

Hodnotenie odolnosti proti opotrebeniu nástrojových ocelí v laboratórnych podmienkach

Jakub Lacza^{1,*}, Tomáš Vlach¹

¹ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství, Karlovo náměstí 13, 121 35 Praha 2, Česká republika

Abstrakt

Práca je zameraná na porovnanie a vyhodnotenie miery opotrebenia troch typov nástrojových ocelí v závislosti na troch metódach stanovenia objemového úbytku materiálu po skúške Pin on disk. Vybranými nástrojovými rýchloreznými ocelami boli Vanadis 23 a Vanadis 30, vyrábané metódou práškovej metalurgie a nástrojová oceľ Sverker 21 vyrábaná metódou tavnej metalurgie. Vo všetkých prípadoch boli vzorky kalené a popúšťané. Z mechanických vlastností bola vyhodnotená pevnosť v ohybe a tvrdosť podľa Rockwella. Dosiagnuté výsledky preukazujú nižšiu odolnosť proti opotrebeniu u ocele Sverker 21 oproti materiálom vyrábaným metódou práškovej metalurgie a rozdiely medzi výsledkami metód stanovenia objemového úbytku.

Kľúčové slová: nástrojová oceľ, opotrebenie, Pin on disk, objemový úbytok, pevnosť v ohybe, tvrdosť

1. Úvod

Nástrojové ocele sú predurčené na výrobu nástrojov pre najrôznejšie aplikácie. Vplyvom pracovných podmienok u týchto nástrojov dochádza k ich nežiaducemu opotrebeniu. V prípade ak opotrebovaný nástroj už nespĺňa geometrické požiadavky je nutné pristúpiť k jeho výmene za nový. V praxi ale výmena nástroja často znamená dlhšiu odstavku výroby, čo prináša množstvo nákladov, ktoré sa snažia podniky znížiť na minimum. Jedným z riešení je použitie takých nástrojov, ktoré sa vyznačujú vyššou odolnosťou proti opotrebeniu a to aj napriek ich vyššej nákupnej cene. V súčasnosti sa popri konvenčne vyrábaných nástrojových rýchlorezných oceliach (K/M) vyrábajú aj ocele metódou práškovej metalurgie rýchlo stuhnutých častíc (P/M). Technologický proces práškovej metalurgie umožňuje vyrábať materiály s unikátnymi kombináciami štruktúry a vlastností, poprípade materiály, ktoré konvenčnými metódami nie je možné vyrobiť. Tento proces spočíva v atomizácii taveniny v plynnom médiu na jemný prášok, ktorý sa následne kompaktizuje a speká. Metódou izostatického lisovania za tepla takýchto práškov (metódou HIP) je možné vyrobiť materiály, ktoré po tepelnom spracovaní vykazujú rovnakú tvrdosť, akú majú ich konvenčne vyrábané ekvivalenty, avšak výrazne ich prevyšujú húževnatosťou a ďalšími vlastnosťami [1]. Normovanou skúškou pre vyhodnocovanie odolnosti proti opotrebeniu je skúška Pin on disk. Podstata skúšky spočíva vo vytvorení stopy (drážky) do vzorky pomocou telieska (pinu) definovaných rozmerov. Skúška je definovaná silou, ktorou je skúšobné teliesko pritláčané k vzorke, relatívnou rýchlosťou pohybu a dĺžkou dráhy, ktorú skúšobné teliesko na vzorke prejde. Výstupmi zo skúšky Pin on disk môžu byť koeficient trenia v závislosti na rôznych parametroch (mazanie, teplota, vlhkosť, počet cyklov), alebo ako v našom prípade objemový úbytok materiálu vzorky. Vzorka je upevnená na otočný stôl skúšobného zariadenia. Na

testovaciu plochu vzorky sa pritlačí pin definovanou silou. Otáčaním stola dochádza na povrchu vzorky k vzniku stopy (drážky), ktorej rozmery sa následne premerajú a výpočtom sa určí objemový úbytok. Norma ASTM G99 pre túto skúšku udáva možnosť lineárneho merania vzniknutej drážky a merania hmotnostného úbytku. Upozorňuje na to, že hmotnostné úbytky sú malé, vďaka čomu môže vzniknúť nepresnosť a preto odporúča lineárne meranie. V prípade tohoto merania je možné šírku drážky merať na svetelnom mikroskope alebo profilometri [1].

