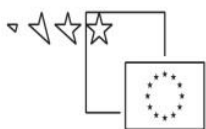




REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA ŠOLSTVO IN ŠPORT



Naložba v vašo prihodnost
OPERACIJO DELNO FINANCIRA EVROPSKA UNIJA
Evropski socialni sklad

MATERIALI

SLAVKO BOŽIČ

Višješolski strokovni program: Strojništvo
Učbenik: Materiali
Gradivo za 2. letnik

Avtor:

Mag. Slavko Božič, univ. dipl. stroj.
ŠOLSKI CENTER POSTOJNA
Višja strokovna šola



Strokovni recenzent:

dr. Danilo Zupančič, univ. dipl. inž. stroj.

Lektorica:

Vlasta Milavec, prof. slov.

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

620.1/.2(075.8)(0.034.2)

BOŽIČ, Slavko, 1971-

Materiali [Elektronski vir] : gradivo za 1. letnik / Slavko
Božič. - El. knjiga. - Ljubljana : Zavod IRC, 2010. - (Višješolski
strokovni program Strojništvo / Zavod IRC)

Način dostopa (URL): [http://www.zavod-irc.si/docs/Skriti_dokumenti/
Materiali-Bozic.pdf](http://www.zavod-irc.si/docs/Skriti_dokumenti/Materiali-Bozic.pdf). - Projekt Impletum

ISBN 978-961-6857-00-0

255566336

Izdajatelj: Konzorcij višjih strokovnih šol za izvedbo projekta IMPLETUM
Založnik: Zavod IRC, Ljubljana.
Ljubljana, 2011

Strokovni svet RS za poklicno in strokovno izobraževanje je na svoji 130. seji dne 6. 5. 2011 na podlagi 26. člena Zakona o organizaciji in financiranju vzgoje in izobraževanja (Ur. l. RS, št. 16/07-ZOFVI-UPB5, 36/08 in 58/09) sprejel sklep št. 01301-3/2011/9-2 o potrditvi tega učbenika za uporabo v višješolskem izobraževanju.

© Avtorske pravice ima Ministrstvo za šolstvo in šport Republike Slovenije.

Gradivo je sofinancirano iz sredstev projekta Impletum 'Uvajanje novih izobraževalnih programov na področju višjega strokovnega izobraževanja v obdobju 2008-11'.

Projekt oz. operacijo delno financira Evropska unija iz Evropskega socialnega sklada ter Ministrstvo RS za šolstvo in šport. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007-2013, razvojne prioritete 'Razvoj človeških virov in vseživljenjskega učenja' in prednostne usmeritve 'Izboljšanje kakovosti in učinkovitosti sistemov izobraževanja in usposabljanja'.

Vsebina tega dokumenta v nobenem primeru ne odraža mnenja Evropske unije. Odgovornost za vsebino dokumenta nosi avtor.

KAZALO VSEBINE

PREDGOVOR	3
1 UVOD	5
2 JEKLA IN LITINE	9
2.1 ZLITINE ŽELEZA IN OGLJIKA	10
2.1.1 Mikrostrukture znotraj diagrama Fe-Fe ₃ C za jekla	12
2.2 OSNOVE O FAZNIH PREMENAH – FAZNIH TRANSFORMACIJAH	14
3 TOPLOTNA OBDELAVA	20
3.1 VRSTE TOPLOTNIH OBDELAV	22
3.1.1 Žarjenje	22
3.1.2 Kaljenje	24
3.1.3 Poboljšanje	26
3.1.4 Površinsko utrjevanje	27
3.1.5 Mehanizem gašenja pri toplotni obdelavi	30
3.1.6 Tehnike gašenja	33
3.1.7 Metode in standardi za laboratorijsko testiranje hladilnih sredstev	35
3.2 LEGIRANA JEKLA IN LITINE	41
3.3 BARVNE KOVINE	46
4 PREIZKUŠANJE MATERIALOV	53
4.1. MEHANSKI PREIZKUSI	53
4.1.1 Natezni preizkus	54
4.1.2 Trajni mirujoči preizkus	57
4.1.3 Preizkus udarne žilavosti	58
4.1.4 Merjenje trdote	60
4.2 PREISKAVE MATERIALOV BREZ PORUŠITVE	62
4.3 METALOGRAFSKE PREISKAVE KOVIN	64
5 KOROZIJA	66
5.1 PROTIKOROZIJSKA ZAŠČITA	69
6 KERAMIKA	71
6.1 KERAMIKE ZA REZALNA ORODJA	75
6.2 KARBIDNE TRDINE	75
7 TRDE PREVLEKE	77
7.1 POSTOPKI NANAŠANJA TRDIH PREVLEK	77
7.2 LASTNOSTI TRDIH PREVLEK	79
8 KOMPOZITNI MATERIALI	81
9 POLIMERI – UMETNE MASE	85
9.1 TEHNOLOŠKA DELITEV UMETNIH SNOVI	86
9.2 UPORABA POLIMEROV Z DRUGIMI MATERIALI KOT KOMPOZIT	88

