

Česká zemědělská univerzita v Praze



Diplomová práce

2011

Bc. Hana VRANÁ

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Abrazivní opotřebení návaru na bázi Fe-Cr-C

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Autor práce: Bc. Hana Vraná

Praha 2011

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Akademický rok 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hana Vraná

obor Obchod a podnikání s technikou

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

Název práce: **Abrazivní opotřebení návarů na bázi Fe-Cr-C**

Osnova diplomové práce:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Definice tření a základních druhů opotřebení
4. Experimentální zkoušky návarů na bázi Fe-Cr-C
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] PLUHARĚ, 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] časopisy: Strojárstvo - Strojírenství, Zváranie - Svařování, MM Průmyslové spektrum, Dělení spojování svařování materiálů, Technik.
- [9] ČSN 01 5050. Opotřebenění materiálu. Návosloví. 1969.

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

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání diplomové práce: duben 2011


.....
Vedoucí katedry




.....
Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, pod vedením Ing. Petra Hraběte, Ph.D. Veškerou použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v kapitole „Použitá literatura“.

V Praze dne:

.....

PODĚKOVÁNÍ

Za odbornou pomoc při zpracování předkládané diplomové práce chci na tomto místě poděkovat Ing. Petru Hraběti, Ph.D. a doc. Ing. Rostislavu Chotěborskému, Ph.D.

Abstrakt: V první části diplomové práce, kterou tvoří literární rešerše, je stručně popsáno opotřebení a jeho druhy. Podrobněji je pak popsáno abrazivní opotřebení a vlivy, které na něj působí. V závěru rešeršní části jsou uvedeny zkoušky abrazivního opotřebení. V praktické části diplomové práce je popsána experimentální část a výsledky zkoušek. Vybrané návarové materiály byly zkoušeny na přístroji s volným abrazivem a bylo provedeno měření tvrdosti podle Vickerse. Cílem této práce bylo shromáždit poznatky zatížení, velikost abrazivní částice, struktuře na odolnost proti abrazivnímu opotřebení na základě plánovaných experimentů.

Klíčová slova: opotřebení, abrazivní opotřebení, abrazivní částice, návarové materiály, opotřebení materiálu

ABRASIVE WEAR OF HARDFACING ON Fe-Cr-C BASE

Abstract: The first part of the diploma thesis is focused on review of the literature. In this part are described wear processes. The second part of the diploma thesis is focused on the further description of the wear processes and their fundamental description, and effect of variables during wear process on abrasive wear. In the conclusion of literature review are added abrasive wear resistance tests and their description. In the practice oriented part of the diploma thesis are descriptions of the experimental procedure and results. The selected hardfacing alloys were tested on the rubber wheel test machine and the same samples were tested according to Vicker's hardness test. The goal this thesis were collected knowledge about relationships of some variables (loading, abrasive particle size, microstructure of the abraded material) and abrasive wear resistance. The experimental procedure was developed with using design of experiment system.

Key words: wear, abrasive wear, particle abrasive, welding materials, material wear

Obsah

2. Úvod.....	- 1 -
3. Cíl práce a metodika	- 2 -
3.1. Cíl práce.....	- 2 -
3.2. Metodika práce	- 2 -
4. Definice tření a základních druhů opotřebení.....	- 4 -
4.1. Definice tření	- 4 -
4.1.1. Kluzné tření	- 5 -
4.1.2. Valivé tření	- 6 -
4.2. Základní druhy opotřebení	- 7 -
4.2.1. Adhezivní opotřebení	- 8 -
4.2.2. Erozivní opotřebení	- 9 -
4.2.3. Kavitační opotřebení	- 9 -
4.2.4. Únavové opotřebení.....	- 10 -
4.2.5. Vibrační opotřebení.....	- 11 -
4.3. Abrazivní opotřebení	- 12 -
4.3.1. Způsoby členění abrazivního opotřebení.....	- 14 -
4.3.2. Hlavní faktory ovlivňující mechanismus opotřebení	- 15 -
4.4. Vlivy na opotřebení	- 16 -
4.4.1. Vliv abrazivních částic na proces opotřebení	- 16 -
4.4.2. Vliv množství abrazivních částic	- 16 -
4.4.3. Vliv velikosti abrazivních částic	- 17 -
4.4.4. Vliv tvaru abrazivních částic	- 17 -
4.4.5. Vliv tvrdosti abrazivních částic	- 18 -
4.4.6. Vliv struktury opotřebovávaného materiálu	- 18 -
4.4.7. Vliv pevnosti abrazivních částic.....	- 20 -
4.4.8. Vliv zatížení na proces abrazivního opotřebení	- 20 -
4.4.9. Vliv kluzné rychlosti.....	- 20 -

4.4.10.	Vliv doby provozu na proces abrazivního opotřebení.....	- 21 -
4.4.11.	Vliv chemického složení opotřebovávaného materiálu	- 21 -
4.4.12.	Vliv legování a tepelného zpracování.....	- 21 -
4.4.13.	Vliv vlhkosti vzduchu	- 22 -
4.5.	Zkoušky abrazivního opotřebení	- 23 -
4.5.1	Přístroje s vázanými částicemi	- 24 -
4.5.2	Přístroje s volnými částicemi.....	- 26 -
5.	Experimentální zkoušky návarů na bázi Fe – Cr – C.....	- 29 -
5.1.	Použitý základní materiál	- 29 -
5.2.	Použitý přídatný materiál.....	- 29 -
5.3.	Zkouška navařovacích parametrů	- 29 -
5.4.	Navařovací parametry.....	- 30 -
5.5.	Příprava zkušebních vzorků.....	- 30 -
5.6.	Zkouška tvrdosti podle Vickerse	- 32 -
5.7.	Zkoušky abrazivního opotřebení materiálu na pryžovém kotouči	- 33 -
5.8.	Statistické vyhodnocení experimentu.....	- 35 -
5.9.	Vyhodnocení tvrdosti a úbytku materiálu	- 37 -
6.	Závěr.....	- 45 -

2. Úvod

S rozvojem techniky stoupají nároky jak na technickou úroveň nových strojů a strojních zařízení, tak i na jejich spolehlivost a efektivnost. Základním předpokladem pro splnění požadovaných technických a ekonomických parametrů je v řadě odvětví trvalý a bezporuchový provoz.

Na základě statistických údajů i praktických poznatků je dostatečně známo, že mnohé součásti jsou vystaveny náročným provozním podmínkám. Např. v zemědělském opravárenství je až 90 % ze všech poškozených součástí vyřazováno z důvodu nadměrného opotřebení. Přitom až 80 % z nich ztrácí funkčnost v důsledku jejich abrazivního opotřebení. [1].

Nejčastějším důvodem znehodnocení součástí strojů a zařízení, které pracují v prašném prostředí nebo přímo v půdě, je abrazivní opotřebení. Intenzivnímu abrazivnímu opotřebení jsou vystaveny především pracovní části strojů na zpracování půdy, těžbu a dopravu rud či hornin, ošetřování a sklizeň plodin atp. Toto opotřebení ale může nastat i u takových pohybových mechanismů, mezi jejichž funkční plochy vnikají částice a nečistoty z okolního prostředí.

V úvodních kapitolách této práce je popsáno vše, co se týče oblasti tření a základních druhů opotřebení. Převážná část práce se týká především abrazivního opotřebení. Jsou zde také uvedeny hlavní vlivy, které působí na mechanismus abrazivního opotřebení. V další části práce jsou popsány různé metody zkoušení abrazivního opotřebení.

Praktická část diplomové práce je zaměřena na experimenty, které byly provedeny v laboratořích „Katedry materiálu a strojírenské technologie“ za účelem zjištění intenzity abrazivního opotřebení návaru.

Závěr diplomové práce tvoří shrnutí obsahu předchozích kapitol a zhodnocení výsledků prováděných experimentů.

3. Cíl práce a metodika

3.1. Cíl práce

Cílem této diplomové práce bylo shromáždit poznatky o zatížení, velikosti abrazivních částic, struktuře opotřebovávaného materiálu a dalších faktorů působících na odolnost proti abrazivnímu opotřebení. A na základě experimentálních zkoušek posoudit vliv některých proměnných parametrů navařovacího procesu, při zachování značného množství konstantních proměnných parametrů působících na navařovací proces, na opotřebení jednoho z mnoha druhů návarových materiálů.

3.2. Metodika práce

Prvním krokem praktické části práce bylo vytvoření návaru na základním materiálu. Návar byl vytvořen trubičkovým drátem na svařovacím automatu v ochranné atmosféře CO₂. Byly použity rozdílné parametry při navařování. Tyto parametry (tj. vzdálenost průvlaku od základního materiálu, rychlost navařování, velikost napětí a velikost proudu) byly poté při vyhodnocení experimentu porovnávány a byly zjištěny optimální hodnoty těchto parametrů.

Vzhledem k vysoké tvrdosti návarové vrstvy bylo k rozřezání této vrstvy použito rozbrušovací zařízení Metasecar s rozbrušovacím kotoučem. Toto zařízení zaručuje vysokou kvalitu řezu a minimální tepelné ovlivnění povrchové vrstvy materiálu. Řezání bylo prováděno pod vodou, aby nedocházelo k tepelnému ovlivnění a důsledkem toho ani ke změně struktury. Poté byl materiál již nařezán pomocí strojní rámové pily na vzorky o rozměrech 25 x 25 x 8. Vzorky byly dále upraveny a zpracovány pro vyhodnocení laboratorních experimentů. Před každou zkouškou, bylo důležité vzorky pečlivě očistit, odmastit a osušit.

Dalším krokem bylo zkoušení tvrdosti na tvrdoměru podle Vickerse. Bylo provedeno 12 vtisků do každého vzorku. Na základě této zkoušky bylo možné posoudit vliv různých velkých parametrů při navařování (velikost napětí, rychlost navařování, vzdálenost průvlaku od základního materiálu, velikost proudu) působících na tvrdost zkoušeného návaru.

Následovala zkouška abrazivního opotřebení materiálu na pryžovém kotouči. Byl vybrán jeden druh abraziva (hnědý korund o zrnitosti 80) a ten byl v množství 250 mg vsypán mezi

rotující kotouč a vzorek. Zkouška probíhala po dobu jedné minuty a byla u každého vzorku provedena třikrát. Před zkouškou i po zkoušce byly vzorky zváženy. Výsledkem této zkoušky byl hmotnostní úbytek, který byl v poslední části práce, stejně tak jako naměřené tvrdosti u zkoušek podle Vickerse, zhodnocen v závislosti na odlišných parametrech při navařování.

V poslední části práce jsou zhodnoceny výsledky experimentálních zkoušek a to za pomoci metody DoE v programu STATISTICA 9. V závěru kapitoly 5.9. jsou vyhodnoceny výsledky měření pro zkoušku tvrdosti podle Vickerse a zkoušku abrazivního opotřebení na pryžovém kotouči, v závislosti na odlišných navařovacích parametrech vzorků.

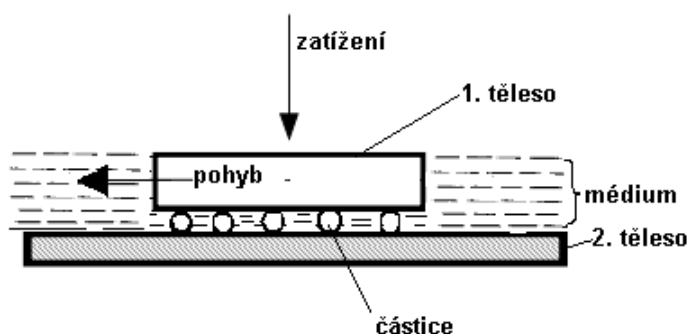
4. Definice tření a základních druhů opotřebení

4.1. Definice tření

Všechny stroje a zařízení obsahují součásti, které se vzájemně pohybují. Procesy tření a opotřebení probíhající na povrchu součástí vedou k postupné degradaci povrchových vrstev a tím ke zhoršení funkčních vlastností součástí, konstrukčních uzlů a nakonec celých systémů. [2]

Tření představuje ztrátu mechanické energie v průběhu nebo na začátku, popř. na konci, relativního pohybu vzájemně se dotýkajících hmotných ploch. Důsledkem tření je opotřebení pohybujících se povrchů. [3]

Mezi tělesy v relativním pohybu může být buď plynné, nebo kapalně médium, které navíc může obsahovat tuhé částice (obr. 1)



Obr. 1 Tření a opotřebení těles

Hodnotou charakterizující tření je koeficient tření μ , určený vztahem:

$$\mu = \frac{T}{L} \quad (1)$$

kde: T je tangenciální třecí síla a L je normálové zatížení

Tření lze rozlišit podle pohybu funkčních povrchů na tření smykové vznikající při smyku dvou rovinných ploch, valivé tření při valení rotačního tělesa po rovinné podložce a jejich kombinace, tj. valivé tření s větším nebo menším prokluzem funkčních povrchů.

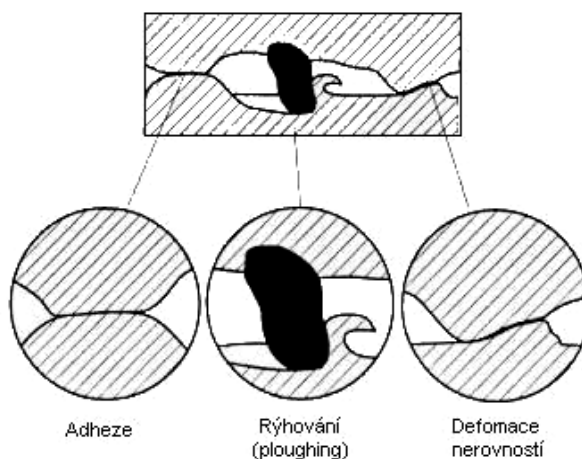
Při bezprostředním dotyku tuhých těles se tření označuje jako suché (tření bez maziva), naopak u funkčních ploch, které jsou dokonale odděleny souvislou vrstvou maziva nebo jiného média (např. tření na vzduchovém polštáři) se tření nazývá kapalné. Přejíčovou oblastí mezi třením suchým a třením kapalinným je tření polosuché, při kterém z vrstvy maziva vystupují vrcholy nerovností povrchu. [5]

Existují tedy dva základní druhy vzájemného pohybu dvou těles – vzájemný posuvný pohyb a odvalování – charakterizované tzv. kluzným a valivým třením. Tyto dva základní druhy tření budou dále blíže popsány.

4.1.1. Kluzné tření

V případě kluzného tření těles je možné pozorovat tři základní komponenty (obr. 2):

- tření vlivem adheze mezi nerovnostmi povrchu,
- tření vlivem deformace nerovností povrchu,
- tření vlivem rýhování, způsobené přítomností jemných částic vzniklých při opotřebovávání povrchu.



Obr. 2 Tři komponenty kluzného tření [4]

Poměr jednotlivých komponentů tření závisí na typu materiálové dvojice, podmínkách tření (způsob pohybu, drsnost povrchu atd.) a na časovém stádiu vzájemného pohybu. Průběh tření

není v závislosti na kluzné dráze konstantní. Bylo definováno 5 stádií tření vzájemně se lišících mechanismem tření. [4]

Během prvního stadia je dominantním mechanismem rýhování povrchu ostrými nerovnostmi. Dále se uplatňuje mechanismus postupné deformace povrchových nerovností. Adhezní mechanismus nehraje výraznou roli, protože povrch materiálů bývá kontaminován přítomností cizích částic (oxidů atd.). Koeficient tření není v této fázi závislý na materiálu kluzné dvojice ani na podmínkách tření. [4]

V druhém stadiu dochází k mírnému nárůstu koeficientu tření vlivem rostoucích adhezních sil mezi povrchy. Během první a druhé fáze byly otěrem očištěny a aktivovány oba povrchy, může tedy docházet k adhezním spojením. [4]

Třetí stadium je charakteristické růstem koeficientu tření, způsobeným přibýváním částic tvořených produkty opotřebení. Komponenta tření vyvolaná rýhováním povrchů částicemi dosahuje maxima v případě srovnatelné tvrdosti obou materiálů. Současně s rýhováním dochází k plastické deformaci nerovností a ke zvětšování aktivované plochy povrchu podléhající adheznímu tření. [4]

Čtvrté stadium je stadium konstantní úrovně tření. Množství částic, míra adhezního tření i deformace nerovností je konstantní. [4]

Páté stadium se objevuje pouze v případě kluzné dvojice tvořené velmi tvrdým a velmi měkkým povrchem. Nerovnosti měkčího povrchu jsou třením zaleštěny do zrcadlového lesku a hodnota koeficientu tření klesá. [4]

V posledním stádiu je dosaženo zrcadlového lesku obou povrchů, jedná se opět o fázi konstantní úrovně tření. [4]

4.1.2. Valivé tření

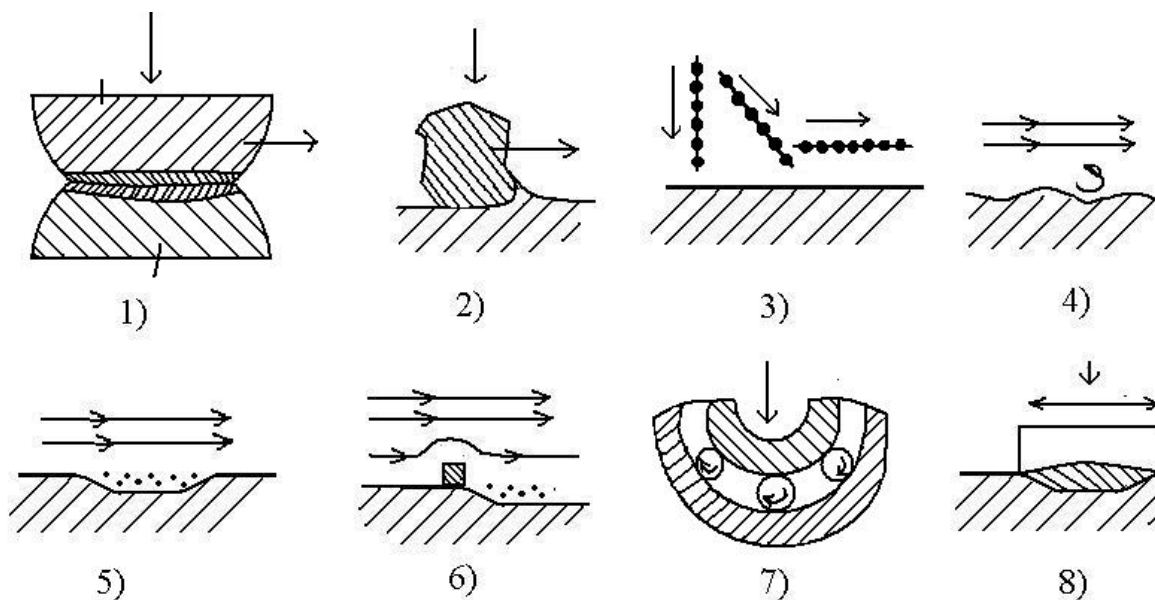
Valivé tření vzniká, pokud se valí jedno těleso po druhém. Alespoň jedno z nich musí být kulaté (koule nebo válec). Valivé tření je mnohem menší než smykové, protože tělesa po sobě nekloužou celými plochami, jež nikdy nejsou dokonale hladké, nýbrž se jen na malé ploše dotýkají. I přesto tu určitý odpor přece jenom je, i když jeho příčina je neobvyklá. Je to dočasná deformace obou k sobě přitlačených těles. Koule (nebo válec) i rovinná podložka jsou poněkud stlačeny. Při valení se musí překonávat síla, jíž se podložka brání

deformaci. V místě, kde se podložka díky své pružnosti opět narovná, působí síla, která naopak podporuje pohyb válce. Ta je vždy menší. Tento rozdíl je příčinou valivého tření. Tření nevzniká na povrchu, nýbrž uvnitř tělesa. Molekuly se stlačí a opět narovnejí; přitom se musí o sebe třít. Například ohýbáme-li hliníkový drát, zahřeje se. Třením molekul se mechanická energie přemění v teplo. Deformaci při valivém pohybu můžeme dobře pozorovat u gumových kol. Je zde velmi patrné i zahřívání. [22]

4.2. Základní druhy opotřebení

Opotřebení je nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává. Projevuje se jako odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z funkčního povrchu mechanickými účinky, popřípadě doprovázenými i jinými vlivy (např. chemickými, elektrochemickými nebo elektrickými). [6]

Opotřebení lze rozdělit podle vnějších změn a podmínek vzniku na opotřebení: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační. Schematické znázornění uvedených typů opotřebení je na obrázku (obr. 3).



