

SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA

V NITRE

TECHNICKÁ FAKULTA

Evidenčné číslo 127499

**ZLEPŠENIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ
POVRCHOVÝCH VRSTIEV OCELÍ**

Nitra, 2010

Štefan Marton

SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA

V NITRE

Rektor: prof. Ing. Mikuláš Látečka, PhD.

TECHNICKÁ FAKULTA

Dekan: prof. Ing. Vladimír Kročko, CSc.

**ZLEPŠENIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ
POVRCHOVÝCH VRSTIEV OCELÍ**

Bakalárska práca

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

Nitra, 2010

Štefan Marton

Čestné vyhlásenie

Podpísaný Štefan Marton vyhlasujem, že som záverečnú prácu na tému „Zlepšenie mechanických vlastností povrchových vrstiev ocelí“ vypracoval samostatne s použitím uvedenej literatúry.

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

V Nitre 07. mája 2010

Štefan Marton

Pod'akovanie

Touto cestou ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Ivanovi Kováčovi za odborné vedenie pri spracovaní bakalárskej práce.

Súčasne ďakujem kolektívu pracovníkov katedry za pomoc pri výrobe skúšaných vzoriek.

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá zvyšovaním tvrdosti povrchových vrstiev materiálov vplyvom bóru. Zmeny povrchových vlastností jednotlivých skúšaných materiálov boli sledované pri nasycovaní chemickými zlúčeninami tetraboritanu sodného – bórax a karbidu bóru. Ocele ktoré boli použité pri meraniach a skúmaníach boli ocele triedy 12 050 a 15 230, ktoré boli pretavované technológiou zvarovania WIG v ochrannej atmosfére argónu. WIG je zvarovanie netaviacou sa elektródou. Vlastné merania prebiehali na Katedre kvality a strojárskych technológií. Skúšky tvrdosti boli merané Vickersovou metódou konkrétne tvrdomerom HPO 250 podľa normy STN ISO 6506. Na každej vzorke sa meranie zopakovalo desaťkrát a to prvýkrát na povrchu skúšaného materiálu a druhýkrát sa desaťkrát merala tvrdosť v hĺbke meraného materiálu. Z výsledných hodnôt sa vypočítal aritmetický priemer jednotlivých tvrdostí. Tvrdosť bola postupne meraná na základnom materiály, v tepelne ovplyvnenej oblasti a v boridovanej vrstve. Z výsledkov merania vzoriek vyplýva, že na boridovanie sú vhodnejšie ocele triedy 15 230, ktoré mali vyššiu nameranú tvrdosť ako ocele triedy 12 050.

Kľúčové slová: tvrdosť, oceľ, bór, technológia, povrchová vrstva

Abstract

This bachelor work deals with increasing the hardness of the surface layers of materials the influence of boron. Changes in surface properties of various tested materials were observed in the saturation of chemical compounds, sodium tetraborate - borax and boron carbide. Steels have been used in measurements and investigations were steel class 12 050 and 15 230 have been remelting WIG welding technology in a controlled atmosphere of argon. WIG non-melting the welding electrode. Custom measurements were conducted at the Department of Quality and engineering technologies. Tests of hardness were measured by Vickers hardness testers specifically HPO 250 according to ISO 6506th For each sample, the measurement was repeated ten times and the first time on the surface of the test material and the second time ten times the measured hardness in the depth of the material being measured. The resulting values are calculated by the arithmetic average of the individual hardness. Hardness was measured successively at the basic materials in the heat affected zone and borodizing layer. The results of sample measurements that are more appropriate for borodizing steel class 15 230, which were higher than the measured hardness steel grade 12050.

Key words: hardness, steel, boron, technology, coating

Obsah

Úvod

1. Chemicko - tepelné spracovanie ocelí	10
1.1 Definícia chemicko-tepelného spracovania ocelí.....	10
1.2 Cementovanie.....	12
1.3 Nitridovanie.....	13
1.4 Ostatné spôsoby chemicko-tepelného spracovania.....	15
2. Skúšky tvrdosti.....	17
2.1 Definícia tvrdosti materiálu, meranie tvrdosti materiálu, rozdelenie skúšok.....	17
2.2 Skúška tvrdosti podľa Brinella.....	18
2.3 Skúška tvrdosti podľa Vickersa	19
2.4 Skúška tvrdosti podľa Rockwella	20
2.5 Skúška tvrdosti Komparačnou metódou	21
2.6 Skúšky mikrotvrdosti	22
2.7 Porovnanie a použitie metód na meranie tvrdosti	23
3. Boridovanie.....	24
3.1 Bór a jeho vlastnosti.....	24
3.2 Teória procesu boridovania.....	25
3.3 Prípravky vhodné na boridovanie	26
3.4 Boridovanie ocelí	27
3.5 Technológia procesu boridovania	28
3.6 Difúzne boridovanie.....	29
3.7 Elektrolytické boridovanie	30
3.8 Chyby v boridovaných vrstvách.....	31
3.9 Materiály vhodné na boridovanie.....	32
4. Cieľ práce	33
5. Metodika práce	34
5.1 Charakteristika použitého materiálu	34
5.2 Charakteristika použitých prístrojov	35
5.3 Charakteristika pracovných postupov	36
5.3.1 Mechanické skúšky – meranie tvrdosti	36
6. Výsledky práce	37

7. Diskusia.....	41
8. Záver	42
9. Zoznam použitej literatury	43

Použité označenia

Ra – drsnosť povrchu

D – priemer guľôčky (mm)

d – aritmetický priemer vtlačku

HV – tvrdosť podľa Vickersa ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)

HBW – tvrdosť podľa Brinella ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)

HR – tvrdosť podľa Rockwella ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)

HB – tvrdosť meraná pomocou Poldi kladivka

F – sila (N)

S – plocha (mm)

u – uhlopriečka odtlačku (mm)

N – dusík

S – síra

Cr – chróm

Al – hliník

Si – kremík

B – bór

Úvod

V súčasnej dobe moderného priemyslu sa kladú veľmi vysoké požiadavky na všetky zariadenia a súčiastky v oblasti strojárstva. Prvoradými cieľmi pre všetkých sú hlavne kvalita výrobku, jeho bezporuchová prevádzka, čo najdlhšia životnosť a samozrejme primeraná cena. Z hľadiska vlastností každej strojnej súčiastky sú prvoradé hlavne konštrukčné vlastnosti danej súčiastky. Najdôležitejšími konštrukčnými vlastnosťami sú tvrdosť, pevnosť, medza klzu, tepelná vodivosť, odolnosť voči korózii a podobne.

V praxi sa používa mnoho technológií, ktorými sa výrobcovia snažia zlepšiť mechanické vlastnosti povrchových vrstiev súčiastok. Základom týchto metód je, že na základný materiál nie je potrebné naniesť súvislú kovovú vrstvu požadovaných mechanických vlastností. Túto vrstvu je potrebné naniesť len na tie časti súčiastky, ktoré sú najviac vystavované namáhaniu a opotrebeniu. Medzi takéto technológie určite patrí chemicko – tepelné spracovanie ktorému sa v mojej práci venujem.

Výberom vhodnej metódy a chemickej zliučiny a samozrejme správneho technologického postupu sa dá dosiahnuť vysoká kvalita daného povrchu pri ekonomickej nenáročnosti. Cieľom mojej bakalárskej práce je zistiť vplyv vybraných prvkov a sledovať zvýšenie tvrdosti povrchových vlastností skúšaných materiálov, ktorými sú ocele triedy 12 050 a 15 230.

1. Chemicko - tepelné spracovanie ocelí

1.1 Definícia chemicko-tepelného spracovania ocelí

Chemicko-tepelné spracovanie zahŕňa postupy difúzneho nasycovania povrchu materiálov rôznymi prvkami, kovovými i nekovovými, s cieľom vyvolať zmeny mechanických, chemických a fyzikálnych vlastností povrchových vrstiev materiálu. Častým cieľom z hľadiska mechanických vlastností chemicko-tepelného spracovania je zvýšenie tvrdosti povrchu a zachovanie si húževnatého jadra. Základom chemicko-tepelného spracovania je zmena chemického zloženia povrchovej vrstvy (Balla, 2009).

Podľa Martinca a Šimkoviča (1997) sa požadované vlastnosti (zvýšenie tvrdosti a odolnosti povrchu proti opotrebeniu a zachovanie húževnatého jadra) dosiahnu buď priamo, t.j. obohatením povrchovej vrstvy príslušným prvkom (N, S, Cr, Al, Si, B, ...) alebo aj nasledujúcim tepelným spracovaním – kalením a popúšťaním (C, C+N).

Chemicko-tepelné spracovanie možno rozdeliť z hľadiska postupov do dvoch skupín:

1. ak sú požadované vlastnosti dosiahnuté až po chemicko-tepelnom spracovaní (cementovanie, nitridovanie, nitrocementovanie)

2. ak sú považované vlastnosti dosiahnuté už v priebehu obohacovania povrchovej vrstvy (difúzne pokovovanie – nasycovanie ďalšími prvkami)

Prostredie chemicko-tepelného spracovania môže byť z hľadiska prostredia plynné, kvapalné alebo tuhé. Tuhým prostredím rozumieme prášok. Pri dostatočne vysokej teplote tieto prostredia v styku s povrchom ocele vyvolávajú nasledujúce reakcie:

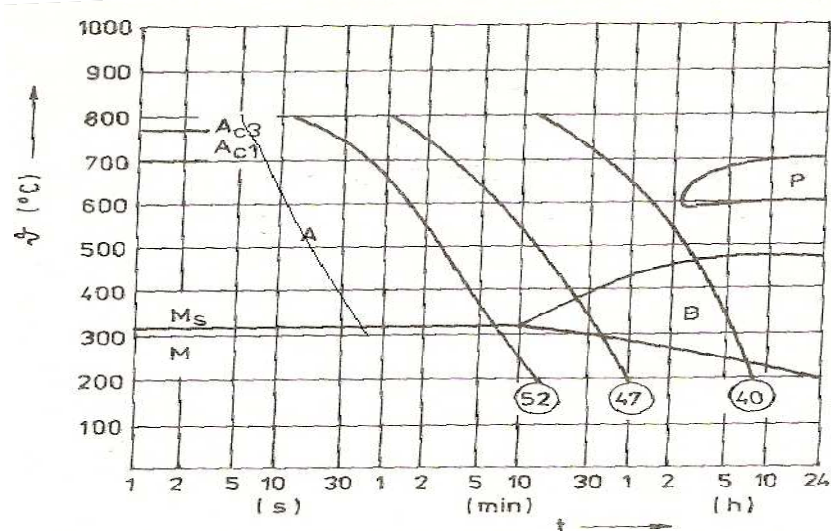
a) disociácia – rozpad molekúl zlúčenín nasycujúcej látky – vznikajú tu aktívne atómy

b) absorpcia – ide o pohlcovanie atómov ktoré vznikli disociáciou. Absorpcia však môže nastať len za určitých podmienok a to len vtedy ak:

- atómy nasycujúcej látky sú v stave zrodu (aktívne atómy)
- nasycujúca látka je v základnom kove rozpustná
- základný kov a nasycujúce prostredie sú v dokonalom styku

c) difúzia – pohyb atómov v smere koncentračného gradientu

Povrchová vrstva základného materiálu, ktorá sa chemickým zložením odlišuje od jadra, sa nazýva difúznou vrstvou. Celková hrúbka difúznej je vzdialenosť od nasycovaného povrchu až po miesto, pokiaľ prenikol difundujúci prvok. Tento spôsob spracovania ocele má pre strojársku výrobu veľký význam keďže sa používa pri súčiastkach ktoré majú byť húževnaté, a ktorých povrch má byť tvrdý, aby lepšie odolával oteru a otláčeniu (Veselý, 1973).



