozmezí 1,3 – 1,7 [-] [1]

Hodnoty tvrdostí minerálních látek a některých fází v kovových materiálech jsou znázorněny v tab. 2. Z hodnot je zřejmé, že částice SiO_2 jsou tvrdší než

martenzit uhlíkových ocelí. Výjimky tvoří speciální a komplexní karbidy v nástrojových ocelích, v bílých legovaných litinách nebo tvrdých návarech. [1]

Tab. 2 Tvrdost minerálních látek a fází v kovových materiálech [1]

Minerální látka	Tvrdost (HV)	Minerální látka	Tvrdost (HV)
Sádrovec	36	SiC	2600
Vápenec	140	Diamant	10000
Fluorit	190	B ₄ C	3700
Apatit	540	Hematit	470 - 650
Sklo	500	Křemen	900 - 1280
Živec	600 - 750	Pazourek	800 - 1100
Topas	1430	Korund	1800 - 2000
Fáze v slitinách Fe	Tvrdost (HV)	Fáze v slitinách Fe	Tvrdost (HV)
Ferit	100, 70 - 200	Austenit - Cr litina	300 - 600
Perlit nelegovaný	250 - 320	(Fe, Cr) ₂ C	840 - 1100
Perlit legovaný	300 - 460	(Fe, Cr) ₇ C ₃	1200 - 1600
Martenzit - ocel	850 - 890	Mo ₂ C	1500
Martenzit - Cr litina	500 - 1000	VC	3000, 2800
Popuštěný martenzit	280 - 700	TiC	3000 - 3200
Austenit - Mn ocel	200 - 500	WC	2400, 1780 - 2200

3.2.3.5 Vliv tvaru abrazivních částic

Pravděpodobnost rýhování a oddělování částic z opotřebovaného povrchu je větší, čím více se bude abrazivní částice lišit od kulového tvaru. Dochází jak k porušování povrchových vrstev opotřebovaného materiálu, tak k otupování či vylamování hrotů a hran abrazivních částic. Abrazivní částice jsou tvořeny jednou či více chemickými sloučeninami s iontovou nebo kovalentní vazbou, ale nepřihlíží se zpravidla k adhezi mezi abrazivem a opotřebovaným kovovým materiálem. Během průběhu opotřebování mohou však nastat mezi opotřebovaným materiálem a abrazivem nebo okolním prostředím chemické reakce, které ovlivní intenzitu procesu abrazivního opotřebování i mechanismus. Pokud stoupne relativní vlhkost z 0 na 65 %, zvýší se poměrný otěr, který je způsoben snadnějším porušováním abraziva a vytvářením většího počtu řezných hran. [1]

Velikost zrn se při malém zatížení moc nemění, ale mění se jejich mikrogeometrie. Při zkoušce na Staufferově přístroji bylo experimentálně zjištěno, že průměrná velikost abrazivních zrn se zmenšila o 10%, ale na 40% původní hodnoty klesl jejich abrazivní účinek. Dochází k intenzivnímu porušování ostrých řezných hran a jejich zaoblování při kontaktu částic abraziva s opotřebovaným povrchem. Abrazivní částice se intenzivně porušují při velkém zatížení, ale abrazivita (=schopnost brusných částic opotřebovávat funkční povrch kovového materiálu) zrn i minerálů s velkou štěpitelností neklesá, neboť roste počet řezných hran. Abrazivní částice jsou porušovány vnitřními defekty a trhlinami. Přitom efektivní pevnost v tahu částic klesá s jejich velikostí. Pravděpodobnost výskytu částic s vhodně orientovaným defektem roste. Pevnost v tahu podle experimentálních údajů pro různá abraziva je přibližně nepřímo úměrná druhé mocnině jejich průměru. Z tohoto důvodu se pravděpodobněji poruší větší a značně zatížené abrazivní částice než jemné a lehce zatížené abrazivní částice. [1]

3.2.3.6 Vliv velikosti abrazivních částic

Experimentálním studiem závislosti abrazivního otěru na průměrné velikosti abrazivních částic se ukázalo, že existuje kritická velikost abrazivních částic. Jsou-li částice menší, abrazivní otěr s růstem jejich velikosti zřetelně roste. Intenzita abrazivního otěru výrazně klesá po dosažení kritické velikosti částic. Kritická velikost se pohybuje v mezích 10 – 50 μm a je závislá na rozměrech opotřebované plochy, na zatížení, na vlastnostech opotřebovávaného materiálu a na typu použitých abrazivních částic. [1]

Jsou známa 3 různá stádia rychlosti opotřebení jako funkce velikosti abrazivních částic. Prvé stádium odpovídá maximálnímu zpevnění povrchových vrstev kovu tvorbou fragmentové struktury. Jedná se o případ plastické deformace, kdy rychlost relaxace je větší než rychlost plastické deformace. Taková struktura odpovídá maximální odolnosti kovu proti opotřebení. Druhé stádium odpovídá přechodu od relativně nízké rychlosti opotřebení na vysokou rychlost. Struktura v tomto stadiu vykazuje růst velikosti fragmentů a zpevnění je menší než ve stádiu 1. Ve třetím stádiu se ve struktuře ve většině případů objevují relativně velké fragmenty vytvořené v povrchových vrstvách, rychlost otěru je velká. Úroveň plastické deformace a odpovídající úroveň zpevnění jsou menší než při opotřebení jemnými

abrazivy. Dochází k lomu materiálu bez velké plastické deformace, neboť rychlost deformačního procesu je vyšší než rychlost relaxačního procesu. [1]

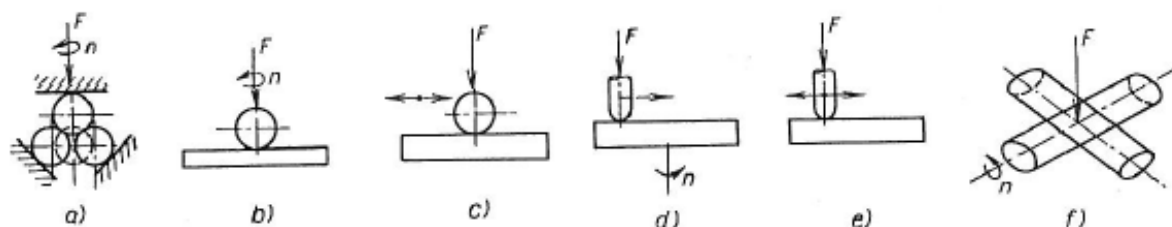
3.3 Zkoušení odolnosti materiálů proti adhezivnímu opotřebení

Rozhodujícím kritériem pro rozdělení přístrojů na zkoušení odolnosti materiálů proti adhezivnímu opotřebení je geometrie třecího uzlu. Může dojít ke třem typům dotyku – bodovému, plošnému a čárovému. [4, 5]

3.3.1 Přístroje s bodovým dotykem

Používají se z velké části k laboratornímu výzkumu procesů tření a opotřebení a na zkoušení maziv. Mezi výhody patří jednoduchá konstrukce a vysoká kluzná rychlost bez drahého pohonného systému. Nevýhodami je pokles měrných tlaků na dotykové ploše při postupném opotřebení kulové plochy a obtížná výroba zkušebních vzorků. Schemata některých třecích uzlů přístrojů s bodovým dotykem jsou znázorněny na obr. 12. [4, 5]

Obr. 12 Schemata třecích uzlů přístrojů s bodovým dotykem [4]



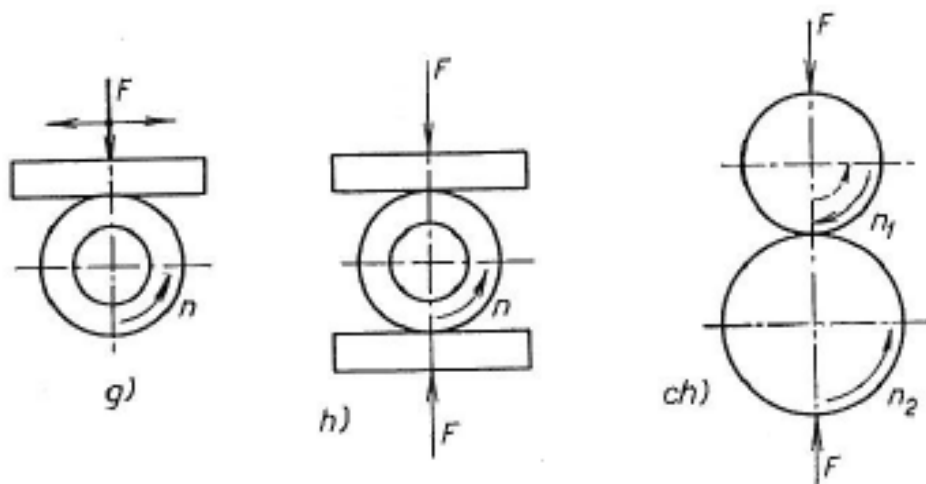
Mezi přístroje s bodovým stykem patří i přístroje se zkříženými válci. Tyto přístroje dovolují měnit zatížení i kluznou rychlost v širokém rozsahu. Jejich výhodou je snadná výroba zkušebních vzorků. Zato nevýhodou je možnost vzniku vibrací při vysokých kluzných rychlostech a malém zatížení. [4, 5]

3.3.2 Přístroje s čárovým dotykem

Mezi výhody těchto přístrojů patří jednoduchý tvar vzorků, umožňující snadnou výrobu, krátká doba zkoušky a široké rozmezí zkušebních parametrů. Nedostatkem je pokles měrného tlaku v oblasti styku během zkoušky. Důsledkem je postupné

opotřebení zkušebních vzorků. Zařízení se rozdělují na přístroje s kotoučkem a příložkou, přístroje s kotoučkem a 2 příložkami a přístroje s dvěma kotoučky. Přístroje s dvěma kotoučky mají využití i u modelování procesů únavového opotřebení na bocích ozubených kol. Schemata třecích uzlů přístrojů s čárovým dotykem jsou zobrazena na obr. 13. [4, 5]

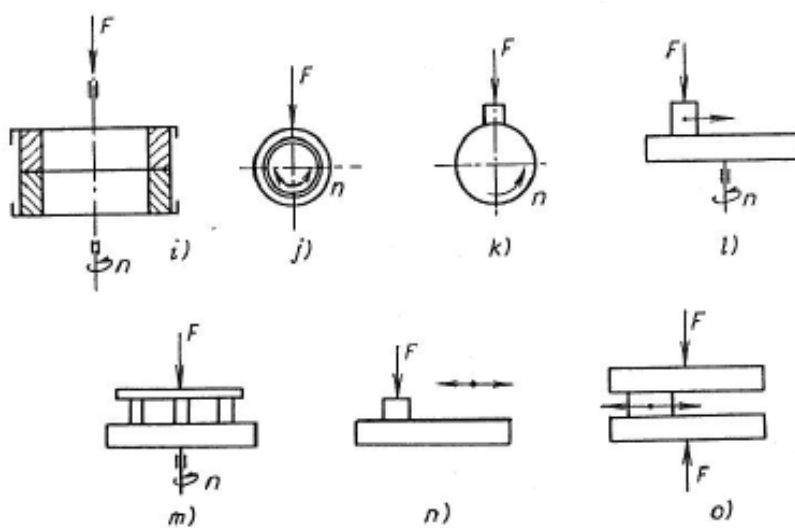
Obr. 13 Schemata třecích uzlů přístrojů s čárovým dotykem [4]



3.3.3 Přístroje s plošným dotykem

Jedná se o nejčastější přístroje pro hodnocení odolnosti materiálových dvojic proti adhezivnímu opotřebení. Výhodou je možnost zkoušení dvojice materiálů za sucha i v kapalinách a snadná výroba vzorků. Naproti tomu přístroje s plošným dotykem mají složitý pohonný systém, omezený rozsah zkušebních podmínek a složitou konstrukci. U moderních zařízení je možné zkoušet dvojice materiálů ve vysokém vakuu, v různých plynných atmosférách nebo za nízkých a vysokých teplot. Existuje řada konstrukcí třecích uzlů. Schemata třecích uzlů přístrojů s plošným dotykem jsou zobrazena na obr. 14. [4, 5]

Obr. 14 Schemata třecích uzlů přístrojů s plošným dotykem [4]



3.3.4 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení je charakterizováno oddělováním a přemísťováním částic z míst, kde při relativním pohybu funkčních povrchů došlo k jejich dotyku, k porušení povrchových vrstev a ke kovovému styku obou materiálů. [4]

Adhezivním opotřebením se označuje případ porušování mikrospojů, vzniklých následkem interakce povrchových nerovností, zpravidla vedoucí k přenosu materiálu z jednoho funkčního povrchu na druhý. [4]

Je řada faktorů, které mají vliv na vznik adhezivního opotřebení:

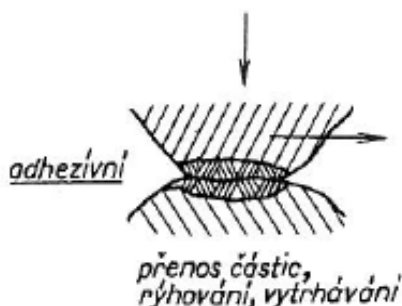
- zatížení a rychlost relativního pohybu,
- hloubka vniku a poloměr zakřivení mikronerovností,
- schopnost materiálu vytvářet adhezivní spoje. [4]

Médium, které je přítomné mezi funkčními povrchy, může významně ovlivnit intenzitu adhezivního opotřebení. Například mazivo může částečně oddělit stykové povrchy a zmenšit tak interakci povrchových mikronerovností. Naopak ve vakuu nemohou vznikat na kovech ochranné oxidické vrstvy a předpoklady pro vznik adhezivních mikrospojů jsou tedy usnadněny. [4]

V praxi se rozlišuje různá intenzita vlastního opotřebení vlivem podmínek a intenzity působících faktorů, a to od mírné formy až po formu intenzivní. V prvním případě mírného opotřebení se jedná o děj, při němž rychlost vzniku oxidických

ochranných vrstev na povrchu kovu je větší než rychlost jejich porušování při vzájemném relativním pohybu funkčních povrchů. Ve druhém případě se jedná o výrazné a relativně hluboké rozrušování funkčních povrchů, provázené vznikem četných částic, jejich oddělováním a přenosem mezi funkčními povrchy a velkými změnami funkčních povrchů následkem plastické deformace mikrooblastí a makrooblastí. V podmínkách intenzivního adhezivního opotřebení vzrůstá velmi silně odpor proti relativnímu pohybu, to může vést až k jeho přerušení. Na obr. 15 je znázorněno schema adhezivního opotřebení a charakter poškození funkčního povrchu. [4]

Obr. 15 Adhezivní opotřebení a charakter poškození funkčního povrchu [4]



3.4 Zkoušení odolnosti materiálů proti erozivnímu opotřebení

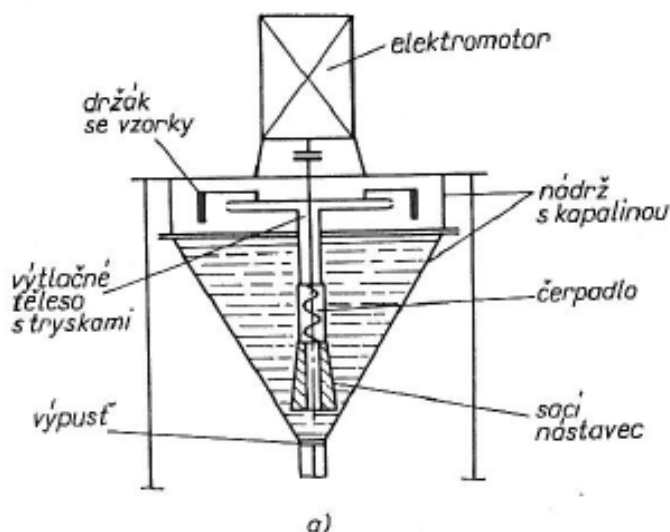
Zkušební zařízení se dělí podle charakteru eroze na přístroje ke zkoušení odolnosti materiálů v proudu kapaliny s částicemi, v proudu kapaliny, plynu nebo páry a kapek, v proudu plynů a částic. Přístroje na zkoušení odolnosti materiálů v proudu kapaliny s částicemi se dělí na přístroje s brusnou nádobou, na přístroje s oběhovou soustavou a na tryskací přístroje. [4, 5]

3.4.1 Přístroje na zkoušení odolnosti materiálů v proudu kapaliny s částicemi

U tryskacích přístrojů jsou zkušební vzorky nejčastěji otryskávány směsí kapaliny a částic, která obíhá v uzavřeném systému. Mezi výhody patří jednoduchá konstrukce a velmi intenzivní průběh eroze. Nevýhodou je rychlé opotřebení funkčních částí čerpadla, to má za následek postupné změny zkušebních podmínek

v průběhu zkoušek. Tomu lze částečně předejít používáním etalonů a hodnocením materiálů pomocí poměrné odolnosti proti erozivnímu opotřebením. Další nevýhodou je postupná změna skutečného úhlu nárazu částic s postupujícím lokálním opotřebením zkoušených vzorků. Také klesá abrazivita částic v průběhu zkoušky, z tohoto důvodu je nutná náhrada čerstvými částicemi. Tryskací přístroj je znázorněn na obr. 16. [4, 5]

Obr. 16 Schema tryskacího přístroje [4]



U přístroje s brusnou nádobou je abrazivo nahrazeno směsí kapaliny a částic. Výhodou je jednoduchá konstrukce a spolehlivost. Mezi nevýhody patří omezený rozsah zkušebních podmínek, nedefinovaný úhel nárazu částic a neznámá relativní dopadová rychlost částic. Přístroje s oběhovou soustavou dokážou zkoušet strojní části za podmínek blízkých provoznímu nasazení. Nevýhodou je nákladnost zařízení, časová náročnost vlastního experimentálního programu a značné prostorové nároky na laboratorní plochy. [4, 5]

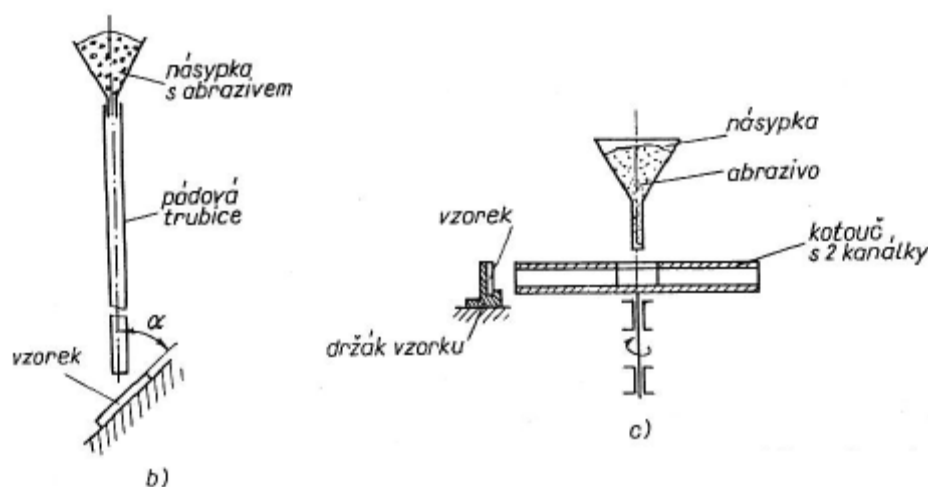
Pro zkoušení odolnosti materiálů proti erozivnímu opotřebením částicemi v proudu plynů se používají tryskače, které jsou nejpoužívanější, přístroje na principu volného pádu, experimentální turbíny a přístroje s urychlováním částic odstředivou silou. [4, 5]

Upravené tryskače se používají na otryskávání výkovek či odlitků. Ale u těchto přístrojů nejsou definovány podmínky zkoušení, jako skutečná dopadová rychlost částic. U laboratorních tryskacích zařízení je možné zkušební podmínky přesně nastavit a podle požadavků měnit v širokém rozsahu. K výzkumu odolnosti proti erozivnímu opotřebením. Experimentální turbíny se používají na výzkum odolnosti proti

erozivnímu opotřebení pro materiály určené na lopatky spalovacích turbín. Nehodí se pro zkoušky materiálů na jiné strojní součásti. [4, 5]

Přístroje na principu volného pádu jsou vhodné ke studiu mechanismu eroze. Méně se hodí k hodnocení jednotlivých materiálů a vyžadují nákladný vakuový systém. Přístroj na principu odstředivé síly urychluje částice abraziva odstředivou silou. Nevýhodou zařízení je nestejná rychlost částic s různou hmotností. Z tohoto důvodu se používají jen standardní abraziva s jednotnou velikostí částic. Přístroj na principu volného pádu a na principu odstředivé síly je znázorněn na obr. 17. [4, 5]

Obr. 17 Schema přístrojů na principu volného pádu a na principu odstředivé síly [4]



Zařízení na zkoušení odolnosti materiálů proti erozivnímu opotřebení proudem plynu, páry nebo vody se používají na konkrétní provozní aplikace a z tohoto důvodu pracují jen ve velmi úzkém rozmezí zkušebních parametrů. [4, 5]

3.4.2 Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním funkčního povrchu:

- částicemi nesenými proudem kapaliny,
- částicemi nesenými proudem plynu,
- proudem páry, kapaliny, kapek nebo plynu. [4]

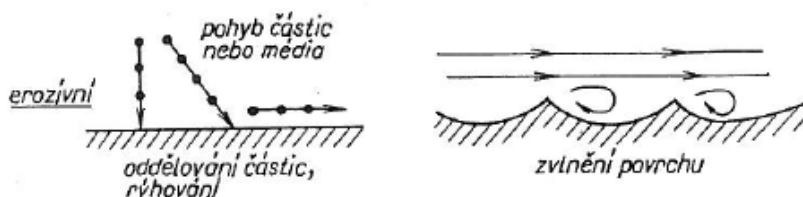
Intenzita erozivního opotřebení je ovlivněna řadou faktorů, které se vztahují jak k působícímu médiu a částicím, tak i k exponovanému povrchu. Jedná se mimo jiné o relativní rychlost, teplotu a chemické působení nosného média, dále o druh,

velikost, tvar a tvrdost částic. Pro působení erozivního média s částicemi je prvořadá kinetická energie a také úhel dopadu částic na funkční povrch. [4]