Obr. 3 Schéma různého poškození materiálu opotřebením: 1) adhezivním; 2) abrazivním; 3,4) erozivním; 5,6) kavitačním; 7) únavovým; 8) vibračním

Problematika poškození strojních součástí je velmi rozsáhlá a tato diplomová práce bude zaměřena především na abrazivní opotřebení, které je blíže popsáno v kapitole 4.3.

4.2.1. Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení je typické pro případy, kdy dochází ke smýkání dvou tuhých těles, přitlačovaných k sobě normálovou silou. Následkem toho dochází k jejich dotyku, k porušování povrchových adsorpčních a oxidových vrstev a ke vzniku adhezivních mikronerovností, které jsou vzápětí rozrušovány. [7]

Velikost opotřebení je úměrná zatížení a velikosti vzájemného pohybu. V prvním případě je opotřebení závislé na hrubosti tvrdého povrchu, dále pak na množství, velikosti, tvaru a tvrdosti cizích částic. [8]

Vznik a průběh adhezivního opotřebení je ovlivňován především faktory jako jsou:

- hloubka vnikání a poloměr zakřivení povrchových mikronerovností,
- velikost zatížení a rychlost relativního pohybu,
- schopnost materiálu vytvářet adhezivní spoje.

Intenzitu opotřebení ovlivňuje úroveň jednotlivých faktorů. Výrazný vliv má na intenzitu adhezivního opotřebení látka, která je přítomna mezi funkčními povrchy (mazivo).

V jednom krajním případě adhezivního opotřebení dochází k mírnému opotřebení. To tehdy, když rychlost porušování adsorpční a oxidové vrstvičky na povrchu je menší než rychlost jejich obnovování. V takovém případě působí tyto vrstvičky jako ochrana povrchů, brání vzniku adhezivních spojů, které jsou méně četné a méně dokonalé, takže při jejich následném porušování nedochází k významnému přenosu materiálu mezi povrchy. Takto mírně opotřebovávané povrchy jsou vyhlazené, lesklé, bez rýh a stop po zadírání. Obdobně, jen obvykle s podstatně větší účinností, funguje i mazivo přítomné mezi třecími se povrchy. [7]

V druhém krajním případě adhezivního opotřebení dochází ke vzniku četných a relativně dokonalých adhezivních mikrospojů, k jejich následnému rozrušování spojenému s přenosem materiálu mezi povrchy a ke vzniku volných částic. Takto intenzivně opotřebovávané povrchy jsou rýhované, rozbrázděné, v pokročilejším stadiu jsou i pouhým okem viditelné částice materiálu, ulpělé na jednom nebo i obou površích. Velmi silně vzrůstá odpor proti pohybu a může to skončit úplným zablokováním (zadřením). Příčiny takového stavu jsou různé, velmi často jde o následek selhání mazání. [7]

4.2.2. Erozivní opotřebení

Tento druh opotřebení je charakterizován oddělováním materiálu účinkem:

- částic, nesených proudem kapaliny nebo plynu (vyskytuje se např. u čerpadel na znečištěné kapaliny, ventilátorů, cyklonů, tryskáčů, potrubí pneumatické, hydraulické či spádové dopravy aj.),
- částic samotné kapaliny, páry nebo plynu (vyskytuje se např. u parních armatur, koncových stupňů parních turbín pracujících v oblasti mokré páry, plynových turbín, náběžných hran křídel a ostatních ploch letadel, ventilů spalovacích motorů aj.). [7]

Stupeň opotřebení závisí na:

- relativní rychlosti opotřebovávajících částic,
- teplotě a chemické vlastnosti nosného média,
- druhu, vlhkosti a tvaru částic,
- kinetické energii a úhlu dopadu částic,
- vlastnostech opotřebovávaného materiálu. [7]

Všechny tyto zmíněné vlivy působí vzájemně, ale v různé míře, podle konkrétní situace. Jedná se tedy o poměrně složité a variabilní děje.

Erozivní opotřebení je typické nerovnoměrným porušením povrchu, který se projevuje zvlněním, zvrásněním a poškozením i v prohlubeninách.

4.2.3. Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení způsobují dynamické účinky vyvolané vznikem a zánikem bublin vyplněných sytou párou v kapalině v místech, kde náhle klesne tlak kapaliny pod tlak syté páry a opět stoupne nad tlak syté páry. Tento typ opotřebení se vyskytuje obzvlášť u vodních turbín a čerpadel, u součástí hydraulických systémů, ve vodovodech, atd. [8]

Ke kavitačnímu opotřebení může docházet pouze tam, kde se vyskytuje kavitace, tj. dochází ke vzniku kavitačních dutin, jejichž zánik vyvolává hydrodynamické rázy, které působí na povrchy materiálu tím, že v nich působí postupnou koncentrací napětí. [8]

Kavitační dutiny vznikají v místech, kde se z nějakých důvodů (proudění zúženým průtočným průřezem, působení tahových napětí na kapalinu aj.) sníží tlak pod hodnotu tlaku nasycených par kapaliny při dané teplotě, vznikají kavitační dutiny. V tom případě se v kapalině začnou tvořit dutiny (kaverny), vyplněné parami kapaliny. Objem, který zaujímá kavitační dutina, může kolísat ve velkém rozsahu, řádově od krychlových milimetrů do krychlových metrů. V oblasti vyššího tlaku pak tyto dutiny zanikají, to působí hydrodynamické rázy, které poškozují povrchy materiálu. Typický kavitačně poškozený povrch je drsný, jakoby vytrhaný. [7]

Hlavní faktory ovlivňující intenzitu kavitačního opotřebení jsou:

- obsah plynů v kapalině,
- teplota a tlakové poměry,
- povrchové napětí a viskozita kapaliny. [7]

Nejúčinnější ochranou proti kavitačnímu opotřebení je vyloučení výskytu kavitace. Toho lze dosáhnout konstrukcí zařízení, popř. dodržáním předepsaných provozních podmínek. [8]

4.2.4. Únavové opotřebení

Únavové opotřebení je charakterizováno postupnou kumulací poruch v povrchové vrstvě při opakovaných kontaktních napětích. Dosahují-li tato napětí hodnot nad mezí kluzu, jde o nízkocyklovou únavu, jsou-li pod mezí kluzu, jde o vysokocyklovou únavu. Nejčastější případy povrchové únavy jsou známy u valivých ložisek, ozubených kol, železničních kol, apod. [7]

Počáteční stadium opotřebení je charakteristické elastickou deformací povrchu, po delším působení cyklického namáhání vznikají velmi jemné trhlinky, které se šíří rovnoběžně s povrchem a způsobují odlupování částic kovu. [8]

Kontaktní únavové opotřebení vzniká při silovém, cyklicky opakovaném styku dvou těles se zakřivenými styčnými plochami, typicky na bocích zubů ozubených kol. Kromě vysokých kontaktních tlaků zde ještě spolupůsobí skluz a tření, které přidávají ještě tahové a smykové namáhání a tím dále přispívají k porušování povrchu. Při tom se podmínky kontaktního namáhání značně mění podél boku zubů, protože se kromě čistého valení vyskytuje ještě

různě velký skluz, který současně vytváří předpoklady pro vznik adhezivního opotřebení a projevuje se i různý vliv maziva. [7]

První únavové trhliny, které vedou k rozvoji únavového opotřebení, vznikají v tenké povrchové vrstvě materiálu. Porušování povrchu pak nastává jejich rozvojem a vylamováním částí povrchu. Častým typem únavového poškození je především tvoření důlků, obvykle okrouhlého tvaru, ovšem u povrchů s vysokou tvrdostí (valivá ložiska nebo cementované součásti) mohou mít důlky i hranatý nebo protáhlý tvar. Na jejich vzniku se význačně podílí mazivo. Účinkem kontaktních tlaků vniká mazivo do povrchových trhlin, v důsledku dalšího pohybu součásti je v nich uzavíráno a jeho tlak se účinkem kontaktního namáhání zvyšuje. To přispívá k dalším šíření trhlinek a vede až ke vzniku zmíněných důlků. [7]

Na vznik únavového opotřebení mají, kromě provozních podmínek, které mají rozhodující význam, vliv také:

- tvrdost povrchové vrstvy,
- nečistoty a vměstky,
- drsnost povrchu. [7]

K zabránění, popř. zmírnění opotřebení únavou, lze doporučit vysokou tvrdost povrchu součásti, vysoké vyleštění styčných ploch a co největší mikronečistotu materiálu, zejména v povrchových vrstvách. [8]

4.2.5. *Vibrační opotřebení*

Vznik vibračního opotřebení je dán vlivem vzájemného kmitavého pohybu o různé amplitudě, frekvenci a proměnlivém zatížení částí, které jsou v bodovém, čárovém a nejčastěji v plošném dotyku. Poškození se projevuje vznikem velmi jemných oxidových vrstev, které u materiálu na podkladě železa mají často sytě červeno-hnědé zbarvení. Toto zbarvení je často nazýváno jako tzv. „krvácení materiálu“. K tomu však nemusí vždy dojít. Obvykle k tomu nedojde, je-li místo opotřebení chráněné vrstvou maziva před přístupem vzdušného kyslíku. [7, 8]

Vibračním opotřebením se poškozují i velmi tvrdé materiály, bez ohledu na přítomnost maziva. K vibračnímu opotřebení může docházet např. v různých pohyblivých uloženích, na která se přenáší kmity vlastní nebo vybuzečné cizím zdrojem. Většinou se jedná o valivá ložiska, čepy, hřídele a spojky. Často k němu dochází také u nalisovaných spojení,

např. náboje kol, setrvačníky, řemenice apod., není-li hřídel nebo čep dostatečně tuhý, takže dochází k jeho střídavému ohybu v místě nalisování. Typický výskyt tohoto opotřebení je u křížových kloubů a v drážkovém spojení kloubových hřídelů. [7]

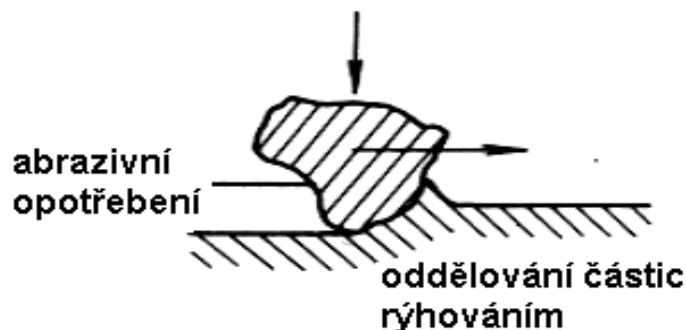
Na průběh a intenzitu vibračního opotřebení působí řada faktorů, zejména:

- amplituda pohybu,
- frekvence pohybu,
- měrný tlak ve styku součástí,
- vlastnosti materiálu. [7]

Hlavní možnosti omezení vibračního opotřebení spočívají v konstrukčních opatřeních, směřujících k omezení vibrací, v pečlivé a přesné výrobě, která zajistí dokonalé spojení součástí a v povrchových úpravách součástí, které příznivě ovlivní vlastnosti materiálů v místě styku. Maziva dávají určitou možnost ovlivnění vibračního opotřebení, i když neumožňují jeho potlačení. [7, 8]

4.3. Abrazivní opotřebení

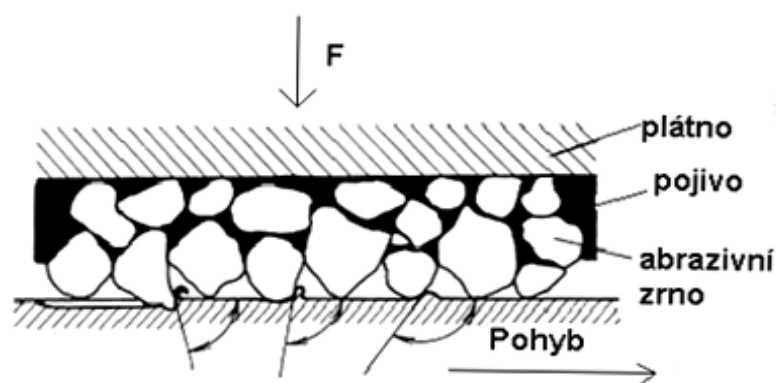
Abrazivní opotřebení se projevuje oddělováním částic z funkčního povrchu účinkem tvrdého a drsného materiálu nebo tvrdých abrazivních částic, se kterými je měkčí opotřebovávaný povrch v kontaktu a vůči kterým je v relativním pohybu. Potom dochází k oddělování částic materiálu z opotřebovávaného povrchu rýhováním či seřezáváním. (obr. 4)



Obr. 4 Abrazivní opotřebení [18]

Typický je rýhovaný vzhled povrchu, kde v případě intenzivního opotřebení jsou rýhy velmi hluboké, viditelné pouhým okem a v případě mírnějšího opotřebení jsou povrchy, alespoň v počátečním stadiu, vyleštěné a rýhy jsou patrné jen při zvětšení. [9]

Nejjednodušší model pro abrazivní opotřebení plastických materiálů - kovů je právě případ dvou těles, kdy pevně vázané tvrdé částice nebo nerovnosti povrchu vnikají do povrchu a při relativním pohybu částic a měkčího opotřebovávaného povrchu kovu ho rýhují. Tento proces může a také nemusí vést k oddělování třísek opotřebovávaného materiálu. Existují 2 extrémní případy. [9]



Obr. 5 Dotyk tělesa s abrazivními částicemi brusného plátna [9]

V prvním případě dochází k plastické deformaci spojené s rýhováním povrchu, kdy se vytváří nárůstek před abrazivní částicí a materiál je kontinuálně vytlačován do boků a vytváří valy kolem rýhy. Teoreticky nedochází k přenosu materiálu, ani se nevytváří částice otěru a proto nedochází k otěru. Ve skutečnosti pravděpodobně bude otěr způsoben delaminačním mechanismem po vyčerpání deformační schopnosti povrchových vrstev materiálu. [9]

V druhém případě je tvorba rýh spojena s odstraňováním materiálu z povrchu mikrořezáním. Extrémem v tomto případě je odstranění celého objemu materiálu rýhy ve formě třísky bez tvorby valů po stranách rýhy. [9]

Na obrázku (obr. 5) je schéma vzájemného působení vázaných abrazivních částic a opotřebovávaného povrchu. Jde o nejčastější případ poškození povrchu součásti abrazivními částicemi. Důležitý je zejména úhel, který svírá hrana abrazivní částice s povrchem.

Na velikosti tohoto úhlu záleží, zda částice bude povrch jen rýhovat a vytvářet podél své dráhy jakýsi „val“, nebo zda dojde při rýhování ke vzniku „třísky“. [10]

4.3.1. Způsoby členění abrazivního opotřebení

Standardní klasifikační schéma používané v odborné literatuře člení abrazivní opotřebení na:

- two-body abrasion (abrazivo – opotřebovávaný povrch)
- three-body abrasion (abrazivo mezi 2 povrchy).

