

SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA

V NITRE

TECHNICKÁ FAKULTA

2118114

DIPLOMOVÁ PRÁCA

2010

Juraj Bagin, Bc.

SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA

V NITRE

TECHNICKÁ FAKULTA

**ZVÝŠENIE OTERUVZDORNOSTI POVRCHOVÝCH
VRSTIEV NAUHLIČENÍM**

Diplomová práca

Študijný program:
systémov

Spoľahlivosť a bezpečnosť technických

Študijný odbor:

5.2.57 Kvalita produkcie

Školiace pracovisko:

Katedra kvality a strojárskych technológií

Školiteľ:

Ivan Kováč, Ing.

Nitra 2010

Juraj Bagin, Bc.

Čestné vyhlásenie

Podpísaný Juraj Bagin vyhlasujem, že som záverečnú prácu na tému „Zvýšenie oteruvzdornosti povrchových vrstiev nauhličením“ vypracoval samostatne s použitím uvedenej literatúry.

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

V Nitre 15.apríla 2010

Pod'akovanie

Ďakujem môjmu školiteľovi Ing. Ivanovi Kováčovi za odbornú pomoc a vedenie pri spracovaní predloženej práce.

Abstrakt

V súčasnej modernej dobe plnej strojov a iných vymožeností používaných v každodennom bežnom živote uľahčujúcich nám život sa mnoho ľudí nezapodieva ich dôležitosťou, funkciou a samotným fungovaním až do momentu ich opotrebenia. Opotrebenie je najčastejším javom, ktorý vzniká vzájomným kontaktom pohybujúcich sa dvoch funkčných plôch, trením. Cieľom mojej diplomovej práce je v laboratórnych podmienkach overiť oteruvzdornosť nauhličených povrchových vrstiev cementačnej ocele 12 010, 14 223 a 16 121 na brúsnom plátne podľa platnej normy STN 01 5084. Použité ocele boli vybrané nie len na základe ich fyzikálno – mechanických vlastností, ale i poznania ich chemickej štruktúry a očakávaných vlastností. Prvú časť mojej práce som venoval literárnym poznatkom z danej problematiky. V druhej časti som sa zaoberal laboratórnymi skúškami a vyhodnotením výsledkov. Merania prebiehali na katedre spoľahlivosti strojov. Cementovanie povrchu prebieha v plynnom prostredí pretavovaním povrchu metódou TIG za použitia zváracieho prístroja od firmy REHM – TIGER 210 AC/DC, pričom ako nauhličujúci plyn je použitý propán bután. Skúška prebieha na skúšobnom prístroji s brúsnym plátnom podľa normy STN 01 5084. Proces skúšky spočíva v opotrebovávaní nami vybraných ocelí prostredníctvom brúsneho plátna a následným porovnávaním so vzorkou ocele 12 014, ktorá bola nami vopred zvolená ako etalónová vzorka. Pri všetkých oceliach sa po cementácii povrchu zvýšila odolnosť voči abrazívnemu opotrebeniu. Pre jednoduchšie a prehľadnejšie pochopenie a interpretáciu výsledkov som zvolil grafické zobrazenie. Výsledok danej skúšky môže poslúžiť pri riešení problematiky opotrebenia pracovných nástrojov, strojov a strojných zariadení a poukazuje nato, že riešenie problematiky opotrebenia má svoje opodstatnenie.

Kľúčové slová: tribológia, abrazia, vzorka, trenie.

Abstract

In heutiger moderner Zeit, voll von Maschinen und anderen täglich gebräuchlichen Errungenschaften, die uns das Leben erleichtern, beschäftigen sich nur wenige Menschen mit ihrer Wichtigkeit, Funktion und selbstständigem Funktionieren bis zum Moment ihrem Abnutzen. Das Abnutzen ist die häufigste Erscheinung, die durch Kontakt der sich einander berührenden Funktionsflächen, durch das Reiben, entsteht. Das Ziel meiner Diplomarbeit ist in laboratorischen Bedingungen die Reibungsresistenz der durch den Kohlenstoff beschichtete Oberflächenschichten des Einsatzstahls 12 010, 14 223 und 16 121 auf einem Schleifleinwand laut Norm STN 01 5084 zu prüfen. Der verwendete Stahl wurde nicht nur aufgrund seiner physikalisch – mechanischen Eigenschaften, sondern auch aufgrund Kenntniss seiner chemischen Struktur und erwarteten Eigenschaften ausgewählt. Den ersten Teil meiner Arbeit widmete ich mich der Literaturquellen von der gegebenen Problematik. Im zweiten Teil beschäftigte ich mich mit den Proben im Labor und mit der Bewertung der Resultate. Die Messungen verliefen am Lehrstuhl für Maschinensicherheit. Das Oberflächenaufkohlen verläuft durch das Umschmelzen der Oberfläche mit der TIG-Methode in einer Gasumgebung mit Verwendung von dem Schweißgerät von der Firma REHM – TIGER 210 AC/DC, wobei das mit Kohlenstoff bereicherte Gas – Propan Butan angewendet wird. Die Probe verläuft am Probegerät mit der Schleifleinwand laut der Norm STN 01 5084. Der Probeprozess beruht in der Abnutzung der von uns ausgewählten Stahlmuster durch die Schleifleinwand und in dem folgenden Vergleich mit dem Stahlmuster 12014, das von uns vorher als ein Etanolmuster ausgewählt wurde. Bei allen Stahlmustern wurde nach dem Aufkohlen die abrasive Reibungsresistenz erhöht. Für eine einfachere und übersichtbarere Auffassung und Interpretation haben wir eine grafische Darstellung gewählt. Das Resultat der gegebenen Probe kann bei Lösung der Abnutzung von Arbeitsgeräten, Maschinen und Maschineneinrichtungen behilflich sein und weist darauf an, dass die Lösung der Problematik der Abnutzung ihre Begründung hat.

Schlüsselwörter: Tribologie, Abrasion, Muster, Reiben

Obsah

Obsah	7
Zoznam skratiek a značiek	10
Úvod	12
1 Literárny prehľad o súčasnom stave riešenia problematiky	13
1.1 Tribológia	13
1.1.1 Procesy trenia	13
1.1.2 Procesy opotrebenia	14
1.1.3 Opotrebenie	15
1.1.3.1 Mechanizmy opotrebenia	15
1.1.3.2 Abrazívne opotrebenie	16
1.1.3.3 Odolnosť proti opotrebeniu a jej skúšanie	18
1.2 Difúzia	19
1.2.1 Bodové poruchy	19
1.2.2 Mechanizmy difúzie	20
1.2.3 Difúzia v zliatinách	20
1.2.4 Praktický význam difúzie	21
1.3 Spôsoby tepelno-chemického spracovania ocelí	22
1.3.1 Cementovanie	22
1.3.2 Nitridovanie	23
1.3.2.1 Podstata nitridovania	24
1.3.2.2 Nitridovací proces (normálny)	24
1.3.2.3 Vplyv teploty na priebeh nitridovania	24
1.3.2.4 Nitridovanie v plynnom prostredí	26
1.3.2.5 Nitridovanie v kvapalnom prostredí	26
1.3.2.6 Ostatné spôsoby tepelno-chemického spracovania	27
1.4 Vplyv plynov na štruktúru materiálu	28
1.4.1 Vplyv kyslíka	28
1.4.2 Vplyv dusíka	29
1.4.3 Vplyv argónu	30
1.4.4 Vplyv uhlíka	30
1.4.4.1 Uhlík v zliatinách železa	30

1.5 Zváranie kovov	32
1.5.1 Definícia zvárania	32
1.5.2 Zváranie oblúkom v ochranných atmosférach	32
1.5.3 Charakteristika zvárania TIG	32
1.5.3.1 Teplotný cyklus	34
1.5.3.2 Prednosti zvárania TIG	35
1.5.3.3 Ochranné plyny	35
1.5.3.4 Zapálenie, horenie a ukončenie oblúka TIG	36
1.5.3.5 Základné parametre zvárania TIG	38
1.5.3.6 Veľkosť zváracieho prúdu	38
1.5.3.7 Dĺžka oblúka	39
1.5.3.8 Rýchlosť zvárania	40
1.5.3.9 Doplnkové parametre zvárania TIG	40
1.5.3.10 Netaviaca sa elektróda	41
1.5.3.11 Dýza (hubica)	42
1.5.3.12 Prídavný materiál	42
1.6 Skúšky tvrdosti	43
1.6.1 Tvrdosť	43
1.6.2 Typy skúšok tvrdosti	43
1.6.2.1 Skúška tvrdosti podľa Brinella	44
1.6.2.2 Skúška tvrdosti podľa Vickersa	44
1.6.2.3 Skúška tvrdosti podľa Rockwella	45
1.6.2.4 Skúšanie mikrotvrdosti	46
2 Cieľ práce	47
3 Metodika práce	48
3.1 Charakteristika skúšaných materiálov	48
3.2 Charakteristika technologického zariadenia na pretavenie	50
3.3 Podstata a popis skúšobného zariadenia	51

3.4 Charakteristika skúšobného zariadenia	52
3.5 Výroba a príprava skúšobných vzoriek	53
3.5.1 Príprava vzoriek a pretavenie metódou TIG	53
3.6 Postup skúšky na skúšobnom prístroji	54
3.7 Vyhodnotenie nameraných úbytkov	55
4 Výsledky meraní	56
4.1 Grafické zobrazenia nameraných a vypočítaných hodnôt	59
Diskusia	63
Záver	65
Zoznam použitej literatúry	66
Prílohy	68

Zoznam skratiek a značiek

Značka	Názov	Jednotka
F	сила	N
T	teplota	°C
t	čas	s
v	rychlost'	m.s ⁻¹
d	priemer	mm
Ø	priemer	mm
s	posuv	mm
HV	tvrdost' podľa Vickersa	HV
HR	tvrdost' podľa Rockwella	HR
HBS	tvrdost' podľa Brinella pri použití guľôčky ocelovej	HBS
HBW	tvrdost' podľa Brinella pri použití guľôčky z tvrdokovu	HBW
STN	Slovenská technická norma	–
TIG	Tungsten Inert Gas	–
Ar	Argón	–
Ψ_{abr}	pomerná odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu	–
W_{opV}	priemerný objemový úbytok porovnávacích vzoriek	mm ³

Značka	Názov	Jednotka
W_{osV}	priemerný objemový úbytok skúšaných vzoriek	mm^3
W_{hpV}	priemerný hmotnostný úbytok porovnávacích vzoriek	g
W_{hsV}	priemerný hmotnostný úbytok skúšaných vzoriek	g
ρ_{sv}	merná hmotnosť skúšaných vzoriek	g/cm^3
ρ_{pv}	merná hmotnosť porovnávacích vzoriek	g/cm^3
C	uhlík (carboneum)	
Cr	chróm (chromium)	
Cu	meď (cuprum)	
Mn	mangán (manganum)	
Ni	nikel (niccolum)	
P	fosfor (phosphorus)	
S	síra (sulfur)	
Si	kremík (silicium)	
Ti	titán (titanium)	

Úvod

Opotrebenie funkčných povrchov rozhodujúcich súčastí alebo konštrukčných uzlov strojov a strojných zariadení má vo väčšine prípadov vplyv na životnosť a spoľahlivosť strojov a strojných zariadení. Výrobný proces je zložitý proces, v ktorom sa často stretávame so zložitými mechanickými, fyzikálnymi a chemickými činiteľmi, ktoré negatívne ovplyvňujú daný proces a preto optimálnym výberom materiálov sa snažíme o elimináciu tohto vplyvu.

Proces opotrebenia vedie nie len k postupnému zhoršovaniu technických a ekonomických parametrov a preto sa mu venuje v praxi podstatne menšia pozornosť ako procesom náhleho porušenia súčastí ako sú únavové lomy. Prieskumy však ukazujú, že v 80 % prípadov primárnou príčinou vyradenia strojov a strojných zariadení z prevádzky je opotrebenie. Požiadavky na zvýšenie výkonných charakteristík strojov, strojných zariadení a nástrojov spolu so zvýšením životnosti ako aj spoľahlivosti, kladú na výrobcov zvýšené návrhy na ich bezporuchovosť. Okrem vhodného výberu materiálov je dôležitý aj vhodný výber technológie na úpravu povrchovej vrstvy týchto materiálov, ktorými možno zabezpečiť stabilitu mechanických vlastností povrchov, ale aj niekoľkonásobné ich zvýšenie.

Abrazívne opotrebenie patrí bezpochyby medzi najčastejšie druhy opotrebenia funkčných povrchov. Môžeme teda konštatovať že tribologické skúšky odolnosti materiálov ako je skúška na prístroji s brúsnym plátnom majú svoje opodstatnenie.

V danej diplomovej práci overujem v laboratórnych podmienkach oteruvzdornosť nauhličených povrchových vrstiev cementačných ocelí 12 010, 14 223, 16 121 na brúsnom plátne podľa platnej normy STN 01 5084.

1 Literárny prehľad o súčasnom stave riešenia problematiky

1.1 Tribológia

Tribológia, odvodená z gréckeho slova tribos teda trenie, je oblasť ľudskej činnosti, kde sa stretávajú veda a technika, ktoré sa zaoberajú kontaktujúcimi sa povrchmi počas vzájomného relatívneho pohybu. Táto skutočnosť v konečnom dôsledku znamená, že sa tribológia zaoberá fenomenálnymi javmi, ktoré sú spojené s trením, opotrebovaním a mazaním.

Významnou súčasťou tribológie je tribotechnika. Táto oblasť vznikla za účelom modifikovania trenia a opotrebovania v konštrukčných uzloch, ich výroby, montáže, prevádzky a údržby. Ak dve strojové súčiastky sú v interakcii s relatívne sa pohybujúcim stykovým povrchom, takému uzlu hovoríme tribologický uzol. Tribotechniku je teda možné definovať ako technologické opatrenie, ktoré vedie:

- k zníženiu strát energie v trecích uzloch,
- k zníženiu strát materiálu opotrebením čo vedie k predĺžovaniu technického života trecích uzlov,
- k zvyšovaniu úžitkovej hodnoty strojov rastom ich spoľahlivosti,
- k zníženiu nákladov na údržbu a opravy.

Napriek zvýšenej tribologickej aktivite existuje ešte veľký počet nevyriešených technologických problémov, ktoré predstavujú výzvu pre početom stále malé spoločenstvo tribotechnikov a tribológov (Blaškovič, Balla, Dzimko, 1990).

1.1.1 Procesy trenia

Trenie je prírodným javom, ktorý má charakter procesu a ako také sa viaže na vzájomný relatívny pohyb dvoch dotýkajúcich sa prvkov tribologického systému. V závislosti od hĺbky skúmania trecích procesov sa rozlišuje skúmanie na úrovni makromodelu a mikromodelu. Kým pri vyšetrovaní trenia na úrovni mikromodelu sa vychádza z trenia ako elementárneho procesu, pri makromodeli zohľadňuje celkový funkčný prejav modelu, vyplývajúci zo vzájomného pôsobenia elementárnych procesov.

Trenie je odpor proti relatívnemu pohybu vznikajúci medzi dvoma k sebe pritláčanými telesami v oblasti dotyku ich povrchov v tangenciálnom smere k nim. Táto definícia platí v plnej miere pre vonkajšie trenie, nepostihuje celkom vnútorné trenie a preto sa prejavila nevyhnutnosť novej definície:

Trenie je strata mechanickej energie v priebehu, na začiatku alebo ukončení relatívneho pohybu navzájom sa dotýkajúcich materiálových oblastí. K definícii sa priradujú pojmy: vynaložená mechanická energia, materiálová oblasť a podmienka, že trenie sa vždy spája s pohybom.

Vonkajšie trenie charakterizuje styk dvoch trecích telies, kým vnútorné trenie prebieha v materiálových vrstvách patriacich k rovnakému treciemu telesu (Blaškovič, Balla, Dzimko, 1990).

Vychádzajúc zo základného tribologického systému môžu nastať podľa stavu, v ktorom sa nachádzajú aktívne prvky systému, štyri základné stavy trenia a to:

- trenie tuhých telies,
- kvapalinové,
- plynové,
- plazmatické trenie.

