

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Vliv tvrdosti abraziva na odolnost proti opotřebení

DIPLOMOVÁ PRÁCE



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

Autor práce: Bc. Martin Bureš

PRAHA 2013

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bureš Martin

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Vliv tvrdosti abraziva na odolnost proti opotřebení

Anglický název

Effect of the abrasive hardness against the wear resistance

Cíle práce

Shromáždit literární podklady o vlivu tvrdosti abraziva na odolnost proti opotřebení. Vyhodnocení odolnosti experimentálních zkoušek opotřebení.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše), cíle práce a metody jejího vypracování, výsledky experimentů a jejich diskuze, závěry a přínos práce.

Osnova práce

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Současný stav problematiky opotřebení
4. Experimentální zkoušky opotřebení
5. Závěr
6. Seznam použité literatury

Rozsah textové části

cca 60 stran

Klíčová slova

Tvrdost, opotřebení, abrazivní částice, odolnost

Doporučené zdroje informací

DASTUR, M., R., MOSKOVITC, L., N.: Talled coating for hardfacing. In: Proceeding of the annual powder. Metallurgy conference, 1983, No 39, s. 307 – 321.
DORAZIL, E.: Strojírenské materiály a povrchové úpravy. Brno, VUT, 1988, 330s.
Friction and Wear Testing. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1987. pp. 186.
KARAKOZOV, E. S.: Sojediněje metalov v tvěrdoj faze. Moskva, Metalurgija, 1976, 264 s.
KUČERÍKOVÁ, V.: Organické povrchové úpravy. Bratislava, STK 1974, 99 s.
Repair and Maintenance Welding Handbook. ESAB AB. 120 s.
STEDFELD, R. L.: Metals Handbook. Vol. 5., Surface cleaning, finishing, and coating. 9. ed. Metals Park, Ohio, American Society for Metals 1982. XVI, 715 s.
TUMANOVA, N. CH.: Galvaničeskije pokrytija iz ionnyh rasplavov. Kijev, 1983, 164 s.
Časopisy: Strojírenská technologie, MM Průmyslové spektrum, TM Svařování – dělení- spojování materiálů, Technik
Firemní literatura: katalogy, prospekty

Vedoucí práce

Hrabě Petr, Ing., Ph.D.

Termín zadání

listopad 2011

Termín odevzdání

duben 2013

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Vedoucí katedry



prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan fakulty

V Praze dne 6.2.2012

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením a za pomoci vedoucího diplomové práce Ing. Petra Hraběte, Ph.D. a použil jen pramenů citovaných v příložené bibliografii.

V Praze dne: 6. 4. 2013

Martin Bureš

Poděkování

Děkuji za věcné připomínky a odbornou pomoc, kterou mi při psaní diplomové práce poskytl
Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Abstrakt: Cílem této diplomové práce bylo shromáždit literární podklady o vlivu tvrdosti abraziva na odolnost proti opotřebení a vyhodnotit výsledky experimentálních zkoušek opotřebení. Teoretická část práce postihuje současný stav problematiky opotřebení a s ním souvisejícího tření. Charakterizuje jednotlivé druhy opotřebení. Podrobněji se věnuje opotřebení abrazivnímu a vlivu tvrdosti abraziva na odolnost proti opotřebení. V praktické části byl zkoušen vliv tvrdosti tří druhů abraziv (Al_2O_3 , ocelová drť, SiO_2) na ocelové zkušební vzorky o dvou relativně nízkých tvrdostech s použitím metody s volnými abrazivními částicemi.

Klíčová slova: tvrdost, opotřebení, abrazivní částice, odolnost

Effect of the abrasive hardness against the wear resistance

Summary: The aim of this thesis was to gather literary information about the influence of the hardness of the abrasive particles on wear resistance and evaluate the results of the experiments wear. The theoretical part of the work affects the present state of wear and the related friction. The work describes the various types of wear and provides an analysis of the abrasive wear and impact abrasive particles hardness of the abrasive wear resistance. The practical effect of hardness was tested three types of abrasive materials (Al_2O_3 , steel grit, SiO_2) on steel specimens of two relatively low hardness using methods with loose abrasive particles.

Key words: hardness, wear, abrasive particle, resistance

Obsah

1 Úvod	1
2 Současný stav problematiky opotřebení.....	2
2.1 Definice tření a jeho druhy	2
2.2 Definice a druhy opotřebení	4
2.2.1 Adhezivní opotřebení	5
2.2.2 Abrázivní opotřebení.....	6
2.2.3 Erozivní opotřebení	8
2.2.4 Kavitační opotřebení	9
2.2.5 Únavové opotřebení.....	10
2.2.6 Vibrační opotřebení.....	11
2.3 Nejdůležitější faktory ovlivňující abrazivní opotřebení	12
2.3.1 Velikost abrazivních částic.....	12
2.3.2 Tvar abrazivních částic.....	13
2.3.3 Pevnost abazivních částic	14
2.3.4 Tvrdost abraziva	15
2.4 Zkoušení vlivu tvrdosti abraziva na odolnost proti opotřebení	22
2.5 Tvrdost materiálu a její zkoušení	24
2.5.1 Zkouška podle Brinella.....	25
2.5.2 Zkouška podle Rockwella	27
2.5.3 Zkouška podle Vickerse	28
2.5.4 Zkouška podle Shoreho	30
3 Experimentální zkoušky opotřebení	30
3.1 Výroba a příprava materiálu pro zkoušky	30
3.2 Výběr a příprava abraziva	35
3.3 Laboratorní zkoušení vlivu tvrdosti abraziva na odolnost proti opotřebení.....	39
3.4 Výsledky měření a vyhodnocení experimentálních zkoušek opotřebení	42
4 Závěr.....	50
5 Literatura:	51

1 Úvod

S rozvojem techniky stoupají nároky na technickou úroveň nových strojů a strojních zařízení, ale i na jejich spolehlivost a efektivnost. V řadě výrobních odvětví je kladen důraz na splnění požadovaných technických a ekonomických parametrů pro trvalý, bezporuchový provoz a maximální šetření materiálem s ohledem na dopady na životní prostředí. Rozbory příčin poruch strojů a zařízení ukazují, že jejich nejčastější příčinou je opotřebení důležitých funkčních částí. Opotřebení strojů a strojních zařízení vede k postupné ztrátě jejich funkčnosti a negativně ovlivňuje kvalitu a ekonomii výrobního procesu. Proto je třeba zaměřit se na možnosti omezení tohoto nežádoucího jevu.

Jedním z velmi intenzivních degradačních procesů je abrazivní opotřebení materiálu, které způsobují tvrdé převážně minerální částice. Změny na funkčním povrchu součástí a strojů způsobené abrazivními částicemi jsou velmi různorodé a mají na ně vliv konstrukční, materiálové i provozní faktory. Abrazivní opotřebení patří mezi důležité činitele omezující dobu použití součástí a strojů využívaných v mnoha technických i jiných oborech.

V řadě případů lze prodloužit životnost strojů a součástí použitím materiálů, které mají vyšší odolnost proti danému typu opotřebení. Důležitým předpokladem pro volbu optimálních materiálů je znalost jejich chování v různých podmínkách provozu a s tím související znalost vlivu jednotlivých faktorů na intenzitu opotřebení. Patří sem například velikost, tvar a pevnost abrazivních částic. Velmi významný je také vliv tvrdosti abraziva, a to zejména ve vztahu k tvrdosti opotřebovávaného kovového materiálu.

2 Současný stav problematiky opotřebení

2.1 Definice tření a jeho druhy

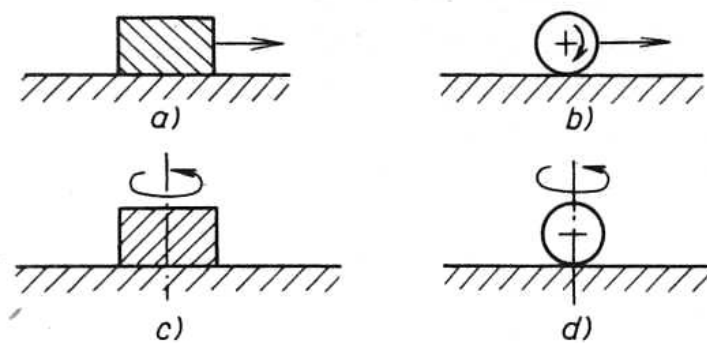
Tření je jev, který přijímáme zcela samozřejmě v běžném životě, a široce se uplatňuje v technické praxi.

Podle nejznámější definice: „ Tření je odpor proti pohybu, vznikající mezi dvěma tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů, v tečném směru k nim“. Tato definice se prakticky nezměnila od doby Leonarda da Vinci (1452- 1519) a platí v plné míře pro vnější tření [1].

Aby bylo definicí postíženo i vnitřní tření, byla nově formulována takto:

„ Tření je ztráta mechanické energie v průběhu, na začátku nebo při ukončení relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálových oblastí “ [2].

Vnější tření je charakterizováno stykem dvou třecích těles. Naproti tomu vnitřní tření, pro které se u tuhých těles používá přesnější výraz útlum a u kapalin se označuje jako viskozita (vazkost), probíhá v materiálových vrstvách patřících témuž tělesu. Rozděluje se tření v klidu, definované jako odpor proti působení vnější síly, které postačuje právě k uvedení tělesa do pohybu. A dále tření za pohybu u těles v relativním pohybu.



Obr. 1 Případy relativního pohybu těles [1]

V závislosti na vzájemném pohybu funkčních povrchů mohou vznikat následující druhy tření:

- a) tření při kluzném pohybu dvou těles, například pohyb pístních kroužků s pístem ve válci motoru
- b) valivé tření při odvalování těles, příkladně u valivých ložisek nebo, pohyb kol železničních vagónů po kolejích
- c) prokluz při kluzném tření, může to být např. lamela kotoučových spojek.
- d) vrtné tření, vzniká například při pohybu rotačního nástroje (hřbet vrtáku, hřbet zubu frézy) při obrábění kovů

Kombinací tření při kluzném pohybu a valivého tření při odvalování těles vzniká valivé tření s větším nebo menším prokluzem funkčních ploch [1].

Podle přítomnosti maziva nebo jiné látky mezi styčnými povrchy se rozlišuje tření bez maziva, tření s tuhým mazivem, tření s plastickým nebo kapalným mazivem, tření ve vrstvě plynu.

Při kapalinném tření jsou funkční plochy odděleny vrstvou maziva nebo kapalného média. Vrstva materiálu, ve které probíhá tření má vlastnosti kapaliny. Od kapalinného tření odlišované, tzv. suché tření, nemá označení zcela přesné, protože na povrchu třecích materiálů jsou téměř vždy absorbovány vrstvy plynů, vlhkost nebo oxidické vrstvy kovů, které mají vliv na třecí vlastnosti funkčních povrchů.

Limitním případem kapalinného tření je tzv. mezní tření, při kterém jsou vlastnosti přítomné tenké vrstvy kapaliny odlišné od jejich objemových vlastností.

V označení smíšené tření je zahrnuta celá řada případů, kdy v procesu tření dochází za přítomnosti maziva k občasným dotykům mikronerovností povrchu funkčních ploch [1,2].

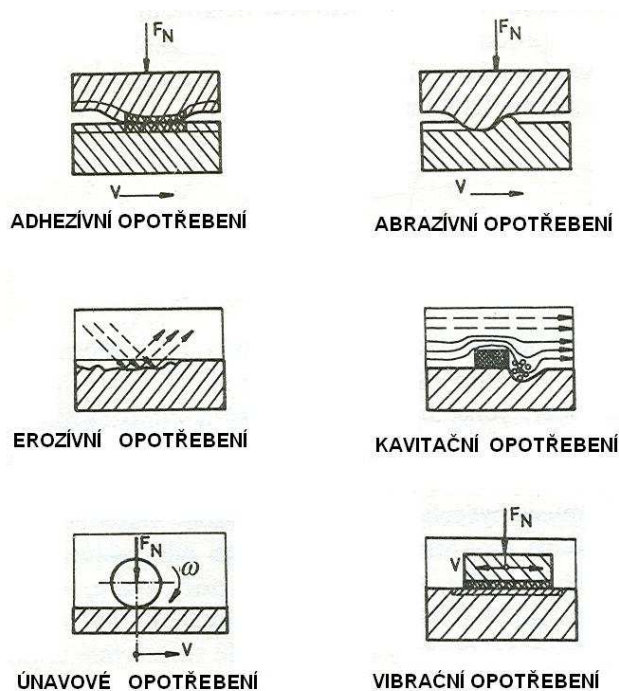
Všechny druhy tření, které byly výše zmíněny, mohou být podstatou procesů žádaných, využívaných v řadě průmyslových technologií a u strojních součástí. Jsou však také podstatou jevů nežádaných, mezi něž patří opotřebení materiálu.

2.2 Definice a druhy opotřebení

Opotřebení je definováno jako nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a media, které opotřebení vyvolává.[1,3].

Je to v důsledku tření vyskytující se stálá změna tvaru nebo změna vlastností vrstev materiálu tvořících povrch tuhých těles, která vznikla mimo technologicky požadované tváření nebo mimo požadovanou změnu materiálu [2]. Tento jev může být doprovázen i jinými vlivy, např. chemickými, elektrochemickými nebo elektrickými. Projevem opotřebení je odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z funkčního povrchu působením mechanických účinků.

Existuje šest základních druhů opotřebení: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové, vibrační. [1, 3]



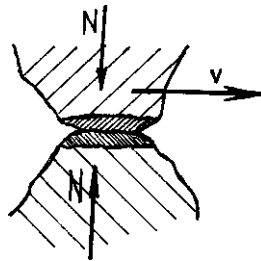
Obr. 2 Symbolické znázornění jednotlivých druhů opotřebení [2]

Na tyto základní druhy opotřebení je však třeba nahlížet jako na ideální zjednodušené případy, protože v technické praxi se obvykle tyto jevy kombinují a setkáváme se s řadou variant [1,2].

2.2.1 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení způsobuje oddělování a přemísťování částic kovu mezi dvěma povrchy, které se dostávají do kontaktu a jsou v relativním pohybu [1,2]

Povrchy tuhých těles nejsou nikdy dokonale hladké. V závislosti na použití technologie opracování povrchu zde dochází ke vzniku makronerovnosti, mikronerovností a submikronerovností. Při působení zatížení na tělesa se pak styk povrchů realizuje prostřednictvím velkého množství kontaktních plošek, kdy za současného působení velkých sil vznikají plastické deformace a vlivem adhezních sil se tvoří mikrospoje. Tyto jsou v důsledku relativního pohybu povrchů v zápětí rozrušovány.



Obr. 3 Schéma adhezivního opotřebení

Adhezivní opotřebení materiálů se může v praxi objevovat v rozsahu od opotřebení mírného až po intenzivní.

V krajním případě tzv. mírného opotřebení, při němž oxidické ochranné vrstvy kovu vznikají rychleji než jejich porušování při vzájemném relativním pohybu funkčních povrchů, jsou adhezivní spoje méně četné a méně dokonalé. Nedochozí tak k významnému přenosu materiálu mezi povrchy a mírně opotřebované povrchy jsou lesklé, vyhlazené, nemají rýhy a stopy po zadírání. Obdobný vzhled adhezivně opotřebovaných povrchů můžeme pozorovat, pokud je přítomno mazivo mezi povrchy, které se třou.

V případě intenzivního opotřebení nastává výrazné, relativně hluboké, rozrušování funkčních povrchů, jehož průvodním jevem je vznik četných částic, jejich oddělování a přenos mezi styčnými povrchy spolu s velkými změnami funkčních povrchů následkem plastické deformace mikrooblastí a makrooblastí. Intenzivně opotřebované povrchy jsou rýhované, rozbrázděné a často mají pouhým okem viditelné částice materiálu, které ulpívají

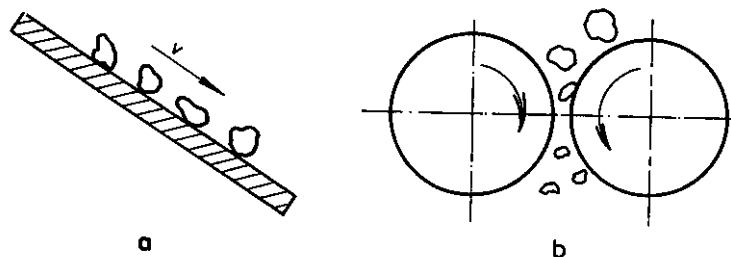
na povrchu jedné či obou součástí, které se spolu stýkají. Toto vede k růstu odporu proti pohybu a může nastat až úplné zablokování (zadření). Velmi častou příčinou tohoto stavu je selhání mazání [1,4].

Projevy adhezivního opotřebení v praxi lze zaregistrovat např. u kluzných ložisek, u čepů nebo při kontaktu kolejového vozidla s kolejnicemi.

Průběh adhezivního opotřebení je ovlivněn řadou působících faktorů. Mezi nejvýznamnější patří zatížení, kluzná rychlost, materiály třecí dvojice a jejich fyzikálně mechanické a chemické charakteristiky, mazivo, okolní prostředí, systém mazání, velikost stykových povrchů, způsob jakým byly vyrobeny jednotlivé členy dvojice a doba jejich funkce [1].

2.2.2 Abrázivní opotřebení

Abrázivní opotřebení lze popsat jako oddělování částic materiálu z funkčního povrchu působením tvrdšího a drsnějšího povrchu druhého tělesa nebo účinkem abrazivních částic. Toto se projevuje poškozením povrchu funkční plochy rýhami.



a - interakce dvou těles, b - interakce tří těles

Obr. 4 Schéma mechanismu abrazivního opotřebení [2]

U abraze mohou nastat dva případy. Při prvním z nich jde o opotřebení vzájemným silovým působením tvrdých, obvykle minerálních částic a funkčního povrchu součástí. Při tomto ději dochází k oddělování a přemístování částic materiálů, jde vlastně o interakci dvou těles, částic a součástí, kdy tvrdé částice opotřebovávají jeden funkční povrch.