2. Experimentálny materiál

Skúšaným materiálom boli tri typy vybraných nástrojových ocelí - Sverker 21 (K/M), Vanadis 23 (P/M) a Vanadis 30 (P/M). Vo všetkých troch prípadoch sa jedná o materiál určený na výrobu nástrojov pracujúcich za studena [2,3,4].

2.1. Chemické zloženie

Výrobcom uvádzané chemické zloženie pre skúšané materiály je uvedené v Tabuľke 1.

Tabuľka 1. Chemické zloženie skúšaných materiálov

Materiál		Chemické zloženie [%]					
Názov	Norma	C	Cr	Mo	W	V	Co
Sverker 21	1.2379	1,55	11,30	0,80	-	0,80	-
Vanadis 23	1.3395	1,28	4,20	5,00	6,40	3,10	-
Vanadis 30	1.3294	1,28	4,20	5,00	6,40	3,10	8,50

* Kontakt na autora: jakublacza@fs.cvut.cz

2.2. Skúšobné vzorky

Dodané vzorky mali v prípade materiálov Vanadis 23 a Sverker 21 rozmery 10x10x100 mm a v prípade materiálu Vanadis 30 rozmery $\varnothing 11 \times 100$ mm. Tieto vzorky boli použité pre skúšku pevnosti v ohybe. Po ich prelomení sa zvyšný materiál použil pre meranie tvrdosti, výrobu vzoriek pre skúšku Pin on disk a prípravu metalografických výbrusov. Na vzorkách so štvorcovým prierezom sa tvrdosť merala na koncových, neovplyvnených častiach pôvodných vzoriek. U vzorky s kruhovým prierezom sa po prelomení z neporušeného konca pôvodnej vzorky odrezal kotúč o rozmeroch $\varnothing 11 \times 15$ mm, na ktorom bola meraná tvrdosť. Následne bol tento kotúč použitý na prípravu metalografického výbrusu. Metalografické výbrusy boli pripravené klasickým spôsobom pozostávajúcim zo zalisovania do plastovej hmoty, brúsenia na metalografických brúsnych papieroch, leštenia a leptania leptadlom Nital (2% roztok kyseliny dusičnej v etanole). Vzorky pre skúšku Pin on disk boli taktiež zalisované do plastovej hmoty a brúsené na metalografickej brúske z dôvodu zníženia drsnosti povrchu, resp. v prípade Vanadis 30 z dôvodu vytvorenia plochy pre skúšku Pin on disk. Po brúsení boli z plastového obalu vyňaté a použité pre skúšku.

2.3. Tepelné spracovanie

Tepelné spracovanie jednotlivých materiálov udáva Tabuľka 2.

Tabuľka 2. Tepelné spracovanie skúšaných materiálov

Materiál		Tepelné spracovanie	
Názov	Norma	Kalenie	Popúšťanie
Sverker 21	1.2379	1050 °C/30 min.	2x 500°C/ 2 hod.
Vanadis 23	1.3395	1100 °C/ 5 min.	3x 560°C / 1 hod.
Vanadis 30	1.3294	1100 °C/ 5 min.	3x 560°C / 1 hod.

Vo všetkých prípadoch prebehla austenitizácia vo vákuovej peci a kalenie v peci prúdom dusíka o tlaku 5 bar.