Obr. 1 Diagram fázovej premeny ocele NCMo 7 (16 640)

Zdroj: Smóling, 1980

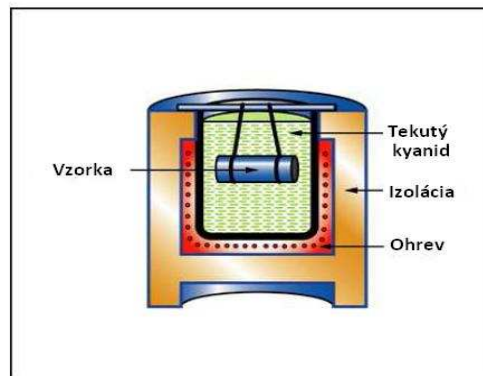
Obrobky podrobené tomuto spôsobu spracovania sa používajú vtedy, ak požadujeme oteruvzdornú povrchovú vrstvu a húževnaté jadro. Húževnaté jadro odoláva dynamickeému namáhaniu, pritom tvrdá povrchová vrstva vyhovuje aj z hľadiska únavy materiálu. Pevnosť jadra môže byť v rozpätí 400 až 1500 MPa, podľa akosti ocele, rozmerov obrobku a charakteru tepelného spracovania. Toto tepelné spracovanie vždy volíme podľa predpokladaného spôsobu namáhania.

Pevnosť jadra určuje predovšetkým akosť ocele. Prekaliteľnosť závisí predovšetkým od rozmeru obrobku. Preto je vhodné predpisovať dolnú hranicu pevnosti, podľa ktorej sa zvolí spôsob chemicko-tepelného spracovania (Smóling, 1980).

1.2 Cementovanie

Cementovanie je nasycovanie povrchu oceľových súčiastok uhlíkom. Je to najrozšírenejší postup chemicko-tepelného spracovania. Používa sa za účelom dosiahnutia vysokej povrchovej tvrdosti. Na cementovanie sú vhodné mäkké ocele s obsahom od 0,1 do 0,3 %C. Následným zakalením cementovanej súčiastky sa získa vo vrstve martenzitická štruktúra vysokej tvrdosti pričom v jadre dochádza väčšinou iba k čiastočnému zakaleniu, a preto zostane mäkké a húževnaté.

Cementuje sa pri teplotách 850 až 900°C. Cementovanie v závislosti od prostredia môže prebiehať v troch prostrediach: v tuhom, kvapalnom a plynnom prostredí.



Obr. 2 Schéma procesu cementovania

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

Najčastejšie sa cementovanie používa v automobilovom, leteckom a všeobecnom strojárskom priemysle. Aplikuje sa na súčiastky pred dokončením počnúc od výliskov z mäkkých ocelí až po ťažké súčasti prevodoviek zo zliatinových ocelí. Všeobecným pravidlom je že tenké vrstvy (do 0,5 mm) sa používajú na vodné pumpy, hriadele, puzdrá, a malé ozubenia.

Stredne hrubé vrstvy (0,5 až 1,0 mm) sa používajú na súčasti ventilov, puzdrá a ozubenia. Hrubé vrstvy 1,0 až 1,5 mm) na prevodovky a čapy a extra hrubé vrstvy (nad 1,5 mm) na vačkové hriadele (Iždinská, 2006).

Podľa Ballu (2009), čas potrebný na cementovanie závisí na cementačnom prostredí a hrúbke cementačnej vrstvy. Bežne trvá cementovanie od 10 do 12 hodín. Požadované vlastnosti cementovanej súčiastky sa dosiahnu až tepelným spracovaním.

1.3 Nitridovanie

Tvrďšiu vrstvu ako cementovaním a zakalením je možné vytvoriť nitridovaním, to je nasýtením povrchu ocelí dusíkom. Na rozdiel od cementovania sa nitriduje pri teplotách podstatne nižších okolo 500 až 600 °C. To znamená že sa nitriduje približne v oblasti najväčšej rozpustnosti dusíka v železe α . Nitriduje sa buď v plynnom prostredí alebo v prostredí soľného kúpeľa. V prvom prípade je zdrojom dusíka čpavok. Nitridy zvyšujú tvrdosť vrstvy z časti vysokou tvrdosťou ale taktiež vytvrdzovacím efektom. Pre zlepšenie vlastností vrstvy sa do nitridačných ocelí pridávajú Al a Cr, ktoré tvoria zvláštne tvrdé nitridy a znižujú krehkosť vrstvy. U týchto ocelí sa dosahuje tvrdosť viac ako 1 100 HV.

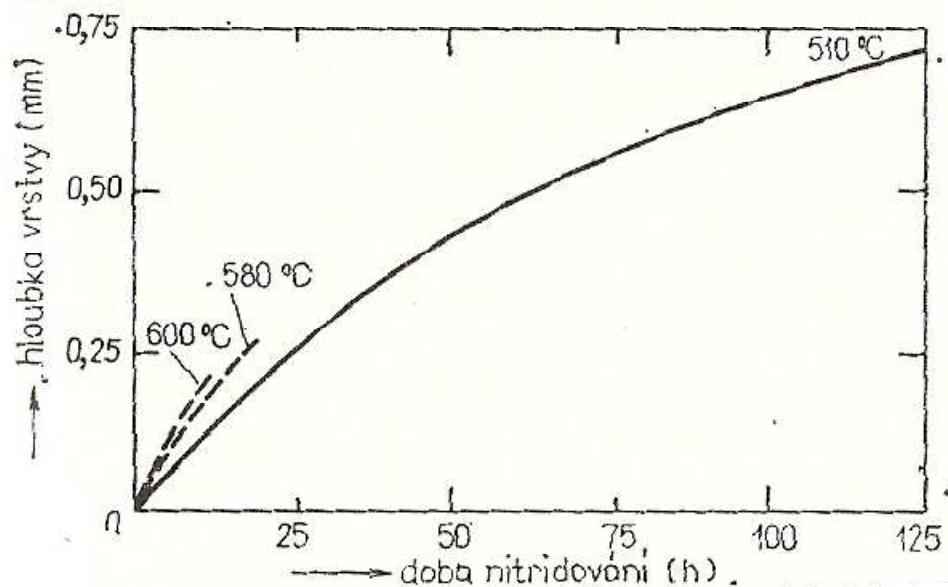
Tvrdosť povrchovej vrstvy pri nitridovaní nie je teda spojená s tvorením martenzitu. Preto sa nitridované súčiastky nikdy nekalia. Pri nitridovaní vzniká na povrchu tenká súvislá vrstvička hexagonálneho nitridu, ktorá je menej tvrdá a húževnatá. Je však pomerne odolná proti korózii a má dobré trecie vlastnosti. Niekedy sa zvykne táto vrstvička na súčiastkách obrusovať napríklad pre dosiahnutie najvyššej medze únavy. Pre nitridovanie v plyne slúžia plynotesné zvonové, šachtové alebo komorové pece.

Spoľahlivosť nitridovania v soľnom kúpeli sa dá významne zlepšiť núteným prevzdušňovaním taveniny, ktorá urýchľuje oxidáciu kyanidov a zaisťuje neustále dostatočný potenciál dusíka. Tento postup sa obvykle používa pri mäkkom nitridovaní pri 570 až 580 °C. Dosiahnutie húževnatej vrstvy si však vyžaduje použitie titanový kelímok. Soľné kúpele sú ekonomické len pri krátkodobom nitridovaní. Navyše sú veľmi prudko jedovaté a vyžadujú si zložité bezpečnostné opatrenia. Taktiež veľmi náročná je aj neutralizácia odpadu. Čas nitridovania v soľnom kúpeli je podstatne kratší ako v plyne a to v rozmedzí od 0,5 až 4 hodín pričom nitridovanie v plyne trvá zvyčajne 12 až 60 hodín. S narastaním teploty sa rýchlosť nitridovania zvyšuje (Pluhař, 1981).

Podľa Martinca a Šimkoviča (1997) sa nitridujú spravidla zliatinové ocele, ktoré obsahujú hliník, chróm a vanád. Vplyvom pomerne nízkej nitridačnej teploty sú deformácie súčiastok prakticky zanedbateľné. Podstatou veľmi vysokej povrchovej tvrdosti je vznik veľmi tvrdých kovových zlúčenín dusíka so železom – nitridov železa a prípadne s ďalšími prísadovými prvkami. V priebehu nitridácie treba nitridačnú atmosféru obnovovať trvalým prívodom čpavku. Časti povrchu, ktoré nemajú byť nitridované sa pokrývajú povlakom medi, niklu alebo rôznymi nátermi. Nitridujú sa konštrukčné ocele so stredným obsahom uhlíka (0,3 až 0,4 % C) a na dosiahnutie optimálnych vlastností jadra sa nitridované súčiastky pred nitridáciou zošľachtujú. Popúšťacia teplota pri zošľachtovaní býva vyššia ako teplota nitridačná. Po znitridovaní sa súčiastky už len brúšia.