Abrazivní opotřebení (two-body abrasion), které vzniká silovým působením abraziva na opotřebovávaný povrch, způsobuje poměrný otěr o 1 až 3 řády vyšší než abrazivní opotřebení s mezivrstvou částic mezi dvěma povrchy (three-body abrasion) při stejném zatížení. První případ abrazivního opotřebení (interakce dvou těles) je typický pro opotřebení zubů rýpadel nebo plužních čepelí. K druhému případu (interakce tří těles) dochází prakticky u všech pohybových mechanismů, do nichž vnikají nebo mohou vniknout částice nebo nečistoty z okolního prostředí. [10]

Podle intenzity abrazivního opotřebení, můžeme toto opotřebení členit na:

- Případy málo intenzivního abrazivního opotřebení

Nejčastěji se jedná o abrazi sypkými materiály nebo málo pevnými částicemi při malých rychlostech pohybu. Při nedostatečné životnosti součástí, které jsou v kontaktu s abrazivem, lze nahradit obvyklé používané ocelové plechy nebo profily bez tepelného zpracování materiály s větší odolností proti abrazivnímu opotřebení nebo upravit konstrukce stroje či zařízení, aby umožnila rychlou výměnu opotřebovaných částí. [2]

- Případy středně intenzivního abrazivního opotřebení

Tento typ opotřebení je typický pro různé mlýny používané pro dezintegraci abrazivních materiálů, pro stroje pracující při těžbě, dopravě a zpracování zemin a různých stavebních nebo keramických materiálů. Intenzitu abrazivního opotřebení součástí lze snížit použitím ocelí s vysokou pevností nebo použitím otěruvzdorných heterogenních materiálů s vysokou pevností základní hmoty a tvrdými karbidy (otěruvzdorné bílé litiny, legované nástrojové oceli apod.). [2]

- Případy velmi intenzivního abrazivního opotřebení

Jde zejména o drcení tvrdých hmot a nerostných surovin, přičemž se dosahují na funkčních površích maximální silové účinky. S ohledem na požadovanou provozní bezpečnost se na výrobu rozměrných součástí drtičů a mlýnů používá nejčastěji velmi houževnatá manganová austenitická ocel a její modifikace. Tato ocel při velkém silovém zatížení zpevňuje do hloubky až několika mm v důsledku strukturních změn a dobře odolává opotřebení abrazivními materiály. Některé případy intenzivní abraze při zpracování hornina nerostných surovin se řeší nástrojovými ocelmi zušlechtěnými na velkou tvrdost, případně použitím vložek ze slinutých karbidů připájených na základní materiál o dostatečné pevnosti a houževnatosti. [2]

Standardní klasifikační schéma používané v anglosaské literatuře dělí abrazivní opotřebení na 3 kategorie:

- rýhovací abraze (gouging abrasion),
- vysokonapěťová abraze (high stress abrasion),
- nízkonapěťová abraze (low stress abrasion).

Jestliže používané zatížení způsobí poškození abrazivních částic, je opotřebení nazýváno “high-stress” abrazivní opotřebení, a naopak, jestliže poškození abrazivních částic není jednoznačně patrné, jedná se o opotřebení nazývané “low-stress” abrazivní opotřebení. Ovšem, zda se jedná o jaký druh abrazivního opotřebení z hlediska “stress” podmínek není striktně předepsáno. [11]

4.3.2. Hlavní faktory ovlivňující mechanismus opotřebení

Změny na funkčním povrchu součástí vyvolané abrazivním působením částic jsou velmi různorodé, což je ovlivněno působícími materiálovými, konstrukčními i provozními faktory. Intenzita abrazivního opotřebení je ovlivněna celou řadou faktorů, jako je například množství abrazivních částic a jejich koncentrace mezi třecími povrchy, velikost částic, tvar částic, tvrdost částic, pevnost částic, velikost a charakter zatížení, kluzná rychlost, struktura materiálu, vlhkost vzduchu a další. [10]

4.4. Vlivy na opotřebení

Problémy, které by neměly být v žádném případě opomenuty, jsou vnitřní a vnější vlivy působící na opotřebení. Jedná se především o tyto vlivy: vliv abrazivních částic – množství, velikosti, tvaru, tvrdosti, pevnosti; velikosti a charakteru zatížení; vliv kluzné rychlosti; vliv doby provozu, vliv chemického složení materiálu, vliv legování a tepelného zpracování, vliv struktury materiálu; vliv vlhkosti vzduchu.

4.4.1. Vliv abrazivních částic na proces opotřebení

Opotřebení povrchu plastického materiálu probíhá především tvorbou rýh a oddělováním částic ve formě třísek. O účinku abrazivních částic rozhoduje i jejich poloha. Pouze vhodně orientovaná abrazivní zrna oddělují částice materiálu. Podle Larsen-Basseho [25] působí abrazivní částice na opotřebovávaný povrch kovového materiálu třemi způsoby:

- 1) Vytvářením nárůstku před zrnem,
- 2) Rýhováním a vytvářením valu podél rýhy,
- 3) Vytvářením třísky před břitem abrazivního zrna.

Se zvětšováním zatížení resp. měřeného tlaku téměř lineárně roste počet rýh na exponovaném povrchu, přičemž tento růst je charakteristický pro každý průměr abrazivních částic. Šířka rýh závisí na velikosti a tvaru abrazivní částice a nepřesahuje obvykle 10-20% jejího charakteristického rozměru. I při poměrně malých zatíženích dochází k plastické deformaci v oblasti kontaktu mezi abrazivem a opotřebovávaným povrchem. S růstem zatížení roste počet abrazivních částic, které se dostávají do kontaktu s opotřebovávaným povrchem. [2]

4.4.2. Vliv množství abrazivních částic

Vliv množství abrazivních částic mezi opotřebovávanými povrchy je zřejmý. Je-li částic hodně, dochází k jejich shlukování či vrstvení a tím k abrazivnímu opotřebení i v případě, že většina částic má menší velikost než je vůle mezi povrchy. Je také větší pravděpodobnost, že se bude vyskytovat větší množství částic takového tvaru, který je z hlediska abrazivního opotřebení nepříznivý (tj. ostrohranných) a že jich bude větší množství v takové poloze, kdy mohou intenzivněji opotřebovávat povrch součástí. [12]

4.4.3. Vliv velikosti abrazivních částic

Experimentálním studiem závislosti abrazivního otěru na průměrné velikosti abrazivních částic se ukázalo, že existuje „kritická velikost abrazivních částic“. Pokud jsou částice menší, pak s růstem jejich velikosti výrazně roste abrazivní otěr. Po dosažení kritické velikosti částic intenzita abrazivního otěru výrazně klesá. Tato kritická velikost je závislá na zatížení, na rozměrech opotřebované plochy, na typu použitých abrazivních částic a na vlastnostech opotřebovávaného materiálu. Obvykle se pohybuje v mezích 10 – 50 μm . [2]

Vliv velikosti abrazivních částic byl zkoumán řadou autorů (např. Larsen-Basse, J. [25], Suh, N.P. [27], Garbar, I.I. [29]) Byla nalezena 3 různá stádia rychlosti opotřebení jako funkce velikosti abrazivních částic. V první oblasti je velmi nízká rychlost opotřebení s mírným růstem, když roste velikost částic. V druhém stadiu s dalším růstem velikosti částic rychlost opotřebení prudce roste. V třetím stadiu je rychlost opotřebení nezávislá na průměru částic nebo jen mírně roste. [2]

4.4.4. Vliv tvaru abrazivních částic

Lze předpokládat, že čím více se bude abrazivní částice lišit od kulového tvaru, tím větší bude pravděpodobnost rýhování a oddělování částic z opotřebovávaného povrchu při jejich relativním pohybu. Kromě porušování povrchových vrstev opotřebovávaného materiálu dochází k otupování či vylamování hrotů a hran abrazivních částic. [2]

Vocel M. [10] na základě experimentálních zkoušek prokázal, že při malém zatížení se příliš nemění velikost abrazivních zrn, ale mění se jejich mikrogeometrie. Při zkoušce na Staufferově přístroji se průměrná velikost abrazivních zrn zmenšila o 10%, ale jejich abrazivní účinek klesl až na 40% původní hodnoty. Při nárazu částice abraziva na opotřebovávané povrchy dochází k intenzivnímu porušování ostrých řezných hran a jejich zaoblování. [2]

Při velkém zatížení se intenzivně porušují abrazivní částice, ale abrazivita zrn u minerálů s velkou štěpitelností podstatně neklesá, protože zároveň roste počet řezných hran. Abrazivní částice mají vnitřní defekty a trhliny. Efektivní pevnost v tahu abrazivních částic přitom výrazně klesá s jejich velikostí. Roste pravděpodobnost výskytu částic s vhodně orientovaným defektem. Podle experimentálních údajů pro různá abraziva pevnost v tahu je přibližně nepřímě úměrná druhé mocnině jejich průměru. Proto větší a značně zatížené abrazivní částice se pravděpodobněji poruší než jemné a lehce zatížené abrazivní částice. [2]

4.4.5. *Vliv tvrdosti abrazivních částic*

Vliv tvrdosti abrazivních částic na opotřebení je velký. Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení závisí na poměru tvrdosti abraziva a tvrdosti opotřebovávaného povrchu. [9,6] Je-li tvrdost kovového materiálu H_m značně menší než tvrdost abraziva H_a , pak je odolnost proti abrazivnímu opotřebení malá. S růstem tvrdosti opotřebovávaného kovového materiálu roste odolnost proti opotřebení a dosahuje své maximální hodnoty v okamžiku, kdy platí vztah:

$$H_m = \frac{H_a}{K} \quad (2)$$

Podle Chruščova se hodnota koeficientu „ k “ pohybuje v rozmezí 1,3 - 1,7. [2]

Odolnost proti abrazivnímu opotřebení kovových materiálů tedy závisí na tvrdosti, tvaru, velikosti a množství tvrdých strukturních složek a na jejich rozložení v základní kovové hmotě. S rostoucí tvrdostí těchto fází a s jejich větším podílem v mikrostruktuře stoupá odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Podíl karbidů ve struktuře nelze však posuzovat izolovaně od základní hmoty. Např. u perliticko-karbidických mikrostruktur s růstem podílu karbidů do 35% roste tvrdost i odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Avšak u feriticko-karbidické mikrostruktury stoupá s růstem podílu karbidů odolnost proti abrazivnímu opotřebení do 5-6% a další růst podílu karbidů již odolnost proti abrazivnímu opotřebení podstatně neovlivní. [2]

Pro dosažení vysoké odolnosti proti abrazivnímu opotřebení je příznivá vysoká disperznost karbidů. Kromě podílu karbidů mají příznivý vliv na chování ocelí a litin i další tvrdé fáze jako karbidy nebo tvrdé nekovové vměstky, pokud mají parametry krystalové mřížky blízké parametrům krystalové mřížky matrice. [2]

4.4.6. *Vliv struktury opotřebovávaného materiálu*

Slitiny jsou základním kovovým konstrukčním materiálem. Jejich vlastnosti lze ovlivnit v mnohem větším rozsahu než u čistých kovů. Slitinami nejpoužívanějšími jsou slitiny železa a uhlíku. Tyto slitiny lze rozdělit podle obsahu uhlíku na oceli (obsah uhlíku menší než 2,14%) a litiny (obsah uhlíku větší než 2,14%). Při krystalizaci v průběhu ochlazování slitin dochází k fázovým změnám a vzniku rozličných struktur závislých na chemickém složení a rychlosti ochlazování. V případě slitin železa s uhlíkem se jedná o volný uhlík

(grafit) a různé karbidy jako cementit, ferit, austenit, perlit nebo popřípadě ledeburit. Při dostatečně rychlém ochlazování vznikají nerovnovážné strukturní složky, jako jsou například martenzit či bainit vykazující vysokou tvrdost.

Strukturní součásti, které se vyskytují ve slitinách železo - uhlík, můžeme tedy rozdělit na strukturní složky rovnovážné (vznikají při dostatečně pomalém ochlazování) a strukturní složky nerovnovážné (vznikají při vyšších rychlostech ochlazování nebo kalení).

Rovnovážné strukturní složky jsou tyto:

- **ferit** - tuhý roztok uhlíku v železe α nebo δ . Ferit α je tvárný, mez pevnosti má kolem 220 MPa, tvrdost je 50 HB a tažnost kolem 70%. Ferit δ (vysokoteplotní fáze δ) je intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe.
- **austenit** - intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe γ , je dobře tvárný, paramagnetický a houževnatý.
- **perlit** - eutektoid tvořený střídavě uloženými krystaly feritu a cementitu, je magnetický, má pevnost kolem 840 MPa a tvrdost 280 HB, je méně tvárný než austenit.
- **cementit** - křehká fáze s tvrdostí 700 HV až 800 HV. Je to chemická sloučenina (Fe_3C).
- **grafit** - křehká a měkká fáze. Je to čistý krystalický uhlík, je přítomen v šedé litině. Slitiny s grafitem vyloučeným ve formě lupínků (nejčastěji podlouhlé lupínky) jsou křehké. Pevnost, houževnatost a plastické vlastnosti závisejí více na způsobu vyloučení grafitu než na jeho hmotnosti.
- **ledeburit** - eutektikum složené ze směsi krystalů austenitu (obsah uhlíku 2,14%) a cementitu.

Nerovnovážné strukturní částice:

- **martenzit** - přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α . Je velmi tvrdý a křehký, vzniká kalením,

- **bainit** - stejně jako perlit tvořen feriticko-cementickou strukturou, jeho tvrdost je 400 – 450 HB, je méně křehký než martenzit,
- **sorbit** - směs jemně vyloučeného cementitu a feritu při popouštění martenzitu za vyšší teploty. [13,14]

4.4.7. Vliv pevnosti abrazivních částic

Pokud je pevnost abrazivních částic nízká, dochází k jejich drcení a to tak že se snižují rozměry, případně až pod kritické a dochází též k otupování částic olamováním hran. Tím se zároveň i vytváří nové částice s ostrými hranami. Tyto jevy (zmenšování rozměrů a otupování na jedné straně a vznik nových ostrohranných částic na druhé) působí protikladně. Výsledkem je známý fakt, že s rostoucím zatížením povrchů, působícím na abrazivní částice, nedochází prakticky ke změně jejich abrazivity. [12]

4.4.8. Vliv zatížení na proces abrazivního opotřebení

Obvykle se předpokládá na podkladě řady experimentů na různých laboratorních zařízeních s otevřeným systémem, kdy nedochází v průběhu zkoušek k postupnému snižování abrazivity částic, že hmotnostní otěr materiálu je přímo úměrný působícímu zatížení, resp. měrnému tlaku. [2]

Při zkouškách na přístroji s brusným plátnem bylo zjištěno, že s rostoucím měrným tlakem roste hmotnostní otěr zkoušené oceli. S růstem velikosti abrazivních částic se objevily mírné odchylky od této závislosti. Zároveň lze očekávat, že počet rýh vzniklých opotřebením povrchu abrazivními částicemi bude nepřímo úměrný velikosti částic a přímo úměrný zatížení. Samozřejmě za předpokladu, že v průběhu děje nebude docházet k většímu poškození nebo dokonce k drcení částic. [10]

4.4.9. Vliv kluzné rychlosti

Vocel M. a Dufek V. [10] prokázali, na základě zkoušek, že vliv relativní kluzné rychlosti částic po funkčním povrchu je málo významný. S růstem kluzné rychlosti abrazivní opotřebení mírně stoupá, až do rychlosti kolem 2,0 m.s.⁻¹. Při větších kluzných rychlostech lze očekávat, že vlastnosti povrchové vrstvy materiálu budou ovlivněny zejména změnou teploty vlivem tření. Růst teploty se většinou projeví hlavně snížením tvrdosti povrchové vrstvy, vlivem čehož se sníží i její odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Uvažujeme-li proto o možnosti snižování abrazivního opotřebení při velkých kluzných rychlostech, bude na místě

používání ocelí s velkou odolností proti popouštěcím teplotám, eventuálně jiných materiálů s vysokou tvrdostí i při vyšších teplotách. [10]

4.4.10. Vliv doby provozu na proces abrazivního opotřebení

V otevřených systémech abrazivního opotřebení, pokud nedochází k tvarovým změnám opotřebované součásti a ke změně dominantního mechanismu opotřebení, velikost otěru roste lineárně s dobou provozu, délkou třecí dráhy nebo s množstvím zpracovávaného materiálu. Typickým příkladem jsou závislosti hmotnostního otěru na třecí dráze stanovené při zkouškách na přístroji s pryžovým kotoučem. Odchytky mohou nastat v případech opakované interakce abraziva s opotřebovaným povrchem, kdy může docházet k porušování řezných hran abraziva nebo k znečištění abraziva částicemi otěru a tím ke změně mechanismu opotřebení. Odlišná situace je u uzavřených systémů, kdy při opakovaném vzájemném působení částic abraziva a opotřebovaného povrchu dochází k postupnému poklesu jejich abrazivity vlivem porušování řezných hran a rychlost otěru postupně klesá. [2]

4.4.11. Vliv chemického složení opotřebovaného materiálu

Za běžných podmínek abrazivního opotřebení nedochází k vzájemnému ovlivnění abraziva a opotřebovaného materiálu a proto chemické složení opotřebovaného kovového materiálu ovlivňuje spolu s podmínkami tepelného zpracování především jeho mikrostrukturu. U ocelí a litin závisí odolnost proti abrazivnímu opotřebení na pevnosti základní kovové hmoty a na obsahu karbidů, tj. na obsahu uhlíku a dalších prvků ovlivňujících pevnost základní hmoty a tvorbu tvrdých strukturních složek. Podle chemického složení, tepelného zpracování a mikrostruktury mohou mít oceli a litiny velmi rozdílnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. U slitin neželezných kovů rovněž závisí odolnost proti abrazivnímu opotřebení na pevnosti základní kovové hmoty a na přítomnosti tvrdých strukturních složek, která je dána obsahem legujících prvků a historií zpracování. [2]

4.4.12. Vliv legování a tepelného zpracování

Technické slitiny železa jsou obvykle komplexními slitinami, v nichž vedle uhlíku, který podstatně ovlivňuje jeho vlastnosti, jsou zpravidla vždy přítomny i další tzv. doprovodné prvky. Tyto prvky se dostávají do ocelí a litin výrobním pochodem. Lze je rozdělit na prospěšné (mangan, křemík, měď) a škodlivé (síra, kyslík, fosfor, dusík či vodík). Dále se do slitin přidávají také prvky, jejichž příměsí lze získat požadované vlastnosti slitin.

Jde především o prvky jako je chrom, nikl, mangan, molybden, wolfram, vanad, titan aj. Proces přidávání těchto přísadových, slitinových prvků se nazývá legování. [13,8]

Další možností, jak lze změnit vlastnosti ocelí, jsou vhodně řízené změny teploty. Procesy tepelného zpracování dovolují v mnoha případech získat požadované vlastnosti a úsporněji legované oceli a nahradit tak dražší ocel s vyšší úrovní legování. Každý postup tepelného zpracování se skládá ze tří hlavních fází - ohřevu na předepsanou teplotu, výdrží na předepsané teplotě a ochlazením.