Příkladem může být opotřebenění ostří u radlice pluhu nebo opotřebenění zubů u rýpadel. Druhý případ abrazivního opotřebenění způsobují tvrdé částice, které jsou mezi dvěma vzájemně se pohybujícími funkčními povrchy. Dochází zde k interakci tří těles. Takto se opotřebovávají prakticky všechny pohybové mechanismy, do kterých mohou vniknout částice nebo nečistoty z okolního prostředí [1,3].

Částice, které způsobují abrazi, mohou být volné (sytký materiál) nebo dostatečně pevně vázány, jak je tomu např. u brusného plátka, nebo jsou vázány vzájemně jako v případě brusných kotoučů.

Pro abrazivní částice, které jsou dostatečně pevně vázány, platí, že opotřebený objem je přímo úměrný zatížení a délce dráhy částic a nepřímo úměrný tvrdosti opotřebovaného povrchu. Při reálném styku nerovností nebo abrazivních částic s funkčním povrchem dochází podle působících sil v místě dotyku ke vzniku pružných, pružně plastických nebo plastických deformací.

Bylo prokázáno, že deformace povrchu materiálu závisí především na poměru $\frac{h}{R}$, kde h je hloubka vzniku výstupku tvrdého tělesa, R je poloměr vznikajícího výstupku. K plastickým deformacím dochází při $\frac{h}{R} < 0,1$ a při $\frac{h}{R} \geq 0,1$ dochází k mikrořezání.

S analogickou situací se setkáváme při styku abrazivních částic, které jsou více nebo méně pevně vázány s opotřebovaným povrchem [1].

V technické praxi jsou časté případy abrazivního opotřebenění částicemi úplně volnými nebo jen slabě vzájemně vázanými. To se děje například při přemísťování sytkých materiálů, nebo při těžbě písku a šterku. V těchto podmínkách se realizuje jednak vzájemný relativní pohyb částice a tělesa, ale abrazivní částice se vzájemně pohybují i mezi sebou. Mezi částicemi tak může docházet k posuvným pohybům, k odvalování, k rotaci. Abrazivní účinek částic volných nebo málo vzájemně vázaných je proto výrazně menší než u částic pevně vázaných[1,2].

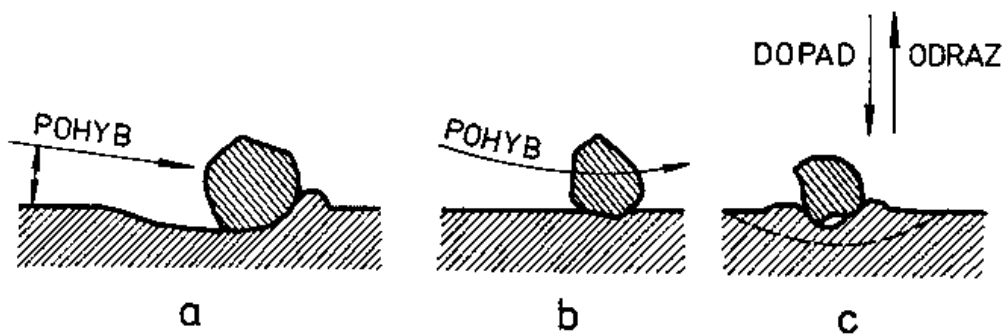
U čepů a kluzných ložisek může dojít k opotřebenění účinkem abrazivních částic, které mají původ v nečistotách maziva. Paradoxem je, že se více opotřebovává tvrdý čep oproti poměrně měkké výstelce ložiska. Způsobují to tvrdé částice, které se mohou zamáčknot do měkkého ložiskového kovu a svými vyčnívajícími výstupky pak rýhují tvrdý čep [1].

Poškození funkčního povrchu součástí v případě abraze závisí na zatížení a na vlastnostech abrazivních částic, tj. na jejich velikosti, tvaru, pevnosti, tvrdosti. Další faktory, které ovlivňují abrazivní opotřebení jsou např. kluzná rychlost a vlhkost. Odolnost proti abrazivnímu opotřebení může být u řady kovových materiálů zvýšená legováním a tepelným zpracováním [1].

2.2.3 Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení se projevuje oddělováním částic a poškozováním funkčního povrchu:

- částicemi nesenými proudem kapaliny (např. u trysek armatur, u součástí čerpadel)
- částicemi nesenými proudem plynu (příkladně součásti ventilátorů)
- proudem kapaliny, kapek, páry nebo plynu (např. u parních armatur, částí parních turbín, součástí plynových turbín) [1,2].



a - částice nesené proudem plynu, b - částice nesené proudem kapaliny, c - proudem kapaliny, kapek, páry anebo plynu.

Obr. 5 Schéma mechanizmu erozivního opotřebení [2]

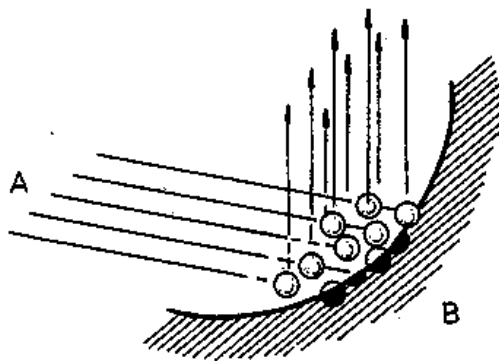
Na intenzitu erozivního opotřebení má vliv řada faktorů. Je to především relativní rychlost, teplota a chemické působení nosného média a dále charakter částic, tj. jejich druh, velikost, tvar a tvrdost. Účinek erozivního média s částicemi závisí především na kinetické energii a úhlu dopadu částic na funkční povrch [1,2,4].

Typickým projevem erozivního opotřebení je nerovnoměrné porušení funkčního povrchu a často jeho výrazné zvlnění. Je to důsledek turbulence proudícího média, při níž může docházet k oddělování částic materiálu v určitých exponovaných místech povrchu [1].

2.2.4 Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení je charakteristické oddělováním částic a poškozováním povrchu součástí v oblasti zanikání kavitačních dutin v kapalině.

Kavitace často vzniká v hydraulických zařízeních, kde tekutiny obsahující plyny působí na povrch tuhých těles při vysokých rychlostech. V místech, kde vzrůstá rychlost proudění a v důsledku toho se sníží tlak kapaliny, se objeví kavitační bubliny (dutiny) vyplněné parou nebo plynem a ulpí na povrchu kovu. Tyto bubliny zanikají implozí. V okamžiku zániku kavitačních dutin dochází ke vzniku hydrodynamických rázů, které rozrušují povrch kovových součástí [1,4].



A - proud tekutiny, B - povrch tělesa

Obr. 6 Schéma mechanismu kavitačního opotřebení [2]

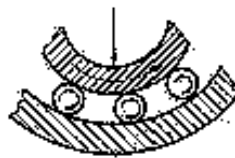
Intenzita kavitačního opotřebení je proměnlivá s časem. V první fázi dochází ke kumulaci poruch v povrchových vrstvách materiálu bez oddělování částic. Až v další fázi dochází ke vzniku povrchových a podpovrchových trhlinek.

Kavitační opotřebení poškozuje nejčastěji např. vodní turbíny, čerpadla, součásti hydraulických systémů, redukční ventily, tlakově mazaná ložiska [1].

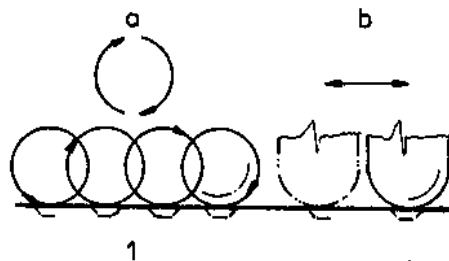
Kavitační opotřebení ovlivňuje řada faktorů, mezi něž především patří obsah plynů v kapalině, teplota a tlak, povrchové napětí a viskozita [1].

2.2.5 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení má podstatu v postupné kumulaci poruch v povrchové vrstvě materiálu funkčních ploch při opakovaných stykových napětích v určitých oblastech funkčních povrchů. Je-li napětí pod mezí kluzu, vzniká vysokocyklová únava, při napětích nad mezí kluzu vzniká nízkocyklová únava, K únavovému poškození tedy dochází v důsledku cyklického namáhání součástí.



Obr. 7a Schéma mechanismu únavového opotřebení [1]



a – Cyklický pohyb, b – vratný skluz

1 – zárodek opotřebení z povrchové anebo podpovrchové trhliny

Obr. 7b Mechanismus únavového opotřebení [2]

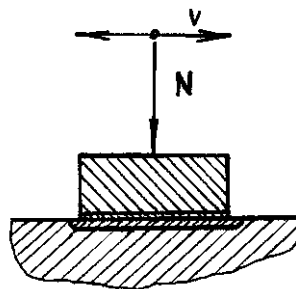
Oblasti nízkých mikrotrhlin se postupně rozšiřují a vznikají rozsáhlejší oblasti únavového opotřebení. Tento děj vázaný převážně na vrstvy povrchu materiálu může vést až ke vzniku únavových lomů, které postihnou část nebo celý průřez součásti.

S únavovým opotřebením se velmi často setkáváme u valivých ložisek, u ozubených kol, u zdvihátek ventilů a podobně [1,2].

Únavové procesy jsou ovlivňovány především materiálovými faktory, z nichž nejvýznamnější jsou tvrdost, vměstky a nečistoty, kvalita a drsnost povrchu [1].

2.2.6 Vibrační opotřebení

Charakter vibračního opotřebení je dán oddělováním částic a poškozováním povrchu materiálu v místech kmitavých tangenciálních posuvů funkčních ploch při působení normálového zatížení.



Obr. 8 Schéma mechanismu vibračního opotřebení

Při vibračním opotřebením jsou amplitudy kmitavého pohybu poměrně malé. Jejich hodnoty se pohybují v rozmezí 0,1 až 100 μm . Typickým průvodním jevem vibračního opotřebení je vznik oxidů železa, které mají hnědočervenou nebo hnědočernou barvu.

V praxi vzniká vibrační opotřebení u valivých ložisek, čepů, nalisovaných spojení náboje kola a hřídele. Vlivem vibrací mohou být poškozeny i velmi tvrdé materiály bez

ohledu na přítomnost maziva. Důsledkem vibračního opotřebení mohou být i únavové lomy [1].

Průběh vibračního opotřebení a jeho intenzita mohou být ovlivňovány především velikostí amplitudy pohybu, kmitočtem, dobou působení kmitavého pohybu, prostředím, ale i vlastnostmi materiálu [1].

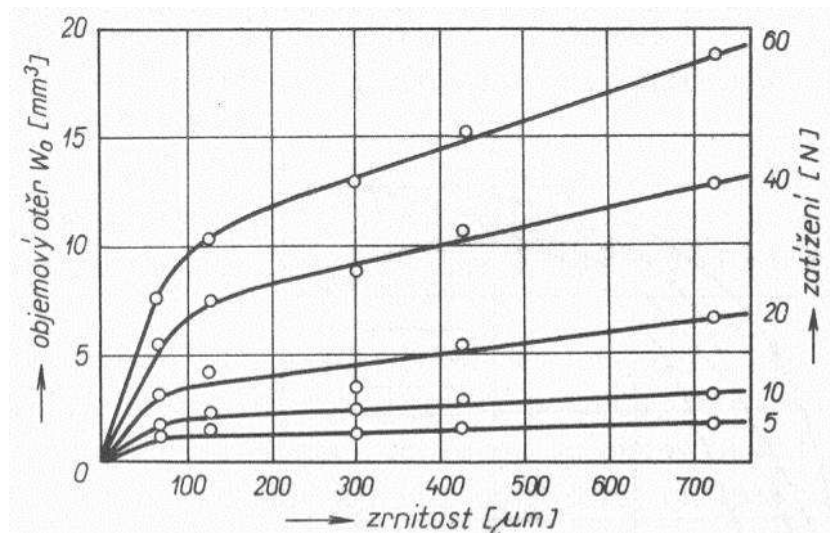
2.3 Nejdůležitější faktory ovlivňující abrazivní opotřebení

Na abrazivní opotřebení funkčních povrchů strojních součástí nebo zařízení se významně podílí zatížení a abrazivní částice, respektive jejich vlastnosti, to je velikost, tvar, pevnost a tvrdost.

2.3.1 Velikost abrazivních částic

Studiem závislosti abrazivního opotřebení různých materiálů na zatížení a průměrné velikosti částic bylo zjištěno, že tato závislost není lineární, Tyto závislosti popsali při zatíženích 0,5; 1; 2; 4 a 6 N Chruščov a Babičev [5] u železa a litiny, kdy bylo zkoušeno opotřebení abrazivními částicemi (50 až 800 μm) při dráze kluzu 6 m a rychlosti kluzu 0,5 m/s. Obdobná pozorování zaznamenali také Nathan a Jones [6]. Zjištěná závislost objemového otěru při konstantní dráze kluzu na velikost abraziva při proměnném zatížení je znázorněna na následujícím obr. č. 9, ze kterého je patrné, že průběh sledovaných závislostí lze rozdělit na 3 části:

1. Oblast velmi malých rozměrů zrna, kdy je objemový otěr přímo úměrný průměrné velikosti zrna
2. Přejídná oblast, kdy dochází ke změně závislosti opotřebení
3. Oblast větších rozměrů zrna, kde je závislost objemového otěru a průměrné velikosti zrna lineární.



Obr. 9 Závislost objemového otěru při konstantní dráze kluzu na velikosti abrazivního zrna a zatížení vzorků [1]

Velikost abrazivních částic, při které se výrazně mění závislost opotřebení na průměrné velikosti abrazivních částic, byla označena jako tzv. kritická velikost abrazivního zrna. Je závislá na zatížení a za daných zkušebních podmínek nabývá hodnot 70 až 200 μm .

Znalost kritické velikosti abrazivních částic má význam pro praxi. Zmenšováním velikosti abrazivních částic pod kritickou hodnotu výrazně klesá jejich abrazivní účinek. To může pomoci řešit například problém nežádoucích účinků abrazivních částic, které se dostávají do maziva [1].

2.3.2 Tvar abrazivních částic

Abrazivní účinky částic jsou nepochybně ovlivněny i jejich tvarem, který je možné popsat:

- množstvím hran či výstupků (makrogeometrie)
- hladkostí povrchu hran či výstupků (mikrogeometrie)
- poloměrem výstupků.

Na vliv uvedených faktorů neexistuje jednotný názor, což je dáno obtížností měření a hodnocení tvaru částic, jejich různorodými vlastnostmi i chemickým složením [1].

Makrogeometrie abrazivního zrna se může posuzovat například podle tzv. součinitele hranatosti, definovaného jako poměr povrchu skutečného zrna k povrchu koule o stejném objemu. V praxi je měření součinitele hranatosti využíváno nejvíce k určení vlastností slévarenských písků používaných pro formování odlitků. Lze též předpokládat, že čím bude reálná částice odlišnější od kulového tvaru, tím bude mít větší počet výstupků a hran a tím větší bude také pravděpodobnost rýhování a oddělování částic z funkčního povrchu při relativním pohybu.

Při posuzování mikrogeometrie částic bylo zjištěno, že hrany a výstupky částic nejsou geometricky přesné řezy krystalografických rovin, ale téměř vždy to jsou zaoblené tvary. Bylo to prokázáno proměřováním karborundových a korundových částic malé i velké zrnitosti [1,5]. Detailní proměřování mikrogeometrie zrn by mohlo být využito při studiu mechanismu opotřebení, protože umožňuje poměrně přesně postihnout tvar částic i jejich změny v průběhu abrazivního opotřebení. Tato metoda se však pro svou pracnost a náročnost spíše nevyužívá.

2.3.3 Pevnost abrazivních částic

Pro průběh a intenzitu opotřebení má veliký význam pevnost abrazivních částic. Při vzájemném pohybu částic a funkčního povrchu součástí dochází k porušování materiálu a současně k otupování či vylamování výstupků a hran abrazivních zrn. Vocel a Dufek [1] svými zkouškami prokázali, že při malém silovém působení se příliš nemění průměrná velikost zrn, ale mění se jejich mikrogeometrie. Sledovali pokles abrazivního účinku křemenných částic o průměru 1 až 2 mm v brusné nádobě, ve které byly za rotace exponovány po různou dobu vždy čtyři válcové vzorky o průměru 10 mm z oceli 12050 o tvrdosti 200 až 210 HV. Sítovým rozborem částic po ukončení zkoušky bylo zjištěno, že průměrná velikost abrazivních zrn se změnila maximálně o 10%, ale jejich účinek poklesl až na 40% původní hodnoty.

Dynamickými zkouškami pevnosti abrazivních částic, při kterých částice dopadají volným pádem na válec, který rotuje obvodovou rychlostí 30 ms^{-1} , bylo zjištěno, že u korundu

(Al_2O_3) dochází k fragmentaci částic více než u karbidu křemíku (SiC). Za těchto zkušebních podmínek se karbid křemíku jevil jako odolnější [1].

Větší silové působení během interakce abraziva s funkčním povrchem způsobuje větší porušování zrn, především jejich fragmentaci, čímž se do určité míry kompenzuje větší otupování výstupků a hran. Tím se zřejmě vysvětluje skutečnost, že pokles abrazivního účinku částic při větším silovém působení se výrazně neliší od poklesu abrazivity při malém silovém působení.

Podle Červeného [7] spočívá vliv pevnosti abrazivních částic v tom, že při nízké pevnosti částic dochází k jejich drcení a k otupování olamování hran. Současně se však vytvářejí částice nové, které mají ostré hrany. Tyto dva jevy (zmenšování rozměrů a otupování na jedné straně a vznik nových ostrohranných částic na straně druhé) působí protichůdně. Výsledkem je fakt, že s rostoucím zatížením povrchů téměř nedochází ke změně abrazivity [1,7].

