

**SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA
V NITRE
TECHNICKÁ FAKULTA**

Evidenčné číslo 1127422

TRIBOLOGICKÉ SKÚŠKY OTERUVZDORNÝCH VRSTIEV

BAKALÁRSKA PRÁCA

2010

Pavol Cigán

**SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA
V NITRE**

Rektor: prof. Ing. Mikuláš Látečka, PhD.

TECHNICKÁ FAKULTA

Dekan: prof. Ing. Vladimír Kročko, CSc.

TRIBOLOGICKÉ SKÚŠKY OTERUVZDORNÝCH VRSTIEV

Bakalárska práca

Evidenčné číslo 1127422

Študijný program:	Manažérstvo kvality produkcie
Študijný odbor:	5. 2. 57 Kvalita produkcie
Školiace pracovisko:	Katedra kvality a strojárskych technológií
Školiteľ:	Ing. Ivan Kováč

Čestné vyhlásenie

Podpísaný Pavol Cigáň týmto vyhlasujem, že bakalársku prácu na tému “Tribologické skúšky oteruvzdorných vrstiev“ som vypracoval samostatne s použitím uvedenej literatúry.

Som si vedomý zákonných dôsledkov v prípade, ak hore uvedené údaje nie sú pravdivé.

V Nitre 19. marca 2010

Pavol Cigáň

Pod'akovanie

Dovoľujem si touto cestou poďakovať svojmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Ivanovi Kováčovi za metodickú a odbornú pomoc pri riešení a spracovaní predkladanej práce. Zároveň chcem poďakovať všetkým, ktorí mi boli nápomocní cennými odbornými radami a pripomienkami.

Abstrakt

Trenie je prírodným javom, ktorý má charakter procesu. Nežiaducim javom, ktorý vzniká pri trení je opotrebenie. Jedným z druhov opotrebenia, ktoré sa najčastejšie vyskytuje v strojových častiach priemyselných zariadení je abrazívne opotrebenie. Tvorí až 80% z celkového objemu. Aj z tohto hľadiska sa budeme zaoberať hlavne týmto druhom opotrebenia. Jedným zo spôsobov chemicko-tepelného spracovania kovových materiálov, ktorým sa dosahuje vysoká tvrdosť povrchu a odolnosť proti opotrebeniu, je difúzne boridovanie. Na prípravu presýteného difúzneho roztoku sme použili karbid bóru B_4C a bórax $Na_2B_4O_7$. V bakalárskej práci riešime problematiku, ktorá sa týka tribologických vlastností materiálov. Cieľom je vhodný výber technológie úpravy materiálu a samotného materiálu tak, aby bola zvýšená odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu. Na skúšku proti abrazívnemu opotrebeniu sme vybrali ocele triedy 12 021 a 14 120. Za etalón sme si podľa STN 01 5084 zvolili vzorku ocele 12 014. Aby sme získali zvýšenú povrchovú odolnosť, vzorky sme postupne pretavovali netaviacou sa volfrámovou elektródou (TIG) v plynnej atmosfére čistého Ar. V laboratóriu sme skúmali veľkosť opotrebenia zvolených ocelí, taktiež aj priemerný úbytok hmotnosti. Skúšku sme realizovali na skúšobnom prístroji s brúsnym plátnom, jej princíp spočíval v trení vzorky skúšaného materiálu o brúsne plátno po špirálovej dráhe. Hmotnostný úbytok skúšaných vzoriek sme vážili na elektronickej váhe. U skúšaných vzoriek sme získali výsledky, ktoré potvrdili zvýšenú celkovú pomernú odolnosť proti abrazii. Výsledky môžu poslúžiť technickým pracovníkom pri projektovaní rôznych strojových súčiastok.

Kľúčové slová: abrazívne opotrebenie, trenie, oceľ, tribológia, boridovanie

Abstract

Friction is natural phenomenon, which has the character of process. Undesirable phenomenon, which arises during the friction, is wear. One of the types of wear, which is mostly occurred in mechanical parts of industrial equipment, is abrasive wear. It makes up to 80% of total content. Also from this view, we will concern mainly with this kind of wear. One of the ways of chemical-thermic processing metal materials, by which high hardness and wear resistance are reached, is diffusional boriding. For the preparation of replete diffusional solution we used boron carbide B_4C and borax $Na_2B_4O_7$. In the bachelor work we deal with problems, which concern about tribological qualities of materials. The aim is suitable choice of technology of material modification and material itself in that way, which arises abrasive wear resistance. For testing against abrasive wear we chose steel class 12 021 and 14 120. As etalon we chose sample of steel 12 014 according to STN 01 5084. To gain added surficial resistance, we gradually remelted samples by non-melting wolfram electrode (TIG) in gaseous atmosphere of pure Ar. In laboratory we examined intensity of wear of selected steels, also average decrease of weight. We executed examination using experimental machine with abrasive cloth, its principle predicated on friction of sample of tested material against abrasive cloth along spiral trajectory. We weighted decrease of weight of tested samples on electronic weight. We gained the results from tested samples which confirmed added comparative resistance against abrasiveness. The results can serve to technical workers in projecting various mechanical components.

Key words: abrasive wear, friction, steel, tribology, boriding

Obsah

Zoznam použitých skratiek a značiek	8
Úvod	9
1 Úvod do riešenej problematiky.....	10
1.1 Opotrebenie.....	10
1.2 Druhy opotrebenia	12
1.3 Adhezívne opotrebenie	13
1.4 Abrazívne opotrebenie	14
1.4.1 Faktory ovplyvňujúce abrazívne opotrebenie.....	17
1.5 Erozívne opotrebenie	18
1.6 Únavové opotrebenie	19
1.7 Kavitačné opotrebenie	20
1.8 Vibračné opotrebenie	20
1.9 Difúzia	21
1.9.1 Faktory ovplyvňujúce difúziu.....	21
1.10 Chemicko-tepelné spracovanie	22
1.10.1 Cementovanie	24
1.10.2 Nitridovanie	25
1.10.3 Nitrocementovanie a karbonitridovanie.....	26
1.10.4 Sulfonitridovanie	27
1.10.5 Sulfonizovanie	27
1.10.6 Difúzne pokovovanie.....	27
1.11 Boridovanie.....	28
2 Cieľ práce	33
3 Metodika práce	34
3.1 Charakteristika materiálov	35
3.2 Príprava skúšobných vzoriek	36
3.3 Charakteristika zvracieho poloautomatu na pretavovanie vzoriek	36
3.4 Popis skúšobného zariadenia	37
3.5 Postup skúšky na skúšobnom zariadení.....	38
3.6 Spôsob vyhodnocovania skúšky	39
4 Výsledky práce	40
5 Diskusia	43
6 Záver	45
7 Zoznam použitej literatúry	46

Zoznam použitých skratiek a značiek

Ψ_{abr}	- pomerná odolnosť proti abrazii
μm	- mikrometer
Al	- hliník
Ar	- argón
B	- bór
C	- uhlík
Cr	- chróm
H	- dusík
HRB	- tvrdosť podľa Brinella
HRC	- tvrdosť podľa Rockwella
HV	- tvrdosť podľa Vickersa
Mn	- mangán
Mo	- molybdén
MPa	- megapascal
N	- dusík
Ni	- nikel
Si	- kremník
STN	- Slovenská Technická Norma
TIG	- Tungsten Inert Gas (zváranie netaviacou sa elektródou v ochr.atmosfére)
W	- volfrám
WIG	- Wolfram Inert Gas (zváranie netaviacou sa elektródou v ochr.atmosfére)

Úvod

Ekonomický rozvoj s a ním spojený vývoj vo všetkých odvetviach ľudskej činnosti nadobúda stále väčšieho rozsahu. Platí to aj pre strojárstvo, ktoré sa v posledných rokoch dočkalo veľkého pokroku. Technický pokrok a nové vedecké poznatky vo vývoji a výrobe zariadení pre tepelné a chemicko-tepelné spracovanie umožnili rozpracovať nové technológie nasycovania povrchu ocelí i ďalších liatin prípadne kovov vhodnými prvkami. Stúpajú požiadavky na úžitkové vlastnosti, konkurencieschopnosť výrobkov, ako aj na ekonomickosť ich výroby. Pri rozhodovaní o zakúpení nového zariadenia potrebného pre realizáciu novej technológie je potrebné zvážiť dobu návratnosti investičných nákladov. Ďalej, či náklady spojené so zavedením novej technológie sú vyvážené jej prínosom a výhodami, v porovnaní s doteraz zaužívanou technológiou. Mimoriadne dôležitý je nielen optimálny výber materiálov, ale aj ovplyvňovanie ich vlastností chemicko-tepelným spracovaním ich povrchov.

Postupy difúzneho sýtenia povrchu rôznymi prvkami (kovmi i nekovmi), s cieľom dosiahnuť rozdielne mechanické alebo fyzikálno-chemické vlastnosti povrchu a jadra súčiastok sa nazývajú chemicko-tepelným spracovaním. Tvorba povrchových oblastí procesmi chemicko-tepelného spracovania patrí k široko používaným postupom, ktoré sú aplikované na nástroje s cieľom zlepšiť ich vlastnosti. Abrazívne opotrebenie je jedným z druhov opotrebenia, ktoré sa najčastejšie vyskytuje v strojových častiach priemyselných zariadení a tvorí až 80 % z celkového objemu. Aj z toho hľadiska je dôležité hlbšie sa zaoberať týmto druhom opotrebenia a skúmať jeho vplyv na funkčné povrchy strojových častí v poľnohospodárstve, ale aj v stavebnom, hutníckom a strojárskom priemysle.

V bakalárskej práci sa budeme venovať problematike, ktorá sa týka tribologických vlastností materiálov. Porovnáваме tu úbytky hmotností dvoch druhov ocelí, ktoré sme si vybrali na skúšku na brúsnom plátnom v laboratórnych podmienkach, kde budú ocele odolávať abrazívnemu opotrebeniu. Budeme sledovať zvýšenie oteruvzdornosti ocelí, ktoré boli upravené boridovaním. Nakoniec vyhodnotíme ich opotrebenie na základe úbytku materiálu zo vzoriek ocelí. Výsledky sme spracovali aj graficky.

1. Úvod do riešenej problematiky

1.1 Opotrebenie

Počas prevádzky je mnoho strojných súčastí vystavených opotrebeniu. Meradlom opotrebenia je nielen úbytok materiálu, ale aj celková zmena jeho akosti, príp. aj tvaru funkčného povrchu súčasti. Ako uvádzajú Skočovský a Vaško (2004) opotrebenie spravidla prináša zhoršenie funkcie súčasti a vedie k jej predčasnému vyradeniu alebo k úplnému porušeniu.

STN 01 5050 definuje opotrebenie ako nežiaducu zmenu povrchu alebo rozmerov tuhých telies, spôsobených buď vzájomným pôsobeným funkčných povrchov alebo funkčného povrchu a média, ktoré opotrebenie vyvoláva pri ich vzájomnom relatívnom pohybe. Prejavuje sa odstraňovaním alebo premiestňovaním častíc hmoty z funkčného povrchu mechanickými účinkami, niekedy sprevádzanými aj inými vplyvmi, napríklad chemickými, elektrochemickými a pod.

K definovaniu opotrebenia podľa Fleischera et al. (1980) sa priradujú nasledujúce definičné predpoklady:

- opotrebenie sa vždy spája s trením, platí to pre všetky fázy pohybu, vrátane fázy rozbehu a dobehu relatívneho pohybu,
- definícii opotrebenia sa priraduje pojem materiállovej vrstvy,
- základným predpokladom pri definícii opotrebenia je jav stálej zmeny tvaru alebo zmeny vlastnosti materiálu.

Mechanizmy opotrebenia

Opotrebenie môže mať veľa foriem, ktoré závisia od topografie povrchu, kontaktných podmienok a prostredia. Pri analýze opotrebenia možno tento proces rozdeliť na tri javy (Blaškovič, Balla, Dzimko, 1990):

1. vzájomné pôsobenie povrchov pri trení,
2. zmeny, ktoré prebiehajú v povrchovej vrstve elementov trecej dvojice,
3. porušenie povrchov.

Tieto javy nemožno skúmať ako etapy, ktoré nasledujú za sebou. Vzájomne sa prekrývajú, to znamená, že vzájomné pôsobenie povrchov sa mení pri relatívnom pohybe. Potom porušenie povrchov je konečnou etapou ich účinkov.

Vo všeobecnosti možno povedať, že existujú dva základné mechanizmy opotrebenia (Jones et al., 1983):

1. mechanické (zahŕňa procesy, ktoré môže spôsobovať trenie, abrázia, erózia a únava).
2. chemické (vychádza z atakovania povrchu reaktívnymi zložkami a príslušným zadieraním alebo oddeľovaním splodín opotrebenia mechanickým pôsobením).