Základné technologické parametre a výsledky nitridovania možno zhrnúť nasledovne:

- teplota nitridácie je 500 až 600 °C
- čas nitridácie je v rozmedzí 12 až 600 h
- hrúbka nitridačnej vrstvy dosahuje 0,05 až 0,5 mm
- tvrdosť nitridačnej vrstvy je v rozmedzí 1000 až 1200 HV
- typické nitridačné ocele sú ocele 14 340, 15 230, 15 330, 15 340



Obr. 3 Priemerná rýchlosť rastu nitridovanej vrstvy

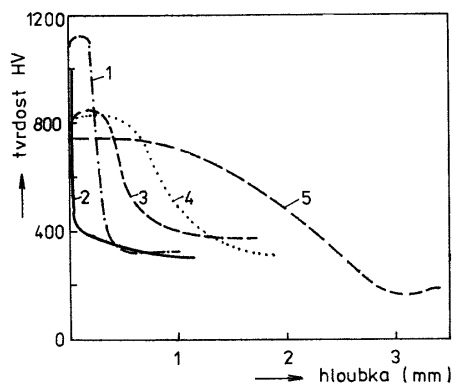
Zdroj: Martinec, Šimkovič, 1997

1.4 Ostatné spôsoby chemicko-tepelného spracovania

Nitrocementovanie a karbonitridovanie – pre obidva tieto postupy je charakteristické sýtenie povrchu súčasne uhlíkom aj dusíkom. Tieto postupy chemicko-tepelného spracovania sa uplatňujú na oceľových súčiastkach s 0,25 až 0,4 % C a uskutočňujú sa buď v plynnom prostredí – v zmesi uhl'ovodíkov a čpavku alebo v kvapalnom prostredí – v sol'ných kúpeľoch s prísadou kyanidov. Základné odlišnosti medzi nitrocementáciou a karbonitridáciou sú uvedené v nasledujúcej tabuľke:

Charakteristika	Nitrocementovanie (kyanidovanie)	Karbonitridovanie
Teplota	820 až 840 °C	600 až 630 °C
Prevažujúci vplyv prvku	uhlík	dusík
Tepelné spracovanie	kalenie a popustenie	bez tepelného spracovania
Hrúbka vrstvy	0,3 až 0,4 mm	asi 0,05 mm
Tvrdosť vrstvy	700 až 800 HV	Do 1 000 HV
Štruktúra vrstvy	martenzit, zv. austenit, karbonitridy	karbonitridy

(Martinec, Šimkovič, 1997)



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

Zdroj: Smóling, 1988

Sulfonitridovanie – odolnosť voči opotrebeniu nezávisí len na povrchovej tvrdosti, ale tiež od klzných vlastností povrchov. Tie je možné zlepšiť nasýtením povrchu ocelí sírou, čo sa dosahuje pri teplote 550 až 600 °C buď v soľnom kúpeli alebo v atmosfére zo zmesi čpavku so sírovodíkom alebo sírouhlíkom. V priebehu 0,5 až 4 hodín sa vytvorí tučná vrstva až niekoľko stotín mm ktorá je obohatená nielen sírou, ale tiež uhlíkom, dusíkom a kyslíkom. Vrstva má výborné trecie vlastnosti a veľmi dobre sa osvedčuje i pri zlom mazaní (Pluhař, 1981).

Difúzne hliníkovanie – je to proces povrchového nasycovania ocelí hliníkom, ktorým sa zväčšuje žiaruvzdornosť ocelí a korózna odolnosť. Podľa spôsobu prevedenia sú difúzne vrstvy vytvorené dvoma spôsobmi. Prvý spôsob je alitovaním to znamená difúziou v prášku feroaluminiumu s prídavkom chloridu amonného, ktorý urýchľuje prenášanie Al na oceľ. Druhý spôsob difúzneho hliníkovania je tzv. alümetovanie ktoré spočíva v ohreve hliníkom nametalizovaného predmetu na teplotu 900 – 1000 °C po dobu niekoľkých hodín, aby hliník difundoval do základného materiálu. Oxidácii hliníka pri týchto teplotách sa zabraňuje niekoľkonásobným náterom z vodného skla.

Difúzne kremíkovanie – je podobné alitovaniu alebo inchrómovaniu. Získa sa ním povlak, ktorý odoláva korózii kyselinami. Vrstva na povrchu je vždy tvorená zliatinou železa a kremíka. Najrozšírenejší je spôsob kremíkovania v prášku s urýchľovačom. Kremíkovanie sa robí pri teplotách 900 – 1100 °C. Kremíkované predmety majú veľmi dobrú odolnosť proti korózii v kyselinách dusičnej, sírovej, soľnej za normálnej teploty. Z hľadiska pevnosti nemajú veľký význam, sú však vhodné ako vrstvy odolné proti opotrebeniu (Tolnai, 2000).

Difúzne chrómovanie – ide o nasycovanie povrchu ocelí chrómom za účelom zvýšenia žiaruvzdornosti a korozivzdornosti povrchu nízkouhlíkových ocelí. V posledných rokoch sa robí difúzne chrómovanie aj u austenitických ocelí s cieľom zvýšiť ich žiaruvzdornosť a odolnosť proti korózii. Difúzne chrómovanie sa robí pri teplotách 900 až 1200 °C a trvá 6 až 12 hodín. Difúzne chrómovanie sa robí v práškových zmesiach ferochrómu, alebo kovového chrómu, kaolínu alebo inej keramickej zložky zabraňujúcej spečeniu zmesi (Zábavník, Buršák, 2004).

2. Skúšky tvrdosti

2.1 Definícia tvrdosti materiálu, meranie tvrdosti materiálu, rozdelenie skúšok

Tvrdosť je definovaná ako odpor materiálu voči vnikaniu cudzieho telesa. Určujeme ju tak, že teleso vhodného tvaru (guľôčka, kužeľ, ihlan, diamant) zatlačáme do skúšobného materiálu. Tvrdosť posudzujeme z veľkosti deformácie jeho povrchu. Meranie tvrdosti je veľmi rozšírenou laboratórnou skúškou. Má oproti ostatným skúškam niektoré výhody, ako napríklad rýchlosť a jednoduchosť prevedenia, možnosť skúšať i hotové súčasti bez ich znehodnotenia a podobne. Z tvrdosti často vyplývajú aj iné vlastnosti materiálov ako napríklad ich pevnosť v ťahu, obrobiteľnosť a podobne.

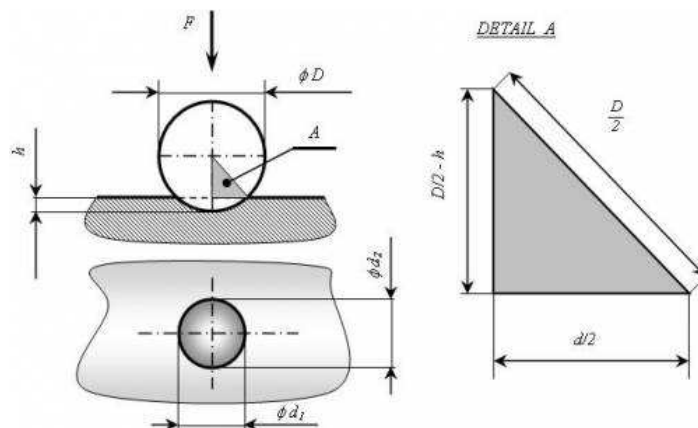
Metód pre zisťovanie tvrdosti je veľa. Najčastejšie ich delíme na vrypové, vnikacie a odrazové. Podľa toho aký tlak je vyvodzovaný, môžeme ich tiež deliť na statické a dynamické. Pri skúške tvrdosti sa väčšinou vytvára v skúšobnom telese odtlačok o veľkosti niekoľko desiatín milimetra až niekoľko milimetrov. Potom hovoríme o makrotvrdomi. Často nás však zaujíma tvrdosť jednotlivých štruktúrnych zložiek alebo veľmi malých objemov materiálu. V tom prípade ide o mikrotvrdosť.

Statické vrypové skúšky tvrdosti majú už len malý význam. Sú obdobou metódy prevzatej z mineralógie, kde pre posudzovanie tvrdosti slúži tzv. Mohsova stupnica tvrdosti. Pre kovové materiály sa používa k vytvoreniu vrypu kužeľa s diamantovým hrotom o vrcholovom uhle 90 °C. Ide o tzv. Martensovu skúšku tvrdosti (Pluhař, 1981).

Veľmi často v praxi sa tvrdosť materiálu považuje za rozhodujúcu vlastnosť z hľadiska jeho použitia. Vysoká tvrdosť sa vyžaduje najmä u nástrojov pre trieskové obrábanie, pre tvárniace a meracie nástroje. Tvrdosť materiálu úzko súvisí s odolnosťou proti opotrebeniu, preto vysoká tvrdosť napr. zubov ozubených kôl, hriadeľov, čapov a iných súčastí spravidla zabezpečuje ich dlhodobú životnosť. Tvrdosť ako mechanickú vlastnosť nie je možné definovať ako základnú fyzikálnu veličinu, pretože jej hodnota závisí od komplexných vlastností povrchu skúšaného materiálu a od skúšobných podmienok, pri ktorých tvrdosť zisťujeme (Zábavník, Buršák, 2009).

2.2 Skúška tvrdosti podľa Brinella

Na Slovensku sa Brinellova skúška tvrdosti vykonáva podľa národnej normy STN EN ISO 6506-1. Princíp skúšky je založený na vtláčaní guľôčky z tvrdokovu s priemerom D do povrchu skúšaného materiálu skúšobnou zaťažujúcou silou F . Brinellova tvrdosť je definovaná ako podiel zaťažujúcej sily F k povrchu vtláčku S a označuje sa HBW. Voľba priemeru guľôčky – indentora a veľkosti zaťažujúcej sily závisí od druhu skúšaného materiálu.



Obr. 5 Princíp merania Brinellovej tvrdosti na výpočet povrchu vtláčku S

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

Stanovenie tvrdosti podľa Brinella:

$$HBW = K \frac{F}{S} = 0,102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

kde:

K - konštanta

D - priemer guľôčky – indentora,

d - aritmetický priemer vtláčku $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

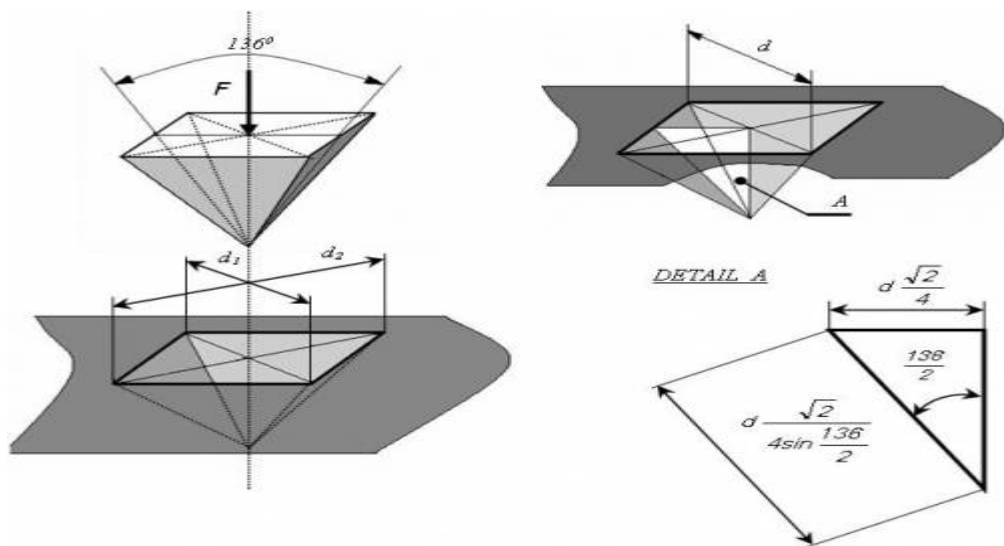
Symbol HBW sa uvádza za hodnotou tvrdosti a je doplnený indexom, ktorý určuje podmienky skúšky v nasledujúcom poradí:

1. priemer guľôčky z tvrdokovu – indentora D [mm],
2. index skúšobného zaťaženia,
3. čas pôsobenia skúšobného zaťaženia v sekundách, ak je iný ako čas od 10 do 15 s (Iždinská, 2006).