2.3.4 Tvrdość abraziva

Velmi intenzivním degradačním procesem je opotřebení povrchu materiálu způsobené tvrdými, převážně minerálními částicemi. Více než padesát procent ze všech případů opotřebení strojů a strojních součástí se přisuzuje abrazi. Abrazivní opotřebení, jak je popsáno v článku 2.2.2 této práce, mohou způsobovat tvrdé částice, které jsou volné nebo vázané (např. v hornině nebo na brusném plátně) nebo dochází k abrazi působením tvrdých částic přítomných mezi dvěma funkčními povrchy, které se vůči sobě vzájemně pohybují. Reálné procesy vzájemného působení tvrdých abrazivních částic a materiálů podléhajících opotřebení jsou však mnohem složitější. Jsou ovlivněny také charakterem a časovým průběhem sil, které působí mezi abrazivními částicemi a opotřebovaným povrchem. [1,16]

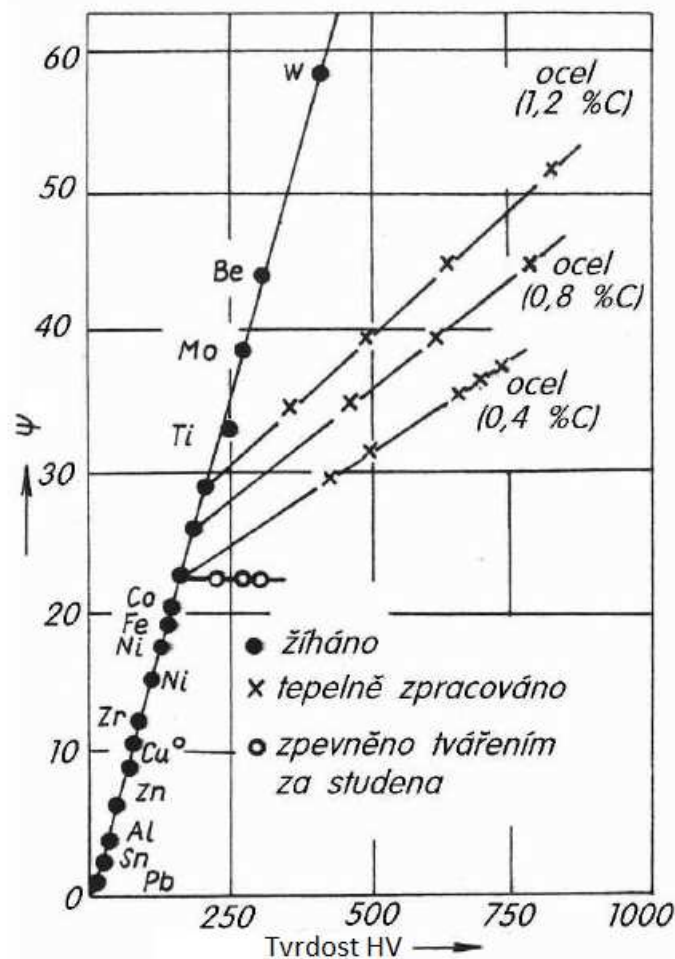
Tvrdość abraziva patří mezi jeho nejdůležitější vlastnosti. Při opotřebení se výrazně uplatňuje v souvislosti s tvrdostí opotřebovaného materiálu. Čím jsou abrazivní částice tvrdší než funkční povrch, tím snáze do tohoto opotřebovaného materiálu částice vnikají a intenzita opotřebení je tím větší [2,7].

Pro usnadnění vzájemného porovnávání různých materiálů byla zavedena tzv. poměrná odolnost proti opotřebení ψ , definovaná vztahem

$$\psi = \frac{W_l \text{etalonu}}{W_l \text{vzorku}} = \frac{W_h \text{et.}}{W_h \text{vz.}} \cdot \frac{\rho \text{vz.}}{\rho \text{et.}} = \frac{W_o \text{et}}{W_o \text{vz.}}$$

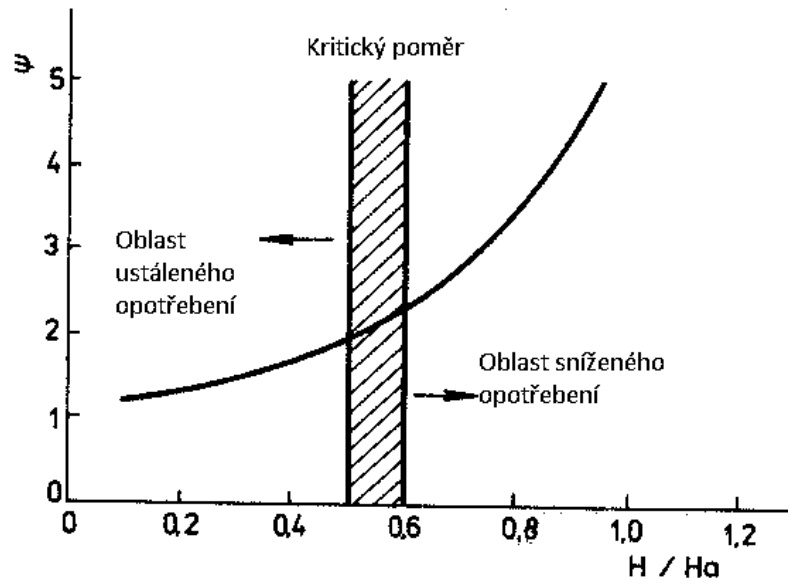
Definuje se tedy jako poměr délkového otěru W_l zkoušeného etalonu a vzorku nebo jako poměr objemového otěru W_o zkoušeného etalonu a vzorku. Objemový otěr se pak nejčastěji určuje nepřímo z hmotnostního otěru W_h při známé hustotě ρ . Při srovnávání se používají obvykle kovové etalony, které mohou být zhotoveny tvářením nebo litím. Pro omezení vlivu náhodných faktorů na výsledky zkoušek se používají též etalonová abraziva [1].

Vlivy poměru tvrdostí abraziva a opotřebovaného kovového materiálu na poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení sledovali Chruščov a Babičev [5] a znázorňuje je obr. č. 10.



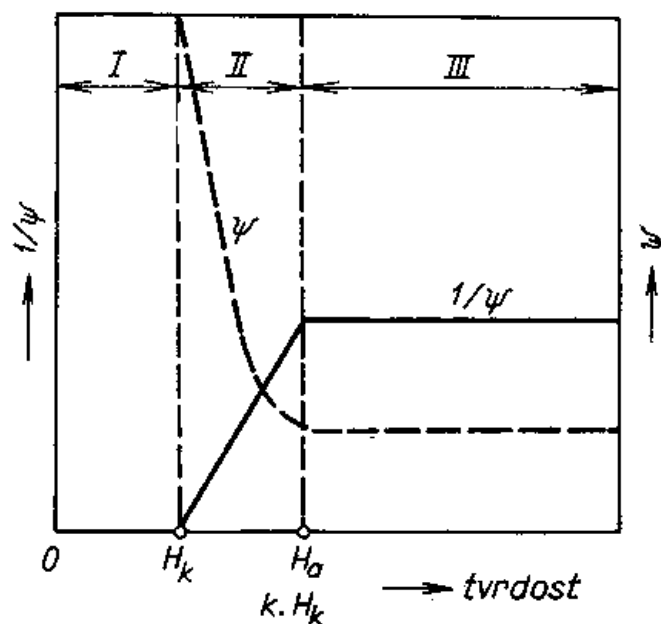
Obr. 10 Závislost poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení ψ kovových materiálů na jejich tvrdosti [5]

Blaškovič, Balla a Dzimko [2] poukazují na výsledky řady prací ukazujících významný vliv vzájemného, vztahu mezi tvrdostí abraziva a opotřebovávaného kovu. Byl prokázán poměrně prudký vzrůst odolnosti proti opotřebení, pokud koeficient tvrdosti $K_T = \frac{H}{H_a}$ (kde H je tvrdost opotřebovávaného materiálu a H_a je tvrdost abraziva) přesáhne hodnotu 0,5 až 0,6. Toto je znázorněno na obrázku č. 11



Obr. 11 Vztah mezi poměrem tvrdosti abraziva a opotřebovaného kovu a poměrnou odolností proti opotřebení [2]

Chruščov a Babičev [5] popsali závislost poměrného opotřebení $\frac{1}{\psi}$ a poměrné odolnosti proti opotřebení ψ zkoušeného kovu a tvrdosti H_k na tvrdosti abraziva H_a . Schéma této závislosti znázorňuje obr. č. 12



Obr. 12 Závislost poměrného opotřebení $\frac{1}{\psi}$ a poměrné odolnosti proti opotřebení ψ zkoušeného kovu o tvrdosti H_k na tvrdosti abraziva H_a [5]

Hodnotou $\frac{1}{\psi}$ je definováno tzv. poměrné opotřebení vzorku vzhledem k etalonu. Na schématu obr. 11 je označena tvrdost abraziva H_a a tvrdost kovu H_k . Má-li abrazivum menší tvrdost než kov, jde o oblast I na schématu, k opotřebení ve větší míře nedochází. V oblasti III, kde tvrdost abraziva výrazně převyšuje tvrdost kovu, je opotřebení víceméně konstantní a nezávisí na poměru H_a/H_k . Významná je tzv. přechodová oblast II, ve které opotřebení vzrůstá od minimální hodnoty $H_a = H_k$ k hodnotě maximální $H_a = k \cdot H_k$. Chruščov [5] uvádí, že hodnoty součinitele k pro různé kovy a různá abraziva kolísají v rozmezí 1,3 až 1,7. Vocel a Dufek [1] uvádějí také hodnoty součinitele k podle Tenenbauma v rozmezí 1,6 až 2,0.

Na základě experimentálních výsledků byl pro velikost opotřebeného objemu v závislosti na poměru tvrdosti abraziva a tvrdosti kovu odvozen vztah:

$$W_0 = K_1 \cdot \log_{10} \frac{H_a}{H_k},$$

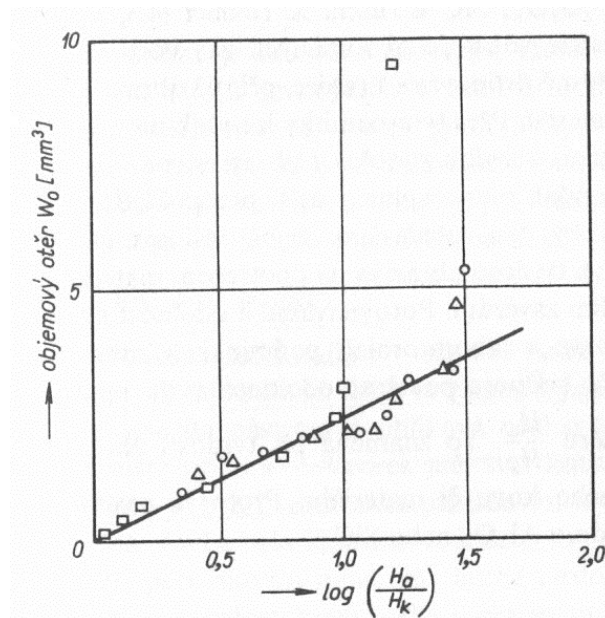
kde W_o je objemový otěr

H_a - efektivní tvrdost abraziva (definovaná maximální tvrdostí kovu, který může být ještě abrazivem opotřebován)

H_k – tvrdost kovu

K_I – konstanta odpovídající daným zkušebními podmínkám [1].

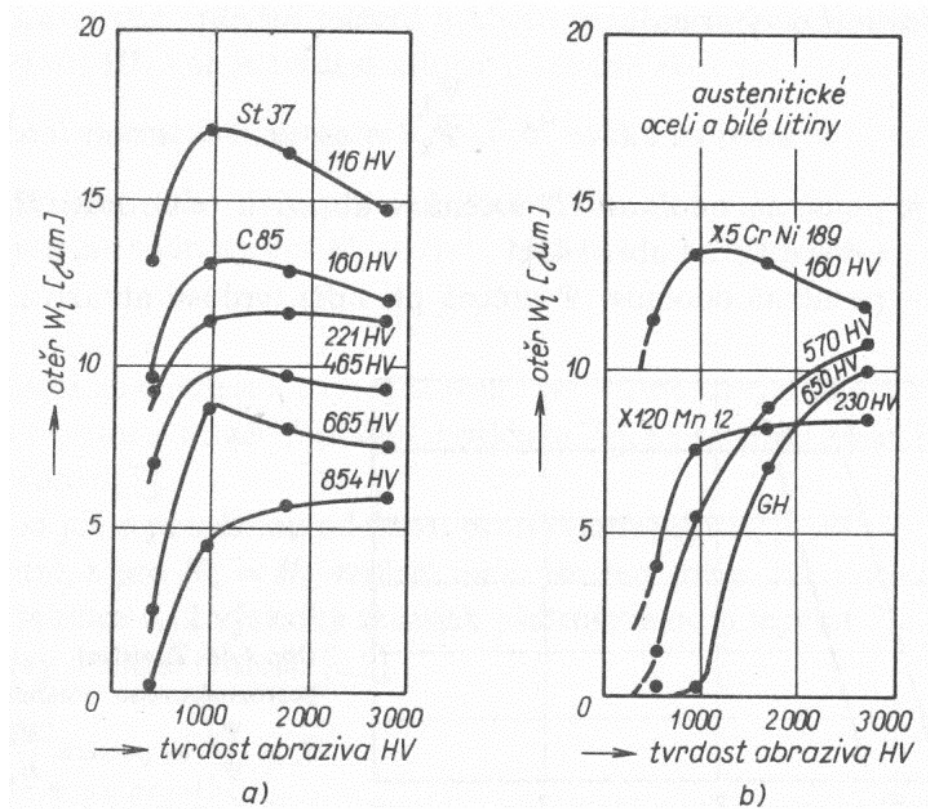
Vztah mezi objemovým otěrem kovu a poměrem H_a/H_k znázorňuje obr. č. 12. Z tohoto obrázku je patrné, že závislost poměru tvrdosti a opotřebení objemu s výjimkou velmi měkkých kovů rovnici odpovídá.



Obr. 13 Vztah mezi objemovým otěrem kovu a poměrem $\frac{H_a}{H_k}$ pro tři druhy abraziva [1]

Závislost délkového otěru W_l na tvrdosti abraziva u některých typů ocelí a litin zachycují autoři Vocel a Dufek [1] na základě údajů podle Gürleyika [12] na obr.14

Označení etalonové oceli *St 37* odpovídá dle EN jakosti *S 235* a označení *C 85* odpovídá dle EN jakosti *CS 85*.



Obr.14 Závislost délkového otěru W_1 na tvrdosti abraziva u některých typů ocelí a litin [1]

Na obr. 14 a) je průběh opotřebení výše popsané etalonové oceli tepelně zpracované na různé hodnoty tvrdosti. Na obr. 14 b) je znázorněn průběh opotřebení pro austenitické oceli a bílé litiny. Z obrázků je patrné, že u ocelí se dosáhne maximálního opotřebení již při tvrdosti abraziva kolem 1000 HV, zatímco u bílých litin stoupá opotřebení i u tvrdších abraziv. Je to ovlivněno zřejmě větším obsahem karbidů ve struktuře, jejichž tvrdost je srovnatelná s tvrdostí křemene, korundu nebo karbidu křemíku [1].

Poznatky o vlivu tvrdosti abraziva na opotřebení materiálu ukazují na to, že při porovnávání odolnosti materiálu proti opotřebení je třeba pracovat v laboratorních podmínkách v oblasti, kde hodnota poměrné odolnosti proti opotřebení ψ nezávisí na poměru $\frac{H_a}{H_k}$. To znamená, že tvrdost použitého abraziva musí být větší než tvrdost zkoušeného kovu nebo materiálu. Proto nejčastěji používanými abrazivy jsou korund ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) nebo karbid křemíku (SiC) [1,4].

Kašparová, Zahálka a Houdková [14] zkoušeli opotřebení nelegované konstrukční uhlíkové oceli vhodné ke svařování o označení ČSN 41 1523 (ocel 11 523) a zároveň stříkaných povlaků na bázi cementu „WC-CrC-Ni“. Porovnávali opotřebení při tzv. DrySand/RubberWheel (DSRW) a DrySand/SteelWheel (DSSW) zkouškách, tj. při třítělesovém uspořádání za použití jednak gumově lemovaného kola a dále za použití ocelového kola. Použitými abrazivními médii byly písek z bílého korundu (Al_2O_3) o velikosti zrn 212 – 250 μm a křemičitý písek (SiO_2) o velikosti zrn 200 – 300 μm . Zkouškami probíhajícími při dvou různých zatíženích, a to 22 N a 56 N, byly zjišťovány objemové úbytky materiálu, vypočítané z hmotnostních úbytků zjištěných vážením vzorků s přesností na 0,0001 g. Mezi zajímavé závěry z těchto zkoušek patří:

- Rychlost opotřebení ocelového materiálu je pro obě použítá abraziva při DSSW podmínkách téměř dvojnásobně vyšší než při DSRW zkouškách.
- Písky Al_2O_3 a SiO_2 o zrnitostní frakci 200-300 μm mají téměř stejnou abrazivní schopnost vůči oceli ČSN 11 523 bez ohledu na jejich rozdílné vlastnosti.
- Se zvyšujícím se zatížením se zvyšuje opotřebení oceli bez závislosti na použitém abrazivním médiu.
- Drsnost povrchu ocelového kola se mění pouze s měnícím se abrazivním médiem, vliv zatížení nebyl průkazný.
- Byla zjištěna závislost mezi velikostí zatížení a rychlostí opotřebení ocelového kola.
- Pro hodnocení zároveň stříkaných povlaků dle DSSW je nutné zohlednit typ testovaného materiálu povlaku a zabezpečit vhodné podmínky zkoušek a reprodukovatelnost procesu [14].