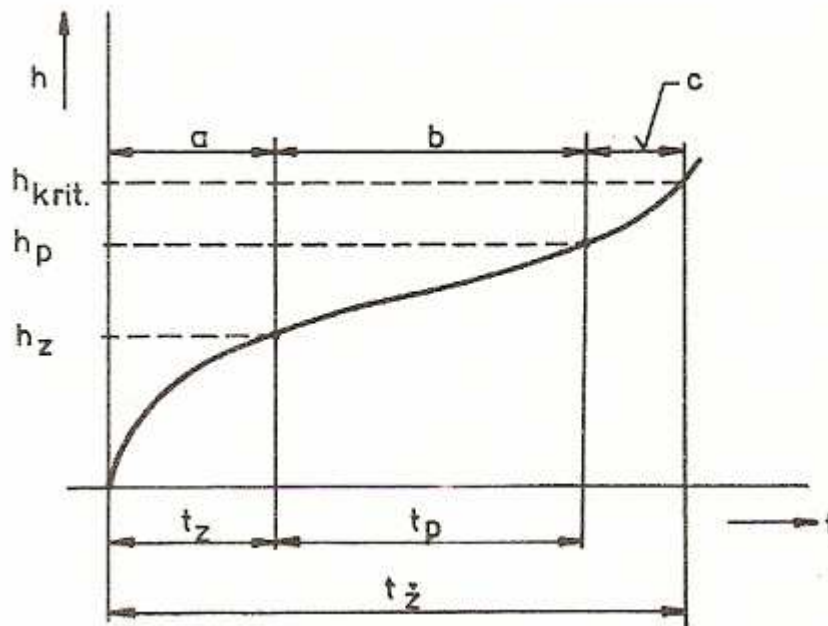
Ak na dva povrchy navzájom na seba kontaktne pôsobia, reálna plocha kontaktu je podstatne menšia, pretože dotyk povrchov definovanej drsnosti je len na ich výstupkoch. Tlaky v týchto plochách sú vysoké a povrch materiálu sa deformuje aplikovaným zaťažením, a tým sa zväčšuje styková plocha.

Ocele odolné voči opotrebeniu

Patrí sem austenitová mangánová oceľ, označovaná podľa pôvodcu často ako Hadfieldova. Jej typické zloženie je: 1,3 % C, 13 % Mn, okolo 0,5 % Si s eventuálnou prísadou 1 % Cr. Dodáva sa ako tvárnená (STN 17 618), alebo ako oceľové odliatky STN 42 2760, 42 2761. Za rovnovážnych podmienok by mala mať podľa pseudobinárneho diagramu mikroštruktúru tvorenú feritom a karbidom $(\text{FeMn})_3$. Obvyklé podmienky ochladzovania však vedú k potlačeniu alotropickej premeny, oceľ má štruktúru austenitickú s vylúčenými karbidami po hraniciach a v medzivetvových priestoroch austenitických dendritov. Takáto štruktúra nie je z hľadiska plastických vlastností vyhovujúca. Tepelným spracovaním sa snažíme previesť vylúčené karbidy do roztoku. Prevádza sa to homogenizáciou pri 1050 – 1100 °C a nasledujúcim zakalením do vody. Výborná odolnosť tejto ocele voči opotrebeniu vyplýva zo schopnosti austenitu spevňovať sa tvárnením za studena. Tvrdosť spevnených oblastí stúpa na 450 – 500 HB. Z uvedenej ocele sa vyhotovujú lyžice bagrov, články traktorov a tankov, železničné srdcovky, panciere nedobitných pokladníc (Štifner, 2006).

Časový priebeh opotrebenia

Každé opotrebenie má určitý časový priebeh. Na (Obr. 1) je charakteristický priebeh rozdelený na tri časové úseky, v ktorých sa rýchlosť opotrebenia navzájom odlišuje, podľa čoho možno rozlíšiť opotrebenie počas bežnej technickej prevádzky, opotrebovanie počas zábehu a počas dožívania alebo havarijnej situácie.



Obr. 1 Krivka časového priebehu opotrebenia

a – zábeh,	$h_{krit.}$ – kritická hodnota opotrebenia,
b – prevádzka,	h_p – prevádzková hodnota opotrebenia,
c – dožívanie (havarijná situácia),	h_z – zábehová hodnota opotrebenia,
h – hodnota opotrebenia,	t – čas prevádzky.

Zdroj: Blaškovič, Balla, Dzimko, 1990

1.2 Druhy opotrebenia

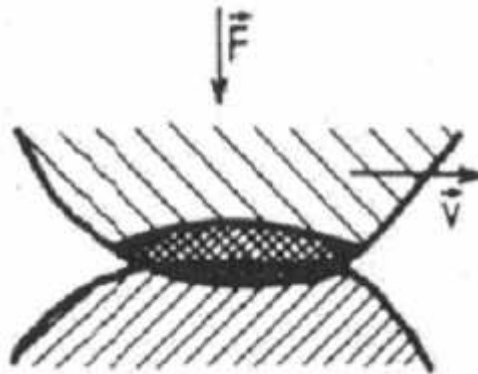
Podľa STN 01 5050 opotrebenie rozdeľujeme na 6 základných druhov:

- adhezívne,
- abrazívne,
- erozívne,
- únavové,
- kavitačné,
- vibračné.

1.3 Adhezívne opotrebenie

Je najčastejším spôsobom opotrebovania súčiastok, ktorých funkčné povrchy sa dostali do vzájomného styku pri vzájomnom pohybe. Je charakterizované oddeľovaním a premiestňovaním častíc materiálu, v dôsledku pôsobenia medziatómových síl, uplatňujúcich sa medzi stykovými plochami.

Jeho vznik sa vysvetľuje tým, že povrchy stykových plôch nie sú nikdy hladké, a že ku styku dvoch telies teda nedochádza na celom povrchu, ale na veľkom počte dotykových miest. Pôsobením síl sa vrcholy nerovností na povrchu plasticky deformujú, atómy oboch povrchov sú v tesnom styku a dochádza k vytváraniu mikrospojov. Pri relatívnom pohybe povrchov sa tieto mikrospoje porušujú. Keďže sú povrchové oblasti spevnené plastickou deformáciou, ich pevnosť je vyššia ako pevnosť podpovrchových oblastí, preto k oddeľovaniu materiálu nedochádza v mieste pôvodných stykových povrchov, ale vo vnútri materiálu jedného z telies. Pri porušení mikrospoja dochádza k prenosu častíc z povrchu jedného telesa na povrch druhého telesa, alebo sa voľne pohybujú medzi oboma funkčnými povrchmi. Veľkosť oddelených častíc závisí od toho, v akej vzdialenosti od miesta styku k odtrhnutiu došlo. Čím je väčšie spevnenie povrchu, tým sa zvyšuje tendencia k oddeľovaniu väčších častíc.



Obr. 2 Adhezívne opotrebenie

Zdroj: www.tuzvo.sk

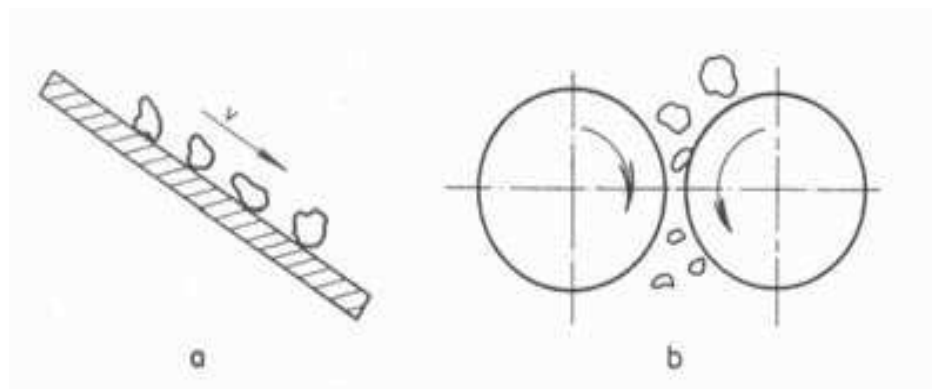
Na vznik adhézneho opotrebenia vplývajú najmä tieto faktory (Vocel, Dufek, 1976):

- zaťaženie, rýchlosť relatívneho pohybu,
- polomer zakrivenia nerovností,
- schopnosť materiálu vytvárať adhézne spojenie,
- chemické procesy na povrchu telies,

- teplota,
- kryštalická štruktúra materiálu,
- kontakt rôzne tvrdých povrchov súčiastok,
- prítomnosť rôznych legujúcich prvkov.

1.4 Abrazívne opotrebenia

Abrazívne opotrebenie je charakterizované oddeľovaním častíc materiálu z funkčného povrchu účinkom tvrdšieho a drsného povrchu iného telesa alebo účinkom abrazívnych častíc. Podľa charakteru vzájomných interakcií pri abrazívnom opotrebení rozlišujeme dva základné modely. Pri prvom z nich ide o opotrebenie pri interakcii dvoch telies (Obr. 3a), najčastejšie častíc a funkčného povrchu (napr. opotrebenie súčiastok pri spracovaní pôdy, ťažbe surovín a iné). Druhým prípadom je opotrebenie časticami, ktoré sú medzi dvoma funkčnými povrchmi. Táto situácia znamená interakciu troch telies (Obr. 3b). V praxi sa s týmto usporiadaním stretávame v rôznych pohyblivých uloženiach, pri vniknutí nečistôt, pri drvení nerastov a podobne. V prípade interakcie dvoch telies toto opotrebenie závisí od drsnosti daného povrchu, v prípade interakcie troch telies od množstva, veľkosti, tvaru a tvrdosti cudzích častíc (Blaškovič, Čomaj, 2006).



Obr. 3 Základné modely abrazívneho opotrebenia:

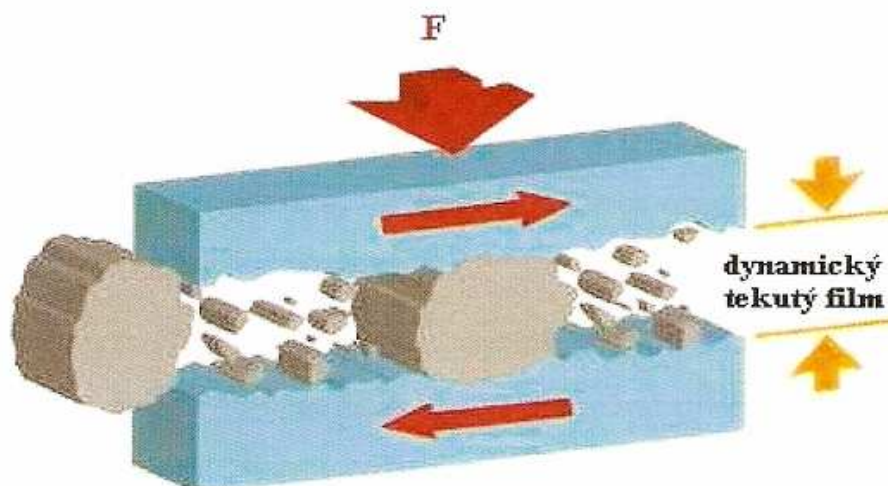
a – interakcia dvoch telies , b – interakcia troch telies

Zdroj: Blaškovič, Balla, Dzimko, 1990

Pri abrazívnom opotrebení treba rozlíšiť tieto rozhodovacie štádiá:

- proces vtlačania abrazíva do povrchu materiálu, kde rozhodovacím faktorom je tvrdosť,
- proces rozrušovania povrchu, kde hlavnú úlohu majú sily medziatómových väzieb a pevnosť spojenia.

Schopnosť abrazívneho zrna vnikat' do materiálu závisí nielen od tvrdosti, ale aj od geometrického tvaru zrna. Hranaté častice mäkkého materiálu spôsobujú väčšie opotrebenie ako zaoblené častice tvrdšieho materiálu. Dôležitý je aj vplyv veľkosti abrazívnych častíc. Abrazivita sa zvyšuje zväčšovaním rozmerov abrazívnych častíc. Pri nerovnorodej veľkosti zrn určujúcim rozmerom je rozmer najväčšej frakcie. Hraničný rozmer tohto zrna je rôzny pre rôzne kovy. Podobnosť ryhovania a oddeľovania častíc z funkčného povrchu pri relatívnom pohybe bude tým väčšia, čím viac sa budú častice líšiť od guľového tvaru. Tvorbu mikroryhy sprevádza značná plastická deformácia kovu. Na dne ryhy sa tvoria priečne trhlinky, ktoré môžu byť zárodkami rozrušenia pri ďalších pracovných cykloch. V takýchto podmienkach má oceľ s feriticko – perlitickou štruktúrou nízku odolnosť voči abrazívnemu opotrebeniu, pretože štruktúrne zložky sa rozrušujú dosť ľahko (Blaškoviš, Kovaříková, 2007).