Nerovnoměrné porušení funkčního povrchu a jeho výrazné zvlnění je jedním z charakteristických jevů erozivního opotřebení. Hlavním důvodem je vliv turbulence proudícího média, při níž mohou být oddělovány částice materiálu v určitých exponovaných místech i z nejnižších míst povrchu. U jiných typů opotřebení, jako abrazivní nebo adhezivní, probíhá opotřebení hlavně mezi vrcholy mikronerovností. [4]

Následkem nerovnoměrného erozivního opotřebení se často vyřazují z provozu součásti, kde dochází k silnému opotřebení v místě, které znemožňuje nebo ohrožuje správnou funkci stroje. Na obr. 18 je znázorněno schema erozivního opotřebení a charakter poškození funkčního povrchu. [4]

Obr. 18 Erozivní opotřebení a charakter poškození funkčního povrchu [4]



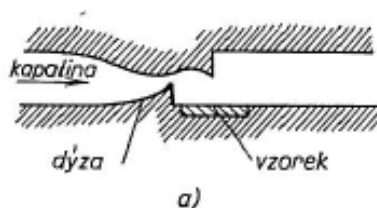
3.5 Zkoušení odolnosti materiálů proti kavitačnímu opotřebení

V laboratorních podmínkách se používají čtyři základní typy přístrojů, umožňující zkoušet vzorky:

1. v kavitační oblasti vytvořené v kanále proměnného průřezu,
2. v kavitační oblasti vzniklé za otvorem v rotujícím disku,
3. mnohonásobnými úderů o vodní proud,
4. v kavitační oblasti vytvořené vibrací. [4, 5]

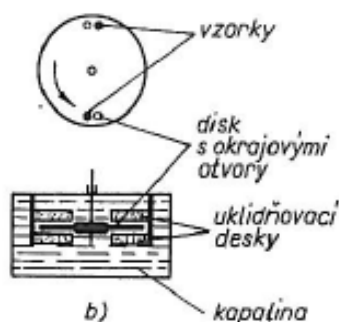
U prvního případu se používá dýzový přístroj, u kterého vzniká kavitační poškození místním poklesem tlaku v zúžené části zkušebního kanálu. Jejich použití je především ke studiu mechanismu kavitace a kavitačního opotřebení. Jelikož intenzita kavitace je nízká, doba zkoušky je z tohoto důvodu dlouhá. Schema dýzového přístroje je znázorněno na obr. 19. [4, 5]

Obr. 19 Schema dýzového přístroje [4]



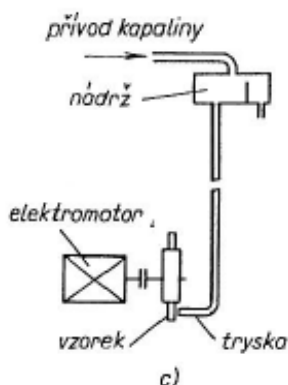
U druhého případu se používá rotační diskový přístroj, u kterého rotuje v kapalině kruhový disk kolem vertikální nebo horizontální osy. Disky mají průchozí díry. V těchto dírách nebo blízko nich vznikají při rotaci disku kavitační dutiny. Dutiny zanikají na povrchu disku v oblasti za otvory. Nevýhodou je složitá konstrukce a náročnost na obsluhu. Schema rotačního diskového přístroje je znázorněno na obr. 20. [4, 5]

Obr. 20 Rotační diskový přístroj [4]



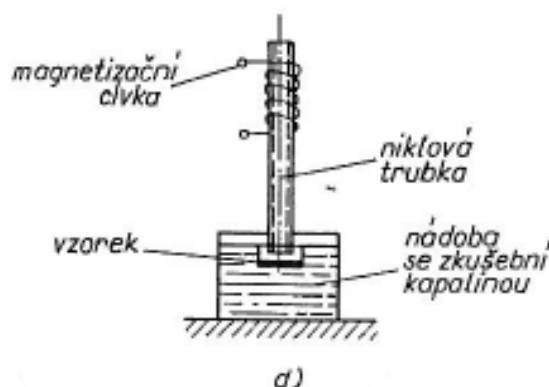
U třetího případu se používá rotační nárazový přístroj. Přístroj modeluje proces kavitace nárazem proudu kapaliny na povrch vzorku. Vzorky jsou umístěné na rotujícím kotouči a proud kapaliny vytékající z trysek do nich naráží. Výhoda je v jednoduché konstrukci a nenáročnost na obsluhu. Schema rotačního nárazového přístroje je znázorněno na obr. 21. [4, 5]

Obr. 21 Rotační nárazový přístroj [4]



U čtvrtého případu se používá magnetostrikční přístroj. Relativní pohyb vzorků se vyvozuje proti kapalině magneticky, mechanicky nebo elektricky. Ke kavitačnímu opotřebení dochází při implozi kavitačních bublin, vznikajících v oblasti sníženého tlaku na povrchu vzorku. Vibrační přístroje se používají nejčastěji, mají velice jednoduchou konstrukci. Nevýhoda je s aplikací naměřených výsledků na skutečné strojní součásti. Schema vibračního přístroje je zobrazeno na obr. 22. [4, 5]

Obr. 22 Magnetostrikční přístroj [4]



3.5.1 Kavitační opotřebení

Opotřebení je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním povrchu součástí v oblasti zanikání kavitačních dutin v kapalině. [4]

Již zmíněné kavitační dutiny vznikají tehdy, sníží-li se změnou rychlosti nebo podmínek proudění tlak v určité oblasti kapaliny tak, že se dosáhne při dané teplotě tlaku nasycených par. V tom případě se začínají tvořit v kapalině malé dutinky, vyplněné párami kapaliny. V oblasti vyššího tlaku média dochází pak ke zmenšování objemu vzniklých dutin, až k jejich zániku. Pohyb kapaliny ke středu dutin, nazývaných kavitační, vede v okamžiku jejich zániku ke vzniku hydrodynamických rázů, jimiž je namáhán povrch součástí nalézajících se v jejich těsné blízkosti. Čas od vzniku do zániku jednotlivých dutin bývá v rozmezí od 10^{-2} do 10^{-3} sekund. [4]

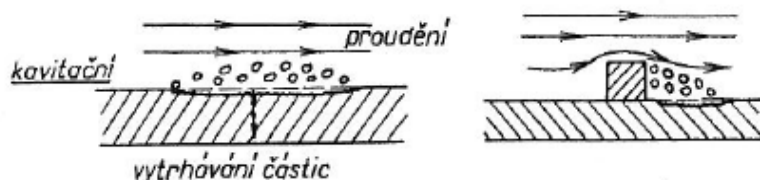
Na rozrušování materiálu při kavitaci se mohou podílet i další faktory, kromě tlakových účinků, a to chemické a elektrochemické. Předpokládá-li se, že převládající vliv na intenzitu kavitačního porušování materiálu mají opakované tlakové účinky, dá se očekávat, že průběh opotřebení bude zčásti podobný jako u únavového

porušování. Potvrzují to zkušenosti, že intenzita kavitačního opotřebení je proměnlivá s časem. [4]

V první fázi se kumulují poruchy v povrchových vrstvách materiálu, aniž by docházelo k oddělování částic. Na povrchu materiálu je vidět pouze zmatnění, které dále přechází až ke vzniku povrchových a podpovrchových trhlinek. [4]

Chemické a elektrochemické působení média může samozřejmě výrazně ovlivnit průběh kavitačního opotřebení. V některých případech mají poškozené plochy nápadné znamení těchto doprovodných účinků. Jsou známy případy, kdy zavedením elektrického napětí nebo změnou chemického prostředí u částí strojů bylo možné částečně omezit účinky kavitace. Na obr. 23 je znázorněno kavitační opotřebení a charakter poškození funkčního povrchu materiálu.[4]

Obr. 23 Kavitační opotřebení [4]

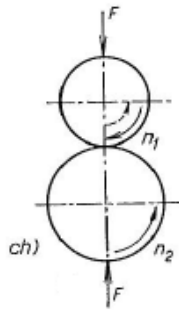


Ke kavitačnímu opotřebení dochází nejčastěji u vodních čerpadel a turbín, kde je nutné z důvodů účinnosti připustit při proměnném průtoku či výkonu funkci zařízení v podmínkách, při nichž dochází ke kavitaci. Kavitační opotřebení se vyskytuje i u jiných strojů a součástí. Například u kluzných ložisek, v hydraulických systémech, v redukčních ventilech či dokonce i u spalovacích motorů, a to na vnějších plochách vložek válců chlazených vodou. [4]

3.6 Zkoušení odolnosti materiálů proti únavovému opotřebení

Používají se přístroje se dvěma vzájemně se odvalujícími kotoučky. Sleduje se únavové opotřebení buď při valení s určitým podílem skluzu, nebo při čistém valení. Speciální stoje umožňují simulovat podmínky provozu u zkoušek ozubených kol. Materiály pro valivá ložiska se zkoušejí podobně na válečkových analogonech. Veškeré zkoušky jsou finančně i časově náročné, ale lze je automatizovat a programově řídit na moderních zařízeních. Schema přístroje se dvěma vzájemně se odvalujícími kotoučky je zobrazeno na obr. 24. [4, 5]

Obr. 24 Příklad se dvěma odvalujícími kotoučky [4]



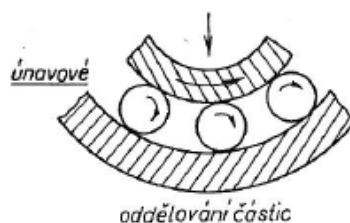
3.6.1 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení vzniká v povrchové vrstvě materiálu při opakovaných stykových napětích v určitých pásmech funkčních povrchů postupnou kumulací poruch. Jedná-li se o napětí pod mezí kluzu, lze uvažovat o vysokocyklové únavě. Na rozdíl při napětích nad mezí kluzu se jedná o případy nízkocyklové únavy. [4]

Mezi nejčastější případy únavového opotřebení jsou poruchy valivých ložisek, ozubených kol, kolejnic, zdvihátek ventilů a také poruchy u strojů, které pracují se silnými a pulzujícími rázy. [4]

U materiálů málo plastických či křehkých může dojít při vysoké úrovni smykových namáhání v povrchové vrstvě k oddělování částic mechanismem křehkého lomu. Únavové opotřebení může zahájit i vznik únavových lomů, které zasáhnou z části nebo zcela průřez součásti. Únavové poškození povrchu součástí vede ke zhoršení funkce stroje, ke zvýšení hlučnosti a vibrací. Popřípadě k většímu odporu proti pohybu, poté přechod k únavovým lomům, které zaručují vznik náhlých poruch nebo havárií stroje. Zabránění tomuto typu opotřebení lze vhodnými konstrukčními zásahy a volbou materiálu, respektive pozorným prováděním systematických preventivních kontrol a včasné indikaci vznikajících defektů. Na obr. 25 je schematicky znázorněno únavové opotřebení. [4]

Obr. 25 Únavové opotřebení [4]



U únavového opotřebení od kontaktního namáhání, popř. kontaktní únavě, dochází k únavovým jevům při silovém, cyklicky opakovaném kontaktu dvou těles. Jedná se o vysoké tlakové složky, které značně svou velikost mění v průběhu pracovního cyklu. Při styku těles se zakřivenými styčnými plochami se uplatňují obzvláště vysoké lokální tlaky. K tomuto namáhání se přidávají ještě tahové a smykové složky za spolupůsobení skluzu a tření, které prospívají dále k vývoji porušování. [4]

K porušování a kontaktnímu únavovému namáhání dochází u mnoha funkčních členů strojů. Patrným příkladem může být kontaktní namáhání a porušování boků zubů ozubených kol. V tomto případě se kontaktní namáhání periodicky s frekvencí záběrů opakuje. Kontaktní porušování i ohybové únavové namáhání v patě zubu omezuje vitalitu ozubení. Podmínky kontaktního namáhání se velice mění podél boku zubu. Na začátku a na konci záběru se výrazně uplatňuje relativní skluzový pohyb, také i čisté odvalování povrchů v oblasti valivého bodu na roztečné kružnici. Za spolupůsobení smykového tření různé intenzity probíhá poté kontaktní namáhání v jednotlivých oblastech zubů. Adhezivní opotřebení spolu s kontaktními únavovými účinky se uplatní při porušování. [4]

Únavové kontaktní porušení, které se vyskytuje především u měkkých, nitridovaných, karbonitridovaných a zušlechtěných ozubených kol, je častým typem tvoření důlků tzv. pitingů. Na obr. 26 je znázorněn vznik pitingů na bocích zubů ozubených kol. Důlky sahají do hloubky několika desetin milimetru u zubů malých a středních modulů a mají většinou okrouhlý tvar. Jejich výskyt je charakteristický v místě pod valivým bodem v oblastech nevýrazného záporného skluzu. [4]

Obr. 26 Vznik pitingů na bocích zubů ozubených kol [7]



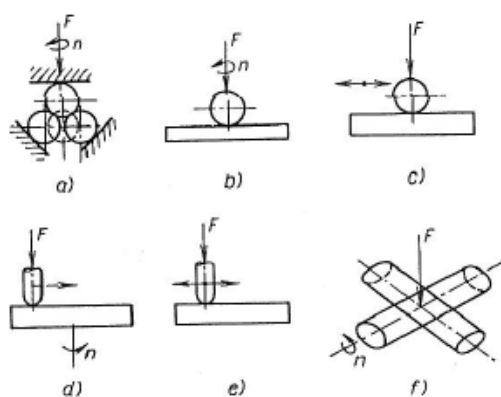
Kontaktní únavové porušování a opotřebení hraje důležitou roli pro životnost valivých ložisek. Velké procento ložisek se odstraňuje z důvodů kontaktního poškození ať již valivých drah nebo i valivých členů. Vysoké lokální tlaky, kvalita

maziva a přítomnost abrazivních složek v něm, korozní účinky apod. jsou faktory, které spolupůsobí při provozním nasazení ložisek. [4]

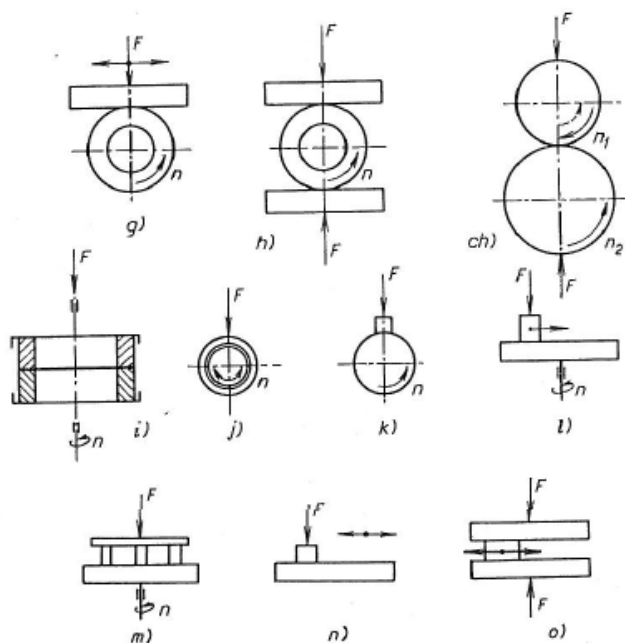
3.7 Zkoušení odolnosti materiálů proti vibračnímu opotřebení

Ke zkoušení odolnosti materiálů proti vibračnímu opotřebení se používají přístroje, které dovolují vzájemný kmitavý pohyb vzorků. Dotyk vzorků může být čárový, bodový nebo plošný. Na přístrojích lze měnit frekvenci i amplitudu kmitavého pohybu, zatížení a médium mezi stykovými povrchy. Lze zkoušet na některých přístrojích kombinovaný účinek vibračního opotřebení a únavových jevů. Schemata třecích uzlů jsou zobrazena na obr. 27 a 28. [4, 5]

Obr. 27 Schemata třecích uzlů (bodový dotyk) [4]



Obr. 28 Schemata třecích uzlů (čárový a plošný dotyk) [4]

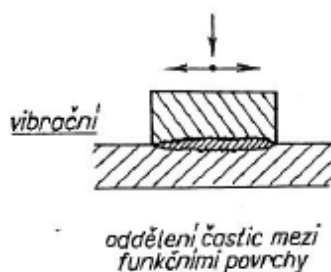


3.7.1 Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení vzniká oddělováním částic a poškozováním povrchu materiálu vzájemnými kmitavými tangenciálními posuny funkčních povrchů těles při působení normálového zatížení. Amplitudy vibrací u vibračního opotřebení jsou docela malé a dosahují hodnot 0,1 až 100 μm . Odstraňování částic vznikajících mezi funkčními povrchy je při tak malých relativních pohybech velice ztíženo. Může docházet i k vytlačení nebo znehodnocení maziva, které mohlo být obsaženo mezi nimi, v místech styku mikronerovností. [4]

V praxi se často stává, že vibrační opotřebení se zaměňuje s případy korozního napadení povrchu součástí. Důvodem může být charakteristické zbarvení opotřebeného povrchu. U ocelí a litin jsou produkty vibračního opotřebení oxidy železa, které mají světle hnědé, hnědočervené nebo hnědočerné zbarvení. Není nutnou podmínkou ke vzniku vibračního opotřebení oxidace povrchových vrstev materiálu vzdušným kyslíkem, ale i tento faktor ovlivňuje průběh a intenzitu děje. Na obr. 29 je znázorněno schema vibračního opotřebení a charakter poškození funkčního povrchu. [4]

Obr. 29 Vibrační opotřebení [4]



Vibrační opotřebení se v praxi vyskytuje poměrně často. Jedná se především o různá pohyblivá uložení, do nichž se přenáší kmity vlastní nebo buzené cizím zdrojem, jako zejména čepy, hřídele, spojky a valivá ložiska. Časté případy porušení jsou u nalisovaných spojů, např. setrvačnicků u pohybových šroubů na mechanických lisech, nebo nábojů kol a hřídelů. [4]

V prvním momentě se jedná o poškození funkčních povrchů, kde působí vibrace stále v jednom místě nebo směru. V druhém momentě jde o poškození nalisovaných spojů nebo nepohyblivých uložení. Tato poškození vznikají např. ohybem nedostatečně tuhých hřídelů na okraji náboje kola. V takovém spoji vibrační

opotřebení velice zhoršuje kvalitu styčných povrchů a někdy znemožňuje rozebrání spoje při nutných opravách. Vzniklé částice při vibračním opotřebení jsou často abrazivní. Proto při demontáži nalisovaného spoje mohou výrazně zvýšit součinitele kluzného tření, popř. mohou iniciovat poškození povrchu kombinovaným abrazivním a adhezivním mechanismem. Odpor při rozebírání součástí může přitom narušit pevnost materiálu takovým způsobem, že povrch a rozměry součástí nebudou moci vykonávat požadovanou funkci. [4]

U vibračního opotřebení dochází k narušování povrchových vrstev, i u kvalitních a velmi tvrdých materiálů. To má za následek vyvolání únavových lomů hřídelů, čepů, nebo iniciaci únavového opotřebení ozubených kol nebo valivých uložení. [4]

4 Laboratorní zkoušky návarových materiálů proti opotřebení

4.1 Návarové materiály

Opotřebené součásti mají vliv na vznik poruch strojních zařízení. Poškození strojů zaviňuje také zadírání funkčních ploch, které je způsobeno různými pracovními podmínkami. Zabránit těmto defektům lze vhodným mazáním funkčních ploch nebo konstrukčními úpravami. Jelikož nelze v častých případech spoléhat na mazací prostředky a z konstrukčních důvodů ani nelze měnit konstrukci stroje, je nutné upravit povrch funkčních ploch a hran nebo zvolit vhodný materiál. Zvolit vhodný materiál je důležité na základě druhu opotřebení. Intenzita opotřebení závisí především na vzájemném odírání materiálů. Jiná intenzita opotřebení nastává při odírání kov o nekov a jiná při vzájemném odírání kovu na kov. Rychlost opotřebení strojních součástí je závislá na teplotě a na prostředí, v kterém opotřebení probíhá, resp. v prostředí chemicky aktivním. Tento jev u téhož materiálu probíhá jinak při valivém tření, jinak při tření kluzném, při bodovém dotyku, při plošném dotyku, při rovnoměrném a nerovnoměrném pohybu, při malé a velké rychlosti, při různé drsnosti funkčních ploch, nebo působí-li na součást velké tlaky a rázy. [8]

Odolnost proti opotřebení se zvýší navařením vhodným návarovým materiálem na funkční povrch součásti. Návarové materiály mají různé vlastnosti a při volbě je velmi důležité vycházet ze způsobu namáhání navařované součásti a při tom mít na vědomí složení základního kovu. Namáhání je totiž jiné u ostří rezných nástrojů, jiné zase u čelistí drtičů. Jiné návarové materiály jsou vhodné pro nástroje zpracovávající půdu, jiné pro práci se šterkem a pískem. Aby životnost byla co nejdělsí u vysoce namáhaných součástí, je důležité volit materiál s hodnotnějšími prvky než je samotný základní kov. Je celá řada materiálů pro tento účel jako různě legované oceli, tvrdé neželezné slitiny na kobaltovém nebo niklovém základě, slitiny obsahující značné procento karbidotvorných prvků, návary s karbidy wolframu apod. [8]

Navařování má v dnešní době široké uplatnění nejen při opravách, ale i při výrobě nových strojních dílů. Jedním z mnoha důvodů je úspora materiálu, úspora finančních prostředků a času. Výhodou navařování je rychlý způsob zvýšení

odolnosti proti opotřebení. Použití návarových materiálů je většinou tam, kde není možné dosáhnout potřebné jakosti povrchu žádným z běžně používaných způsobů tepelného nebo chemicko-tepelného zpracování jako je cementování, povrchové kalení, nitridování nebo nitrocementování. [8]