10 LITERATURA 90

PREDGOVOR

Vedno večja vloga materialov v vsakdanjem življenju človeka narekuje tudi vedno večje poznavanje le-teh. Na vseh mednarodnih in prav tako na domačih znanstvenih in strokovnih posvetovanjih, seminarjih in simpozijih zasledimo zahtevo po večji kakovosti, po povečanju produktivnosti in znižanju cene izdelkov. Kvalitetnejše, hitreje in ceneje je geslo današnje proizvodne tehnologije. To pa zahteva dobro poznavanje materialov, in to tako tistih, ki jih obdelujemo, kakor tudi tistih, iz katerih delamo orodja za obdelavo. Le dobro poznavanje materialov lahko prinese dejanske kvalitetne izboljšave ne samo v tehnologijo, temveč prav tako v konstrukcijo.

Na današnji stopnji tehnike in znanosti temelji nadaljnji razvoj materialov na poznavanju zgradbe materialov od atomskega nivoja, preko mikrostrukture in velikosti konstrukcijskih delov. Lastnosti materialov izvirajo iz njihove zgradbe. S primerno izbiro kemijske sestave materialov in ustreznim tehnološkim postopkom izdelave lahko dosežemo načrtovano zgradbo materialov in s tem želene lastnosti. Izgradnja kovin in njihovih zlitin je za tehnologa – metalurga prav tako izredno pomembna, saj je nadaljnja toplotna obdelava ključna in odvisna od tega, kako so kovinski materiali sestavljeni, kako so kristalizirani in kako oblikovani.

Kovine in nekovine skupaj predstavljajo kemične elemente, iz katerih je sestavljeno neko določeno gradivo. Od 103 kemičnih elementov, kolikor jih poznamo do danes, je večina (79) kovinskega značaja. Kovine in njihove zlitine so najvažnejša gradiva v strojništvu. Prav tako so v strojništvu pomembna gradiva tudi nekovinski materiali. Posebno še v zadnjem času, z iznajdbo umetnih snovi, ki iz dneva v dan na najrazličnejših mestih z uspehom nadomeščajo čedalje več kovinskih materialov. Nenazadnje je pomembna tudi zaščita kovin pred atmosferskimi in drugimi vplivi.

Učbenik Materiali naj bi po učnem programu zajemal predvsem znanja s področja kovinskih in nekovinskih materialov ter informacije o preskušanju materialov, zaščiti pred korozijo in toplotni obdelavi tehničnih zlitin. Slednje je pomembno zato, ker so lastnosti zlitine odvisne v enaki meri od kemične sestave kot od toplotne obdelave zlitine. Navedena dopolnila so učbenik nekoliko razširila, vendar sem mnenja, da je le celovita obravnava materialov lahko logična in razumljiva.

Na začetku vsakega posameznega poglavja je predstavljena vsebina, temu sledi razlaga vsebine, na koncu poglavja pa so pripravljena vprašanja za utrjevanje in posamezne dodatne vaje.

Upam, da bo učbenik koristil tako študentom kot tudi predavateljem višjih strokovnih šol. Kljub temu bi predvsem študentom dal še en nasvet. Ko boste naleteli na težje razumljivo poglavje, poiščite še kakšno drugo knjigo. Tudi snov s področja tehnike se da predstaviti na več načinov in morda vam bo prav tisti »drugi način« razjasnil problem.

Zato želim vsem, ki bodo uporabljali učbenik, ki je prirejen študiju na višjih strokovnih šolah, obilo uspeha.

Materiali

V učbeniku boste srečali štiri oznake.