1.1.2 Procesy opotrebenia

Procesy trenia a opotrebenia predstavujú jednotu príčiny a dôsledku a analogicky k treniu aj pri opotrebení prebiehajú elementárne procesy fenomenologického charakteru. Pri ich určení a definovaní závislosti treba vychádzať už z definovaných trecích stavov alebo vo všeobecnosti z agregátových stavov namáhaného objemu materiálovej oblasti, čiže z opotrebenia tuhých telies, kvapalinového, plynového a plazmatického opotrebenia. V súčasnosti sa pojem opotrebenie obmedzuje predovšetkým na tuhé telesá. Pri analýze opotrebenia a trenia tuhých telies treba vychádzať z redukovaného tribologického systému, ktorý má základné trecie teleso, druhé trecie teleso a okolie. Na dosiahnutie reálnych výsledkov treba s veľkou presnosťou kvantifikovať vstupné veličiny, vybrať vhodný model a diferencovať hĺbku vyšetrovania, ktorú môže určovať makroskopický a mikroskopický prístup (Blaškovič, Balla, Dzimko, 1990).

1.1.3 Opotrebenie

Definícia opotrebenia: Opotrebenie, ako proces úbytku materiálu z povrchu jedného alebo oboch kontaktných povrchov tuhých telies prebieha pri všetkých druhoch ich relatívneho pohybu. Patrí k degradačným procesom (Dzimko, 1985).

1.1.3.1 Mechanizmy opotrebenia

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

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 ich relatívnom pohybe. Potom porušenie povrchov je konečnou etapou ich účinkov.

Vo všeobecnosti potom možno povedať, že existujú dva základné mechanizmy opotrebenia:

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

K zmenám spôsobeným deformáciou patria:

1. opakujúce sa pružné deformácie, ktoré v dôsledku heterogénnej štruktúry materiálu spôsobujú pri určitých podmienkach únavové porušenie povrchov pri valivom trení. Opakované pružné deformácie mikronerovností povrchov pri klznom trení menia štruktúru materiálu.

2. plastická deformácia, ktorá mení štruktúru povrchovej vrstvy. Plastická deformácia tuhých telies sa skladá zo štyroch najdôležitejších elementárnych procesov:

- sklzu po kryštalografických rovinách,
- dvojčatenia,
- zmeny pravidelného usporiadania atómov v mriežke a ich tepelný pohyb,
- štruktúrnych porúch,

3. plastická deformácia pri teplote nižšej ako je teplota rekryštalizácie spevňuje povrchovú vrstvu. Napriek tomu pri samotnom povrchu je štruktúra mäkkšia, čo sa prejavuje aj znížením mikrotvrdości. Mikrotvrdosť dosahuje maximum v určitej vzdialenosti od povrchu, a potom sa postupne znižuje až na pôvodnú hodnotu.

4. pri veľkom rozdieloch tvrdosti štruktúrnych zložiek materiálov a viacnásobnom zaťažovaní sa zo začiatku intenzívne opotrebenie mäkká matrice, a tým sa tlak zvyšuje na výstupky tvrdej zložky. Niektoré výstupky sa vtlačajú do mäkkej matrice, niektoré sa rozdrobia a pôsobením tretej sily sa postupne premiestňujú. Pri takomto mechanizme sa povrch obohacuje tvrdými štruktúrnymi zložkami a získava sa „riadkovitá“ štruktúra (Blaškovič, Balla, Dzimko, 1990).

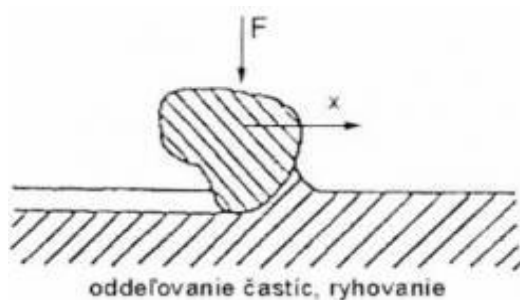
1.1.3.2 Abrazívne opotrebenie

Podstatou abrazívneho opotrebenia je oddeľovanie častíc z funkčného povrchu jedného telesa účinkom tvrdého a drsného povrchu druhého telesa alebo účinkom tvrdých samostatných častíc nachádzajúcich sa medzi oboma povrchmi.

Typickým príkladom procesu abrazívneho opotrebovania je brúsenie kovového predmetu šmirgl'ovým plátnom alebo brúsnym kotúčom.

Ak sa abrazívne opotrebenie uskutočňuje cudzími tvrdými časticami, ktoré sú medzi dvoma funkčnými povrchmi, ide o interakciu troch telies. Takéto možnosti opotrebenia vznikajú všade tam, kde sa medzi funkčné povrchy vystavené sklzovému treniu dostanú nečistoty vo forme tvrdých častíc (Balla, 2001).

Výsledkom abrazívneho opotrebenia sú ryhy na funkčných povrchoch Obr. 1

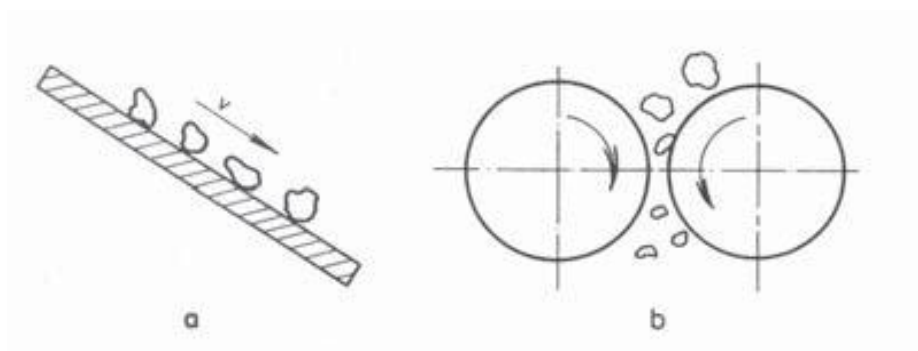


Obr. 1 Schéma abrazívneho opotrebenia (www.matnet.sav.sk)

Podľa (Balla, 2001) veľkosť abrazívneho opotrebenia závisí od mnohých činiteľov, najmä od tvaru, veľkosti a tvrdosti abrazívnych častíc, ale aj od ostatných prevádzkových podmienok (vlhkosť, rýchlosť trenia, teplota a pod.).

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.



Obr. 2 Základné modely abrazívneho opotrebenia (www.strojarstvo.sk)

a - interakcia dvoch telies, b - interakcia troch telies

Abrazívne opotrebenie vzniká najmä v drsných podmienkach strojov na spracovanie rôznych surovín a stavebných materiálov ako sú drviče a mlyny kameňa, uhlia, rudy a pod. Tento druh opotrebenia nastáva aj pri čapoch, ozubeniach, piestnych krúžkoch a vložkách valcov motorov, vodiacich plôch obrábacích strojov a pod. vtedy, ak sa do mastiaceho média dostanú tvrdé častice z okolia.

1.1.3.3 Odolnosť proti opotrebeniu a jej skúšanie

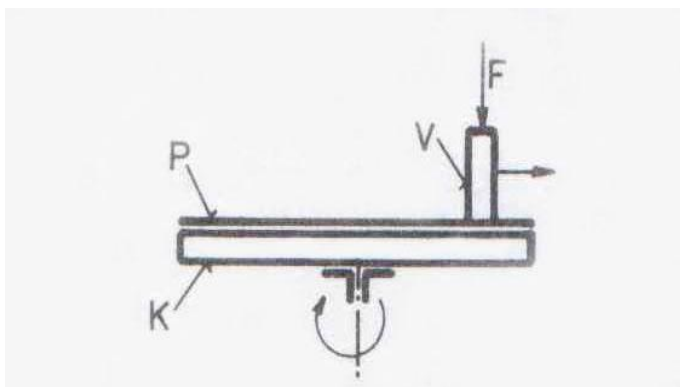
Pri väčšine druhov opotrebení môže nastať medzný stav poškodenia funkčných plôch bez toho, aby bol úbytok hmotnosti alebo rozmeru zmerateľný. To znamená, že tieto hodnoty možno pri skúškach použiť len ako pomerné kritériá. Veľkosť opotrebenia sa zisťuje podľa zmeny veličín meraných na funkčnom povrchu v závislosti od času. Základné priamo merané veličiny, ktorými sa hodnotí opotrebenie, sú špecifikované v tab. 1.

Tab. 1 Veličiny používané na hodnotenie opotrebenia

Opotrebenie	Označenie	Jednotka	Rýchlosť opotrebenia	
			veličina	jednotka
Dĺžkové	W_L	$\mu.m$	$W_{L/t}$	$\mu.m.s^{-1}$
Hmotnostné	W_m	m.g	$W_{m/t}$	$m.g.s^{-1}$
Objemové	W_v	mm^3	$W_{v/t}$	$mm^3.s^{-1}$

Princíp prístroja na skúšky abrazívneho opotrebenia vyjadruje schéma na obr. 3. Kotúč K sa otáča v horizontálnej rovine. Na jeho povrchu je pripevnené brúsne plátno P, ktoré slúži ako abrazív pre vzorku V pritláčanú na plátno silou F.

Na zachovanie rovnakých podmienok počas skúšky sa posúva vzorka V od stredu na okraj, čím sa dosiahne stály styk vzorky s novým brusivom. Veľkosť opotrebenia sa vyhodnocuje meraním veličiny uvedenej v tab. 1 (Veles, 1985).



Obr. 3 Princíp skúšky abrazívneho opotrebenia 1 (Veles, 1985)

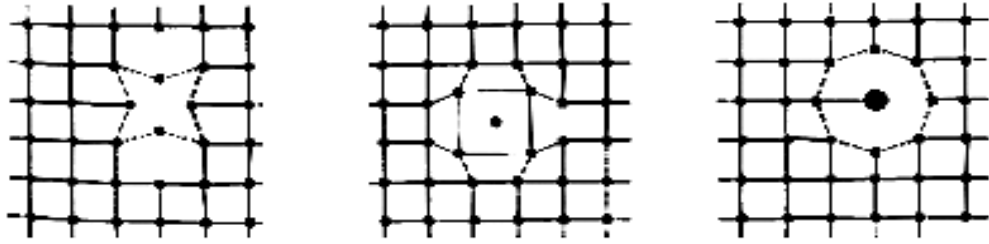
1.2 Difúzia

Ak v ľubovoľnej látke dochádza k premiestňovaniu častíc hmoty na vzdialenosť väčšiu než je priemerná vzdialenosť, hovoríme o difúznom pochode. Hmota ako atómy či ióny sa posúvajú z miesta ktoré má vyššiu koncentráciu tejto látky. Presnejšie sa má uvažovať 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 objektu (Sečkář, 1988).

1.2.1 Bodové poruchy

Štruktúra žiadneho kovu nie je ideálna. I keď neuvažujeme prítomnosť nečistôt (umiestnených v rôznych polohách mriežky), existuje plejáda porúch v pravidelnom usporiadaní atómov. Obyčajne ich delíme na poruchy bodové, čiarové, plošné alebo priestorové. Medzi bodové poruchy patrí vakancia a intersticiálne umiestnené atómy. Vakanciou si len zjednodušene predstavujeme odstránenie jedného atómu z jeho pravidelného miesta v mriežke. Je to zoskupenie atómov v určitej malej ploche alebo objeme, kde počet atómov je o jeden menší než pri pravidelnom a úplnom usporiadaní. Keď sa v rovnakom objeme nachádza o dva atómy menej, vznikajú buď dva voľné alebo jedna dvojité vakancia. Vakancia sa považuje za jednoduchú, ak vzdialenosť medzi dvoma vakanciami je väčší než mriežková konštanta. Pri bodových poruchách nie je vo väčšine prípadoch dôležitá ich presná poloha, ale ich statické rozdelenie.

Bodové poruchy sú charakterizované energiou ich vzniku a pohybu. Predpokladajme že máme dokonalý kryštál a porovnajme ho s rovnakým, ktorý má jednu vakanciu. Rozdiel energie v oboch kryštáloch je teda energia potrebná na vznik vakancie. Ak prebieha zmena za rovnakého tlaku, ide vlastne o entalpiu vzniku vakancie. Podobne si môžeme predstaviť tiež vznik intersticiálneho atómu. Prítomnosť bodových porúch v kovoch i pri veľmi malých koncentráciách môžeme dokázať rôznymi spôsobmi, najčastejšie zmenou fyzikálnych vlastností z rentgénových a kalometrických meraní. Je prirodzené, že bodové poruchy a zmeny ich koncentrácie a konfigurácie ovplyvňujú podmienky difúzie a všetky pochody, ktoré sú difúziou riadené, alebo sú ňou ovplyvnené (Sedláček, Králik, Šejnoha, 1968).



Obr. 4 Typy bodových porúch (Sedláček, Králik, Šejnoha, 1968)

1.2.2 Mechanizmy difúzie

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

Difúzny pohyb teda migrácia atómov v kryštálovej mriežke sa uskutočňuje nasledovne:

- výmenou miest medzi dvoma susednými atómami, alebo súčasnou výmenou miest medzi viac ako dvoma atómami v mriežke.
- pohybom vakancií, čo spočíva v pohybe častíc na miesta vakancií.
- pohybom intersticiálne uloženého atómu, t.j. v preskoku atómu z jednej medziatómovej polohy do niektorej zo susedných medziatómových polôh (Balla, 2003).

1.2.3 Difúzia v zliatinách

Prítomnosť cudzích atómov i v čistých kovoch ovplyvní podmienky difúzie. Z hľadiska prísne fyzikálneho nejde teda ani pri kovoch bežnej čistoty uplatniť zákony samodifúzie, pretože vždy sú prítomné atómy nečistôt v rôznom množstve a preto sa otázky difúzie riešia ako u zliatin s veľmi malou koncentráciou ďalšieho alebo ďalších prvkov.

Vedľa toho je však celá rada problémov, kde ide o skutočné zliatiny s väčším obsahom legujúcich prvkov a často i o zložitejšie sústavy. Otázky difúzie u zliatin boli študované prvé, pretože súvisia s technickou aplikáciou. Prechod na štúdium otázok difúzie pri čistých kovoch bol vedený snahou po zjednodušení problematiky a odvodenia modelu difúzie i základných zákonov. Vypracované a overené modely potom boli späť používané k štúdiu zliatin (Sedláček, Králik, Šejnoha, 1968).

1.2.4 Praktický význam difúzie

Pohyb atómov v tuhých látkach je závislý predovšetkým na výške teploty a koeficiente difúzie. Smer difúzie je určovaný gradientami vyvolanými napríklad miestnymi rozdielmi v chemickom zložení, miestnym nahromadením vakancií alebo rozdielmi v energií kryštálov. Výsledkom je pohyb atómov vyvolávajúci zmeny vlastností materiálu s časom. Toto môže mať veľmi závažné negatívne dôsledky na dlhodobú stabilitu materiálu v prevádzke. Na druhej strane pohyb atómov môžeme výhodne využiť pre zlepšenie vlastností materiálov.

Praktické príklady využitia difúzných javov - 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, 2003).

1.3 Spôsoby tepelno-chemického 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. Z hľadiska mechanických vlastností je častým cieľom chemicko – tepelného spracovania zvýšenie tvrdosti povrchu a zachovanie si húževnatého jadra. Na rozdiel od povrchového kalenia, pri ktorom sa rozdielne vlastnosti povrchu a jadra získajú zmenou štruktúry povrchovej vrstvy tepelným spracovaním pri nezmenenom zložení v celom priereze súčiastky, základom chemicko – tepelného spracovania je zmena chemického zloženia povrchovej vrstvy.

Postupy chemicko – tepelného spracovania môžeme rozčleniť do dvoch skupín. Prvú skupinu tvoria postupy u ktorých sa požadovaný účinok dosiahneme až po tepelnom spracovaní nasýtenej vrstvy, napr. cementovanie. Druhú skupinu tvoria postupy, kde sa požadované vlastnosti dosahujú už v priebehu obohacovania povrchovej vrstvy príslušným prvkom, napr. nitridovanie (Balla, 2003).