Tepelné zpracování vyvolává změny struktury a tím i vlastností. Výsledná struktura po tepelném zpracování může být dvojitá: a) rovnovážná, které se dosáhne žíháním; b) nerovnovážná, které se dosáhne kalením. Při těchto postupech tepelného zpracování se mění struktura oceli, aniž dochází ke změnám chemického složení. Jestliže při zvýšené teplotě působí na povrch oceli vhodné prostředí, jehož účinkem se změní chemické složení oceli v povrchové vrstvě, jde o chemicko-tepelné zpracování. [13]

4.4.13. Vliv vlhkosti vzduchu

Podle dosud neúplných a nesystematických výsledků v oblasti zkoumání vlivu vlhkosti na abrazivní opotřebení, můžeme usuzovat, že vliv vlhkosti se může na intenzitu abrazivního opotřebení projevit příznivě i negativně.

Na základě zkoušek na brusném plátně bylo prokázáno, že intenzita opotřebení roste s obsahem vodní páry ve vzduchu a vliv relativní vlhkosti vzduchu je mnohem vyšší, dochází-li ke kondenzaci par na povrchu abrazivních zrn. Při dlouhodobém porovnávání naměřených úbytků má vlhkost vzduchu vliv i na vlastnosti brusných pláten nebo papírů, zejména pokud jsou pojeny kličem. [10]

Příznivé působení vlhkosti vzduchu se projeví tím, že se zlepší třecí poměry částic a povrchu. To nastane v případech vyšší intenzity opotřebení, kdy rychlost porušování povrchové vrstvy rýhováním bude převládat nad narůstáním zplodin koroze a jejich eventuálním porušováním. Pokud však půjde o opotřebení menší intenzity, růst korozních zplodin bude srovnatelný s abrazí a může jí naopak usnadňovat. Ve většině případů jsou totiž korozní produkty měkčí než základní materiál a snadněji se oddělují z jeho povrchu. [10]

4.5. Zkoušky abrazivního opotřebení

Velikost opotřebení se měří: délkovým W_e , hmotnostním W_h , nebo objemovým otěrem, který se zpravidla vztahuje na jednotku dráhy $W_e \cdot x^{-1}$, $W_h \cdot x^{-1}$ a $W_o \cdot x^{-1}$ a uvádí se v $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-1}$ a $\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$.

Časovou derivací otěru ($w_i = dW \cdot dt^{-1}$) je definována rychlost otěru.

K hodnocení opotřebení se kromě uvedených přímo měřených veličin používá i veličin relativních. Nejčastěji je používán vztah: [15]

$$\Psi_i = \frac{W_i \text{ etalonu}}{W_i \text{ vzorku}}, \quad i = l, h, o \quad [\text{mm}, \text{mg}, \text{mm}^3] \quad (3)$$

Metody zkoušení abrazivního opotřebení

Nejčastějšími metodami, kterými lze zjistit abrazivní opotřebení, jsou:

Provozní zkoušky - které probíhají na výrobním zařízení, umožňují sledovat a hodnotit opotřebení přímo na dané strojní součásti nebo na konstrukčním uzlu. Výsledky provozních zkoušek jsou často ovlivněny proměnlivostí provozních parametrů. Proto mají význam jen pro konkrétní výrobní zařízení nebo pro zařízení pracující v obdobných podmínkách. [16]

Výhodou provozních zkoušek je hodnocení a sledování materiálu ve skutečných podmínkách - přímo na strojní součásti a v terénu. Naopak mezi nevýhody patří zpravidla vysoké náklady, organizační potíže, vyšší časová náročnost a nestálost okolního prostředí.

Laboratorní zkoušky - při laboratorních zkouškách se dají obvykle modelovat jen některé základní parametry, a proto získané výsledky lze aplikovat až po důkladné analýze skutečných provozních podmínek. Na laboratorních přístrojích však můžeme studovat vliv jednotlivých faktorů na charakter a intenzitu opotřebení. [16]

Výhodou laboratorních zkoušek je jejich opakovatelnost, časová nenáročnost a relativně nízké náklady, nevýhodou je odlišnost průběhu zkoušky od namáhání materiálu v provozu. [17]

Tato zkouška je prováděna ve stanovených a kontrolovaných klimatických podmínkách. Zařízení pro tyto zkoušky se rozdělují podle podmínek v oblasti dotyku na:

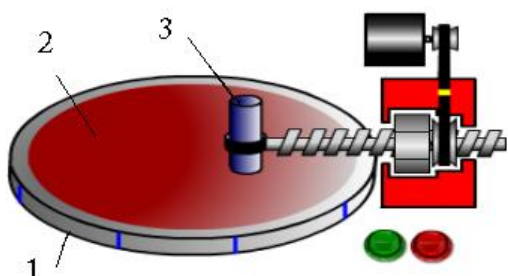
- přístroje s vázanými částicemi (mohou být ve formě: brusného plátna, brusného kotouče, přístroje s přímočarým vratným pohybem, popř. přístroje s brusným pásem),
- přístroje s volnými částicemi (lze je rozdělit na přístroje bubnové, přístroje s pružným kotoučem nebo přístroje s brusnou nádobou),
- přístroje s vrstvou volných částic mezi dvěma stykovými povrchy.

4.5.1 Přístroje s vázanými částicemi

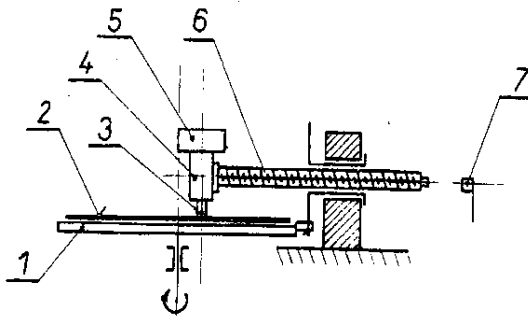
Vázané abrazivní částice mohou být ve formě brusného plátna nebo brusného kotouče. Přístroje s brusným plátnem se používají ke zkouškám kovových materiálů nejčastěji. Jejich předností je jednoduchost a spolehlivost. Rozptyl výsledků je relativně malý. [18]

4.5.1.1 Přístroj s brusným plátnem

Na rovnoměrně se otáčející vodorovné desce je upevněno brusné plátno (obr. 6, 7). Zkušební těleso je drženo v upínací hlavici a je silou vyvozenou závažím přitlačováno k brusnému plátnu. Během zkoušky je zkušební těleso posunováno od středu ke kraji brusného plátna za pomoci zařízení umožňujícího radiální posuv, aby částí svého povrchu přicházelo neustále do styku s nepoužitým brusným plátnem. Po ujetí předepsané dráhy se přístroj automaticky vypne. [19]



Obr. 6 Přístroj s brusným plátnem [18]

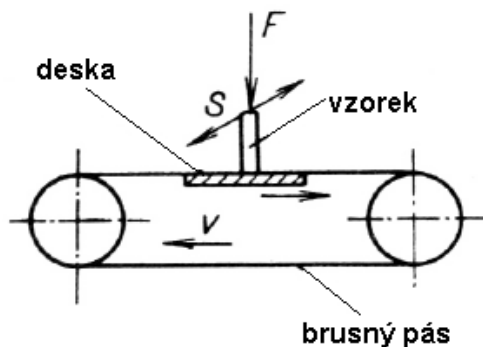


Obr. 7 Schéma přístroje s brusným plátnem [19]

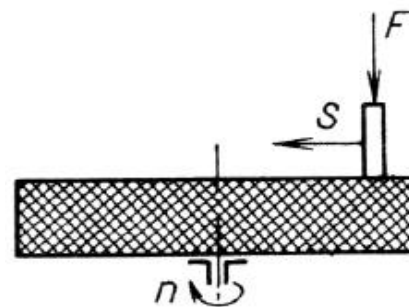
Legenda obr. 6 a obr. 7: 1 - rotující deska, 2 - brusné plátno, 3 - zkušební těleso, 4 - držák, 5 - závaží k vyvození přitlačné síly, 6 - pohybový šroub, 7 - koncový spínač. [2]

4.5.1.2 Přístroj s brusným pásem

Předností těchto přístrojů (obr. 8) je jednoduchost a spolehlivost. Rozptyl výsledků je relativně malý (v rozmezí 5%). Nevýhodou všech přístrojů s vázanými částicemi je klesající abrazivita brusného plátna i brusného kotouče v průběhu zkoušek. Abrazivní částice se postupně opakovanými interakcemi s povrchy zkoušených vzorků otupují a vylamují, kromě toho se jejich povrch znečišťuje částicemi oteru. [18]



Obr. 8 Přístroj s brusným pásem [10]



Obr. 9 Schéma přístroje s brusným kotoučem [10]

4.5.1.3 Přístroj s brusným kotoučem

Brusný kotouč (obr. 9) je tvořen velkým množstvím tvrdých zrněk spojených pojivem. Brusná zrnka jsou vyrobena z brusných materiálů, jako je umělý korund a karbid křemíku. Ostré hrany zrněk odebírají tenké třísky. Výhodou přístrojů s brusným kotoučem je, že s jejich pomocí lze zkoušet materiály proti abrazivnímu opotřebení za vysokých teplot.

4.5.2 *Přístroje s volnými částicemi*

Mezi přístroje s volnými částicemi patří především přístroj s pryžovým kotoučem, na kterém byla provedena zkouška úbytku materiálu pro tuto diplomovou práci. Dále se mezi přístroje s volnými částicemi řadí přístroje s bubnovou nádobou a bubnové přístroje.

4.5.2.1 *Přístroj s pryžovým kotoučem*

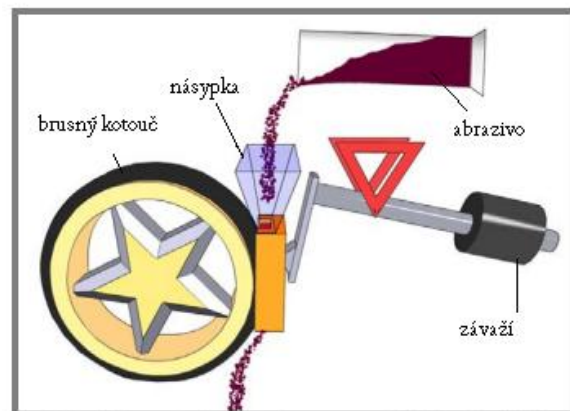
Tento přístroj s pryžovým kotoučem (obr. 10) byl, jak už bylo výše zmíněno, použit při zkoušce pro tuto diplomovou práci. Průběh zkoušky bude blíže popsán v kapitole 5.7.

Charakteristika zkoušky je následující:

Mezi pryžový rotující kotouč a pevně uchycený vzorek, který je dostatečně zatížen závažím, jsou vnášeny abrazivní částice v množství 250mg (obr. 11). Celý abrazivní proces trvá 1 minutu. Výsledkem testu je úbytek objemu vzorku tj. míra opotřebení zkoušeného materiálu v krychlových milimetrech. Hmotnostní úbytky vzorku jsou měřeny na digitálních váhách s přesností měření na 0,0001g.



Obr. 10 Přístroj s pryžovým kotoučem



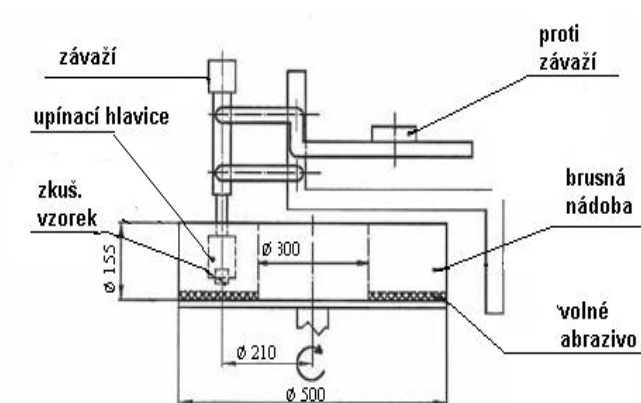
Obr. 11 Schéma přístroje s pryžovým kotoučem [16]

Nedostatkem těchto přístrojů je nevhodná reprodukovatelnost v použití abraziva. Při opakovaném použití abrazivního materiálu dochází ke snížení abrazivity a tím tedy k nepřesným výsledkům zkoušky. Dalším důvodem proč nelze opětovně použít abrazivo

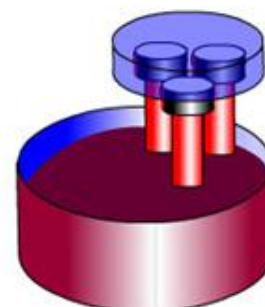
je, že obsah nečistot v abrazivu může zapříčinit zneprůchodnění násypky a tím zkreslení výsledků zkoušky. Je tedy vhodné po každém měření použít nový abrazivní materiál a pečlivě po zkoušce vyčistit násypku a zkontrolovat průchodnost násypky.

4.5.2.2 *Přístroje s brusnou nádobou*

Základem přístrojů s „brusnou“ nádobou (obr. 12, 13) je zkušební nádoba s abrazivními částicemi, do které zasahují zkušební vzorky. Při vzájemném relativním pohybu vzorků a volných částic se jejich povrch opotřebovává.



Obr. 12 Schéma přístroje s brusnou nádobou [20]



Obr. 13 Přístroj s brusnou nádobou [18]

Předností přístrojů je větší přiblížení provozním podmínkám, možnost využít ke zkouškám různé druhy částic a zkoušet materiály i za vysokých teplot. Nedostatkem zkoušek je postupný pokles abrazivity volných částic následkem jejich interakcí s povrchem zkušebních vzorků (drcení, otupování, znečišťování otěrem apod.). V praxi se to řeší periodickou výměnou abraziva.

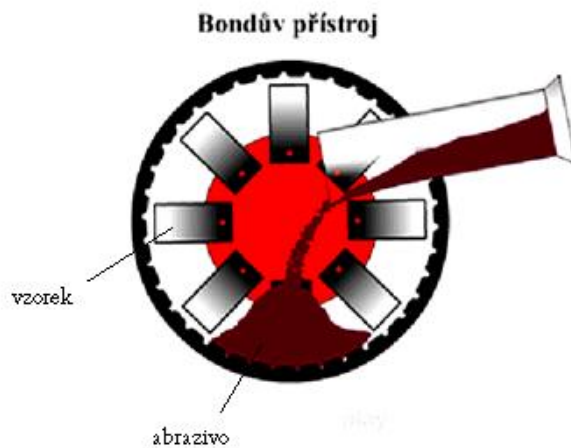
4.5.2.3 *Bubnové přístroje*

Bubnové přístroje (obr. 14, 15) jsou velmi jednoduché a spolehlivé v provozu. Lze pomocí nich měřit několik vzorků v jedné etapě. Výhodou je možnost použití různých druhů abraziva (např. písku, kamennou drť, litinovou drť...).

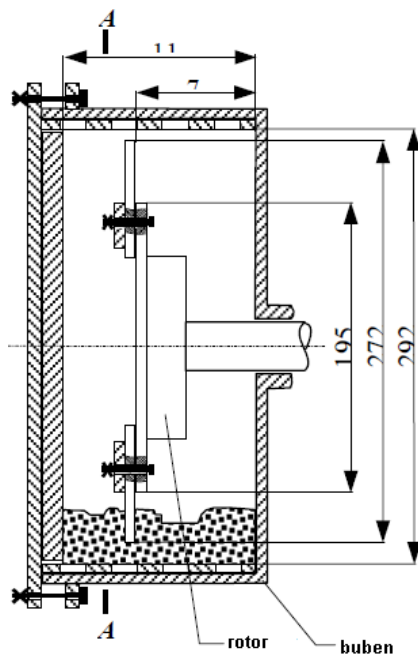
Při laboratorních zkouškách se dají obvykle modelovat jen některé základní parametry, a proto získané výsledky lze aplikovat až po důkladné analýze skutečných provozních

podmínek. Na laboratorních přístrojích však můžeme studovat vliv jednotlivých faktorů na charakter a intenzitu opotřebení. [18]

Princip: Zkušební vzorek se otáčí v prostoru s abrazivem. Složky abraziva vykonávají vůči povrchu vzorku náhodný pohyb.



Obr. 14 Bubnový přístroj [18]



Obr. 15 Schéma bubnového přístroje [18]

5. Experimentální zkoušky návarů na bázi Fe – Cr – C

Tato část diplomové práce bude popisovat postupy při výrobě vzorků, zkoušky tvrdosti, zkoušení abrazivního opotřebení návaru na přístroji s pryžovým kotoučem. V poslední části budou uvedeny postupy statistického vyhodnocení experimentálních zkoušek.

5.1. Použitý základní materiál

Pro experimentální zkoušky byla použita nízkouhlíková nelegovaná ocel S235 JR, jejíž chemické složení je uvedeno v tab. 1. v procentech.

C	Ni	Mn	Cu	S	P
0,080	0,030	0,330	0,030	0,008	0,002

Tab. 1 Chemické složení použitého základního materiálu (v %)

5.2. Použitý přídatný materiál

Pro navařování byl použit trubičkový drát SK A 43 – O firmy Soudokay S.A. - SK A 43 O - DIN 8555 : MF 10-GF-65-G průměru Ø 1,6 mm, jehož chemické složení je uvedeno v tab. 2.

C	Mn	Si	Cr	Nb	Fe
5,6	0,2	1,3	20,2	6,7	Zbytek

Tab. 2 Chemické složení použitého přídatného materiálu (v %)

5.3. Zkouška navařovacích parametrů

Byly vyzkoušeny maximální a minimální hodnoty navařovacího proudu I [A] a napětí U [V].

Zmíněné hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.

Hodnoty	U [V]	I [A]	v [cm.min-1]	Lpr [mm]
Min	24	110	60	12
Max	32	300	20	12

Tab. 3 Použité hodnoty při zkoušení navařovacích parametrů

Po zkoušce navařovacích parametru byla provedena zkouška stability drátu. Bylo zjištěno, že navařování je stabilní v celém rozmezí, to znamená, že lze navařovat.

5.4. Navařovací parametry

Hodnoty navařovacího proudu I (A) a napětí U (V), které byly použity při experimentu, uvádí tab. 4a, 4b.