Obr. 4 Znáozornenie abrazívneho opotrebenia

Zdroj: www.pall.com

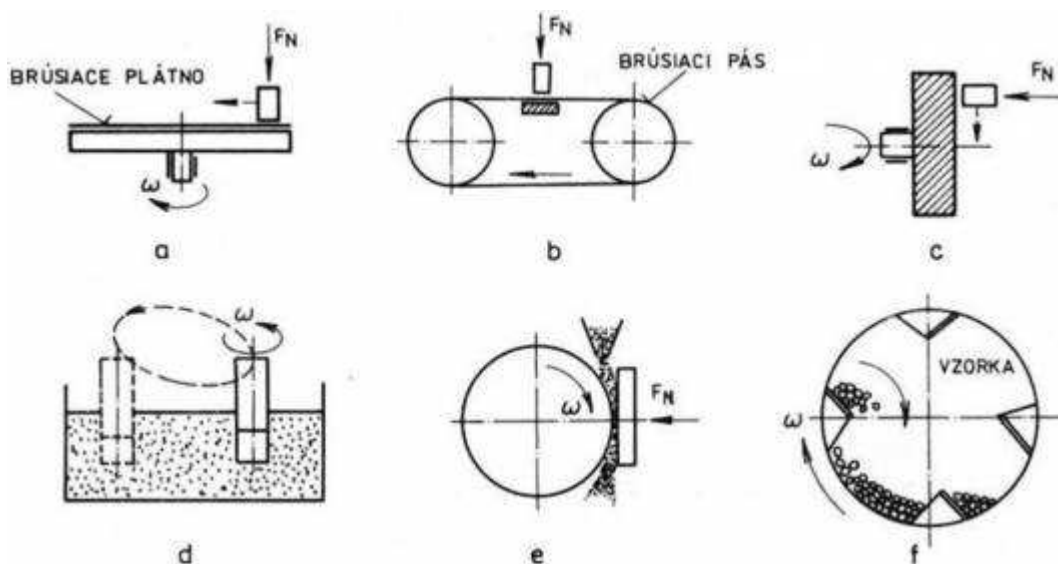
Štruktúra odolná proti abrazívnemu opotrebeniu

Doteraz nie je jednotný názor na najvhodnejší typ štruktúry z hľadiska odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu. Tieto rozdielne názory vyplývajú z rôznorodosti procesu abrazívneho opotrebenia a širokej škály skutočných prevádzkových podmienok. Najvyššia odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu sa získava pri austeniticko – karbidickej štruktúre. Je vhodná pri podmienkach vysokých špecifických tlakov a prítomnosti nárazov. Parametre mriežok karbidov a austenitu sú bližšie ako parametre mriežok martenzitu a karbidov, preto spojenie týchto štruktúrnych zložiek najpriaznivejšie vplýva na schopnosť odolávať abrazívnemu opotrebeniu.

Zariadenia na skúšky odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu

Experimentálne zariadenia sa rozdeľujú na prístroje (Iždinská, 2006):

- s viazanými časticami (Obr. 5a,b,c),
- s voľnými časticami (Obr. 5d,e,f),
- s vrstvou voľných častíc medzi dvoma stykovými povrchmi.



Obr. 5 Schémy prístrojov na skúšky odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu:

- a) prístroj s brúsiacim plátnom, b) prístroj s brúsiacim pásmom, c) prístroj s brúsiacim kotúčom, d) prístroj s brúsiacou nádobou, e) prístroj s pružným kotúčom, f) bubnový prístroj

Zdroj: Iždinská, 2006

1.4.1 Faktory ovplyvňujúce abrazívne opotrebenie

Poznáme vonkajšie a vnútorné faktory ovplyvňujúce abrazívne opotrebenie. Vonkajšie faktory ovplyvňujúce abrazívne opotrebenie sú tie, ktoré sú nezávislé od použitého materiálu a tvaru pracovných súčastí strojov. Ovplyvňuje ich:

- rozmery a tvar abrazívnych častíc,
- pevnosť abrazívnych častíc,
- rýchlosť pohybu,
- vlhkosť,
- merný tlak pôdy na pracovný povrch.

Vnútorné faktory ovplyvňujúce abrazívne opotrebenie sú tie, ktoré môžeme ovplyvňovať spôsobom výroby a používania náradia u pôdospracujúcich strojov. Sú to predovšetkým vlastnosti materiálu a spôsob jeho spracovania.

Kritická veľkosť abrazívnych častíc

Pri podrobnom štúdiu závislosti abrazívneho opotrebenia rôznych materiálov na zaťažení a priemernej veľkosti častíc sa zistilo, že nejde o lineárny vzťah. Bola zistená tzv. kritická veľkosť abrazívneho zrna, pri ktorej dochádza k výraznej zmene závislosti opotrebenia na priemernej veľkosti abrazívnych častíc. Kritická veľkosť zrna je závislá na zaťažení a mení sa v skúšobných podmienkach v rozmedzí 70 až 200 μm . Bolo zistené, že kritická veľkosť zrna je ovplyvnená skúšobnými podmienkami, najmä rozmerom vzorky, použitými časticami, i vlastnosťami opotrebovávaného materiálu (Vocel, Dufek, 1976).

Tvar abrazívnych častíc

Tvar abrazívnych častíc z hľadiska abrazívnych účinkov môžeme charakterizovať:

- množstvom hrán alebo výstupkov (makrogeometria),
- hladkosťou povrchu hrán alebo výstupkov (mikrogeometria),
- polomerom výstupkov.

Ako uvádzajú Vocel a Dufek (1976) makrogeometria abrazívneho zrna sa posudzuje napríklad podľa tzv. súčiniteľa hranatosti, čo je pomer povrchu skutočného zrna k povrchu gule s rovnakým objemom. Meranie súčiniteľa hranatosti sa zatiaľ najčastejšie používa v zlievarenstve k určovaniu vlastností zlievarenských pieskov a podobných materiálov

určených na výrobu foriem. Čím viac sa bude tvar abrazívnej častice odlišovať od ideálneho guľového tvaru, tým väčší počet výstupkov a hrán bude mať, takže to spôsobí väčšie abrazívne opotrebenie.

Pevnosť abrazívnych častíc

Pri vzájomnom pohybe častíc a funkčného povrchu súčastí dochádza na jednej strane k porušovaniu materiálu a na druhej strane k vylamovaniu alebo otupovaniu výstupkov a hrán abrazívnych zrn. Výsledky meraní ukazujú že pri malom silovom pôsobení sa priemerná veľkosť zrn veľmi nemení, ale mení sa ich mikrogeometria. Pri väčšom silovom pôsobení už dochádza k väčšiemu porušovaniu zrn a k ich fragmentácii, čo do určitej miery kompenzuje väčšie otupovanie výstupkov a hrán (Vocel, Dufek, 1976).

Vplyv vlhkosti na abrazívne opotrebenie

Existujú rozdiely v rýchlosti oteru abrazívnymi časticami pri nízkej a vysokej relatívnej vlhkosti vzduchu. Dopracovalo sa k názoru, že rýchlosť oteru rastie so vzrastajúcim obsahom vodnej pary vo vzduchu. Vplyv atmosferickej vlhkosti sa môže prejaviť najmä vtedy, keď dôjde ku kondenzácii vodných pár na povrchu abrazívnych zrn (Vocel, Dufek, 1976).

1.5 Erozívne opotrebenie

Charakterizuje sa podľa STN 01 5050 oddeľovaním častíc a poškodzovaním povrchu:

- časticami nesenými v prúde kvapaliny,
- časticami nesenými prúdom plynu,
- prúdom kvapaliny, kvapiek, pary alebo plynu.

Pri štúdiu odolnosti proti opotrebeniu materiálov v súvislosti s jeho základnými vlastnosťami sa zistilo, že existuje korelácia medzi pevnosťou kohéznej väzby v kovoch a ich odolnosťou proti erozívne opotrebeniu. Z toho vyplýva, že aj ostatné vlastnosti kovov súvisia s ich odolnosťou proti erozívne opotrebeniu. Preto v tejto súvislosti základná charakteristika – energia kohéznej väzby – je v každom prípade užitočných parametrom pri hodnotení niektorých vlastností materiálu vzhľadom na jeho odolnosti proti erozívne opotrebeniu (Blaškovič, Balla, Dzimko, 1990).

Pri erozívnom opotrebení patrí k premenlivým parametrom:

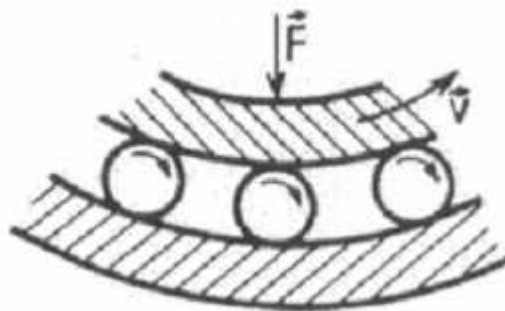
- charakter častíc,
- rýchlosť pohybu častíc, ktoré určujú energiu pri zrážke s povrchom tuhého telesa (niekedy je energia taká vysoká, že sa môže materiál na povrchu nastavovať).

Erozívne opotrebeniu sú vystavené napríklad súčiastky vodných turbín, ventilátorov, potrubia na dopravu sypkých hmôt, povrchové plochy kozmických lodí prechádzajúce atmosférou, rotorové listy vrtuľníkov a podobne.

1.6 Únavové opotrebenie

Jedným z najrozšírenejších mechanizmov oddeľovania častíc pri porušovaní povrchovej vrstvy pri opotrebení je únavový proces. Podmieňuje ho opakujúce sa kontaktné napätie (pri rotačnom alebo vratnom pohybe), ktoré iniciujú tvorbu zárodkov povrchových alebo podpovrchových trhlín, ktoré potom umožňujú tvorbu častíc opotrebenia a porušovanie povrchovej vrstvy (Blaškoviš, Čomaj, 2006).

Tento proces prebieha napríklad pri krúžkoch valivých ložísk, pri ktorých guľka alebo valček sa opakujúco valí po jednom a tom istom mieste povrchu. Po určitom opakovanom namáhaní vznikne zárodok trhliny v povrchovej alebo podpovrchovej vrstve. Podpovrchová trhlina sa postupne rozrastá smerom k povrchu, a tým oddeľuje časticu opotrebenia. Povrchová trhlina rastie do hĺbky materiálu, spája sa so susednými trhlinami, a podmieňuje aj vytváranie častice opotrebenia.



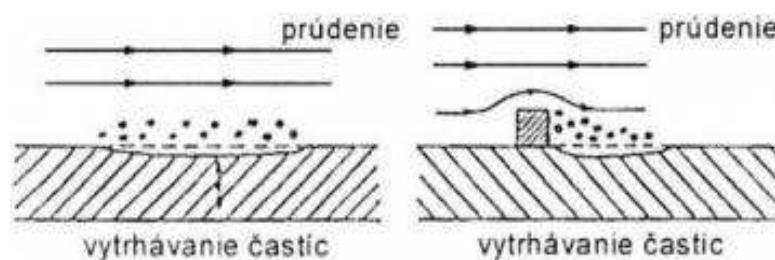
Obr. 6 Schematické znázornenie únavového opotrebenia

Zdroj: <http://www.tuzvo.sk>

1.7 Kavitačné opotrebenie

Je charakterizované oddeľovaním častíc a poškodzovaním povrchu súčiastok v prostredí prúdiacej kvapaliny. Jeho príčinou je tvorba a zánik plyných, resp. mikroskopických bublín pár v prúdiacej kvapaline. Najčastejšie sa vyskytuje na lodných skrutkách, lopatkách vodných turbín a vrtúľ a pod. Jeho dôsledkom je charakteristické hubovité rozrušovanie štruktúry materiálu.

Kavitačné opotrebenie možno znížiť voľbou vhodného materiálu a ochranou povrchu vhodným povlakovaním, ktoré predlžuje inkubačnú dobu. Kavitačné opotrebeniu odolávajú materiály s homogénnou štruktúrou, napr. u ocelí sú to tuhé roztoky. V uzavretých systémoch možno použiť aj kavitačné opotrebenie minimalizovať prídávaním prísad, ktoré znižujú povrchové napätie kvapaliny a zabraňujú spájaniu menších dutín do väčších (Materiálovotechnologická fakulta STU, 2005).