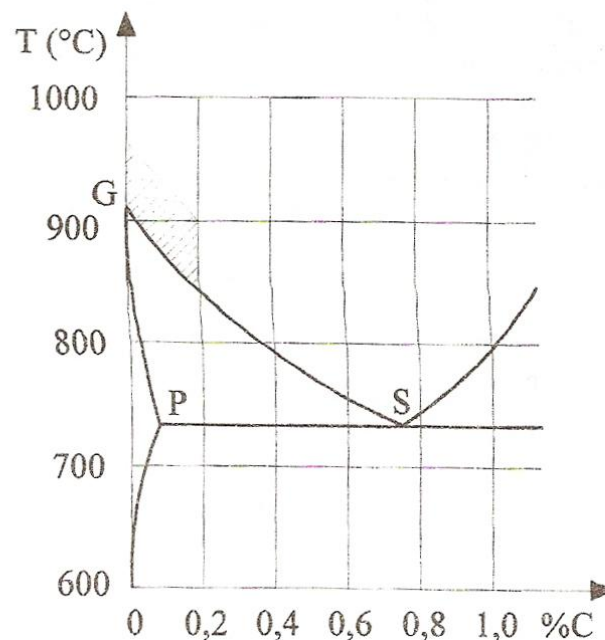
1.3.1 Cementovanie

Je to najpoužívanejší postup chemicko – tepelného spracovania ocelí. Cementovanie je nasycovanie povrchu ocelových súčiastok uhlíkom. Používa sa vtedy, ak sa od súčiastok požaduje vysoká povrchová tvrdosť, pri súčasnom zachovaní húževnatého jadra (čapy, hriadele, ozubené kolesá).

Na cementovanie sú vhodné mäkké ocele s obsahom od 0,1 až 0,4 %C. Povrch súčiastok sa obohacuje na eutektoidnú alebo mierne nadeutektoidnú koncentráciu. Zakalením nacementovanej súčiastky sa získa vo vrstve martenzitická štruktúra vysokej tvrdosti, pričom v jadre dochádza, v závislosti od prekaliteľnosti ocele a veľkosti prierezu, väčšinou iba k čiastočnému zakaleniu, prípadne vznikajúci martenzit má vzhľadom na nízky obsah uhlíka nízku tvrdosť. Jadro súčiastky preto zostane mäkké a húževnaté.

Cementovanie sa robí pri teplotách asi 50°C nad A_{c3} , teda austenitická oblasť. Pre ocele uhlíkové s obsahom 0,4 %C je to asi 850 až 950°C. Hĺbka cementačnej vrstvy býva 0,5 až 2 mm (v závislosti od tvaru, veľkosti a funkčnosti súčiastky). Obsah uhlíku vo vrstve nemá príliš prekročiť eutektoidnú koncentráciu. Je tam totiž nebezpečenstvo, že pri ochladzovaní z cementačnej teploty sa vylúči nadeutektoidný (segregačný) cementit sieťového tvaru po hraniciach austenitických zŕn. Jeho prítomnosť značne zväčšuje krehkosť vrstvy.. Pri cementovaní môže uhlík do ocele difundovať buď z plynnej alebo kvapalnej fázy. Atmosféry pre cementovanie predstavujú zložité zmesi plynov, najmä CO, CO₂, H₂, N₂, H₂O a uhl'ovodíkov.

Cementovanie ako proces môže prebiehať v tuhom, kvapalnom alebo plynnom prostredí (Balla, 2003).



Obr. 5 Schematické zobrazenie cementačných teplôt v diagrame Fe-Fe₃C (Balla, 2003)

1.3.2 Nitridovanie

Nitridovanie je spôsob povrchového vytvrdzovania, pri ktorom sa za tepla nasycuje povrch ocele dusíkom za vzniku nitridov na vysokú pevnosť.

V definícii je spomenutá iba oceľ ale možno nitridovať i zliatiny železa aj neželezné kovy, pričom zdrojom dusíka nemusí byť iba amoniak ale aj iné zlúčeniny dusíka.

Nitridovanie je proces, ktorý môžeme rozdeliť na:

- Nitridovanie v plynnom prostredí,
- Nitridovanie v kvapalnom prostredí,
- Nitridovanie v tuhom prostredí,

1.3.2.1 Podstata nitridovania

Na nitridovanie sa nedá použiť dusík v molekulárnej podobe, lebo vo vztyku so železom aj za zvýšenej teploty je neaktívny a netvorí nitrid. Aby nastalo zlúčenie železa s dusíkom, musíme použiť atomárny dusík, ktorý vzniká prechodne pri reakciách, v ktorých dusík vzniká štiepením. Najjednoduchšou takouto reakciou je rozklad amoniaku: $\text{NH}_3 = \text{N} + 3\text{H}$. Dusík sa zlučuje ihneď so železom na povrchu za vzniku nitridu, ktorý prenáša dusík difúziou ďalej pod povrch. Nitridovanie obvykle prebieha pri teplotách od 500 do 600 °C (Sečkář, 1988).

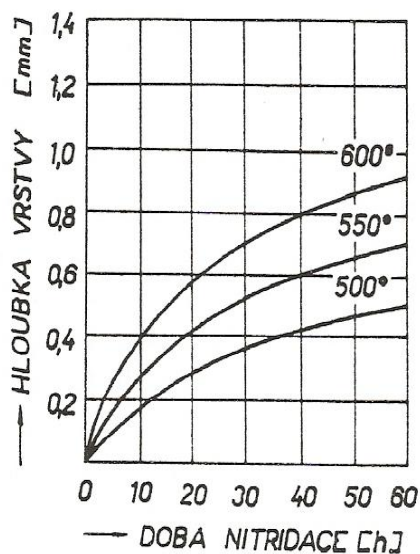
1.3.2.2 Nitridovací proces (normálny)

Na výsledky nitridovania má vplyv zloženie ocele, teplota, čas, predbežné tepelné spracovanie ocele, disociácia amoniaku a tlak. Pri normálnom procese sú podmienky nemenné oproti zvláštnym procesom kde je zložitejšia kombinácia podmienok. Pri normálnom procese sa pracovná teplota pohybuje medzi 480 a 530 °C najčastejšie medzi 480 a 510 °C. používa sa veľmi čistý amoniak bez prísad a dodržiava sa najvhodnejší stupeň disociácie, to je asi 20 až 30 % rozloženého plynu v odchádzajúcom amoniaku po celú dobu procesu. Trvanie procesu sa pohybuje medzi 12 a 96 hod., najčastejšie však len medzi 24 a 72 hod (Sečkář, 1988).

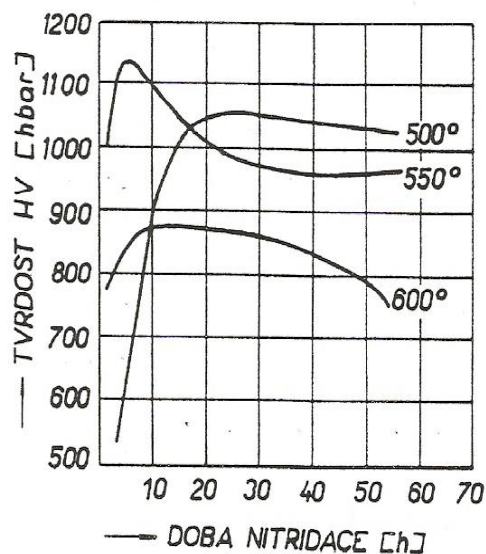
1.3.2.3 Vplyv teploty na priebeh nitridovania

Vplyv teploty na tvrdosť a hrúbku vrstvy možno zhrnúť do týchto dvoch bodov:

1. čím vyššia je nitridovacia teplota, tým hrubšia je vrstva a opačne,
2. čím nižšia je teplota, tým je vrstva tvrdšia a opačne,



Obr. 6 Vplyv nitridácie na hĺbku vrstvy



Obr. 7 Vplyv teploty nitridácie na tvrdosť vrstvy

Pri vyššej teplote za normálnej disociácie amoniaku sa tvorí príliš hrubá vrstvička, ktorá zasahuje ihlicovitými výbežkami do jadra. U niektorých ocelí, zvlášť chrómových, sa pod ňou tvorí aj sieťovina, ktorá je príčinou zvýšenej krehkosti. Vyššia teplota dáva síce hrubšie vrstvy, ale mäkšie a na povrchu mäkšie. Nízka teplota poskytuje vrstvy tvrdšie, ale len pri dostatočne dlhej nitridačnej dobe, aby vznikla čo najvhodnejšie rozmiestnenie nitridov. Preto sú vhodnejšie tenké a tvrdé vrstvy, nižšie teploty a dlhší čas, než krátky čas a vyššia teplota (Sečkář, 1988).

Voľba výšky teploty, na ktorej záleží konečná tvrdosť súčiastky sa riadi podľa ďalšieho použitia hotovej súčiastky. V praktickom použití je možno nitridáciou zvýšiť:

- tvrdosť a odolnosť voči opotrebeniu,
- medzu únavy ocele,
- odolnosť voči koróziám,

1.3.2.4 Nitridovanie v plynnom prostredí

- Uskutočňuje sa v hermetickej pracovnej komore, v ktorej je zabezpečený ohrev, kontrola a regulácia teploty, tlaku a stupňa disociácie amoniaku.
- Proces nitridácie sa skladá z dvoch neoddeliteľných procesov - tepelného procesu a chemického procesu.
- Voľba teploty nitridácie vychádza z požiadaviek na tvrdosť a hrúbku vrstvy (vysoká tvrdosť a malá hrúbka - nižšie teploty).
- Dôležitým ukazovateľom pre nitridáciu v plyne je stupeň disociácie amoniaku. Napr. pre konštrukčné ocele pre teplotu nitridácie $500 \div 520 \text{ }^\circ\text{C}$ je stupeň disociácie $20 \div 40 \%$, pre teploty $520 \div 540 \text{ }^\circ\text{C}$ je $30 \div 50 \%$ a pre $540 \div 560 \text{ }^\circ\text{C}$ sú stupne disociácie 40 až 60 %.
- Nitridovanie v plynnom prostredí je najčastejšie používaný spôsob nitridácie u nás.
- Proces nitridácie zväčša trvá 5 až 15 hod., čo závisí od použitej atmosféry.

1.3.2.5 Nitridovanie v kvapalnom prostredí

Nitridácia v kvapalných prostrediach poskytuje určité výhody oproti iným spôsobom nitridácie:

- vysoká rýchlosť ohrevu, zmenšenie deformácií súčiastok, možnosť regulácie rýchlosti ochladzovania z teploty nitridácie.
- najčastejšie sa uskutočňuje v roztavených soliach - kyanidy a kyanaty.
- ide o prudko jedovaté látky, ktoré sa navyše ešte obtiažne likvidujú a preto sa upúšťa od tohto spôsobu nitridovania.

1.3.2.6 Ostatné spôsoby tepelno-chemického spracovania

Nitrocementovanie

Je sýtenie povrchu uhlíkom a dusíkom súčasne v kyanidových soľných kúpeľoch pri teplotách 750 až 850 °C, alebo v plynnej atmosfére s prísadou čpavku pri teplotách 800 až 880 °C. Čím je teplota uhlíku vyššia, tým bude vyššie nasýtenie uhlíkom a naopak. Potom sa súčasti kalia do oleja, čím sa znižuje pnutie. Po kalení sa súčiastky popúšťajú pri 200 °C.

K výhodám nitrocementovania patrí tiež to, že pri nižších teplotách procesu dochádza k menším deformáciám súčiastok než pri cementovaní. Doba nitrocementovania je 1 – 2 hodiny (Balla, 2003).

Karbonitridovanie

Je nasycovanie povrchu súčiastok dusíkom a uhlíkom pri teplotách 600 až 630 °C. Doba trvania procesu karbonitridovania je 4 hodiny. Ďalšie parametre ako sú tvrdosti a hrúbka vrstvy sú pre hrúbku vrstvy 0,05 mm a tvrdosti až 1000 HV. Pri samotnom procese nám vzniká vrstva karbonitridov, ktorá zvyšuje odolnosť súčiastky proti opotrebeniu, zadretiu ako aj oteru. Zároveň prispieva k zvýšeniu únavovej pevnosti súčiastok (Balla, 2003).

Sulfonitridovanie

Sulfonitridovanie patrí medzi novšie spôsoby chemicko-tepelného spracovania. Je nasycovanie povrchu súčiastok sírou a dusíkom pri teplotách 550 až 600 °C. Proces prebieha v soľnom kúpeli, ktorého zloženie je 95 percent kyanidu sodného a 5 percent sodného. Dostatočne hrubé vrstvy sa dosahujú zhruba za 60 až 180 minút. Uplatňuje sa pri rôznych súčiastkach oceľových, ako sú časti spojok, časti hospodárskych strojov, ďalej súčiastok vyrobených zo šedej liatiny napríklad piestne krúžky, ložiskové puzdra a pod. Sulfonitridovaním sa zlepšuje súčiniteľ trenia asi o 30 % oproti plochám, ktoré neboli takto povrchovo upravené (Balla, 2003).

1.4 Vplyv plynov na štruktúru materiálu

1.4.1 Vplyv kyslíka

Kyslík a prísada dezoxidačných prvkov je počas tavenia alebo dezoxitácie hlavným zdrojom oxidov v oceliach. Oxidy vznikajú počas finálnej dezoxidácie taveniny, alebo môžu tiež vzniknúť ako výsledok interakcie taveniny s výmurovkou panvy. Pri teplote ocele 1530 °C je rozpustnosť kyslíka v tavenine 0,18 % a spolu so vzrastajúcou teplotou taveniny sa podstatne zvyšuje. Naopak s klesajúcou teplotou, počas tuhnutia ocele sa rozpustnosť kyslíka v oceli výrazne znižuje, až pri izbovej teplote je prakticky nulová.

Kyslík sa počas tuhnutia viaže v binárnom systéme na FeO, disperzný globulárny oxid, ktorý sa pri teplote pod 560 °C rozkladá na magnezit Fe₃O₄. Ak sa do ocele pridávajú dezoxidačné prvky, napríklad Mn, Si, Al, Cr, Ti, Zr, rozpustnosť kyslíka v tavenine prudko klesá a z taveniny sa vylučujú oxidy. Oxidy sú väčšinou veľmi tvrdé, nedeformovateľné častice a preto ich aj vo valcovaných oceliach nachádzame ako zhluky častíc.

Oxidy bývajú v tepelne ovplyvnenej oblasti stabilné, čo znamená, že sa nerozpúšťajú ani pri najvyšších teplotách ovplyvnenia. Disperzné oxidy môžu brániť migrácií hraníc zŕn v ohrevovej časti teplotného cyklu a tým brzdiť rast γ zŕn v podhúsenicovej zóne. Oxidy môžu hrať aj úlohu zárodokov pri vylučovaní sa feritu z ausenitu počas premeny $\gamma \rightarrow \alpha$. Ak je však v oxidoch vyšší podiel FeO alebo iných nižšie tavitelných komponentov, môžu sa oxidy čiastočne v podhúsenicovej zóne rozpúšťať. Práve vtedy prispievajú k likvidačnej praskavosti ocele. Veľmi nepríjemné sú tiež tavitelné oxidy, ktoré môžu spôsobovať pórovanie zvarov. Niektoré druhy oxidov majú fóliovú formu. Tieto oxidy môžu v tepelne ovplyvnenej oblasti spôsobovať praskanie tým, že separujú priľahlé časti zrna.

1.4.2 Vplyv dusíka

Dusík podobne ako aj kyslík má vlastnosti podobného charakteru a vo ferite α , v ešte oveľa väčšej miere. Rozpustnosť dusíka vo ferite pri rovnováhe so stabilným nitridom Fe_3O_4 je maximálna pri teplote $590\text{ }^\circ\text{C}$ ($0,1\% \text{ N}$). Pri teplote $200\text{ }^\circ\text{C}$ klesá až na $3 \cdot 10^{-3}\% \text{ N}$.

Pri precipitácii nitridov z presýteného tuhého roztoku dusíka v železe α a rozpadom martenzitu vzniká prechodný martenzit α'' .