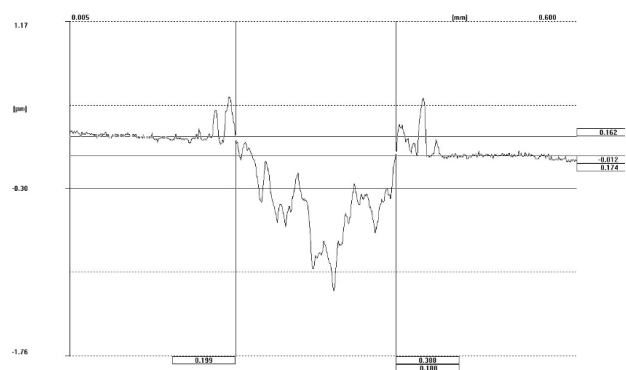
3. Experimentálne metódy

Meranie tvrdosti prebehlo na univerzálnom tvrdomeri EMCOTEST M4C metódou HRC [5]. Na každej zo skúšaných vzoriek bolo urobených 10 meraní. Pevnosť v ohybe bola meraná na zariadení Instron 5582, pri rýchlosti posuvu 1mm/min a vzdialenosti podpôr 80 mm. Skúška Pin on disk bola vykonaná na tribometri THT-S-CE-0000. Prítlačná sila pinu na povrch vzorky bola 5 N, celková dĺžka trenia 100 m, priemer stopy 4 mm a priemer pinu bol 6 mm. Materiál pinu bol Al_2O_3 . Skúška prebiehala pri teplote okolia. Pre vyhodnotenie skúšky Pin on disk sme použili tri metódy stanovenia objemového úbytku. Pre výpočet objemového úbytku sa vychádzalo z predpokladu, že stopa má prierez tvaru kruhovej úseče, s polomerom zhodným s polomerom skúšobného telieska. Šírka drážky predstavuje tetivu časti kruhu, pomocou ktorej je možné vypočítať prierez

drážky a potom aj objemový úbytok, pre ktorý norma [2] udáva vzťah (1).

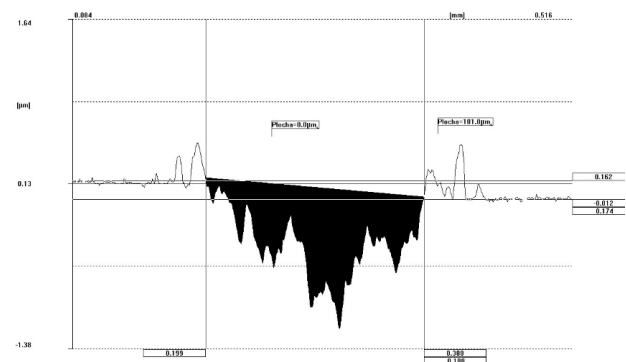
$$OÚ_{vzorky} = 2\pi R \left[r^2 \sin^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \left(\frac{d}{4} \right) (4r^2 - d^2)^{\frac{1}{2}} \right] [mm^3] \quad (1)$$

Pomocou svetelného mikroskopu NEOPHOT 32 bola premeraná šírka vytvorenej drážky v piatich oblastiach. Z nameraných hodnôt sa určila priemerná šírka drážky. Meranie šírky drážky pomocou profilometra je založené na podobných princípoch ako v predošlom prípade. Pomocou profilometra HOMMEL TESTER a softvéru NIS Elements advanced research bola zmeraná šírka drážky a rovnakým spôsobom prepočítaná na objemový úbytok. Príklad profilu drážky po skúške pin on disk vzorky materiálu Vanadis 23 je na obr.1. V tomto prípade bola nameraná hodnota šírky drážky 0,189 mm.



Obr.1. Profil drážky

Pri vyhodnocovaní objemového úbytku pomocou profilometra je možné využiť jeho analytické funkcie. Po určení okrajov stopy je možné vyhodnotiť plošný obsah oblasti odpovedajúcej profilu drážky. Konečný objemový úbytok sa určí ako súčin plochy prierezu drážky a jej dĺžky. Vyhodnotenú plochu prierezu drážky z obr.1 ukazuje obr.2. Z uvedeného vyplýva, že všetky použité metódy vyhodnotenia objemového úbytku sú zaťažené určitou chybou, ktorá je daná geometrickou členitosťou vyhodnocovanej drážky a bezprostredného okolia okolo nej. V dostupnej literatúre nie je známa práca, ktorá by sa touto problematikou zaoberala.



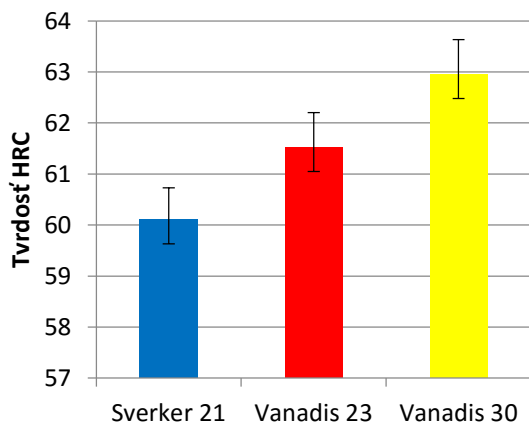
Obr.2. Profil drážky s vyhodnotenou plochou prierezu drážky

Metalografické výbrusy boli pozorované na svetelnom mikroskope NEOPHOT 32 pri zväčšení 500x.