Obr. 7 Schematické znázornenie princípu kavitačného opotrebenia

Zdroj: www.matnet.sav.sk

1.8 Vibračné opotrebenie

Je opotrebenie, ktoré je charakterizované oddeľovaním častíc a poškodzovaním opotrebovávaného povrchu vzájomnými oscilujúcimi tangenciálnymi posunmi stykových povrchov telies pri pôsobení normálového zaťaženia. Dosahuje sa vtedy, keď máme dvojicu s vibračným alebo vratným pohybom s veľmi malou amplitúdou kmitania. Vibračné opotrebenie charakterizujú produkty reakcie označované ako „kakao“ (Blaškoviš, Čomaj, 2006).

Tento druh opotrebenia sa vyskytuje u súčasti s hybným pohybom (valivé ložiská, čapy, hriadele), ale aj u zdanlivo nepohyblivých súčastí, ako sú lisované spoje, nity a skrutky.

Na intenzitu vibračného opotrebenia má vplyv celá rada faktorov:

- relatívny pohyb stykových povrchov,
- merný tlak,
- doba vibračného opotrebenia,
- charakter prostredia,
- teplota a vlhkosť prostredia.

1.9 Difúzia

Difúzia jav prenosu (premiestňovania) častíc hmoty vo vnútri tuhého telesa pohybom atómov na vzdialenosť väčšiu, ako parameter mriežky uvádza Balla (2009).

Mechanizmy difúzie

Difúzia z hľadiska atómov je postupný pohyb atómov z jedného miesta na druhé miesto v kryštálovej mriežke. V tuhej látke sú atómy v podstate v neustálom pohybe okolo rovnovážnej polohy. Na to, aby mohlo dôjsť k posunu atómu na iné miesto, musí mať atóm dostatočnú energiu, aby prekonal svoje väzby so susednými atómami a takto spôsobil distorziu mriežky počas svojho premiestňovania (Balla, 2009).

Difúzny pohyb atómov sa uskutočňuje v kryštálovej mriežke niektorým z nasledovných mechanizmov:

- výmenou miest medzi dvoma susednými atómami, alebo súčasnou výmenou miest medzi viac ako dvoma atómami v mriežke,
- pohybom vakancií, čo spočíva v pohybe častíc (atómov, iónov) na miesta vakancií,
- pohybom intersticiálne uloženého atómu, t.j. v preskoku atómu z jednej medziatómovej polohy do niektorej zo susedných medziatómových polôh.

1.9.1 Faktory ovplyvňujúce difúziu

Najväčší vplyv na difúziu rýchlosť, popri koeficiente difúzie, ktorý je určovaný zložením materiálu, má teplota. Proces difúzie sa výrazne exponenciálne urýchľuje so vzrastajúcou teplotou. Difúzia určitej látky v krištále kovu nezávisí od toho, či existuje táto látka mimo kov v skupenstve plynnom, alebo nie. Koeficient difúzie rôznych prvkov v určitej látke nie je rovnaký, čo znamená že prenos častíc určitého druhu v danom systéme prebieha rýchlejšie ako iných častíc v tej istej sústave (Kirkendallov jav).

Ďalším významným faktorom ovplyvňujúcim rýchlosť difúzie je prítomnosť porúch v materiáli. Zvláštnym prípadom je difúzia – po hraniciach zrn, difúzia pozdĺž

dislokačných čiar alebo difúzia po voľnom povrchu kovu, kde je aktivačná energia nižšia ako v bezporuchovom křišťále. Hovoríme, že difúzia je štruktúrne citlivá.

V deformovanom kove, ktorý obsahuje viac štruktúrnych porúch, prebieha difúzia rýchlejšie, ako v nedeformovanom. Difúzia ľahšie prebieha v jemnozrnnom materiáli (väčšia plocha hraníc zŕn), ako v hrubozrnnom materiáli uvádza Balla (2009).

Podľa Zábavníka (1977) difúzia atómov na voľnom povrchu prebieha rýchlejšie, ako po hraniciach kryštalových zŕn a táto zase obvykle vyššou intenzitou, ako v objeme zrna.

Praktický význam difúzie

Medzi praktické príklady využitia difúzných javov patrí odstránenie koncentračného gradientu po tuhnutí zliatin kovov, vytvrdzovanie materiálov riadeným procesom starnutia, väčšina procesov tepelného spracovania materiálov je založená na difúzných procesoch, rast zŕn v polykryštalických materiáloch, proces spekania pri výrobe spekaných materiálov, možnosť vytvorenia difúzneho spojenia materiálov, napr. pri spájkovaní (Balla, 2009).

1.10 Chemicko-tepelné spracovanie

Chemicko-tepelné spracovanie je založené na difúzných procesoch nasycovaním povrchových vrstiev súčiastok vybranými prvkami. Podobne sa vyjadrujú viacerí autori (Balla, 2009; Martinec, Šimkovič, 1997). Umožňuje vyrobiť súčiastky, ktoré majú odlišné chemické zloženie povrchu a jadra. Využíva sa najmä u ocelí.

Norma STN 42 0004 definuje chemicko-tepelné spracovanie ako proces, pri ktorom dochádza k nasycovaniu povrchu.

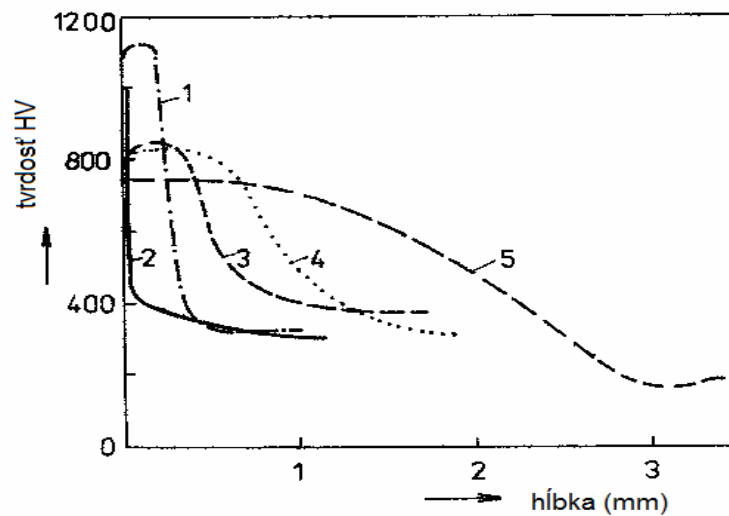
Povrchová vrstva základného materiálu, ktorá sa chemickým zložením odlišuje od jadra, sa nazýva difúznou vrstvou. Táto vrstva môže byť tvorená tuhým roztokom, chemickou zlúčeninou, alebo kombináciou tuhého roztoku a chemickej zlúčeniny.

Celková hrúbka difúznej vrstvy sa nazýva vzdialenosť od nasycovaného povrchu až po miesto, pokiaľ prenikol difundujúci prvok. Pre prax je dôležitejšia tzv. efektívna hrúbka difúznej vrstvy – je to časť celkovej hrúbky difúznej vrstvy, ktorá je daná vzdialenosťou od nasycovaného povrchu po nominálnu hodnotu zvoleného parametra (koncentrácia difundujúceho prvku, štruktúrny príznak alebo vlastnosť – tvrdosť).

Postupy chemicko-tepelného spracovania možno rozdeliť na:

1. cementovanie, nitríkovanie, nitrocementovanie a karbonitríkovanie,
2. difúzne pokovovanie – nasycovanie ďalšími prvkami.

Prostredie chemicko-tepelného spracovania môže byť plynné, kvapalné alebo tuhé (prášok).



Obr. 8 Tvrdosť a hĺbka povrchovej vrstvy: 1 – nitridované, 2 – karbonitridované, 3 – nitrocementované, 4 – cementované, 5 – povrchovo kalené

Zdroj: <http://www.fpt.tnuni.sk>

Základné čiastkové procesy pri chemicko-tepelnom spracovaní

Zábavník a Buršák (2004) uvádzajú, že chemicko-tepelným spracovaním obecné rozumieme procesy, pri ktorých zmenou chemického zloženia povrchu kovov a zliatin dosahujeme žiadané mechanické, prípadne fyzikálne vlastnosti. Túto zmenu chemického zloženia zaisťujeme chemickým pôsobením obklopujúceho prostredia pri zvýšených teplotách. Môže sa teda jednať o zníženie obsahu niektorých prvkov, napr. pri oduhlíčovacom žíhaní (transformátorových plechov, vysokolegovanej manganovej ocele), alebo o zvýšenie ich obsahu, t.j. nasycovanie povrchu.

Schopnosť prenikať do kryštalografickej mriežky nasycovaného povrchu majú iba atómy nasycujúceho prvku, ktoré vytvárajú v tejto mriežke tuhé roztoky interstitické (C, N, B, H), alebo substitučné (Cr, Al, Si a iné), prípadne chemické zlúčeniny. Tieto „aktívne“ atómy vznikajú rozkladom molekúl chemických zlúčenín na nasycovanom povrchu, až na ojedinelé výnimky (alitovanie v roztavenom hliníku, ionitrovanie v N_2). Aktívne atómy, ktoré do povrchu prenikli a ostali týmto povrchom pohltené, absorbované, premiestňujú sa z povrchu do vnútra difúznej vrstvy v súlade so zákonmi difúzie.

Procesy chemicko-tepelného spracovania sa teda uskutočňujú súčasným priebehom štyroch čiastkových procesov (Zábavník, Buršák, 2004):

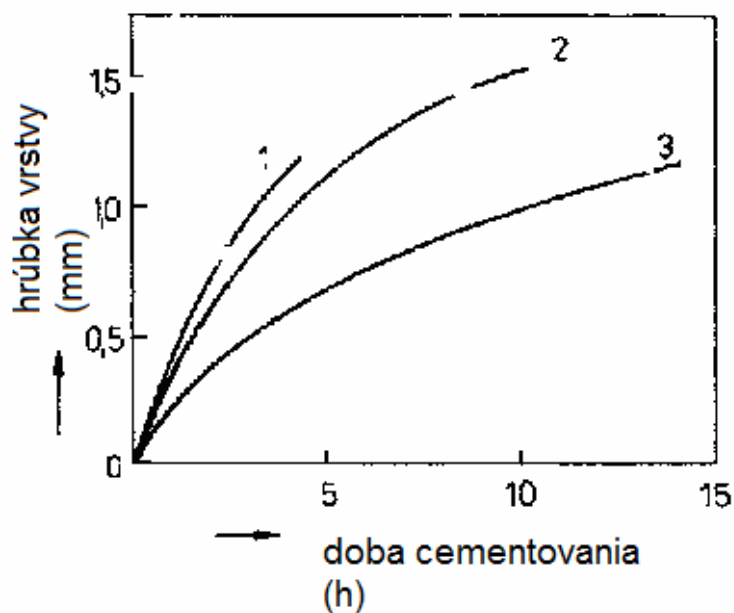
1. adsorpcie molekúl chemických zlúčenín nasycovaným, tzv. adsorpčným povrchom,
2. disociácie adsorbovaných molekúl za vzniku aktívnych atómov nasycujúceho prvku,
3. absorpcie – pohltienia týchto atómov nasycovaným povrchom, ktorý pri danej teplote nevykazuje medznú nasýtenosť,
4. difúzie absorbovaných atómov z povrchu do vnútra difúznej vrstvy.

1.10.1 Cementovanie

Je to postup chemicko-tepelného spracovania, pri ktorom sa povrch súčiastok z ocele sýti uhlíkom. Jeho cieľom je získať vysokú tvrdosť a odolnosť povrchu proti opotrebeniu a húževnaté jadro cementovaného predmetu. Na cementovanie sa používajú prevažne nízkouhlíkové ocele (0,1 až 0,3 % C) a povrchová vrstva sa obohatí uhlíkom na eutektoidnú, resp. tesne nadeutektoidnú koncentráciu. Príklady cementačných ocelí: 12 010, 12 020, 14 220 a 16 220. Najčastejšie sa používa oceľ 14 220, ktorá obsahuje približne 1 % Mn a 1 % Cr. Cementovanie prebieha pri teplotách 880 až 950 °C. Hrúbka cementovanej vrstvy dosahuje hrúbku 0,5 až 2 mm. Martinec a Šimkovič (1997) uvádzajú, že požadované vlastnosti cementovanej súčiastky sa dosiahnu až tepelným spracovaním, ktoré nasleduje po nasýtení povrchu uhlíkom. Používa sa kalenie a popúšťanie pri nízkych teplotách. Povrchová tvrdosť takto spracovaným súčiastok dosahuje hodnoty 58 až 62 HRC.