Při navařování vzniká úspora při výrobě součástí z uhlíkové nebo nízkouhlíkové oceli. Materiál, který je odolný proti opotřebení a vzdoruje chemickým vlivům, se navaří na funkční plochy. Navařování se uplatňuje i u velkých a strojních součástí, jinak by bylo nutné vyrobít celé díly z drahých materiálů. Aby se zařízení udrželo v provozu bez nákladných rekonstrukcí, jedná se v mnoha případech o jediné řešení. Jelikož životnost strojních součástí opatřené návary je velice vysoká, volba této dražší metalurgické úpravy povrchu se v provozu mnohonásobně vyplatí. [8]

4.1.1 Laboratorní návarové materiály

Pro experiment byly použity následující návarové materiály, které byly poskytnuty z Katedry materiálu a strojírenské technologie:

- PZ 6159
- OK TUBRODUR 14.70

4.1.1.1 Návarový materiál PZ 6159

Jedná se o trubičkový drát pro navařování. Svarový kov obsahuje karbidy wolframu v martenzitické matici a odolává teplotám do 500°C. Opracování je možné pouze broušením. Drát je použitelný i pro navařování částí pracujících za zvýšených teplot jako např. v ocelářství. Použití tohoto návarového materiálu je především u navařování ostří nástrojů pracujících za tepla a u žíhacích pecí. Tvrdost návarového materiálu se pohybuje v rozmezí 49 – 55 HRC. V tab. 3 jsou znázorněny svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty. Typ náplně je s kovovým práškem a používaný ochranný plyn je EN 439 C1. Chemické složení návarového materiálu je vylíčeno v tab. 4. [9]

Tab. 3 Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty [9]

Průměr (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Výlet drátu (mm)	Rychlost podávání (cm.min ⁻¹)	Výkon svařování (kg.h ⁻¹)
1,6	250	25	20	13	1,8 - 9

Tab. 4 Chemické složení – čistý svarový kov (%) [9]

C	Si	Mn	Cr	Co	Mo	V	W
0,40	1,10	1,10	1,80	2,00	0,40	0,40	8,00

4.1.1.2 Návarový materiál OK TUBRODUR 14.70

Jedná se o trubičkový drát pro tvrdé návary s velmi vysokou odolností proti opotřebení tvrdými a zrnitými minerály jako pískem, rudou, kamenivem, půdou apod. Otěruvzdornost je zachována až do teploty 500°C. Návar je korozivzdorný a žáruvzdorný do 1000°C. Využití návarového materiálu je především v důlním průmyslu, u činných dílů zemních a důlních strojů apod. Při aplikaci se používají dva průměry drátů, 1,6 mm a 2,4 mm a pro každý průměr je polarita při svařování jiná. Tvrdost návarového materiálu se pohybuje v rozmezí 50 – 60 HRC. V tab. 5 jsou znázorněny svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty. Typ náplně je rutilová. Chemické složení návarového materiálu je zobrazeno v tab. 6. [9]

Tab. 5 Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty [9]

Průměr (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Rychlost podávání (cm.min ⁻¹)
1,6	250	25	13

Tab. 6 Chemické složení – čistý svarový kov (%) [9]

C	Si	Mn	Mo	Cr	V
3,50	0,40	0,90	3,5	22,0	0,40

4.2 Abrazivní částice pro laboratorní zkoušku

Pro laboratorní experiment byly použity abrazivní částice ostrohranného písku a umělého korundu. Ostrohranný písek pochází z pískovny Vrábče u Českých Budějovic. Umělý korund byl zapůjčen z České zemědělské univerzity z Katedry materiálu a strojírenské technologie.

4.2.1 Umělý korund

Korund vzniká v pegmatitech bohatých na hliník spolu s andalusitem a kyanitem a v horninách, které prošly kontaktně tepelně-tlakou metamorfózou (příkladem jsou metamorfované bauxity, terry rosy, jílovité horniny, dolomity, svory a břidlice). Obecně se dá říci, že vzniká v prostředí bohatém na hliník a chudším na křemík. Vzhledem ke své odolnosti se nachází také v rozsypech. Je druhý nejtvrdší minerál na Mohsově stupnici tvrdosti a mezi další vlastnosti patří křehkost a neštěpnost. [10]

Umělý korund se vyrábí pálením bauxitu v indukčních pecích při teplotě 1600°C. Po vychladnutí několik tunového bloku je korund rozdrcen a roztříděn. Kaskádou válcových a čelistových drtičů je surovina připravena pro třídící linku. Na třídící lince je zrna tříděna a tvarována. Brousící zrna se používají pro výrobu brusných nástrojů a pro tryskání. Na obr. 30 je umělý korund zobrazen. [11]

Obr. 30 Umělý korund [12]



Velikost brousícího zrna se značí dle třídění FEPA. Tato norma nahrazuje všechny dosavadní normy. Jedná se o normu mezinárodní označena FEPA "F" 42–D–1986. Podle třídění FEPA bylo následujícím postupem zvolit zrnitosti umělého

korundu. Zvolily se zrnitosti umělého korundu F22 a F40 a na základě jeho měrného rozměru zrna se určila pro experiment frakce ostrohranného písku. V tab. 8 je zobrazen náhled velikostí brousících zrn dle FEPA. [13]

Tab. 7 Náhled velikostí brousících zrn dle FEPA [13]

Převodní tabulka FEPA „F“	
Označení dle FEPA „F“ 42 – D – 1986	Měrný rozměr zrna [μm]
F8	2800 – 2360
F10	2360 – 2000
F12	2000 – 1700
F14	1700 – 1400
F16	1400 – 1180
F20	1180 – 1000
F22	1000 – 850
F24	850 – 710
F30	710 – 600
F36	600 – 500
F40	500 – 425
F46	425 – 355
F54	355 – 300

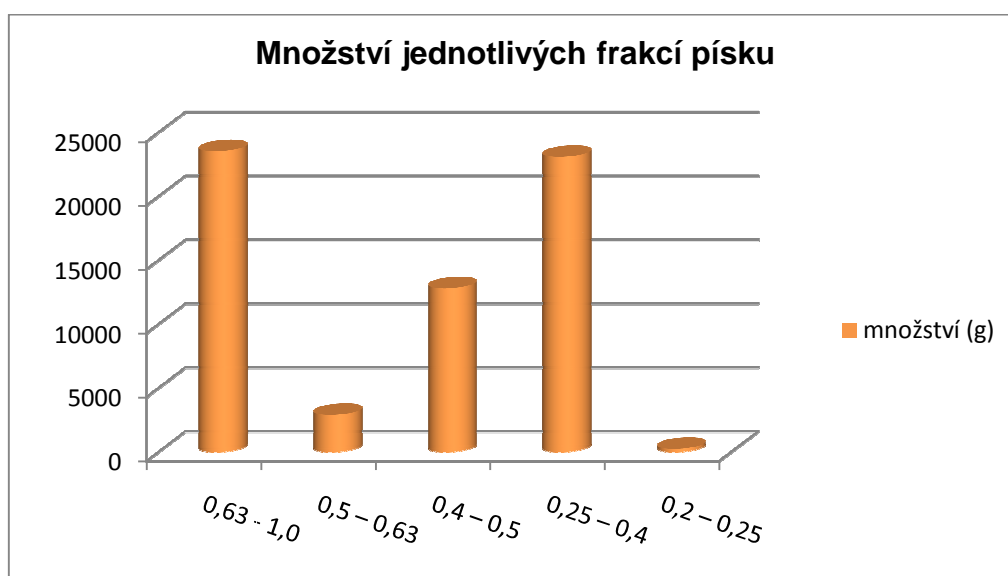
4.2.2 Ostrohranný písek

Ostrohranný písek byl rozříděn na laboratorní prosévače HAVER EML digital plus na jednotlivé frakce. Frakce ostrohranného písku a jejich množství jsou znázorněny v tab. 7 a na obr. 31. Před rozříděním byl písek dokonale vysušen, aby jej bylo možné prosévat.

Tab. 8 Frakce ostrohranného písku

Frakce (mm)	Množství (g)
0,63 - 1,0	23530
0,5 – 0,63	2900
0,4 – 0,5	12800
0,25 – 0,4	23095
0,2 – 0,25	240
Σ	62565

Obr. 31 Množství jednotlivých frakcí písku



Z grafu je zřejmé, že největší množství ostrohranného písku bylo u frakcí v rozmezí 0,63 - 1,0 a 0,25 - 0,4 mm. Naopak nejmenší množství bylo zjištěno u frakce v rozmezí 0,2 - 0,4 mm, která dosahovala 240 g.

Po prosetí byly jednotlivé frakce uskladněny do plastových lahví, aby nedocházelo k navlhnutí a pro jejich přesnou manipulaci byly viditelně označeny. Na obr. 32 jsou roztříděné frakce vyfoceny.

Obr. 32 Označené a roztříděné frakce



Pro experiment byly zvoleny frakce ostrohranného písku v rozmezí 0,4 – 0,5 a 0,63 – 1,0 mm, protože korespondují s měrným rozměrem zrna u umělého korundu F22 a F40.

4.2.2.1 Stroj pro analytické třídění HAVER EML digital plus

Stroj pro laboratorní analytické třídění, jinak prosévačka, slouží k automatickému třídění sypkých materiálů na jednotlivé frakce. Ve velmi krátké době umožňuje získat regulární výsledky analýzy. Při třídícím procesu je simulováno ruční prosévání jako základ celé techniky separace. Laboratorní stroj HAVER EML digital plus vytváří trojrozměrný prosévací pohyb a tříděný materiál je rozvrstven po celé ploše síta. U materiálů, které se hůře prosévají, lze naprogramovat přerušení prosévacího procesu, čímž dochází k zintenzivnění prosévání a celý proces je značně urychlen. [14]

Stroj pro analytické třídění HAVER s elektromagnetickým pohonem EML digital plus je velmi robustní, nemá žádné otáčivé díly, je minimálně hlučný, nevyžaduje pravidelnou údržbu a má mnohostranné využití. Konstrukce je velice masivní a odolná, neboť má dvojitý pružinový systém a je složena z litinových dílů. Na pevné části analytické prosévačky se nepřenášejí žádné nežádoucí vibrace. Analytická prosévačka HAVER EML digital plus má výborné předpoklady pro bezchybné a efektivní třídění hrubozrnných materiálů a je schopna zpracovat vzorky až do 20 kg. [14]

Analytická síta se rozlišují především podle způsobu zhotovení a podle materiálu. Zpravidla se používají analytická síta s třídící plochou z nerezové drátěné tkaniny se čtvercovými oky. Kruhová i čtvercová síta jsou vyráběna ve shodě s normou ČSN ISO 3310. Materiály lze na nich třídít od velikosti zrn 20 mikrometrů do 125 milimetrů. [15]

Byla použita tyto analytická síta:

- 1,0 mm
- 0,63 mm
- 0,5 mm
- 0,4 mm
- 0,25 mm

- 0,2 mm

Před začátkem celé aplikace se nastavily na prosévače vstupní parametry jako doba prosévání a amplituda výkyvu. V tomto případě byla doba prosévání 5 minut a amplituda výkyvu 1 mm. Na obr. 33 je vyfocen stroj pro analytické třídění HAVER EML digital plus spolu s analytickými sítí.

Obr. 33 Stroj pro analytické třídění HAVER EML digital plus



4.3 Laboratorní zkouška návarových materiálů proti abrazivnímu opotřebení

4.3.1 Příprava laboratorní zkoušky

Jak už bylo zmíněno, na laboratorní zkoušku byly připraveny návarové materiály PZ 6159 a OK TUBRODUR 14.70. Oba typy návarových materiálů byly použity pro zkoušku opotřebení volnými částicemi písku, tak i volnými částicemi umělého korundu. Dohromady tedy byly použity čtyři návarové materiály, které měly speciální označení, aby se návary při zkoušce nepomíchaly. U dvou materiálů bylo označení vytvořeno vyjiskřováním a u zbylých dvou materiálů vyražením, aby se značky při manipulaci nebo jinými např. chemickými vlivy neporušily. Označení návarových materiálů je vyfoceno na obr. 34 a zobrazeno v tab. 9. V této tabulce je zřetelné, jaký druh abraziva byl použit při experimentu na daný typ návarového materiálu.

Obr. 34 Označení návarových materiálů



Tab. 9 Označení návarových materiálů a použité abrazivní částice

Návarové materiály			
PZ 6159		OK TUBRODUR 14.70	
E ₂ V ₁ 6	E ₂ V ₁ 7	E ₄ V ₁ 2	E ₄ V ₁ 3
SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃

Před laboratorní zkouškou se vytvořil návrh čtyř faktorového experimentu, který určoval celý postup zkoušky návarových materiálů. Jedná se o tabulku, která řídí systém vstupních faktorů dle jednotlivých pokusů. Tabulka se vytvořila v programu Statistica a byla klíčem pro analýzu rozptylu ANOVA. Během celého experimentu byl tento algoritmus návodem, kdy a jaké faktory za daného pokusu použít. Mezi tyto faktory patří druh návarového materiálu, velikost zatížení, druh volných částic (abraziva) a velikost zrna.

Tab. 10 Návrh čtyř faktorového experimentu

Pokus	Návrh: 2** (4 – 0) schema (Tabulka 5)			
	Návarový materiál	Zatížení (N)	Abrazivo	Velikost zrna (mm)
1	E ₂ V ₁ 6	5,8	SiO ₂	0,4 – 0,5
2	E ₄ V ₁ 2	5,8	SiO ₂	0,4 – 0,5
3	E ₂ V ₁ 6	22	SiO ₂	0,4 – 0,5
4	E ₄ V ₁ 2	22	SiO ₂	0,4 – 0,5
5	E ₂ V ₁ 7	5,8	Al ₂ O ₃	0,4 – 0,5
6	E ₄ V ₁ 3	5,8	Al ₂ O ₃	0,4 – 0,5
7	E ₂ V ₁ 7	22	Al ₂ O ₃	0,4 – 0,5
8	E ₄ V ₁ 3	22	Al ₂ O ₃	0,4 – 0,5
9	E ₂ V ₁ 6	5,8	SiO ₂	0.63 – 1
10	E ₄ V ₁ 2	5,8	SiO ₂	0.63 – 1
11	E ₂ V ₁ 6	22	SiO ₂	0.63 – 1
12	E ₄ V ₁ 2	22	SiO ₂	0.63 – 1
13	E ₂ V ₁ 7	5,8	Al ₂ O ₃	0.63 – 1
14	E ₄ V ₁ 3	5,8	Al ₂ O ₃	0.63 – 1
15	E ₂ V ₁ 7	22	Al ₂ O ₃	0.63 – 1
16	E ₄ V ₁ 3	22	Al ₂ O ₃	0.63 – 1

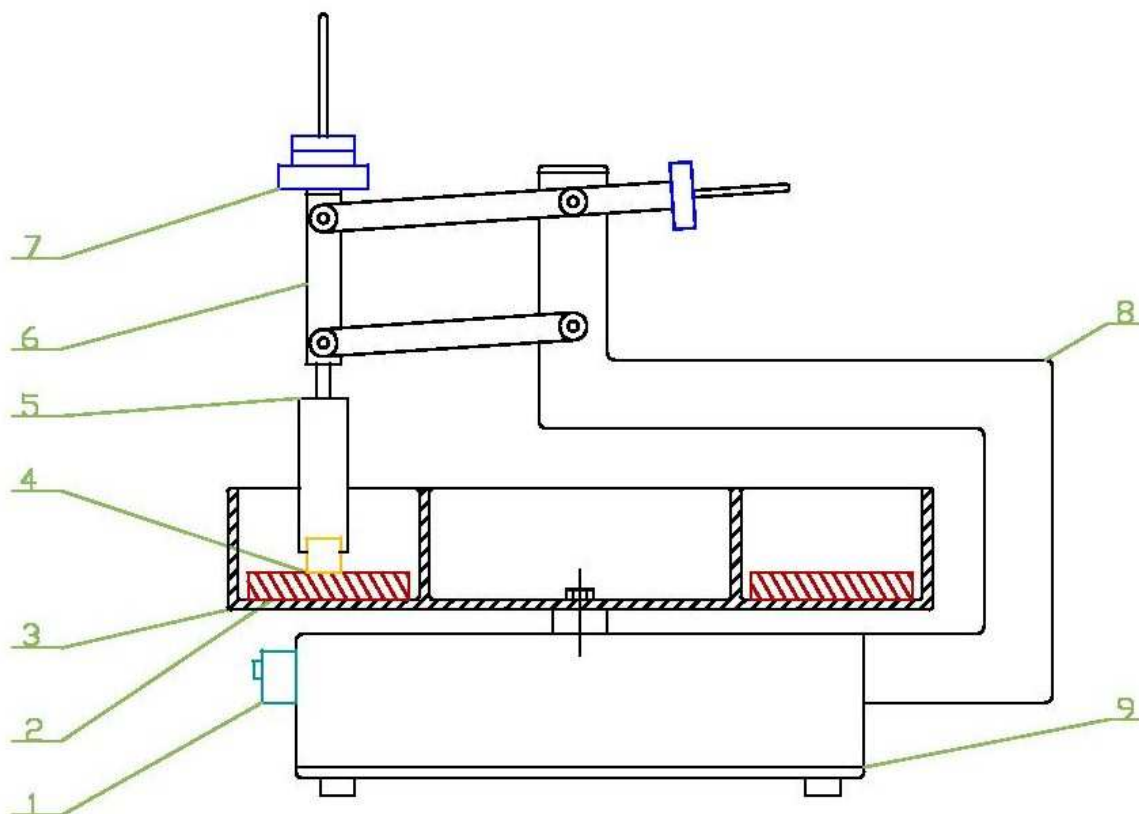
Z tabulky je zřejmé, že pokusů bylo 16. Každý pokus má jiné parametry, kupř. u prvního pokusu byl použit návarový materiál E₂ V₁ 6, zatížení bylo 5,8 N, abrazivo SiO₂ a velikost zrna v rozmezí 0,4 – 0,5 mm.

4.3.2 Laboratorní zkouška

4.3.2.1 Zařízení s brusným žlabem

Experiment se prováděl na přístroji s brusným žlabem. Jednoduché schéma zařízení s brusným žlabem je zobrazeno na obr. 35.

Obr. 35 Schema zařízení s brusným žlabem



Pozice	Popis	Pozice	Popis
1	Ovládací spínač	6	Pohyblivé rameno
2	Pryžová podložka	7	Zatížení
3	Brusný žlab	8	Pevné rameno
4	Zkušební vzorek	9	Podstava
5	Upínací hlava		

Zařízení s brusným žlabem, viz obr. 36, se skládá z různých částí. Pryžová podložka je umístěna v umělohmotném brusném žlabu, který koná otáčivý pohyb. Abrazivní částice jsou rovnoměrně rozmístěny v brusném žlabu na pryžové podložce a během otáčení brusného žlabu opotřebovávají návarový materiál (zkušební vzorek). Návarový materiál je umístěn v upínací hlavě, která je spojená s pohyblivým ramenem. Pohyblivé rameno je zatěžováno závažími. Pokud závaží na pohyblivé rameno nepůsobí, je vyrovnáváno protizávažím a setrvává v rovnoměrné poloze.

Obr. 36 Zařízení s brusným žlabem



Parametry:

Průměr brusného žlabu = 525 mm

Otáčky brusného žlabu = 50 otáček.min⁻¹

4.3.2.2 Měření

Před začátkem měření se na návarových materiálech srazila hranka, aby abrazivní částice lépe vnikaly pod návarový materiál. Sražené hranky na návarových materiálech jsou vyfoceny na obr 37. Začátek měření se rozvrhl podle algoritmu, viz kap. „Příprava laboratorní zkoušky“.

Obr. 37 Sražené hranky na návarových materiálech



Začalo se pokusem 1. Podle předepsaného algoritmu se připravily vstupní parametry, které odpovídají tabulce, tzn. návar $E_2 V_1 6$, zatížení 5,8 N, abrazivo SiO_2 a velikost abraziva v rozmezí 0,4 – 0,5 mm. Návarový materiál se před měřením musel odmastit. Odmaštění probíhalo v ultrazvukové čističce, která je vyfocena na obr. 38. Návar se umístil do acetonu a nádoba s návarem do ultrazvukové vany. Přibližně po dvou minutách se návar vyjmul z acetonu a ručním fénem se osušil. Čištění pomocí ultrazvuku má celou řadu výhod. Zejména je to rychlost čistícího procesu, neboť potřebná doba se zkracuje na jednotky, maximálně desítky minut. Pro ultrazvuk neexistují nepřístupná místa, stejně dobře vyčistí tvarově složitý předmět i slepý otvor. Díky zákonitostem šíření ultrazvuku v kapalinách je možné čistit předměty jinými technologiemi čistitelné jen velice obtížně, případně vůbec. Odpadá také namáhavá a nepříjemná manuální práce, zbývá pouze vložení čištěného předmětu do ultrazvukové vany a po ukončení procesu jeho vyjmutí. [16]

Obr. 38 Ultrazvuková čistička



Po osušení ručním fénem se návar zvážil na laboratorních vahách WA 35 s přesností na 0,00001 g. Na obr. 39 jsou laboratorní váhy vyfoceny. Návar se umístil na misku vah, u kterých se předem nastavila hodnota zjištěná na laboratorních předvážkových vahách a zapsala se hodnota. Pro lepší přesnost výsledku se návary vážily třikrát. Hodnoty zjištěné laboratorními vahami jsou důležité pro výpočet hmotnostního úbytku návarového materiálu. Seznam naměřených hodnot je uveden v příloze 1 a 2 na str. I a III.

Obr. 39 Laboratorní váhy



Do brusného žlabu se nasypalo cca 0,7 l volných částic SiO_2 o velikosti v rozmezí 0,4 – 0,5 mm. Abrazivo muselo být rozprostřeno po celé ploše pryžové podložky. Tak aby při otáčení brusného žlabu částice vnikaly pod návarový materiál a opotřebovávaly ho.