2.3 Skúška tvrdosti podľa Vickersa

Vickersova metóda má ako vnikajúce teliesko štvorboký ihlan o vrcholovom uhle 136° . Pri tomto tvare sú vtláčky geometricky podobné i pri zmene zaťažujúcej sily v širokom rozsahu, takže zaťaženie sa dá voliť prakticky ľubovoľne. Dĺžku d uhlopriečky vtláčku meriame v dvoch kolmých smeroch a pre strednú hodnotu odčítame z tabuliek tvrdosť. Obvyklé zaťaženia sú od 1 kp do 100 kp. Inak volíme prednostne radu 1, 3, 5, 10, 30, 50 a 100. Za normálne zaťaženie sa predpokladá 30 kp a tvrdosť označujeme HV. Iné zaťaženie je potrebné uviesť v označení.

Doba zaťaženia sa volí podľa tvrdosti skúšaného materiálu. Vickersova metóda je jednou z najpresnejších metód merania tvrdosti materiálov. Vyžaduje však, vzhľadom k malým rozmerom vtláčkov, starostlivú úpravu povrchu materiálu. Pri malom zvolenom zaťažení sa volí je najlepšie voliť brúsenie (Pluhař, 1981).



Obr. 6 Princíp merania tvrdosti podľa Vickersa na výpočet povrchu vtláčku S

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

Keď je zaťažujúca sila vyjadrená v N a uhlopriečka v mm, pre výpočet platí vzťah:

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2}$$

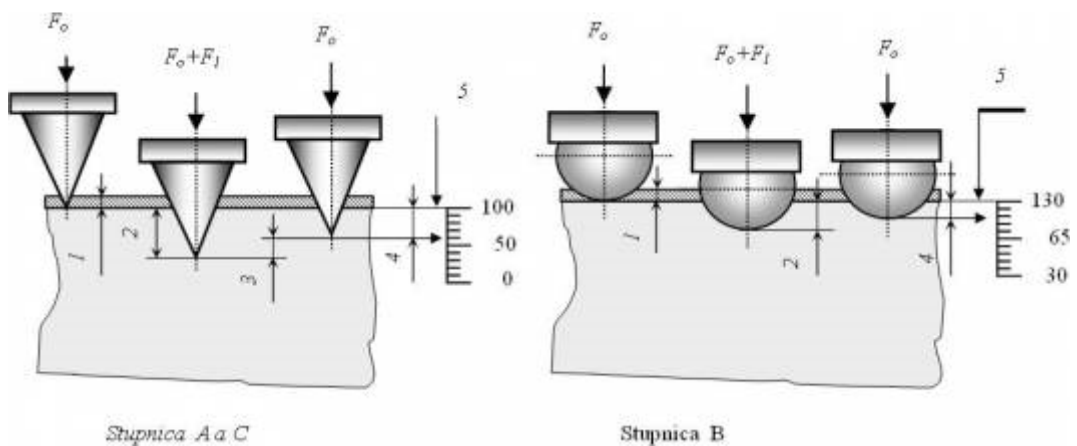
F – zaťažujúca sila, d – uhlopriečka (Zábavník, Buršák, 2009).

2.4 Skúška tvrdosti podľa Rockwella

Táto skúška tvrdosti sa od predchádzajúcich odlišuje tým, že merítkom tvrdosti je trvalá hĺbka vtlaku. Všetky Rockwellove skúšky majú tri fázy:

- 1) celkové zaťaženie silou $F_0 = 100 \text{ N}$, identor vnikne do hĺbky h_1
- 2) celkové zaťaženie silou F_c , ktorá sa líši u jednotlivých metód,
- 3) odľahčenie na predbežné zaťaženie F_0 (identor je v hĺbke $h_3 + h_1$)

Pre stanovenie tvrdosti je rozhodujúca hĺbka h_3 . Výhodou je priame odčítanie tvrdosti na stupnici hĺbkomerom. V praxi je najviac rozšírená metóda C a to hlavne v kaliarňach (Skočovský, Vaško, 2004)



Obr. 7 Princíp merania tvrdosti podľa Rockwella

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

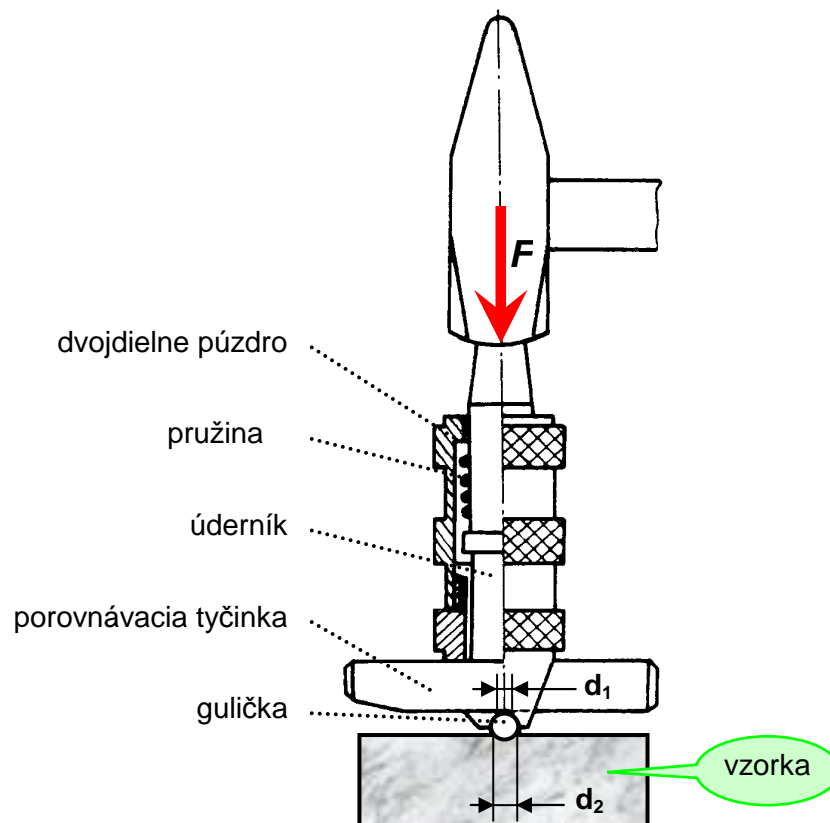
Vzorky a skúšobné telesá musia mať hladký a rovný povrch, ktorý musí byť odmastený. Ak má povrch vzorky tvar valca, pripočítavame k hodnote tvrdosti korekčné hodnoty uvedené v norme STN EN ISO 6508 – 1.

Rockwellova metóda je rýchla a jednoduchá. Uplatňuje sa hlavne pri kontrole tvrdosti po kalení a pri kontrole hrúbky spevnených povrchových vrstiev po chemicko – tepelnom spracovaní (Martinec, Šimkovič, 1997).

2.5 Skúška tvrdosti Komparačnou metódou

Táto metóda pomocou „Poldi“ kladivka patrí do skupiny dynamických skúšok tvrdosti. Toto kladivko pracuje porovnávacou metódou. Kladivko s porovnávacou tyčkou známej pevnosti postavíme na skúšobný predmet, ktorý je na podložke o dostatočne veľkej hmotnosti. Úderom kladiva na úderník vznikne vtláčok v skúšanom predmete i v porovnávacej tyčke. Po zmeraní oboch vtláčkov sa dá z tabuliek určiť tvrdosť, poprípade pevnosť skúšaného materiálu. Hodnoty tvrdosti pre jednotlivé materiály sú rôzne (Pluhař, 1981).

Poldi kladivko je mechanický tvrdomer určený pre orientačné meranie tvrdosti kovových materiálov. Jedná sa o kovový výrobok hute „Poldi“ Kladno, ktorým sa meria tvrdosť kovov a materiálov. Tvrdosť meraná pomocou Poldi kladivka sa označuje symbolom HB „Poldi“ za hodnotu tvrdosti (Bidwell, 1988).



Obr. 8 Poldi kladivko

Zdroj: <http://www.ime.fme.vutbr.cz>

2.6 Skúšky mikrotvrdosti

Mikrotvrdosť sa používa na meranie veľmi malých predmetov a tenkých vrstiev. Sú to napríklad vrstvy po chemicko – tepelnom spracovaní, povrchových úpravách a podobne. Taktiež sa používa meranie mikrotvrdosti aj v metalografii na identifikáciu jednotlivých štruktúrnych zložiek. Princíp merania je zhodný s Vickersovou metódou tvrdosti, ale s oveľa menším zaťažením, a postup je zahrnutý v STN ISO 6507/3. Úprava povrchu na meranie mikrotvrdosti vyžaduje mimoriadnu starostlivosť. Mechanickým leštením sa vyvolá deformačné spevnenie povrchovej vrstvičky kovu, čo značne ovplyvňuje namerané hodnoty mikrotvrdosti. Vhodnejšie je preto elektrolytické alebo chemické leštenie. Mikrotvrdosť sa obvykle meria na metalografických výbrusoch.

Hodnota mikrotvrdosti závisí od veľkosti použitého zaťaženia, kvality povrchu, presnosti odčítania, rozmeru vtlačku a podobne. Hodnoty mikrotvrdosti nie sú preto porovnateľné s hodnotami makrotvrdosti meraných pri väčšom zaťažení. Pri meraní mikrotvrdosti sa používa zaťaženie od $9,8 \cdot 10^{-3}$ do $49,10^{-1}$ N odstupňované v desiatich stupňoch. Mikrotvrdosť sa zmluvne označuje značkou HVM, doplnenou veľkosťou a časom zaťaženia, rovnakou ako pri Vickersovej mikrotvrdosti. Voľba zaťaženia pri meraní mikrotvrdosti závisí od hrúbky a tvrdosti skúšaného predmetu (Zábavík, Buršák, 2009).

Mikrotvrdomery sú buď súčasťou metalografických mikroskopov alebo sa používajú samostatne. Pracujú prevažne vnikacou metódou s diamantovými hrotmi. Takto pracuje napríklad tzv. Hanemannov mikrotvrdomer. Pri použití Vickersovho diamantového ihlana sa mikrotvrdosť označuje písmenami HM a použitým zaťažením, napr. 560 HM 30 (Martinec, Šimkovič, 1997).

2.7 Porovnanie a použitie metód na meranie tvrdosti

Najpoužívanejšie skúšobné metódy na meranie tvrdosti sú Brinellova, Rockwellova a Vickersova. Každá z nich má svoje opodstatnenie, svoje oblasti použitia, ale aj určité prednosti a nedostatky, ktoré umožňujú či vylučujú jej aplikáciu pri skúšaní konkrétnych materiálov. Pri voľbe jednotlivých metód treba brať do úvahy najmä jednoduchosť metódy, presnosť a citlivosť pri meraní, rýchlosť metódy, náročnosť na prípravu povrchu meraného materiálu, ekonomické hľadisko a oblasti použitia.