2.4 Zkoušení vlivu tvrdosti abraziva na odolnost proti opotřebení

Laboratorní zkoušky pro určování opotřebení jsou klasifikovány podle typu používaných zařízení, hlavních parametrů určujících stupeň opotřebení a podle geometrického uspořádání systému. Jestliže používané zatížení vede k poškození abrazivních částic, je opotřebení nazýváno „high–stress“ abrazivní opotřebení. Pokud poškození abrazivních částic není jednoznačně patrné, jedná se o tzv. „low-stres“ abrazivní opotřebení. Dalším významným termínem pro hodnocení opotřebení je „x-tělesové“ opotřebení. Jestliže je například abrazivum v kontaktu s jiným předmětem a zároveň dalším povrchem, jedná se o tzv. „tří-tělesové“ abrazivní opotřebení, při kterém bývá materiál abraziva většinou tvrdší než opotřebovaný objekt [4, 15].

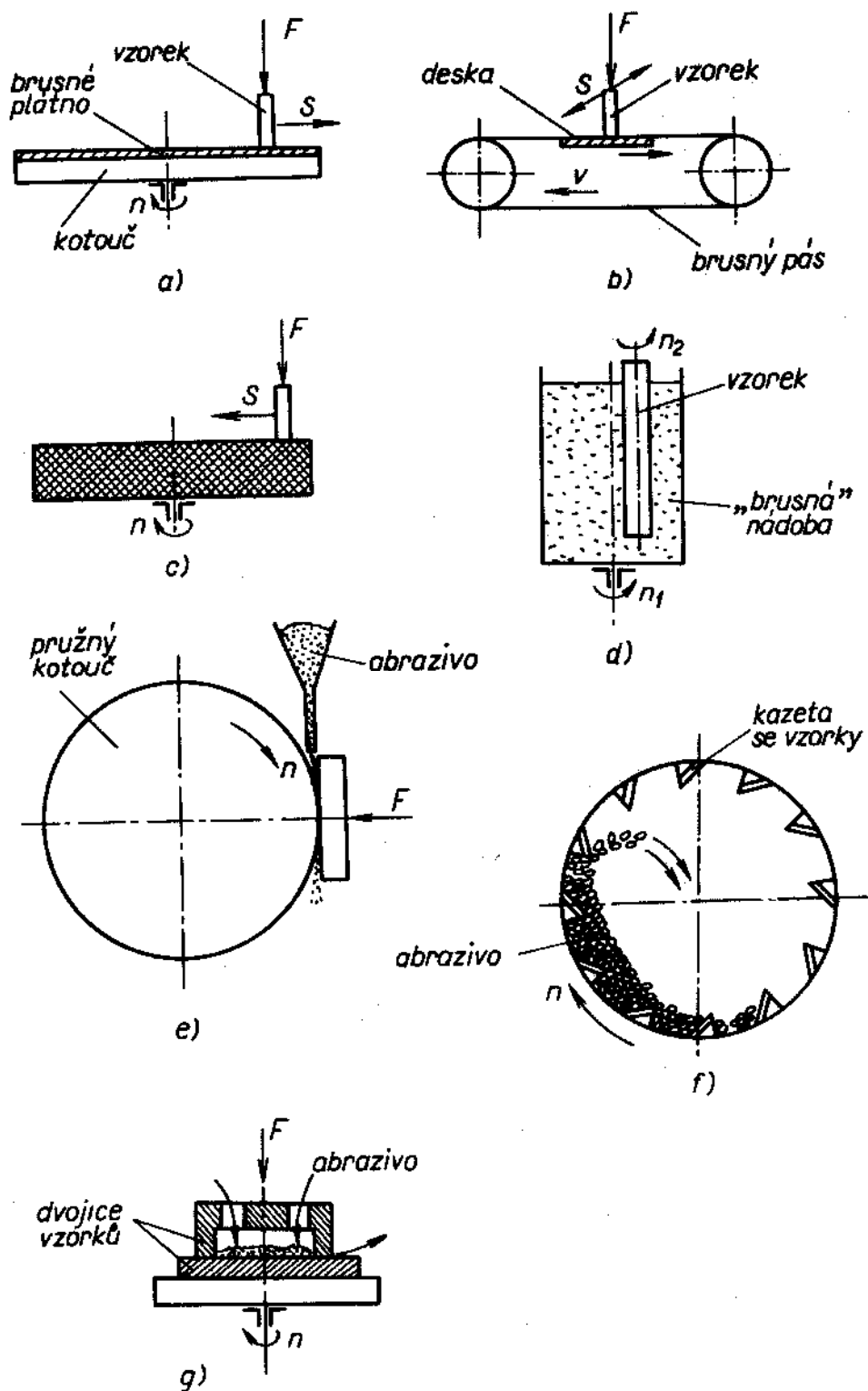
Na základě podmínek v oblasti dotyku mezi opotřebovaným povrchem a abrazivními částicemi lze experimentální zařízení rozdělit na přístroje s vázanými částicemi, přístroje s volnými částicemi a přístroje s vrstvou volných částic mezi dvěma stykovými povrchy.

Schématické uspořádání přístrojů na zkoušky odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení jsou na obr. 15.

Přístroje s vázanými abrazivními částicemi pracují nejčastěji s brusným plátnem nebo s brusným kotoučem. Používají se přístroje s rotačním pohybem, ale také s přímočarým vratným pohybem, případně přístroje s brusným pásem. Z uvedených druhů přístrojů se ke zkouškám kovových materiálů užívají nejčastěji přístroje s brusným plátnem. Jejich výhodou je jednoduchost, spolehlivost a dobrá reprodukovatelnost výsledků s malým rozptylem.

U přístrojů s brusným kotoučem se využívá možnosti zkoušet materiály proti abrazivnímu opotřebení za vysokých teplot.

U všech přístrojů s vázanými částicemi však lze zaznamenat jako nevýhodnou vlastnost klesající abrazivitu brusného plátna nebo brusného kotouče v průběhu zkoušek. Opakovanými interakcemi s povrchy zkoušených vzorků dochází postupně k otupování a vylamování částic abraziva a také se jejich povrch znečišťuje částicemi oteru.



Obr. 15 Schémata přístrojů na zkoušky odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení:
 a – přístroj s brusným plátnem, b – přístroj s brusným pásem, c – přístroj s brusným kotoučem, d – přístroj s brusnou nádobou, e – přístroj s pružným kotoučem, f – bubnový přístroj, g – přístroj s vrstvou brusných částic mezi dvěma stykovými povrchy [1]

Přístroje s volnými abrazivními částicemi lze rozdělit na přístroje s brusnou nádobou, přístroje s pružným kotoučem a bubnové přístroje.

Přístroje s brusnou nádobou pracují tak, že do zkušební nádoby s abrazivními částicemi zasahují zkušební vzorky a vlivem vzájemného relativního pohybu vzorků a volných abrazivních částic se jejich povrch opotřebovává.

Zkoušení na těchto přístrojích je vhodné proto, že lépe simulují provozní podmínky, umožňují využití různých druhů abraziva a materiály lze zkoušet i za vysokých teplot. K nevýhodám zkoušek patří postupný pokles abrazivity volných částic, který je důsledkem jejich interakcí s povrchem zkoušených vzorků. Dochází k drcení, otupování a znečišťování částic abraziva otěrem. V praxi toto bývá řešeno periodickou výměnou abrazivních částic.

Přístroje s pružným kotoučem využívají abrazivního účinku částic sypaných mezi vzorek zkoušeného materiálu a rotující kotouč. Tyto přístroje dobře modelují podmínky provozu strojních zařízení pracujících v zemině. Při těchto zkouškách se však obtížněji reprodukuje výsledky měření při použití nestandardního abraziva s různou velikostí částic.

Bubnové přístroje jsou velmi jednoduché a v provozu spolehlivé. Pracují tak, že vzorky zkoušeného materiálu upevněné na vnitřní obvodové straně bubnu jsou opotřebovávány působením rotujících volných abrazivních částic. Výsledky takto pořízených zkoušek se obvykle využívají k hodnocení odolnosti materiálů proti opotřebení v podmínkách mletí.

Přístroje s vrstvou abrazivních částic mezi dvěma stykovými povrchy pracují s dvojicí vzorků, které jsou v relativním pohybu. Tyto přístroje se využívají méně. Při zkouškách je obtížné dosáhnout rovnoměrnosti ve vrstvě abraziva. Náročné je také odstraňování rozdrčených částic z pracovní oblasti a dodávka částic nových [1,2,4,5,8].

2.5 Tvrdost materiálu a její zkoušení

Tvrdost je jednou z mechanických vlastností, která má hlavně u kovových materiálů mimořádnou důležitost. Ze všech vlastností materiálů ji lze zjistit nejrychleji, nejlevněji a i na předmětech nejmenších rozměrů. Z tvrdosti lze usuzovat i na některé další vlastnosti

materiálu (pevnost v tahu, obrobitelnost apod.). Zkoušení tvrdosti se provádí buď na zkušebních vzorcích, nebo přímo na hotových výrobcích.

Tvrдост je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Na této definici je založena většina přístrojů k měření tvrdosti.

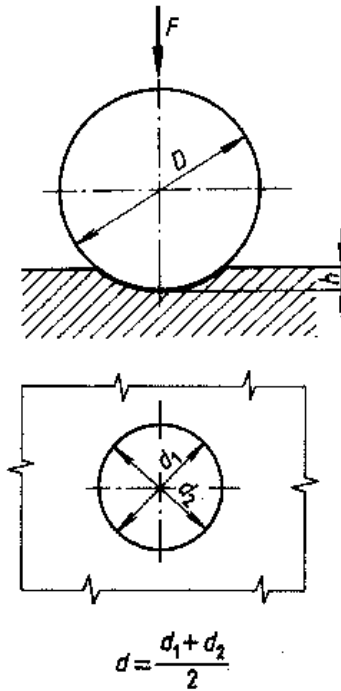
Zkoušky tvrdosti patří mezi nepoužívanější způsoby zkoušení materiálu také pro svou jednoduchost, snadnou proveditelnost a možnost zkoušení hotových dílů bez jejich znehodnocení. Podmínky zkoušek jsou stanoveny empiricky a hodnoty tvrdosti získané různými zkouškami jsou udávány v různých stupnicích, které nelze exaktně vzájemně porovnávat, tzn. nelze je převést na jiné tvrdosti. V technické praxi nejsou vždy k dispozici veškeré přístroje potřebné pro měření tvrdosti všemi metodami. Proto byly sestaveny porovnávací tabulky tvrdostí pro ocel (ČSN 42 0379).

Z mnoha druhů zkoušek tvrdosti jsou ve strojírenství nepoužívanější metody vnikací. Statické vnikací zkoušky jsou normalizované metody, které spočívají v pozvolném vtláčování vnikacího velmi tvrdého tělesa (indentoru) vhodného tvaru (kulička, kužel, jehlan) do povrchu zkoušeného materiálu. Měřítkem tvrdosti je velikost vniklého vtisku (průměr, hloubka nebo uhlopříčka).

2.5.1 Zkouška podle Brinella

Zkouškou podle Brinella (ČSN EN ISO 6506-1,2,3 (42 0359) : 2000) se zjišťuje vtisk, který se považuje za kulový. Indentorem je vyleštěná kulička z tvrdokovu, slinutého karbidu wolframu (WC), o průměru $D = 10; 5; 2,5$ a 1 mm. Po odlehčení zkušebního zatížení F se měří průměr vtisku d , který se získá jako aritmetický průměr dvou na sebe kolmých rozměrů d_1 a d_2 . Tloušťka zkoušeného materiálu nesmí být menší než osminásobek hloubky vtisku, aby se neprojevil vliv tvrdosti podložky. Teplota měření musí být 10 až 35 °C. (obvykle je 23 ± 5 °C).

Doba počátečního zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí být kratší než 2 s a nesmí trvat déle než 8 s. Doba plného zkušebního zatížení má být v rozmezí 10 až 15 s. Zkušební zatížení musí být vybráno tak, aby průměr vtisku ležel v rozmezí $0,24 D$ až $0,6 D$. Poměr zatížení k průměru kuličky ($0,102 \cdot \frac{F}{D^2}$) musí být vybrán s ohledem na zkoušený materiál a jeho tvrdost.



Obr. 16 Schéma zkoušky tvrdosti podle Brinella [11]

Tvrдость podle Brinella se označuje HBW a určuje se jako poměr zkušebního zatížení a povrchu vtisku. Podle vztahu $HBW = \frac{0,102F}{A}$ kde F je zkušební zatížení v N a A je plocha vtisku v mm^2 :

Pro výpočet tvrdosti se používá upravený vzorec:

$$HBW = 1,02 \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

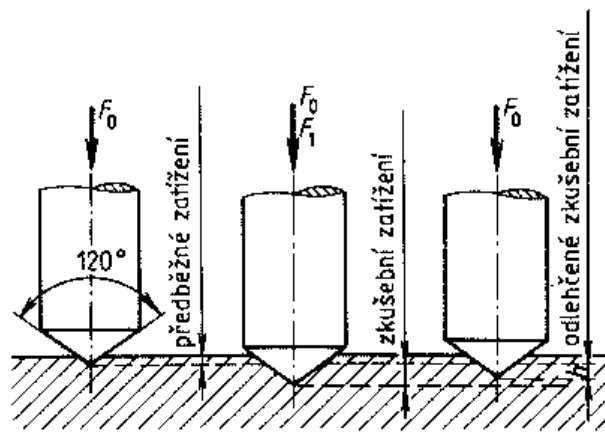
Příklad značení podle normy:

350 HBW 5/750 značí tvrdost 350 dle Brinella, určenou kuličkou z tvrdokovu o $\varnothing D = 5$ mm při zkušebním zatížení 7,355 kN pro standardní dobu působení [11,19].

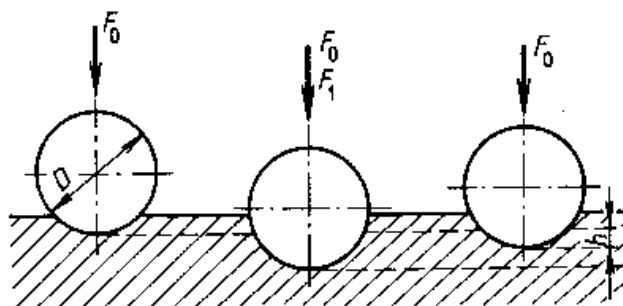
2.5.2 Zkouška podle Rockwella

(ČSN EN ISO -1,2(42 0360) : 2000).

Tvrdość podle Rockwella se určí z hloubky h trvalého vtisku vnikajícího tělíska měřením s přesností na $\pm 2\mu\text{m}$. Indentorem pro tvrdé materiály je diamantový kužel o vrcholovém úhlu 120° . Pro měkké materiály se používá kulička z tvrdokovu o průměru 1,578mm nebo 3,175mm. Celkové zkušební zatížení $F = F_0 + F_1$ se skládá z předběžného zatížení ($F_0 = 98,07\text{N}$) a přídavného zatížení (F_1 je různé podle stupnice tvrdosti.)



Obr.17a Diamantový kužel pro Rockwellovy zkoušky tvrdosti (HRC, HRA) [11]



Obr.17b Kulička pro Rockwellovy zkoušky (HRB, HRD, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK) [11]

Tvrlost se vypočítá z zjištěné hodnoty h a konstant N (číslo charakterizující stupnici) a S (jednotková stupnice) podle vzorce:

$$\text{Tvrlost podle Rockwella} = N - \frac{h}{S},$$

Pro tuto zkoušku jsou tvrdoměry většinou upravovány tak, že hloubka vtisku se odečte na číselníkovém úchylkoměru, kde ukazatel na číselníku ukazuje přímo tvrdost podle Rockwella.

Příklady označení tvrdosti:

59 HRC – tvrdost podle Rockwella měřená na stupnici C s použitím diamantového kužele.

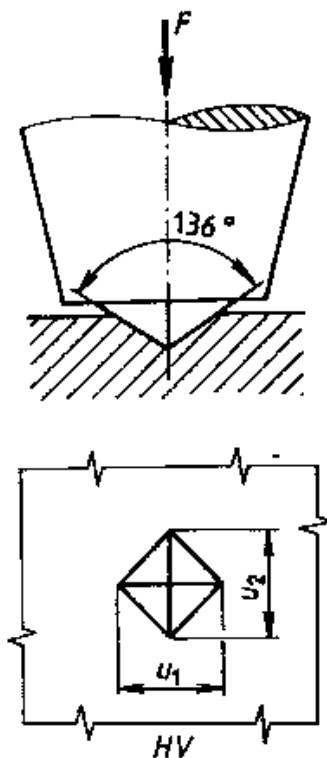
60 HRB – tvrdost podle Rockwella měřená na stupnici B s použitím kuličky z tvrdokovu

70 HR 30N – tvrdost podle Rockwella měřená na stupnici 30 N s celkovým zkušebním zatížením 294,2N [11,17,19].

2.5.3 Zkouška podle Vickerse

(ČSN EN ISO 6507 -1,2 (42 0374) : 1999).

Zkouška spočívá ve vtlačování diamantového vnikacího tělesa do zkušebního tělesa pod zkušebním zatížením po stanovenou dobu a v následném změření úhlopříček vtisku. Zjišťuje se aritmetický průměr délek obou změřených úhlopříček po odlehčení zatížení. Indentorem je diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° . Zatížení je obvykle v rozsahu 49 až 981 N. Standardní doba zatěžování je 10 až 15s [19].



Obr. 18 Diamantový čtyřboký jehlan pro Vickersovu zkoušku[11]

Tvrdość podle Vickerse se označuje HV a stanoví se podle vztahu:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{F}{d^2},$$

kde $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ [mm] je aritmetický průměr délek úhlopříček a F zkušební zatížení v N.