Návarový materiál se umístil do upínací hlavy a pohyblivé rameno se zatížilo závažím. Umístění návarového materiálu je vyfoceno na obr. 40.

Obr. 40 Umístění návarového materiálu



Měření trvalo 10 minut. Po vypnutí zařízení s brusným žlabem se návarový materiál vyjmul z upínací hlavy, odmastil se v ultrazvukové čističce a poté zvážil na laboratorních vahách. Postup odmaštění a vážení je stejný jako předchozím případě. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 1 na str. I a II.

Každý pokus se opakoval sedmkrát a vždy, před novým měřením, se abrazivní částice vyměnily za nové. Z tohoto důvodu se před druhým měřením vymetly z brusného žlabu abrazivní částice SiO_2 a nahradily se přibližně stejným množstvím novým abrazivem. Pro vyhodnocení abrazivních částic se použité abrazivní částice uschovaly.

Tímto způsobem se postupovalo i u dalších pokusů, které byly dle algoritmu v pořadí. Dohromady se tedy odměřilo 16 pokusů po sedmi měřeních, jejichž naměřené hodnoty jsou zapsány a uvedeny v přílohách 1 a 2 na str. I a III.

U měření pokusu 7 byly použity digitální laboratorní váhy KERN s přesností 0,0001 g, které se využívaly po zbytek měření. Návarový materiál se tedy vážil pouze jednou. Digitální laboratorní váhy KERN jsou vyfoceny na obr. 41. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 2 na str. III.

Obr. 41 Digitální laboratorní váhy

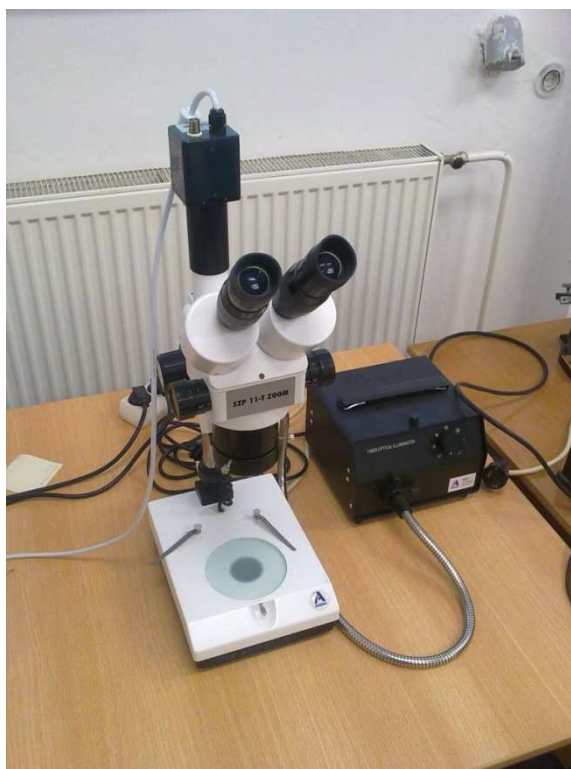


4.4 Vyhodnocení laboratorní zkoušky návarových materiálů proti abrazivnímu opotřebení

4.4.1 Vyhodnocení abrazivních částic

Cílem vyhodnocení bylo zjistit velikosti zrna před měřením a po měření u částic SiO_2 a umělého korundu a t – testem zjistit jejich nezávislost. Ze všech šestnácti pokusů se použité abrazivní částice uschovaly, aby je bylo možno vyhodnotit. Abrazivní částice SiO_2 a umělého korundu se na laboratorním mikroskopu vyfotily a následně v programu Gwyddion upravily. Fotografie se poskytly u zrna SiO_2 před měřením a po měření, a to u pokusů 1, pokusů 2, pokusů 3, pokusů 4 a pokusů 9, pokusů 10, pokusů 11, pokusů 12. U zrna umělého korundu se fotografie poskytly také před měřením a po měření u pokusů 5, pokusů 6, pokusů 7, pokusů 8 a pokusů 13, pokusů 14, pokusů 15, pokusů 16. Na obr. 42 je laboratorní mikroskop vyfocen.

Obr. 42 Laboratorní mikroskop

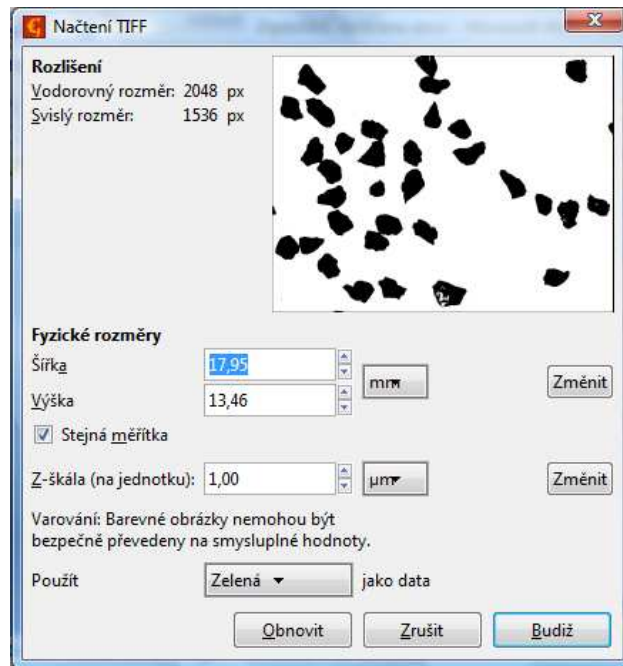


Zrna se nasypala na dno skleněné misky a po celé ploše se rozmístila. Miska se zrny se vložila pod objektiv a na počítači vyfotila. Bylo důležité rozmístit zrna tak, aby na fotografii zrna nebyla spojená a byla jednotlivě poskládána. Pro přesnost výsledku se vyfotily alespoň čtyři snímky jak u použitých částic SiO_2 a umělého korundu, tak i u nepoužitých. Výběr vyfocených zrn SiO_2 jsou zobrazeny v příloze 3 na str. V, umělého korundu v příloze 4 na str. VII (fotografie nemají dobrou kvalitu, neboť pro další práce s těmito fotografiemi se měnil kontrast a jas).

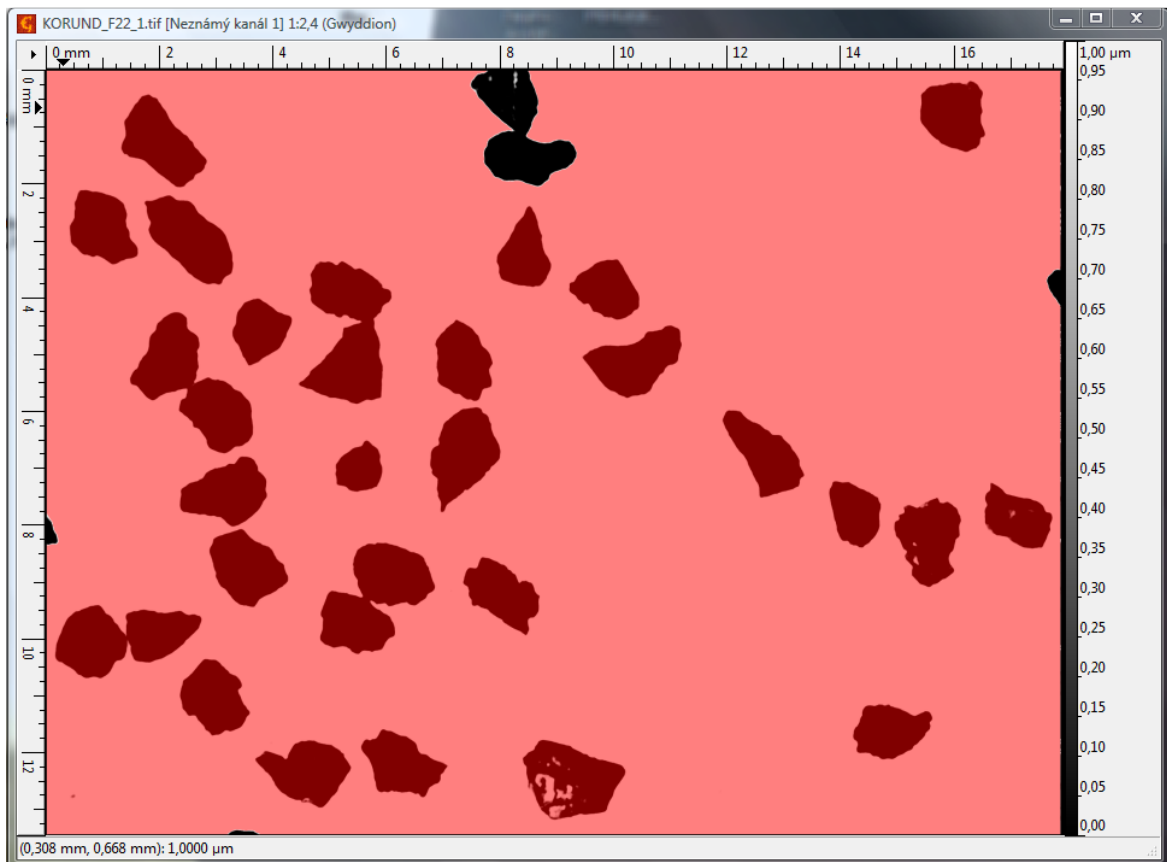
Z těchto fotografií byla potřeba získat data, která byla potřebná pro výpočet rozměru zrna a potřebná pro následné porovnání těchto zrn před měřením a po měření. Z tohoto důvodu se snímky upravovaly a vyhodnocovaly v programu Gwyddion verze 2.21. Gwyddion je modulární multiplatformní software pro 2D analýzu dat a jejich vizualizaci. [17]

Fotografiím se upravil jas a kontrast, aby zrna byla v programu lépe rozpoznatelná. Fotografie se převedly na nekomprimovaný obrázek (formát TIFF), neboť je lze převádět do binární soustavy. Pro správný výpočet se muselo zadat rozlišení a rozměry snímku, které se předem zjistily. Načtení snímku se vstupními parametry je znázorněno na obr. 43. Na obr. 44 je znázorněn snímek, u kterého dochází k úpravě zrn v programu Gwyddion.

Obr. 43 Načtení snímku se vstupními parametry



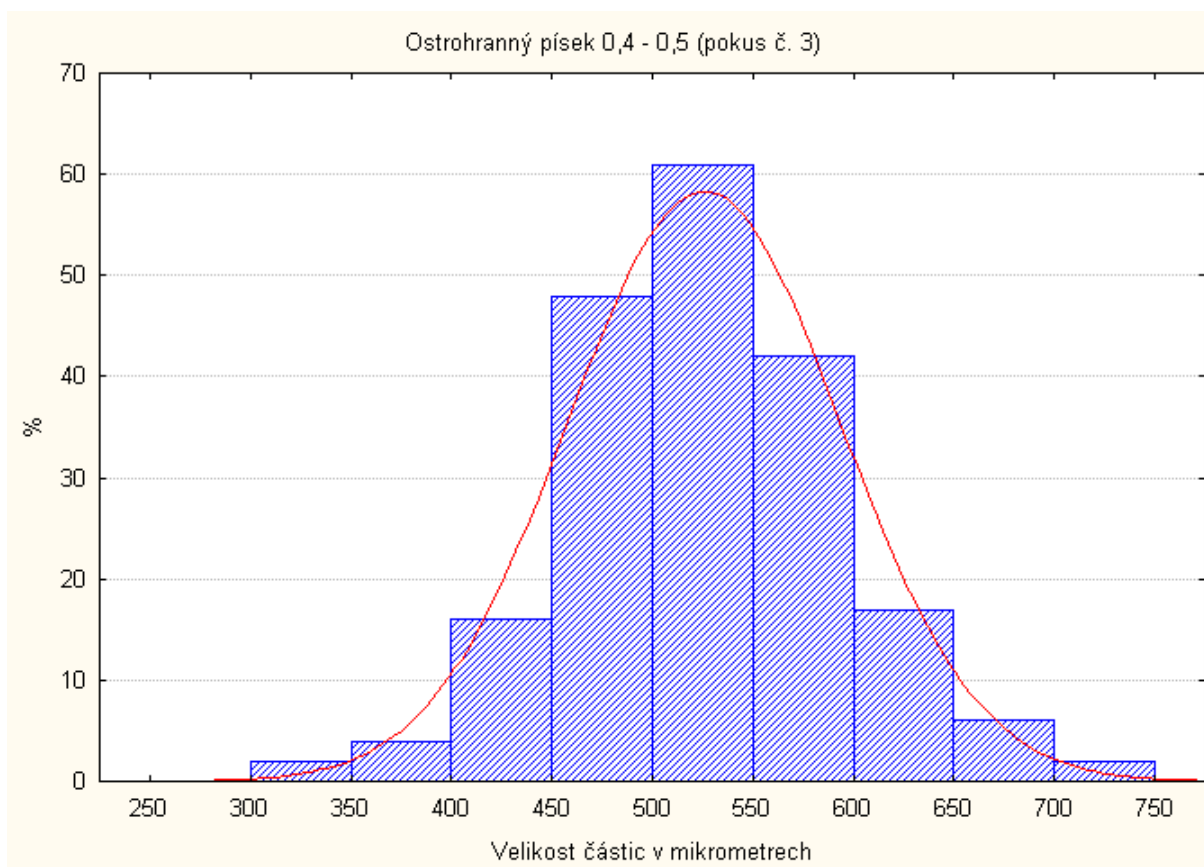
Obr. 44 Snímek v programu Gwyddion



Zrna, která byla na snímku spojená nebo nebyla celá zobrazena, se vyloučila. Ne zcela viditelná zrna (zrna, která barevně prosvítala, viz obr. 44) se funkcí vyplnila. Data se exportovala do programu Excel verze 2001. Jedná se o plochu a průměr zrna v mikrometrech. Tímto postupem se zjistily hodnoty na všech snímkách.

Hodnocení se provádělo pomocí programu Statistica t – testem, konkrétně t – testem na nezávislost. Z tohoto důvodu se data exportovala z programu Excel do programu Statistica. V programu Statistica se vyloučily extrémní hodnoty, které byly rozpoznány histogramem. Jedná se o hodnoty, které se výrazně lišily a ovlivňovaly průběh histogramu. Na obr. 45 je znázorněn histogram použitého ostrohranného písku u fakce v rozmezí 0,4 – 0,5 mm. Na vodorovné ose je velikost částic v mikrometrech a na svislé ose četnost. Bylo použito normální rozdělení, z tohoto důvodu byl důležitý aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Výsledná tabulka s hodnotami je znázorněna v tab. 11.

Obr. 45 Histogram



Tab. 11 Hodnocení zrna

		Průměr (μm)	So (μm)	t	p		
Písek	Před měřením		583,276	152,4076	-	-	-
	Po měření	Pokus 1	515,5931	71,6262	6,86438	0,001<	N
		Pokus 2	482,8939	128,3154	7,73704	0,001<	N
		Pokus 3	524,2348	67,7260	5,28191	0,001<	N
		Pokus 4	493,7988	73,8727	6,17709	0,001<	N
	Před měřením		897,765	249,8707	-	-	-
	Po měření	Pokus 9	893,4823	142,9649	-0,03571	0,971589	Z
		Pokus 10	934,9723	934,9723	-1,12250	0,264774	Z
Pokus 11		909,8235	141,2446	-0,61280	0,541346	Z	
Pokus 12		912,1659	137,4244	-0,23801	0,812322	Z	
Korund	Před měřením		605,351	67,7995	-	-	-
	Po měření	Pokus 5	542,1910	162,9803	4,955452	0,001<	N
		Pokus 6	535,0434	157,5616	4,938696	0,001<	N
		Pokus 7	512,1964	143,8634	7,841713	0,001<	N
		Pokus 8	599,5350	95,6372	1,190188	0,236682	Z
	Před měřením		1203,492	123,0306	-	-	-
	Po měření	Pokus 13	1214,298	210,4515	-0,408148	0,685018	Z
		Pokus 14	1219,398	126,2905	-0,838500	0,405193	Z
Pokus 15		1215,770	145,8803	-0,540220	0,591079	Z	
Pokus 16		1168,796	124,9115	1,481411	0,143185	Z	

So – směrodatná odchylka, t – T – test, p – závislost, N – nezávislé, Z - závislé

Důležitým parametrem je hodnota p. Tato hodnota určuje, zdali se velikost zrna po měření změnila, či nikoli. Hodnota 0,001< znamená, že číslo je menší jak 0,01 a lze říci, že je statisticky nezávislé. Z tabulky je tedy zřejmé, že závislost nelze prokázat u písku, resp. u pokusů 1, 2, 3 a 4. To samé lze říci i u korundu u pokusů 5, 6 a 7. Závislost lze prokázat u písku u pokusů 9, 10, 11 a 12 a u korundu u pokusů

13, 14, 15 a 16. Např. u pokusu 9 u hodnoty $p = 0,971589$ lze závislost prokázat z 97 % a nezávislost nelze prokázat z 3 %.

Závěrem hodnocení lze říci, že po procesu opotřebením návarových materiálů bylo prokázáno, že zrna písku a umělého korundu se rozrušovala u menších průměrů při působení obou zatížení.

4.4.2 Vyhodnocení hmotnostních úbytků návarových materiálů

Cílem vyhodnocení bylo určit pomocí vícefaktorové analýzy rozptylu ANOVA, které vstupní faktory mají v procesu opotřebením vliv na hmotnostní úbytek návarových materiálů. Analýza rozptylu (ANOVA), je analýza, při které lze zjistit, zda jsou efekty faktorů či interakcí statisticky významné. [18, 19]

V programu Statistica se vytvořil standardní návrh čtyř faktorového experimentu o dvou úrovních. Jedná se o tabulku, která obsahuje horní a dolní úrovně v jednotlivých krocích značené kódově (-1, 1), viz tab. 12. Jelikož experiment obsahuje čtyři faktory o dvou úrovních, počet kroků se vypočítá:

$$n = 2^k = 2^4 = 16$$

n – počet kroků, k – počet faktorů. [18]

Výpočtem se zjistilo, kolik kroků, resp. postupů bude návrh obsahovat.

Tab. 12 Standardní návrh čtyř faktorového experimentu o dvou úrovních

Pokus (krok)	Návrh: 2** (4-0) schema (Tabulka5)			
	Materiál	Zatížení	Abrazivo	Velikost
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1

<u>Materiál:</u>	- 1 => 1 1 => 2
<u>Zatížení:</u>	- 1 => 5,8 N 1 => 22 N
<u>Abrazivo:</u>	- 1 => SiO ₂ (1090 HV) 1 => Al ₂ O ₃ (1900 HV) [1]
<u>Velikost zrna:</u>	- 1 => menší [\bar{x} , σ] 1 => větší [\bar{x} , σ]

\bar{x} – průměr (μm)

σ – směrodatná odchylka (μm)

V tabulce jsou v řádcích uspořádány kroky procesu a podle ní se prováděl vlastní experiment (viz kapitola Příprava laboratorní zkoušky a Měření). Hodnotu hmotnostního úbytku lze vypočítat:

$$\Delta m = m_{\text{před.}} - m_{\text{po.}}$$

Δm – hmotnostní úbytek (g), $m_{\text{před.}}$ – hmotnost návarového materiálu před opotřebením (g), $m_{\text{po.}}$ – hmotnost návarového materiálu po opotřebením (g).

Jelikož se návarové materiály v každém měření vážily třikrát, vycházely pochopitelně třikrát hodnoty hmotnostních úbytků. Z těchto tří vypočtených hodnot se vytvořil průměr. Výjimka je u pokusů 6, 7, 8 a u pokusů 13, 14, 15 a 16. U těchto pokusů byly k dispozici digitální laboratorní váhy a návarový materiál se vážil pouze jednou. Průměrná hodnota hmotnostních úbytků se zde tedy nepočítala. Naměřené hodnoty hmotnostních úbytků jsou znázorněny v příloze 1 a 2 na str. I a III.

Dalším krokem při vyhodnocení faktoriálního experimentu je výpočet efektů faktorů a interakcí. Než se výpočet efektů faktorů a interakcí provedl, upravila se tabulka do takové podoby, aby bylo možné provést analýzu. Jelikož se každý pokus opakoval sedmkrát, obsahovala tabulka sedm řádků u každých šestnácti pokusů. Jak již bylo zmíněno, sledují se čtyři faktory, které mají vliv na hmotnostní úbytek, jedná se o materiál, zatížení, abrazivo a velikost částic. Do tabulky se vedle tyto čtyři faktory zapsala odezva. Odezva je výstup měření, v tomto případě hmotnostní úbytek. V příloze 5 na str. IX je vstupní upravená tabulka znázorněna.

Do tabulky se dosadily konkrétní hodnoty za horní a dolní úroveň. Za materiál se dosadila čísla jedna a dva, neboť se jedná o nespojitou veličinu. Dále se dosadila zatěžující síla, za abrazivo tvrdost podle Vickerse a za velikost zrna aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Dosazená tabulka je zobrazena v příloze 6 na str.XIII. [1]

Po vytvoření vstupních tabulek se provedl výpočet efektů faktorů a interakcí pomocí softwarového programu Statistica. Data jsou uvedena v tabulce, která je na obr. 46. V prvním sloupci je uveden efekt faktoru a interakce, ve druhém sloupci je uvedena směrodatná chyba efektu a interakce, ve třetím sloupci je uvedena velikost efektu a interakce a ve čtvrtém sloupci je uvedena statistická významnost faktoru a interakce.