Keďže je v oceli prítomný uhlík, môže s ním dusík tvoriť karbonitridy, pri nízkych teplotách hexagonálny $\epsilon\text{Fe}(\text{CN})$ a pri vyšších teplotách ϵFe karbonitridy. Z toho vyplýva, že v základnom materiáli nízkouhlíkovej nelegovanej ocele vzniká rýchle ohriatie ako aj rýchle ochladenie. Pri rýchlom ochladení oblasti teplôt maximálnej rozpustnosti uhlíka a dusíka v železe α sa spája rozpad presýteného tuhého roztoku dusíka alebo uhlíka vo ferite, čo je sprevádzané zmenou mechanických vlastností (znížením vrubovej húževnatosti, zvýšením tvrdosti). Zmena vlastností pomínie pri vyprecipitácii novej fázy z tuhého roztoku. Môžu s ním byť, v systéme $\text{Fe} - \text{C}$ hexafónálny karbid železa, v systéme $\text{Fe} - \text{N}$ tetragonálny alebo hexagonálny karbonitrid, ako je to pri vyšších obsahoch N, ktorý obsahuje určité množstvo uhlíka, ale neprecipituje obe fázy súčasne. Tieto fázy prebiehajú prakticky vo všetkých druhoch tavného zvarovania a spôsobujú ťažkosti pri mechanickom, či inom namáhaní nízkouhlíkových ocelí.

1.4.3 Vplyv argónu

Argón zvyčajne nebýva príliš čistý. Bežne sa používa pre zváranie s čistotou 99,5 %. Z nečistôt prevláda v argóne dusík, ktorý má vlastnosť zvarový kov nitridovať. Dôkazom toho možno uviesť príklad zvarového kovu chemickým zložením: 0,07 % C, 1,45 Mn, 0,83 % Si, 0,024 % S vytaveného v ochrannom prostredí nečistého argónu po tepelnom spracovaní 15 s pri 325 °C. Vo ferite tohto nízkouhlíkatého materiálu možno zistiť veľké množstvo lamelárnych tetragonálnych nitridov. Z toho vyplýva, že v takomto zvare môžeme v praxi po účinku namáhania nebezpečne zmeniť jeho mechanické vlastnosti. To isté ešte vo väčšej miere platí pri zváraní v ochrannej atmosfére CO₂. Takéto prostredie nechráni zvarový kov pred nitridáciu ani pred oxidáciou (vo ferite vznikli lamelárne tetragonálne trhliny s veľkým počtom kysličníkových vtrúsenín).

1.4.4 Vplyv uhlíka

Uhlík má na vlastnosti ocelí najväčší vplyv. Zvyšuje pevnosť, tvrdosť, zhoršuje húževnatosť a zvarateľnosť. Ocele s obsahom do 0,2 % C sú vhodné na cementovanie, čiže na povrchové nasycovanie uhlíkom. Ocele s obsahom uhlíka väčším ako 0,35 % sú už kaliteľné.

1.4.4.1 Uhlík v zliatinách železa

Uhlík sa rozpúšťa v oboch modifikáciách železa intersticiálne. V modifikácií s kubickou priestorovo centrovanou mriežkou sa umiestňujú atómy uhlíka v stredoch stien základných buniek, kde je najväčší priestor. Tento intersticiálny tuhý roztok sa nazýva ferit. Maximálna rozpustnosť uhlíka vo ferite je 0,018%.

- uhlík najviac ovplyvňuje zvariteľnosť ocelí,
- so vzrastajúcim obsahom uhlíka množstvo perlitu vzrastá, teda sa menia aj mechanické vlastnosť,
- s rastúcim obsahom uhlíka rastie pevnosť, tvrdosť a kaliteľnosť ocele, pričom však klesá húževnatosť a zhoršuje sa zvariteľnosť,

- nelegované ocele sú zaručené zvariteľné do obsahu uhlíka 0,22 % C,
- čím je nižší obsah uhlíka, tým je oceľ lepšie zvariteľná,
- čím je vyšší obsah uhlíka v oceli, tým je oceľ náchylnejšia na vznik tvrdých, krehkých štruktúrnych zložiek. Takéto štruktúry sú potom príčinou vzniku trhlin.

1.5 Zváranie kovov

1.5.1 Definícia zvárania

Zváranie je nerozoberateľné spájanie materiálov pomocou sústredeného tepelného zdroja, alebo tlaku s použitím alebo bez použitia prídavného materiálu zvyčajne podobného zloženia ako sú spájané materiály. Tieto materiály v mieste vytváraného spoja pôsobením použitej energie premeníme do stavu tekutého alebo tvárneho a tým sa vzájomne spoja (Tolnai, 2002).

1.5.2 Zváranie oblúkom v ochranných atmosférach

Zváranie v ochranných atmosférach nachádza uplatnenie vo všetkých oblastiach výroby zváraných konštrukcií. V súčasnej dobe patrí k technológiám, ktoré prekonávajú najväčší rozvoj v strojárskych podnikoch.

Pri tomto spôsobe zvárania je tavný kúpeľ chránený pred nepriaznivými účinkami okolitej atmosféry (hlavne kyslíka a dusíka) ochrannou atmosférou, ktorá môže byť inertná alebo aktívna. Inertné atmosféry nevstupujú do chemických reakcií s tavným kúpeľom. Pre tieto účely sa používa argón, hélium alebo ich zmes. Aktívne atmosféry sa podieľajú na chemických reakciách v tavnom kúpeľi, ich škodlivé pôsobenie je však kompenzované vhodným zložením prídavného materiálu (Tolnai, 2002).

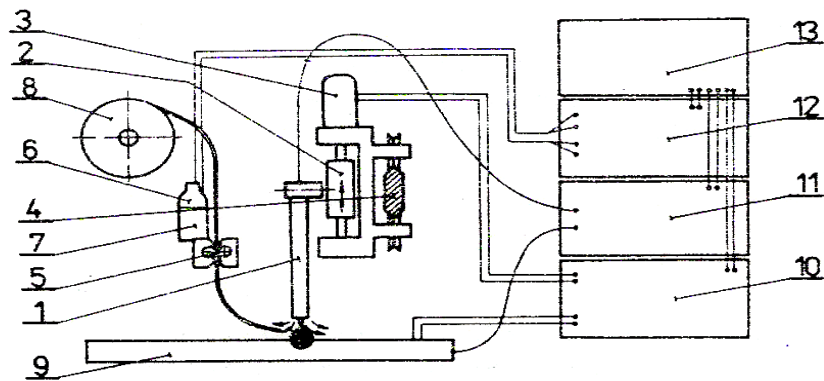
1.5.3 Charakteristika zvárania TIG

Zváranie TIG je tavné zváranie. Miestnym natavením zvarových plôch základných materiálov a odtavením potrebného množstva prídavného materiálu sa vytvára zvarový kúpeľ. Tento nadväzne tuhne a vytvára požadovanú fyzikálnu väzbu medzi spájanými základnými materiálmi.

Zdroj tepla pri zváraní TIG je elektrický oblúk. Zváranie TIG je ďalším variantom oblúkového zvárania. Pri zváraní TIG horí oblúk medzi koncom netaviacej sa elektródy a základným materiálom v prostredí inertného (chemicky nereagujúceho) plynu.

Charakteristika zvarania

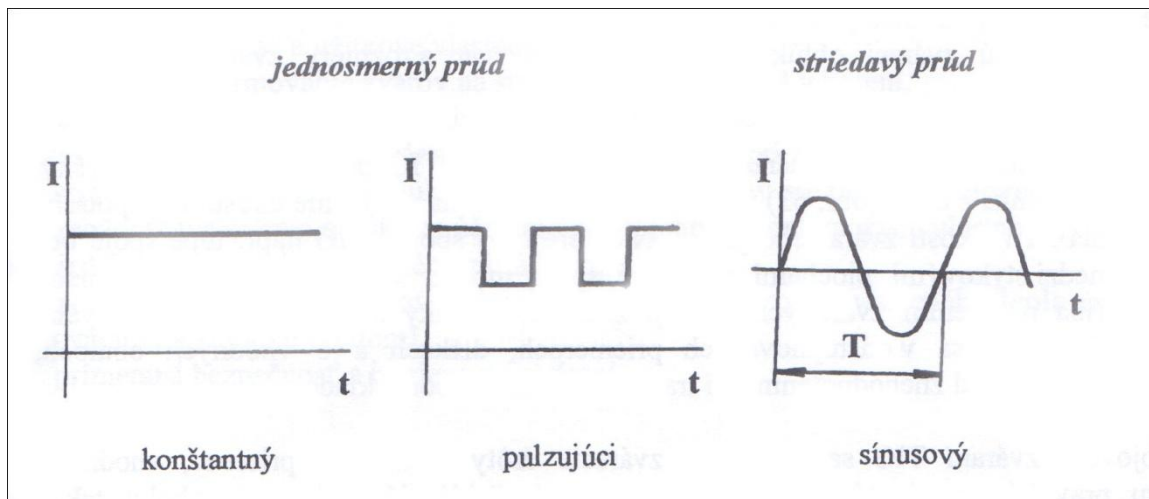
- Poloha - všetky polohy,
- Hrúbka zákl. mat. - 0,5 až 10 mm,
- Druh zákl. mat. - všetky druhy ocelí, zliatiny Ni, Cu, Al, Ti, Ag, Zr,
- Zvárací prúd - 10 až 400 A,
- Druh prúdu: striedavý pre Al a jeho zliatiny, jednosmerný pre ostatné,
- Priemer elektródy - 1 až 8 mm, chladenie horáka - do 150 A plynom, nad 150 A – kvapalinou (vodou), Statická charakteristika zdroja - strmo klesajúca,
- Zapalovanie oblúka - vysokofrekvenčným výbojom,
- Ochranný plyn - argón, hélium a ich zmes.



Obr. 8 Automatické zvaranie WIG (Tolnai, 2002)

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1 – horák WIG | 8 – zásobník príd. materiálu |
| 2 – pohyb. mech. regulácie dĺžky oblúka | 9 – základný materiál |
| 3 – elektromotor | 10 – regulácia napätia na oblúku |
| 4 – suport pozdĺžneho pohybu horáka | 11 – regulácia prúdu |
| 5 – podávanie príd. materiálu | 12 – regulácia posuvu drôtu |
| 6 – elektromotor podávania | 13 – programovanie zvaracieho cyklu |
| 7 – tachodynamo posuvu elektródy | |

Pri zvaraní TIG možno použiť jednosmerný prúd konštantnej veľkosti alebo pulzujúci zvárací prúd s priamou alebo nepriamou polaritou alebo striedavý prúd. Ich časové priebehy sú na obr.č.9.



Obr. 9 Časové priebehy zvaracieho prúdu pri zváraní TIG (Kolektív autorov VÚZ, 2000)

Pri zváraní TIG sa používajú takmer výlučne inertné (chemicky nereagujúce) plyny, najmä argón alebo zmesi argónu s héliom. Iba inertné plyny môžu pri zváraní TIG úspešne plniť funkciu efektívnej ochrany zvarového kúpeľa, vysokovyhriatej netaviacej sa volfrámovej elektródy a vysokovyhriatych častí základného materiálu vedľa zvaru pred škodlivými účinkami vonkajšej vzdušnej atmosféry. Inertné plyny plnia však pri zváraní TIG aj ďalšie funkcie. Vylepšujú podmienky na zapálenie oblúka (ionizáciu plynného prostredia v priestore oblúka), stabilizujú zvarací oblúk TIG, ovplyvňujú tvar a rozmery zvaru (formovanie zvarovej húsenice), (ORSZÁGH V.,ORSZÁGH P., 1998).

1.5.3.1 Teplotný cyklus

Teplotný cyklus je pri zváraní TIG pomerne priaznivý (mäkký režim). To pozitívne pôsobí najmä na formovanie zvarovej húsenice. Zváranie TIG má zo všetkých metód oblúkového zvárania najnižšiu koncentráciu tepla. Zvary TIG sú preto charakteristické svojím pravidelným formovaním na strane povrchu a najmä v koreni. Zváranie TIG sa preto veľmi často používa na výrobu koreňových vrstiev a doplnkovú úpravu povrchových vrstiev zvarových spojov vyrobených inými metódami oblúkového zvárania (tzv. žehlenie povrchu oblúkom TIG). Cieľom tejto doplnkovej úpravy povrchov zvarov je znížiť vrubový účinok prevýšenia zvarov .

Mäkký zvärací režim predurčuje použitie zvärania TIG prednostne na spájanie materiálov veľmi malých a malých hrúbok (najčastejšie do 5 mm) a na zväranie v polohách všeobecne. Úspešne ho možno použiť aj pri naváraní (ORSZÁGH V.,ORSZÁGH P., 1998).

1.5.3.2 Prednosti zvärania TIG

Podľa (ORSZÁGH V.,ORSZÁGH P., 1998) prednosti zvärania TIG a jeho najnovších variantov pred inými metódami oblúkového zvärania možno vyjadriť týmito ukazovateľmi:

- vysoká celistvosť a úžitkové vlastnosti spojov,
- vynikajúce formovanie zvarov na strane povrchu a najmä v koreni,
- čistá metóda zvärania (nevyžaduje použitie tavív alebo trosiek),
- vysoká operatívnosť pri zväraní tenkých materiálov a pri zväraní v polohách všeobecne,
- vysoko stabilný zvärací oblúk a zvärací proces výhodný pre ručné i strojové zväranie,
- jednoduchá obsluha zväracieho zariadenia,
- presná regulácia parametrov zvärania a množstva do zvaru vneseného tepla (najmä pri zväraní pulzujúcim prúdom),
- primeraná bezpečnosť a hygiena pri zväraní.

1.5.3.3 Ochranné plyny

Pri zväraní TIG plnia ochranné plyny najmä tieto základné funkcie:

- zabezpečujú ochranu konca netaviacej sa alebo taviacej sa elektródy, zvarového kúpeľa a vysokovyhriateho základného materiálu pred škodlivými účinkami vzdušnej atmosféry (pred ich oxidáciou a naplynením),
- vytvárajú priaznivé podmienky na zapálenie a horenie oblúka, odtavovanie prídavného materiálu, formovanie zvaru a stabilitu zväracieho procesu všeobecne.

Pri zváraní TIG ovplyvňujú ochranné plyny najmä tieto ukazovatele zváracieho procesu:

- tepelný výkon oblúka,
- prenos kovu v oblúku,
- chemické zloženie, formu a rozmery zvaru,
- celistvosť a úžitkové vlastnosti zvaru,
- produktivitu a hospodárnosť zvárania
- Zvárací oblúk TIG a jeho vlastnosti

Elektrický oblúk je elektrický výboj v plynoch medzi dvomi elektródami – katódou a anódou. Je vysokoenergetickým zdrojom tepla.

Zvárací oblúk TIG je trvalý elektrický výboj. Horí medzi netaviacou sa elektródou a základným materiálom v prostredí inertných plynov (argónu, hélia alebo ich zmesi). Vďaka vysokej teplote a vysokej koncentrácii tepla môže oblúk TIG zabezpečiť c relatívne krátkom čase miestne tavenie kovov pri zváraní.

Fyzikálne a technologické vlastnosti zváracieho oblúka TIG môžu značne ovplyvniť predovšetkým základné parametre zvárania – druh a veľkosť zváracieho prúdu, dĺžka oblúka a rýchlosť zvárania. Z podmienok zvárania sú to najmä polarita na netaviacej sa elektróde, druh, množstvo a čistota inertného plynu, tvar a priemer výtokovej dýzy (hubice), druh a priemer netaviacej sa elektródy, úprava konca volfrámovej elektródy, jej vyloženie z dýzy a pod. Základnou vlastnosťou oblúka TIG je jeho stabilita. Od nej sa odvíjajú aj stabilita zváracieho procesu TIG, efektívnosť plynovej ochrany, pravidelnosť formovania zvaru a v značnej miere tiež úžitkové vlastnosti vyrobených zvarových spojov (ORSZÁGH V.,ORSZÁGH P., 1998).