Příklady označování:

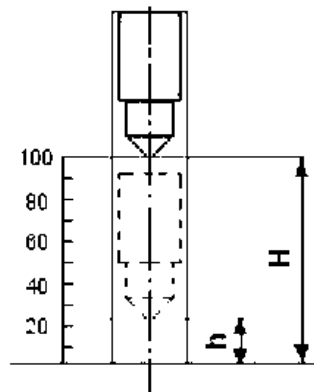
640 HV je tvrdość podle Vickerse při stanovené zatížení 294,2N působícím po standardní dobu

640 HV1 je tvrdość 640 dle Vickerse stanovené při zkušebním zatížení 9,81N působícím po standardní dobu

640 HV 30/20 je tvrdost 640 dle Vickerse stanovená při zatížení 294,2N působícím po dobu 20s.

2.5.4 Zkouška podle Shoreho

V praxi se používá také odrazová zkouška založená na principu pružného odrazu závaží, spuštěného z určité výšky od zkoušeného materiálu. Používaný přístroj se nazývá Shoreho skleroskop. Zjištěná výška odskoku závaží je přímo hodnota tvrdosti HSh (tvrdost podle Shoreho). (ČSN EN ISO 868 z 2/1999) [13,17]



Obr. 19 Schéma Shoreova skleroskopu [13]

3 Experimentální zkoušky opotřebení

3.1 Výroba a příprava materiálu pro zkoušky

Jako materiál na výrobu zkušebních vzorků byla použita normalizovaná plochá ocelová tyč tažená za studena, polotovár dle ČSN 42 6522 o rozměrech: délka:1000 mm, šířka 25 mm, tloušťka 8 mm. Složení materiálu: Fe - 99,54%, Cr - 0,019%, Ni - 0,08%, Mn - 0,38%, C - 0,11%, Si- 0,018%, Cu- 0,071, S - 0,035%, P - 0,050%.

Po důkladném očištění byla ocel nařezána na rámové pile na jednotlivých dvacet kusů o délce 40 mm. Takto hotové polotovary byly následně dále třískově obráběny. Přesto, že bylo třeba ubrat na tloušťce více než jeden mm, bylo rozhodnuto neprovádět frézování

materiálu vzhledem k časové náročnosti při složitém upínání vzorků. Materiál byl proto pouze broušen. Broušení vzorků bylo provedeno na magnetické brusce tak, abychom získali přesné rozměry a požadovanou drsnost povrchu na pracovních plochách. Po broušení byly u vzorků ručně sraženy hrany. Bylo tak získáno 20 vzorků o rozměrech 40x24x7 mm. Vzorky byly označeny pořadovými čísly od 1 do 20 pomocí razníku. Následně byly vzorky na vrchní plošce označeny důlčičkem z důvodu dodržení orientace při jejich upínání do přístroje měřícího abrazivní opotřebení. Na takto upravených vzorcích byla následně zjišťována tvrdost podle Vickerse pomocí univerzálního tvrdoměru. Bylo použito standardní zatížení 294,2N po dobu patnácti sekund.



Obr. 20 Univerzální tvrdoměr

Každý z dvaceti vzorků byl měřen jednou a následně byla vypočtena průměrná tvrdost

dle vzorce: $HV = 0,1891 \frac{F}{u^2}$, která činila 204 HV.

Vzorek	u_1	u_2	u [mm]
1	0,523	0,524	0,524
2	0,520	0,528	0,524
3	0,530	0,522	0,526
4	0,528	0,517	0,523
5	0,525	0,518	0,522
6	0,523	0,518	0,521
7	0,525	0,521	0,523
8	0,522	0,522	0,522
9	0,526	0,521	0,524
10	0,516	0,508	0,512
11	0,524	0,525	0,526
12	0,530	0,530	0,530
13	0,520	0,513	0,516
14	0,524	0,526	0,525
15	0,527	0,520	0,524
16	0,513	0,513	0,513
17	0,526	0,527	0,527
18	0,516	0,515	0,516
19	0,516	0,515	0,516
20	0,527	0,527	0,527

Tab. 1 Uhlopříčky po vtisku jehlanu naměřené na jednotlivých vzorcích

Vzorek	u [mm]	HV	Vzorek	u [mm]	HV
1	0,524	203	11	0,526	201
2	0,524	203	12	0,530	198
3	0,526	201	13	0,516	209
4	0,523	204	14	0,525	202
5	0,522	204	15	0,524	203
6	0,521	205	16	0,513	211
7	0,523	203	17	0,526	201
8	0,522	204	18	0,516	209
9	0,524	203	19	0,516	209
10	0,512	212	20	0,527	200
Průměr: 204 HV					

Tab. 2 Tvrdosti jednotlivých vzorků v HV

U poloviny vzorků byla ponechána současná tvrdost. Druhá polovina vzorků byla následně žhána, aby byly získány vzorky dvou rozdílných tvrdostí. Pro velmi nízký obsah uhlíku (0,11%) v oceli nebylo možné materiál kalit a dosáhnout tak vyšší tvrdosti vzorku. Proto bylo rozhodnuto připravit vzorky tvrdosti nižší a polovina vzorků byla tedy žhána.



Obr.21a Pec Carbolite



Obr.21b Pohled do vnitřního prostoru pece

Před žíháním v peci Carbolite byly vzorky natřeny ochranným prostředkem proti oxidaci a oduhlíčení Condursal Z1100 od firmy Nussle Hartetechnik Nagold. Poté byly uloženy do pece vyhřáté na 950 °C po dobu jedné hodiny, následně byla teplota v peci snížena na 700 °C a vzorky zde ponechány po dobu 6 hodin. Poté se vzorky nechaly chladnout na vzduchu. U vzorků byly tradičním způsobem odstraněny okuje a následně byly vzorky opět broušeny na magnetické brusce pro dosažení kvalitního povrchu na pracovní ploše. Na takto upravených žíhaných vzorcích byla znovu měřena jejich tvrdost. Každý z deseti vzorků se měřil jednou a byla vypočtena průměrná tvrdost 133 HV.

Vzorek	u_1	u_2	u [mm]
11	0,648	0,646	0,647
12	0,639	0,633	0,636
13	0,662	0,658	0,660
14	0,664	0,654	0,659
15	0,643	0,644	0,644
16	0,650	0,640	0,645
17	0,647	0,648	0,648
18	0,649	0,641	0,645
19	0,651	0,650	0,651
20	0,645	0,636	0,641

Tab.3 Uhlopříčky jehlanu HV naměřené na jednotlivých vzorcích

Vzorek	u [mm]	HV
11	0,647	133
12	0,636	137
13	0,660	128
14	0,659	128
15	0,644	134
16	0,645	134
17	0,647	133
18	0,645	134
19	0,651	132
20	0,641	136
Průměr: 133 HV		

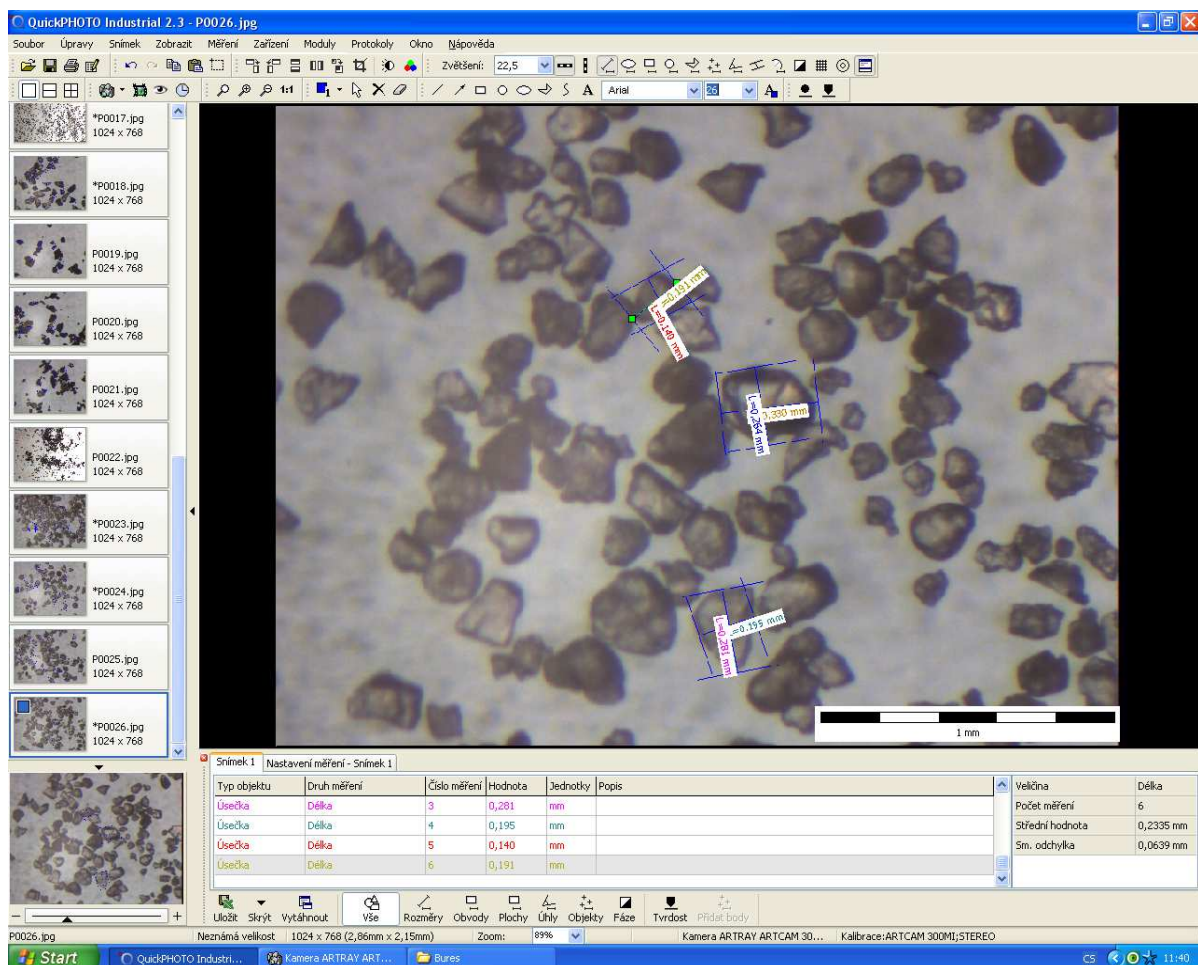
Tab.4 Tvrdost jednotlivých vzorků

Získali jsme tak dvacet vzorků o dvou tvrdostech. Deset o tvrdosti 133 HV a zbylých deset o tvrdosti 204 HV. Obě dvě sady byly tedy velice měkké, neměřitelné Rocwellovou metodou.

3.2 Výběr a příprava abraziva

Pro naše měření byly zvoleny 3 druhy abraziva o rozdílných tvrdostech a stejné zrnitosti:

1. Ocelová drť s označením GH80, zakoupená od společnosti PKIT Praha s.r.o. Jedná se o granulát o tvrdosti 900 HV a zrnitosti 0,1- 0,3 mm.
2. Křemičitý písek (SiO_2) o tvrdosti 950 HV byl přesíván pomocí dvou sít tak aby bylo dosaženo stanovené zrnitosti 0,1- 0,3 mm.
3. Nejtvrďší materiál byl použit Korund (Al_2O_3) s označením F 80 o tvrdosti 2060 HV.



Obr. 22 Měření velikosti zrna programem QUICKPHOTO INDUSTRIAL 2.3

U všech tří materiálů byla pomocí stereoskopického mikroskopu SZP11-T ZOOM a programu QUICKPHOTO INDUSTRIAL 2.3 zjišťována průměrná velikost zrna tak, že bylo proměřeno vždy 100 náhodně vybraných částic abraziva. Způsob měření průměrů částic je zobrazen na obrázku č. 22



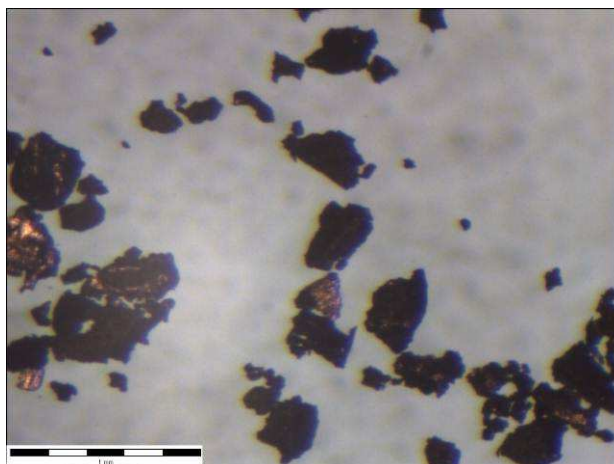
Obr.23 stereoskopický mikroskop SZP11-T ZOOM

Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

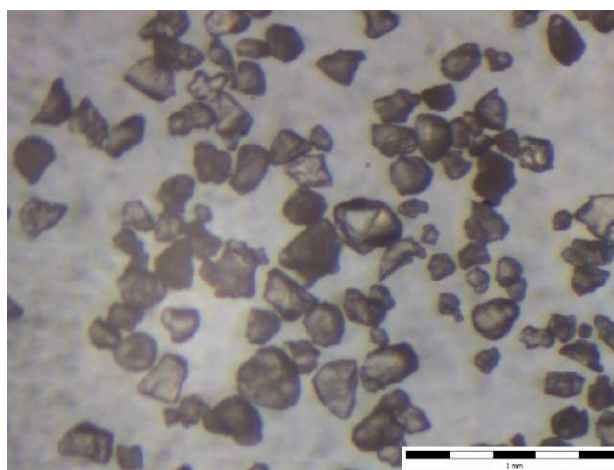
Abrazivo	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Ocel
Průměrná zrnitost [mm]	0,254125	0,222213	0,247543

Tab. 5 Průměrná zrnitost jednotlivých abraziv

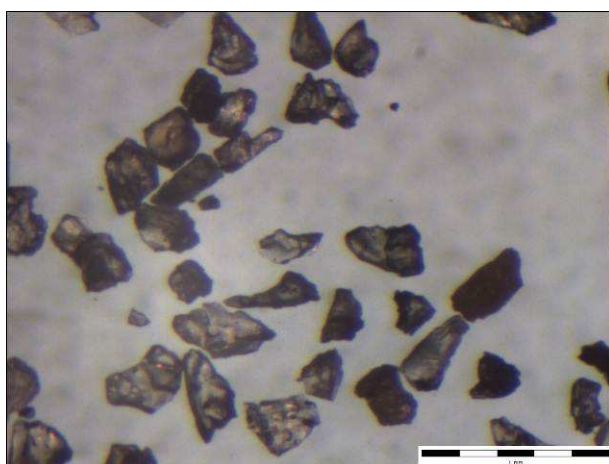
Na následujících obrázcích jsou detailně zvětšeny částice jednotlivých abraziv.



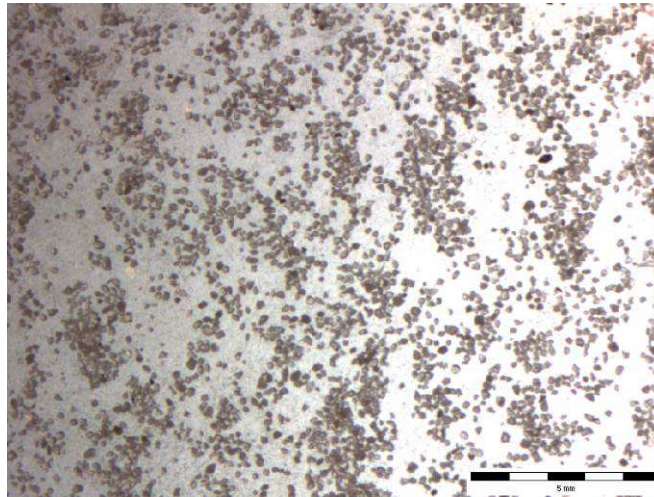
Obr.24 Detailní zvětšení abraziva - oceli (jeden dílek měřítka představuje 0,2 mm)



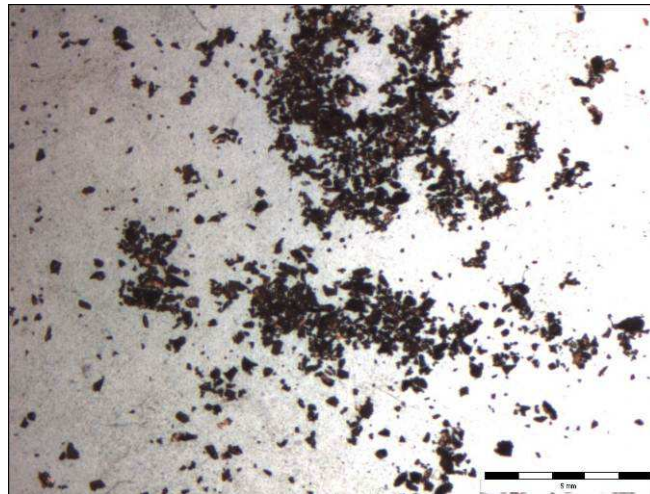
Obr.25 Detailní zvětšení abraziva SiO₂ (jeden dílek měřítka představuje 0,2 mm)



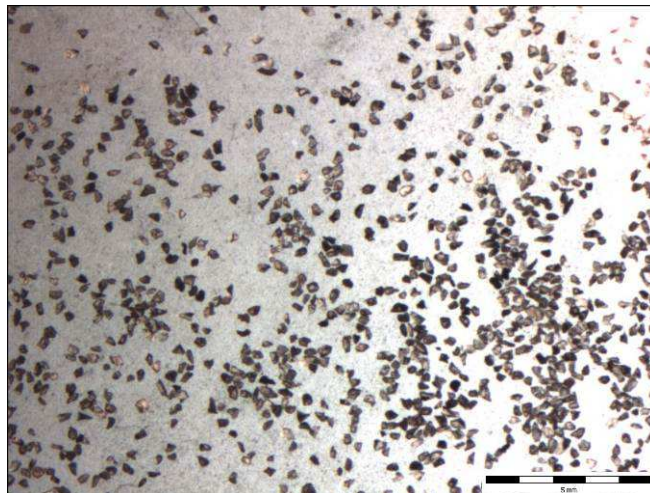
Obr.26 Detailní zvětšení abraziva Al₂O₃ (jeden dílek měřítka představuje 0,2 mm)



*Obr.27*Detailní zvětšení abraziva SiO_2 (jeden dílek měřítka představuje 1 mm)



*Obr. 28*Detailní zvětšení abraziva oceli (jeden dílek měřítka představuje 1 mm)

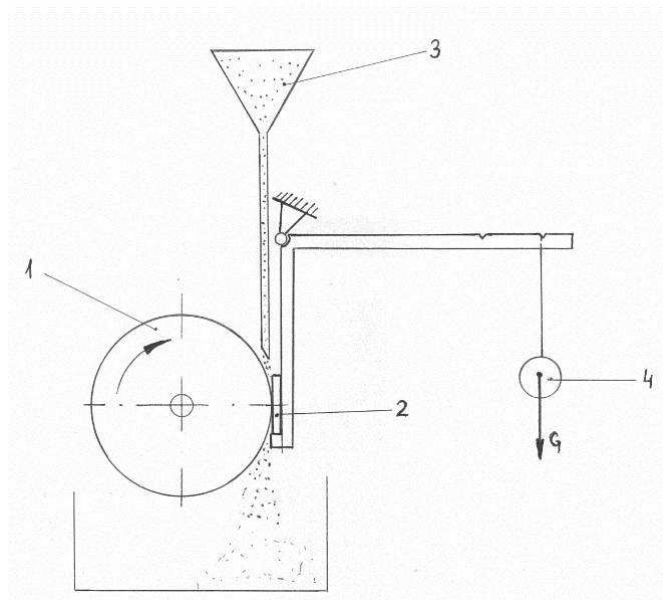


Obr.29 Detailní zvětšení abraziva Al_2O_3 (jeden dílek měřítka představuje 1 mm)

Drobné rozdíly v průměrné velikosti zrna jsou pravděpodobně způsobeny rozdílnými tvary jednotlivých abraziv.