4. Výsledky a ich diskusia

4.1. Meranie tvrdosti

Výsledky merania tvrdosti skúšaných materiálov sú graficky znázornené na obr. 3. Hodnoty sú priemerné a doplnené o chybové úsečky znázorňujúce rozptyl hodnôt meraní.

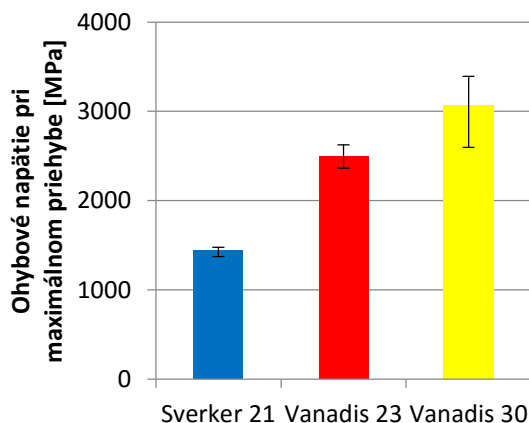


Obr. 3. Porovnanie tvrdostí skúšaných materiálov

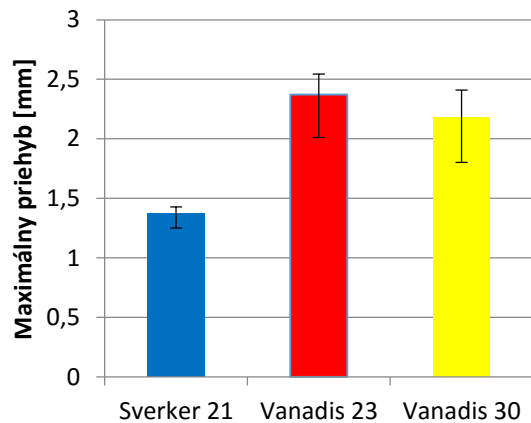
Z obr. 3. vyplýva, že najvyššiu tvrdosť vykazuje materiál Vanadis 30, kým najnižšiu tvrdosť vykázal materiál ocele Sverker 21.

4.2. Pevnosť v ohybe

Pri vyhodnocovaní skúšky pevnosti v trojbodovom ohybe je nutné brať do úvahy rozdielny prierez skúšaných vzoriek.



Obr.4. Porovnanie ohybových napätí materiálov pri maximálnom priehybe

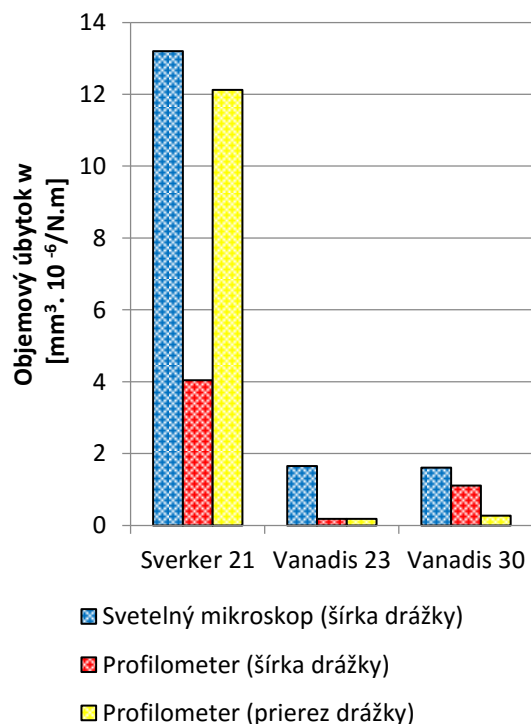


Obr.5. Porovnanie maximálnych priehybov vzoriek

Z obr. 4-5. vyplýva, že kombináciu najvyššej pevnosti v ohybe a húževnatosti poskytuje materiál Vanadis 23. Vanadis 30 vykázal najvyššie hodnoty pevnosti pri maximálnom priehybe. Rýchlorezná oceľ Sverker 21 vykázala najhoršiu kombináciu pevnosti a húževnatosti. Z merania taktiež vyplýva, že vplyv prierezu vzorky na výslednú pevnosť je relatívne nevýznamný.