Číslo vzorku	U	I	V	N
	[V]	[A]	[cm/min]	[mm]
1	26	180	30	16
2	26	180	30	24
3	26	180	50	16
4	26	180	50	24
5	26	260	30	16
6	26	260	30	24
7	26	260	50	16
8	26	260	50	24
9	30	180	30	16
10	30	180	30	24
11	30	180	50	16
12	30	180	50	24
13	30	260	30	16
14	30	260	30	24
15	30	260	50	16

Tab. 4a Použité navařovací parametry

Číslo vzorku	U	I	V	N
	[V]	[A]	[cm/min]	[mm]
16	30	260	50	24
17	24	220	40	20
18	32	220	40	20
19	28	140	40	20
20	28	300	40	20
21	28	220	20	20
22	28	220	60	20
23	28	220	40	12
24	28	220	40	28
25	28	220	40	20
26	28	220	40	20
27	28	220	40	20
28	28	220	40	20
29	28	220	40	20
30	28	220	40	20

Tab. 4b Použité navařovací parametry

Návary na základním materiálu byly vytvořeny trubičkovým drátem MOG (\varnothing 1,6 mm) na svařovacím automatu. Proces probíhal v ochranné atmosféře CO₂ (obr. 13). Navařování bylo provedeno bez přehřevu základu. Navařovalo se elektrickým obloukem pomocí odtažující se kontinuálně podávané elektrody.

5.5. Příprava zkušebních vzorků

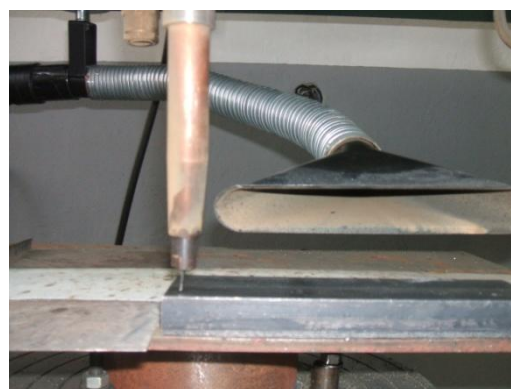
Jelikož návarová vrstva má poměrně vysokou tvrdost, nemohl být základní materiál rozřezán klasickým způsobem. K dělení materiálu bylo využito rozbrušovacích kotoučů, pomocí

kterých se narušila tvrdá návarová vrstva. Vzhledem k tomu, že byla také vrstva části základního materiálu (v části kde došlo k promíšení základního a přídavného materiálu) příliš tvrdá, byl i zde použit rozbrušovací kotouč. Poté již došlo k nařezání materiálu klasickým způsobem pomocí strojní rámové pily FA – 320. Rozřezané vzorky o rozměrech 25 x 25 x 8 byly dále označeny a zpracovány pro vyhodnocení laboratorního experimentu.

Desky byly pomocí razidel a elektronického pera označeny kódem. Navaření návarové housenky (obr. 18) bylo provedeno pomocí svařovacího automatu ESAB (obr. 16, 17). U vzorků byla zbrušena plocha návaru na frézce FA2V a hrany byly začištěny pilníkem. Vzorky se označily pomocí elektronického pera, očistily a připravily na zkoušku tvrdosti podle Vickerse.



Obr. 16 Navařovací proces



Obr. 17 Navařovací proces



Obr. 18 Návarová housenka

5.6. Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Měření tvrdosti návarů byla provedena podle Vickerse HV 30 na přístroji zvaném tvrdoměr HPO 250 (obr. 20). Vzorky byly před touto zkouškou pečlivě očištěny a odmaštěny. Měřeny byly 2 oblasti na vzorku – levý a pravý okraj, z nichž v každé bylo provedeno šest měření (vtisků). Celkem bylo tedy provedeno 12 vtisků do každého vzorku. Předepsané zkušební zatížení bylo $F = 294 \text{ N}$. Rozmístění vtisků na vzorku je znázorněno na obr. (obr. 19). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze.



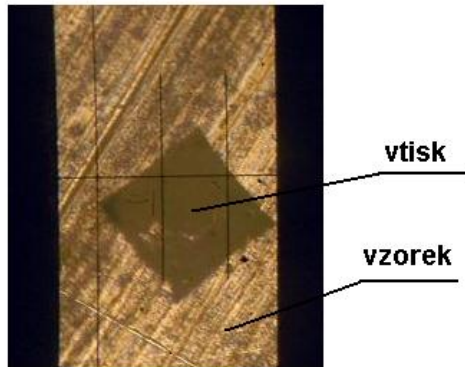
Obr. 19 Naznačení vtisků na vzorku



Obr. 20 Přístroj na měření tvrdosti

Zkouška tvrdosti podle Vickerse spočívá ve vtláčování diamantového tělíska ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu do zkušebního materiálu. Takto vytvořený vtisk má tvar čtvercový. Mírou tvrdosti jsou zde délky úhlopříček po odlehčení zatížení. Vzorek se vloží na podložku měřidla. Měřidlo se skládá z 2 hlavních částí. V levé části je objektiv, pomocí kterého se vyhledá vhodné místo na vzorku. Poté se natočí až na doraz horní část přístroje vlevo a tím je připraven k měření. Měření se provede stlačením páky na pravé straně dolů, opět na doraz. Páka se zdvihne nahoru pomocí pružiny, která vyvine potřebnou sílu. Vytvořený vtisk se pak zobrazí v okuláru (obr. 21).

Vhodným otáčením pomocí ovládacích prvků si nastavíme obraz vtisku. Délku úhlopříčky změříme pomocí rysek v okuláru a podle stupnice na ovládacím prvku.



Obr. 21 Měření tvrdosti - vtisk [21]

Tvrдост se vyjadřuje jako poměr zatížení vnikajícího tělíska F k ploše vtisku (plášť jehlanu):

$$HV = \frac{F}{S} = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (4)$$

Kde: F (N) je zkušební zatížení, u [mm] je aritmetický průměr délek úhlopříček vtisku u_1 a u_2 . Tvrдост se označuje bezrozměrným číslem před písmeny HV.

Byly změřeny délky úhlopříček u_1 a u_2 . Pro stanovení tvrdosti podle Vickerse se použije aritmetický průměr d obou změřených úhlopříček: [8]

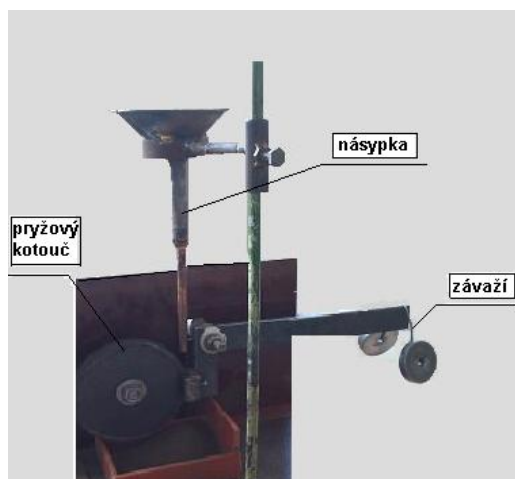
$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (5)$$

5.7. Zkoušky abrazivního opotřebení materiálu na pryžovém kotouči

Před experimentálním měřením došlo k úpravě vzorků na požadovaný rozměr. Vzorky byly očištěny a zbaveny nečistot opláchnutím v acetonu a nakonec osušeny. Následovalo zvažení vzorků na laboratorních váhách (obr. 22). Přístroj s pryžovým kotoučem (obr. 23), na kterém byla provedena laboratorní zkouška, byl zatížen závažím o hmotnosti 250 g. Pro zkoušku na pryžovém kotouči byl vybrán jeden druh abraziva, konkrétně hnědý korund o zrnitosti 80. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze.



Obr. 22 Laboratorní váhy

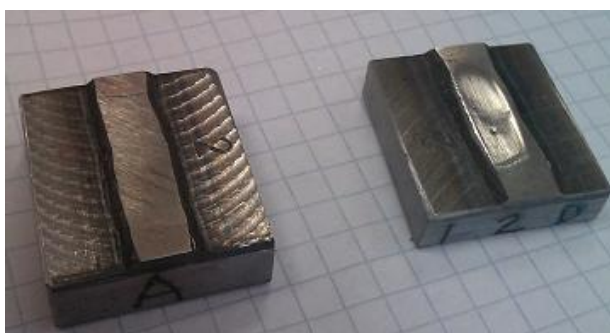


Obr. 23 Přístroj s pryžovým kotoučem

Před spuštěním přístroje, byl vzorek vložen do prostoru mezi pryžový kotouč a páku se závažím, kde byl pevně uchycen a vystředěn tak, aby se návarová plocha dotýkala kotouče. Na digitálních váhách (obr. 24) se navážilo 250 mg abraziva (hnědý korund). Toto abrazivo bylo při spuštění přístroje vsypáno mezi rotující kotouč a vzorek. Zkouška trvala 1 minutu. Po zkoušce byl vzorek (obr. 25) očištěn, odmaštěn, osušen a opět zvážen na laboratorních váhách. Výsledek byl řádně zapsán a vyzkoušený vzorek byl uložen. Prvotním výsledkem zkoušek je hmotnostní úbytek testovaného materiálu. Zkouška byla na každém vzorku provedena třikrát. Po provedení zkoušky bylo vždy důležité vyčistit násypku, aby nedošlo ke zpomalení vsypání abraziva a tím ke zkreslení výsledků.



Obr. 24 Digitální váhy



Obr. 25 Vzorek před a po zkoušce na pryžovém kotouči

5.8. Statistické vyhodnocení experimentu

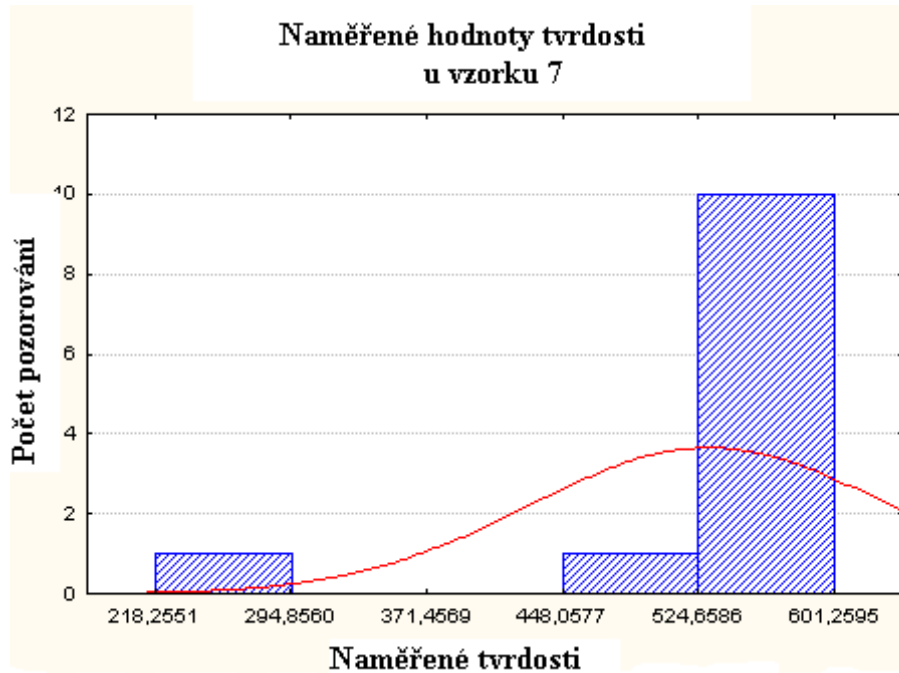
Statistické vyhodnocení laboratorních zkoušek bylo provedeno v programu STATISTICA metodou DoE – pomocí faktoriální funkce ANOVA (Analysis of Variance = analýza variace), která slouží k posouzení jednotlivých zdrojů variability v datech.

DoE není jen vlastním návrhem experimentu, ale je to souhrn řady činností, které můžeme rozdělit do pěti etap a to: Plánování experimentu, vlastní návrh experimentu, provedení experimentu, analýza výsledků a aplikace výsledků.

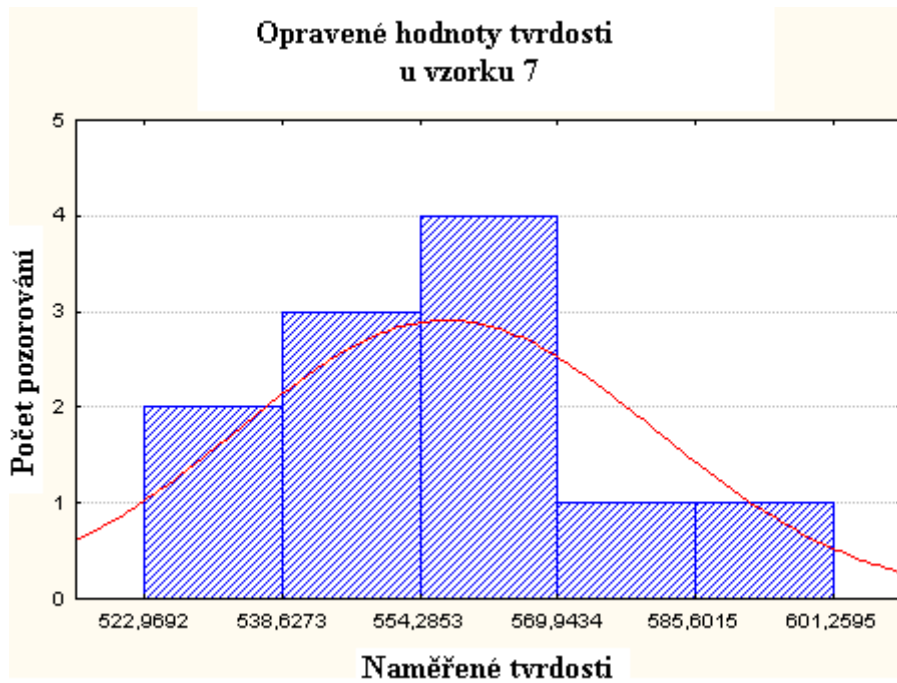
Faktoriální experiment při vyhodnocení sestává z několika kroků. Prvním krokem je výpočet efektů faktorů a interakcí. Výsledkem je první, nahrubo načrtnutý model procesu. Pomocí tohoto modelu je možné poté vytvořit tabulku s vypočtenými efekty. (efekt faktoru, regresní koeficient, statistická významnost faktoru nebo interakce vyjádřená jako p-value).

Dalším krokem při vyhodnocení výsledků experimentu je oddělení faktorů „opravdových“ či „významných“ od těch, které jsou jenom výsledkem experimentálního šumu. K tomu mohou posloužit především dva grafy – Paretův graf a normální pravděpodobnostní diagram. Paretův graf - efekty faktorů a interakcí, seřazené podle velikosti do Paretova diagramu. Vychází se z toho, že větší vypočtené efekty budou nejspíš patřit těm faktorům, které mají v procesu skutečný vliv. Principem pro vyhodnocení experimentu pomocí normálního pravděpodobnostního diagramu je vycházet z úvahy, že samotný experimentální šum má normální rozdělení. [23]

Při vyhodnocení naměřených hodnot z laboratorních měření, byly nejprve v programu STATISTICA vytvořeny grafy Q-Q a P-P včetně histogramů z hodnot tvrdosti, které byly zjištěny na základě laboratorních experimentů. Jelikož byly některé naměřené hodnoty tvrdosti zkreslené a chybné, bylo nutné provést separaci těchto hodnot na základě výchylek v grafech a histogramech (obr. 26). Tyto chybné hodnoty byly vymazány z tabulky naměřených hodnot tvrdostí. Graf po vymazání chybných hodnot je znázorněn na obrázku (obr. 27). Dále byl pomocí popisné statistiky v programu STATISTICA byl vypočten průměr hodnot tvrdostí a směrodatná odchylka. Dále se pomocí popisné statistiky vytvořily pravděpodobnostní a bodové grafy včetně Paretova grafu standardizovaných efektů.



Obr. 26 Příklad s pryžovým kotoučem

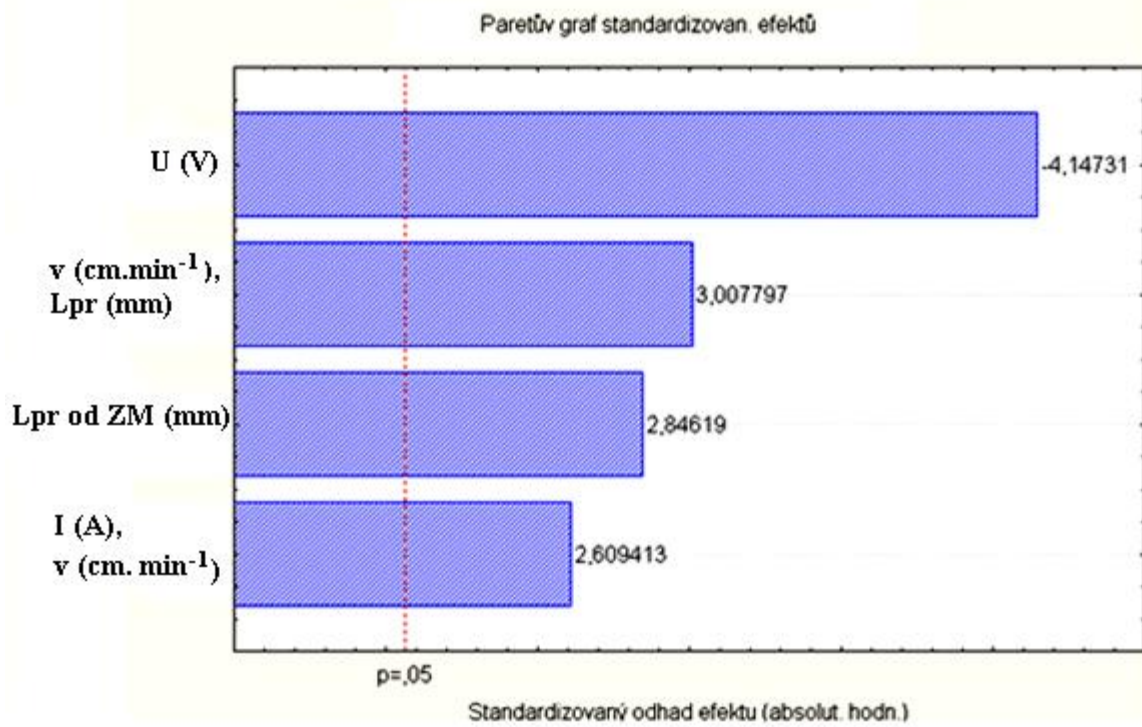


Obr. 27 Histogram tvrdosti po odstranění chyby

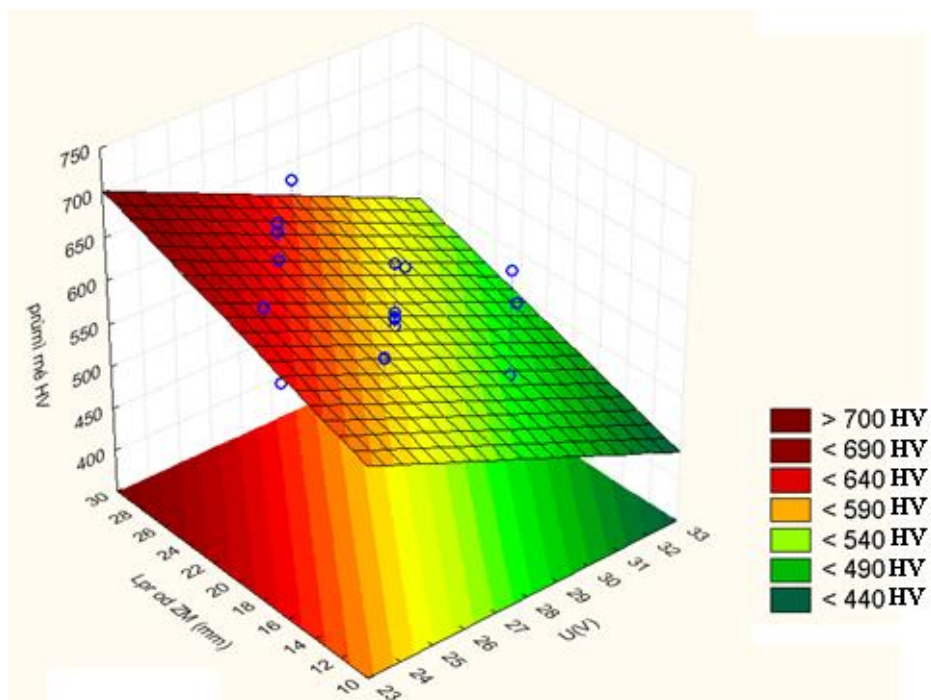
Na základě analýzy rozptylu ANOVA pro $t(\alpha) = 0,05$ byly sledovány vlivy parametrů (napětí, rychlost, vzdálenost průvlaku od základního materiálu) a jejich efekty. Všechny tyto parametry měly význam, ale každý z nich měl jiný vliv.