3.3 Laboratorní zkoušení vlivu tvrdosti abraziva na odolnost proti opotřebení

Zkoušky tvrdosti abraziva na odolnost proti opotřebení byly prováděny v tzv. třítělesovém uspořádání na přístroji s volnými částicemi a pružným kotoučem. Přístroj byl sestaven v laboratoři Katedry materiálů a strojírenské technologie Technické fakulty České zemědělské university v Praze. Princip zkoušky schematicky znázorňuje obr. 30.



Obr. 30 Schéma zkušebního zařízení: 1 – Kotouč s povrchovou vrstvou z tvrdé pryže, 2 – Testovaný Vzorek, 3 – Násypka s abrazivem, 4 – Závaží zajišťující konstantní přitlačnou sílu na vzorek

Zařízení je sestaveno z rotujícího ocelového kotouče o průměru 130 mm a šířce 10 mm opatřeného po obvodu tvrdým pryžovým materiálem, dále přitlačného dvouramenného zařízení ve tvaru úhelníku, na jehož svislém rameni se upevňuje vzorek zkoušeného materiálu. Vodorovné rameno slouží jako páka zatížená na konci závažím. Nad těmito

součástí je umístěna kovová násypka s abrazivem, jejíž stopka (pádová trubice) ústí těsně nad stýkajícími se funkčními povrchy.

Průběh zkoušky byl následující: abrazivní částice o dané tvrdosti a zrnitosti, které opotřebovávají zkoušený kov, padají z násypky po stanovenou dobu mezi kotouč rotující otáčkami 400 min^{-1} a kovový vzorek, který je ke kolu přitlačován určitou silou realizovanou závažím o tíze $0,575 \text{ kg}$ zavěšeným na konci vodorovné páky. Výsledkem zkoušky byl hmotnostní úbytek materiálu.

Hmotnostní úbytky pro jednotlivá měření byly zjišťovány s přesností měření $0,0001 \text{ g}$ na digitálních analytických vahách KERN ABS 120 od německého výrobce KERN & SOHN GmbH.



Obr.31 Digitální analytické váhy KERN ABS 120[18]

Zkušební zařízení je zachyceno na obr. č. 32 Před vlastním začátkem zkoušek bylo třeba seřídít polohu etalonu tak, aby dosedal tangenciálně na pryžové kolo. Bylo to provedeno pomocí tří stavících šroubů po orientačním pokusu na dvou zkušebních etalonech. Zároveň byla upravena poloha vyústění násypky tak, aby abrazivo dopadalo přímo mezi kotouč a testovaný vzorek. Podmínky měření byly nastaveny tak, aby každé měření na vzorku probíhalo při zatížení 27 N přesně jednu minutu. Pro vyloučení nepřesnosti měření času a lepší reprodukovatelnost výsledků byla předem na digitální váze s přesností $0,1\text{g}$ zjištěna hmotnost každého druhu abraziva, které projde násypkou přesně za dobu jedné minuty. Tyto hmotnosti činily: $220,0 \text{ g}$ pro SiO_2 , $248,5 \text{ g}$ pro Al_2O_3 a $433,0 \text{ g}$ pro ocel. Takto zjištěné

množství abraziva bylo předem naváženo pro každé měření. Pro každé ze tří zvolených abraziv bylo použito vždy šest ocelových vzorků, tři vzorky o tvrdosti 204 HV a tři o tvrdosti 133 HV. Na každém vzorku bylo celkem provedeno 11 měření po dobu jedné minuty, kterým předcházelo tzv. nulté měření, aby se na vzorku vytvořila konstantní styková plocha. Aby nedocházelo k přehřívání kotouče při měření a nepřesnostem s tím spojeným byla po každém čtvrtém minutovém měření zařazena přestávka na dobu 10 minut.

Po nultém měření byly vzorky očištěny v acetonu, osušeny na vzduchu a následně dosušeny proudem horkého vzduchu a poté zváženy na vahách s přesností 0,0001 g pro zjištění jejich počáteční hmotnosti, od které byly zjišťovány jednotlivé hmotnostní úbytky. Stejným způsobem byly vzorky očištěny vždy před každým dílčím zjištěním jejich změněné hmotnosti. Hmotnosti vzorků byly zjišťovány po prvním, druhém, pátém, sedmém, desátém a jedenáctém měření.



Obr. 32 Zkušební zařízení Pro zkoušku s volným abrazivem

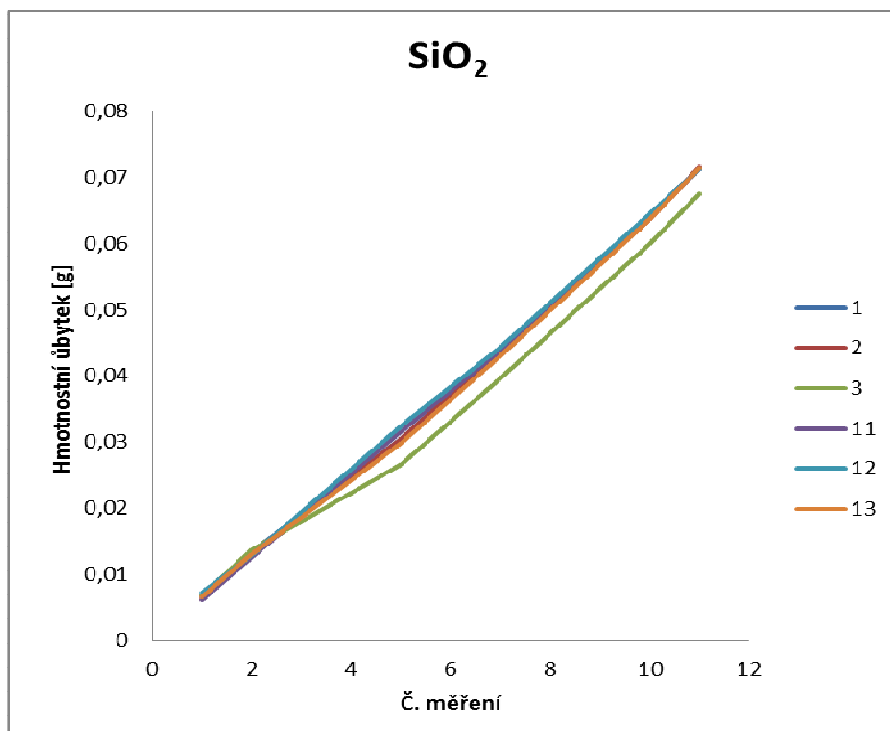
Zjištěné hodnoty dílčích hmotností jednotlivých vzorků byly průběžně zaznamenávány. Po pořízení všech požadovaných hodnot byly tyto výsledky přeneseny do tabulek v aplikaci Microsoft Excel a následně vypočítány hmotnostní úbytky a výsledky zkoušek zpracovány graficky.

3.4 Výsledky měření a vyhodnocení experimentálních zkoušek opotřebení

Zjištěné výsledky abrazivního opotřebení na vzorcích zvoleného ocelového materiálu o složení: Fe - 99,54%, Cr - 0,019%, Ni - 0,08%, Mn - 0,38%, C - 0,11%, Si- 0,018%, Cu- 0,071, S - 0,035%, P - 0,050%. s použitím korundu Al_2O_3 , oceli a křemene SiO_2 jako abraziv, jsou uvedeny v následujících tabulkách a z nich plynoucí závislosti jsou zobrazeny graficky.

Tvrдость	Vzorek	Číslo měření					
		1	2	5	7	10	11
204 HV	1	0,0067	0,0134	0,0305	0,0439	0,0643	0,0714
	2	0,0062	0,0130	0,0305	0,0436	0,0637	0,0715
	3	0,0068	0,0137	0,0266	0,0396	0,0600	0,0676
133 HV	11	0,0061	0,0125	0,0316	0,0438	0,0640	0,0713
	12	0,0072	0,0129	0,0324	0,0443	0,0644	0,0713
	13	0,0066	0,0130	0,0298	0,0429	0,0637	0,0714

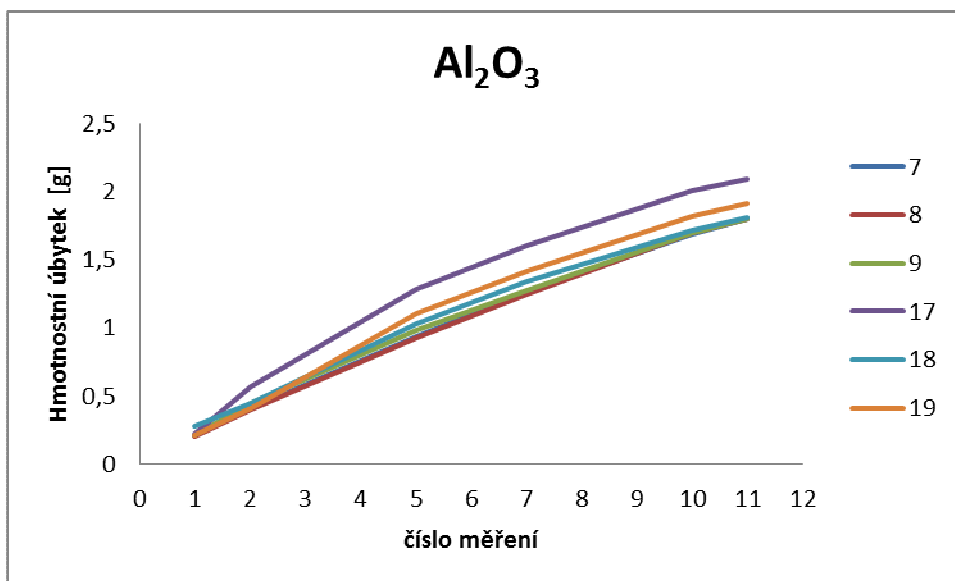
Tab. 6 Hmotnostní úbytky v gramech testovaných vzorků při použití abraziva SiO_2



Obr. 33 Graf znázornění hmotnostních úbytků jednotlivých vzorků odvou tvrdostech v průběhu jedenácti minutových měření při použití abraziva SiO_2

		Číslo měření					
Tvrдост	Vzorek	1	2	5	7	10	11
204 HV	7	0,2100	0,4079	0,9393	1,2638	1,6905	1,8013
	8	0,2038	0,3985	0,9229	1,2443	1,7004	1,7981
	9	0,2171	0,4496	0,9805	1,2741	1,7016	1,8046
133 HV	17	0,2197	0,5711	1,2862	1,6036	2,0095	2,0924
	18	0,2768	0,4505	1,0310	1,3361	1,7145	1,8085
	19	0,2148	0,4109	1,1012	1,4148	1,8215	1,9165

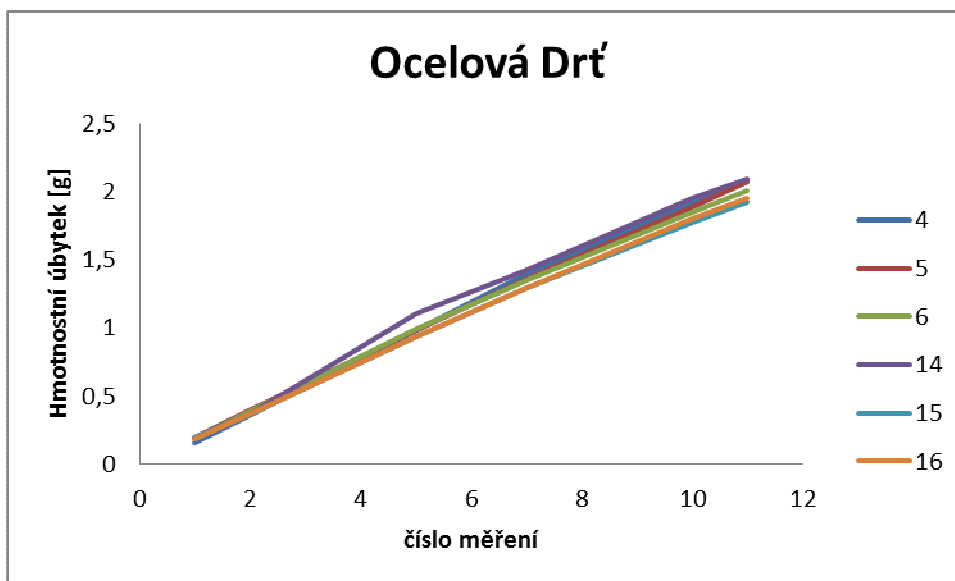
Tab.7 Hmotnostní úbytky v gramech testovaných vzorků při použití abraziva Al_2O_3



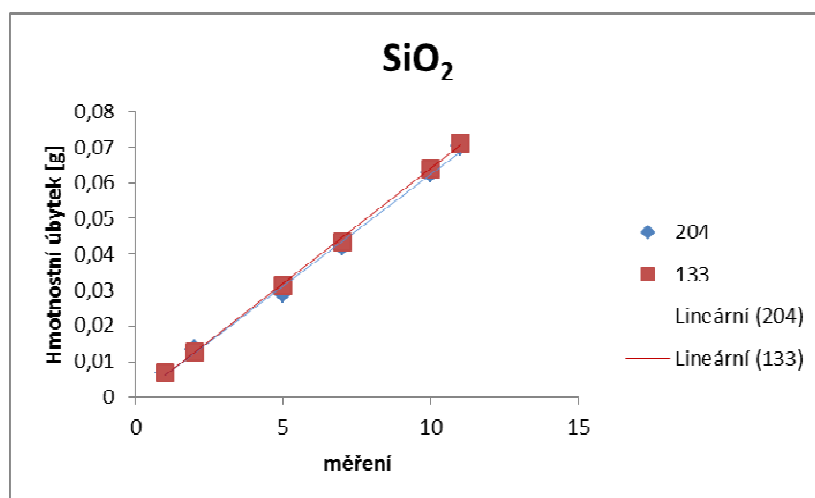
Obr. 34 Graf znázornění hmotnostních úbytků jednotlivých vzorků o dvou tvrdostech v průběhu jedenácti minutových měřeních při použití abraziva Al₂O₃

Tvrdość	Vzorek	Číslo měření					
		1	2	5	7	10	11
204 HV	4	0,1607	0,3601	0,9830	1,3949	1,9150	2,0780
	5	0,1959	0,3994	0,9796	1,3554	1,8844	2,0775
	6	0,1861	0,3888	0,9954	1,3459	1,8515	2,0099
133 HV	14	0,1969	0,3752	1,1099	1,4276	1,9499	2,0930
	15	0,1963	0,3730	0,9395	1,2935	1,7739	1,9227
	16	0,1875	0,3737	0,9337	1,2918	1,7992	1,9492