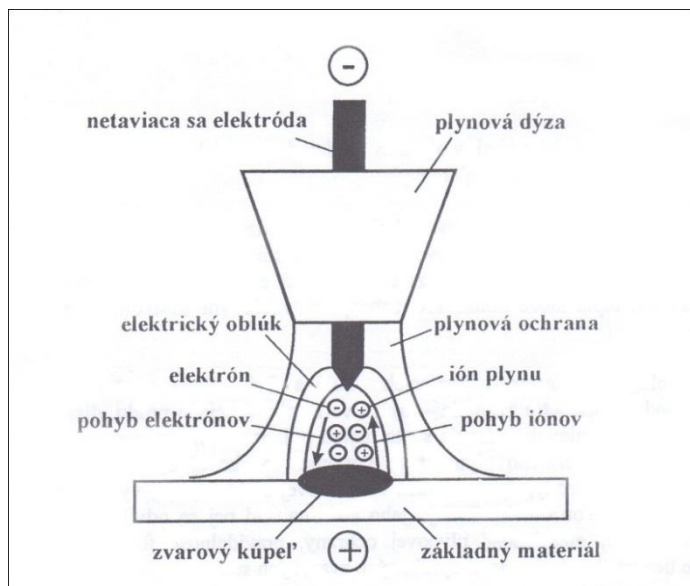
1.5.3.4 Zapálenie, horenie a ukončenie oblúka TIG

Pri zváraní TIG sa elektrický oblúk zapaluje vytvorením skratu (skratové zapalovanie oblúka) alebo vysokofrekvenčným vysokým napätím (bezskratové zapalovanie oblúka).

Pri skratovom zapáľovaní sa dotykom netaviacej sa elektródy s povrchom medenej podložky alebo medenej príložky položenej na zváraný materiál vytvorí skrat, uzavrie sa elektrický obvod a začne ním pretekať zvärací prúd. Následným rýchlym oddialením elektródy od povrchu medenej príložky na malú vzdialenosť (niekoľko mm) sa vytvorí elektrický oblúk. Zapáľovanie oblúka skratom treba pri zváraní TIG robiť na medenej podložke alebo príložke pri relatívne nízkych zväracích prúdom (do 10 A), aby nedošlo k nataveniu konca volfrámovej elektródy a k nalegovaniu zväracieho materiálu volfrámom. Preto sa zakazuje zapáľovať oblúk skratom priamo na zváranom materiáli.

Bezskratové zapálenie oblúka sa pri zváraní TIG realizuje pomocou ionizátora, ktorý je dnes bežným vybavením zväračiek TIG. Pomocou vysokého napätia s vysokou frekvenciou sa vytvorí elektrický výboj – oblúk.

Udržanie oblúkového procesu po zapálení (horenie oblúka) je podmienené tepelnou ionizáciou plynu v priestore oblúka. Produktom ionizačných dejov v oblúku sú elektricky nabité častice plynu – elektróny a ióny. Smer ich pohybu v oblúku vidieť na obr. č.10. Čím väčšia je koncentrácia elektricky nabitých častíc v priestore oblúka, tým je oblúk stabilnejší a tým vyššia je tiež jeho teplota (Kolektív autorov VÚZ, 2000).



Obr 10 Základné komponenty zvárania TIG (Kolektív autorov VÚZ, 2000)

Zapáľovanie a horenie oblúka významnou mierou ovplyvňujú ionizačné vlastnosti plynu. Podľa ionizačných vlastností je najvhodnejším inertným plynom argón. Zapálenie oblúka v argóne je preto ľahšie ako v hélíu. V argóne sa tiež dosahuje vysoká stabilita oblúka aj pri jeho značnej dĺžke (10-12mm).

Zvárací proces TIG sa uskutočňuje prerušením ionizačných dejov – zhasnutím oblúka. V zvaračskej praxi sa to realizuje prerušením zvaracieho obvodu vypínačom alebo oddialením horáka TIG na väčšiu vzdialenosť od povrchu zváraného materiálu (Kolektív autorov VÚZ, 2000).

1.5.3.5 Základné parametre zvárania TIG

Pri zváraní TIG jednosmerným a striedavým prúdom je nastavenie vhodného tepelného režimu veľmi jednoduché. Pri bežnom zváraní TIG je tepelný režim definovaný iba tromi základnými parametrami:

- zváracím prúdom,
- dĺžkou oblúka,
- rýchlosťou zvárania.

Pri zváraní TIG pulzujúcim prúdom je tepelný režim zvárania definovaný až šiestimi parametrami:

- základným prúdom,
- impulzným prúdom,
- časom trvania základného prúdu,
- časom trvania impulzného prúdu,
- dĺžkou oblúka a rýchlosťou zvárania.

Nastavenie optimálneho režimu je preto pri impulznom zváraní TIG zložitejšie ako pri zváraní TIG prúdom konštantnej veľkosti.

1.5.3.6 Veľkosť zvaracieho prúdu

Pri ručnom zváraní TIG sa stanovuje podľa hrúbky a tepelnej vodivosti základného materiálu, podľa typu spoja, polohy zvárania a predpokladanej zvaracej rýchlosti.

Podstatne väčší zvarací prúd vyžadujú materiály s vysokou tepelnou vodivosťou (meď, hliník a ich zliatiny) ako materiály s malou tepelnou vodivosťou (vysokolegované austenitické ocele a titán). Pri zvaraní TIG kútových spojov sú potrebné väčšie zvaracie prúdy ako pri zvaraní TIG tupých, lemových a rohových spojov. Pri výrobe polohových spojov sa zase používajú nižšie zvaracie prúdy ako pri zvaraní TIG vo vodorovnej polohe. Pri strojovom zvaraní sú vyššie zvaracie prúdy zdôvodnené vyššími zvaracími rýchlosťami (Kolektív autorov VÚZ, 2000).

1.5.3.7 Dĺžka oblúka

Pri zvaraní TIG môže byť od 3 až do 12mm, čo platí pre oblúk TIG horiaci v prostredí argónu. Čím dlhší je zvarací oblúk, tým širšia je tiež zóna oblúkom vyhriateho základného materiálu a tým menšia je efektívnosť plynovej ochrany. Krátky oblúk TIG (3 až 5mm) sa preto odporúča používať u kovov s malou tepelnou vodivosťou a najmä u kovov náchylných na oxidáciu a naplynenie pri zvýšených teplotách, napr. pri zvaraní vysokolegovaných austenitických ocelí, niklu, titánu a ich zliatin. Oblúk strednej dĺžky (6 až 10mm) je výhodný na zvaranie TIG materiálov s vysokou tepelnou vodivosťou, napr. medi, hliníka a ich zliatin.

Dlhý oblúk sa používa pri naváraní medi a medených zliatin na ocele. Pri naváraní TIG sa dĺžka oblúka pohybuje často aj nad 10mm. Dlhý oblúk nachádza občas uplatnenie aj pri zvaraní mosadzí a materiálov obsahujúcich legúry s nízkou teplotou varu, napr. Zinok (Kolektív autorov VÚZ, 2000).

1.5.3.8 Rýchlosť zvárania

Rýchlosť zvárania sa pri ručnom zváraní TIG menšia ako pri strojovom zváraní. Pri ručnom zváraní TIG tenkých plechov obyčajne nepresahuje hodnotu $400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, pri zváraní plechov stredných hrúbok $200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Pri zváraní TIG jednosmerným prúdom na priamej polarite sa používajú vyššie rýchlosti zvárania ako pri zváraní TIG striedavým alebo pulzujúcim prúdom, čo je zdôvodnené vyššou stabilitou oblúka a charakteristickou formou zvaru pri zváraní TIG jednosmerným prúdom na priamej polarite. Pri zváraní TIG bez prídavného materiálu sú rýchlosti zvárania až o 20 % vyššie ako pri zváraní TIG s prídavným materiálom. Pri výrobe zvarov v polohách treba znížiť rýchlosť zvárania, často až o 50 % v porovnaní so zváraním TIG vo vodorovnej polohe zhora.

Najčastejšie používané rýchlosti zvárania od $200 \text{ mm}/\text{min}$ do $400 \text{ mm}/\text{min}$ sú často nižšie ako rýchlosť šírenia tepla v niektorých tepelne vysokovodivých materiáloch. Táto skutočnosť môže vyvolať postupné zvyšovanie teploty zváraného materiálu, zmenu rozmerov kúpeľa a formovania zvarovej húsenice, najmä pri strojovom zváraní TIG. Riešením je príslušná zmena regulačného parametra počas zvárania podľa pevného programu alebo riadiaceho systému so spätnou väzbou (Kolektív autorov VÚZ, 2000).

1.5.3.9 Doplnkové parametre zvárania TIG

Ochranný plyn – jeho druh, čistota, prietokové množstvo, prípadne tiež jeho výtoková rýchlosť z dýzy horáka rozhodujú predovšetkým o účinnosti (efektívnosti) plynovej ochrany, o stabilite zváracieho oblúka a zváracieho procesu TIG všeobecne.

Pri určovaní stupňa čistoty argónu treba vychádzať z vlastností zváraného materiálu pri zvýšených teplotách a z požiadaviek na celistvosť zvarových spojov. Vysokú čistotu argónu (min. 99,95 % Ar) treba použiť pri zváraní materiálov zvlášť náchylných na oxidáciu a naplynenie pri zvýšených teplotách, napr. titánu, niklu a tiež niektorých vysokolegovaných ocelí. Argón čistoty min. 99,9 % Ar sa bežne používa pri zváraní medi, hliníka a nehrdzavejúcich austenitických ocelí. Prietokové množstvo argónu sa pri zváraní TIG používa najčastejšie v rozsahu od $3 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ do $15 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Pri voľbe množstva argónu sa vychádza z požiadaviek na šírku chránenej zóny a efektívnosť plynovej ochrany. Týmto požiadavkám treba prispôbiť tiež priemer plynovej dýzy horáka (hubice).

Netesnosti v prívodnom potrubí alebo v prívodných hadiciach, prievan na pracovisku, nesprávne nastavený predfuk alebo dofuk argónu môžu podstatne zvýšiť spotrebu argónu pri výrobe spoja a naopak významne znížiť účinnosť plynovej ochrany. Prejavuje sa to na zhoršení formovania zvaru, kresby povrchovej húsenice a sfarbení povrchu netaviacej sa elektródy.

Účinnosť plynovej ochrany nie je u všetkých typov spojov rovnaká. Veľmi priaznivá je napr. u kútových spojov, vyhovujúca u tupých spojov, málo účinná u lemových a rohových spojov. Posledne menované spoje vyžadujú zvláštne opatrenia v záujme zlepšenia plynovej (usmernenie prúdnic plynu primárneho argónu), (Kolektív autorov VÚZ, 2000).

1.5.3.10 Netaviaca sa elektróda

Pri zváraní TIG je tepelne namáhaná sálavým teplom oblúka a tiež vedením zváracieho prúdu. Volfrám má totiž značný elektrický odpor. Aby bol prestup tepla z elektródy do chladeného telesa zváracieho horáka dobrý, je potrebné dobré upnutie elektródy v horáku. Tým sa súčasne zabezpečí dobrý prívod zváracieho prúdu na elektródu. Upínanie elektródy v horáku sa robí ručne, vylučuje sa použitie nástrojov – kľúčov, kliešti a pod.

Volfrámová elektróda je pri zváraní TIG vyhriata na pomerne vysokú teplotu (až na úroveň červeného žiaru volfrámu). Pri tejto teplote však volfrám rýchlo oxiduje a nasycuje sa plynmi. Pri zváraní TIG treba preto netaviacu sa elektródu účinne chrániť ochranným plynom. Plynová ochrana elektródy musí pôsobiť zatiaľ, kým elektróda celkom nevychladne. Dofuk argónu po ukončení zvárania trvá ešte 10 s až 30s.

Podľa veľkosti zváracieho prúdu sa určuje priemer netaviacej sa elektródy, podľa typu spoja zase vyloženie elektródy z dýzy (hubice). Vyloženie volfrámovej elektródy z dýzy sa pohybuje v rozsahu 1,5 až 3-násobok priemeru elektródy.

Stabilný oblúk TIG vyžaduje pri zváraní jednosmerným prúdom zahrotenie funkčného konca volfrámovej elektródy do kužeľa. Vrcholový uhol vytvoreného kužeľa sa mení s priemerom elektródy od 30° do 120°. Čím má elektróda menší priemer, tým menší je aj vrcholový uhol. Pri zváraní TIG striedavým prúdom sa elektróda do kužeľa, iba sa zrazí hrana na jej čelnej ploche (Kolektív autorov VÚZ, 2000).

1.5.3.11 Dýza (hubica)

Dýza zabezpečuje prívod ochranného plynu do miesta zvaru. Jej priemer sa určuje tak, aby vytekajúci ochranný plyn obsiahol celú oblasť zvarového kúpeľa ako aj zónu vysokovyhriateho základného materiálu v mieste zvárania. Priemer vnútorného otvoru dýzy treba preto prispôbiť rozmerom zvarového kúpeľa a šírke tepelne ovplyvnenej oblasti vedľa zvaru, teda tepelnému režimu zvárania a tepelnej vodivosti zváraných materiálov.

Dýza horáka je pri zváraní TIG vystavená tepelnému žiareniu oblúka. Je preto tepelne namáhaná. Často dochádza tiež k jej znečisteniu alebo k mechanickému poškodeniu, čo sa nepriaznivo prejavuje na účinnosti plynovej ochrany. Údržbu dýz treba preto robiť pravidelne (Kolektív autorov VÚZ, 2000).

1.5.3.12 Prídavný materiál

Prídavný materiál má malý vplyv na zvarací proces a jeho stabilitu pri ručnom zváraní TIG. Nie je tomu tak však pri strojovom zváraní TIG, kde sa prídavný materiál pridáva v tvare drôtu z boku. Priemer drôtu a jeho poloha voči zvarovému kúpeľu, spôsob jeho tvarovania po výstupe z koncovky bovdenu (voľného konca drôtu) má totiž významný vplyv na spôsob odtavovania drôtu, veľkosť oddeľovaných kvapiek tekutého kovu a ich splynutie so zvarovým kúpeľom. Problémy tohto druhu sú zvlášť významné pri použití drôtov malých priemerov (pod 1,5mm). Preto pri strojovom zváraní TIG tenkých plechov treba sa orientovať prednostne na zvarové spoje, ktoré možno vyrobiť bez použitia prídavného materiálu (lemové spoje alebo tupé I – spoje bez medzery v stykových plochách).

Zváranie TIG je totiž jedinou metódou oblúkového zvárania, pri ktorej množstvo prídavného materiálu nie je úmerné veľkosti zvaracieho prúdu a pri ktorej možno realizovať veľmi úspešne aj zváranie bez prídavného materiálu. Túto skutočnosť treba v maximálnej miere využívať u tenkých plechov, nakoľko má pozitívny vplyv nielen na hospodárnosť zvárania ale aj na produktivitu zvárania a kvalitu vyrábaných spojov (Kolektív autorov VÚZ, 2000).

1.6 Skúšky tvrdosti

1.6.1 Tvrdosť

Tvrdosť je mechanická vlastnosť, ktorá vyjadruje odpor materiálu proti deformácií jeho povrchu vyvolanej pôsobeným telesa s presne definovaným tvarom a rozmermi a s tvrdosťou vyššou ako je tvrdosť skúšaného materiálu.

Hodnota tohto odporu je závislá od viacerých faktorov:

- subštruktúry materiálu definovanej druhom atómovej väzby, typom kryštálovej mriežky a mriežkovými poruchami,
- mikroštruktúry materiálu definovanej veľkosťou zrna, stupňom nerovnomernosti a nerovnovážnosti štruktúry, množstvom a tvarom prímiesí v štruktúre,
- vnútorného napätia v materiáli vyvolaného tvárnením za studena, nerovnomerným ochladzovaným, fázovými premenami a pod. (Balla, Mikuš, Cviková, 2001).

1.6.2 Typy skúšok tvrdosti

Skúšky tvrdosti sa podľa princípu rozdeľujú na vnikacie, vrypové, odrazové, kyvadlové.

- Vnikacie metódy sú založené na princípe vtlačania guľôčky, kužeľa, ihlanu alebo iného presne definovaného telesa z kalenej ocele alebo z diamantu do skúšaného materiálu. Meradlom tvrdosti je veľkosť alebo hĺbka vzniknutého vtlačku.