Osnovne enačbe in definicije, ki si jih je vredno zapomniti:



Praktične naloge s postopkom reševanja:



Praktične naloge, ki jih reši študent sam ali v skupini:



Vprašanja in naloge:



Na tem mestu bi se rad zahvalil vsem, ki so pripomogli k nastanku tega študijskega gradiva. Posebna zahvala gre predvsem dr. Danilu Zupančiču za strokovno recenzijo in prof. Vlasti Milavec za strokovno lektoriranje, ki sta svojo nalogo opravila v zelo kratkem času, vendar zares temeljito.

tlačne obremenitve. Drugače lahko uporabimo tehnične polimere, npr. PVC (polivinil klorid). Teflon bi uporabili le, če bi bile postavljene dodatne zahteve, kot je npr. najmanjši koeficient trenja.

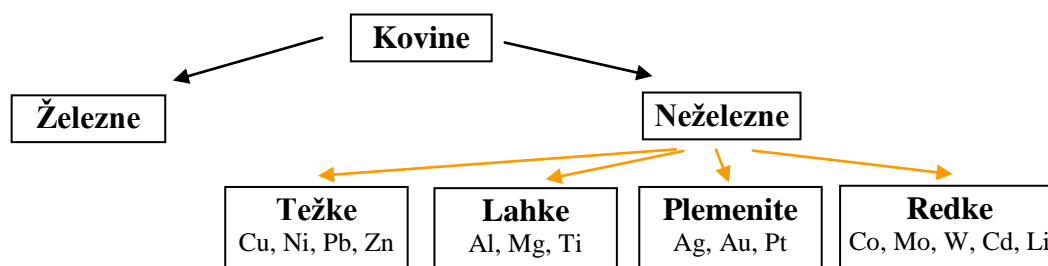
Neka snov, ki ima primerne tehniške lastnosti, še ne postane material, če ne izpolni dodatnih zahtev. Imeti mora sposobnost, da iz nje z nekim izdelovalnim postopkom (litjem, preoblikovanjem, stiskanjem in sintranjem ali z odrezovanjem) izdelamo dele kompliciranih oblik. Poleg tega mora imeti sposobnost spajanja z varjenjem, spajkanjem lepljenjem ...

Naslednji pogoj je gospodarnost. Kljub temu da imajo nekatere snovi odlične tehniške lastnosti, se ne uporabljajo kot materiali, ker so predragi. Pri opredelitvi gospodarnosti moramo upoštevati vse stroške. Če lahko nek poceni material izdelamo le z dragim izdelovalnim postopkom, bo lahko manj gospodaren kot sicer dražji material, ki ga lahko izdelamo s cenenim postopkom. Glede na vedno večjo zahtevano skrb za okolje je potrebno upoštevati tudi stroške, ki jih imamo z recikliranjem ali odlaganjem (Zupanič in Anžel, 2007, 1).

V osnovi delimo materiale v tri skupine:

- *kovina* (to so tehnično čiste kovine in zlitine ...),
- *keramika* (keramična stekla, kristalna keramika ...) in
- *polimeri* (elastomeri, termoplasti in duroplasti).

Kovine lahko razdelimo na železne in neželezne kovine, kot kaže slika 2. Kovine se lahko mešajo in tvorijo zlitine. Pogosto zlitine izboljšajo nekatere lastnosti sestavin.



Slika 2: Razdelitev kovin na železne in neželezne kovine
Vir: Lasten

Osnovne lastnosti kovinskih materialov so dobra toplotna in električna prevodnost, preoblikovalnost, odpornost proti lomu in kovinski sijaj. Keramična gradiva so slabi električni in toplotni prevodniki, imajo visoko tališče, velik modul elastičnosti, veliko trdoto ter so zelo krhki. Polimerni materiali imajo majhno gostoto, nizko tališče, so slabi toplotni in električni prevodniki, v primerjavi s kovinskimi in keramičnimi gradivi imajo majhno trdnost. Potrebno je poudariti, da lahko lastnosti v vsaki skupini materialov dosegajo vrednosti v razmeroma širokih mejah in da se lahko deloma prekrivajo tudi z lastnostmi drugih skupin.

Kadar vsaj dva različna materiala združimo, dobimo *kompozit*. Kompozitni materiali imajo to prednost, da lahko njihove lastnosti vnaprej napovemo in jih tudi »prikrojimo« za točno določen namen uporabe. Nekatere značilne uporabe različnih materialov so podane v tabeli 1.