Cementáciu povrchu možno dosiahnuť týmito technologickými variantmi procesu cementovania:

- 1) v plyne,
- 2) v prášku,
- 3) v rozstavených soliach (v kúpeli),
- 4) pri zníženom tlaku (vo vákuu).



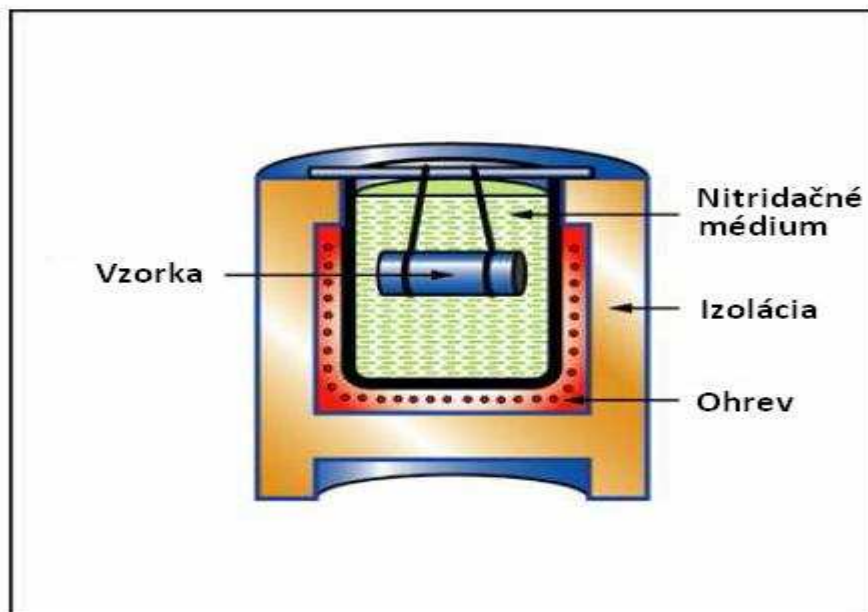
Obr. 9 Závislosť hĺbky cementovanej vrstvy na dobe cementovania (pri 900 °C): 1 – v kúpeľi, 2 – v plyne, 3 – v prášku

Zdroj: Pluhař, Koritta, 1981

1.10.2 Nitridovanie

Je to spôsob chemicko-tepelného spracovania, pri ktorom sa tenká povrchová vrstva ocele nasycuje dusíkom. Požadované vlastnosti povrchu dosiahneme v priebehu nasycovania dusíkom, t. j. bez nasledujúceho tepelného spracovania (na rozdiel od cementovania). Cieľom je získať vysokú tvrdosť povrchu a húževnaté jadro. Podstatou vysokej povrchovej tvrdosti je vznik veľmi tvrdých kovových zlúčenín dusíka so železom – nitridov železa a prípadne s ďalšími prísadovými prvkami. Teplota nitrídácie je v rozmedzí 500 až 600 °C. Hrúbka dosiahnutej nitrídačnej vrstvy býva 0,05 až 0,5 mm. Tvrdosť nitrídačnej vrstvy je 1000 až 1200 HV (Martinec, Šimkovič, 1997).

Ocele používané na nitrídáciu obsahujú obvykle 0,3 až 0,4 % C. Pred nitrídáciou sa spravidla zušľachtujú na pevnosť 900 až 1200 MPa. Typickým predstaviteľom nitrídačných ocelí sú: 14 340, 15 230, 15 330 a 15 340.



Obr. 10 Schéma procesu nitridovania

Zdroj: <http://www.matnet.sav.sk>

Nitridácia sa uskutočňuje v širokom intervale teplôt a v rozličných nasycujúcich prostrediach:

- v tuhom prostredí,
- v kvapalnom prostredí,
- v plynnom prostredí,
- s využitým vysokofrekvenčného ohrevu,
- v ultrazvukovom poli,
- vo fluidnej vrstve,
- pri zvýšených tlakoch,
- iónová nitridácia.

1.10.3 Nitrocementovanie a karbonitridovanie

Podľa Martinca a Šimkoviča (1997) pre oba postupy je charakteristické sýtenie povrchu súčasne uhlíkom aj dusíkom. Tieto postupy sa uplatňujú na oceľových súčiastkach s 0,25 % až 0,4 % C. Uskutočňujú sa buď v plynnom prostredí (v zmesi uhlíkovdíkovo a čpavku) alebo v kvapalnom prostredí (v solných kúpeľoch s prísadou kyanidov). Základné odlišnosti medzi nitrocementáciou a karbonitridáciou sú v teplote, štruktúre, hrúbke a v tvrdosti vzniknutej vrstvy a tiež v prevažujúcom prvku. Prevažujúci vplyv prvku pri nitrocementovaní je uhlík a pri karbonitridovaní je to dusík.

1.10.4 Sulfonitridovanie

Je to nasycovania povrchu súčiastok sírou a dusíkom, pri teplotách 550 až 600 °C. Prebieha v soľnom kúpeli zloženom napr. z 95 % kyanidu soľného a 5 % siričitanu sodného (Martinec, Šimkovič, 1997). Na povrchu takto vytvorených sulfonitridovaných súčiastok sa vytvorí vrstva obsahujúca sírniky železa FeS, FeS₂ spolu s karbonitridami. Táto vrstva sa obyčajne ďalej tepelne nespracúva.

Procesom sulfonitridovania možno dosiahnuť nasledovné vlastnosti vrstvy:

- dobrá odolnosť proti opotrebeniu,
- dobrá odolnosť proti zadieraniu pri polosuchom a suchom trení,
- dobrá odolnosť proti korózii a proti únave.

1.10.5 Sulfonizovanie

Je to postup podobný ako sulfonitridovanie, ale pri sulfonizovaní sa povrch súčiastok nasycuje prevažne alebo výhradne sírou. Prostredím pri sulfonizovaní je zmes čpavku so sírovodíkom alebo sírouhlíkom.

1.10.6 Difúzne pokovovanie

Pri difúznom pokovovaní sa povrch základného kovu nasycuje iným kovom. Možno ho uskutočňovať v prostredí tuhom, kvapalnom alebo plynnom podobne ako pri iných postupoch chemicko-tepelného spracovania (Martinec, Šimkovič, 1997). Difúzne pokovovanie sa robí na rozdiel od cementovania alebo nitridovania pri vyšších teplotách (do 1100 °C). Difúzne vrstvy sú pri rovnakých podmienkach 10 až 100-krát tenšie ako pri cementovaní a nitridovaní. Tvorí sa však veľmi pomaly.

Difúzne chrómovanie

Jeho účelom je zvýšiť odolnosť proti korózii a zvýšiť žiaruvzdornosť súčiastok. Hrúbka difúznych chrómovaných vrstiev je pomerne malá a podľa spôsobu chrómovania, teploty a času dosahuje hodnotu 25 až 600 μm (Martinec, Šimkovič, 1997).

Difúzne hliníkovanie

Uskutočňuje sa dvojakým spôsobom:

- 1) alitovaním – povrch súčiastky sa priamo nasycuje hliníkom buď v tuhom prostredí alebo v rozstavenom hliníku,
- 2) alumenovaním – na povrch predmetov sa nastrieka šopovacou pištolou hliník, nasleduje niekoľkonásobný náter aktívnou látkou a po vysušení sa predmety žihajú pri teplote 900 až 1000 °C.

Jeho účelom je zlepšiť žiaruvzdornosť a odolnosť proti korózii.

Difúzne kremníkovanie

Účelom je získať vrstvu s dobrou odolnosťou proti korózii v rôznych anorganických kyselinách, žiaruvzdornú a do určitej miery odolnú proti opotrebeniu. Krátkodobo znášajú teplotu až 1000 °C. Pomerne dlhú životnosť majú pri teplotách 600 až 700 °C. Pri porovnaní s hliníkovými vrstvami je však ich žiaruvzdornosť nižšia (Martinec, Šimkovič, 1997).

Difúzne zinkovanie

Difúzne zinkovanie (tzv. sherardizovanie) sa vytvára priamym stykom ocelových súčiastok so zinkovým prachom zriedeným kremenným pieskom ako výplňou v uzavierateľných bubnoch. Bubny sa vyhrievajú na teplotu 250 - 450 °C za súčasného otáčania po dobu niekoľkých hodín (Tolnai, 2000).

Je vhodné pre drobné výrobky (skrutky, klince, matice, podložky a pod.).

1.11 Boridovanie

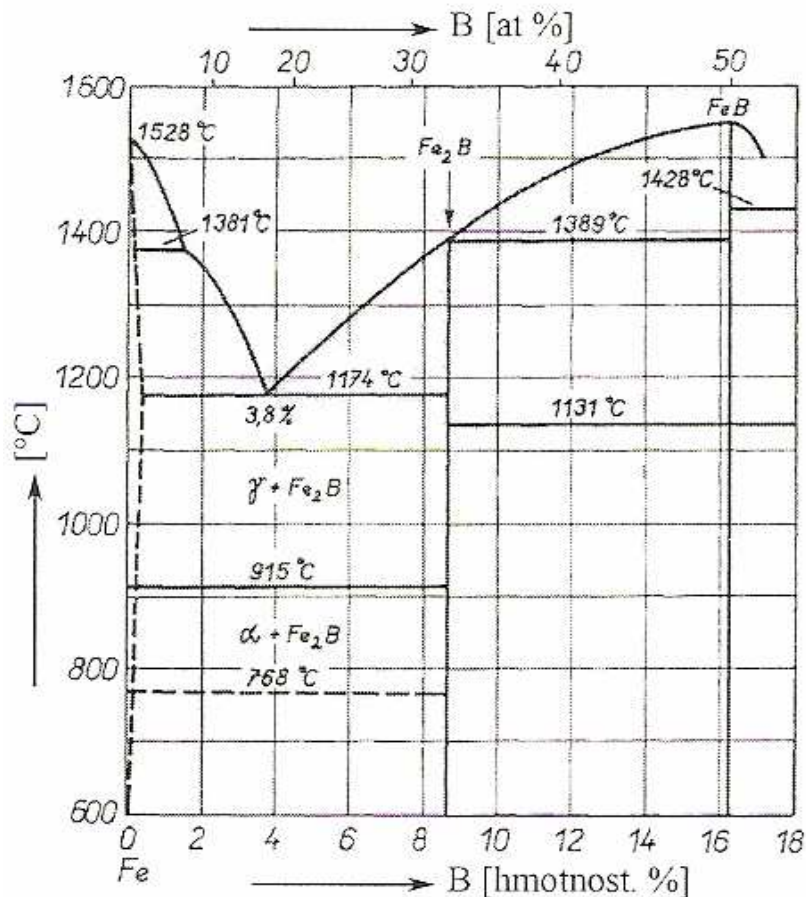
Podľa Zábavníka a Buršáka (2004) je boridovanie nasycovanie povrchu ocelí bórom za účelom zvýšenia ich povrchovej tvrdosti, odolnosti proti opotrebeniu pri abrazívnom trení, pri klznom trení a pri trení za zvýšených teplôt. Boridovaná vrstva vykazuje vysokú tvrdosť 2000 HV až do 900 až 950 °C, zvýšenú žiaruvzdornosť a v porovnaní s neboridovanou oceľou.

Ako uvádza Čižmárik (1986) boridovanie je pochod chemicko–tepelného spracovania, spočívajúci v difúznom nasýtení povrchových vrstiev výrobkov (súčiastok z kovov a zliatin) bórom pri ohreve v príslušnom prostredí, obsahujúcom bór.

Boridovanie je možné robiť v týchto zmesiach :

- v práškovej zmesi asi 60 % amorfného bóru, ferrobóru alebo karbidu bóru, 2 až 4 % NH_4Cl a mletého šamotu, oxidu hlinitého, prípadne kremičitého piesku,
- v plynnej zmesi $\text{B}_2\text{H}_6 + \text{H}_2$ a pomere 1 : 25 až 1 : 150,
- v zmesi $\text{BCl}_3 + \text{H}_2$ a pomere 1 : 20.

Po dostatočne intenzívnom nasycovaní vykazuje boridovaný povrch v súlade s binárnym diagramom (Obr. 11), smerom od povrchu k jadrú súvislú vrstvu boridov FeB o obsahu 16,25 % B, Fe_2B o obsahu 8,84 % B a tuhého roztoku bóru v Fe_α (resp. Fe_γ) – α fázy na prechode do jadra (Zábavník, Buršák, 2004).