5.9. Vyhodnocení tvrdosti a úbytku materiálu

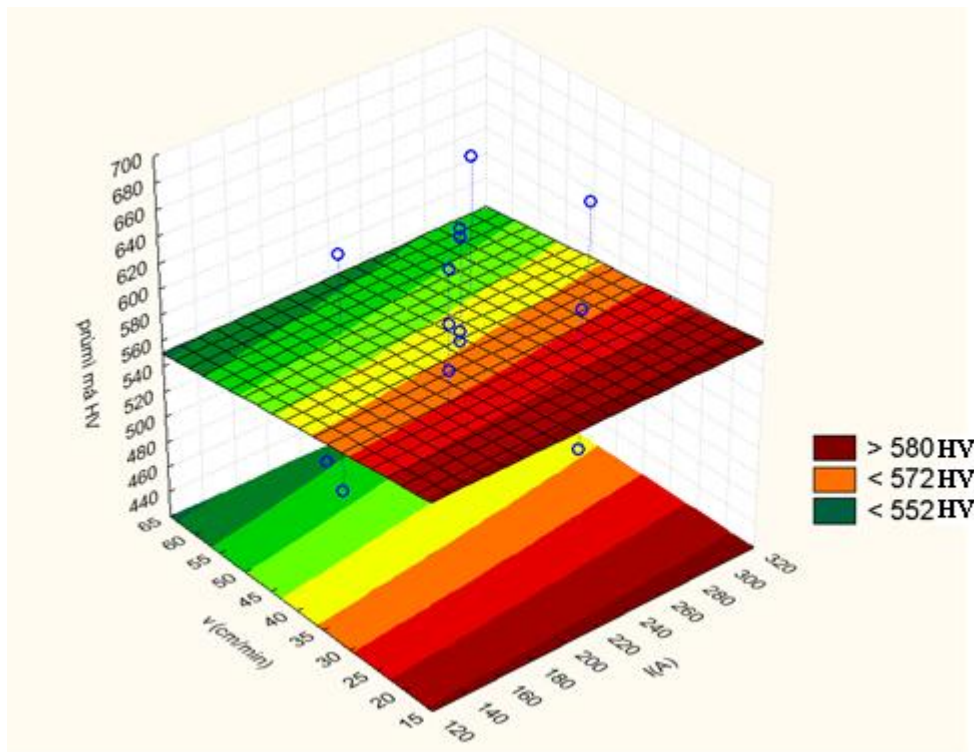
Na základě analýzy ANOVA vyplývá přímý vliv napětí a vzdálenosti průvlaku od základního materiálu. Z Paretova grafu (obr. 28)) je zřejmé, že s rostoucí hodnotou navařovacího napětí U [V] klesá tvrdost materiálu a s rostoucí hodnotou vzdálenosti průvlaku od základního materiálu roste tvrdost materiálu. Vliv navařovací rychlosti v [$\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$] byl vyhodnocen v interakci s navařovacím proudem I [A] a vzdáleností průvlaku od základního materiálu L_{pr} [mm]. S rostoucí interakcí navařovacího proudu a navařovací rychlosti roste tvrdost materiálu a stejně tak tomu je i pro interakci navařovací rychlosti a vzdálenosti průvlaku od základního materiálu, kdy s rostoucí interakcí navařovací rychlosti a vzdálenosti průvlaku od základního materiálu, roste tvrdost materiálu. Dále jsou znázorněny grafy proložení (obr. 29 Vliv navařovacího napětí a vzdálenosti průvlaku na tvrdost návaru, obr. 30 Vliv navařovací rychlosti a navařovacího proudu na tvrdost návaru , obr. 31 Vliv vzdálenosti průvlaku a navařovací rychlosti na tvrdost návaru).



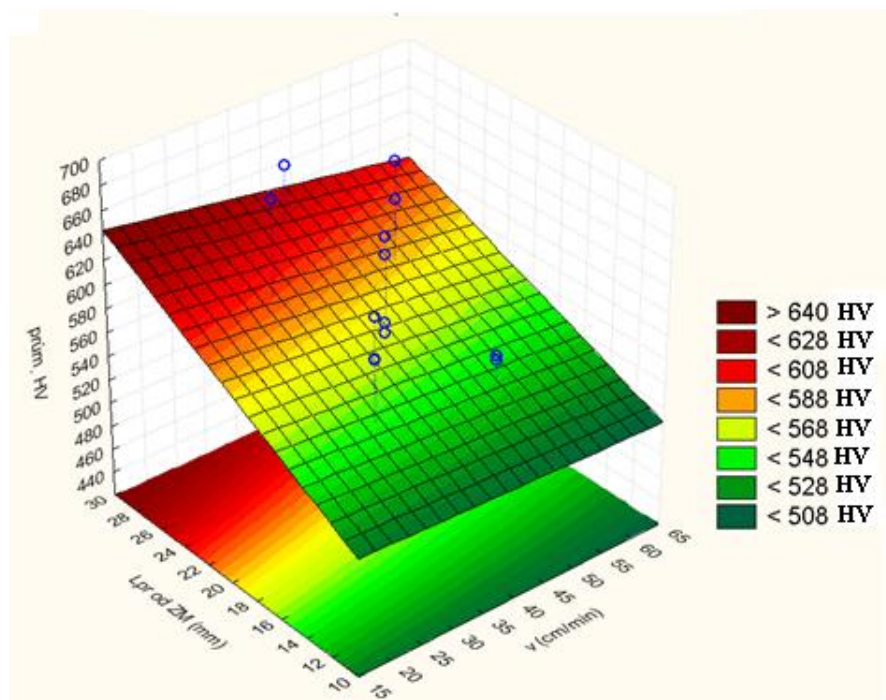
Obr. 28 Paretův graf standardizovaných efektů pro vyhodnocení tvrdosti návaru



Obr. 29 Vliv navařovacího napětí a vzdálenosti průvlaku na tvrdost návaru



Obr. 30 Vliv navařovací rychlosti a navařovacího proudu na tvrdost návaru

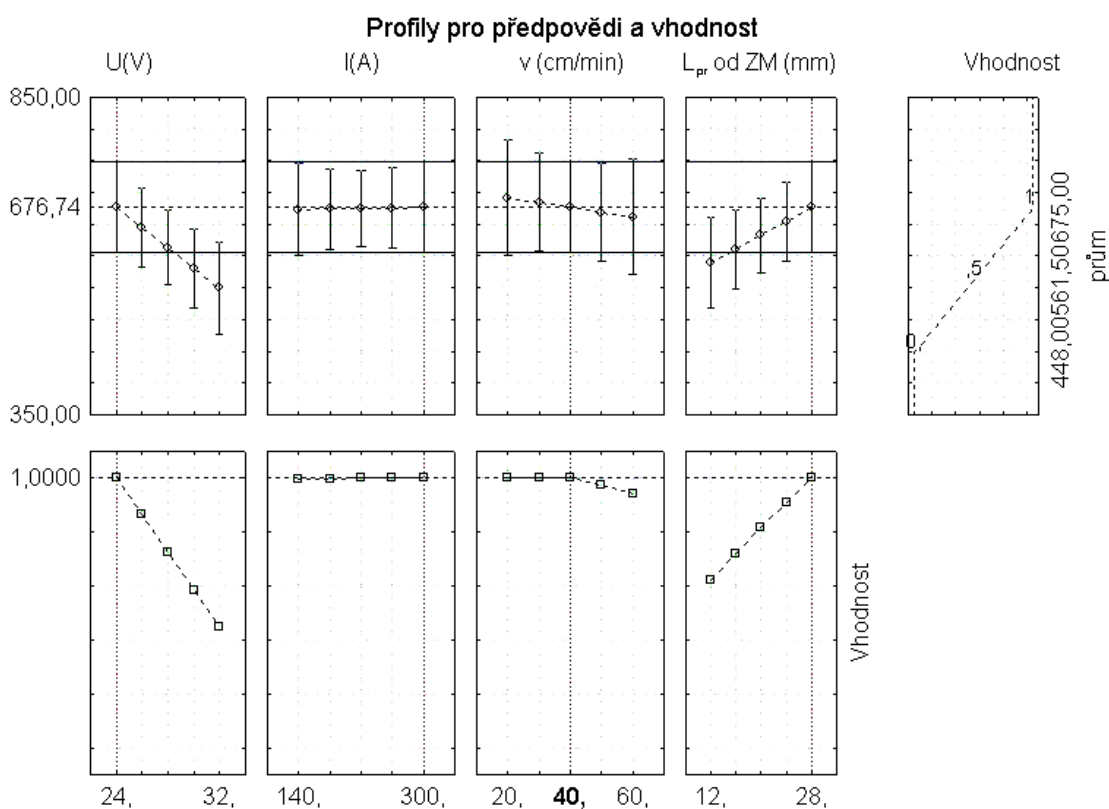


Obr. 31 Vliv vzdálenosti průvlaku a navařovací rychlosti na tvrdost návaru

Odhad efektů tvrdosti materiálu:

Z výsledků podle profilu předpovědi a vhodnosti (obr. 32) je patrné, že se vzrůstající hodnotou napětí při navařování se snižuje tvrdost navařeného materiálu. Optimální hodnotou pro napětí je $U = 24$ V.

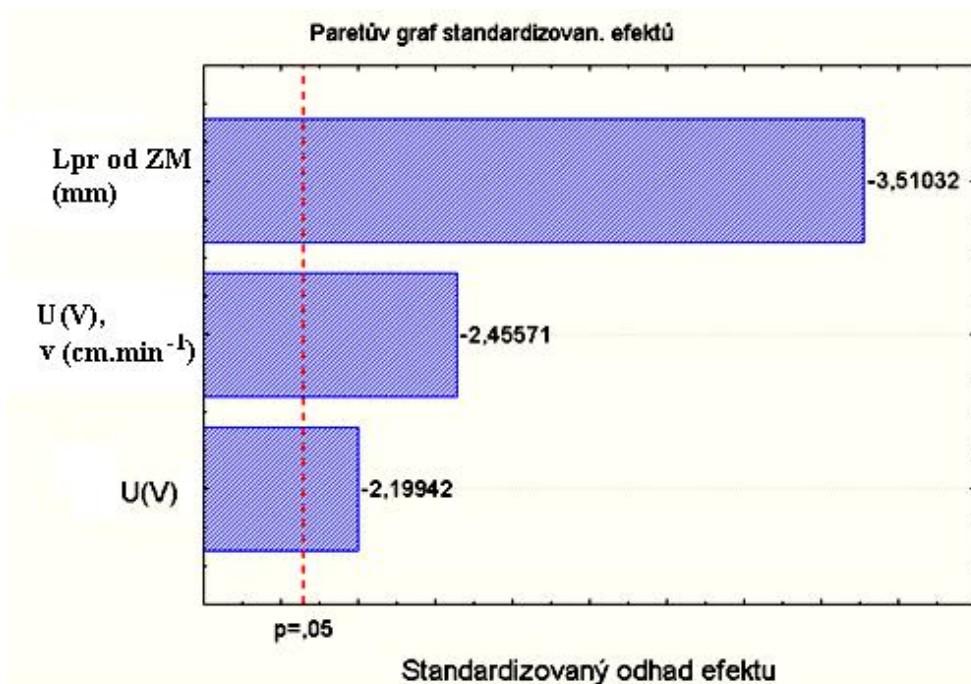
Velikost proudu neprojevila zásadní vliv na tvrdost. Optimální velikost proudu je $I = 300$ A. Dále bylo vyhodnoceno, že se zvyšující se rychlostí navařování, dochází k mírnému poklesu tvrdosti. Optimální hodnotou rychlosti navařování je $v = 40$ cm.min⁻¹. Vzdálenost průvlaku od základního materiálu má také vliv na tvrdost navařeného materiálu. Čím je vzdálenost průvlaku od základního materiálu větší, tím větší je tvrdost navařeného materiálu. Optimální vzdálenost by tedy byla $L_{pr} = 28$ mm.



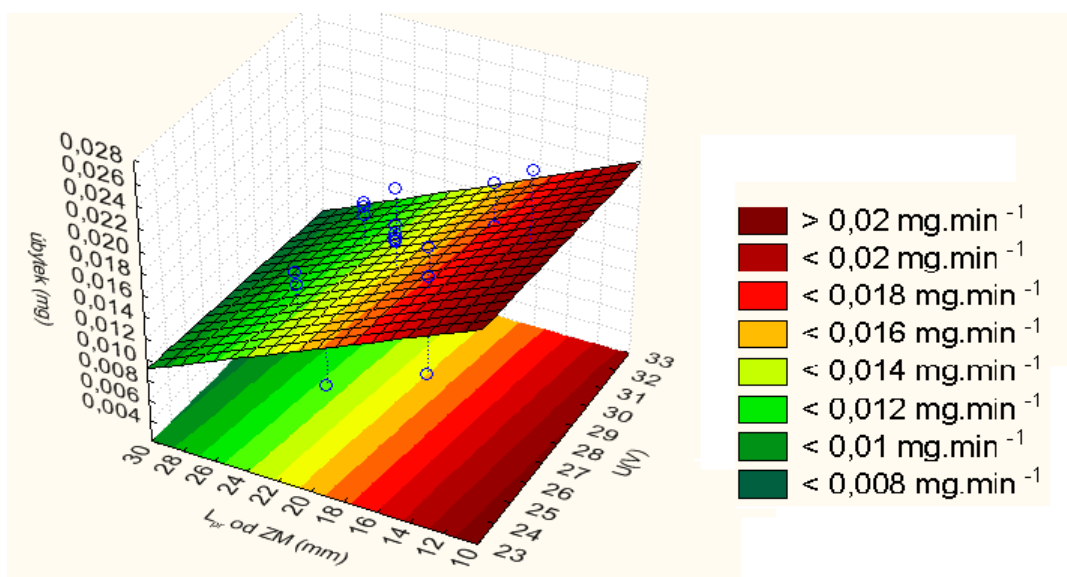
Obr. 32 Předpovědi a vhodnosti parametrů působících na tvrdost návaru

Vyhodnocení úbytku materiálu:

Z Paretova diagramu (obr. 33) a grafu proložení (obr. 34) je zřejmé, že s rostoucí hodnotou navařovacího napětí klesá úbytek materiálu a s rostoucí hodnotou vzdálenosti průvlaku od základního materiálu klesá úbytek materiálu.