Tabela 1: Izbrane vrste materialov, njihove lastnosti in uporaba

Material	Uporaba	Značilna lastnost
Kovinski materiali		
Baker	električni vodnik	dobra električna prevodnost
Siva litina	bloki avtomobilskih motorjev	dobra livnost, odrezovalnost, velika dušilnost, poceni
Jeklo	orodja	trdo, žilavo, obdrži dobre trdnostne lastnosti do 600 °c
Keramična gradiva		
SiO ₂ -Na ₂ O-Cao	okensko steklo	prepušča vidno svetlobo, toplotna izolacija
Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂	ognjevzdržni material za taljenje kovin	majhna toplotna prevodnost, odpornost proti visokim temperaturam, ne reagirajo s tekočimi kovinami
Barijev titanat	uporaba v avdio napravah	pretvarja zvok v elektriko
Polimerna gradiva		
Polietilen	pakiranje živil	enostavno oblikovalen v tanke in gibke neprodušne folije
Epoksidne smole	nosilec integriranih vezij	električno neprevodne, odporne proti vlagi
fenolne smole	adheziv	trdne, odporne proti vlagi
Kompozitna gradiva		
Grafit-epoksidna smola	deli letal	veliko razmerje trdnost/masa (velika specifična trdnost)
Volframov karbid – kobalt (karbidna trdina)	rezalna orodja za odrezovanje	velika trdota ob sorazmerno dobri odpornosti proti toplotnim šokom

Vir: Prirejeno po Zupanič in Anžel, 2007, 4



Primer: Kupola vesoljske ladje je bila skonstruirana za enkratni pristanek na luni in povratek na zemljo. Ladja je pristala na štirih stopalih, pritrjenih na dolgih palicah. Pristanek na zemlji je predviden s padalom. Kakšen naj bo material palic?

1. Tog 2. Žilav 3. Trd 4. Mehek 5. Raztegljiv 6. Krhek

Lastnosti materialov določa njihova notranja zgradba ali drugače povedano: s spreminjanjem notranje zgradbe lahko spremenimo lastnosti materialov. Toda kaj spada v notranjo zgradbo materialov? To so elektronska zgradba, kristalna zgradba in mikrostruktura.

Elektronska zgradba nam pove, katera stanja zasedajo elektroni v materialu. V veliki meri določa električne in magnetne lastnosti materialov, pomemben vpliv ima tudi na razporeditev atomov v prostoru in na mehanske lastnosti.

O kristalni zgradbi govorimo, kadar so atomi urejeno razporejeni v prostoru. To je zelo pogosto, saj je kristalno stanje navadno ravnotežno stanje snovi. S primernimi izdelavnimi tehnologijami lahko dosežemo tudi steklasto ali amorfno stanje, kjer pa so atomi razporejeni v prostoru popolnoma neurejeno.

Mikrostruktura je realna zgradba, za katero je značilno odstopanje od pravilne kristalne zgradbe z določenimi napakami, ki jih ne moremo opazovati s prostim očesom, temveč z uporabo mikroskopov. V tehnični praksi lahko močno vplivamo na mikrostrukturo materialov predvsem s primerno izbiro kemijske sestave materiala in s postopkom izdelave.

Povzetek

Materiali so snovi, iz katerih izdelujemo orodja, stroje, naprave, stavbe, umetniške upodobitve ... Neka snov lahko postane material, če ima primerne lastnosti za določen namen uporabe, poleg tega pa jo lahko izdelamo na gospodaren način.

Gradiva delimo na kovinska, keramična, polimerna.

Lastnosti materialov izvirajo iz njihove makro-, mikro- in nanozgradbe, na katere ima poleg kemične sestave velik vpliv le način izdelave. Temeljni cilj gradiva Materiali je, da bi bralec

dojel povezavo med mikrostrukturo materiala in njegovimi lastnostmi ter zmožnostmi različnih postopkov izdelave (litje, preoblikovanje, toplotna obdelava) za doseganje različnih mikrostruktur in s tem tudi lastnosti.