Obr. 46 Výpočet efektů a interakcí

Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(97)	p	-95,% Lmt.Spol	+95,% Lmt.Spol	koef.	Sm.Ch. koef.	-95,% Lmt.Spol	+95,% Lmt.Spol
Průměr/ab.č.	0,039973	0,000831	48,11653	0,000000	0,038324	0,041622	0,039973	0,000831	0,038324	0,041622
(1)materiál	-0,011509	0,001662	-6,92663	0,000000	-0,014806	-0,008211	-0,006754	0,000831	-0,007403	-0,004106
(2)zátížení (N)	0,059310	0,001662	35,69657	0,000000	0,056012	0,062608	0,029655	0,000831	0,028006	0,031304
(3)abrazivo (HV)	0,049651	0,001662	29,88328	0,000000	0,046354	0,052949	0,024826	0,000831	0,023177	0,026474
(4)velikost zrna (µm)	-0,010135	0,001662	-6,09964	0,000000	-0,013432	-0,006837	-0,005067	0,000831	-0,006716	-0,003418
1 * 2	-0,010171	0,001662	-6,12163	0,000000	-0,013469	-0,006874	-0,005086	0,000831	-0,006734	-0,003437
1 * 3	0,004276	0,001662	2,57343	0,011584	0,000978	0,007573	0,002138	0,000831	0,000489	0,003787
1 * 4	-0,002812	0,001662	-1,69242	0,093776	-0,006110	0,000486	-0,001406	0,000831	-0,003055	0,000243
2 * 3	0,037110	0,001662	22,33541	0,000000	0,033813	0,040408	0,018555	0,000831	0,016906	0,020204
2 * 4	-0,008716	0,001662	-5,24592	0,000001	-0,012014	-0,005419	-0,004358	0,000831	-0,006007	-0,002709
3 * 4	-0,012484	0,001662	-7,51366	0,000000	-0,015782	-0,009186	-0,006242	0,000831	-0,007891	-0,004593
1*2*3	0,001215	0,001662	0,73123	0,466402	-0,002083	0,004513	0,000607	0,000831	-0,001041	0,002256
1*2*4	-0,001834	0,001662	-1,10352	0,272530	-0,005131	0,001464	-0,000917	0,000831	-0,002566	0,000732
1*3*4	-0,001191	0,001662	-0,71676	0,475247	-0,004489	0,002107	-0,000595	0,000831	-0,002244	0,001053
2*3*4	-0,009740	0,001662	-5,86219	0,000000	-0,013038	-0,006442	-0,004870	0,000831	-0,006519	-0,003221

Dalším krokem při vyhodnocení výsledků experimentu je přijetí faktorů významných od těch, které jsou jenom výsledkem experimentálního šumu.

Pro významnost efektů slouží dva grafy:

- Paretův graf
- Normální pravděpodobnostní graf [18]

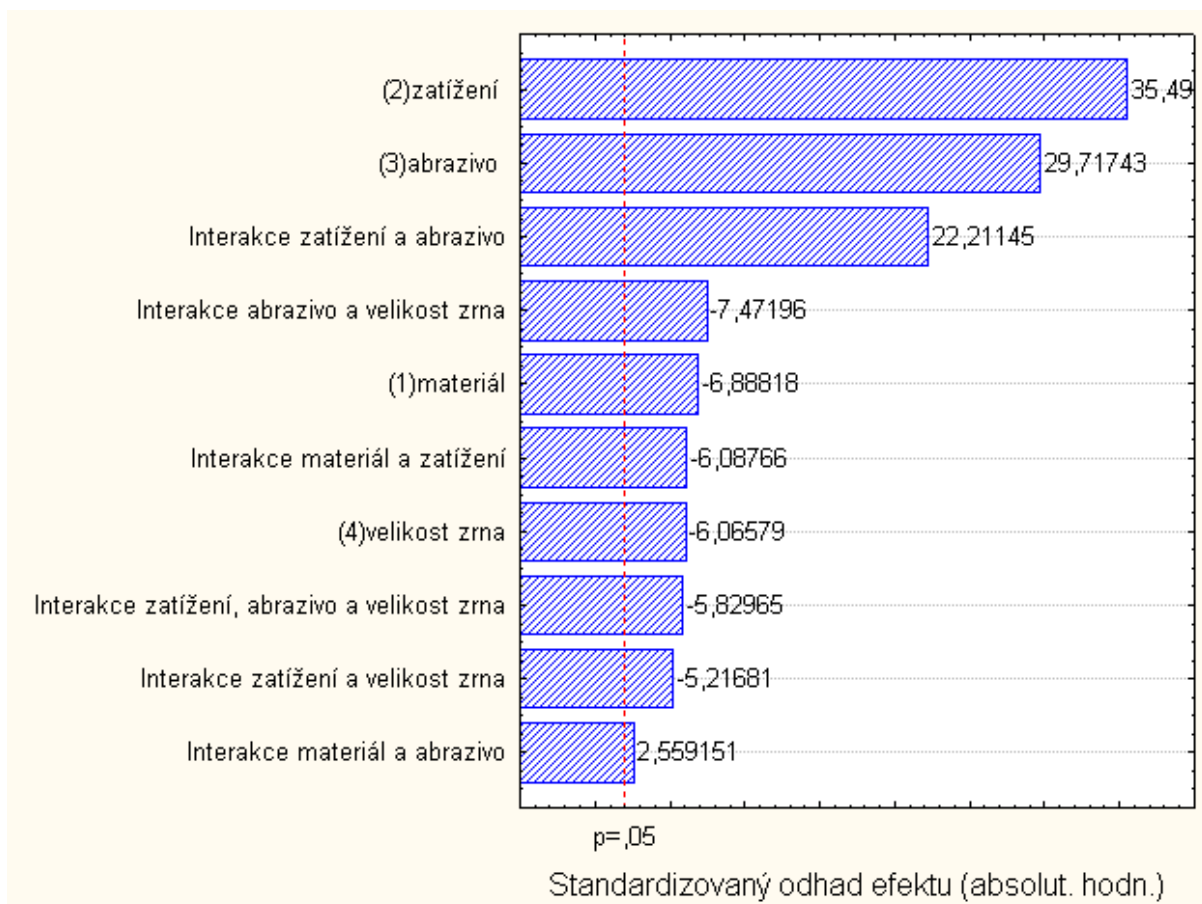
V našem případě se použil Paretův graf. Jedná se o sloupečkový diagram vypočtených efektů, seřazených podle velikosti. Vychází se z toho, že největší vypočtené efekty budou nejspíš patřit těm faktorům, které mají skutečný vliv. U faktorů či interakcí, u kterých nebyl na hladině významnosti prokázán vliv, se jeví

jako nevýznamné. Jedná se o interakci materiálu a velikosti zrna, interakci materiálu, zatížení a abraziva, interakci materiálu, zatížení a velikosti zrna a v poslední řadě o interakci materiálu, abraziva a velikosti zrna. Na obr. 47 je zobrazena tabulka po vyloučení interakcí, které nemají na proces prokázaný vliv. Paretův graf vytvořený z upravené tabulky je zobrazen na obr. 48.

Obr. 47 Tabulka po úpravě interakcí

STATISTICA Cz - [PSanova* - Odhady efektů; R-kv.=,96614; Upr.: 96278 (anova)]										
Soubor Upravit Zobrazit Vložit Formát Statistika Data mining Grafy Nástroje Data Pracovní sešit Okno Nápověda										
Arial 10 B I U										
PSanova* - Odhady efektů; R-kv.=,96614; Upr.: 96278 (anova)										
2**(4-0) schéma; MS reziduí = ,0000782										
ZP: pr.										
Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(101)	p	-95, % Lmt.Spol	+95, % Lmt.Spol	koef.	Sm.Ch. koef.	-95, % Lmt.Spol	+95, % Lmt.Spol
Průměr/ab.č.	0,039973	0,000835	47,84949	0,000000	0,038316	0,041630	0,039973	0,000835	0,038316	0,041630
(1)materiál	-0,011509	0,001671	-6,88818	0,000000	-0,014823	-0,008194	-0,005754	0,000835	-0,007412	-0,004097
(2)zatížení (N)	0,059310	0,001671	35,49846	0,000000	0,055996	0,062624	0,029655	0,000835	0,027998	0,031312
(3)abrazivo (HV)	0,049851	0,001671	29,71743	0,000000	0,046337	0,052966	0,024826	0,000835	0,023168	0,026483
(4)velikost zrna (µm)	-0,010135	0,001671	-6,06579	0,000000	-0,013449	-0,006820	-0,005067	0,000835	-0,006724	-0,003410
1 * 2	-0,010171	0,001671	-6,08766	0,000000	-0,013486	-0,006857	-0,005086	0,000835	-0,006743	-0,003428
1 * 3	0,004276	0,001671	2,55915	0,011975	0,000961	0,007590	0,002138	0,000835	0,000481	0,003795
2 * 3	0,037110	0,001671	22,21145	0,000000	0,033796	0,040425	0,018555	0,000835	0,016898	0,020212
2 * 4	-0,008716	0,001671	-5,21681	0,000001	-0,012031	-0,005402	-0,004358	0,000835	-0,006015	-0,002701
3 * 4	-0,012484	0,001671	-7,47196	0,000000	-0,015798	-0,009170	-0,006242	0,000835	-0,007899	-0,004586
2*3*4	-0,009740	0,001671	-5,82965	0,000000	-0,013054	-0,006426	-0,004870	0,000835	-0,006527	-0,003213

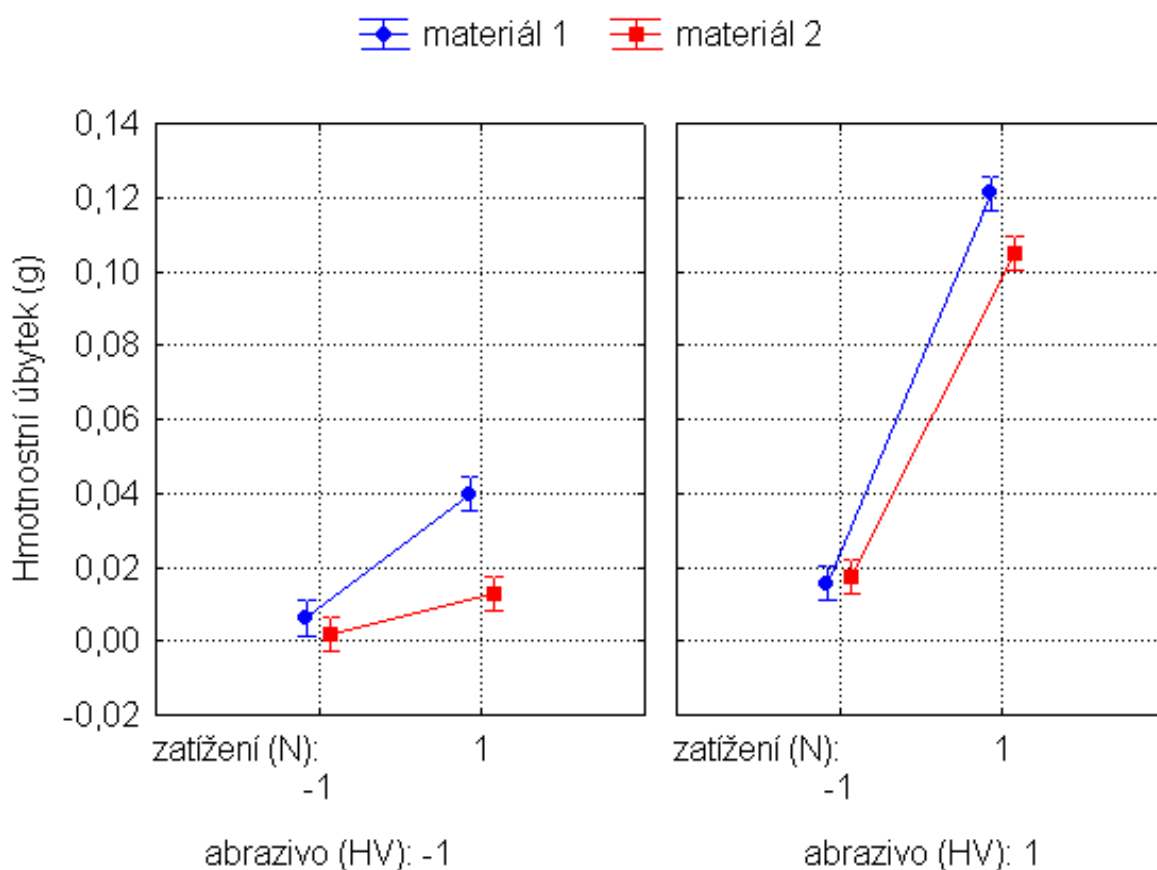
Obr. 48 Paretův graf



V Paretově grafu jsou statisticky významné ty faktory a interakce, které překročily hladinu významnosti 0,05. Z grafu je zřejmé, že velice významné faktory v procesu opotřebení jsou zatížení, abrazivo a interakce mezi těmito faktory. Dále v procesu opotřebení má vliv materiál, velikost zrna, interakce abraziva a velikosti zrna, interakce materiálu a zatížení, interakce zatížení, abraziva a velikosti zrna a interakce zatížení a velikosti zrna. Nejméně významným vlivem v procesu je interakce materiálu a abraziva.

Prvním výstupem je graf hmotnostního úbytku v závislosti na materiálu, abrazivu a zatížení, který je znázorněn na obr. 49.

Obr. 49 Graf hmotnostního úbytku v závislosti na materiálu, abraziva a zatížení



Materiál: 1 = Návarový materiál s nižším obsahem uhlíku, molybdenu a chromu.

2 = Návarový materiál s vyšším obsahem uhlíku, molybdenu a chromu.

Abrazivo: -1 = SiO₂ (1090 HV)

1 = Al₂O₃ (1900 HV)

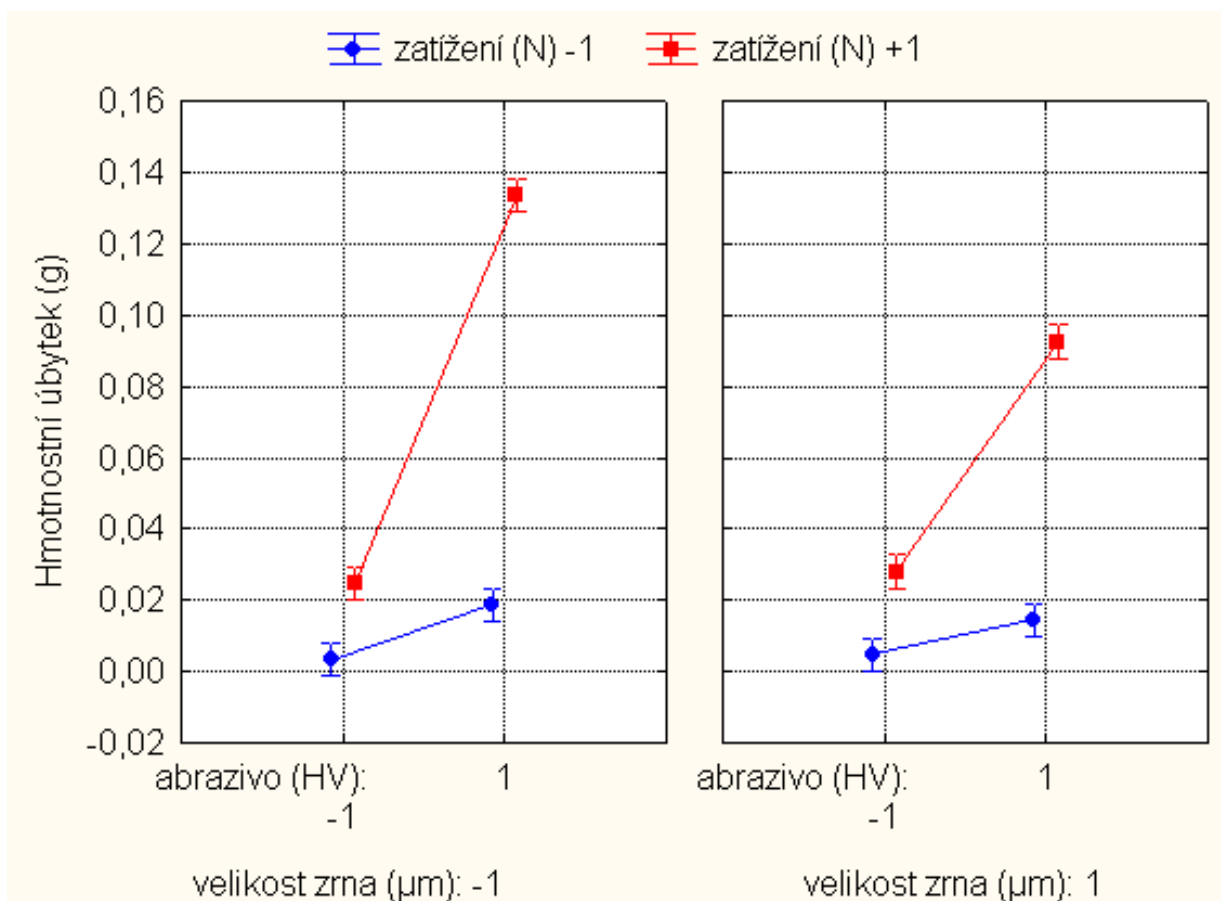
Zatížení: -1 = 5,8 N

1 = 22 N

Z grafu je patrné, že dochází k jistému stupni interakce mezi materiálem a zatížením, neboť spojnice dvou křivek v pravé a levé části grafu nejsou rovnoběžné. K výrazné interakci dochází mezi zatížením a abrazivem, protože koncové spojnice obou křivek v pravé části grafu oproti levé výrazně stoupají. V levé části grafu při změně zatížení dochází k nepatrnému nárůstu hmotnostního úbytku při použití abraziva o menší tvrdosti u obou materiálů, ale větší nárůst hmotnostního úbytku je u prvního materiálu. V pravé části grafu při změně zatížení dochází k výraznému zvýšení hmotnostního úbytku u obou materiálů při použití abraziva o vyšší tvrdosti, ale větší nárůst hmotnostního úbytku je jako v předešlém případě u prvního materiálu.

Druhým výstupem je graf hmotnostního úbytku v závislosti na zatížení, velikosti zrna a abrazivu, který je znázorněn na obr. 50.

Obr. 50 Graf hmotnostního úbytku v závislosti na zatížení, velikosti zrna a abraziva



Zatížení: -1 = 5,8 N
1 = 22 N

Velikost zrna: - 1 = menší

1 = větší

Abrazivo: -1 = SiO₂ (1090 HV)

1 = Al₂O₃ (1900 HV)

Z grafu je zřejmé, že dochází k výrazné interakci mezi zatížením a abrazivem, neboť spojnice dvou křivek v pravé a levé části grafu nejsou rovnoběžné. Interakce mezi abrazivem a velikostí zrna klesá, neboť koncové spojnice obou křivek mají v pravé části grafu oproti levé klesající tendenci. V levé části grafu při změně abraziva dochází u menší velikosti zrna k nárůstu hmotnostního úbytku u obou materiálů, ale při užití vyššího zatížení tento nárůst strmě stoupá. Oproti levé, v pravé části grafu dochází při změně abraziva u větší velikosti zrna k menšímu nárůstu hmotnostního úbytku u obou materiálů, ale přesto, jako v předchozím případě, dochází k nárůstu při užití vyššího zatížení.

5 Závěr

Diplomová práce na téma odolnost návarových materiálů proti abrazivnímu opotřebení volnými částicemi přibližuje problematiku abrazivního opotřebení volnými částicemi návarových materiálů. Návarové materiály s rozdílným chemickým složením byly podle statisticky navrženého experimentu opotřebovávány volnými abrazivními částicemi při působení různé velikosti zatížení a rozdílné velikosti částic. Abrazivní částice představovaly ostrohranný písek a umělý korund.

Vyhodnocením abrazivních částic po opotřebení návarových materiálů bylo prokázáno, že zrna umělého korundu a ostrohranného písku se rozrušovala u menších průměrů při působení obou zatížení. U zrn větších průměrů ostrohranného písku a umělého korundu se rozrušování při působení obou zatížení po opotřebení nepodařilo statisticky prokázat.

Vyhodnocením hmotnostních úbytků návarových materiálů bylo prokázáno, že nejvýznamnějšími vlivy v procesu abrazivního opotřebení jsou zatížení, abrazivo a vzájemné působení zatížení a abraziva. Vyšší hmotnostní úbytek byl zaznamenán při působení u vyššího zatížení (22 N) a opotřebováním ostrohranným pískem u návarového materiálu PZ 6159 s nižším obsahem uhlíku, molybdenu a chromu. Největší úbytek materiálu byl zaznamenán u téhož materiálu při působení vyššího zatížení a opotřebováním umělým korundem. Dále bylo zjištěno, že hmotnostní úbytek u obou návarových materiálů při použití menší velikosti abrazivních částic (u ostrohranného písku v rozmezí 0,4 – 0,5 mm a u umělého korundu zrnitost F40), vyššího zatížení a tvrdšího abraziva stoupá. Dalo by se tedy říci, že návarový materiál s vyšším obsahem uhlíku, molybdenu a chromu je odolnější v prostředí, kde by byl vzhledem k pracovním podmínkám opotřebován abrazivními částicemi o nižší i vyšší tvrdosti.

K řešení případů abrazivního opotřebení nelze přistupovat pouze z pozice optimální volby materiálu, ale je třeba brát v úvahu konstrukci strojního zařízení a podmínky jeho provozu. Provozní řešení spočívá v dodržování provozního režimu dle parametrů stanovených výrobcem. Konstrukční řešení může eliminovat intenzitu abrazivního opotřebení, umožnit rychlou výměnu opotřebovaných částí nebo upravit tvar součásti tak, aby nedocházelo k intenzivnějšímu abrazivnímu opotřebení. Volba materiálu pro součásti pracující v podmínkách abrazivního opotřebení nevyžaduje

jenom podrobnou analýzu působících faktorů i jejich interakcí, ale při výběru materiálu se musí zvážit i hlediska výrobně-technická a provozně-ekonomická.

Vzhledem k tomu, že při laboratorním experimentu na materiály řada provozních podmínek nepůsobila, jako především teplota, chemické působení okolního prostředí apod., je potřeba uskutečnit další experimenty a analýzy pro optimální použití návarových materiálů v technické praxi.