Obr. 11 Binárny diagram Fe- B

Zdroj: Zábavník, Buršák, 2004

Boridované obroky sa vyznačujú nasledujúcimi vlastnosťami:

- vynikajúcou ochranou pri abrazívnom namáhaní,
- dobrou ochranou proti tribooxidačnému oteru,
- malým sklonom k nalepovaniu,
- veľmi vysokou tepelnou odolnosťou.

Bór a jeho zlúčeniny

Atómová hmotnosť je 10,82, merná hmotnosť $2,33 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, teplota tavenia 2075 °C, teplota varu 3927 °C. Zliatiny železa s bórom (12 až 16% B) majú teplotu tavenia 1470 až 1547 °C. S uhlíkom tvorí karbid B_4C , s kremíkom silicidy SiB_6 , s hliníkom zlúčeniny AlB_2 , AlB_{10} , $\alpha - \text{AlB}_{12}$ a $\beta - \text{AlB}_{12}$, s dusíkom nitrid BN a s kyslíkom oxid B_2O_3 .

V prírode sa bór vyskytuje v oxidickej forme. Do ocele sa bór pridáva vo forme ferobóru kvôli zlepšeniu prekaliteľnosti a mechanických vlastností. V technike sa bór používa tiež vo forme karbidu na výrobu brusných materiálov, pri výrobe porcelánu a žiaruvzdorných skiel.

Zliatina železa s bórom s vysokým obsahom bóru je krehká a nie je všeobecne použiteľná. Výnimkou je oceľ s obsahom 4 % bóru na výrobu tyčí regulátorov v atómových reaktoroch a ako neutrónová ochrana. Značné zvýšenie kaliteľnosti ocele sa dosahuje pri prídavku bóru 0,007 %. V legovaných oceliach je možné zamieňať značné množstvo percentuálnych obsahov iných legujúcich prvkov bórom bez akéhokoľvek zhoršenia mechanických vlastností (Čižmárik, 1986).

Základy technologického postupu boridovania

V súčasnosti najviac prepracované je boridovanie v pevných prostriedkoch. Nové vyvinuté práškové boridovacie prostriedky zostávajú i po nasadení sypké a tým sa značne uľahčuje vyberanie spracovaných obrobkov. Výhodou je i nízka sypná hustota, ktorá vedie k zníženiu spotreby boridovacích prostriedkov a tým k obmedzeniu nákladov na tepelné spracovanie. K realizácii boridovania sa používajú komorové pece alebo trubkové pece, ktoré umožňujú odvod vznikajúcich splodín, napr. vytesňovaním pomocou argónu (Gerstenberger, 2010).

Spravidla sa boridujú už hotové opracované diely a to z dôvodu vysokej tvrdosti vytvorených boridovaných vrstiev. Pre diely citlivé na deformáciu sa doporučuje uskutočniť pred posledným mechanickým opracovaním žihanie ku zníženiu pnutí. K dosiahnutiu optimálnej kvality vrstvy sa majú nasadzovať jemné brúsené povrchy.

Po uplynutí požadovanej dobre spracovania sa nádoby vyberú z pece a spravidla sa ochladzujú na vzduchu. Na základe vysokej tepelnej zaťažiteľnosti boridovanej vrstvy sa môžu boridované obrobky zušľachtovať. Tým sa dosiahne dobrá únosnosť pri vysokých hodnotách plošného tlaku a tiež vysoká pevnosť. Avšak austenitizačná teplota musí ležať pod 1050 °C, aby sa predošlo natavovaniu (Gerstenberger, 2010).



Obr. 12 Ocel 12 050, boridovaná 16 hodín pri teplote 900 °C

Zdroj: <http://www.mmspektrum.com>

Materiály vhodné na boridovanie

Boridovať možno väčšinu konštrukčných a nástrojových ocelí určených na zušľachtovanie, cementovanie i nitridovanie, nehrdzavejúce ocele, ocele na odliatky, sivú a tvárnu liatinu, spekané železo a oceľ, tvrdokovy, ale aj niektoré neželezné kovy (Mo, Ni, W). V tejto súvislosti je potrebné zdôrazniť fakt, že boridovaním je možno nahradiť vysokolegované ocele nízkolegovanými, prípadne len uhlíkovými (Zábavník, 1977).

Ďalším dôležitým faktom, je tá skutočnosť, že vlastnosti a štruktúra vrstiev boridov nízko a stredne legovaných ocelí sa prakticky nelíšia od vlastností a štruktúry vrstiev boridov uhlíkových ocelí (Vorošin, 1981). Preto pri výbere ocele pre výrobu konkrétnej súčiastky je potrebné vychádzať z požiadaviek na vlastnosti vrstvy boridov.

2. CIEĽ PRÁCE

Opotrebenie pracovnej časti poľnohospodárskych strojov výrazne ovplyvňuje kvalitu práce, výkonnosť a náklady. Práve preto sa mu venuje dôkladná pozornosť. Veľký dôraz sa v súčasnosti kladie na vývoj nových technológií a materiálov, ktoré by zabezpečili zvýšenie životnosti a odolnosti proti opotrebeniu ťažko namáhaných strojných súčastí strojov.

Cieľom mojej bakalárskej práce bolo overiť zvýšenie oteruvzdornosti difúzne nasycovaných vrstiev v laboratórnych podmienkach. Ako difúzne médium obsahujúce bór sme použili tetraboritan sodný (borax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) a karbid bóru (B_4C). Vybrali sme si vzorky z ocelí typu 12 021 a 14 120. Zisťovali sme abrazívne opotrebenia na základe skúšky na skúšobnom zariadení. Skúška odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu sa vykonala na skúšobnom zariadení podľa normy STN 01 5084. Vzorky boli pretavované netaviacou sa volfrámovou elektródou (TIG) v inertnej atmosfére argónu. Týmto sme sa snažili dosiahnuť zvýšenie mechanických vlastností konštrukčných materiálov.

3. METODIKA PRÁCE

3.1 Charakteristika materiálov

Na vykonanie skúšky proti abrazívnemu opotrebeniu sme vybrali ocele 12 021 a 14 120. Ako porovnávaciu vzorku (etalón) sme zvolili oceľ 12 014. Pri ich výbere nás po preštudovaní literatúry o materiáloch ovplyvnilo chemické zloženie materiálov a ich dobré mechanické vlastnosti. Môžeme ich použiť pri výrobe namáhaných strojných súčastí strojov a skúšať ich odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu.

Oceľ 12 021

Je to oceľ vhodná na cementovanie so strednou pevnosťou v jadre po kalení. Používa sa na výrobu menej namáhaných strojných súčiastok (napr. menej namáhané ozubené kolesá, vačkové hriadele, vložky, väčšie reťazové kolesá, puzdra). V žíhanom stave sa používa na háky žeriavov, výťahov a pod. Oceľ nie je vhodná na galvanické pokovovanie.

Tabuľka 1 Chemické zloženie ocele 12 021

Chemické zloženie (hm%)								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
min:	0,123	0,60	0,15	—	—	—	—	—
max:	0,20	0,90	0,40	0,25	0,30	0,30	0,04	0,04

Oceľ 14 120

Oceľ je dobre tváriteľná za tepla, po žíhaní na mätko i za studena je dobre obrábiteľná. Je vhodná na cementované strojové súčiastky, na zušľachtovanie do Ø 30 mm so strednou pevnosťou v jadre po kalení.

Tabuľka 2 Chemické zloženie ocele 14 120

Chemické zloženie (hm%)						
	C	Mn	Si	Cr	P	S
min:	0,12	0,40	0,17	0,70	—	—
max:	0,18	0,70	0,47	1,00	0,035	0,035

Oceľ 12 014 (etalón)

Oceľ je nízkouhlíková, ušľachtilá. Patrí medzi ocele so zvláštnymi vlastnosťami, magnetickými a elektrickými, je magneticky mäkká. Vhodná ja pre použitie na galvanické pokovovanie a tvárnenie za studena. Používa sa tiež v elektronike a v telekomunikačnej technike. Podľa normy STN 01 5084 je z tejto ocele vyrobený porovnávací etalón.

Tabuľka 3 Chemické zloženie ocele 12 014

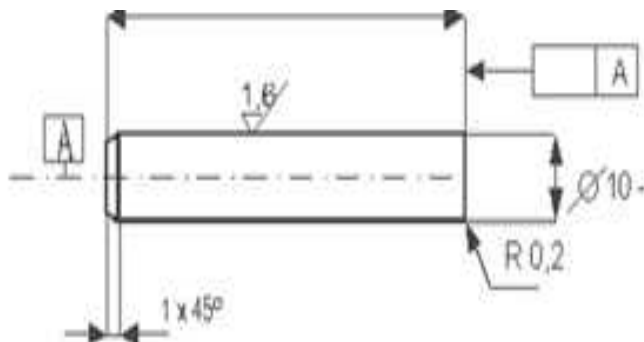
Chemické zloženie (hm%)						
	Al	C	Mn	Si	P	S
min:	0,020	—	—	—	—	—
max:	—	0,060	0,450	0,150	0,020	0,020

3.2 Príprava skúšobných vzoriek

Podľa STN 01 5084 sa pri skúškach abrazívneho opotrebenia používajú valcové vzorky s priemerom \varnothing 6 a \varnothing 10 mm. Ocele, ktoré sme si zvolili pre skúšky proti abrazívnemu opotrebeniu sme museli pred skúškou upraviť, nakoľko ich rozmery nevyhovovali uvedenej norme.

Vybraný materiál bol v podobe tyčí valcového prierezu, pri všetkých triedach vybraných ocelí. Oceľové vzorky valcového prierezu sme museli pomocou sústruženia opracovať z priemeru \varnothing 15 mm na požadovaný rozmer \varnothing 10 mm. Aby nedošlo k tepelnému ovplyvneniu materiálovej vzorky, tak sme pri obrábaní týchto vzoriek museli použiť chladiacu emulziu. Ďalej sme postupovali tak, že sme pásovou pilou oceľové vzorky predelili na dĺžku 30 mm po 2 kusy z každého materiálu. Následne sme na fréze typu FA3U zarovnali plochy vzoriek, ktoré boli určené na pretavenie, aby sme u nich dosiahli rovnobežnosť. Vzorky sme očistili od nečistôt a odmastili technickým benzínom. Nakoniec sme si ich označili.

Pre takto pripravené vzorky pripravíme presýtený difúzny roztok, ktorý vytvoríme zriedeným vybraných práškov (karbid bóru B_4C a bórax $Na_2 B_4O_7$) s vodou do žiadaného stavu. Následne sme takto pripravený difúzny roztok aplikovali na povrchy pripravených vzoriek, o vrstve cca. 3 mm. Postupne sme vzorky z ocelí na pracovnom stole uchytili do zveráka, kde sme ich postupne pretavovali metódou TIG v Ar.



Obr. 13 Tvar vzorky na skúšku abrazívneho opotrebenia

3.3 Charakteristika zváracieho poloautomatu na pretavovanie vzoriek

Ako zvárací poloautomat na pretavovanie vzoriek sme použili REHM TRANSWIG 200G 1 x 400 V, 50 Hz. Je to zariadenie, ktoré je určené pre zváranie netaviacou sa elektródou v ochrannej atmosfére systémom TIG/WIG. Externou dýzou bude zabezpečený prívod plynu do zvarového kúpeľa. Jedná sa o tranzistorový zdroj pre jednosmerný a striedavý prúd s vyhovujúcimi zváracími vlastnosťami.

Tabuľka 4 Základné parametre zváracieho aparátu REHM

Základné údaje	
Rozsah nastavenia – prúd	4 – 200 A
Rozsah nastavenia – napätie	10 – 16 V
Druh zvárania	V inertnej atmosfére s volfrámovou elektródou
Napätie naprázdno	48 V
Maximálny príkon	7 kVA
Hladina hlučnosti	66 – 75 dB
Sieťové napájanie	1 x 400 V/ 50 Hz

3.4 Popis skúšobného zariadenia

Skúšobný prístroj (Obr. 14) s brúsnym plátnom pozostáva z otáčajúceho sa kotúča s brúsnym plátnom. Ako brúsne plátno sa použije Globus 100. Pre každú skúšku sa používa nový kotúč brúsneho plátna. Skúšky abrazívneho opotrebenia so vzorkou $\varnothing 10$ mm sa obvykle uskutočňujú s merným tlakom $0,32 \text{ N.mm}^{-2}$. Vzorka je upevnená v upínacej hlavici a je pritláčaná k brúsnemu plátnu závažím. Pomocou posuvnej skrutky a prevodu je vzorka v držiaku posúvaná smerom do alebo od stredu kotúča. Pohon kotúča zabezpečuje regulačný motor, ktorý umožňuje zmenu relatívneho pohybu vzorky po kotúči, ktorá neustále kopíruje povrch brúsneho plátna.