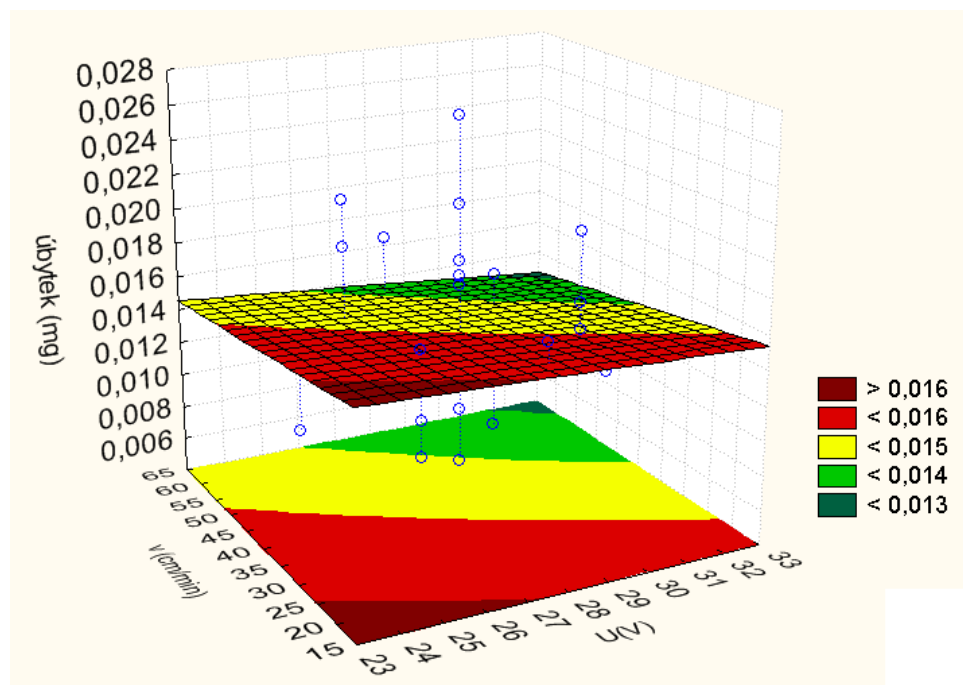


Obr. 33 Paretoův diagram standardizovaných efektů pro vyhodnocení úbytku materiálu



Obr. 34 Vliv navařovacího napětí a vzdálenosti průvlaku na úbytek materiálu

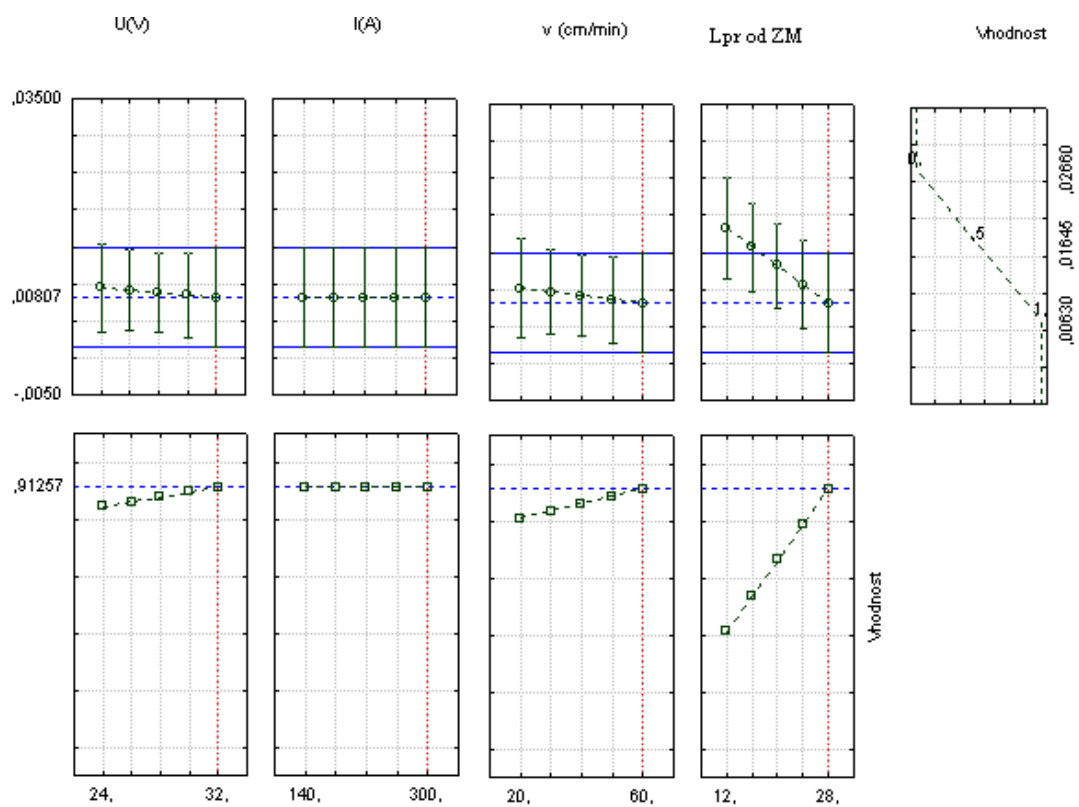
U dalších parametrů navařovacího napětí a navařovací rychlosti (obr. 35) nebyl prokázán přímý vliv, ale byl prokázán vliv interakce těchto dvou parametrů. Vliv navařovacího napětí a navařovací rychlosti je kladný ve vztahu k úbytku materiálu, protože pokud oba parametry (interakce napětí a rychlosti) současně rostou, klesá úbytek materiálu.



Obr. 35 Vliv navařovací rychlosti a navařovacího napětí na úbytek materiálu

Odhad efektů úbytku materiálu:

Z výsledků je patrné (obr. 36), že se vzrůstající hodnotou napětí při navařování dochází k poklesu úbytku navařeného materiálu. Optimální hodnotou byla vyhodnocena na $U = 32 \text{ V}$. Velikost proudu neprojevila zásadní vliv na úbytek materiálu. Optimální velikost proudu $I = 300 \text{ A}$. Dále bylo zjištěno, že se zvyšující se rychlostí navařování, dochází k mírnému poklesu úbytku materiálu. Optimální hodnota byla vyhodnocena na $v = 60 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Vzdálenost průvlaku od základního materiálu má také vliv na úbytek navařeného materiálu. Čím je vzdálenost průvlaku od základního materiálu větší, tím klesá úbytek navařeného materiálu. Optimální vzdálenost průvlaku od základního materiálu byla vyhodnocena jako $L_{pr} = 28 \text{ mm}$.



Obr. 36 Předpovědi a vhodnosti parametrů působících na úbytek materiálu

Závěrečná diskuse:

Z výsledku experimentů je patrné, že velikost rychlosti neprojevila zásadní vliv na velikost úbytku návarového materiálu a ani na tvrdost návaru. Stejně tak tomu bylo i při změně napětí ve vztahu k úbytku materiálu.

Tyto parametry však ovlivňují tvrdost a úbytek materiálu při interakci a to tak, že pokud současně tyto interakce rostou při navařování (navařovací proud a navařovací rychlost, navařovací rychlost a vzdálenost průvlaku od základního materiálu), tak mají kladný vliv na tvrdost návaru. Pokud roste interakce navařovacího napětí a navařovací rychlosti, tak má kladný vliv ve vztahu k úbytku materiálu, jelikož dochází k nižším úbytkům materiálu. Optimální hodnoty byly, při vyhodnocení tvrdosti a úbytku materiálu stanoveny odlišně a to tak, že optimální hodnoty tvrdosti byly pro proud 300 A, pro rychlost 40 cm.min⁻¹ a pro vzdálenost průvlaku od základního materiálu 28 mm. Zatímco optimální hodnoty pro úbytek materiálu byly vyhodnoceny pro napětí 32 V a pro rychlost 60 cm.min⁻¹.

Dále bylo na základě experimentálních zkoušek prokázáno, že zvyšující se vzdálenost průvlaku od základního materiálu má kladný vliv jak na tvrdost materiálu, tak i na úbytek materiálu. Pokud roste vzdálenost průvlaku od základního materiálu, zvyšuje se tvrdost návaru a snižuje se úbytek materiálu. Dále s rostoucí hodnotou napětí, klesá úbytek materiálu a také klesá tvrdost návaru. Optimální hodnota pro vzdálenost průvlaku byla vyhodnocena, jak pro úbytek materiálu, tak i pro tvrdost materiálu 28 mm. Optimální hodnota napětí byla vyhodnocena 24 V a optimální hodnota napětí 32 V.

Jak je vidět z vyhodnocení experimentálních zkoušek, není snadné stanovit optimální hodnoty, pokud chceme dosáhnout dostatečné tvrdosti návaru a co nejnižších úbytků materiálu. Celé chování může být ovlivněno dalšími vlivy, které byly při sestavování tohoto experimentu konstantní, jako například tepelné předeřtí elektrody, pozice navařování, typ elektrody, náplň elektrody, chemické složení, rychlost navařování, teplota a vlhkost místnosti apod.

6. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo shromáždit poznatky o zatížení, velikosti abrazivních částic, struktuře opotřebovávaného materiálu a dalších faktorů působících na odolnost proti abrazivnímu opotřebení. A na základě experimentálních zkoušek posoudit vliv některých proměnných parametrů navařovacího procesu, při zachování značného množství konstantních proměnných parametrů působících na navařovací proces, na opotřebení jednoho z mnoha druhů návarových materiálů.

Tento cíl byl splněn v kapitolách 4.4. a 5., které se věnují problematice „Vlivy působící na abrazivní opotřebení“ a „Experimentální zkoušky abrazivního opotřebení“.

Prvním krokem praktické části práce bylo vytvoření návarů na základním materiálu při různých parametrech navařování (vzdálenost průvlaku od základního materiálu, rychlost navařování, proud, napětí). Navařený základní materiál byl nařezán na jednotlivé vzorky. Tyto vzorky byly poté použity pro laboratorní zkoušky prováděné v laboratořích „Katedry materiálu a strojírenské technologie“. Zde byly, laboratorně zkoušeny vlivy parametrů navařování v závislosti na změřené tvrdosti a hmotnostních úbytků při zkoušce abrazivního opotřebení na pryžovém kotouči.

Na základě výsledků těchto experimentálních zkoušek bylo provedeno závěrečné vyhodnocení. Výsledné hodnoty zkoušek byly porovnány v závislosti na odlišných navařovacích parametrech zkoušených vzorků. K vyhodnocení výsledků byla použita metoda experimentální strategie DoE. Pomocí této metody byly v programu STATISTICA vyhodnoceny výsledky experimentálních zkoušek. Za pomoci analýzy rozptylu pro $t_{(a)}=0,05$ byly sledovány vlivy parametrů (napětí, rychlost, vzdálenost průvlaku od základního materiálu) a jejich efekty. Všechny tyto parametry měly význam, ale každý z nich má jiný vliv.

Z laboratorních zkoušek měření tvrdosti podle Vickerse byly v programu STATISTICA vyhodnoceny, za pomoci metody DoE, naměřené hodnoty společně s odlišnými navařovacími parametry. Experimentální výsledky lze shrnout do několika bodů:

- a) Pokud roste velikost napětí při navařování, klesá tvrdost materiálu,

- b) Roste-li vzdálenost průvlaku od základního materiálu při navařování, vzrůstá potom i tvrdost materiálu.
- c) U dalších parametrů, kterými jsou proud a rychlost, nebyl prokázán přímý vliv, ale byl prokázán vliv interakce těchto dvou parametrů. Vliv navařovacího proudu a navařovací rychlosti byl vyhodnocen jako kladný ve vztahu k tvrdosti materiálu, jelikož se při zvyšování této interakce zvyšuje i tvrdost materiálu.
- d) Vliv interakce byl vyhodnocen také u navařovací rychlosti a vzdálenosti průvlaku od základního materiálu. Pokud rostou oba tyto parametry zároveň, zvyšuje se současně i tvrdost materiálu.

Co se týče úbytku materiálu, byly na základě laboratorních zkoušek abrazivního opotřebení na pryžovém kotouči, vyhodnoceny naměřené hodnoty s odlišnými navařovacími parametry. Z analýzy úbytků materiálu vyplývá, že :

- a) s rostoucí hodnotou navařovacího napětí, klesá úbytek materiálu,
- b) s rostoucí hodnotou vzdálenosti průvlaku od základního materiálu klesá úbytek materiálu,
- c) u napětí a rychlosti nebyl prokázán přímý vliv, ale byl prokázán vliv interakce těchto dvou parametrů. Z výsledků je patrné, že pokud oba parametry (navářovací napětí a navařovací rychlost) rostou zároveň, pak klesá úbytek materiálu.

Výsledky experimentů provedených v rámci řešení diplomové práce přispěly k hlubšímu poznání problematiky abrazivního opotřebení. Problematice abrazivního opotřebení je důležité věnovat dostatečnou pozornost. Je prokázáno, že mnohé součásti jsou vystaveny náročným provozním podmínkám a až 80% z nich ztrácí svou funkčnost v důsledku abrazivního opotřebení. Abrazivní opotřebení je nejčastějším důvodem znehodnocení součástí strojů a zařízení, které pracují v prašném prostředí nebo přímo v zemině. Je tedy podstatné pochopit tuto problematiku a minimalizovat tak prostředky vynaložené na ztráty energie, materiálu, opravu a údržbu.

Seznam literatury:

1. MM Průmyslové spektrum, Hodnocení odolnosti návarů proti abrazivnímu opotřebení, 2003, č. 11, s. 52. Dostupné u URL: <http://www.mmspektrum.com/clanek/hodnoceni-odolnosti-navaru-proti-abrazivnimu-opotrebeni>
2. SUCHÁNEK, J., KUKLÍK, V., ZDRAVECKÁ, E.: Abrazivní opotřebení materiálů. 1. Vydání, ČVUT, Praha, 2007, 162 s.
3. BRENDEL, H. a kol.: TRIBOTECHNIKA, SNTL Praha, Praha, 1978, 297 s.
4. ŠIMŮNKOVÁ, Š., ENŽL, E., BLÁHOVÁ, O.: Tření a odolnost proti opotřebení, Moderní technologie povrchových úprav [online]. [cit. 2011-03-09]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/11.html#11>
5. MILITKÝ, J., VANÍČEK, J.: Tření, Vlastnosti vláken [online]. [cit. 2011-03 10]. Dostupné z: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/zvt_p_6.pdf
6. BŘEZINA, R.: Laboratorní zkoušky abrazivního opotřebení, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno. [online]. [cit. 2011-03-09]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_mendelnet/mendelnet2003/obsahy/others/brezina.pdf
7. POŠTA, J.: Provozní schopnost strojů [Učební texty], ČZU, Praha, 2002, 95 s., ISBN 80-213-0966-0.
8. PLUHAŘ, J. et.al.: Nauka o materiálech, 1. Vydání, Praha: SNTL, 1989. 552 s.
9. SUCHÁNEK, J.: Tribotechnika, vyd. Techpark, [online]. [cit. 2011-03-10]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html>
10. VOCEL, M., DUFEK, V., aj.: Tření a opotřebení strojních součástí. Praha, SNTL 1976, 376 s.
11. KAŠPAROVÁ, M., ZAHÁLKA, F., HOUDKOVÁ Š.,: Hodnocení abrazivní odolnosti materiálů, Škoda výzkum s.r.o. [online]. [cit. 2011-03-12]. Dostupné z: <http://www.nanocon.cz/data/metal2009/sbornik/Lists/Papers/054.pdf>

12. POŠTA, J.: Degradace strojních součástí [online]. [cit. 2011-03-14].
Dostupné z: http://degradace.tf.czu.cz/Dgrd_txt/Mngr_ram_txt2.htm
13. HORÁČEK, J.: Nauka o materiálu (návody na cvičení), Česká zemědělská univerzita v Praze, 1998.
14. CHOTĚBORSKÝ, R.: Nauka o materiálu. Praha, ČZU v Praze, 136 s. ISBN, 2006, ISBN: 80-213-1442-7.
15. TESIČEK, s.r.o.: Degradací procesy v konstrukčních materiálech výrobků [online]. [cit. 2011-03-15]. Dostupné z: www.tesydo.cz/.../degradacni-procesy-v-konstrukcnich-materialech.doc
16. BŘEZINA, R.: Laboratorní zkoušky abrazivního opotřebení [online]. [cit. 2011-03-16]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_mendelnet/mendelnet2003/obsahy/others/brezina.pdf
17. HRABĚ, P., CHOTĚBORSKÝ, R.: Zvyšování životnosti abrazivně opotřebovaných strojních součástí <http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-zivotnosti-abrazivne-opotrebenych-strojnich-casti>
18. BŘEZINA, R.: Laboratorní zkoušky abrazivního opotřebení. [cit. 2011-03-15]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_mendelnet/mendelnet2003/obsahy/others/brezina.pdf
19. RÁZKOVÁ, E.: Posouzení vlastností plužních čepelí, [online]. [cit. 2011-03-17]. Dostupné z: josef.posta.sweb.cz/KONF/Razkova.doc
20. CHOTĚBORSKÝ, R., HRABĚ, P., MULLER, M.: Abrazivní opotřebení návarových materiálů na bázi Fe-Cr-C [online]. [cit. 2011-03-17]. Dostupné z: http://www.konstrukce.cz/UserFiles/files/K/2009/abraz_01.pdf
21. FRYŠ, J.: Zkouška tvrdosti podle Vickerse [online]. [cit. 2011-03-16]. Dostupné z: <http://www.quido.cz/mereni/vickers.htm>
22. ČESKÝ ROZHLAS: Zlé a dobré tření, podle knihy Fyzika z vlastních pozorování [online]. [cit. 2011-03-17]. Dostupné z: http://www.rozhlas.cz/vedaarchiv/veda/_zprava/358537

23. MILLER, I.: DoE Návrh a analýza experimentu s pomocí MINITAB, 1. Vydání, Praha, 2010, 122 s.: ISBN 978-80-902770-5-2.
24. SUCHÁNEK, J., [online]. [cit. 2011-03-16]. Dostupné z:
<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42009/opotrebeni-materialu.html>
25. BASSE, L.: „Role of Microstructure and Mechanical Properties in Abrasion, „ Scripta Metall. Mat., 24, 821-826 (1990).
26. ZUM GAHR, K.: Modelling of Two-Body Abrasive Wear, Wear, Vol. 124, 1988, pp. 87-103.
27. SUH, N. P.: Tribophysics. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986.
ISBN: 01-39-30983-7
28. STATSOFT, Inc. (2010). STATISTICA (data analysis software system), version 9.1.
www.statsoft.com.
29. GARBAR, I. I.: „Structure-Based Selection of Wear-Resistant Materials,“ Wear, 181-183, 50-55 (1995).