Brinellova metóda - je vhodná na skúšanie mäkkých a stredne tvrdých materiálov, ktoré majú heterogénnu štruktúru (kovy s liacou štruktúrou, s textúrou po tvárnení, s hrubozrnnou štruktúrou...). Pri tejto metóde sa skúma pomerne veľký objem kovu, čím sa získavajú hodnoty tvrdosti zodpovedajúce priemerným vlastnostiam jeho štruktúry. Na druhej strane veľké vtlačky môžu znehodnotiť funkčnú plochu skúšaného výrobku. Vtláčacie teliesko je lacné a ľahko nahraditeľné. Skúška nevyžaduje veľmi často upravený povrch.

Rockwellova metóda - sa vyznačuje najmä rýchlosťou a jednoduchosťou. Využíva sa na bežnú a automatickú kontrolu tepelného spracovania výrobkov, najmä v hromadnej výrobe. Rockwellove tvrdomery sú zaradené do výrobných linky a automaticky oddeľujú výrobky s nesprávnou tvrdosťou. Tento princíp merania tvrdosti sa dá dobre využiť aj na automatickú kontrolu hrúbky spevnených povrchových vrstiev, ktoré majú výrobky, napríklad po povrchovom kalení, cementovaní alebo nitrídaní. Z hľadiska opracovania meraného povrchu je táto metóda najmenej náročná. Cena diamantového kužela je väčšia a jeho náhrada po poškodení nákladnejšia ako pri oceľových alebo tvrdokovových guľôčkach.

Vickersova metóda - je najpresnejšia a najcitlivejšia na jemné rozdiely tvrdosti skúšaného materiálu. Používa sa najmä v laboratóriách pri výskumných a vývojových prácach, ako aj na presnejšie práce pri kontrole a preberaní výrobkov a polovýrobkov. Meraný povrch sa musí starostlivo pripraviť, aby sa vtlačok mohol presne odčítať. Skúška nie je vhodná pre materiály s hrubozrnnou a nehomogénnou štruktúrou. Diamantový ihlan musí mať presné rozmery a nesmie byť poškodený. Jeho cena a náhrada sú pomerne nákladné (Zábavník, Buršák, 2009).

3. Boridovanie

3.1 Bór a jeho vlastnosti

Bór je chemický prvok v periodickej tabuľke prvkov, ktorý má značku B a protónové číslo 5. Patrí medzi nekovové prvky a vyskytuje sa v dvoch modifikáciách, ako amorfný a kryštalický. Kryštalický bór je veľmi tvrdý, po uhlíku (diamante) je to druhý najtvrdší prvok periodickej tabuľky. Bór a jeho zlúčeniny intenzívne sfarbujú plameň do zelena. Tento jav sa využíva na prípravu zmesí pre pyrotechnické účely a v analytickej chémii slúži ako dôkaz prítomnosti bóru v analyzovanej vzorke.

Kryštalický bór takmer nereaguje, amorfný je reaktívnejší, pri zvýšenej teplote reaguje s kyslíkom, dusíkom, halogénmi a sírou za vzniku príslušných binárnych zlúčenín. Oxiduje sa aj s kyselinou dusičnou a za tepla aj s koncentrovanou kyselinou sírovou. Tavením s hydroxidmi poskytuje boritany. V prírode sa bór vyskytuje v oxidačnej forme. Do ocele sa bór pridáva vo forme ferobóru kvôli zlepšeniu prekaliteľnosti a taktiež mechanických vlastností materiálu.

Boridy sú zlúčeniny bóru s menej elektronegatívnymi prvkami, najčastejšie s kovmi. V ich štruktúre sa často vyskytujú izolované atómy bóru, prípadne sú reťazcovo pospájané, alebo vytvárajú trojrozmerné skelety B_6 , B_{12} . Väzby v takýchto zlúčeninách sú viaccentrové. Boridy sú veľmi tvrdé, majú vysoké teploty topenia a sú vo všeobecnosti nereaktívne. Niektoré (borid zirkónu ZrB_2 a titánu TiB_2) majú mnohonásobne vyššiu tepelnú a elektrickú vodivosť ako samotné kovy a viaceré sú polovodivé.

Elementárny bór sa používa pri konštrukcii jadrových reaktorov a moderátorových tyčí ako moderátor (spomaľovač) neutrónov. Významné miesto patrí zlúčeninám bóru aj v sklárskom, keramickom a strojárskom priemysle. Tzv. borosilikátové sklá sa vyznačujú vysokou tepelnou odolnosťou. V keramike sa bór používa predovšetkým ako zložka glazúr. Taktiež sa používa ako dopujúci prvok v polovodičoch. Borid rénia, rovnako ako nitrid bóru a karbid bóru sa používajú vďaka ich vysokej tvrdosti v strojárstve ako brúsne látky (karbid bóru). Zlúčeniny bóru sa používajú aj v pyrotechnike vďaka svojmu zelenému sfarbeniu plameňa (Gažo, 2007).

3.3 Prípravky vhodné na boridovanie

Na boridovanie sa veľmi často používajú boridovacie prípravky DUBROID ktoré sa skladajú z karbidu bóru B₄C. Aktívne uhlie ktoré obsahujú tieto prípravky zaisťuje pri boridovacej teplote redukčnú atmosféru, pre možnosť vytvárania bezkyslíkových vrstiev a okrem toho do veľkej miery zabraňuje spekaniu boridovacieho prostriedku. Boridovací účinok prípravku DUBROID je nastavený tak, aby pri obvyklých podmienkach boridovania vznikali jednofázové vrstvy. Rovnako je vďaka výnimočnému zloženiu umožnený jednoduchý prenos. Aby sa mohlo zaisťiť rovnomerné boridovanie, používajú sa v praxi tri boridovacie prípravky s rôznou zrnitosťou. Boridovacia účinnosť týchto prípravkov je v podstate rovnaká.

Prípravok DUBROID1 je veľmi jemnozrnný produkt, ktorý poskytuje optimálnu kvalitu vrstvy. Prevoz je zložitejší, pretože sa prípravok pri boridovaní speká a vytvára bublinky ktoré je po boridovaní potrebné rozbiť. Prípravok je určený pre spracovanie menších obrobkov a nástrojov.

Prípravok DUBROID2 je rovnomerne jednozrnný a je určený zvlášť pre spracovanie komplikovaných nástrojov a obrobkov. Na základe svojho jemného zrnienia má tento prípravok veľmi dobrý kontakt s povrchom obrobku. Prípravok má pri boridovaní sklony k spekaniu a tvoreniu hrudiek. Po ochladení je ale väčšinou možné boridovací prípravok znovu ľahko rozdrviť.

Prípravok DUBROID3 má zmiešanú zrnitosť a aj po spracovaní je sypký. Z tohto dôvodu je prípravok vhodný najmä pre spracovanie väčších a jednoduchých obrobkov a rovnako i pre sériovú výrobu v priebežných peciach. Vďaka sypkosti prípravku je možné prípravok po procese spracovania opäť z krabice vytriasť. Sypkosť sa zachováva aj pri vyšších teplotách a pri ďalších dobách spracovania. Prípravky DUBROID 2 a DUBROID3 sú pri bežnej dobe boridovania 3 až 5 hodín viackrát použiteľné. Po každom spracovaní je potrebné pridávať 30 až 40% čerstvého boridovacieho prípravku. Až približne po 20 hodinách a viac sa boridovacia účinnosť úplne stratí a boridovací prípravok treba celý vymeniť.

Pasta DUBROID sa používa pri boridovaní pod ochranným plynom. Bola vyvinutá hlavne pre obmedzenie manuálnej námahy, potrebnej pre používanie prachu alebo granulátu. Pasta je vhodná hlavne pre spracovanie väčších sérií. Pasta je vytvorená na vodnej báze. Boridovanie pomocou tejto pasty môže prebiehať výlučne pod ochranným plynom (Bowden, 1985).

3.4 Boridovanie ocelí

Pre boridované vrstvy je charakteristické ich zubové spojenie so základným materiálom u nelegovaných a stredne legovaných ocelí. Dosiahnuteľná sila boridovanej vrstvy je závislá na teplote, na dobe spracovania a na materiály. Teoreticky sa môžu boridovať všetky železné materiály. Vývoj vrstvy závisí na stupni legovania zvoleného materiálu. Pri konštantných podmienkach spracovania, obvykle s narastajúcim obsahom legúr, klesá miera zubového spojenia a sila boridovanej vrstvy. Oproti tomu sa ale zvyšuje povrchová tvrdosť. Pri voľbe materiálu existujú dve obmedzenia, a to z hľadiska obsahu kremíku, ktorý nesmie byť vyšší ako 1% a obsahu hliníka, ktorý by nemal byť vyšší než 3%.

U takýchto ocelí dochádza k obohacovaniu týchto prvkov pod vytvorenou boridovanou vrstvou, čo vedie k feritizácii. U boridovaných rýchlorezných ocelí nastáva problém s následným kalením, keď austenitizačná teplota leží nad teplotou 900 °C, pri ktorej dochádza k natavovaniu boridovanej vrstvy. Nadifundovaný bór vytvára so železom veľmi tvrdú zlúčeninovú vrstvu, ktorá sa vyznačuje mimoriadne vysokou odolnosťou hlavne voči abrazívnemu opotrebeniu a malým sklonom k nalepovaniu.

Ďalším príkladom moderného boridovania je boridovanie sklárskych trňov z ocelí X210Cr12 pre sklársky priemysel. Tu sa využívajú dobré vlastnosti boridovanej vrstvy. Boridovanie tu predstavuje výraznú úsporu nákladov v porovnaní s predošlou technológiou navarovania satelitu. Veľmi zaujímavá je aj výroba hnacích reťazí kde je veľký záujem o boridovacie technologické postupy ktoré nahrádzajú staršie ako bolo napríklad cementovanie. Reťazové čapy z nelegovaných, prípadne z nízko legovaných ocelí k zušľachtovaniu sú prevažne vystavované abrazívnemu opotrebeniu. S veľkým úspechom sa používajú hlavne u horských bicyklov ale taktiež u štvorkoliek (Gerstenberger, 2010).



Obr. 10 Sklársky trň vyrobený z ocele X210Cr12

Zdroj: <http://www.hef-durferrit.cz>

3.5 Technológia procesu boridovania

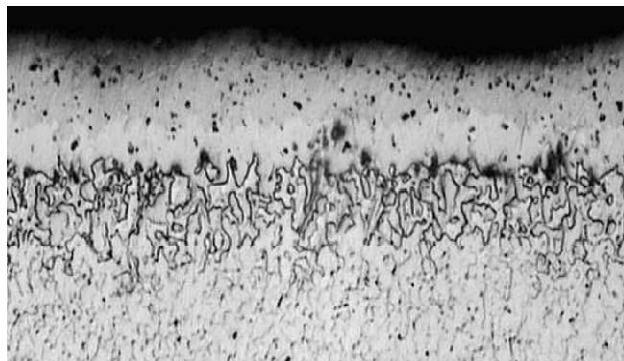
Najviac prepracované je boridovanie v pevných prostriedkoch. Nové vyvinuté práškové boridovacie prostriedky zostávajú i po nasadení sypké a tým sa jasne uľahčuje vyberanie spracovaných obrobkov. Výhodná je i nízka sypná hustota, ktorá vedie k zníženiu spotreby boridovacích prostriedkov a tým k obmedzeniu nákladov na tepelné spracovanie. K realizácii boridovania sa používajú komorové pece alebo trubkové pece, ktoré umožňujú odvod vzniknutých splodín.