- Vrypové metódy spočívajú vo vytváraní vrypov diamantovým telesom s presne definovaným tvarom a zaťaženým určitou silou do vylešteného povrchu skúšaného materiálu. Hodnota tvrdosti je funkciou šírky vrypu (Martensova metóda).

- Princíp odrazových metód spočíva v odraze padajúceho telesa s definovaným tvarom a hmotnosťou od povrchu skúšaného materiálu. Časť energie skúšobného telesa sa spotrebuje na vytvorenie vtlačku a zvyšok energie odrazí skúšobné teleso do určitej výšky od povrchu skúšaného materiálu. Táto výška odrazu je mierou tvrdosti materiálu.

- Pri kyvadlových metódach je mierou tvrdosti úbytok energie kyvadla, ktoré rozširuje vopred vytvorený vtlačok guľôčky v povrchu skúšaného materiálu (Balla, Mikuš, Cviková, 2001).

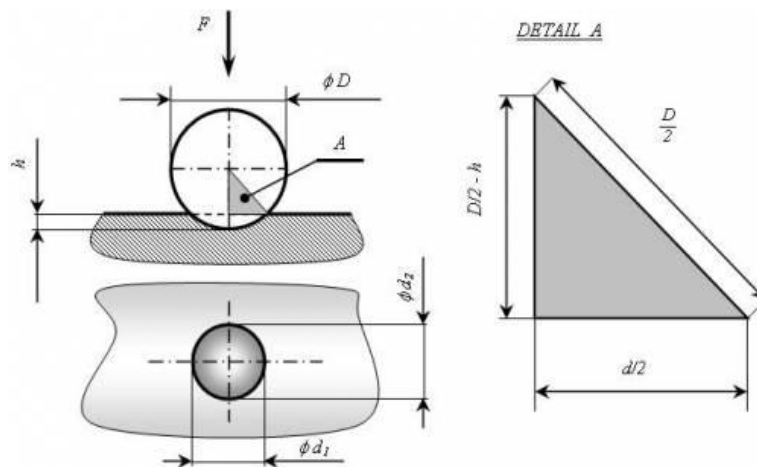
Podľa rýchlosti zaťažovania sa skúšky tvrdosti rozdeľujú na statické, dynamické, skúšky makrotvrdosti a skúšky mikrotvrdosti.

1.6.2.1 Skúška tvrdosti podľa Brinella

Podstata skúšky spočíva vo vtláčaní telieska do povrchu skúšaného telesa a následnom odmeraní priemeru vtláčku d , ktorý zostane na povrchu po odľahčení skúšobného zaťaženia F .

Tvrdosť podľa Brinella sa označuje symbolmi:

- HBS v prípade použitia guľôčky ocelevej,
- HBW v prípade použitia guľôčky z tvrdokovu.
- Symboly HBS a HBW predchádza hodnota tvrdosti a za nimi nasledujú číslice charakterizujúce podmienky skúšky (Balla, Mikuš, Cviková, 2001).

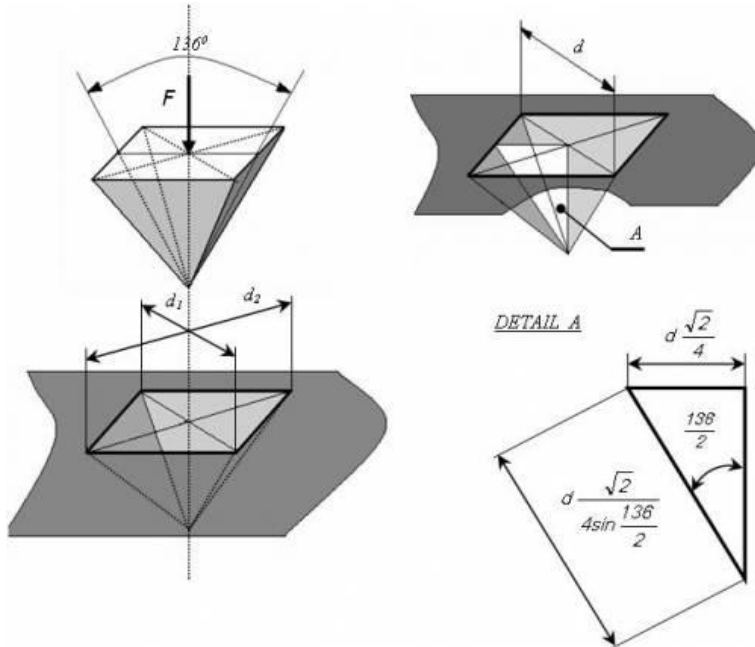


Obr. 11 Skúška tvrdosti podľa Brinella (www.matnet.sav.sk)

1.6.2.2 Skúška tvrdosti podľa Vickersa

Skúška je založená na rovnakom princípe ako skúška podľa Brinella. Rozdiel je iba v skúšobnom teliesku. Pri Vickersovej metóde sa používa diamantové vnikacie teleso v tvare štvorbokého ihlana s vrcholovým uhlom protiľahlých plôch 136° .

Tvrdosť podľa Vickersa sa označuje symbolom HV, za ktorým nasleduje číslica charakterizujúca veľkosť skúšobného zaťaženia v kp a ďalej nasleduje doba pôsobenia zaťaženia, pokiaľ sa líši od doby 10-15 s (Balla, Mikuš, Cviková, 2001).

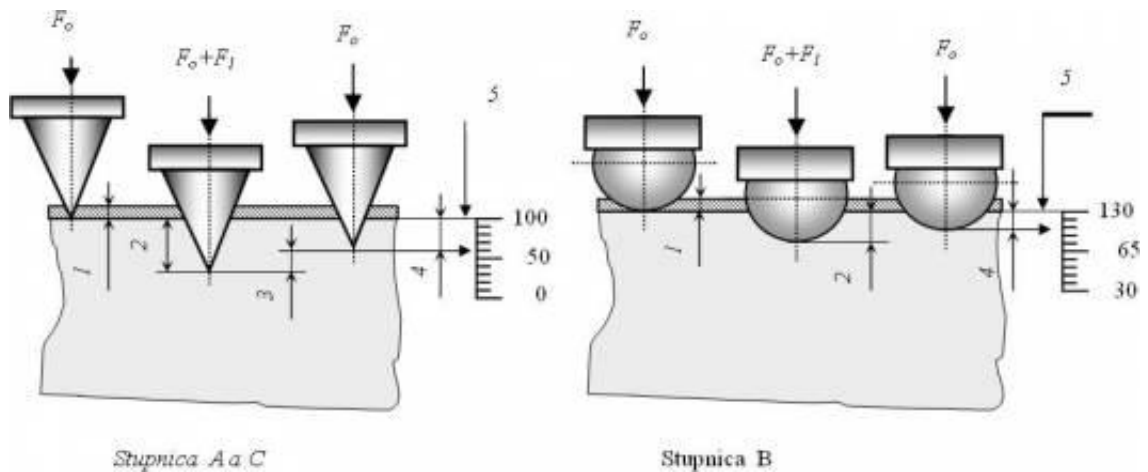


Obr. 12 Skúška tvrdosti podľa Vickersa (www.matnet.sav.sk)

1.6.2.3 Skúška tvrdosti podľa Rockwella

Hodnota tvrdosti pri tejto metóde nie je závislá od plochy vtlačku, ale je závislá od hĺbky vtlačku. Skúška spočíva vo vtlačaní diamantového kužeľa s vrcholovým uhlom 120° alebo kalenej oceľovej guľôčky do povrchu skúšaného materiálu. Meria sa hĺbka trvalého vtlačku e , ktorú vytvorí skúšobné teleso v povrchu skúšaného materiálu.

Daná tvrdosť sa vyjadruje číslami, ktoré udávajú hodnotu tvrdosti a písmenami HR s uvedením stupnice tvrdosti (Balla, Mikuš, Cviková, 2001).



Obr. 13 Skúška tvrdosti podľa Rockwella (www.matnet.sav.sk)

1.6.2.4 Skúšanie mikrotvrdosti

Používa sa na meranie tvrdosti veľmi malých predmetov a tenkých vrstiev, ako aj v metalografii na identifikáciu jednotlivých štruktúrnych zložiek. Na meranie mikrotvrdosti sa používa mikrotvrdomer, prístroj, ktorý je vybavený mikroskopom alebo sám je súčasťou mikroskopu. Mikrotvrdosť sa zvyčajne meria na metalografických výbrusoch, preto si úprava pred samotným meraním vyžaduje veľkú starostlivosť. Povrchy na meranie mikrotvrdosti sa pripravujú leštením. Výsledky skúšky mikrotvrdosti sa označujú podobne ako tvrdosť podľa Vickersa. Hodnoty však nie sú porovnateľné s hodnotami makrotvrdosti získanými pomocou Vickersovej metódy (Balla, Mikuš, Cviková, 2001).

2 Cieľ práce

Cieľom diplomovej práce je v laboratórnych podmienkach overiť oteruvzdornosť nauhličených povrchových vrstiev skúškou na brúsnom plátne podľa STN 01 5084.

Ako cementačné ocele boli zvolené 12 010, 14 223, 16 121. Za etalón bola vybraná vzorka ocele 12 014. Cementovanie povrchu prebieha v plynnom prostredí pretavovaním povrchu metódou TIG, pričom ako nauhličujúci plyn je použitý propán – bután. Skúška prebieha na skúšobnom prístroji s brúsnym plátom podľa normy STN 01 5084. Proces skúšky spočíva v opotrebovovaní vybraných ocelí prostredníctvom brúsneho plátne a následným porovnávaním so vzorkou ocele 12 014, ktorá bola vopred zvolená ako etalónová vzorka.

3. Metodika práce

3.1 Charakteristika skúšaných materiálov

Na laboratórnu skúšku boli zvolené ocele 12 010, 14 223 a 16 121. Výber bol uskutočnený na základe poznania vlastností, chemickej štruktúry a očakávaných vlastností daných ocelí.

Oceľ 12 010

Oceľ vhodná k chemicko – tepelnému spracovaniu, na cementovanie s menšou pevnosťou v jadre po kalení, na lisovanie za studena, tyče, hrubé aj tenké plechy, pásy, drôty, výkovky. Zvariteľnosť zaručená.

Tab.č. 2 Oceľ 12 010

Chemické zloženie, (hm. %)								
	C	Cr	Cu	Mn	Ni	P	S	Si
min.	0,07			0,35				0,15
max.	0,14	0,15	0,30	0,65	0,30	0,040	0,040	0,40

Oceľ 14 223

Oceľ Mn – Cr k cementovaniu, jemnozrnná s titanom. Na výrobu strojných súčiastok určených k cementovaniu, napríklad ozubené kolesá, hriadele, čapy a podobne.

Tab.č. 3 Oceľ 14 223

Chemické zloženie, (hm. %)							
	C	Cr	Mn	P	S	Si	Ti
min.	0,07	1,0	0,8			0,17	0,04
max.	0,23	1,3	1,1	0,035	0,035	0,37	0,10

Oceľ 16 121

Oceľ k chemicko – tepelnému spracovaniu, dobre tvárniteľná za tepla a dobre obrobiteľná. Oceľ nie je určená k zváraniu. V prípade potreby sa však dá zvärať za vhodných zväracích podmienok. Je vhodná pre namáhané strojné časti s cementovaným povrchom so strednou pevnosťou a húževnatosťou v jadre.

Tab.č. 4 Oceľ 16 121

Chemické zloženie, (hm. %)							
	C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si
min.	0,14	0,8	0,7	0,40			0,15
max.	0,19	1,1	1,0	0,7	0,035	0,035	0,40

Etalón 12 014

Magneticky mäkká oceľ so zaručenými hodnotami magnetických vlastností, s dobrou magnetickou vodivosťou. Vhodná na časti magnetických obvodov, prvkov a prístrojov v elektronike a telekomunikačnej technike. Vhodná na galvanické pokovovanie a tvárnenie za studena. Zvariteľnosť zaručená.

Tab. č. 5 Oceľ 12 014

Chemické zloženie, (hm. %)				
C	Mn	Si	P	S
0,06	0,45	0,15	0,020	0,020

3.2 Charakteristika technologického zariadenia na pretavenie

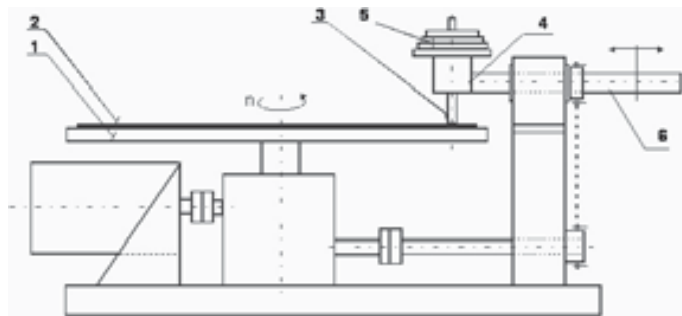
Na pretavenie vzoriek 12 010, 14 223, 16 121 bol použitý zvärací prístroj od firmy REHM – TIGER 210 AC/DC. Zariadenie je určené pre zváranie netaviacou sa wolfrámovou elektródou v ochrannej atmosfére TIG.

Tab.6 Parametre zariadenia na pretavenie

Technické parametre TIGER 210 AC/DC	
Druh zvárania	Netaviacou sa wolfrámovou elektródou
Rozsah nastavenia prúdu	3-10 A
Zvärací prúd pri 100% pracovnom cykle	175 A
Sieťové napätie	1x230 V/ 50 Hz
Poistka	16 A
Účinník $\cos\varphi$	0,99
Chladenie horáka	Plynom
Trieda izolácie	IP 23
Hmotnosť	8,4 kg
Rozmery	340/150/275 mm

3.3 Podstata a popis skúšobného zariadenia

Skúška abrazívneho opotrebenia na prístroji s brúsnym plátnom spočíva v opotrebení skúšobného telesa brúsnym plátnom za podmienok stanovených normou STN 01 5084.



Obr. 14 Skúšobný prístroj s brúsnym plátnom (www.strojarstvo.sk)

- | | |
|----------------------|----------------------|
| 1 – vodorovná doska | 5 – závažie |
| 2 – brúsne plátno | 6 – pohybová skrutka |
| 3 – skúšobné teleso | 7 – koncový vypínač |
| 4 – upínacia hlavica | |

Skúšobný prístroj s brúsnym plátnom pozostáva z rovnomerne sa otáčajúcej vodorovnej dosky v horizontálnej rovine na ktorú sa upevňuje brúsne plátno, ktoré slúži ako abrazív pre vzorku. Upínacia hlavica, ktorou je teleso držané a je pritláčané k brúsnemu plátnu silou spôsobenou závažím. Ďalej pohybová skrutka, ktorá slúži na radiálny posuv vzorky a z koncového vypínača. Na zachovanie rovnakých podmienok počas skúšky sa posúva vzorka od stredu na okraj, čím sa dosiahne stály styk vzorky s novým brusivom. Veľkosť opotrebenia sa vyhodnocuje meraním.

3.4 Charakteristika skúšobného zariadenia

Skúšobné zariadenie proti abrazívnemu opotrebeniu, norma STN 01 5084 bolo k dispozícii na Katedre spoľahlivosti strojov.

Laboratórne zariadenie je riešené na princípe trenia vzorky skúšaného materiálu o brúsne plátno po špirálovej dráhe. Na kotúč je možné pripnúť brúsne plátno rôznej zrnitosti.

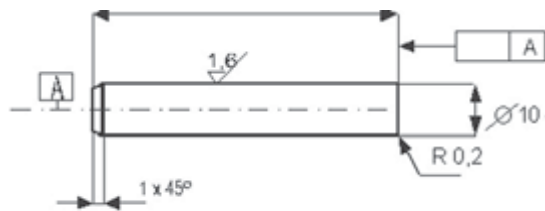
Tab. č. 7 Parametre skúšobného zariadenia

Jednotlivé parametre	Možnosti	Použité pri našej skúške
Dĺžka trecej dráhy	Ľubovoľne voliteľná na základe času skúšky, 150, 15, 50 a 30 metrov	50 metrov
Trecia rýchlosť	0,10 – 0,29 [m.s ⁻¹] 0,15 – 0,48 [m.s ⁻¹] 0,27 – 0,87 [m.s ⁻¹]	0,5 [m.s ⁻¹]
Priečny posuv	1.1 [mm.ot ⁻¹] 2.2 [mm.ot ⁻¹] 3.3 [mm.ot ⁻¹] 4.5 [mm.ot ⁻¹]	3 [mm.ot ⁻¹]
Priemer trecej dráhy v rozsahu	min 160 – max 480 mm	480 mm
Typ brúsneho plátna	– korund – karbokorund (rôznej zrnitosti)	Globus 100
Priemer vzorky	6 – 10 mm	10 mm

3.5 Výroba a príprava skúšobných vzoriek

Pre uskutočnenie skúšky opotrebenia boli zhotovené valcové vzorky z polotovarov podľa normou stanovených podmienok STN 01 5084.