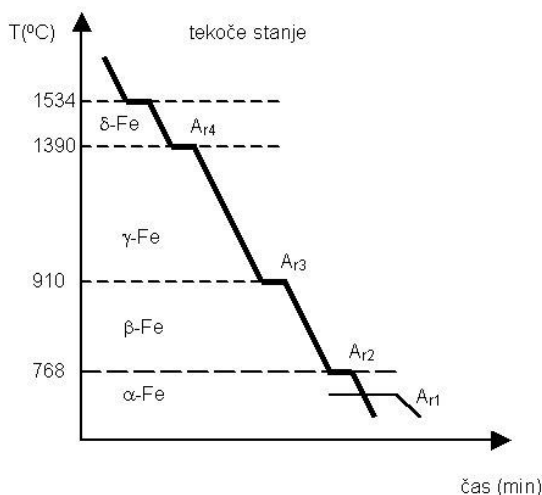


Razmislite, rešite, odgovorite:

- Katere so osnovne vrste tehničnih materialov in kakšne so njihove značilne lastnosti?
- Ali ste že kdaj vrtali v beton? Kateri sveder ste uporabili in zakaj?
- Ugotovite, iz kakšnih materialov je narejen kemični svinčnik! Ugotovite, katere lastnosti se zahtevajo za posamezen del.
- Kaj je material?
- Kdaj postane neka snov material?
- Kakšni so kriteriji za izbiro materiala?
- Kako si pri izbiri materiala pomagamo z diagrami lastnosti?
- Kako delimo materiale?
- Kaj določa lastnosti materialov?
- Na spletni strani: <http://www.imt.si/Revija/> poiščite območje /Search/ in vtipkajte naslednje izraze: Al zlitine; beton; umetne mase; karbonska vlakna. Koliko zadetkov vam ponuja obravnavana revija Materiali in tehnologije?

2 JEKLA IN LITINE

Lastnosti zlitin so podobne ali se bistveno razlikujejo od lastnosti, ki jih imajo čiste komponente. Veliko število zlitin se lahko tudi toplotno obdeluje. Z ustrezno sestavo in toplotno obdelavo se lahko lastnosti zlitin prilagodijo zahtevam v praksi. Nazoren primer so zlitine železa z ogljikom, ki se imenuje jeklo. Uporabnost čistega železa v praksi je zelo mala. Z dodajanjem ogljika in ostalih legirnih elementov nastane zelo veliko število različnih vrst jekel. Njihove lastnosti se zelo razlikujejo in se uporabljajo na zelo različna področja. Jekla in litine na osnovi železa so še vedno materiali, ki jih v tehniki največ uporabljamo. Nekaj zaradi tradicije, predvsem pa zaradi dobrih mehanskih in tehnoloških lastnosti (trdnost, trdota, žilavost, obstojnost proti obrabi ...) pri sorazmerno nizki ceni. Pomembnost poglavja smo utemeljili, poglejmo, kako se bomo lotili tako obširne snovi. Najprej se bomo seznanili s čistim železom. Ponovili bomo njegove fizikalno-kemične lastnosti in spoznali lastnosti železa pri različnih temperaturah.



Slika 3: Ohlajevalna krivulja čistega železa

Vir: http://www2.sts.si/arhiv/teho/Projekt7/alotropija_in_ohlajevalna_krivul/ (3. 5. 2010)

Ohlajevalna krivulja čistega železa in pripadajoče kristalne rešetke prikazujeta slika 3 in tabela 2. Po diagramu sodeč, smo začeli meriti temperaturo pri kakšnih 1700 °C. Tekoče železo se je ohlajalo. Pri temperaturi 1538 °C se je začela kristalizacija in čez nekaj časa se je vse železo strdilo. Nato je začela temperatura ponovno padati do premene Fe δ -Fe γ pri 1394 °C. Kubična ploskovno centrirana kristalna rešetka Fe γ pa ni stalna. V prostorsko se vrača pri temperaturi 912 °C (premena Fe γ -Fe α). Pri nadaljnjem ohlajanju se tip kristalne rešetke ne spreminja več. Kljub temu govorimo o premeni pri temperaturi 770 °C, vendar gre le za spremembo magnetnih lastnosti. Pod temperature 770 °C postane železo magnetno.