Z dôvodu vysokej tvrdosti vytvorenej boridovanej vrstvy sa spravidla boridujú hotové opracované diely. Pre diely citlivé na deformáciu sa odporúča uskutočniť pred posledným mechanickým opracovaním žihanie. K dosiahnutiu optimálnej kvality vrstvy sa majú nasadzovať jemne brúsené povrchy. Teplota spracovania leží v rozmedzí 850 až 1000 °C. Použitá doba boridovania sa stanovuje podľa typu materiálu určeného k spracovaniu a podľa požadovanej hrúbky vrstvy. Hrúbka boridovanej vrstvy závisí od zvoleného materiálu, teploty a doby spracovania a pohybuje sa od 20 do 250 µm.

Po uplynutí požadovanej doby spracovania sa nádoby vyberú z pece a spravidla sa ochladzujú na vzduchu. Na základe vysokej tepelnej zaťažiteľnosti boridovanej vrstvy sa môžu boridované obrobky zušľachtovať. Avšak austenitizačná teplota musí ležať pod 1050 °C, aby sa predišlo natavovaniu.

Boridované obrobky sa vyznačujú nasledujúcimi vlastnosťami:

- vynikajúca ochrana pri abrazívnom opotrebení
- dobrá ochrana proti tribooxidačnému oteru
- malý sklon k nalepovaniu
- veľmi vysoká tepelná odolnosť (Gerstenberger, 2010).



Obr. 11 Mikroštruktúra ocele M 390 boridovanej 1000 °C / 8hod

Zdroj: <http://www.azprokal.cz>

3.6 Difúzne boridovanie

Podľa Píška (1973) je difúzia proces, pri ktorom prúdia častice hmoty na väčšie vzdialenosti v pevnej látke. Hmota sa presúva z miesta, ktoré má vyššiu koncentráciu určitej látky do miesta s nižšou koncentráciou tejto látky. Jedná sa o rozdiel chemického potenciálu určitého prvku v danej sústave, v dôsledku čoho nie je vylúčený prípad znižovania koncentrácie v danom mieste pri súčasnom vzraste koncentrácie tej istej látky v inom mieste toho istého objemu. Difúzny pohyb atómov v kryštálovej mriežke sa uskutočňuje rôznymi mechanizmami, ako sú: výmenný mechanizmus, intersticiálny mechanizmus, vakančný mechanizmus a samodifúzia.

Pri difúznom boridovaní, bór uvoľnený z práškovej zmesi, plynného prostredia alebo najčastejšie z roztavenej soli difunduje pri teplote 900 °C až 1000 °C do povrchu. Tu v pomerne krátkej dobe 2 až 4 hodín vytvára vrstvu boridov o hĺbke 0,15 až 0,35 mm. Uhlík a väčšina legujúcich prvkov v oceli rast boridovanej vrstvy spomaľujú. Ako najvhodnejšie pre difúzne boridovanie sa javia uhlíkové ocele s nízkym a stredným obsahom uhlíka, na ktorých tvrdosť po boridovaní dosahuje mimoriadne hodnoty vzhľadom k cementovaniu.

Za jednu z vážnych príčin, prečo sa difúzne boridovanie doposiaľ v praxi nerozšíri- lo, sa považuje sklon tvrdej sklovitej vrstvy boridov k praskaniu. Boridovanie môže byť výhodne len v prípadoch, keď súčiastka nie je namáhaná dynamicky. Príčinou malej súdržnosti boridovanej vrstvy so základným materiálom je jej textúra, vlastná krehkosť boridov a značné zostatkové napätie. Toto napätie je spôsobené rozdielom merných objemov a súčiniteľov tepelnej rozťažnosti boridovanej vrstvy a jadra súčiastky.

Difúzne boridovanie sa používa v strojárskom priemysle pri boridovaní strojár- skych súčiastok, ložiskových krúžkov, púmp pre naftové čerpadlá, traktorových pásov a podobne. Ako vhodnejší spôsob sa však javí boridovanie pseudozliatin, z ktorých aspoň jedna netvorí s bórom tuhý roztok ani boridy a môže tak prispieť k zvýšeniu tvárnosti vrstvy.

3.7 Elektrolytické boridovanie

Bór v stave zrodu vzniká na povrchu katódy – boridovanej súčasti priamo ako produkt elektrolýzy a nie nepriamo – cestou redukcie B_2O_3 sodíkom. Obsah B_2O_3 v kúpeli vplýva na hrúbku difúznej vrstvy do 60% kladne, ďalšie zvyšovanie obsahu B_2O_3 vplýva záporne, pretože spôsobuje stúpanie viskozity kúpeľa a tým zhoršenie difúznych procesov v kúpeli. Aktívny bór pri elektrolytickom boridovaní vzniká redukciou B_2O_3 sodíkom, vylučujúcim sa v priebehu procesu na katóde, ktorou je spracovaná súčiastka. Pri tavení bóru dochádza k jeho čiastočnej termickej disociácii.

Pri elektrolytickom boridovaní sú súčiastky pripojené na zdroj jednosmerného prúdu o napätí 6 až 24 V ako katódy, anódou je grafitová elektróda ponorená do kúpeľa. Hustota prúdu na povrchu katód má dosahovať 0,20 až 0,24 A.cm⁻². Teplotu kúpeľa pri elektrolytickom boridovaní je treba udržiavať v rozmedzí 900 až 950 °C. Čas nasycovania je obvykle 2 až 4 hodiny a celková hrúbka vrstvy 0,1 až 0,3 mm.

Pri elektrolytickom boridovaní sa boridované súčiastky ohrievajú odporovým teplom a tým sa ich teplota zvyšuje o 20 až 30 °C nad teplotu boridovacieho kúpeľa. Teplota nasycovaného povrchu z uvedeného dôvodu je až o 100 až 150 °C vyššia, ako teplota kúpeľa. Miestne zvýšenie teploty na elektrolyticky boridovanom povrchu nad 1100 °C hrozí natavením boridového eutetika, preto je potrebné dodržiavať teplotu kúpeľa a hustotu prúdu na povrchu katód v predpísanom rozmedzí. U boridovaných vrstiev sa vyhodnocuje celková hrúbka vrstvy a hrúbka vrstvy α fázy.

Žiadané vlastnosti vykazuje len kvalitná boridovaná vrstva, ktorej mikroštruktúru tvoria vzájomne dobre sa prelínajúce stĺpkovité kryštály boridov a ostro zakončených kryštálov α fázy. Čistenie od zvyškov solí a usadenín z kúpeľa je spojené s komplikáciami nie len pre obtiažnosť ich čistenia, ale aj z dôvodov odpraskávania vrstvy po opätovnom ohreve na teplotu austenitizácie za účelom ďalšieho tepelného spracovania. Preto sa odporúča v posledných 5 až 30 minútach v boridovacom procese zmeniť polaritu a tým odstrániť z povrchu boridovaných súčiastok zvyšky solí. Pri tomto spôsobe vzniká určité percento nepodarkov, spôsobené miestnym odpraskávaním boridovanej vrstvy pravdepodobne pri ohreve na teplotu austenitizácie (Zábavník, Buršák, 2004).

3.8 Chyby v boridovaných vrstvách

Na kvalitu boridovanej vrstvy vplýva okrem základných podmienok (teplota a zloženie boridovacieho kúpeľa, doba trvania procesu, hustota prúdu na povrchu katód, chemické zoženie ocele), aj niekoľko premenlivých faktorov. Tieto sa pri aplikácii v prevádzkovom merítku môžu meniť a spôsobiť rozdiely v kvalite difúznej vrstvy u jednotlivých detailov, alebo mieste rozdiely v stavbe mikroštruktúry na tom istom povrchu.

Zvýšená krehkosť vrstvy – boridovaná vrstva vzniknutá na oxidovanom povrchu ocele vykazuje miestne rozdiely v stavbe mikroštruktúry. Mikroštruktúra s obvyklou stĺpkovitou stavbou sa strieda s mikroobjemami, v ktorých boridy nesiahajú až k hranici s CDROM, ale vytvárajú polyedrické zrná v α fáze, takáto stavba mikroštruktúry spôsobuje zvýšenú krehkosť vrstvy.

Náchylnosť ku krehkému porušovaniu vrstvy boridov na styku s α fázou – na oduhličennom povrchu je α fáza boridovanej vrstvy mimoriadne vyvinutá – miestami vytvára súvislú medzivrstvu. Pri určitom vzájomnom pomere hrúbky oduhličenej a boridovanej vrstvy dochádza k zhoršenému prelínaniu tupo zakončených kryštálov α fázy a boridov. Takáto stavba mikroštruktúry zvyšuje náchylnosť ku krehkému porušovaniu vrstvy boridov na styku s α fázou.

Mierny sklon boridovaných detailov vzhľadom k anóde – dochádza k nemu náhodne v prevádzke a môže ho vyvolať vznik oblúku medzi katódou a anódou a tým miestne zvýšenie teploty na boridovanom povrchu a natavenie boridovanej vrstvy aj základného materiálu.

Reťaz čiernych zŕn – nachádza sa na rozhraní α fázy a boridov v boridovanej vrstve niektorých vzoriek chemicko – tepelne spracovaných s čerstvo brúseným i oxidovaným povrchom. Považujú sa za zrná grafitu, vzniknuté v mikroobjemoch, obohatených C a Si ich vzájomnou protichodnou difúziou v priebehu nasycovania povrchu bórom. Sú to mikrodotiny o zvýšenom obsahu uhlíka a kyslíka. Môžu to byť mikropraskliny na rozhraní styku stĺpkovitých kryštálov boridov a α fázy.

Sieť jemných prasklín – vzniká pri tepelnom spracovaní boridovaných detailov na povrchu boridovanej vrstvy, ktorú spôsobujú makroskopické pnutia. Pri nesprávnom kontakte medzi držiakom a detailom dochádza k rozožieraniu povrchu detailu. K miestnemu rozožieraniu povrchu detailov dochádza aj vtedy, ak tieto vyčnievajú z kúpeľa. Vtedy sa celistvosť porušuje v rovine hladiny kúpeľa (Zábavník, Buršák, 2009).

3.9 Materiály vhodné na boridovanie

Po preštudovaní dostupnej literatúry o materiáloch vhodných na boridovanie nás ovplyvnili nasledujúce faktory:

- v strojárstve najčastejšie používané materiály
- chemické zloženie materiálov
- dostupnosť jednotlivých materiálov

Uhlíkové, nízko a stredne legované ocele. sú v prevádzkových podmienkach vystavené rôznym druhom namáhania a opotrebenia. Často pracujú v korózných a agresívnych prostrediach.