- priemer vzorky \varnothing 10 mm
- dĺžka vzorky 30 – 40 mm



Obr. 15 Tvar vzorky na skúšku abrazívneho opotrebenia (www.strojarstvo.sk)

3.5.1 Príprava vzoriek a pretavenie metódou TIG

Vzorky bolo potrebné upraviť na predbežné rozmery. Ďalej sa vzorky zarovnávali kvôli kolmosti plôch voči osi vzorky. Vzorka bola odmastená technickým benzínom. Na pretavenie vzoriek 12 010, 14 223, 16 121 bol použitý zvarací prístroj REHM – TIGER 210 AC/DC s netaviacou sa wolfrámovou elektródou. Ako nahličovacia atmosféra bol použitý propán – bután. Na vnesenie tohto uhl'ovodíkového plynu z propán – butánovej fľaše do pretaveného povrchu slúži regulovateľná tryska, ktorá sa pripája na samotnú fľašu cez vysokotlakovú hadičku. Pomocou tejto regulovateľnej trysky bol nastavený taký plameň, aby bolo nedokonalé horenie. Na zvaracom prístroji sme nastavili jednosmerný zvarací prúd 80 A. Z každého skúšaného materiálu bolo vyrobené po tri vzorky, ktoré sa následne upravovali pretavením a nahličením. Nasledovalo kalenie v peci jednotlivých vzoriek 12 010 , 14 223 a 16 121 pri teplote 840°C do oleja.

3.6 Postup skúšky na skúšobnom prístroji

Označenú a pripravenú vzorku bolo potrebné nechať ubehnúť niekoľko otáčok po brúsnom papieri, kým plocha vzorky presne nekopírovala brúsne plátno. Po odmeraní hmotnosti vzorky na laboratórnej elektronickej váhe Precisa 205 A a jej následným zapísaním do tabuľky sme vzorku pripevnili do upínacej hlavice skúšobného prístroja a na vodorovnú dosku sa upevnilo nové brúsne plátno Globus 100. Pre každú skúšku sa používa nový kotúč brúsneho plátna. Po vložení upínacej hlavice s upevnenou vzorkou do vodiacich drážok skúšobného prístroja a po zaťažení hlavice normou predpísanou silou $0,32 \text{ N/m}^2$ sa vodorovná doska uviedla do chodu. Laboratórny prístroj sa uviedol do chodu. Po ubehnutí vzorky po predpísanej dráhe sa zariadenie samočinne zastavilo pomocou koncového vypínača. Vybrala sa vzorka z upínacej hlavice, očistila sa a následne sa zvažila na váhe. Jej hmotnosť sa zapísala do tabuľky pričom som zaokrúhľoval na 4 desatinné miesta. Takýmto spôsobom sme pokračovali pri všetkých vzorkách.

3.7 Vyhodnotenie nameraných úbytkov

Z nameraných úbytkov hmotnosti jednotlivých skúšobných vzoriek sa vypočítali aritmetické priemery. Hodnoty priemerov vzorky a etalónu sa porovnávali pomocou pomernej odolnosti proti opotrebeniu Ψ_{abr} , ktoré sa vypočíta podľa vzorca uvedeného v norme pre stanovenie odolnosti kovových materiálov proti abrazívnemu opotrebeniu na brúsnom plátne STN 01 5084.

Vzťah pre výpočet pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu:

$$\Psi_{abr} = \frac{W_{oPV}}{W_{oSV}} = \frac{W_{hPV}}{W_{hSV}} \times \frac{\rho_{SV}}{\rho_{PV}}$$

Vysvetlenie použitého označenia:

- W_{oPV} - priemerný objemový úbytok porovnávacích vzoriek (mm^3)
- W_{oSV} - priemerný objemový úbytok skúšaných vzoriek (mm^3)
- W_{hPV} - priemerný hmotnostný úbytok porovnávacích vzoriek (g)
- W_{hSV} - priemerný hmotnostný úbytok skúšaných vzoriek (g)
- ρ_{PV} - merná hmotnosť porovnávacích vzoriek (g/cm^3)
- ρ_{SV} - merná hmotnosť skúšaných vzoriek (g/cm^3)

4 Výsledky meraní

Do vzťahu pre výpočet pomernej odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu sa postupne dosádzali hodnoty jednotlivých vzoriek ocelí 12 010, 14 223 a 16 121 a za hodnotu porovnávacej vzorky sa dosádzal hmotnostný úbytok ocele 12 014, ktorá sa podľa normy STN 01 5084 zvolila ako etalónová vzorka. Namerané a vypočítané hodnoty sú uvedené v tabuľkách.

Tab. č. 8 Hmotnostné úbytky v gramoch a pomerná odolnosť proti opotrebeniu ocele triedy 12 014

Hmotnosť vzorky v g		Hmotnostný úbytok v g	W_h etalón v g	Ψ_{abr}
Pred skúškou	Po skúške			
18,2231	18,0120	0,2111	0,2109	1,000
18,0120	17,8101	0,2019		
17,8101	17,5763	0,2338		
17,5763	17,3792	0,1971		

Tab. č. 9 Hmotnostné úbytky v gramoch a pomerná odolnosť proti opotrebeniu ocele triedy 12 010

Upravený povrch vzorky	Hmotnosť vzorky v g		Hmotnostný úbytok v g	W_h etalón v g	Ψ_{abr}
	Pred skúškou	Po skúške			
1x pretavená (Ar) a nauhličená	35,4288	35,2742	0,1546	0,1593	1,3239
	35,2742	35,1120	0,1622		
	35,1120	34,9572	0,1548		
	34,9572	34,7943	0,1626		
	34,7943	34,6316	0,1627		
2x pretavená (Ar) a nauhličená	36,8362	36,6824	0,1538	0,1598	1,3197
	36,6824	36,5232	0,1592		
	36,5232	36,3688	0,1544		
	36,3688	36,2066	0,1622		
	36,2066	36,0370	0,1696		

Tab. č. 10 Hmotnostné úbytky v gramoch a pomerná odolnosť proti opotrebeniu ocele triedy 14 223

Upravený povrch vzorky	Hmotnosť vzorky v g		Hmotnostný úbytok v g	W_h etalón v g	Ψ_{abr}
	Pred skúškou	Po skúške			
1 x pretavená (Ar) a nauhličená	33,9452	33,7926	0,1526	0,1555	1,3562
	33,7926	33,6342	0,1584		
	33,6442	33,4913	0,1429		
	33,4913	33,3251	0,1662		
	33,3251	33,1676	0,1575		
2 x pretavená (Ar) a nauhličená	34,8144	34,6596	0,1548	0,1621	1,3010
	34,6596	34,4902	0,1694		
	34,4902	34,3320	0,1582		
	34,3420	34,1685	0,1635		
	34,1685	34,0037	0,1648		

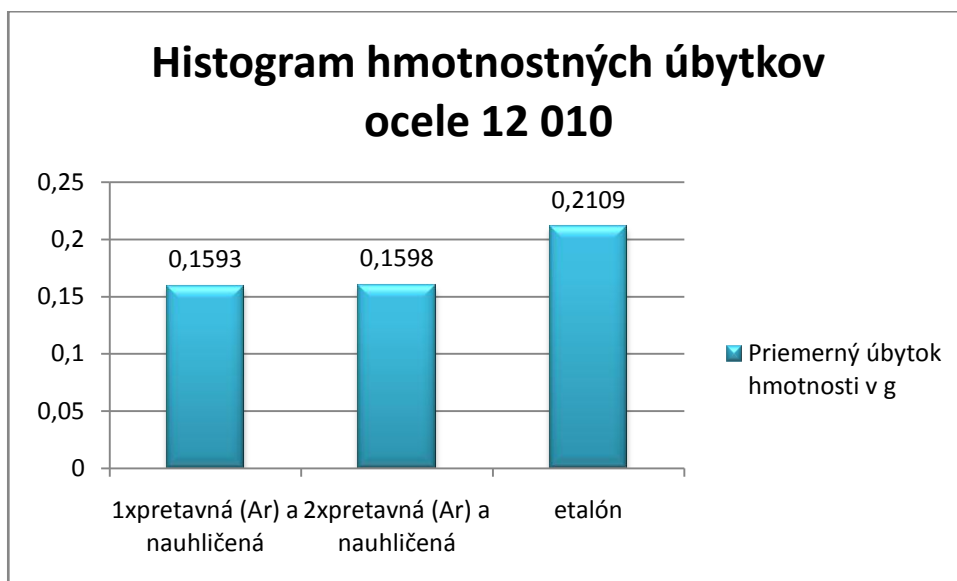
Tab. č. 11 Hmotnostné úbytky v gramoch a pomerná odolnosť proti opotrebeniu ocele triedy 16 121

Upravený povrch vzorky	Hmotnosť vzorky v g		Hmotnostný úbytok v g	W_h etalón v g	Ψ_{abr}
	Pred skúškou	Po skúške			
1 x pretavená (Ar) a nauhličená	35,0946	34,9524	0,1422	0,1448	1,4564
	34,9524	34,8136	0,1388		
	34,8136	34,6644	0,1492		
	34,6644	34,5209	0,1435		
	34,5209	34,4705	0,1504		
2 x pretavená (Ar) a nauhličená	35,8263	35,6740	0,1533	0,1542	1,3677
	35,6740	35,5154	0,1576		
	35,5154	35,3716	0,1438		
	35,3716	35,2187	0,1529		
	35,2187	35,0749	0,1638		

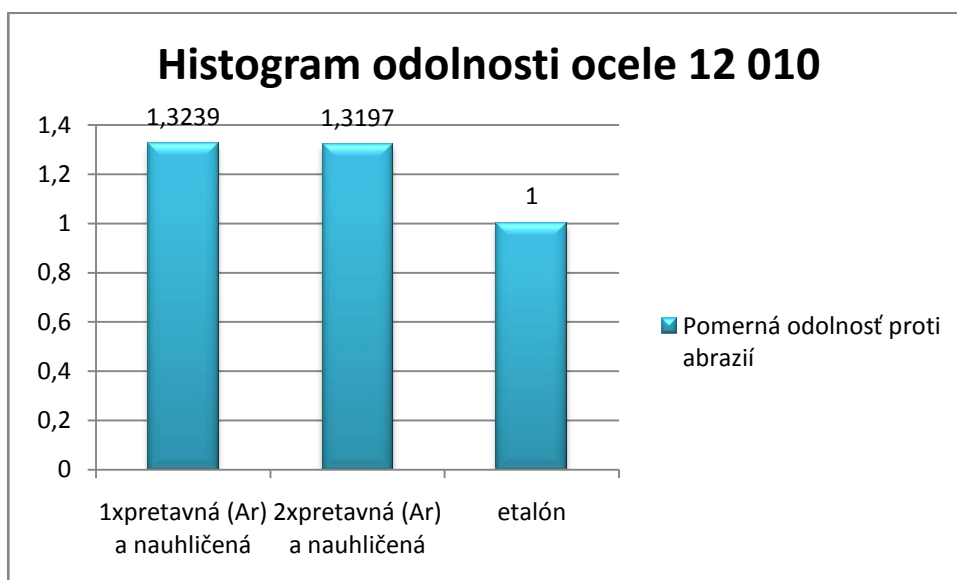
Tab. č. 12 Zhrnutie pomerných odolností skúšaných ocelí proti abrazívnemu opotrebeniu Ψ_{abr}

Upravený povrch vzorky	Druhy ocelí			
	12 010	14 223	16 121	12 014 (etalón)
1 x pretavená (Ar) a nauhličená	1,3239	1,3562	1,4564	1,000
2 x pretavená (Ar) a nauhličená	1,3197	1,3010	1,3677	

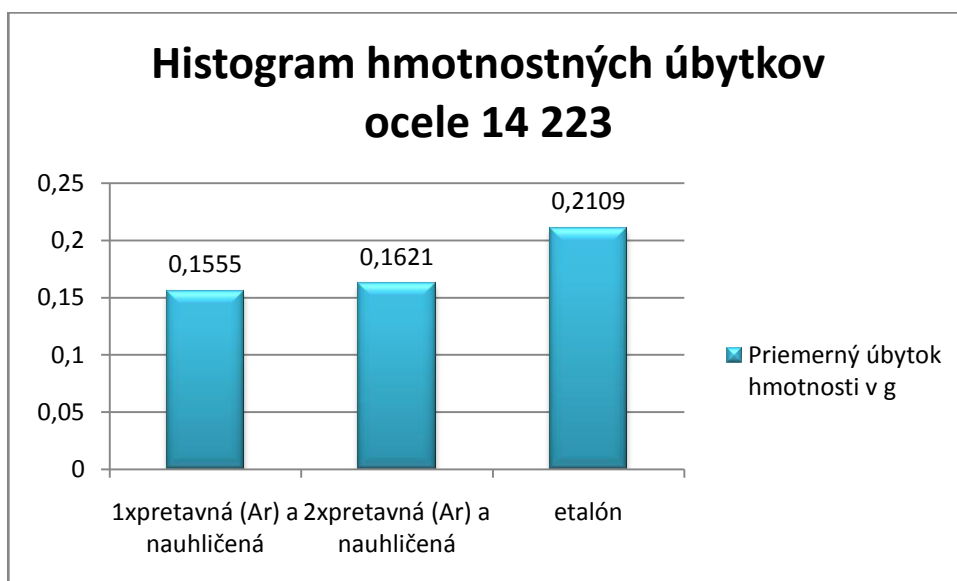
4.1 Grafické zobrazenia nameraných a vypočítaných hodnôt



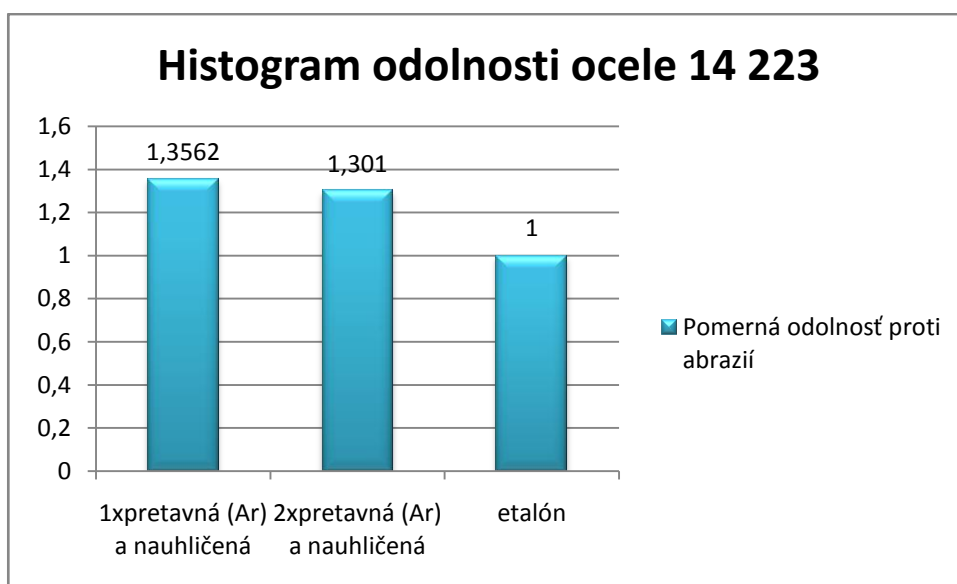
Graf č. 1 Grafické znázornenie priemerných hmotnostných úbytkov ocele 12 010 a etalónu 12 014