4.3. Pin on disk

Hodnoty objemových úbytkov pre všetky tri metódy vyhodnotenia skúšky a pre všetky tri materiály znázorňuje obr. 6.



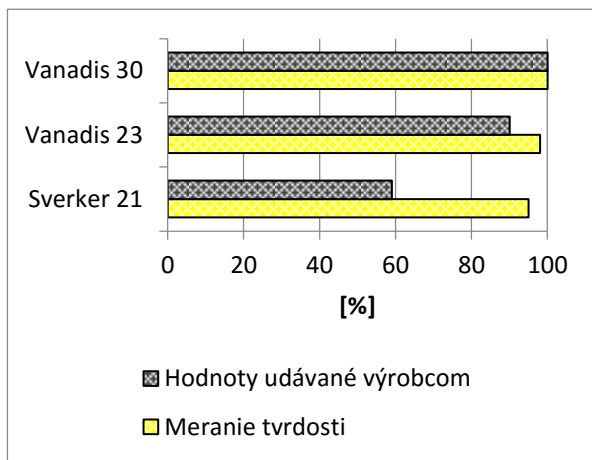
Obr.6. Porovnanie objemových úbytkov skúšaných materiálov v závislosti na metódach stanovenia objemového úbytku

Najvyššie hodnoty objemového úbytku dosiahla podľa očakávania nástrojová oceľ Sverker 21. Medzi jednotlivými

vými metodami stanovenia objemového úbytku sú vo výsledkoch zreteľné rozdiely.

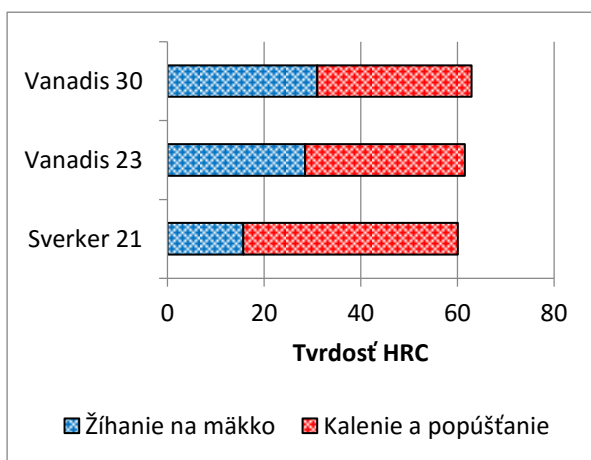
4.4. Porovnanie výsledkov

Výrobca v materiálových listoch [3,4,5] uvádza porovnanie vyrábaných materiálov z jeho sortimentu na základe rôznych kritérií. Nešpecifikuje však bližšie podmienky skúšok alebo skúšobné vzorky. Nami získané výsledky boli preto porovnané s údajmi od výrobcu na základe percentuálneho pomeru. Hodnota tvrdosti u najtvrdšieho materiálu, ktorým bol Vanadis 30, bola stanovená na 100%. Ostatné hodnoty boli potom dopočítané ako percentuálny podiel z tejto hodnoty.



Obr. 7. Pomerné porovnanie nameraných tvrdostí s tvrdosťami udávanými výrobcom [3,4,5]