Oceľ uhlíková a legovaná je vhodná na boridovanie z nasledovných dôvodov:

- možnosť porovnania hrúbky vrstvy boridov na oboch oceliach v závislosti od ich chemického zloženia
- možnosť sledovania rýchlosti nasycovania oboch ocelí v závislosti od ich chemického zloženia
- možnosť sledovania stavby vrstvy boridov na oboch oceliach s rôznym obsahom legujúcich prvkov

Podľa borovičku (1981) možno boridovať 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 možné nahradiť vysokolegované ocele nízkolegovanými, prípadne len uhlíkovými. Ďalším dôležitým faktorom ktorý uvádza Vorošin (1981) 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. Preto pri výbere ocele pre výrobu konkrétnej súčiastky je potrebné vychádzať z požiadaviek na vlastnosti vrstvy boridov.

Boridovanie sa spravidla zaraďuje ako posledná technologická operácia. Po boridovaní v niektorých prípadoch môžu byť zaradené operácie tepelného spracovania zamerané na úpravu vlastnosti povrchovej zóny alebo jadra súčiastky. Podľa Zábavníka (1977) tvrdosť boridov nie je závislá od tepelného spracovania ocele, avšak je závislá od chemického zloženia materiálu.

4. Cieľ práce

Pri výrobe a prevádzke strojných zariadení sa veľký dôraz kladie okrem kvality aj na bezporuchovú prevádzku. Tú môžeme dosiahnuť hlavne zvyšovaním životnosti danej súčiastky alebo zariadenia. Preto sa pri výrobe súčiastok kladie veľký dôraz na výber vhodných materiálov a technológií ktorých mechanické vlastnosti majú čo najlepšie vlastnosti. Hlavne výber vhodnej technológie a kvalitného materiálu na výrobu najviac vplýva na životnosť a bezporuchovosť výrobku.

Cieľom mojej bakalárskej práce bolo načrtnúť možnosti ovplyvnenia jednej z mechanických vlastností materiálov – tvrdosť povrchových vrstiev vybraných materiálov. Ako difúzne prostredie po pretavení bol použitý tetraboritan sodný (bórax) a karbid bóru, pričom wolfrámová elektróda bola chladená argónom. Vplyv difúzie sa sledoval na dvoch skúšobných vzorkách ocelí 12 050 a 15 230.

Na základe teoretických poznatkov sa buď odporučí alebo neodporučí použitie vybraných prvkov na zvýšenie tvrdosti povrchových vrstiev daných materiálov pri pretavení netaviacou sa elektródou (metóda WIG) s ochrannou atmosférou argónu.

5. Metodika práce

5.1 Charakteristika použitého materiálu

Pre experimentálnu časť kde sme merali tvrdosť vybraných ocelí sme použili ocele tried 12 a 15. Konkrétne sme použili vzorky ocelí 12 050 a 15 230. Výber materiálov bol uskutočnený na základe znalostí ich chemickej štruktúry. Tieto ocele majú v porovnaní s ocelami triedy 10 a 11 nižší obsah fosforu a síry a majú obsah uhlíka od 0,06 do 0,9%. Ide o nelegované ocele ktoré sú jedny z najviac používaných.

Oceľ STN 12 050 je vhodná k zušľachtovaniu a k povrchovému kaleniu pre veľké výkovky. Má veľmi obtiažnu zvariteľnosť. Pri výrobe sa z týchto ocelí vyrábajú väčšie ozubené kolesá, čapy, šróby, kľukové hriadele čerpadiel, lisy parných strojov, vŕtacie tyče, frézovacie trne a podobne.

Chemické zloženie ocele triedy 12 050

Značka ocele	C	Mn	Si	Cr	V
12 050	0,42 0,50	0,50 0,80	0,17 0,37	-	-

Oceľ 15 230 je vhodná tiež k zušľachtovaniu a tiež k povrchovému kaleniu. Má veľmi dobrú zvariteľnosť a kaliteľnosť za tepla. Táto oceľ je v žíhanom stave veľmi dobre obrobitelná. Používa sa na veľmi namáhané strojné súčastky s vysokou pevnosťou a pre veľké výkovky. Väčšina ocelí tejto skupiny sa používa na súčastky v tepelných energetických zariadeniach a pri výrobe tlakových nádob vystavených veľmi vysokým teplotám.

Chemické zloženie ocele triedy 15 230

Značka ocele	C	Mn	Si	Cr	V
15 230	0,24 0,30	1,00 1,30	0,17 0,31	0,60 0,90	0,10 0,20

5.2 Charakteristika použitých prístrojov

Na meranie tvrdosti materiálových vzoriek sme použili tvrdomer HPO 250 STN ISO 6506. Ide o zariadenie pre meranie tvrdosti materiálov podľa metód Brinell a Vickers. Merania sa robili podľa Vickersovej metódy zaťažujúcou silou 10 kp čo je 98,1 N. Zariadenie zodpovedá platným normám STN ISO 6506 a STN ISO 6507 a ostatným medzinárodným štandardom pre skúšky tvrdosti.

Technické údaje:

Merací rozsah (N):	Max. 2452,5
Prevedenie stroja:	Liatinový stojan
Meranie diamantom:	Vickersov diamant vrcholový uhol 136°
Max. priemer pracovného stola:	300 mm



Tvrdomer HPO 250 STN ISO 6506

5.3 Charakteristika pracovných postupov

Vzorky, ktoré boli vybrané pre laboratórne skúšky sme si napílili na rozmer 20 mm x 20 mm. Následne sa jednotlivé rezné plochy zarovnali do roviny čelnou frézou na frézovačke FA3U. Materiálové vzorky sme si vopred označili aby nedošlo k ich pomiešaniu.

5.3.1 Mechanické skúšky - meranie tvrdosti

Príprava skúšobných vzoriek na mechanické skúšky začala rozrezaním vzoriek v mieste boridovanej vrstvy. Vzorky sme pílii najprv ručnou pílou avšak v mieste boridovanej vrstvy bolo nutné použiť elektrickú pílu s chladiacou emulziou kvôli vysokej tvrdosti v daných miestach. Povrch vzoriek bol následne zarovnaný brúsením. Bolo nutné vzorky vybrúsiť do roviny. Po dokončení brúsneho procesu bolo nutné jednotlivé vzorky prebrúsiť na brúsnom plátne. Povrchy jednotlivých vzoriek museli mať veľmi lesklý povrch vďaka ktorému sme mohli po nanesení chémie zistiť kde sa presne nachádza boridovaná vrstva.

Tvrdosť bola meraná podľa Vickersa použitím tvrdomeru HPO 250 STN ISO 6506, ktorý sa nachádza v priestoroch Technickej fakulty. Z jednotlivých meraní sa vyhodnocovala tvrdosť v troch oblastiach a to v oblasti základného materiálu, tepelne ovplyvnenej oblasti a v boridovanej vrstve.

Skúšobným telieskom bol diamantový štvorboký ihlan, ktorý bol pri zaťažujúcej sile $F = 10 \text{ kp}$ čo je $98,1 \text{ N}$ vtláčaný do vzoriek. Merania sa robili v dvoch kombináciách na každej vzorke po desať meraní. Najprv sa merala tvrdosť v desiatich rôznych miestach a následne desaťkrát v jednom mieste. Z nameraných hodnôt bol vypočítaný aritmetický priemer.

6. Výsledky práce

Materiál 15 230

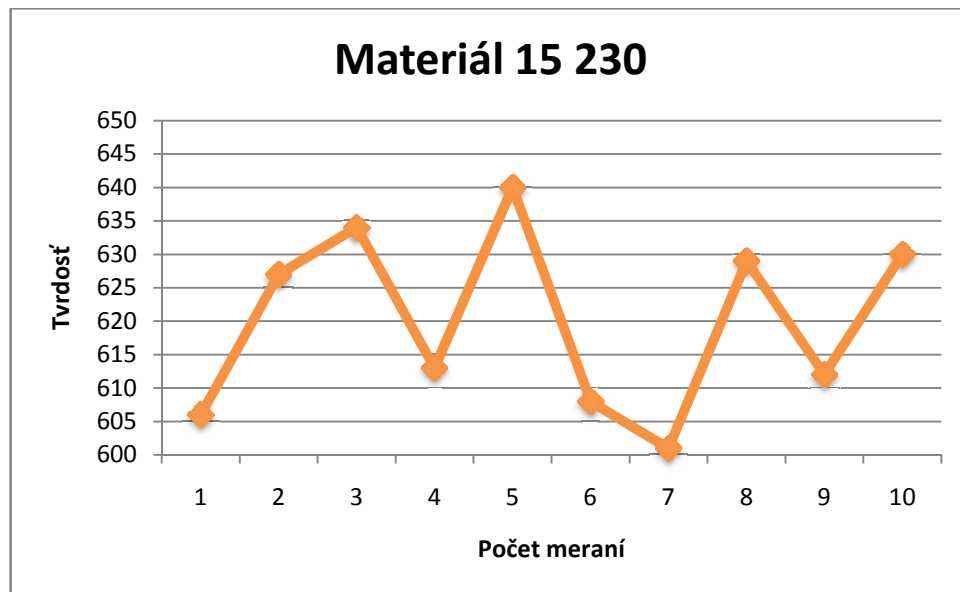
Priemerná hodnota tvrdosti základného materiálu 165 HV 10

Priemerná hodnota tvrdosti materiálu v boridovanej vrstve 620 HV 10

Tabuľka 1 Namerané hodnoty tvrdosti na povrchu skúšaného materiálu

P. č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HV 10	606	627	634	613	640	608	601	629	612	630

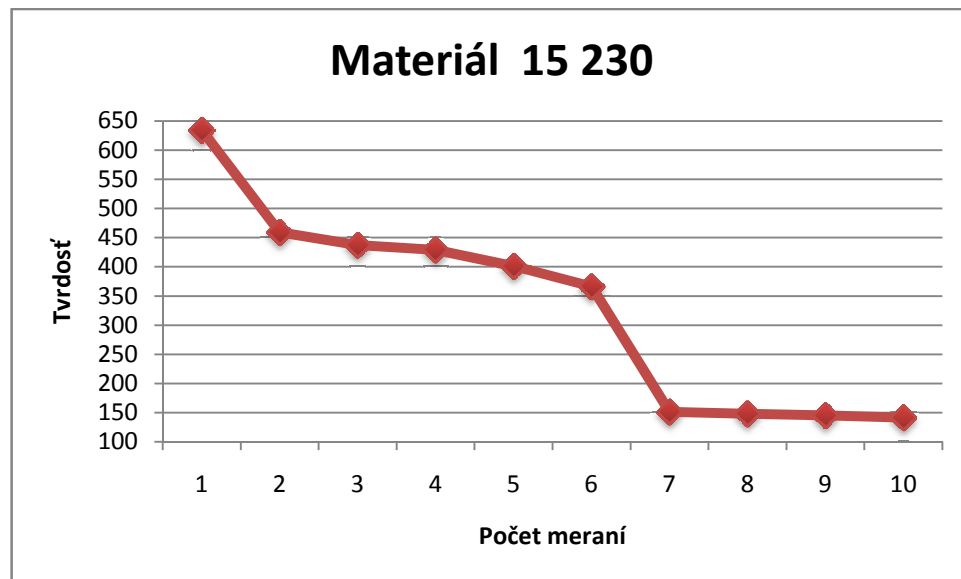
Grafické znázornenie tvrdosti na povrchu skúšaného materiálu