Tabela 2: Modifikacije železa

Modifikacija Fe	obstojnost (°C)	oblika krist.reš.	vel.krist.reš (nm)	št.atom/nm ³
δ Fe	1390 do 1539	pr.cent.kocka	0,293	79.511
γ Fe	910 do 1390	pl.cent.kocka	0,365	82.259
β Fe	768 do 910	pr.cent.kocka	0,290	82.004
α Fe	do 768	pr.cent.kocka	0,286	85.493

Vir: Lasten

Čisto železo se pojavlja v treh oblikah:

- Železo α (ferit):
 - kristalna rešetka: TCK
 - 0 do 912 °C

- topi največ 0,022 %C pri 727 °C
- Železo γ (avstenit):
 - kristalna rešetka: PCK
 - 812°C do 1393 °C
 - topi največ 2,24 %C pri 1147 °C
- Železo δ (δ -Fe):
 - kristalna rešetka: TCK
 - obstojno od 1393 °C do tališča železa 1536 °C.

Mehanske lastnosti čistega železa so sorazmerno skromne. Tako znaša natezna trdnost R_m med 230 in 350 N/mm², trdota je okrog 60 HB, razteznost A pa kar med 40 in 50 %. Čisto železo je dokaj žilavo, da se dobro kovati in ima magnetne lastnosti.

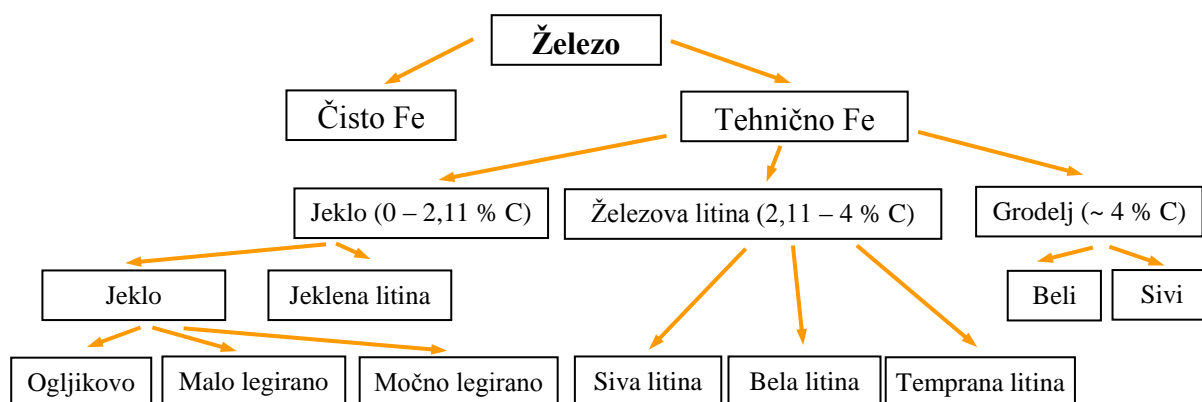
Omenimo lahko, da je v $Fe\gamma$ prostor za atom ogljika, v $Fe\alpha$ pa skoraj ne. V ploskovno centrirani rešetki ($Fe\gamma$) je namreč večina praznega prostora na sredini kocke, stranice pa so dobro zapolnjene. Trdno raztopino ogljika v $Fe\gamma$ imenujemo Avstenit. Prostorsko centrirana kristalna rešetka železa $Fe\alpha$ raztaplja le okrog 0,001 % ogljika. Trdno raztopino ogljika v $Fe\alpha$ imenujemo Ferit.

2.1 ZLITINE ŽELEZA IN OGLJIKA

O uporabnosti železa govorimo šele pri zlitini železa in ogljika. Ogljik je namreč najpomembnejši legirni element za železo in ga najdemo v skoraj vseh tehničnih zlitinah na osnovi železa. Ogljik povečuje železu trdnost in trdoto, zmanjšuje pa žilavost, razteznost in sposobnost za preoblikovanje – preoblikovalnost.



Zlitine, v katerih je poleg železa še do 2,11 % ogljika, imenujemo jekla. Imajo dovolj dobro preoblikovalnost, tako da jih lahko kujemo. V jeklih je ogljik kot železov karbid (Fe_3C), imenovan cementit. Zliti, v katerih je več kot 2,11 % ogljika, ne moremo preoblikovati, temveč jih lijemo. Take zlitine imenujemo litine (siva litina, bela litina, temprana litina). V litinah je železo v obliki cementita, grafita ali v kombinaciji obeh. Shematični prikaz razdelitve železa in železovih zlitin nam kaže slika 4.