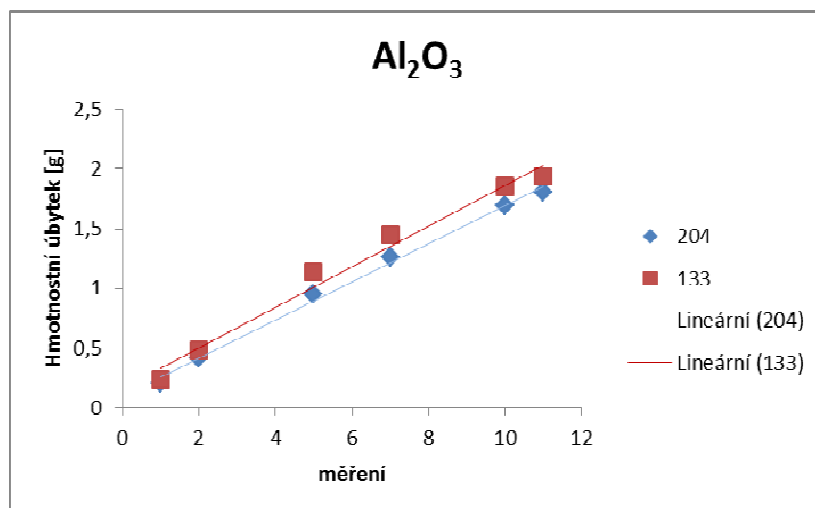
Tab.8 Hmotnostní úbytky v gramech testovaných vzorků při použití abraziva oceli



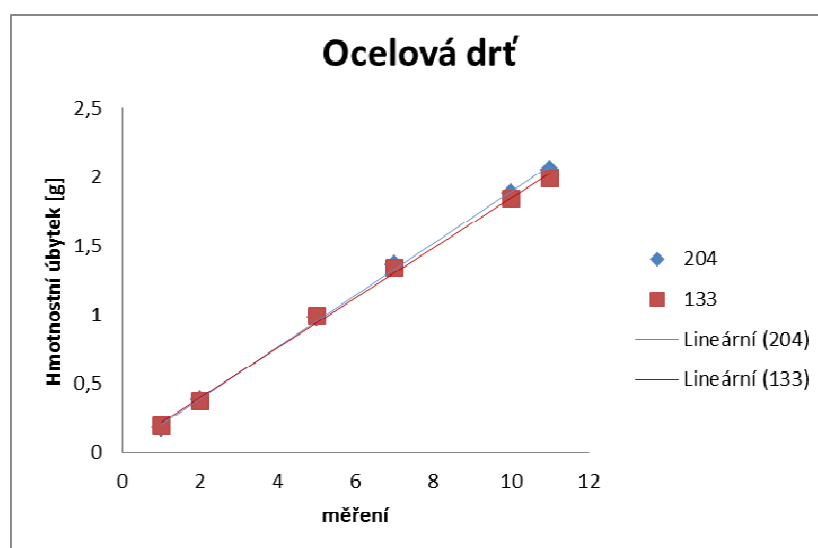
Obr. 35 Graf znázornění hmotnostních úbytků jednotlivých vzorků o dvou tvrdostech v průběhu jedenácti minutových měření při použití abraziva oceli



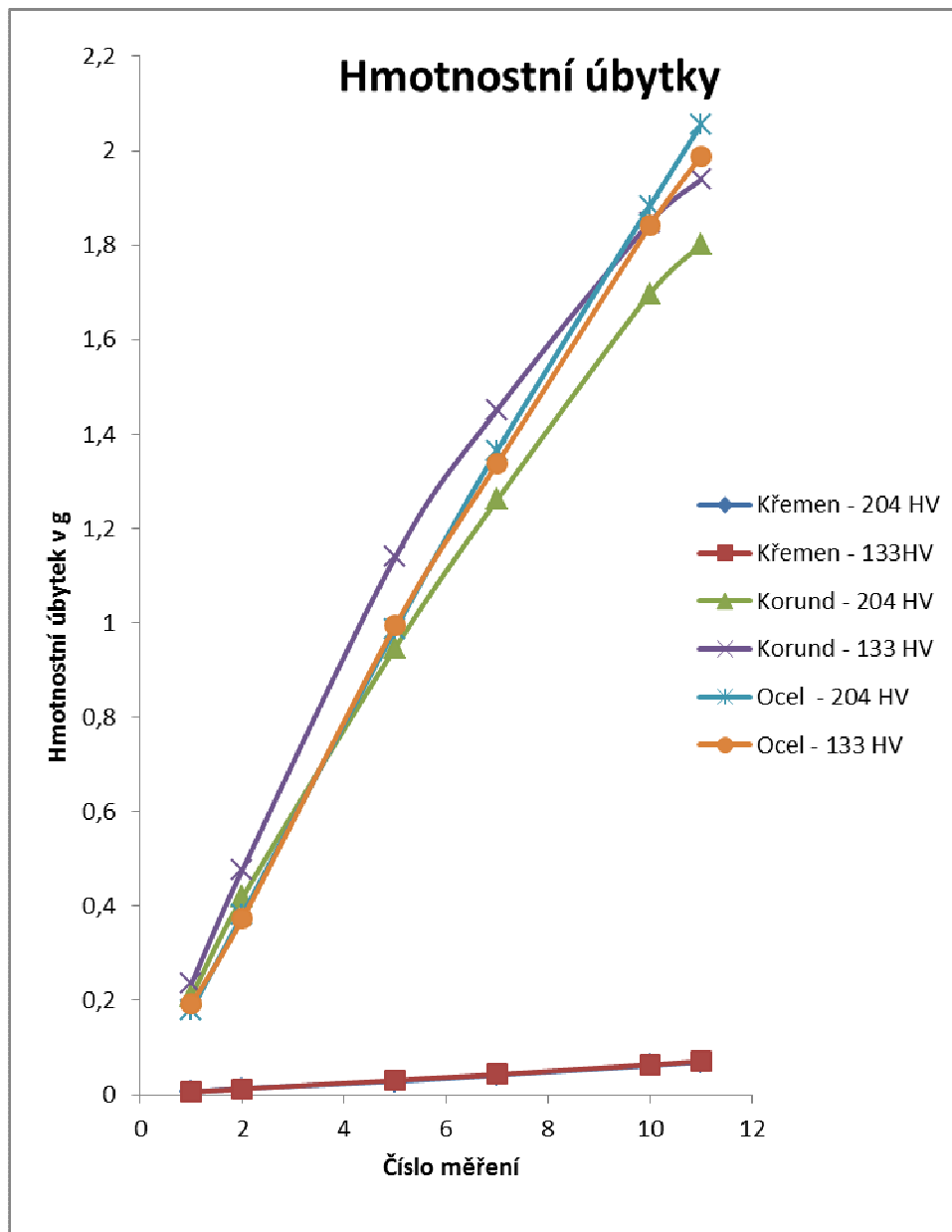
Obr. 36 Graf porovnání hmotnostních úbytků na materiálech o tvrdosti 133HV a 204HV způsobených abrazivem SiO₂ za 11 měření.



Obr. 37 Graf porovnání hmotnostních úbytků na materiálech o tvrdosti 133HV a 204HV způsobených abrazivem Al₂O₃ za 11 měření.



Obr. 38 Graf porovnání hmotnostních úbytků na materiálech o tvrdosti 133HV a 204HV způsobených abrazivem Ocelí za 11 měření.



Obr. 39 Graf porovnání tří abraziv rozdílné tvrdosti a dvou vzorků o rozdílné tvrdosti

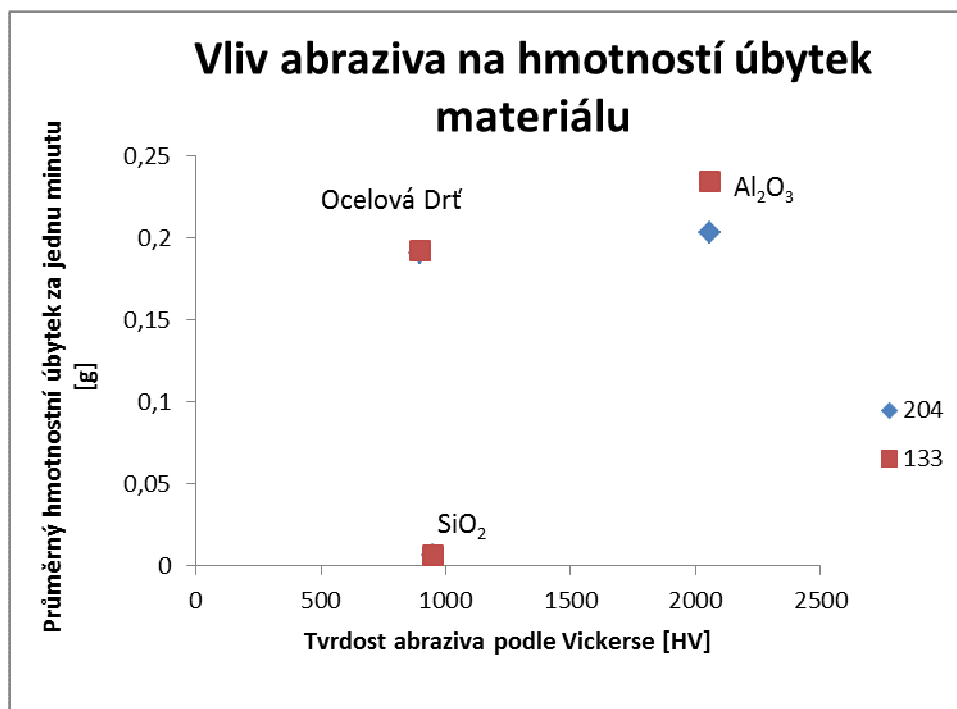
Porovnání abrazivních účinků korundu a křemene ukazuje na to, že abrazivum s větší tvrdostí opotřebovává kov více než abrazivum s tvrdostí nižší. Tomu však neodpovídají výsledky opotřebování zjištěné působením dvou srovnatelně tvrdých abraziv, a to křemene a oceli, kdy částice křemene opotřebovaly vzorky kovu podstatně méně než ocelové abrazivní částice. Tyto rozdílné výsledky v opotřebování nepochybně ovlivňují další faktory, především ostrost hran a tvar abrazivních částic, jak je patrné z obrázků č. 24, 25 a 26. Srovnatelnou abrazivní schopnost vůči zvolenému ocelovému materiálu obou tvrdostí vykazovaly korund a ocel. Úbytky hmotnosti opotřebovaných vzorků byly přibližně 28 krát vyšší ve srovnání s úbytky dosaženými abrazivním působením křemene, jak je zřejmé z grafu č. 7. Vzhledem

k tomu, že obě tvrdosti použitých vzorků byly výrazně nižší než tvrdosti použitých abraziv, neměl rozdíl jejich tvrdosti žádný vliv na hmotnostní úbytky, což je patrné z grafů č. 4, 5 a 6 .

V následující tabulce a grafu jsou uvedeny průměrné hodnoty hmotnostních úbytků vždy za jednu minutu při použití obou materiálů a všech tří abraziv.

	Ocel	Al ₂ O ₃	SiO ₂
HV	900	2060	950
204	0,191135	0,203049	0,006298
133	0,192628	0,234581	0,006402

Tab.9 Průměrné hmotnostní úbytky za dobu jedné minuty



Obr. 40 Graf vlivu jednotlivých abraziv na hmotnostní úbytek vzorku měřený za jednu minutu



a)

b)

c)

Obr. 41 Vzorky opotřebené jednotlivými abrazivy a) – SiO_2 , b) – Ocelová drť, c) – Al_2O_3

4 Závěr

Získávání poznatků o faktorech, které mají významný vliv na opotřebení materiálu má význam především pro technickou praxi. Cílem práce bylo shromáždit literární podklady o vlivu tvrdosti abraziva na odolnost proti opotřebení a vyhodnotit výsledky experimentálních zkoušek opotřebení.

Práce se ve své teoretické části zaměřuje na současný stav problematiky opotřebení a s ním úzce souvisejícího tření. Charakterizuje jednotlivé druhy opotřebení s důrazem na opotřebení abrazivní. Podrobněji pojednává o tvrdosti abraziva a jejím vlivu na odolnost proti opotřebení.

Provedeným zkoušením vlivu tvrdosti abraziva za použití metody s volnými abrazivními částicemi bylo pro ocelové vzorky o tvrdosti 204 HV a 133 HV a tři abrazivní materiály (korund, ocel, křemen) zjištěno, že tvrdost vzorků, která byla v obou případech velice nízká (204 a 133 HV) a příliš se nelišila, neměla žádný vliv na intenzitu opotřebení. U tří testovaných tvrdostí abraziva nebyla prokázána úměra mezi velikostí jejich tvrdosti a velikostí opotřebení vzorků, neboť abrazivum oceli (900 HV), které bylo přibližně stejně tvrdé jako křemen (950 HV), způsobilo 28 krát vyšší úbytek hmotnosti vzorku oproti křemeni, zatímco korund (2060 HV), který byl přibližně 2 krát tvrdší než ocel, prokázal v porovnání s ocelí téměř shodné výsledky.

Uvedené výsledky vedou k závěru, že pro zkoušení byl zvolen u obou druhů vzorku poměrně měkký materiál. Porovnání abrazivních účinků použitých abraziv dokazuje, že kromě tvrdosti, která významně ovlivňuje opotřebení kovů, se výrazně podílí na otěru materiálu také tvar částic a ostrost hran.

Vliv tvrdosti abrazivních částic různých abrazivních materiálů patří mezi významné faktory ovlivňující opotřebení kovových materiálů, proto je potřebné získané poznatky dále rozšiřovat. Na základě již zjištěných výsledků je třeba věnovat při další práci pozornost výběru zkušebních materiálů, aby bylo možné nově dosažené výsledky lépe aplikovat v praxi.

5 Literatura:

- [1] VOCEL, M – DUFEK, V a kol. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha, STNL 1976. 376 s.
- [2] BLAŠKOVIČ, P.- BALLA, J – DZIMKO, M *Tribológia*. Bratislava, ALFA 1990. 360 s.
- [3] ČSN 01 5050. Opotřebení materiálu. Názvosloví. 1969
- [4] BHARAT, B. – GUPTA B.K. *Handbook of Tribology*. New York, McGraw-Hill, Inc. 1991. 1171s.
- [5] CHRUŠČOV, M.M. – BABIČEV, M.A. *Abrazivnoje Iznašivánije*, Moskva, Nauka, 1970. 251 s.
- [6] NATHAN, G.K – JONES, W. J. D. : *The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions*. Wear, 1966.
- [7] ČERVENÝ, J. *Abrazivní a erozivní opotřebení lopatek míchadel*. Povrcháři [online]. 2008 [cit. 2012 -08-15]. Dostupný z WWW: http://www.povrchari.cz/kestazeni/200804_povrchari.pdf
- [8] TENENBAUM, M. M. *Iznosostojkost' konstrukcionnych materialov i detalej mašin pri abrazivnom iznašivani*. Moskva, Mašinostrojenije 1966. 330s.
- [9] KOSŤECKIJ, B. I. *Odolnost strojních součástí proti opotřebení*, Praha, Průmyslové Vydavatelství 1952. 184 s.
- [10] BUTTERY, T.C.- ARCHARD, J.F. *Grinding and abrasive wear*, London , Institution of Mechanical Engineers, 1971. 10s.
- [11] HLUCHÝ, M – KOLOUCH, J *Strojírenská technologie I*, Praha, Scientia, 2002. 266s.
- [12] GÜRLEYIK, M. I. *Gleitverschleiss - Untersuchungen an Metallen und nichtmetallischen Hartstoffen unter Wirkung körniger Gegenstoff*, Bamberg, Rodenbusch, 1967
- [13] conVERTER [online]. 2002 [cit. 2012 -08-20]. Dostupné z : <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-shore.htm>
- [14] KAŠPAROVÁ, M - ZAHÁLKA, F- HOUDKOVÁ,Š. *Wear with respect to load and to abrasive sand under Dry Sand/Steel Wheel abrasion condition* [online]. 2008 [cit. 2012 -08-10] dostupné z : skodavyzkum.cz/projekty/nastriky/doc/vrstvy_povlaky2008.pdf

- [15] KAŠPAROVÁ, M - ZAHÁLKA, F- HOUDKOVÁ,Š . *Hodnocení abrazivní a adhezivní odolnosti materiálů*. [online]. 2009 [cit. 2012 -08-11] dostupné z :
http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_09/Lists/Papers/054_e.pdf
- [16] SUCHÁNEK, J. Abrazivní opotřebení kovových materiálů. *Tribotechnika* [online]. 2010, [cit.2012-12-10]. Dostupné z:
<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html>
- [17] DORAZIL, E *Strojírenské materiály a povrchové úpravy*. Brno, VUT, 1988. 331s
- [18] KONEKO marketing . [online]. [cit. 2013 - 02-20] dostupné z :
http://www.obchod.laboratore.cz/analyticke_vahy_abs__120-4~z884.html
- [19] MACEK, K. *Nauka o materiálu*. Praha. ČVUT, 2007.89s.
- [20] Měření Tvrdosti [online]. 2005 [cit. 2013 -02-10]. Dostupné z :
<http://www.merenitvrdosti.cz/tabulka-srovnani-tvrdosti-podle-ruznych-metod-menreni.html>

Seznam obrázků:

Obr. 1 Případy relativního pohybu těles

Obr. 2 Symbolické znázornění jednotlivých druhů opotřebení

Obr. 3 Schéma adhezivního opotřebení

Obr. 4 Schéma mechanismu abrazivního opotřebení

Obr. 5 Schéma mechanismu erozivního opotřebení

Obr. 6 Schéma mechanismu kavitačního opotřebení

Obr. 7a Schéma mechanismu únavového opotřebení

Obr. 7b Mechanismus únavového opotřebení

Obr. 8 Schéma mechanismu vibračního opotřebení

Obr. 9 Závislost objemového otěru při konstantní dráze kluzu na velikosti abrazivního zrna a zatížení vzorků

Obr. 10 Závislost poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení ψ kovových materiálů na jejich tvrdosti

Obr. 11 Vztah mezi poměrem tvrdosti abraziva a opotřebovaného kovu a poměrnou odolností proti opotřebení

Obr. 12 Závislost poměrného opotřebení $1/\psi$ a poměrné odolnosti proti opotřebení ψ zkoušeného kovu o tvrdosti H_k na tvrdosti abraziva H_a

Obr. 13 Vztah mezi objemovým otěrem kovu a poměrem $\frac{H_a}{H_k}$ pro tři druhy abraziva

Obr. 14 Závislost délkového otěru W_l na tvrdosti abraziva u některých typů ocelí a litin

Obr. 15 Schémata přístrojů na zkoušky odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení

Obr. 16 Schéma zkoušky tvrdosti podle Brinella

Obr. 17a Diamantový kužel pro Rockwellovy zkoušky tvrdosti (HRC, HRA)

Obr. 17b Kulička pro Rockwellovy zkoušky (HRB, HRD, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK)

Obr. 18 Diamantový čtyřboký jehlan pro Vickersovu zkoušku

Obr. 19 Schéma Shoreova skleroskopu

Obr. 20 Universální tvrdoměr

Obr. 21a Pec Carbolite

Obr. 21b Pohled do vnitřního prostoru pece

Obr. 22 Měření velikosti zrna programem QUICKPHOTO INDUSTRIAL 2.3

Obr. 23 Stereoskopický mikroskop SZP11-T ZOOM

Obr. 24 Detailní zvětšení abraziva – oceli

Obr. 25 Detailní zvětšení abraziva SiO₂

Obr. 26 Detailní zvětšení abraziva Al₂O₃

Obr. 27 Detailní zvětšení abraziva SiO₂

Obr. 28 Detailní zvětšení abraziva oceli

Obr. 29 Detailní zvětšení abraziva Al₂O₃

Obr. 30 Schéma zkušebního zařízení

Obr. 31 Digitální analytické váhy KERN ABS 120

Obr. 32 Zkušební zařízení Pro zkoušku s volným abrazivem

Obr. 33 Graf znázornění hmotnostních úbytků jednotlivých vzorků od dvou tvrdostech v průběhu jedenácti minutových měření při použití abraziva SiO₂

Obr. 34 Graf znázornění hmotnostních úbytků jednotlivých vzorků o dvou tvrdostech v průběhu jedenácti minutových měření při použití abraziva Al₂O₃

Obr. 35 Graf znázornění hmotnostních úbytků jednotlivých vzorků o dvou tvrdostech v průběhu jedenácti minutových měření při použití abraziva oceli

Obr. 36 Graf porovnání hmotnostních úbytků na materiálech o tvrdosti 133HV a 204HV způsobených abrazivem SiO₂ za 11 měření.