Seznam obrázků:

<i>Obr. 1 Tření a opotřebení těles</i>	<i>- 4 -</i>
<i>Obr. 2 Tři komponenty kluzného tření [4]</i>	<i>- 5 -</i>
<i>Obr. 3 Schéma různého poškození materiálu opotřebením: 1) adhezivním; 2) abrazivním; 3,4) erozivním; 5,6) kavitačním; 7) únavovým; 8) vibračním</i>	<i>- 7 -</i>
<i>Obr. 4 Abrazivní opotřebení [18]</i>	<i>- 12 -</i>
<i>Obr. 5 Dotyk tělesa s abrazivními částicemi brusného plátna [9]</i>	<i>- 13 -</i>
<i>Obr. 6 Přístroj s brusným plátnem [18]</i>	<i>- 24 -</i>
<i>Obr. 7 Schéma přístroje s brusným plátnem [19]</i>	<i>- 25 -</i>
<i>Obr. 8 Přístroj s brusným pásem [10]</i>	<i>- 25 -</i>
<i>Obr. 9 Schéma přístroje s brusným kotoučem [10]</i>	<i>- 25 -</i>
<i>Obr. 10 Přístroj s pryžovým kotoučem</i>	<i>- 26 -</i>
<i>Obr. 11 Schéma přístroje s pryžovým kotoučem [16]</i>	<i>- 26 -</i>
<i>Obr. 12 Schéma přístroje s brusnou nádobou [20]</i>	<i>- 27 -</i>
<i>Obr. 13 Přístroj s brusnou nádobou [18]</i>	<i>- 27 -</i>
<i>Obr. 14 Bubnový přístroj [18]</i>	<i>- 28 -</i>
<i>Obr. 15 Schéma bubnového přístroje [18]</i>	<i>- 28 -</i>
<i>Obr. 16 Navařovací proces</i>	<i>- 31 -</i>
<i>Obr. 17 Navařovací proces</i>	<i>- 31 -</i>
<i>Obr. 18 Návarová housenka</i>	<i>- 31 -</i>
<i>Obr. 19 Naznačení vtisků na vzorku</i>	<i>- 32 -</i>
<i>Obr. 20 Přístroj na měření tvrdosti</i>	<i>- 32 -</i>
<i>Obr. 21 Měření tvrdosti - vtisk [21]</i>	<i>- 33 -</i>
<i>Obr. 22 Laboratorní váhy</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Obr. 23 Přístroj s pryžovým kotoučem</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Obr. 24 Digitální váhy</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Obr. 25 Vzorek před a po zkoušce na pryžovém kotouči</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Obr. 26 Přístroj s pryžovým kotoučem</i>	<i>- 36 -</i>
<i>Obr. 27 Histogram tvrdosti po odstranění chyby</i>	<i>- 36 -</i>
<i>Obr. 28 Paretův graf standardizovaných efektů pro vyhodnocení tvrdosti návaru</i>	<i>- 38 -</i>
<i>Obr. 29 Vliv navařovacího napětí a vzdálenosti průvlaku na tvrdost návaru</i>	<i>- 38 -</i>
<i>Obr. 30 Vliv navařovací rychlosti a navařovacího proudu na tvrdost návaru</i>	<i>- 39 -</i>
<i>Obr. 31 Vliv vzdálenosti průvlaku a navařovací rychlosti na tvrdost návaru</i>	<i>- 39 -</i>
<i>Obr. 32 Předpovědi a vhodnosti parametrů působících na tvrdost návaru</i>	<i>- 40 -</i>
<i>Obr. 33 Paretův diagram standardizovaných efektů pro vyhodnocení úbytku materiálu</i>	<i>- 41 -</i>
<i>Obr. 34 Vliv navařovacího napětí a vzdálenosti průvlaku na úbytek materiálu</i>	<i>- 41 -</i>
<i>Obr. 35 Vliv navařovací rychlosti a navařovacího napětí na úbytek materiálu</i>	<i>- 42 -</i>
<i>Obr. 36 Předpovědi a vhodnosti parametrů působících na úbytek materiálu</i>	<i>- 43 -</i>

Seznam tabulek:

<i>Tab. 1 Chemické složení použitého základního materiálu (v %)</i>	- 29 -
<i>Tab. 2 Chemické složení použitého přídavného materiálu (v %)</i>	- 29 -
<i>Tab. 3 Použité hodnoty při zkoušení navařovacích parametrů</i>	- 30 -
<i>Tab. 4a Použité navařovací parametry Tab. 4b Použité navařovací parametry</i>	- 30 -

Seznam příloh:

1. Naměřené tvrdosti podle Vickerse [a, b]
2. Hmotnostní úbytky před zkouškou a po zkoušce opotřebení na pryžovém kotouči
3. Krabicový graf tvrdosti

Vzorek	u	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	u1	0,2870	0,3190	0,3090	0,2940	0,3000	0,3060	0,3130	0,3130	0,4080	0,3150	0,3150	0,3130
	u2	0,2750	0,3170	0,2900	0,2940	0,3070	0,3040	0,3930	0,3290	0,3640	0,2860	0,3000	0,2790
2	u1	0,2900	0,2870	0,2920	0,2810	0,2880	0,2980	0,2710	0,2900	0,2840	0,3000	0,2870	0,2860
	u2	0,2890	0,2900	0,2830	0,2880	0,2880	0,2920	0,2780	0,2790	0,2910	0,2810	0,2770	0,3070
3	u1	0,3220	0,3230	0,3220	0,3570	0,4030	0,3260	0,3090	0,3140	0,3260	0,3030	0,3160	0,3280
	u2	0,3220	0,3220	0,3170	0,3230	0,4000	0,3260	0,3100	0,3120	0,3160	0,3060	0,3090	0,3170
4	u1	0,2980	0,3040	0,3030	0,3130	0,2960	0,2930	0,3440	0,2950	0,3040	0,2930	0,2910	0,3100
	u2	0,3010	0,3010	0,2930	0,3050	0,2900	0,2930	0,3120	0,2950	0,2940	0,2990	0,2910	0,2850
5	u1	0,3100	0,3010	0,3140	0,3050	0,3080	0,3160	0,3020	0,3020	0,3070	0,2960	0,3090	0,3050
	u2	0,3100	0,2980	0,3060	0,3050	0,3080	0,3170	0,3030	0,2970	0,3070	0,2880	0,2960	0,3010
6	u1	0,3330	0,3440	0,3430	0,3210	0,3570	0,3500	0,3440	0,2970	0,3340	0,3260	0,3310	0,3340
	u2	0,3360	0,3410	0,3330	0,3240	0,3470	0,3450	0,3350	0,2970	0,3510	0,3260	0,3280	0,3230
7	u1	0,3280	0,3090	0,3040	0,3120	0,3150	0,3220	0,3150	0,3140	0,3210	0,3180	0,3230	0,3150
	u2	0,3220	0,3090	0,3040	0,8160	0,3100	0,3060	0,3150	0,3110	0,3310	0,3170	0,3170	0,3270
8	u1	0,2820	0,2930	0,2930	0,3070	0,3000	0,2950	0,2860	0,2930	0,2940	0,2890	0,2920	0,2960
	u2	0,2860	0,2930	0,2840	0,2960	0,3090	0,2810	0,2920	0,2760	0,2790	0,2940	0,2910	0,2960
9	u1	0,2980	0,2880	0,2840	0,3010	0,2880	0,3050	0,3020	0,3000	0,2990	0,2990	0,2990	0,3000
	u2	0,2940	0,2850	0,2770	0,2890	0,2900	0,3010	0,2910	0,3000	0,2990	0,2920	0,2970	0,3000
10	u1	0,3310	0,3310	0,3400	0,3400	0,3250	0,3270	0,3330	0,3280	0,3280	0,3330	0,3170	0,3160
	u2	0,3300	0,3400	0,3280	0,3340	0,3230	0,3230	0,3360	0,3280	0,3170	0,2990	0,3190	0,3150
11	u1	0,3540	0,3610	0,3580	0,3420	0,3690	0,3520	0,3480	0,3380	0,3390	0,3810	0,4300	0,3500
	u2	0,3540	0,3590	0,3580	0,3220	0,3660	0,3460	0,3430	0,3540	0,3250	0,3970	0,3870	0,3500
12	u1	0,3110	0,3110	0,3120	0,3390	0,3410	0,3280	0,3410	0,3190	0,3200	0,3260	0,3310	0,3250
	u2	0,3110	0,3110	0,3040	0,3390	0,3230	0,3250	0,3410	0,3150	0,3270	0,3160	0,3310	0,3040
13	u1	0,3350	0,3180	0,3150	0,3250	0,3420	0,3540	0,3310	0,3280	0,3320	0,3270	0,3350	0,3290
	u2	0,3110	0,3010	0,3150	0,3310	0,3420	0,3500	0,3320	0,3120	0,3300	0,3310	0,3350	0,3500
14	u1	0,3390	0,3230	0,3270	0,3180	0,3530	0,3240	0,3180	0,3220	0,3020	0,3170	0,3180	0,3130
	u2	0,3610	0,3190	0,3240	0,3120	0,3430	0,3240	0,3180	0,3120	0,2960	0,3190	0,3280	0,3110
15	u1	0,3450	0,3270	0,3460	0,3300	0,3230	0,3250	0,3550	0,3300	0,3340	0,3480	0,3460	0,3200
	u2	0,3520	0,3230	0,3460	0,3300	0,3160	0,3310	0,3510	0,3300	0,3310	0,3480	0,3410	0,3150

Vzorek	u	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
16	u1	0,3140	0,3100	0,3090	0,3200	0,2900	0,3130	0,3200	0,3970	0,3230	0,3150	0,3060	0,3210
	u2	0,3140	0,3100	0,3090	0,3240	0,2900	0,3010	0,3250	0,3970	0,3230	0,3150	0,3010	0,3210
17	u1	0,3070	0,2990	0,2960	0,3100	0,2980	0,3000	0,2830	0,2800	0,2900	0,2950	0,2960	0,2820
	u2	0,2940	0,2990	0,2960	0,3200	0,2830	0,2950	0,2910	0,2890	0,2900	0,3000	0,3000	0,2820
18	u1	0,3340	0,3430	0,3300	0,3350	0,3160	0,3210	0,3200	0,3290	0,3100	0,3330	0,3160	0,3310
	u2	0,3270	0,3360	0,3300	0,3350	0,3160	0,3110	0,3200	0,3240	0,3100	0,3330	0,3200	0,3310
19	u1	0,3300	0,3170	0,3060	0,3320	0,3480	0,3550	0,3370	0,3120	0,3560	0,3280	0,3230	0,3020
	u2	0,3230	0,2960	0,3040	0,3390	0,3480	0,3370	0,3230	0,3220	0,3560	0,3280	0,3060	0,3140
20	u1	0,3150	0,3020	0,2880	0,3000	0,3050	0,2800	0,2920	0,2850	0,3020	0,3000	0,2980	0,2880
	u2	0,3150	0,3020	0,2880	0,3000	0,3050	0,2800	0,2920	0,2850	0,3020	0,3000	0,2980	0,2880
21	u1	0,3150	0,3060	0,3020	0,3060	0,3040	0,3130	0,3120	0,3080	0,3010	0,3090	0,3110	0,3230
	u2	0,3150	0,3060	0,3010	0,3060	0,3040	0,3130	0,3230	0,3180	0,3390	0,3060	0,3110	0,3230
22	u1	0,3490	0,3300	0,3040	0,3120	0,3240	0,3190	0,3330	0,3400	0,3320	0,3030	0,3310	0,3410
	u2	0,3530	0,3150	0,3190	0,3090	0,3240	0,3190	0,3330	0,3400	0,3240	0,3100	0,3160	0,3410
23	u1	0,3490	0,3420	0,3240	0,3350	0,3250	0,3260	0,3380	0,3490	0,3310	0,3330	0,3300	0,3240
	u2	0,3280	0,3390	0,3150	0,3350	0,3320	0,3170	0,3310	0,3380	0,3310	0,3180	0,3300	0,3240
24	u1	0,3140	0,3000	0,2980	0,2900	0,3010	0,3130	0,2960	0,2890	0,2840	0,2910	0,2720	0,2780
	u2	0,2910	0,3100	0,2980	0,2900	0,3010	0,3010	0,2880	0,2890	0,2780	0,2720	0,2720	0,2780
25	u1	0,3260	0,3130	0,3150	0,3000	0,2780	0,3210	0,3070	0,3110	0,3100	0,3090	0,3210	0,3120
	u2	0,3260	0,3060	0,3090	0,3000	0,2780	0,3210	0,3070	0,3110	0,3100	0,3080	0,3060	0,3160
26	u1	0,3070	0,3070	0,3150	0,3210	0,3170	0,2970	0,3100	0,3070	0,3170	0,3130	0,3080	0,3060
	u2	0,3070	0,3070	0,3150	0,3140	0,2970	0,3050	0,3240	0,3070	0,3170	0,3130	0,3120	0,3030
28	u1	0,3140	0,3130	0,3090	0,3270	0,3180	0,3160	0,2980	0,3090	0,3290	0,3090	0,3140	0,3190
	u2	0,3110	0,3060	0,3060	0,3160	0,3140	0,3120	0,2980	0,3130	0,3180	0,3090	0,3100	0,3150
29	u1	0,3310	0,3140	0,3290	0,3330	0,3510	0,3830	0,3040	0,3150	0,3200	0,3150	0,3180	0,2980
	u2	0,3200	0,3140	0,3220	0,3330	0,3510	0,3800	0,3040	0,3010	0,3200	0,3150	0,3120	0,3080
30	u1	0,3330	0,3140	0,3310	0,3290	0,3290	0,3110	0,3050	0,3100	0,2980	0,3340	0,3080	0,3080
	u2	0,3280	0,3140	0,3310	0,3290	0,3110	0,3110	0,3200	0,3100	0,2980	0,3170	0,3090	0,2950

vzorek	U[V]	I[A]	v [cm/min]	L _{pr} [mm]	Ø HV	SD HV	mpm	m1	m2	m3	Δm1	Δm2	Δm3	ΣΔm1	ΣΔm1,2	Σ Δm 1,2,3	pr. M	SD M
1	26	180	30	16	599	36	49,12280	49,11310	49,10340	49,09130	0,00970	0,00970	0,01210	0,00970	0,01940	0,03150	10,50000	1,13137
2	26	180	30	24	675	13	35,88160	35,86980	35,86070	35,84350	0,01180	0,00910	0,01720	0,01180	0,02090	0,03810	12,70000	3,36749
3	26	180	50	16	553	25	47,93520	47,91650	47,86510	47,85220	0,01870	0,02056	0,01290	0,01870	0,03926	0,05216	17,38667	3,26216
4	26	180	50	24	633	15	47,08920	47,07860	47,07110	47,06040	0,01060	0,00750	0,01070	0,01060	0,01810	0,02880	9,60000	1,48549
5	26	260	30	16	600	25	34,12140	34,10600	34,09190	34,07940	0,01540	0,01410	0,01250	0,01540	0,02950	0,04200	14,00000	1,18603
6	26	260	30	24	491	27	47,92530	47,90960	47,89620	47,88610	0,01570	0,01340	0,01010	0,01570	0,02910	0,03920	13,06667	2,29831
7	26	260	50	16	557	24	36,02970	36,00830	35,99140	35,97340	0,02140	0,01690	0,01800	0,02140	0,03830	0,05630	18,76667	1,91543
8	26	260	50	24	665	18	34,05650	34,04200	34,02780	34,01420	0,01450	0,01420	0,01360	0,01450	0,02870	0,04230	14,10000	0,37417
9	30	180	30	16	634	21	33,11450	33,09770	33,08730	33,07720	0,01680	0,01040	0,01010	0,01680	0,02720	0,03730	12,43333	3,09013
10	30	180	30	24	522	25	34,05650	34,04200	34,02780	34,01420	0,01450	0,01420	0,01360	0,01450	0,02870	0,04230	14,10000	0,37417
11	30	180	50	16	448	39	46,59560	46,58380	46,56670	46,54810	0,01180	0,01710	0,01860	0,01180	0,02890	0,04750	15,83333	2,91700
12	30	180	50	24	535	36	44,17790	44,17160	44,16640	44,15590	0,00630	0,00520	0,01050	0,00630	0,01150	0,02200	7,33333	2,28376
13	30	260	30	16	513	37	35,01400	34,99320	34,97400	34,95110	0,02080	0,01920	0,02290	0,02080	0,04000	0,06290	20,96667	1,51511
14	30	260	30	24	545	15	34,27420	34,25890	34,24340	34,21720	0,01530	0,01550	0,01965	0,01530	0,03080	0,05045	16,81667	2,00513
15	30	260	50	16	497	36	46,99600	46,98470	46,97340	46,96250	0,01130	0,01130	0,01090	0,01130	0,02260	0,03350	11,16667	0,18856
16	30	260	50	24	562	26	33,68130	33,66560	33,65070	33,62930	0,01570	0,01490	0,02140	0,01570	0,03060	0,05200	17,33333	2,89406
17	24	220	40	20	650	30	51,16550	51,15510	51,14450	51,13450	0,01040	0,01060	0,01000	0,01040	0,02100	0,03100	10,33333	0,24944
18	32	220	40	20	526	30	50,97680	50,96640	50,96000	50,95210	0,01040	0,00640	0,00790	0,01040	0,01680	0,02470	8,23333	1,64992
19	28	140	40	20	525	54	47,91700	47,89850	47,87070	47,85140	0,01850	0,02780	0,01930	0,01850	0,04630	0,06560	21,86667	4,20819
20	28	300	40	20	635	42	32,87120	32,86130	32,85060	32,82900	0,00990	0,01070	0,01080	0,00990	0,02060	0,03140	10,46667	0,40277
21	28	220	20	20	574	24	31,77020	31,75330	31,73980	31,71740	0,01690	0,01350	0,01344	0,01690	0,03040	0,04384	14,61333	1,61710
22	28	220	60	20	526	43	46,72250	46,70520	46,68830	46,67040	0,01730	0,01690	0,01790	0,01730	0,03420	0,05210	17,36667	0,41096
23	28	220	40	12	508	23	35,00110	34,97450	34,94960	34,91230	0,02660	0,02490	0,01865	0,02660	0,05150	0,07015	23,38333	3,41817
24	28	220	40	28	657	53	48,99070	48,98390	48,97910	48,97410	0,00680	0,00480	0,00500	0,00680	0,01160	0,01660	5,53333	0,89938
25	28	220	40	20	571	25	35,94400	35,92230	35,90310	35,88000	0,02170	0,01920	0,02310	0,02170	0,04090	0,06400	21,33333	1,61314
26	28	220	40	20	579	21	34,43950	34,42660	34,41290	34,38620	0,01290	0,01370	0,01335	0,01290	0,02660	0,03995	13,31667	0,32745
28	28	220	40	20	564	18	47,57300	47,55590	47,54120	47,53060	0,01710	0,01470	0,01060	0,01710	0,03180	0,04240	14,13333	2,68370
29	28	220	40	20	557	34	34,67940	34,66700	34,65560	34,62920	0,01240	0,01140	0,01320	0,01240	0,02380	0,03700	12,33333	0,73636
30	28	220	40	20	563	38	32,40140	32,38370	32,37260	32,34460	0,01770	0,01110	0,01400	0,01770	0,02880	0,04280	14,26667	2,70103