Cílem práce nebylo zjistit ekonomickou efektivnost návarových materiálů v závislosti na průběh opotřebení. Důležité je pro konkrétní aplikaci v praxi vyhodnotit ekonomickou stránku použití návarového materiálu. Zdali je výhodné použít návarový materiál nebo pořídit součást novou, závisí na nákladech renovace. Je-li součást z důvodu opotřebení znehodnocena, určí se celkové náklady obnovy součásti navařováním a tyto náklady se porovnají s náklady na pořízení nové součásti.

6 Seznam literatury

- [1] Suchánek, J., Kuklík, V., Zdravecká, E., Abrazivní opotřebení materiálů, Praha, 2007, 162 str., ISBN 978-80-01-03659-4
- [2] Pošta, J., Technologie údržby a oprav strojů TF, ČZU, Praha, 1995, 196 str., ISBN 80-213-0248-8
- [3] Rabinowicz, E., Friction and wear of materials, J. Wiley and Sons, New York, 1995, 315 str., ISBN 0-471-83084-4
- [4] Vocel, M., Dufek, V., Tření a opotřebení strojních součástí, SNTL, Praha, 1976, 374 str.
- [5] Havlíček, J. aj., Provozní spolehlivost strojů 2, přepracované vydání, SZN, Praha, 1989, 616 str.
- [6] BAM expertise [online]. Dostupné z: <http://www.bam.de/en/kompetenzen/fachabteilungen/abteilung_5/fg56/fg56_ag1d.htm> 2. 12. 2010
- [7] Neale consulting engineers [online]. Dostupné z: <<http://www.tribology.co.uk/services/investigate/g08-0.htm>> 5. 1. 2011
- [8] MM průmyslové spektrum [online]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/navary-a-jejich-vyuziti-v-praxi>> 10. 2. 2011
- [9] ESAB, Katalog přídavných materiálů pro svařování, 2. Přepracované vydání, ESAB Vamberk s.r.o., 2002
- [10] Wikipedia [online]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Korund>> 18. 3. 2011
- [11] Korund Benátky s.r.o. [online]. Dostupné z: <http://www.korund.cz/indexc.php?id=hned_e_korundy&menu=hned_e_korundy> 17. 3. 2011
- [12] Abranova s.r.o. [online]. Dostupné z: <<http://www.abranova.cz/brusne-materialy.htm>> 19. 3. 2011
- [13] Best-holding [online]. Dostupné z: <<http://www.bestb.cz/velikost.php>> 15. 3. 2011

- [14] Průmyslová síta [online]. Dostupné z: <<http://www.eurositex.cz/cz/laboratorni-program/laboratorni-stroje.php> > 17. 3. 2011
- [15] Průmyslová síta [online]. Dostupné z: <<http://www.eurositex.cz/cz/laboratorni-program/laboratorni-sita.php>> 17. 3. 2011
- [16] Ultrasonic [online]. Dostupné z: <<http://www.ultrasonic.cz/vyuziti.htm> > 19. 3. 2011
- [17] Gwiddion [online]. Dostupné z: <<http://gwyddion.net/> > 19. 3. 2011
- [18] Miller, I., DOE Návrh a analýza experimentu s pomocí MINITAB, Praha 2010, ISBN 978-80-902770-5-2
- [19] Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií [online]. Dostupné z: <http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_05_1101.pdf > 28. 3. 2011

7 Seznam obrázků

Obr. 1 – Základní princip Scratch Testeru	str. 6
Obr. 2 – Schema přístroje s brusným plátnem a brusným pásem	str. 6
Obr. 3 – Schema přístroje s brusným kotoučem	str. 7
Obr. 4 – Schema přístroje s brusnou nádobou	str. 7
Obr. 5 – Schema zařízení s pryžovým kotoučem a zařízení s bubnem	str. 8
Obr. 6 – Schema zařízení s mezivrstvou abrazivních částic	str. 8
Obr. 7 – Působení pevně vázaných abrazivních částic na opotřebovaný materiál	str. 9
Obr. 8 – Postupné zatěžování a fragmentace abrazivních částic mezi funkčními povrchy	str. 10
Obr. 9 – Schematické znázornění tvorby otěru křehkého materiálu šířením bočních trhlin z dolních partií plasticky deformované oblasti pod rýhou	str. 14
Obr. 10 – Zjednodušený model interakce abrazivní částice s opotřebovávaným povrchem	str. 14
Obr. 11 – Opotřebení čepu částicemi abraziva zakotvenými v ložiskové pánvi	str. 17
Obr. 12 – Schemata třecích uzlů přístrojů s bodovým dotykem	str. 21
Obr. 13 – Schemata třecích uzlů přístrojů s čárovým dotykem	str. 22
Obr. 14 – Schemata třecích uzlů přístrojů s plošným dotykem	str. 23
Obr. 15 – Adhezivní opotřebení a charakter poškození funkčního povrchu	str. 24
Obr. 16 – Schema tryskacího přístroje	str. 25
Obr. 17 – Schema přístrojů na principu volného pádu a na principu odstředivé síly	str. 26
Obr. 18 – Erozivní opotřebení a charakter poškození funkčního povrchu	str. 27
Obr. 19 – Schema dýzového přístroje	str. 28
Obr. 20 – Rotační diskový přístroj	str. 28
Obr. 21 – Rotační nárazový přístroj	str. 28
Obr. 22 – Magnetostrikční přístroj	str. 29
Obr. 23 – Kavitační opotřebení	str. 30
Obr. 24 – Přístroj se 2 odvalujícími kotoučky	str. 31
Obr. 25 – Únavové opotřebení	str. 31

Obr. 26 – Vznik pitingů na bocích zubů ozubených kol	str. 32
Obr. 27 – Schemata třecích uzlů (bodový dotyk)	str. 33
Obr. 28 – Schemata třecích uzlů (čárový a plošný dotyk)	str. 33
Obr. 29 – Vibrační opotřebení	str. 34
Obr. 30 – Umělý korund	str. 39
Obr. 31 – Množství jednotlivých frakcí písku	str. 41
Obr. 32 – Označené a roztříděné frakce	str. 41
Obr. 33 – Stroj pro analytické třídění HAVER EML digital plus	str. 43
Obr. 34 – Označení návarových materiálů	str. 44
Obr. 35 – Schema zařízení s brusným žlabem	str. 46
Obr. 36 – Zařízení s brusným žlabem	str. 47
Obr. 37 – Sražené hranky na návarových materiálech	str. 48
Obr. 38 – Ultrazvuková čistička	str. 49
Obr. 39 – Laboratorní váhy	str. 49
Obr. 40 – Umístění návarového materiálu	str. 50
Obr. 41 – Digitální laboratorní váhy	str. 51
Obr. 42 – Laboratorní mikroskop	str. 52
Obr. 43 – Načtení snímku se vstupními parametry	str. 53
Obr. 44 – Snímek v programu Gwiddion	str. 53
Obr. 45 – Histogram	str. 54
Obr. 46 – Výpočet efektů a interakcí	str. 58
Obr. 47 – Tabulka po úpravě interakcí	str. 59
Obr. 48 – Paretův graf	str. 59
Obr. 49 – Graf hmotnostního úbytku v závislosti na materiálu, abraziva a zatížení	str. 60
Obr. 50 – Graf hmotnostního úbytku v závislosti na zatížení, velikosti zrna a abraziva	str. 61

8 Seznam tabulek

Tab. 1 – Parametry při abrazivním opotřebení	str. 10
Tab. 2 – Tvrdost minerálních látek a fází v kovových materiálech	str. 19
Tab. 3 – Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty	str. 38
Tab. 4 – Chemické složení – čistý svarový kov (%)	str. 38
Tab. 5 – Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty	str. 38
Tab. 6 – Chemické složení – čistý svarový kov (%)	str. 38
Tab. 7 – Náhled velikostí brousících zrn dle FEPA	str. 40
Tab. 8 – Frakce ostrohranného písku	str. 40
Tab. 9 – Označení návarových materiálů a použité abrazivní částice	str. 44
Tab. 10 – Návrh čtyř faktorového experimentu	str. 45
Tab. 11 – Hodnocení zrna	str. 55
Tab. 12 – Standardní návrh čtyř faktorového experimentu o dvou úrovních	str. 56

9 Přílohy

Příloha 1 Naměřené hodnoty při měření

	Označení návaru	Měření	Zrno	Zatížení	m1	m2	m3	Ubm1	Ubm2	Ubm3	Půměr Ubm	kumulativní	Dráha (m)
	E2 V1 6..	0			84,30339	84,30345	84,30363						
POKUS 1	E2 V1 6..	1	0,5 - 0,4	Nižší	84,29617	84,29611	84,29593	0,00722	0,00734	0,0077	0,00742	0,00742	600
POKUS 1	E2 V1 6..	2	0,5 - 0,4	Nižší	84,2923	84,29267	84,29268	0,00387	0,00344	0,00325	0,00352	0,01094	1200
POKUS 1	E2 V1 6..	3	0,5 - 0,4	Nižší	84,2898	84,28967	84,2895	0,0025	0,003	0,00318	0,00289	0,01383	1800
POKUS 1	E2 V1 6..	4	0,5 - 0,4	Nižší	84,28529	84,28459	84,28442	0,00451	0,00508	0,00508	0,00489	0,01872	2400
POKUS 1	E2 V1 6..	5	0,5 - 0,4	Nižší	84,27821	84,2783	84,27867	0,00708	0,00629	0,00575	0,00637	0,02510	3000
POKUS 1	E2 V1 6..	6	0,5 - 0,4	Nižší	84,27294	84,27276	84,27288	0,00527	0,00554	0,00579	0,00553	0,03063	3600
POKUS 1	E2 V1 6..	7	0,5 - 0,4	Nižší	84,26861	84,26859	84,26851	0,00433	0,00417	0,00437	0,00429	0,03492	4200
POKUS 3	E2 V1 6..	1	0,5 - 0,4	Vyšší	84,24622	84,24658	84,24644	0,02239	0,02201	0,02207	0,02216	0,02216	600
POKUS 3	E2 V1 6..	2	0,5 - 0,4	Vyšší	84,21883	84,21872	84,21905	0,02739	0,02786	0,02739	0,02755	0,04970	1200
POKUS 3	E2 V1 6..	3	0,5 - 0,4	Vyšší	84,17288	84,17208	84,17219	0,04595	0,04664	0,04686	0,04648	0,09619	1800
POKUS 3	E2 V1 6..	4	0,5 - 0,4	Vyšší	84,13265	84,13226	84,13233	0,04023	0,03982	0,03986	0,03997	0,13616	2400
POKUS 3	E2 V1 6..	5	0,5 - 0,4	Vyšší	84,08668	84,08653	84,08624	0,04597	0,04573	0,04609	0,04593	0,18209	3000
POKUS 3	E2 V1 6..	6	0,5 - 0,4	Vyšší	84,04971	84,04921	84,04905	0,03697	0,03732	0,03719	0,03716	0,21925	3600
POKUS 3	E2 V1 6..	7	0,5 - 0,4	Vyšší	84,00875	84,00866	84,00878	0,04096	0,04055	0,04027	0,04059	0,25984	4200
POKUS 2	E4 V1 2.	0			81,24881	81,24869	81,24863						
POKUS 2	E4 V1 2.	1	0,5 - 0,4	Nižší	81,24679	81,24696	81,24689	0,00202	0,00173	0,00174	0,00183	0,00183	600
POKUS 2	E4 V1 2.	2	0,5 - 0,4	Nižší	81,24524	81,24539	81,24523	0,00155	0,00157	0,00166	0,00159	0,00342	1200
POKUS 2	E4 V1 2.	3	0,5 - 0,4	Nižší	81,24267	81,24279	81,24318	0,00257	0,0026	0,00205	0,00241	0,00583	1800
POKUS 2	E4 V1 2.	4	0,5 - 0,4	Nižší	81,24165	81,24149	81,24139	0,00102	0,0013	0,00179	0,00137	0,00720	2400
POKUS 2	E4 V1 2.	5	0,5 - 0,4	Nižší	81,24034	81,24024	81,24022	0,00131	0,00125	0,00117	0,00124	0,00844	3000
POKUS 2	E4 V1 2.	6	0,5 - 0,4	Nižší	81,23722	81,23735	81,23724	0,00312	0,00289	0,00298	0,00300	0,01144	3600
POKUS 2	E4 V1 2.	7	0,5 - 0,4	Nižší	81,23642	81,23617	81,23614	0,0008	0,00118	0,0011	0,00103	0,01247	4200
POKUS 4	E4 V1 2.	1	0,5 - 0,4	Vyšší	81,22177	81,22196	81,22179	0,01465	0,01421	0,01435	0,01440	0,01440	600
POKUS 4	E4 V1 2.	2	0,5 - 0,4	Vyšší	81,2076	81,20777	81,20771	0,01417	0,01419	0,01408	0,01415	0,02855	1200
POKUS 4	E4 V1 2.	3	0,5 - 0,4	Vyšší	81,19266	81,19291	81,19281	0,01494	0,01486	0,0149	0,01490	0,04345	1800
POKUS 4	E4 V1 2.	4	0,5 - 0,4	Vyšší	81,18036	81,18077	81,18097	0,0123	0,01214	0,01184	0,01209	0,05554	2400
POKUS 4	E4 V1 2.	5	0,5 - 0,4	Vyšší	81,16958	81,16952	81,16979	0,01078	0,01125	0,01118	0,01107	0,06661	3000
POKUS 4	E4 V1 2.	6	0,5 - 0,4	Vyšší	81,16058	81,16042	81,16076	0,009	0,0091	0,00903	0,00904	0,07566	3600
POKUS 4	E4 V1 2.	7	0,5 - 0,4	Vyšší	81,15207	81,15233	81,15231	0,00851	0,00809	0,00845	0,00835	0,08401	4200

POKUS 9	E2 V1 6..	1	1 - 0,63	Nižší	84,00481	84,00488	84,00473	0,00394	0,00378	0,00405	0,00392	0,00392	600
POKUS 9	E2 V1 6..	2	1 - 0,63	Nižší	83,99596	83,99594	83,99597	0,00885	0,00894	0,00876	0,00885	0,01277	1200
POKUS 9	E2 V1 6..	3	1 - 0,63	Nižší	83,98871	83,98869	83,98869	0,00725	0,00725	0,00728	0,00726	0,02003	1800
POKUS 9	E2 V1 6..	4	1 - 0,63	Nižší	83,98043	83,98023	83,98018	0,00828	0,00846	0,00851	0,00842	0,02845	2400
POKUS 9	E2 V1 6..	5	1 - 0,63	Nižší	83,97271	83,97253	83,97268	0,00772	0,0077	0,0075	0,00764	0,03609	3000
POKUS 9	E2 V1 6..	6	1 - 0,63	Nižší	83,96477	83,96489	83,96459	0,00794	0,00764	0,00809	0,00789	0,04398	3600
POKUS 9	E2 V1 6..	7	1 - 0,63	Nižší	83,95615	83,95632	83,95612	0,00862	0,00857	0,00847	0,00855	0,05253	4200
POKUS 11	E2 V1 6..	1	1 - 0,63	Vyšší	83,92463	83,92444	83,92422	0,03152	0,03188	0,0319	0,03177	0,03177	600
POKUS 11	E2 V1 6..	2	1 - 0,63	Vyšší	83,87629	83,87646	83,87642	0,04834	0,04798	0,0478	0,04804	0,07981	1200
POKUS 11	E2 V1 6..	3	1 - 0,63	Vyšší	83,83391	83,83377	83,83341	0,04238	0,04269	0,04301	0,04269	0,12250	1800
POKUS 11	E2 V1 6..	4	1 - 0,63	Vyšší	83,78652	83,78684	83,78622	0,04739	0,04693	0,04719	0,04717	0,16967	2400
POKUS 11	E2 V1 6..	5	1 - 0,63	Vyšší	83,74737	83,74786	83,74783	0,03915	0,03898	0,03839	0,03884	0,20851	3000
POKUS 11	E2 V1 6..	6	1 - 0,63	Vyšší	83,70333	83,70315	83,70318	0,04404	0,04471	0,04465	0,04447	0,25298	3600
POKUS 11	E2 V1 6..	7	1 - 0,63	Vyšší	83,65808	83,65849	83,65858	0,04525	0,04466	0,0446	0,04484	0,29781	4200
POKUS 10	E4 V1 2.	1	1 - 0,63	Nižší	81,15033	81,15026	81,15032	0,00174	0,00207	0,00199	0,00193	0,00193	600
POKUS 10	E4 V1 2.	2	1 - 0,63	Nižší	81,14959	81,14911	81,14903	0,00074	0,00115	0,00129	0,00106	0,00299	1200
POKUS 10	E4 V1 2.	3	1 - 0,63	Nižší	81,14706	81,14742	81,14747	0,00253	0,00169	0,00156	0,00193	0,00492	1800
POKUS 10	E4 V1 2.	4	1 - 0,63	Nižší	81,14531	81,14546	81,14559	0,00175	0,00196	0,00188	0,00186	0,00678	2400
POKUS 10	E4 V1 2.	5	1 - 0,63	Nižší	81,14442	81,14422	81,1443	0,00089	0,00124	0,00129	0,00114	0,00792	3000
POKUS 10	E4 V1 2.	6	1 - 0,63	Nižší	81,1426	81,14239	81,14216	0,00182	0,00183	0,00214	0,00193	0,00985	3600
POKUS 10	E4 V1 2.	7	1 - 0,63	Nižší	81,13869	81,13883	81,13896	0,00391	0,00356	0,0032	0,00356	0,01341	4200
POKUS 12	E4 V1 2.	1	1 - 0,63	Vyšší	81,12607	81,12637	81,12608	0,01262	0,01246	0,01288	0,01265	0,01265	600
POKUS 12	E4 V1 2.	2	1 - 0,63	Vyšší	81,11149	81,11121	81,11114	0,01458	0,01516	0,01494	0,01489	0,02755	1200
POKUS 12	E4 V1 2.	3	1 - 0,63	Vyšší	81,09209	81,09212	81,09205	0,0194	0,01909	0,01909	0,01919	0,04674	1800
POKUS 12	E4 V1 2.	4	1 - 0,63	Vyšší	81,07923	81,07928	81,0791	0,01286	0,01284	0,01295	0,01288	0,05962	2400
POKUS 12	E4 V1 2.	5	1 - 0,63	Vyšší	81,06635	81,06633	81,06644	0,01288	0,01295	0,01266	0,01283	0,07245	3000
POKUS 12	E4 V1 2.	6	1 - 0,63	Vyšší	81,05553	81,05551	81,05584	0,01082	0,01082	0,0106	0,01075	0,08320	3600
POKUS 12	E4 V1 2.	7	1 - 0,63	Vyšší	81,04524	81,04559	81,04587	0,01029	0,00992	0,00997	0,01006	0,09326	4200

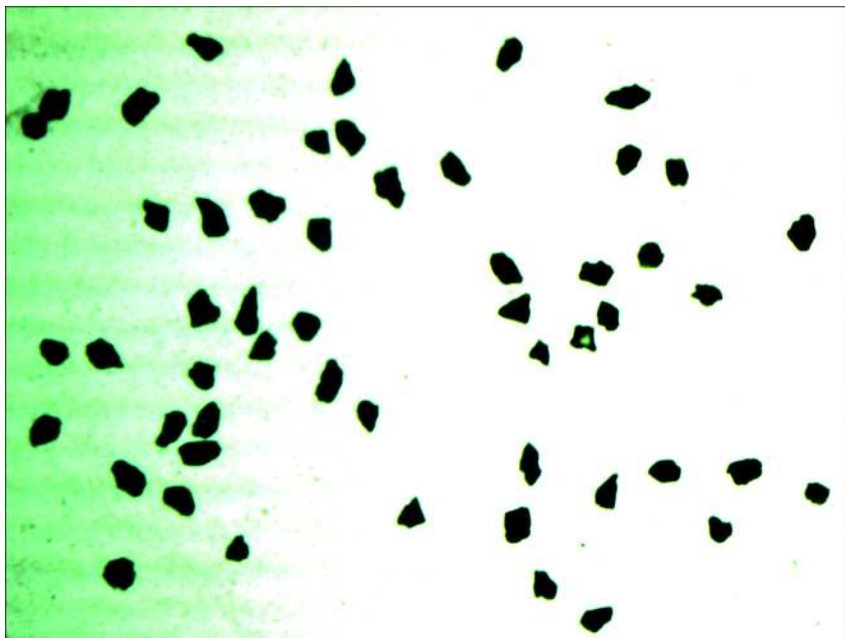
Příloha 2 Naměřené hodnoty při měření

	Označení návaru	Měření	Zrno	Zatížení	m1	m2	m3	Ubm1	Ubm2	Ubm3	Průměr Ubm		kumulativní	Dráha (m)
POKUS 5	E2 V1 7.	0			89,81413	89,8142	89,81433							
POKUS 5	E2 V1 7.	1	F40	Nižší	89,79735	89,7971	89,79738	0,01678	0,0171	0,01695	0,01694		0,01695	600
POKUS 5	E2 V1 7.	2	F40	Nižší	89,78156	89,78172	89,78145	0,01579	0,01538	0,01593	0,01570		0,03265	1200
POKUS 5	E2 V1 7.	3	F40	Nižší	89,76778	89,76723	89,76749	0,01378	0,01449	0,01396	0,01408		0,04672	1800
POKUS 5	E2 V1 7.	4	F40	Nižší	89,75262	89,75274	89,75286	0,01516	0,01449	0,01463	0,01476		0,06148	2400
POKUS 5	E2 V1 7.	5	F40	Nižší	89,73594	89,73565	89,73591	0,01668	0,01709	0,01695	0,01691		0,07839	3000
POKUS 5	E2 V1 7.	6	F40	Nižší	89,71777	89,71757	89,7174	0,01817	0,01808	0,01851	0,01825		0,09664	3600
POKUS 5	E2 V1 7.	7	F40	Nižší	89,69205	89,6921	89,69259	0,02572	0,02547	0,02481	0,02533		0,12198	4200
POKUS 7	E2 V1 7.	1	F40	Vyšší	89,57915	89,57985	89,57971	0,1129	0,11225	0,11288	0,11268		0,11268	600
POKUS 7	E2 V1 7.	2	F40	Vyšší	89,45832	89,45894	89,45847	0,12083	0,12091	0,12124	0,12099		0,23367	1200
POKUS 7	E2 V1 7.	3	F40	Vyšší	89,3221	89,322	89,3225	0,13622	0,13694	0,13597	0,13638		0,37005	1800
POKUS 7	E2 V1 7.	4	F40	Vyšší	89,1819	89,1816	89,1818	0,1402	0,1404	0,1407	0,14043	89,18177	0,51048	2400
POKUS 7	E2 V1 7.	5	F40	Vyšší		89,036			0,145767		0,14577		0,65625	3000
POKUS 7	E2 V1 7.	6	F40	Vyšší		88,8832			0,1528		0,1528		0,80905	3600
POKUS 7	E2 V1 7.	7	F40	Vyšší		88,7261			0,1571		0,1571		0,96615	4200
POKUS 6	E4 V1 3.	0	F40	Nižší		82,4912								
POKUS 6	E4 V1 3.	1	F40	Nižší		82,4689			0,0223		0,0223		0,02230	600
POKUS 6	E4 V1 3.	2	F40	Nižší		82,4463			0,0226		0,0226		0,04490	1200
POKUS 6	E4 V1 3.	3	F40	Nižší		82,4262			0,0201		0,0201		0,06500	1800
POKUS 6	E4 V1 3.	4	F40	Nižší		82,4057			0,0205		0,0205		0,08550	2400
POKUS 6	E4 V1 3.	5	F40	Nižší		82,387			0,0187		0,0187		0,10420	3000
POKUS 6	E4 V1 3.	6	F40	Nižší		82,3693			0,0177		0,0177		0,12190	3600
POKUS 6	E4 V1 3.	7	F40	Nižší		82,3518			0,0175		0,0175		0,13940	4200
POKUS 8	E4 V1 3.	1	F40	Vyšší		82,189			0,1628		0,1628		0,16280	600
POKUS 8	E4 V1 3.	2	F40	Vyšší		82,0448			0,1442		0,1442		0,30700	1200
POKUS 8	E4 V1 3.	3	F40	Vyšší		81,9119			0,1329		0,1329		0,43990	1800
POKUS 8	E4 V1 3.	4	F40	Vyšší		81,7858			0,1261		0,1261		0,56600	2400
POKUS 8	E4 V1 3.	5	F40	Vyšší		81,6666			0,1192		0,1192		0,68520	3000
POKUS 8	E4 V1 3.	6	F40	Vyšší		81,5525			0,1141		0,1141		0,79930	3600
POKUS 8	E4 V1 3.	7	F40	Vyšší		81,4483			0,1042		0,1042		0,90350	4200