Tabuľka 2 Hodnoty tvrdosti merané do hĺbky skúšaného materiálu

P. č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HV 10	634	459	437	429	401	366	151	148	145	141

Grafické znázornenie tvrdosti v hĺbke skúšaného materiálu



Materiál 12 050

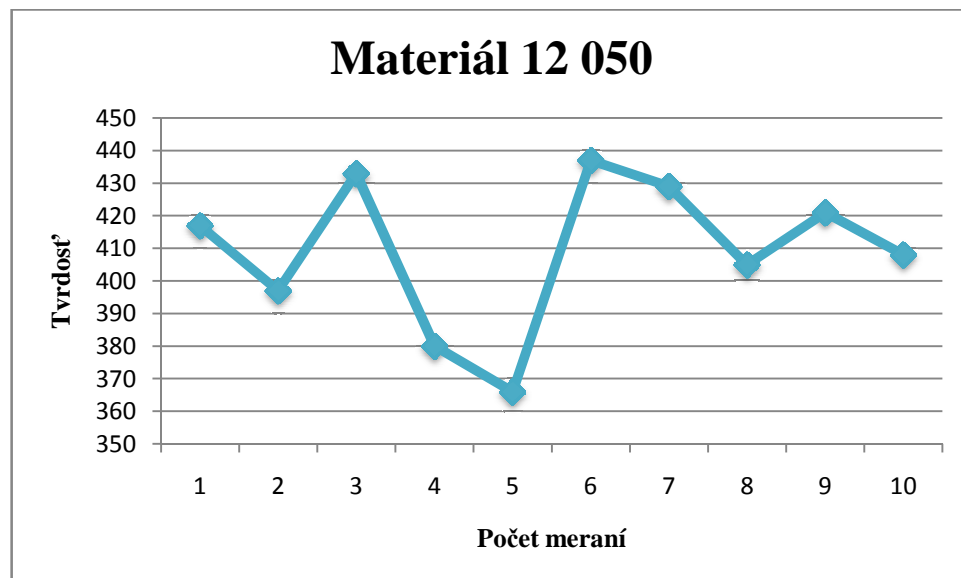
Priemerná hodnota tvrdosti základného materiálu 228 HV 10

Priemerná hodnota tvrdosti materiálu v boridovanej vrstve 409 HV 10

Tabuľka 3 Namerané hodnoty tvrdosti na povrchu skúšaného materiálu

P. č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HV 10	417	397	433	380	366	437	429	405	421	408

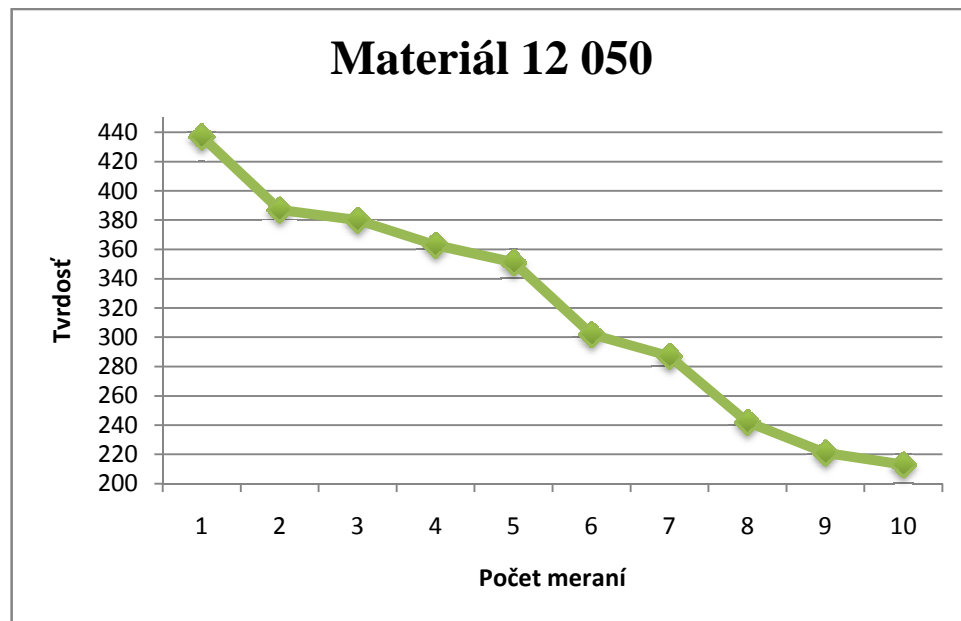
Grafické znázornenie tvrdosti na povrchu skúšaného materiálu



Tabuľka 4 Hodnoty tvrdosti merané do hĺbky skúšaného materiálu

P. č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HV 10	437	387	380	363	351	302	287	242	221	213

Grafické znázornenie tvrdosti v hĺbke skúšaného materiálu



7. Diskusia

Tvrdosť je mechanická vlastnosť materiálu ktorej schopnosť je klásť odpor proti vnikaniu cudzieho telesa. Je to jedna z rozhodujúcich vlastností na základe ktorej vieme určiť kvalitu materiálu alebo strojnej súčiastky. Vysoká tvrdosť vie zaručiť dlhodobú funkčnosť a životnosť všetkých strojných súčiastok. Preto sa v súčasnej dobe čoraz viac kladie dôraz na ovplyvňovanie vlastností povrchových vrstiev materiálov.

V tejto práci sme na povrchové vrstvy dvoch rôznych materiálov naniesli bór a sledovali sme ako ovplyvní ich tvrdosť. Mnoho súčiastok potrebuje mať v určitých najviac namáhaných miestach zvýšenú tvrdosť ktorá výrazne zvyšuje životnosť danej strojnej súčiastky.

V mojej bakalárskej práci sme sledovali ako sa mení tvrdosť vybraných vzoriek materiálov difúznym nasycovaním bóru. Skúšobnými materiálmi boli ocele triedy 12 050 a 15 230. Tieto vzorky boli pretavované technológiou zvárania netaviacou sa elektródou (WIG) v ochrannej atmosfére argónu. Tvrdosť bola meraná Vickersovou metódou.

Priemerná tvrdosť základného materiálu 12 050 bola 228 HV 10. Po pretavení povrchovej vrstvy bolo u materiálu namerané zvýšenie tvrdosti z 213 HV 10 na 437 HV 10. Priemerná hodnota tvrdosti základného materiálu 15 230 bola 165 HV10. Po pretavení povrchovej vrstvy bolo u tohto materiálu zvýšená tvrdosť zo 141 HV 10 na 640 HV 10.

Z výsledkov meraní vyplýva, že vplyv bóru na oboch materiáloch výrazne zvýšil tvrdosti povrchových vrstiev daných materiálov. Z výsledných nameraných hodnôt môžeme hodnotiť, že pre difúzne nasycovanie bórom sú vhodnejšie ocele triedy 15 230 ako ocele triedy 12 050, avšak oceľ triedy 12 050 má dostačujúce zlepšenie z hľadiska zvýšenia tvrdosti daného materiálu.

8. Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo overiť vplyv bóru na zvyšovanie mechanických vlastností – tvrdosti povrchových vrstiev vybraných materiálov. Po pretavení základného materiálu metódou WIG sme merali na skúšobných vzorkách tvrdosť podľa Vickersovej metódy. Základným parametrom pri difúznom nasycovaní bórom je teplota ktorá sa pohybuje v rozmedzí od 900 do 1000°C. Čas pri ktorom táto difúzia prebieha sa pohybuje v rozmedzí 2 až 4 hodín.

Z výsledkov merania je jasné, že vplyv boridovanej vrstvy na základnom materiály výrazne zvyšuje kvalitu skúšaného materiálu. Touto metódou ktorú sme použili v mojej bakalárskej práci sa môže výrazne dosiahnuť úspora drahých materiálov a hlavne zvýšenie kvality a mechanických vlastností povrchových vrstiev súčiastok, čím sa výrazne predĺži životnosť danej strojnej súčiastky vďaka čomu sa znížia náklady na opravy strojných súčiastok a strojov. V porovnaní dvoch skúšaných materiálov ocelí tried 12 050 a 15 230 sme zistili že oceľ 15 230 vykazuje vyššiu nameranú tvrdosť po nanesení boridovanej vrstvy ako oceľ 12 050. Avšak z hľadiska nameranej tvrdosti obidve tieto vzorky vykazujú dostatočne veľkú tvrdosť.

Z nameraných výsledkov môžeme konštatovať, že vplyv boridovanej vrstvy na základnom materiály má pozitívny vplyv pre zvyšovanie tvrdosti povrchových vrstiev skúšaných materiálov.

9. Zoznam použitej literatury

BIDWELL, J. 1988. *Lifter and Lubricants : Tribology Series*. 1. vyd. London: B. v., 1988. 24 s

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.

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

BOWDEN, F. P. – Tabor, D. 1985. *The Friction and Lubrication of Solids, Part 2*. Oxford, Clarendon: B. v., 1985. 35 s.

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

GAŽO, J. 2007. *Všeobecná a anorganická chémia* [online]. Bratislava. [cit. 2010-04-17]. 8 s. Dostupné na internete:

< <http://sk.wikipedia.org/wiki/B%C3%B3r> >

GERSTENBERGER, J. 2010. Vytvarení-tvrдых-a-oteruvzdorných-povrchu-pomoci-boridovaní. In *Trendy/spojovaní 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. *Cementovanie a karbonitridovanie* [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=1088>>

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 : Alumni-press, 2009, 243 s. ISBN 978-80-8096-081-0.
- PÍŠEK, F. 1973. *Náuka o materiálu I*. Praha : Edičné stredisko SVŠT Bratislava, 1973, 595 s.
- 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. – BOKUVKA, O. 2001. *Náuka o materiáli pre odbory strojnícke*. Žilina : Edis, 2001, 379 s. ISBN 80-7100-831-1.
- SKOČOVSKÝ, P. – VAŠKO, A. 2004. *Materiály a technológie*. Žilina : EDIS, 2004. 122 s. ISBN 80-8070-272-2.
- SMÓLING, K. 1988. *Tepelné a chemicko – tepelné spracovanie v príkladoch*. Bratislava : Alfa, 1988, 383 s. ISBN 80-05-00093-6.
- 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.
- VESELÝ, E. 1983. *Strojárska technológia*. Bratislava : Alfa, 1983, 213 s.
- VOROŠIN, L.G. 1981. *Boridovanie promyšlených 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. *Zošľacht'ovanie a kontrola kvality materiálov*. Košice : Emilena, 2004, 281 s. ISBN 80-8073-071-7.
- ZÁBAVNÍK, V. – BURŠÁK, M. 2009. *Materiál, tepelné spracovanie, kontrola kvality*. Košice : Emilena, 2009, 285 s. ISBN 978-80-553-0139-6.