Obr. 37 Graf porovnání hmotnostních úbytků na materiálech o tvrdosti 133HV a 204HV způsobených abrazivem Al₂O₃ za 11 měření.

Obr. 38 Graf porovnání hmotnostních úbytků na materiálech o tvrdosti 133HV a 204HV způsobených abrazivem Ocelí za 11 měření

Obr. 39 Graf porovnání tří abraziv rozdílné tvrdosti a dvou vzorku o rozdílné tvrdosti

Obr. 40 Graf vlivu jednotlivých abraziv na hmotnostní úbytek vzorku měřený za jednu minutu

Obr. 41 Vzorky opotřebené jednotlivými abrazivy

Seznam tabulek:

Tab. 1 Uhlopříčky po vtisku jehlanu naměřené na jednotlivých vzorcích

Tab. 2 Tvrdosti jednotlivých vzorků v HV

Tab. 3 Uhlopříčky jehlanu HV naměřené na jednotlivých vzorcích

Tab. 4 Tvrdost jednotlivých vzorků

Tab. 5 Průměrná zrnitost jednotlivých abraziv

Tab. 6 Hmotnostní úbytky v gramech testovaných vzorků při použití abraziva SiO_2

Tab. 7 Hmotnostní úbytky v gramech testovaných vzorků při použití abraziva Al_2O_3

Tab. 8 Hmotnostní úbytky v gramech testovaných vzorků při použití abraziva oceli

Tab. 9 Průměrné hmotnostní úbytky za dobu jedné minuty

Příloha 1. Tabulka srovnání tvrdosti podle různých metod měření

Hodnoty tvrdostí lze srovnávat jen při použití stejné metody a stejného zkušebního zatížení. Převody hodnot tvrdosti podle různých metod jsou pouze orientační. Takové převody tvrdosti jsou možné jen na základě provedených porovnávacích zkoušek.

Převod tvrdosti je obsahem normy ČSN EN ISO 18265 (420379) Kovové materiály - Převod hodnot tvrdosti (ISO 18265:2003).

Rockwell						Rockwell Superficial				Brinell		Vickers	Shore
A	B	C	D	E	F	15-N	30-N	45-N	30-T	3000 kg	500 kg	136	
60kg Brale	100kg 1/16" Ball	150kg Brale	100kg Brale	100kg 1/8" Ball	60kg 1/16" Ball	15kg Brale	30kg Brale	45kg Brale	30 kg 1/16" Ball	10mm Ball Steel	10mm Ball Steel	Diamond Pyramid	Sciro-scope
86.5	---	70	78.5	---	---	94.0	86.0	77.6	---	---	---	1076	101
86.0	---	69	77.7	---	---	93.5	85.0	76.5	---	---	---	1044	99
85.6	---	68	76.9	---	---	93.2	84.4	75.4	---	---	---	940	97
85.0	---	67	76.1	---	---	92.9	83.6	74.2	---	---	---	900	95
84.5	---	66	75.4	---	---	92.5	82.8	73.2	---	---	---	865	92
83.9	---	65	74.5	---	---	92.2	81.9	72.0	---	739	---	832	91
83.4	---	64	73.8	---	---	91.8	81.1	71.0	---	722	---	800	88
82.8	---	63	73.0	---	---	91.4	80.1	69.9	---	705	---	772	87
82.3	---	62	72.2	---	---	91.1	79.3	68.8	---	688	---	746	85
81.8	---	61	71.5	---	---	90.7	78.4	67.7	---	670	---	720	83
81.2	---	60	70.7	---	---	90.2	77.5	66.6	---	654	---	697	81
80.7	---	59	69.9	---	---	89.8	76.6	65.5	---	634	---	674	80
80.1	---	58	69.2	---	---	89.3	75.7	64.3	---	615	---	653	78
79.6	---	57	68.5	---	---	88.9	74.8	63.2	---	595	---	633	76
79.0	---	56	67.7	---	---	88.3	73.9	62.0	---	577	---	613	75
78.5	120	55	66.9	---	---	87.9	73.0	60.9	---	560	---	595	74
78.0	120	54	66.1	---	---	87.4	72.0	59.8	---	543	---	577	72
77.4	119	53	65.4	---	---	86.9	71.2	58.6	---	525	---	560	71
76.8	119	52	64.6	---	---	86.4	70.2	57.4	---	500	---	544	69
76.3	118	51	63.8	---	---	85.9	69.4	56.1	---	487	---	528	68
75.9	117	50	63.1	---	---	85.5	68.5	55.0	---	475	---	513	67
75.2	117	49	62.1	---	---	85.0	67.6	53.8	---	464	---	498	66
74.7	116	48	61.4	---	---	84.5	66.7	52.5	---	451	---	484	64
74.1	116	47	60.8	---	---	83.9	65.8	51.4	---	442	---	471	63
73.6	115	46	60.0	---	---	83.5	64.8	50.3	---	432	---	458	62

73.1	115	45	59.2	---	---	83.0	64.0	49.0	---	421	---	446	60
72.5	114	44	58.5	---	---	82.5	63.1	47.8	---	409	---	434	58
72.0	113	43	57.7	---	---	82.0	62.2	46.7	---	400	---	423	57
71.5	113	42	56.9	---	---	81.5	61.3	45.5	---	390	---	412	56
70.9	112	41	56.2	---	---	80.9	60.4	44.3	---	381	---	402	55
70.4	112	40	55.4	---	---	80.4	59.5	43.1	---	371	---	392	54
69.9	111	39	54.6	---	---	79.9	58.6	41.9	---	362	---	382	52
69.4	110	38	53.8	---	---	79.4	57.7	40.8	---	353	---	372	51
68.9	110	37	53.1	---	---	78.8	56.8	39.6	---	344	---	363	50
68.4	109	36	52.3	---	---	78.3	55.9	38.4	---	336	---	354	49
67.9	109	35	51.5	---	---	77.7	55.0	37.2	---	327	---	345	48
67.4	108	34	50.8	---	---	77.2	54.2	36.1	---	319	---	336	47
66.8	108	33	50.0	---	---	76.6	53.3	34.9	---	311	---	327	46
66.3	107	32	49.2	---	---	76.1	52.1	33.7	---	301	---	318	44
65.8	106	31	48.4	---	---	75.6	51.3	32.5	---	294	---	310	43
65.3	105	30	47.7	---	---	75.0	50.4	31.3	---	286	---	302	42
64.7	104	29	47.0	---	---	74.5	49.5	30.1	---	279	---	294	41
64.3	104	28	46.1	---	---	73.9	48.6	28.9	---	271	---	286	41
63.8	103	27	45.2	---	---	73.3	47.7	27.8	---	264	---	279	40
63.3	103	26	44.6	---	---	72.8	46.8	26.7	---	258	---	272	39
62.8	102	25	43.8	---	---	72.2	45.9	25.5	---	253	---	266	38
62.4	101	24	43.1	---	---	71.6	45.0	24.3	---	247	---	260	37
62.0	100	23	42.1	---	---	71.0	44.0	23.1	82.0	240	201	254	36
61.5	99	22	41.6	---	---	70.5	43.2	22.0	81.5	234	195	248	35
61.0	98	21	40.9	---	---	69.9	42.3	20.7	81.0	228	189	243	35
60.5	97	20	40.1	---	---	69.4	41.5	19.6	80.5	222	184	238	34
59.0	96	18	---	---	---	---	---	---	80.0	216	179	230	33
58.0	95	16	---	---	---	---	---	---	79.0	210	175	222	32
57.5	94	15	---	---	---	---	---	---	78.5	205	171	213	31
57.0	93	13	---	---	---	---	---	---	78.0	200	167	208	30
56.5	92	12	---	---	---	---	---	---	77.5	195	163	204	29
56.0	91	10	---	---	---	---	---	---	77.0	190	160	196	28
55.5	90	9	---	---	---	---	---	---	76.0	185	157	192	27
55.0	89	8	---	---	---	---	---	---	75.5	180	154	188	26
54.0	88	7	---	---	---	---	---	---	75.0	176	151	184	26
53.5	87	6	---	---	---	---	---	---	74.5	172	148	180	26
53.0	86	5	---	---	---	---	---	---	74.0	169	145	176	25
52.5	85	4	---	---	---	---	---	---	73.5	165	142	173	25
52.0	84	3	---	---	---	---	---	---	73.0	162	140	170	25
51.0	83	2	---	---	---	---	---	---	72.0	159	137	166	24
50.5	82	1	---	---	---	---	---	---	71.5	156	135	163	24
50.0	81	0	---	---	---	---	---	---	71.0	153	133	160	24
49.5	80	---	---	---	---	---	---	---	70.0	150	130	---	---

49.0	79	---	---	---	---	---	---	---	69.5	147	128	---	---
48.5	78	---	---	---	---	---	---	---	69.0	144	126	---	---
48.0	77	---	---	---	---	---	---	---	68.0	141	124	---	---
47.0	76	---	---	---	---	---	---	---	67.5	139	122	---	---
46.5	75	---	---	---	99.5	---	---	---	67.0	137	120	---	---
46.0	74	---	---	---	99.0	---	---	---	66.0	135	118	---	---
45.5	73	---	---	---	98.5	---	---	---	65.5	132	116	---	---
45.0	72	---	---	---	98.0	---	---	---	65.0	130	114	---	---
44.5	71	---	---	100.0	97.5	---	---	---	64.2	127	112	---	---
44.0	70	---	---	99.5	97.0	---	---	---	63.5	125	110	---	---
43.5	69	---	---	99.0	96.0	---	---	---	62.8	123	109	---	---
43.0	68	---	---	98.0	95.5	---	---	---	62.0	121	107	---	---
42.5	67	---	---	97.5	95.0	---	---	---	61.4	119	106	---	---
42.0	66	---	---	97.0	94.5	---	---	---	60.5	117	104	---	---
41.8	65	---	---	96.0	94.0	---	---	---	60.1	116	102	---	---
41.5	64	---	---	95.5	93.5	---	---	---	59.5	114	101	---	---
41.0	63	---	---	95.0	93.0	---	---	---	58.7	112	99	---	---
40.5	62	---	---	94.5	92.0	---	---	---	58.0	110	98	---	---
40.0	61	---	---	93.5	91.5	---	---	---	57.3	108	96	---	---
39.5	60	---	---	93.0	91.0	---	---	---	56.5	107	95	---	---
39.0	59	---	---	92.5	90.5	---	---	---	55.9	106	94	---	---
38.5	58	---	---	92.0	90.0	---	---	---	55.0	104	92	---	---
38.0	57	---	---	91.0	89.5	---	---	---	54.6	102	91	---	---
37.8	56	---	---	90.5	89.0	---	---	---	54.0	101	90	---	---
37.5	55	---	---	90.0	88.0	---	---	---	53.2	99	89	---	---
37.0	54	---	---	89.5	87.5	---	---	---	52.5	---	87	---	---
36.5	53	---	---	89.0	87.0	---	---	---	51.8	---	86	---	---
36.0	52	---	---	88.0	86.5	---	---	---	51.0	---	85	---	---
35.5	51	---	---	87.5	86.0	---	---	---	50.4	---	84	---	---
35.0	50	---	---	87.0	85.5	---	---	---	49.5	---	83	---	---
34.8	49	---	---	86.5	85.0	---	---	---	49.1	---	82	---	---
34.5	48	---	---	85.5	84.5	---	---	---	48.5	---	81	---	---
34.0	47	---	---	85.0	84.0	---	---	---	47.7	---	80	---	---
33.5	46	---	---	84.5	83.0	---	---	---	47.0	---	79	---	---
33.0	45	---	---	84.0	82.5	---	---	---	46.2	---	79	---	---
32.5	44	---	---	83.5	82.0	---	---	---	45.5	---	78	---	---
32.0	43	---	---	82.5	81.5	---	---	---	44.8	---	77	---	---
31.5	42	---	---	82.0	81.0	---	---	---	44.0	---	76	---	---
31.0	41	---	---	81.5	80.5	---	---	---	43.4	---	75	---	---
30.8	40	---	---	81.0	79.5	---	---	---	43.0	---	74	---	---
30.5	39	---	---	80.0	79.0	---	---	---	42.1	---	74	---	---
30.0	38	---	---	79.5	78.5	---	---	---	41.5	---	73	---	---
29.5	37	---	---	79.0	78.0	---	---	---	40.7	---	72	---	---

29.0	36	---	---	78.5	77.5	---	---	---	40.0	---	71	---	---
28.5	35	---	---	78.0	77.0	---	---	---	39.3	---	71	---	---
28.0	34	---	---	77.0	76.5	---	---	---	38.5	---	70	---	---
27.8	33	---	---	76.5	75.5	---	---	---	37.9	---	69	---	---
27.5	32	---	---	76.0	75.0	---	---	---	37.5	---	68	---	---
27.0	31	---	---	75.5	74.5	---	---	---	36.6	---	68	---	---
26.5	30	---	---	75.0	74.0	---	---	---	36.0	---	67	---	---
26.0	29	---	---	74.0	73.5	---	---	---	35.2	---	66	---	---
25.5	28	---	---	73.5	73.0	---	---	---	34.5	---	66	---	---
25.0	27	---	---	73.0	72.5	---	---	---	33.8	---	65	---	---
24.5	26	---	---	72.5	72.0	---	---	---	33.1	---	65	---	---
24.2	25	---	---	72.0	71.0	---	---	---	32.4	---	64	---	---
24.0	24	---	---	71.0	70.5	---	---	---	32.0	---	64	---	---
23.5	23	---	---	70.5	70.0	---	---	---	31.1	---	63	---	---
23.0	22	---	---	70.0	69.5	---	---	---	30.4	---	63	---	---
22.5	21	---	---	69.5	69.0	---	---	---	29.7	---	62	---	---
22.0	20	---	---	68.5	68.5	---	---	---	29.0	---	62	---	---
21.5	19	---	---	68.0	68.0	---	---	---	28.1	---	61	---	---
21.2	18	---	---	67.5	67.0	---	---	---	27.4	---	61	---	---
21.0	17	---	---	67.0	66.5	---	---	---	26.7	---	60	---	---
20.5	16	---	---	66.5	66.0	---	---	---	26.0	---	60	---	---
20.0	15	---	---	65.5	65.5	---	---	---	25.3	---	59	---	---
---	14	---	---	65.0	65.0	---	---	---	24.6	---	59	---	---
---	13	---	---	64.5	64.5	---	---	---	23.9	---	58	---	---
---	12	---	---	64.0	64.0	---	---	---	23.5	---	58	---	---
---	11	---	---	63.5	63.5	---	---	---	22.6	---	57	---	---
---	10	---	---	62.5	63.0	---	---	---	21.9	---	57	---	---
---	9	---	---	62.0	62.0	---	---	---	21.2	---	56	---	---
---	8	---	---	61.5	61.5	---	---	---	20.5	---	56	---	---
---	7	---	---	61.0	61.0	---	---	---	19.8	---	56	---	---
---	6	---	---	60.5	60.5	---	---	---	19.1	---	55	---	---
---	5	---	---	60.0	60.0	---	---	---	18.4	---	55	---	---
---	4	---	---	59.0	59.5	---	---	---	18.0	---	55	---	---
---	3	---	---	58.5	59.0	---	---	---	17.1	---	54	---	---
---	2	---	---	58.0	58.0	---	---	---	16.4	---	54	---	---
---	1	---	---	57.5	57.5	---	---	---	15.7	---	53	---	---
---	0	---	---	57.0	57.0	---	---	---	15.0	---	53	---	---

Zdroj: <http://www.merenitvrlosti.cz/tabulka-srovnani-tvrlosti-podle-ruznych-metod-menreni.html>