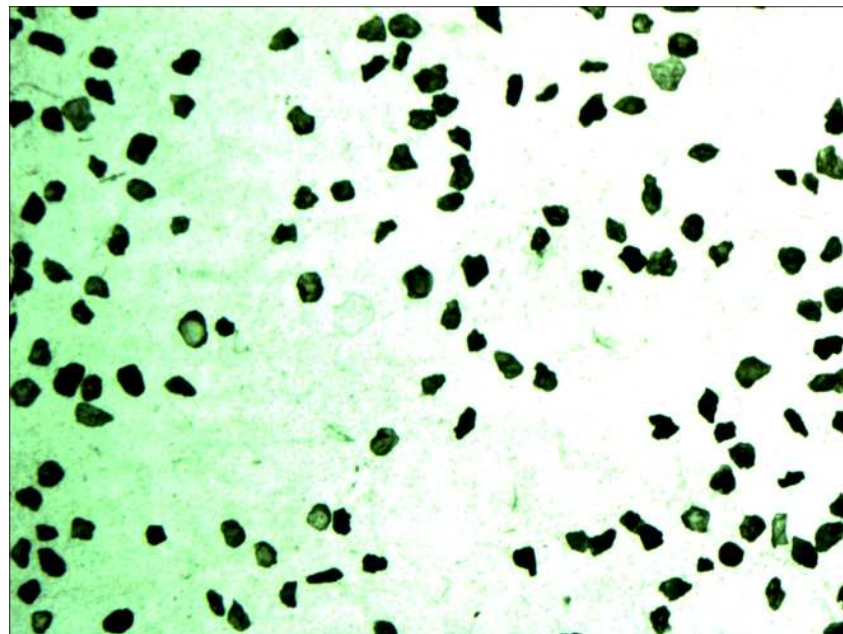
POKUS 13	E2 V1 7.	1	F22	Nižší	88,7126	0,0135	0,0135	0,01350	600
POKUS 13	E2 V1 7.	2	F22	Nižší	88,6989	0,0137	0,0137	0,02720	1200
POKUS 13	E2 V1 7.	3	F22	Nižší	88,6847	0,0142	0,0142	0,04140	1800
POKUS 13	E2 V1 7.	4	F22	Nižší	88,6701	0,0146	0,0146	0,05600	2400
POKUS 13	E2 V1 7.	5	F22	Nižší	88,656	0,0141	0,0141	0,07010	3000
POKUS 13	E2 V1 7.	6	F22	Nižší	88,6419	0,0141	0,0141	0,08420	3600
POKUS 13	E2 V1 7.	7	F22	Nižší	88,6279	0,014	0,014	0,09820	4200
POKUS 15	E2 V1 7.	1	F22	Vyšší	88,5042	0,1237	0,1237	0,12370	600
POKUS 15	E2 V1 7.	2	F22	Vyšší	88,389	0,1152	0,1152	0,23890	1200
POKUS 15	E2 V1 7.	3	F22	Vyšší	88,2845	0,1045	0,1045	0,34340	1800
POKUS 15	E2 V1 7.	4	F22	Vyšší	88,1832	0,1013	0,1013	0,44470	2400
POKUS 15	E2 V1 7.	5	F22	Vyšší	88,0861	0,0971	0,0971	0,54180	3000
POKUS 15	E2 V1 7.	6	F22	Vyšší	87,9929	0,0932	0,0932	0,63500	3600
POKUS 15	E2 V1 7.	7	F22	Vyšší	87,8986	0,0943	0,0943	0,72930	4200
POKUS 14	E4 V1 3.	1	F22	Nižší	81,4276	0,0207	0,0207	0,02070	600
POKUS 14	E4 V1 3.	2	F22	Nižší	81,4105	0,0171	0,0171	0,03780	1200
POKUS 14	E4 V1 3.	3	F22	Nižší	81,3955	0,015	0,015	0,05280	1800
POKUS 14	E4 V1 3.	4	F22	Nižší	81,3813	0,0142	0,0142	0,06700	2400
POKUS 14	E4 V1 3.	5	F22	Nižší	81,3677	0,0136	0,0136	0,08060	3000
POKUS 14	E4 V1 3.	6	F22	Nižší	81,3552	0,0125	0,0125	0,09310	3600
POKUS 14	E4 V1 3.	7	F22	Nižší	81,3434	0,0118	0,0118	0,10490	4200
POKUS 16	E4 V1 3.	1	F22	Vyšší	81,2329	0,1105	0,1105	0,11050	600
POKUS 16	E4 V1 3.	2	F22	Vyšší	81,1382	0,0947	0,0947	0,20520	1200
POKUS 16	E4 V1 3.	3	F22	Vyšší	81,055	0,0832	0,0832	0,28840	1800
POKUS 16	E4 V1 3.	4	F22	Vyšší	80,9769	0,0781	0,0781	0,36650	2400
POKUS 16	E4 V1 3.	5	F22	Vyšší	80,9066	0,0703	0,0703	0,43680	3000
POKUS 16	E4 V1 3.	6	F22	Vyšší	80,8402	0,0664	0,0664	0,50320	3600
POKUS 16	E4 V1 3.	7	F22	Vyšší	80,7781	0,0621	0,0621	0,56530	4200

Příloha 3 Vyfocená abrazivní zrna SiO_2

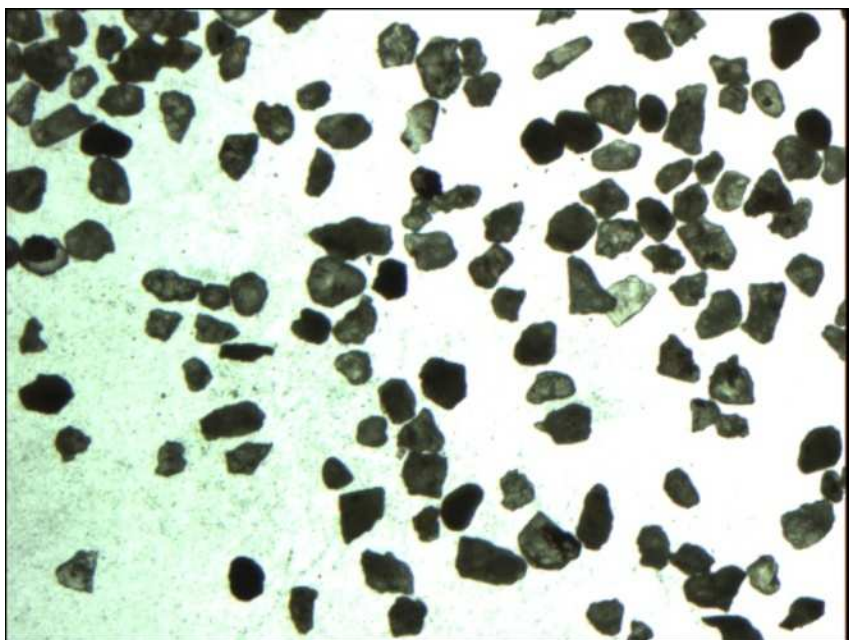
OH_04_05 před měřením



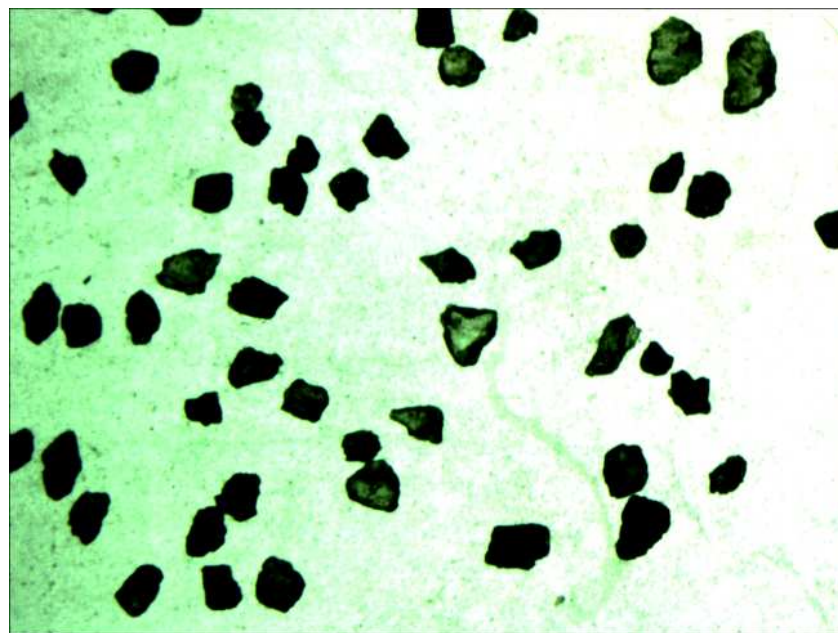
OH_04_05 po měření_pokus1



OH_063_1 před měřením

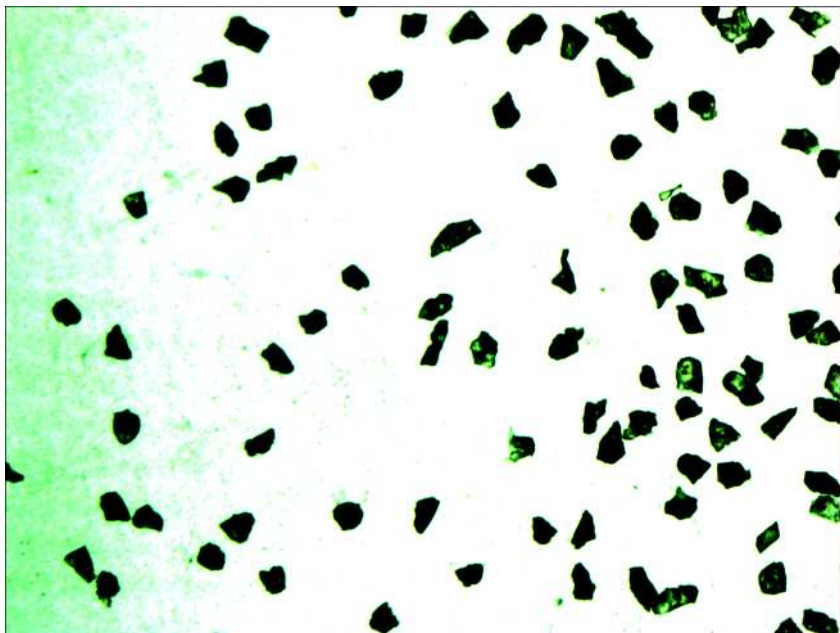


OH_063_1 po měření_pokus11

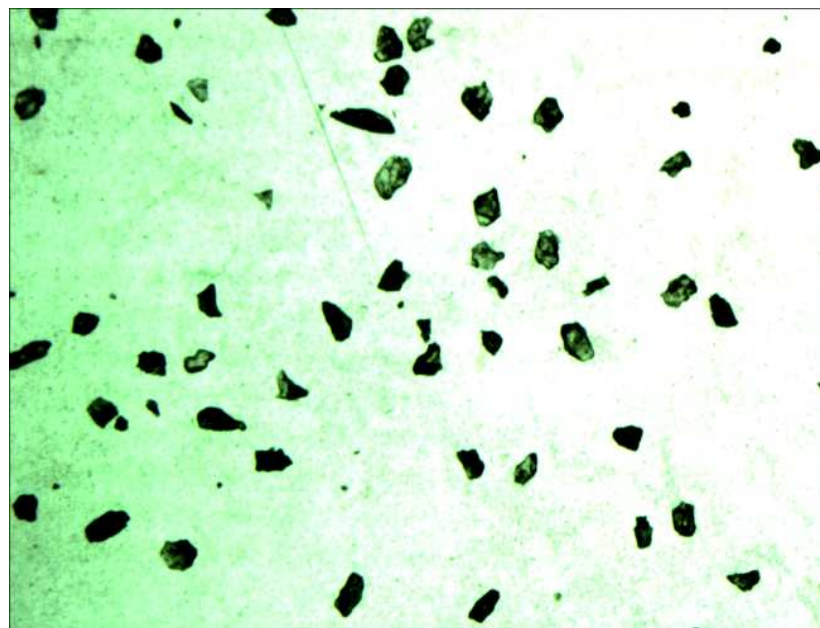


Příloha 4 Vyfocená abrazivní zrna Al_2O_3

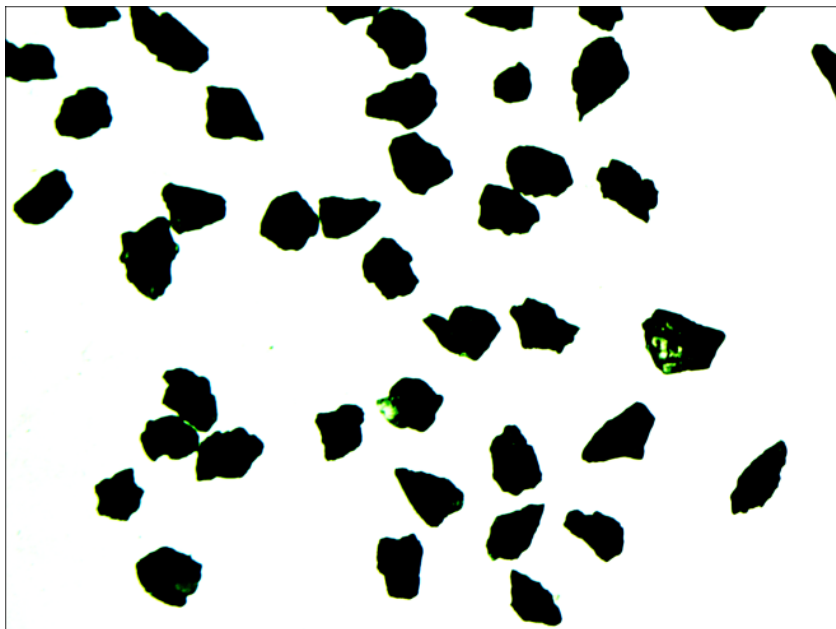
F40_před měřením



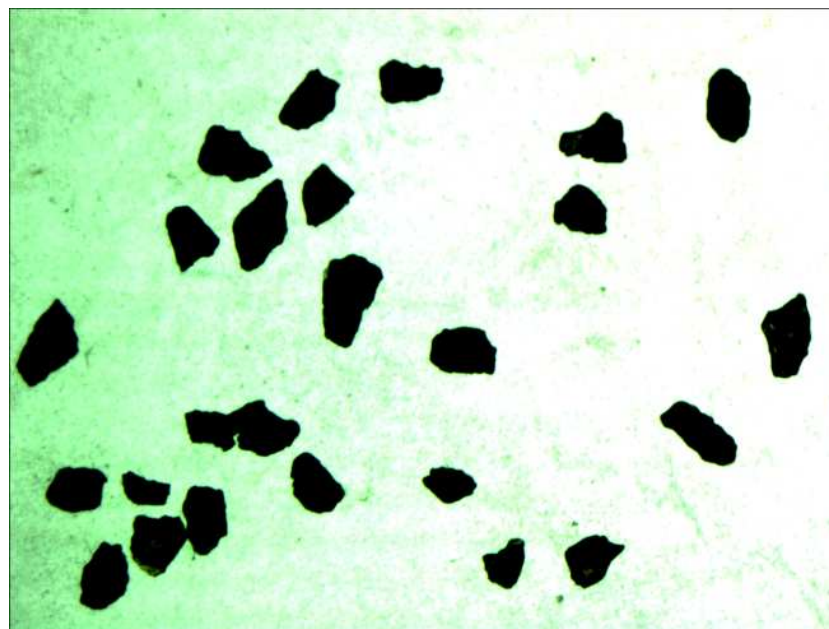
F40_po měření_pokus5



F22_před měřením



F22_po měření_pokus16



Příloha 5 Vstupní tabulka

Pokus	materiál	zatížení	abrazivo	velikost zrna	odezva (průměrné) (g)
Pokus 1	1	-1	-1	-1	0,00742
Pokus 1	1	-1	-1	-1	0,01094
Pokus 1	1	-1	-1	-1	0,013833333
Pokus 1	1	-1	-1	-1	0,018723333
Pokus 1	1	-1	-1	-1	0,025096667
Pokus 1	1	-1	-1	-1	0,03063
Pokus 1	1	-1	-1	-1	0,03492
Pokus 2	2	-1	-1	-1	0,00183
Pokus 2	2	-1	-1	-1	0,003423333
Pokus 2	2	-1	-1	-1	0,00583
Pokus 2	2	-1	-1	-1	0,0072
Pokus 2	2	-1	-1	-1	0,008443333
Pokus 2	2	-1	-1	-1	0,01144
Pokus 2	2	-1	-1	-1	0,012466667
Pokus 3	1	1	-1	-1	0,022156667
Pokus 3	1	1	-1	-1	0,049703333
Pokus 3	1	1	-1	-1	0,096186667
Pokus 3	1	1	-1	-1	0,136156667
Pokus 3	1	1	-1	-1	0,182086667
Pokus 3	1	1	-1	-1	0,219246667
Pokus 3	1	1	-1	-1	0,25984
Pokus 4	2	1	-1	-1	0,014403333
Pokus 4	2	1	-1	-1	0,02855
Pokus 4	2	1	-1	-1	0,04345
Pokus 4	2	1	-1	-1	0,055543333
Pokus 4	2	1	-1	-1	0,066613333
Pokus 4	2	1	-1	-1	0,075656667
Pokus 4	2	1	-1	-1	0,084006667

Pokus 5	1	-1	1	-1	0,016946667
Pokus 5	1	-1	1	-1	0,032646667
Pokus 5	1	-1	1	-1	0,046723333
Pokus 5	1	-1	1	-1	0,061483333
Pokus 5	1	-1	1	-1	0,07839
Pokus 5	1	-1	1	-1	0,096643333
Pokus 5	1	-1	1	-1	0,121976667
Pokus 6	2	-1	1	-1	0,0223
Pokus 6	2	-1	1	-1	0,0449
Pokus 6	2	-1	1	-1	0,065
Pokus 6	2	-1	1	-1	0,0855
Pokus 6	2	-1	1	-1	0,1042
Pokus 6	2	-1	1	-1	0,1219
Pokus 6	2	-1	1	-1	0,1394
Pokus 7	1	1	1	-1	0,112676667
Pokus 7	1	1	1	-1	0,23367
Pokus 7	1	1	1	-1	0,370046667
Pokus 7	1	1	1	-1	0,51048
Pokus 7	1	1	1	-1	0,656246667
Pokus 7	1	1	1	-1	0,809046667
Pokus 7	1	1	1	-1	0,966146667
Pokus 8	2	1	1	-1	0,1628
Pokus 8	2	1	1	-1	0,307
Pokus 8	2	1	1	-1	0,4399
Pokus 8	2	1	1	-1	0,566
Pokus 8	2	1	1	-1	0,6852
Pokus 8	2	1	1	-1	0,7993
Pokus 8	2	1	1	-1	0,9035