Obr. 14 Skúšobný prístroj s brúsnym plátnom

3.5 Postup skúšky na skúšobnom zariadení

Princíp tejto skúšky spočíva na opotrebovaní skúšanej vzorky ocelí, ktorá sa pohybuje špirálovito po brúsnom papieri, ktorý pri tomto pohybe opotrebováva materiálovú vzorku.

Očistené a odmastené vzorky, ktoré sme predtým zarovnali sme najskôr odvážili na elektronickej váhe Precisa 205 A s presnosťou 10^{-4} . Hodnoty sme zapísali do tabuľky. Na kotúč prístroja sme nasadili nepoužité brúsne plátno (Globus 100). Najskôr sme si overili počiatočnú polohu posuvu hlavice a vložili sme vzorku do hlavice prístroja. Hlavicu sme zaťažili zvoleným merným tlakom $0,32 \text{ N.mm}^{-2}$, ktorá sa obvykle používa na skúšku abrazívneho opotrebenia pre vzorku $\varnothing 10 \text{ mm}$ a nachádza sa v rozsahu normy. Regulačný motor zabezpečuje pohon kotúča, ktorý umožňuje zmenu relatívneho pohybu vzorky po kotúči. Po tom ako sme skúšobné zariadenie uviedli do chodu, sme kontrolovali posuv v radiálnom smere a hlavne správny kontakt vzorky na brúsne plátno. Kontrolu sme vykonali najmä z toho dôvodu, aby nám vzorka dosadala dobre na brúsne plátno, lebo pri zlom dosadaní by nám mohlo dôjsť k skresleniu výsledkov skúšky. Skúšobný prístroj sa nám automaticky zastaví pomocou koncového spínača po prejdení predpísanej špirálovej dráhy. Následne sme vzorku vybrali z upínacej hlavice a opätovne sme ju odvážili na elektronickej váhe. Vymenili sme použité brúsne plátno za nové. Plátno sa musí s každým opakovaným skúšky vymeniť, aby sme mali zakaždým rovnaké abrazívne podmienky pre každý materiál. Po vymenení brúsneho plátna sme upli do skúšobnej hlavice ďalšiu vzorku a opakovali sme skúšku znova.

Týmto postupom sme zopakovali skúšku päťkrát na každej jednej vzorke pre dosiahnutie čo najpresnejšieho vyhodnotenia opotrebenia vzoriek. Takto sme postupne vykonali meranie u všetkých vzoriek materiálov. Všetky hodnoty sme zaznamenali do tabuliek.

3.6 Spôsob vyhodnocovania skúšky

Zo zistených úbytkov jednotlivých meraní skúšobných vzoriek a porovnávaných vzoriek sa vypočíta aritmetický priemer. Veľkosť opotrebenia vyjadruje pomernú odolnosť proti opotrebeniu vypočítanú zo vzťahu:

$$\psi_{abr} = \frac{W_{hpz}}{W_{hz}} = \frac{\rho_z}{\rho_{pz}} \cdot \frac{W_{opz}}{W_{oz}}$$

kde :

W_{opz} = priemerný objemový úbytok porovnávacích skúšobných telies (mm^3),

W_{oz} = priemerný objemový úbytok skúšobných telies (mm^3),

W_{hpz} , W_{hz} = priemerný hmotnostný úbytok porovnávacích, resp. skúšobných telies (g),

ρ_z , ρ_{pz} = merná hmotnosť porovnávacích, resp. skúšobných telies (g/cm^3).

Séria skúšok sa vždy začína dvoma porovnávacími vzorkami, ktoré sa do vyhodnocovania skúšok nezapočítavajú. Ďalej nasleduje vlastná skúška, kde sa striedajú vzorky porovnávacie (A) a skúšobné (B) podľa schémy 1 x A – 2 x B – 1 x A – 2 x B – 1 x A.

4. VÝSLEDKY PRÁCE

Namerané hodnoty sme postupne zapisovali do tabuliek, následne sme z nich vypočítali priemerné úbytky hmotnosti, tie sme postupne dosadili do vzťahu pre výpočet pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu a za hodnotu porovnávacej vzorky sme dosadili priemerný úbytok hmotnosti ocele 12 014 (etalón). Zo vzťahu sme vypočítali celkovú pomernú odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu. Všetky vypočítané aj namerané hodnoty sme uviedli v tabuľkách 5,6,7,8,9. Následne sme spracovali výsledky do grafickej podoby (Obr. 15, 16).

Tabuľka 5 Namerané a vypočítané hodnoty pre oceľ 12 021 po difúzii tetraboritanu sodného (bórax, Na₂B₄O₇).

Vzorka ocele	Hmotnosť vzorky pred skúškou (g)	Hmotnosť vzorky po skúške (g)	Úbytok hmotnosti (g)	Priemerný úbytok hmotnosti (g)	Celková pomerná odolnosť proti abrazii ψ_{abr}
12 021	35,4892	35,4166	0,0726	0,0825	3,1127
	35,4166	35,3330	0,0836		
	35,3330	35,2502	0,0828		
	35,2502	35,1609	0,0893		
	35,1609	35,0767	0,0842		

Tabuľka 6 Namerané a vypočítané hodnoty pre oceľ 12 021 po difúzii karbidu bóru (B₄C).

Vzorka ocele	Hmotnosť vzorky pred skúškou (g)	Hmotnosť vzorky po skúške (g)	Úbytok hmotnosti (g)	Priemerný úbytok hmotnosti (g)	Celková pomerná odolnosť proti abrazii ψ_{abr}
12 021	34,5185	34,4389	0,0796	0,0790	3,2506
	34,4389	34,3601	0,0788		
	34,3601	34,2839	0,0762		
	34,2839	34,2054	0,0785		
	34,2054	34,1233	0,0821		

Tabuľka 7 Namerané a vypočítané hodnoty pre oceľ 14 120 po difúzii tetraboritanu sodného (bórax, Na₂B₄O₇).

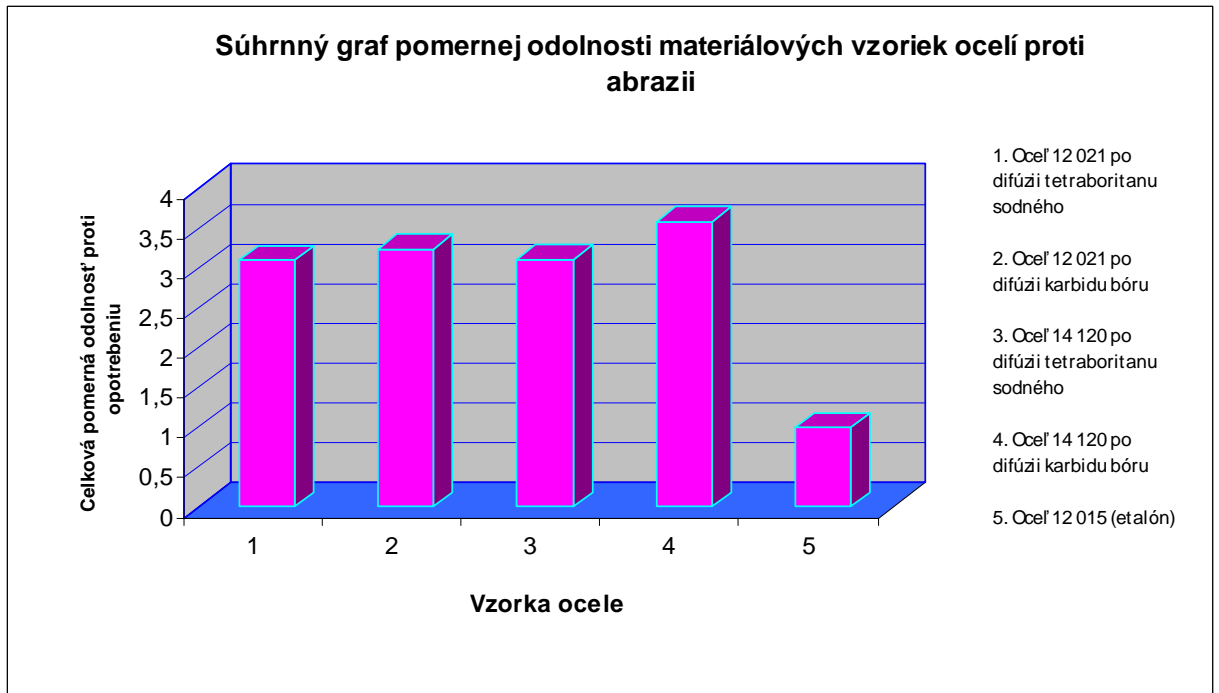
Vzorka ocele	Hmotnosť vzorky pred skúškou (g)	Hmotnosť vzorky po skúške (g)	Úbytok hmotnosti (g)	Priemerný úbytok hmotnosti (g)	Celková pomerná odolnosť proti abrazii ψ_{abr}
14 120	34,1292	34,0456	0,0836	0,0823	3,1203
	34,0456	33,9668	0,0788		
	33,9968	33,8876	0,0792		
	33,8876	33,8040	0,0836		
	33,8040	33,7178	0,0862		

Tabuľka 8 Namerané a vypočítané hodnoty pre oceľ 14 120 po difúzii karbidu bóru (B₄C) .

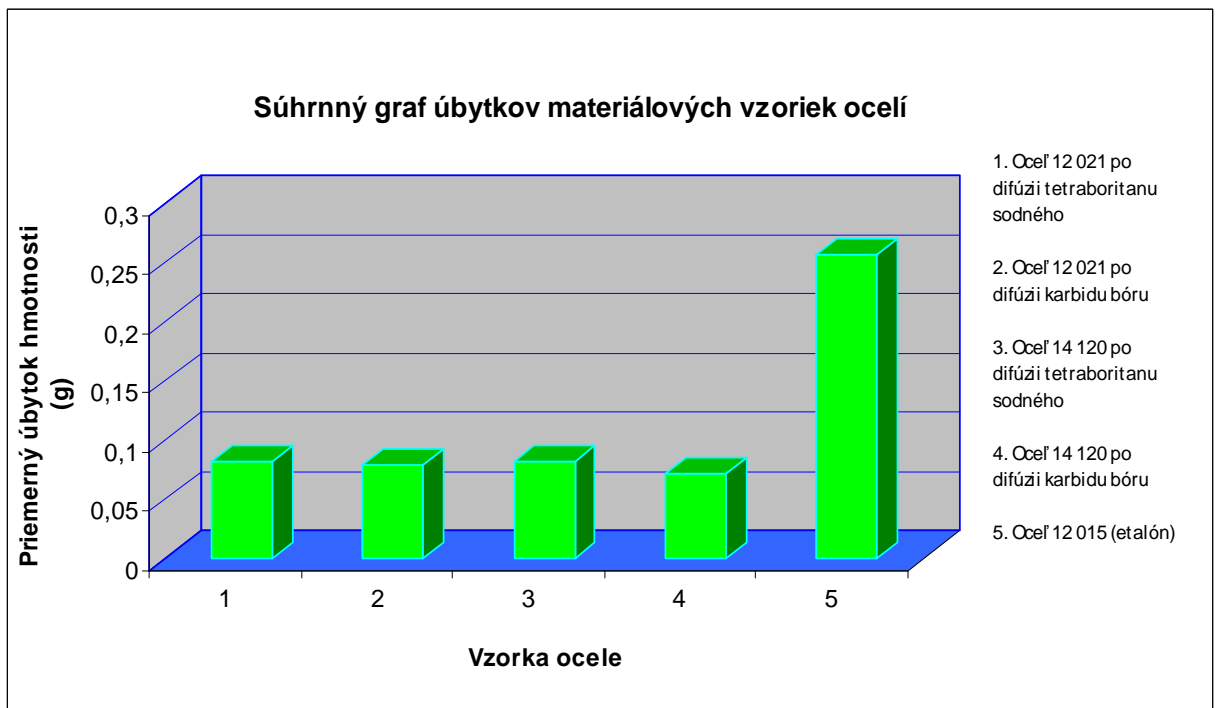
Vzorka ocele	Hmotnosť vzorky pred skúškou (g)	Hmotnosť vzorky po skúške (g)	Úbytok hmotnosti (g)	Priemerný úbytok hmotnosti (g)	Celková pomerná odolnosť proti abrazii ψ_{abr}
14 120	34,0086	33,9298	0,0788	0,0714	3,5966
	33,9298	33,8659	0,0639		
	33,8659	33,7870	0,0789		
	33,7870	33,7195	0,0675		
	33,7195	33,6507	0,0688		

Tabuľka 9 Namerané a vypočítané hodnoty pre oceľ 12 014 (etalón)

Vzorka ocele	Hmotnosť vzorky pred skúškou (g)	Hmotnosť vzorky po skúške (g)	Úbytok hmotnosti (g)	Priemerný úbytok hmotnosti (g)	Celková pomerná odolnosť proti abrazii ψ_{abr}
12 014	19,6568	19,3986	0,2582	0,2568	1,0000
	19,3986	19,1423	0,2563		
	19,1423	18,8927	0,2496		
	18,8927	18,6340	0,2587		
	18,6340	18,3729	0,2611		



Obr. 15 Súhrnné grafické zobrazenie pomernej odolnosti materiálových vzoriek skúšaných ocelí proti abrazívnemu opotrebeniu



Obr. 16 Súhrnné grafické zobrazenie úbytkov materiálových vzoriek skúšaných ocelí

5. Diskusia

U materiálov je ich schopnosť odolávať rôznym vplyvom pre ich určenie rozhodujúca. Z tribologického hodnotenia sa pri výbere materiálov na tribologické použitie vychádza z posudzovania všeobecných vlastností (ako sú pevnosť v ťahu, v tlaku, húževnatosť, cena, dostupnosť a iné), špecifických vlastností (ako sú tvrdosť, odolnosť proti roztrhnutiu a iné) a tiež z tribologických vlastností (veľkosť opotrebenia, trvanlivosť, koeficient trenia).