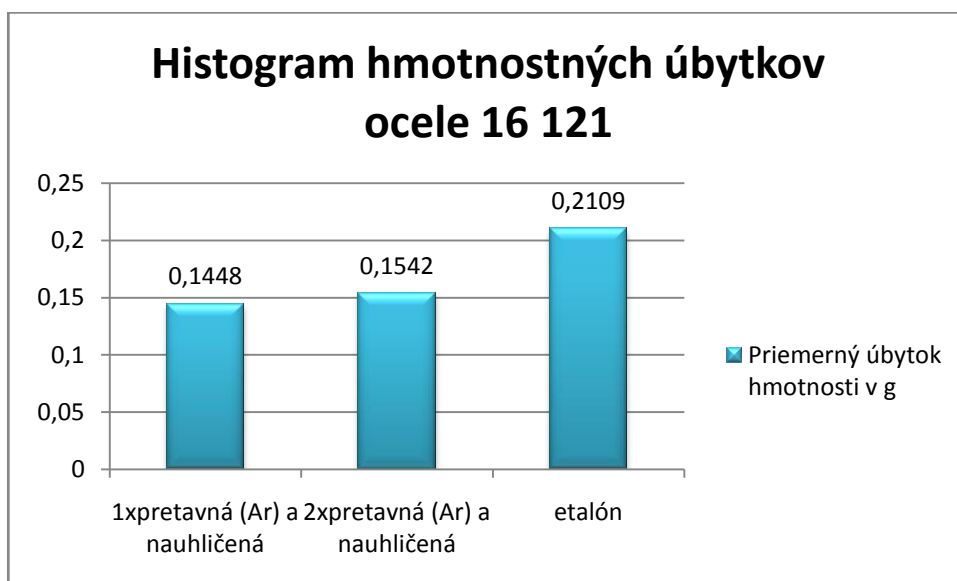
Graf č. 2 Grafické znázornenie pomernej odolnosti ocele 12 010 a etalónu 12 014 proti abrazívnemu opotrebeniu



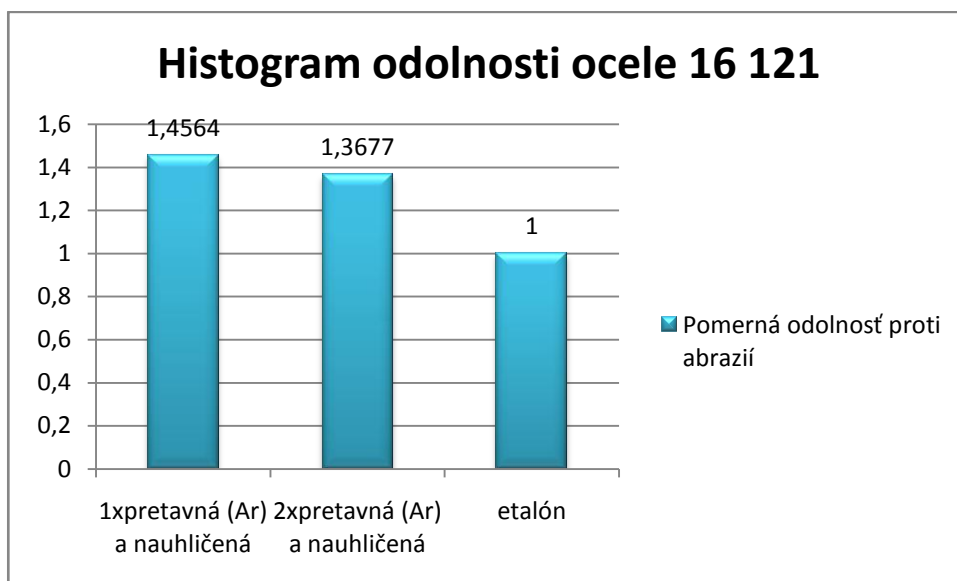
Graf č. 3 Grafické znázornenie priemerných hmotnostných úbytkov ocele 14 223 a etalónu 12 014



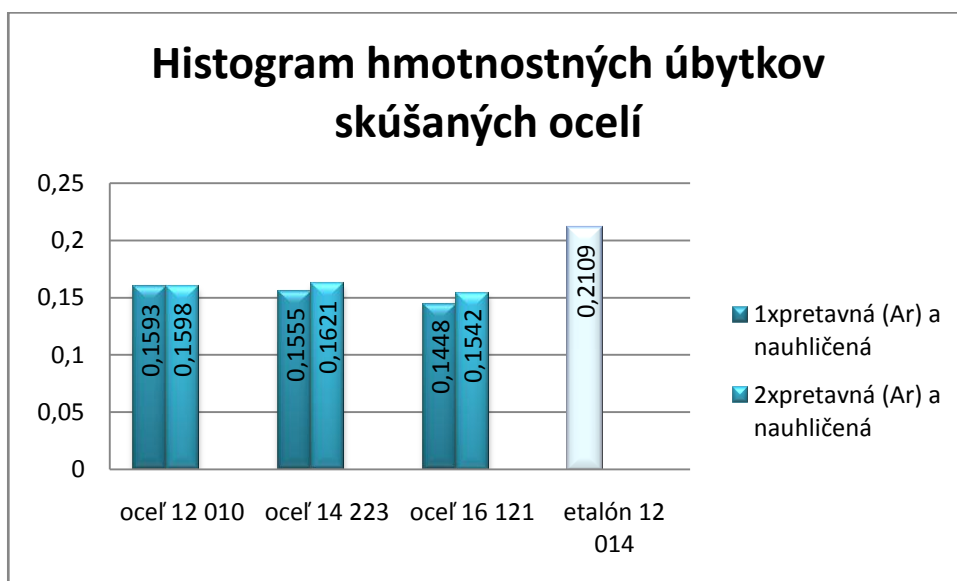
Graf č. 4 Grafické znázornenie pomernej odolnosti ocele 14 223 a etalónu 12 014 proti abrazívnemu opotrebeniu



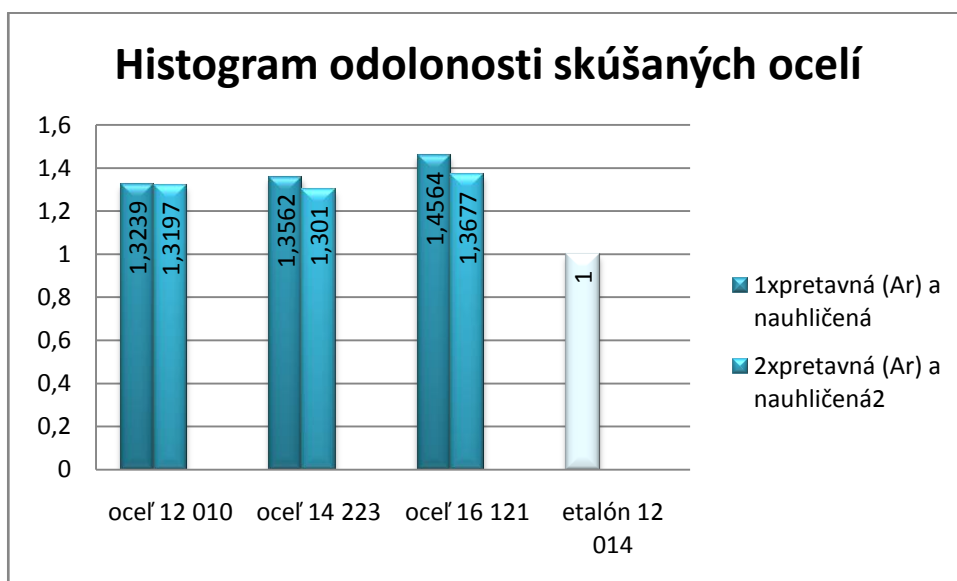
Graf č. 5 Grafické znázornenie priemerných hmotnostných úbytkov ocele 16 121 a etalónu 12 014



Graf č. 6 Grafické znázornenie pomernej odolnosti ocele 16121 a etalónu 12 014 proti abrazívnemu opotrebeniu



Graf č. 7 Grafické znázornenie hmotnostných úbytkov skúšaných ocelí



Graf č. 8 Grafické znázornenie pomerných odolností skúšaných ocelí proti abrazívnemu opotrebeniu

Diskusia

V danej diplomovej práci som riešil zvýšenie oteruvzdornosti povrchových vrstiev cementačných ocelí metódou nauhličením v plynnom prostredí. Zameral som sa na skúšku abrazívneho opotrebenia. Na samotnú skúšku boli zvolené tri druhy ocelí rôznych tried a to konkrétne cementačná uhlíková oceľ 12 010, cementačná zliatinová oceľ triedy 14 223 a nástrojová cementačná oceľ 16 121. Ako nauhličovaciu atmosféru sme použili Ar + propán – bután. Tento uhlovodíkový plyn bol privádzaný z propán – butánovej fľaše. Vzorky boli následne upravené pretavením a nauhličovaním. Nasledovalo kalenie v peci a ochladzovanie z dôvodu zníženia vnútorných napätí. Skúška prebiehala na katedre spoľahlivosti strojov v laboratórnych podmienkach na skúšobnom prístroji s brúsnym plátnom, ktorá spočívala v opotrebení vzoriek brúsnym papierom za podmienok stanovených normou STN 01 5084. Ďalej pri meraní bola použitá aj laboratórna váha Precisa 205 A. Na vyhodnotenie a porovnávanie výsledkov bola zvolená oceľ 12 014, ako etalónová vzorka, ktorej namerané hodnoty som si ponechal s bakalárskej práce. Na vzorkách skúšaných ocelí som zistil, že metódou cementácie v plynnom prostredí sa potvrdilo zvýšenie oteruvzdornosti daných ocelí. Po pretavení materiálovej vzorky v plynnej atmosfére Ar + propán - bután sme namerali menšie úbytky ako u porovnávacieho etalónu.

Pri všetkých druhoch ocelí 12 010, 14 223 a 16 121 sa preukázal priemerný hmotnostný úbytok menší ako u porovnávacieho etalónu 12 014. Najmenšie hmotnostné úbytky pri prvom pretavení má oceľ 12 010 spolu s oceľou 14 223. Naopak najväčší hmotnostný úbytok preukázala oceľ 16 121, čo je znázornené graficky na grafe číslo 7, kde je znázornený súhrnný prehľad hmotnostných úbytkov všetkých troch ocelí spolu s etalónom.

Pri druhom pretavení boli najmenšie hmotnostné úbytky namerané u ocele 14 223, naopak najväčší hmotnostný úbytok preukázala oceľ 16 121 rovnako ako pri prvom pretavení.

Pri zisťovaní pomerných odolností skúšaných ocelí proti abrazií nám všetky druhy ocelí preukázali vyššiu odolnosť v porovnaní s etalónovou vzorkou. Najväčšiu odolnosť pri prvom aj druhom pretavení preukázala oceľ 16 121, naopak najmenšia odolnosť pri prvom pretavení bola nameraná u oceli 12 010 a pri druhom pretavení bola najmenšia hodnota nameraná u oceli 14 223, čo je znázornené aj graficky na grafe č.8.

Prípadné nepresnosti mohli byť zapríčinené pri výrobe materiálovej vzorky. Jej priemer bol vyrobený v tolerancií $\pm 0,05$ mm. Ďalej mohli vzniknúť pri vážení vzorky, avšak vzniku chýb som sa snažil predísť. Na prehľadnejšie zhodnotenie výsledkov som uviedol súhrn tabuliek a grafy.

Záver

Oteruvzdornosť je odolnosť materiálu proti dlhodobému opotrebeniu trením. Navrhovaním a vývojom nových technológií proti opotrebeniu sa získavajú obrovské pozitíva, ktoré nám uľahčujú prácu v rôznych odvetviach.

Cieľom diplomovej práce bolo v laboratórnych podmienkach overiť oteruvzdornosť nauhličených povrchových vrstiev skúškou na brúsnom plátne podľa STN 01 5084.

Laboratórne skúšky potvrdzujú, že sme po pretavení materiálovej vzorky v plynnej atmosfére Ar + propán - bután namerali menšie úbytky ako u porovnávacieho etalónu.

Vykonávanie takýchto skúšok je veľmi dôležité pre znižovanie opotrebnia strojov, pracovných nástrojov a strojných zariadení v budúcnosti, kedy hlavným cieľom je práve predlžovanie životnosti strojov a udržiavanie ich výkonu. Skúmanie oteruvzdornosti je prínosom nie len pre majiteľov a vlastníkov strojov, ale aj pre pracovníkov v oblasti vývoja nových strojných súčiastok.

Zoznam použitej literatúry

1. BLAŠKOVIČ, P. - BALLA, J. - DZIMKO, M.: Tribológia. Alfa, Bratislava, 1990.
2. DZIMKO, M.: Základy tribotechniky, trenie, opotrebenie a mazanie. Tribotechnika Žilina 1985.
3. BALLA, J.- MIKUŠ, R.- CVIKOVÁ, H.: Náuka o materiáloch. Návody na cvičenia, Nitra: SPU, Edičné stredisko, 2001.
4. SEČKÁR, P.: Náuka o materiáloch. Nitra: SPU, Edičné stredisko, 1988.
5. SEDLÁČEK, V. – KRÁLIK, F. – ŠEJNOHA, R.: Difusní a precipitační procesy v kovových soustavách. Praha, 1968.
6. BALLA, J.: Náuka o materiáloch. Vysokoškolské skriptá, Nitra: SPU, 2003.
7. PTÁČEK, L. a kol.: Nauka o materiálu I. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2001.
8. PTÁČEK, L. a kol.: Nauka o materiálu II. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 1999
9. CHOTĚBORSKÝ, R.: Nauka o materiálu. Praha, ČZU 2006.
10. HEBDA, M.-WACHALA, A.: Trybologia. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, 1980.
11. MACHEK, V.: Nauka o materiálu. Praha, ČVUT, 2002.
12. RYŠ, P.- ČENEK, M.- MAZANEC, K.:Náuka o kovech: Železo a jeho slitiny. Praha, Academia, 1975.
13. PÍŠEK, F.: Náuka o materiálu I. Praha, 1975.
14. STN 01 5050 : Opotrebenie materiálu / Názvoslovie /.
15. RATAJ, V. – RYBANSKÁ, M. – JUREKOVÁ, Z. – BOREKOVÁ, B. – WOLCZOVÁ, T.: Metodika písania záverečných prác na SPU v Nitre. Nitra: SPU, 2008
16. TOLNAI, R.: Strojárska technológia, tretie vydanie. Nitra: SPU, 2002.
17. DREVENÁK, L: Hodnotenie odolnosti materiálov proti abrazívnemu opotrebeniu. Diplomová práca, Nitra: SPU, 2008, 59 s.
18. BAGIN, J: Posúdenie oteruvzdornosti pretavovaných vrstiev z hľadiska použitých médií. Bakalárska práca, Nitra: SPU, 2008, 45 s.
19. STN 01 5084: 1973: Stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazívnímu opotřebení na brusném plátně. Praha: ÚNM, 1973.

20. KOLEKTÍV AUTOROV VÚZ : Zváracie metódy a zariadenia, II.diel učebných textov pre kurzy zvaračských technológov, Ostrava, 2000.
21. VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. ALFA: Bratislava, 1985.
22. BALLA, J.: Náuka o materiáloch. Návody na cvičenia, Nitra: SPU, 2001.
23. BAJLA, J. a kol.: Strojnícke tabuľky, Výber noriem, SÚTN: Bratislava 2004.
24. ORSZÁGH, V.-ORSZÁGH, P.: Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov, Bratislava: SAV, 1998.
25. WEBOVÁ STRÁNKA: Odborné a vedecké články, Tribológia tribotechnika, 3/2007.,
Dostupné na: <http://www.strojarstvo.sk/docwww/sk/284/284.pdf>
26. WEBOVÁ STRÁNKA: Skúšky opotrebenia, Dostupné na:
<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=522>

Prílohy

Príloha A



Laboratórne zariadenie s brúsnym plátnom na skúšky odolnosti proti abrazívnemu opotrebeniu podľa STN 01 5084

Príloha B



Elektronická laboratórna váha Precisa 205 A

Príloha C



Zvárací prístroj REHM – TIGER 210 AC/DC