Pokus 9	1	-1	-1	1	0,003923333
Pokus 9	1	-1	-1	1	0,012773333
Pokus 9	1	-1	-1	1	0,020033333
Pokus 9	1	-1	-1	1	0,02845
Pokus 9	1	-1	-1	1	0,03609
Pokus 9	1	-1	-1	1	0,04398
Pokus 9	1	-1	-1	1	0,052533333
Pokus 10	2	-1	-1	1	0,001933333
Pokus 10	2	-1	-1	1	0,002993333
Pokus 10	2	-1	-1	1	0,00492
Pokus 10	2	-1	-1	1	0,006783333
Pokus 10	2	-1	-1	1	0,007923333
Pokus 10	2	-1	-1	1	0,009853333
Pokus 10	2	-1	-1	1	0,01341
Pokus 11	1	1	-1	1	0,031766667
Pokus 11	1	1	-1	1	0,079806667
Pokus 11	1	1	-1	1	0,1225
Pokus 11	1	1	-1	1	0,16967
Pokus 11	1	1	-1	1	0,20851
Pokus 11	1	1	-1	1	0,252976667
Pokus 11	1	1	-1	1	0,297813333
Pokus 12	2	1	-1	1	0,012653333
Pokus 12	2	1	-1	1	0,027546667
Pokus 12	2	1	-1	1	0,04674
Pokus 12	2	1	-1	1	0,059623333
Pokus 12	2	1	-1	1	0,072453333
Pokus 12	2	1	-1	1	0,0832
Pokus 12	2	1	-1	1	0,09326

Pokus 13	1	-1	1	1	0,0135
Pokus 13	1	-1	1	1	0,0272
Pokus 13	1	-1	1	1	0,0414
Pokus 13	1	-1	1	1	0,056
Pokus 13	1	-1	1	1	0,0701
Pokus 13	1	-1	1	1	0,0842
Pokus 13	1	-1	1	1	0,0982
Pokus 14	2	-1	1	1	0,0207
Pokus 14	2	-1	1	1	0,0378
Pokus 14	2	-1	1	1	0,0528
Pokus 14	2	-1	1	1	0,067
Pokus 14	2	-1	1	1	0,0806
Pokus 14	2	-1	1	1	0,0931
Pokus 14	2	-1	1	1	0,1049
Pokus 15	1	1	1	1	0,1237
Pokus 15	1	1	1	1	0,2389
Pokus 15	1	1	1	1	0,3434
Pokus 15	1	1	1	1	0,4447
Pokus 15	1	1	1	1	0,5418
Pokus 15	1	1	1	1	0,635
Pokus 15	1	1	1	1	0,7293
Pokus 16	2	1	1	1	0,1105
Pokus 16	2	1	1	1	0,2052
Pokus 16	2	1	1	1	0,2884
Pokus 16	2	1	1	1	0,3665
Pokus 16	2	1	1	1	0,4368
Pokus 16	2	1	1	1	0,5032
Pokus 16	2	1	1	1	0,5653

Příloha 6 Dosazená vstupní tabulka

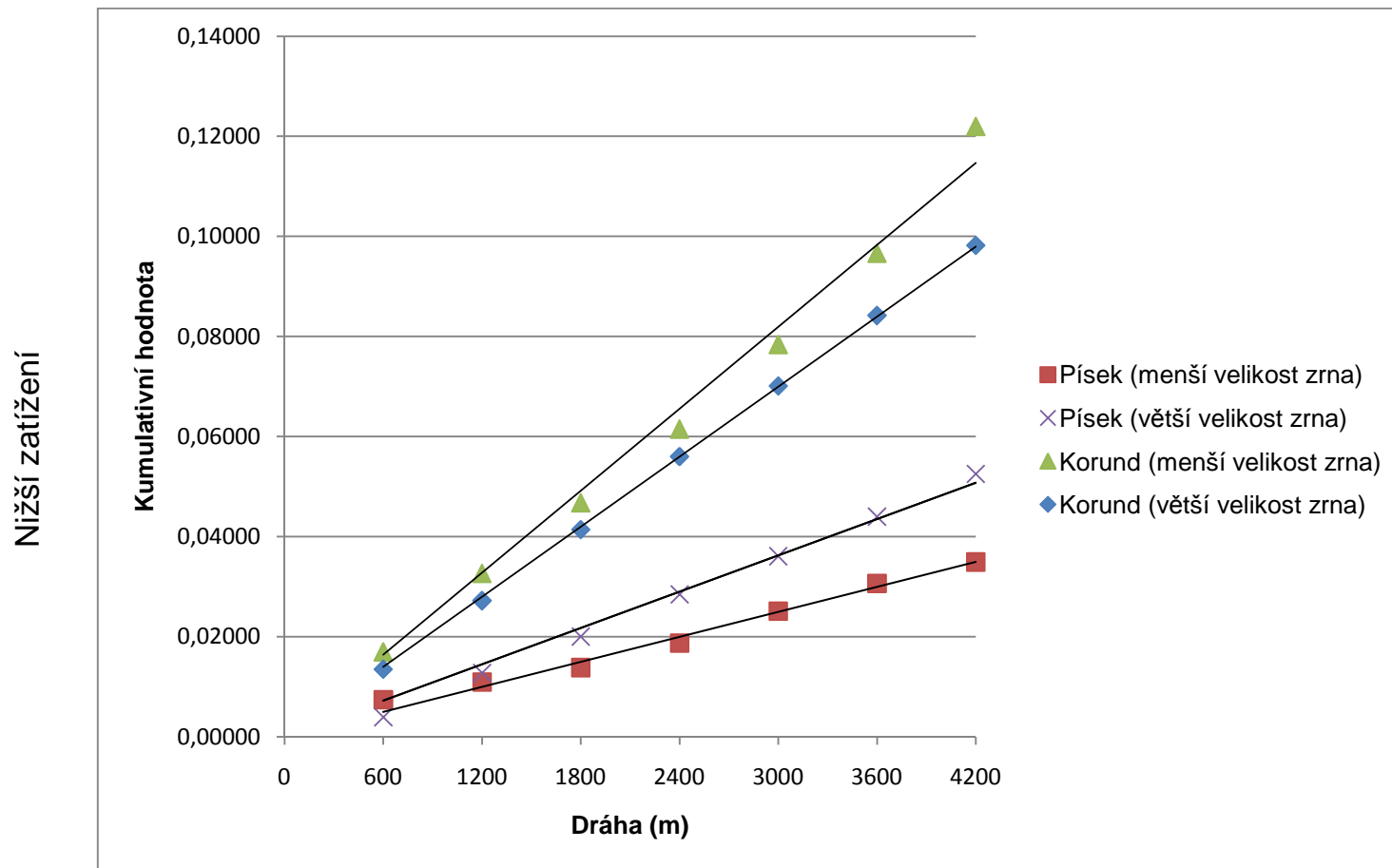
Pokus	materiál	zatížení (N)	abrazivo (HV)	velikost zrna (μm)	So	odezva (průměrné) (g)
Pokus 1	1	5,8	1090	581,5941	143,5089	0,00742
Pokus 1	1	5,8	1090	581,5941	143,5089	0,00352
Pokus 1	1	5,8	1090	581,5941	143,5089	0,002893333
Pokus 1	1	5,8	1090	581,5941	143,5089	0,00489
Pokus 1	1	5,8	1090	581,5941	143,5089	0,006373333
Pokus 1	1	5,8	1090	581,5941	143,5089	0,005533333
Pokus 1	1	5,8	1090	581,5941	143,5089	0,00429
pokus 2	2	5,8	1090	581,4085	143,6944	0,00183
pokus 2	2	5,8	1090	581,4085	143,6944	0,001593333
pokus 2	2	5,8	1090	581,4085	143,6944	0,002406667
pokus 2	2	5,8	1090	581,4085	143,6944	0,00137
pokus 2	2	5,8	1090	581,4085	143,6944	0,001243333
pokus 2	2	5,8	1090	581,4085	143,6944	0,002996667
pokus 2	2	5,8	1090	581,4085	143,6944	0,001026667
pokus 3	1	22	1090	583,6616	143,9408	0,022156667
pokus 3	1	22	1090	583,6616	143,9408	0,027546667
pokus 3	1	22	1090	583,6616	143,9408	0,046483333
pokus 3	1	22	1090	583,6616	143,9408	0,03997
pokus 3	1	22	1090	583,6616	143,9408	0,04593
pokus 3	1	22	1090	583,6616	143,9408	0,03716
pokus 3	1	22	1090	583,6616	143,9408	0,040593333
pokus 4	2	22	1090	600,0947	142,1257	0,014403333
pokus 4	2	22	1090	600,0947	142,1257	0,014146667
pokus 4	2	22	1090	600,0947	142,1257	0,0149
pokus 4	2	22	1090	600,0947	142,1257	0,012093333
pokus 4	2	22	1090	600,0947	142,1257	0,01107
pokus 4	2	22	1090	600,0947	142,1257	0,009043333
pokus 4	2	22	1090	600,0947	142,1257	0,00835

pokus 5	1	5,8	1900	542,1910	162,9803	0,016943333
pokus 5	1	5,8	1900	542,1910	162,9803	0,0157
pokus 5	1	5,8	1900	542,1910	162,9803	0,014076667
pokus 5	1	5,8	1900	542,1910	162,9803	0,01476
pokus 5	1	5,8	1900	542,1910	162,9803	0,016906667
pokus 5	1	5,8	1900	542,1910	162,9803	0,018253333
pokus 5	1	5,8	1900	542,1910	162,9803	0,025333333
pokus 6	2	5,8	1900	535,0434	157,5616	0,0223
pokus 6	2	5,8	1900	535,0434	157,5616	0,0226
pokus 6	2	5,8	1900	535,0434	157,5616	0,0201
pokus 6	2	5,8	1900	535,0434	157,5616	0,0205
pokus 6	2	5,8	1900	535,0434	157,5616	0,0187
pokus 6	2	5,8	1900	535,0434	157,5616	0,0177
pokus 6	2	5,8	1900	535,0434	157,5616	0,0175
pokus 7	1	22	1900	512,1964	143,8634	0,112676667
pokus 7	1	22	1900	512,1964	143,8634	0,120993333
pokus 7	1	22	1900	512,1964	143,8634	0,136376667
pokus 7	1	22	1900	512,1964	143,8634	0,140433333
pokus 7	1	22	1900	512,1964	143,8634	0,145766667
pokus 7	1	22	1900	512,1964	143,8634	0,1528
pokus 7	1	22	1900	512,1964	143,8634	0,1571
pokus 8	2	22	1900	599,5350	95,6372	0,1628
pokus 8	2	22	1900	599,5350	95,6372	0,1442
pokus 8	2	22	1900	599,5350	95,6372	0,1329
pokus 8	2	22	1900	599,5350	95,6372	0,1261
pokus 8	2	22	1900	599,5350	95,6372	0,1192
pokus 8	2	22	1900	599,5350	95,6372	0,1141
pokus 8	2	22	1900	599,5350	95,6372	0,1042

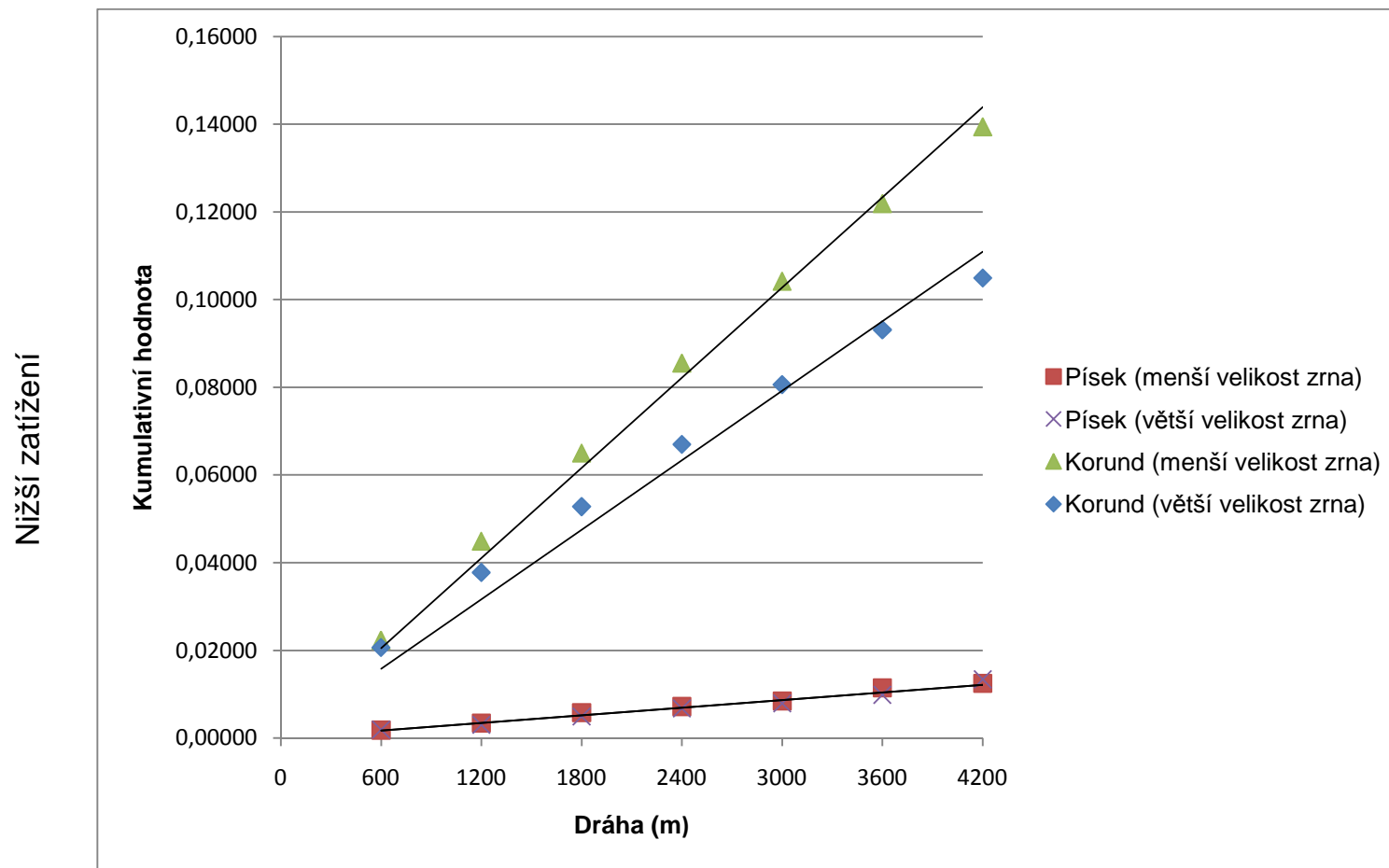
pokus 9	1	5,8	1090	893,4823	142,9649	0,003923333
pokus 9	1	5,8	1090	893,4823	142,9649	0,00885
pokus 9	1	5,8	1090	893,4823	142,9649	0,00726
pokus 9	1	5,8	1090	893,4823	142,9649	0,008416667
pokus 9	1	5,8	1090	893,4823	142,9649	0,00764
pokus 9	1	5,8	1090	893,4823	142,9649	0,00789
pokus 9	1	5,8	1090	893,4823	142,9649	0,008553333
pokus 10	2	5,8	1090	934,9723	140,5136	0,001933333
pokus 10	2	5,8	1090	934,9723	140,5136	0,00106
pokus 10	2	5,8	1090	934,9723	140,5136	0,001926667
pokus 10	2	5,8	1090	934,9723	140,5136	0,001863333
pokus 10	2	5,8	1090	934,9723	140,5136	0,00114
pokus 10	2	5,8	1090	934,9723	140,5136	0,00193
pokus 10	2	5,8	1090	934,9723	140,5136	0,003556667
pokus 11	1	22	1090	909,8235	141,2446	0,031766667
pokus 11	1	22	1090	909,8235	141,2446	0,04804
pokus 11	1	22	1090	909,8235	141,2446	0,042693333
pokus 11	1	22	1090	909,8235	141,2446	0,04717
pokus 11	1	22	1090	909,8235	141,2446	0,03884
pokus 11	1	22	1090	909,8235	141,2446	0,044466667
pokus 11	1	22	1090	909,8235	141,2446	0,044836667
pokus 12	2	22	1090	912,1659	137,4244	0,012653333
pokus 12	2	22	1090	912,1659	137,4244	0,014893333
pokus 12	2	22	1090	912,1659	137,4244	0,019193333
pokus 12	2	22	1090	912,1659	137,4244	0,012883333
pokus 12	2	22	1090	912,1659	137,4244	0,01283
pokus 12	2	22	1090	912,1659	137,4244	0,010746667
pokus 12	2	22	1090	912,1659	137,4244	0,01006

pokus 13	1	5,8	1900	1214,298	210,4515	0,0135
pokus 13	1	5,8	1900	1214,298	210,4515	0,0137
pokus 13	1	5,8	1900	1214,298	210,4515	0,0142
pokus 13	1	5,8	1900	1214,298	210,4515	0,0146
pokus 13	1	5,8	1900	1214,298	210,4515	0,0141
pokus 13	1	5,8	1900	1214,298	210,4515	0,0141
pokus 13	1	5,8	1900	1214,298	210,4515	0,014
pokus 14	2	5,8	1900	1219,398	126,2905	0,0207
pokus 14	2	5,8	1900	1219,398	126,2905	0,0171
pokus 14	2	5,8	1900	1219,398	126,2905	0,015
pokus 14	2	5,8	1900	1219,398	126,2905	0,0142
pokus 14	2	5,8	1900	1219,398	126,2905	0,0136
pokus 14	2	5,8	1900	1219,398	126,2905	0,0125
pokus 14	2	5,8	1900	1219,398	126,2905	0,0118
pokus 15	1	22	1900	1215,770	145,8803	0,1237
pokus 15	1	22	1900	1215,770	145,8803	0,1152
pokus 15	1	22	1900	1215,770	145,8803	0,1045
pokus 15	1	22	1900	1215,770	145,8803	0,1013
pokus 15	1	22	1900	1215,770	145,8803	0,0971
pokus 15	1	22	1900	1215,770	145,8803	0,0932
pokus 15	1	22	1900	1215,770	145,8803	0,0943
pokus 16	2	22	1900	1168,796	124,9115	0,1105
pokus 16	2	22	1900	1168,796	124,9115	0,0947
pokus 16	2	22	1900	1168,796	124,9115	0,0832
pokus 16	2	22	1900	1168,796	124,9115	0,0781
pokus 16	2	22	1900	1168,796	124,9115	0,0703
pokus 16	2	22	1900	1168,796	124,9115	0,0664
pokus 16	2	22	1900	1168,796	124,9115	0,0621

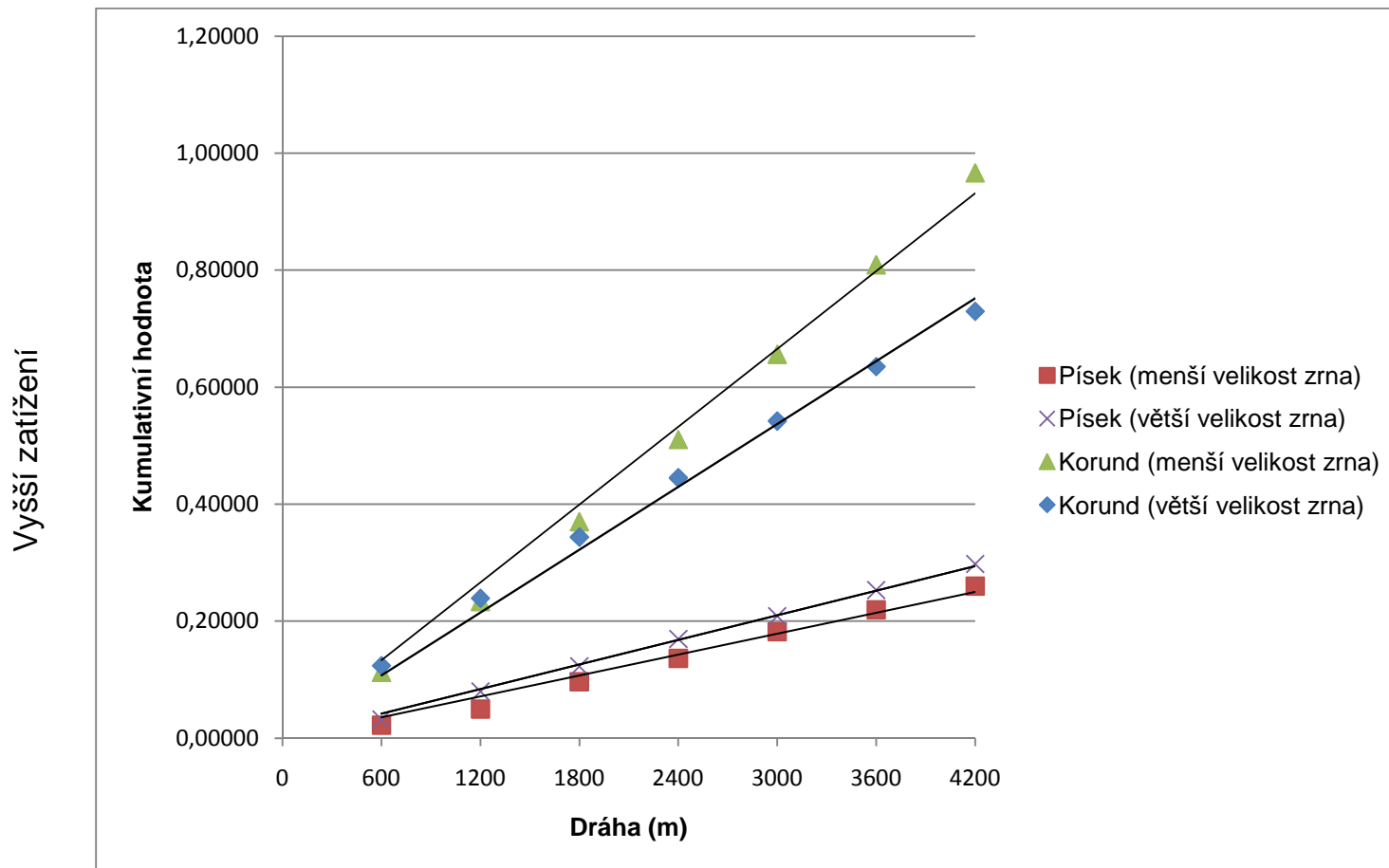
Materiál 1



Materiál 2



Materiál 1



Materiál 2