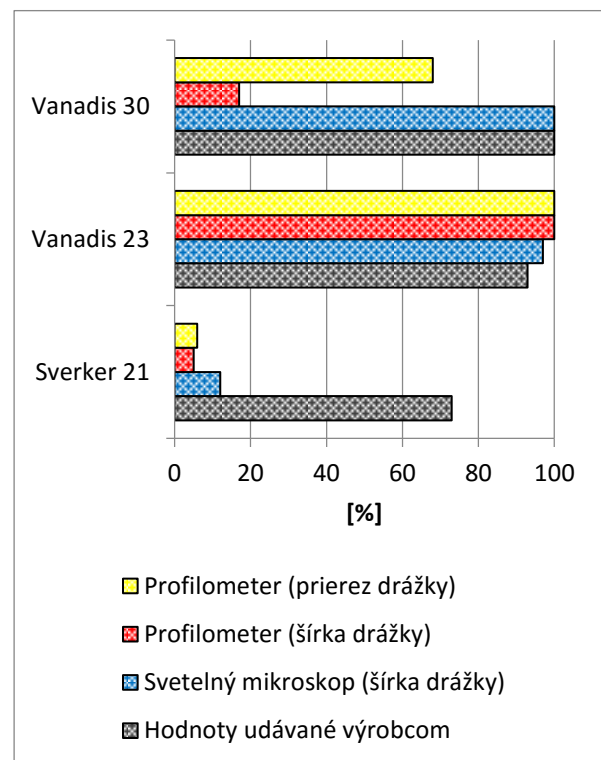
Z obr. 7. vyplýva, že naše meranie poukazuje na fakt, že pokles tvrdosti od najtvrdšieho materiálu po najmäkší nie je taký razantný, ako tvrdí výrobca.



Obr. 8. Prehľad príspevkov tvrdosti po zošľachtení [3,4,5]

Obr. 8 znázorňuje prírastok tvrdosti po zošľachtení od tvrdosti po žihanie na mäkko. Tvrdosti materiálov po žihaní na mäkko udávané výrobcom boli dopočítané

z hodnôt HB na HRC v súlade s [7]. U materiálu Sverker 21 je tento prepočet diskutabilný, keďže jeho tvrdosť v HB je nižšia, ako odporúča na prepočet príslušná norma [7]. Keďže je u menovaného materiálu prevod diskutabilný, nie je vhodné tvrdiť, že materiál Sverker 21 vykázal najvyšší nárast tvrdosti po zošľachtení. U materiálov Vanadis 23 a Vanadis 30 nastal nárast tvrdosti po zošľachtení približne o 100%. Výrobca udáva u materiálov okrem tvrdosti aj odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu. Z hodnôt objemových úbytkov, ktoré sme namerali, sme vypočítali prevrátené hodnoty, ktoré sme následne porovnali s hodnotami od výrobcu. Za 100% bol v rámci metódy braný materiál, ktorý vykázal najvyššiu odolnosť proti opotrebeniu. Ostatné boli dopočítané ako percentuálny podiel maximálnej hodnoty.

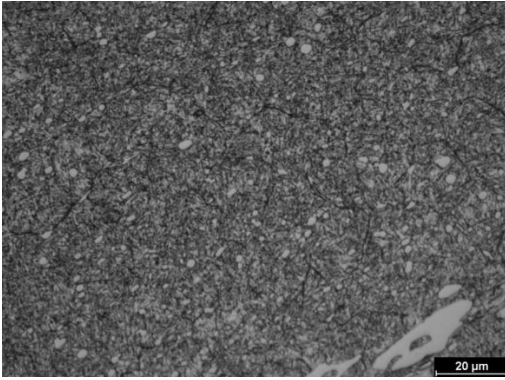


Obr. 9. Pomerné porovnanie nameraných odolností proti opotrebeniu s údajmi od výrobcu [3,4,5]

Z obr.9. je zrejmé, že v prípade materiálu Sverker 21 sme namerali oveľa menšiu odolnosť proti opotrebeniu ako udáva výrobca.

4.5. Metalografická analýza

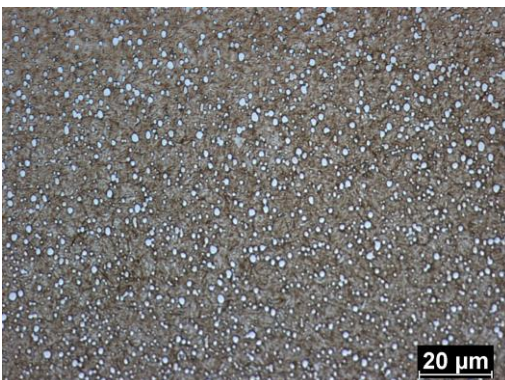
Štruktúru sledovaných materiálov pri použití svetelnej mikroskopie dokumentujú obrázky 10 – 12. Podľa očakávaní je štruktúra tvorená popusteným martenzitom a karbidmi. Môžeme očakávať aj malé množstvo zvyškového austenitu, ktorý svetelnou mikroskopiou nie je identifikovateľný. Veľkosť karbidov a homogenita štruktúry sa podľa predpokladu líši pre K/M a P/M ocele. Štruktúra ocelí Vanadis 23 a Vanadis 30 sa pri pozorovaní svetelnou mikroskopiou nelíšia, pre podrobnejšiu analýzu by bolo nutné použiť riadkovaciu elektrónovú mikroskopiu SEM.