Zvyčajne sa pri výbere materiálov vhodných na použitie robí kompromis medzi ideálnymi mechanickými alebo chemickými vlastnosťami a odolnosťou voči opotrebeniu.

Z dôvodu, že opotrebenie je zložitý proces, už výber materiálov, ktoré mu majú odolávať, je veľmi dôležitý krok pri riadení procesu v inžinierskej praxi. Dá sa teda povedať, že jeho vplyv je rozhodujúci na ekonomické a technologické zhodnotenie. Norma STN 01 5050 definuje opotrebenie ako nežiaducu zmenu povrchu alebo rozmerov tuhých telies, spôsobených buď vzájomným pôsobením funkčných povrchov alebo funkčného povrchu a média, ktoré opotrebenie vyvoláva pri ich vzájomnom relatívnom pohybe a prejavuje sa premiestňovaním alebo odstraňovaním častíc z opotrebovaného povrchu mechanickými účinkami.

U materiálov patrí ich schopnosť odolávať opotrebeniu medzi najdôležitejšie vlastnosti. Materiály s touto schopnosťou sa musia vyznačovať chemickou stabilitou a tvrdosťou.

Naproti tomu materiály s vysokou tvrdosťou sa vyznačujú zvýšenou krehkosťou a malou húževnatosťou. Z týchto dôvodov sa v súčasnosti používa relatívne lacnejší avšak húževnatý základný materiál.

V mojej bakalárskej práci som skúmal ovplyvnenie povrchových vrstiev difúznym nasycovaním bórom a to na vybraných oceliach triedy 12 021 a 14 120, ktoré boli pretavované netaviacou sa volfrámovou elektródou, metódou TIG v inertnej atmosfére argónu. Ako médium obsahujúce bór sme použili zásypy na báze karbidu bóru (B_4C) a bórxu ($Na_2B_4O_7$). Týmto sme sa snažili docieľiť optimálne zvýšenie kvality povrchovej vrstvy pri minimálnych nákladoch.

Našou snahou bolo dosiahnuť zvýšenie oteruvzdornosti materiálu oproti základnému. Výsledky, ktoré sme získali nám potvrdili zvýšenie odolnosti proti korózii a veľmi dobrú oteruvzdornosť.

Za porovnávaciu vzorku pri vyhodnocovaní bola zvolená oceľ triedy 12 014 (etalón) podľa STN 01 5084. Skúšobné vzorky sme porovnali s etalónom.

Najväčší priemerný úbytok hmotnosti sme dosiahli u ocele triedy 12 021, ktorá bola po difúzii tetraboritanu sodného, z čoho vyplýva že táto vzorka má najmenšiu pomernú odolnosť proti opotrebeniu a to $\psi_{abr} = 3,1127$. Jej úbytok bol 0,0825 g,

Najmenší priemerný úbytok hmotnosti sme dosiahli u ocele triedy 14 120, ktorá bola po difúzii karbidu bóru, z čoho vyplýva že táto vzorka má aj najväčšiu pomernú odolnosť proti opotrebeniu a to $\psi_{abr} = 3,5966$. Jej úbytok predstavoval 0,0714 g,

U všetkých vzoriek, ktoré sme použili, sa potvrdilo zníženie priemerných úbytkov hmotnosti a tým zvýšenie pomernej odolnosti proti opotrebeniu. Tým sa nám potvrdilo, že metóda difúzneho nasycovania povrchov ocelí bórom je vhodná metóda na zvýšenie tvrdosti a povrchovej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu.

Z nameraných a vypočítaných výsledkov môžeme vysloviť nasledovný záver, že po difúznom nasýtení vzoriek bórom sme dosiahli zvýšenie odolnosti proti opotrebeniu.

6. Záver

V bakalárskej práci som sa zaoberal problematikou tribologických skúšok oteruvzdorných vrstiev, zisťovaním veľkosti opotrebenia zvolených ocelí, taktiež som sledoval úbytky hmotnosti a zisťoval pomernú odolnosť proti abrazii.

Vzorky sme si pripravili v laboratórnych podmienkach presýtenými difúznymi roztokmi karbidu bóru (B_4C) a bóraxu ($Na_2B_4O_7$), pretavovaním materiálov metódou TIG. Pri tejto metóde je určitou výhodou čas, pri ktorom nasycovanie prebieha, ktorý sa znižuje niekoľko minút. Použitie tejto metódy nám zabezpečilo zvýšenie tvrdosti a tým aj odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu u všetkých skúšaných vzoriek. Dokázali sme tým predĺženie životnosti strojných súčiastok. Skúška opotrebenia, ktorú sme vykonali na skúšobnom prístroji nám napodobnila reálne podmienky, ktoré nastávajú pri opotrebovaní strojných súčiastok v prevádzke.

Z nameraných a vypočítaných výsledkov skúšky je možné zhodnotiť, že pre využitie vytvárania difúzných vrstiev metódou TIG je výhodnejšie použiť karbid bóru, vzhľadom na to, že u obidvoch vzoriek, pri ktorých bol použitý karbid bóru, bol nameraný menší hmotnostný úbytok materiálu a tým bola potvrdená zvýšená celková pomerná odolnosť proti abrazii. Tým je dosiahnutá vyššia životnosť súčiastok. Tiež na základe dosiahnutých výsledkov možno povedať, že vlastnosti oceli 12 021 a 14 120 sú postačujúce pre metódu nasycovania povrchu bórom. Na základe vyššie uvedeného sa môžu tieto ocele použiť v prevádzkových podmienkach, v ktorých sa vyskytuje abrazívne opotrebenie.

7. Zoznam použitej literatúry

BAJLA, J. et al. 2004. *Strojárske tabuľky : Výber noriem*. Bratislava : Slovenský ústav technickej normalizácie, 2004, 451 s. ISBN 80-88971-18-7.

BEZACNÝ, J. 2010. *Náuka o materiáli 2*. 2010 [online]. Púchov : Fakulta priemyselných technológií TnUAD, aktualizované 2010. [cit. 2010-01-08]. Dostupné na internete: <http://www.fpt.tnuni.sk/kfim/predmety/rocnik1/nauka_o_materiali/nauka_o_materiali2.htm>.

BLAŠKOVIČ, P. – BALLA, J. – DZIMKO, M. 1990. *Tribológia*. Bratislava : ALFA, 1990, 360 s. ISBN 80-05-00633-0.

BLAŠKOVITŠ, P. – ČOMAJ, M. 2006. *Renovácia naváraním a žiarovým striekaním*. Bratislava : STU, 2006, 204 s. ISBN 80-227-2482-3.

BLAŠKOVITŠ, P. – KOVAŘÍKOVÁ, I. 2007. Abrazívne opotrebenie: In *Odborné a vedecké články, Strojárstvo extra v tribológii a tribotechnike* [online], 2007 ,č. 3 [cit. 2007-03-15], s. 62-63. Dostupné na internete: <<http://www.strojarstvo.sk/docwww/SK/284/284.pdf>>.

BOROVÍČKA, M. 1981. *Boridovanie konštrukčných a nástrojových ocelí v prášku : Strojnícke výrobné procesy 1. roč. B. m. : B. v., 1981.*

ČIŽMÁRIK, P. 1986. *Zvyšovanie životnosti povrchových vrstiev ocelí boridovaním*. Košice : Editačné stredisko VŠT, 1986.

FLEISCHER, G. et al. 1980. *Verschleiss und Zuverlässigkeit*. Berlin : B. v., 1980.

GERSTENBERGER, J. 2010. Vytvárení-tvrдых-a-oteruvzdorných-povrchu-pomoci-boridovaní. In *Trendy/spojování a dělení* [online], 2010, č. 3 [cit. 2010-03-15], s. 28. Dostupné na internete: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vytvareni-tvrдых-a-oteruvzdorných-povrchu-pomoci-boridovaní>>.

IŽDINSKÁ, Z. 2006. *Skúšky opotrebenia* [online]. Bratislava : Ústav materiálov a mechaniky strojov SAV, 2006. [cit. 2009-03-08]. 5 s. Dostupné na internete: <<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=522>>

JONES, M. H. et al. 1983. *Industrial tribology : Tribology Series*. 1. vyd. Elsevier; Amsterdam; Oxford; New York : B. v., 1983. 12 s.

MARTINEC, Ľ. – ŠIMKOVIČ, M. 1997. *Náuka o materiáloch*. Bratislava : STU, 1997, 232 s. ISBN 80-227-1008-3.

MORAVČÍK, R. – HAZLINGER, M. 2009. *Náuka o materiáloch II*. Trnava : Alumnipress, 2009, 243 s. ISBN 978-80-8096-081-0.

NOVÁK, M. 2009. *Tribologické skúšky oteruvzdorných vrstiev* : diplomová práca. Nitra : SPU, 2009, 63 s.

Opotrebenie a materialy odolne proti opotrebeniu. 2005 [online] Trnava : Materiálovotechnologická fakulta STU, aktualizované 2005. [cit. 2005-03-02]. Dostupné na internete: <<http://www.mtfdca.szm.sk/subory/opotrebenie.pdf>>.

PLUHAŘ, J. – KORITTA, J. 1981. *Strojírenské materiály*. Praha : SNTL/ALFA, 1981, 554 s.

RATAJ, V. et al. 2010. *Metodika písania záverečných prác na SPU v Nitre*. Nitra : SPU, 2010. 84 s. ISBN 978-80-552-0361-4.

SKOČOVSKÝ, P. – VAŠKO, A. 2004. *Materiály a technológie*. Žilina : EDIS, 2004. 122 s. ISBN 80-8070-272-2.

ŠTIFNER, T. 2006. Kovové materiály. In *Texty AFM 2004* [online], 2006, [cit. 2006-12-08], s. 104-105. Dostupné na internete: <<http://www.stifner.sk/skola/stvrty.php>>.

TOLNAI, R. 2000. *Strojárska technológia*. Nitra : Editačné stredisko SPU, 2000, 319 s. ISBN 80-7137-669-8.

VÁVRA, P. et al. 1997. *Strojnícke tabuľky*. 2. uprav. vyd. Praha : B. v., 1997. ISBN 80-88811-59-7.

VOCEL, M. – DUFEK, V. 1976. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha : SNTL, 1976, 376 s. ISBN 04-224-76.

VOROŠIN, L.G. 1981. *Boridovanie promyšlenych stalej i čungov*. Minsk Belarus : B. v., 1981.

ZÁBAVNÍK, M. 1977. *Chemicko-tepelné spracovanie kovov*. Košice : Edičné stredisko VŠT, 1977.

ZÁBAVNÍK, V. – BURŠÁK, M. 2004. *Zošľachťovanie a kontrola kvality materiálov*. Košice : Emilena, 2004, 281 s. ISBN 80-8073-071-7.

ZAKLADY_TRIBOLOGIE. 2009 [online] Zvolen : Technická univerzita, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, aktualizované 2009. [cit. 2009-12-08]. Dostupné na internete:

<http://www.tuzvo.sk/files/FEVT/katedry_fevt/kms/Prednaska_c.2_ZAKLADY_TRIBOLOGIE.pdf>.

www.bortec.de

www.htsbb.eu

www.pall.com