Obr.10. Štruktúra vzorky Sverker 21



Obr.11. Štruktúra vzorky Vanadis 23



Obr.12. Štruktúra vzorky Vanadis 30

5. Závěrečné informace a konečné zhrnutí výsledků

- 1) Nástrojová ocel Sverker 21 dosáhla nejvyšší hodnoty objemového úbytku po skúške Pin on disk.
- 2) Rozdiel objemových úbytkov PM rýchlorezných ocelí Vanadis 23 a Vanadis 30 je nepatrný. Je možné tvrdiť, že legovanie kobaltom nemá pri teplotách okolia výraznejší vplyv na odolnosť proti opotrebeniu.
- 3) Objemový úbytok vyhodnocovaný pomocou merania šírky vytvorenej drážky na svetelnom mikroskope dosahoval vyššie hodnoty ako objemový úbytok vyhodnocovaný pomocou merania šírky drážky profilometrom.
- 4) Z rozdielov zistených medzi objemovým úbytkom vyhodnocovaným zo šírky drážky a objemovým úbytkom

kom vyhodnocovaným z plochy prierezu drážky je možné usúdiť, že profil drážky sa líši od tvaru kruhovej úseče. Najviac to dokazujú výsledky v prípade materiálu Sverker 21, ktorý má najmenšiu tvrdosť a v prípade drážky môžeme predpokladať najväčšiu plastickú deformáciu.

5) Ako najmenej presná sa javí metóda merania šírky drážky pomocou svetelného mikroskopu, keďže je zaťažená najväčšou subjektívnou chybou z dôvodu obtiažneho určenia okraja drážky.

6) Z uvedených metód vyhodnocovania objemového úbytku sa za najpresnejšiu môže považovať metóda stanovenia objemového úbytku pomocou plochy prierezu drážky určenej profilometrom a softvérom. Táto metóda nie je ovplyvnená predpokladom o tvare drážky a zohľadňuje jej skutočný tvar.

Pod'akovanie

Autori by radi poďakovali pracovníkom ústavu Materiálového inžénýrství, zvlášť Ing. Janě Sobotové Ph.D za cenné rady a pripomienky behom riešenia a spracovania dát. Táto práca bola podporená grantom študentskej grantovej súťaže ČVUT č. SGS15/149/OHK2/2T/12.

Zoznam symbolov

K/M	konvenčná (tavná) metalurgia
P/M	prášková metalurgia
HIP	Hot isostatic pressing
N	newton (1 kg.m.s^{-2})
m	meter
mm	milimeter
Al_2O_3	oxid hlinitý
R	polomer dráhy pinu (guličky)
d	šírka drážky disku
r	polomer pinu (guličky)
MPa	megapascal (10^6 kg.m.s^{-2})

Literatúra

- [1] MACEK, Karel. Kovové materiály. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
- [2] Materiálový list k oceli Sverker 21. Uddeholm, 2002. Dostupné z: http://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_sverker_21_english.pdf
- [3] Materiálový list k Vanadis 23. Uddeholm, 2006. Dostupné z: <http://www.uddeholm.cz/czech/files/vanadis-23.pdf>
- [4] Materiálový list k Vanadis 30. Uddeholm, 2006. Dostupné z: <http://www.uddeholm.cz/czech/files/vanadis-30.pdf>
- [5] ČSN EN ISO 6508: Kovové materiály- Zkouška podle Rockwella. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [6] ASTM G 99 - 95A. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus1. West Conshohocken: ASTM, 2000.
- [7] ČSN EN ISO 18265: Kovové materiály - převod hodnot tvrdosti. Praha: Český normalizační institut, 2014.