Slika 4: Razdelitev železa in železovih zlitin

Vir: Lasten

Jekla so tiste železove zlitine, pri katerih je poleg osnovne komponente železa najpomembnejši zlitinski element ogljik. V jeklih je relativno malo ogljika, saj je njegov masni delež navadno manjši kot 1 %, toda kljub temu ima najpomembnejši vpliv na njihove uporabne lastnosti. Najpogostejša so *ogljikova jekla*. To so jekla, ki poleg železa vsebujejo le

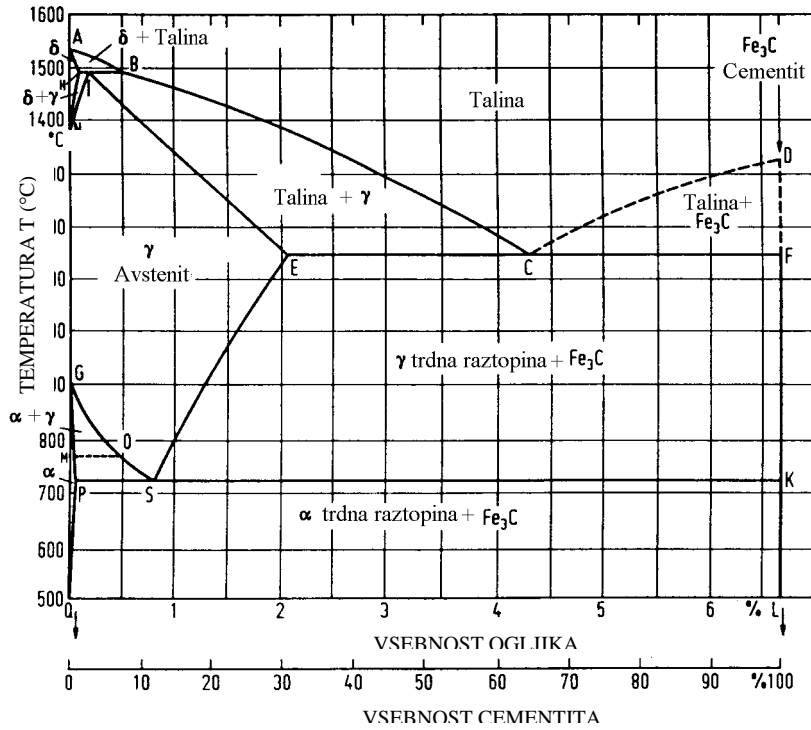
ogljik ter manjše količine mangana, silicija in aluminija. Slednje tri elemente dodamo z namenom, da bi zmanjšali ali povsem izničili negativen vpliv nečistoč, kot so žveplo, fosfor, kisik in dušik. Druga skupina jekel so *legirana jekla*. Ta – za razliko od ogljikovih jekel – vsebujejo še določene količine kroma, niklja, molibdena ali kakega drugega elementa. Posebna legirana jekla, ki so znana kot *nerjavna*, vsebujejo najmanj 11,5 % Cr. *Orodna jekla* so posebna vrsta jekel. Namenjena so odrezovanju in oblikovanju kovinskih in nekovinskih materialov v želeno obliko. Nekatera jekla dobijo svojo končno obliko z litjem (*jeklena litina*), medtem ko večino jekel oblikujemo v končno obliko z gnetenjem (preoblikovanjem) in jih lahko prištevamo h gnetnim zlitinam.

Železove litine vsebujejo mnogo več ogljika in silicija kot jekla; navadno med 2 % in 4 % C ter med 1 % in 3 % Si. Te zlitine dobijo končno obliko z litjem.

Jekla ločimo glede na vsebnost ogljika v padevtektoidna, ki vsebujejo do 0,77 % C, in nadevtektoidna, ki vsebujejo od 0,77 % do 2,11 % C. Če pogledamo v diagram Fe-Fe₃C, vidimo, da bomo z ohlajanjem padevtektoidnih jekel slej ko prej prišli do meje GS, pod katero imamo poleg avstenita v strukturi še feritna zrna. Kaj se pri tem dogaja? Že prej smo spoznali ohlajevalno krivuljo in različne kristalne oblike železa. Povedali smo, da obstaja kubično ploskovno centrirana rešetka Fe_γ, ki je osnova za avstenit, le do temperature 912 °C. Nato naj bi se spremenila v kubično prostorsko centrirano rešetko Fe_α, v kateri se raztoplja le 0,022 % C. Po tem pravilu avstenit pod temperaturo 912 °C ne bi bil več obstojen. Resnica pa je nekoliko drugačna. Atomi ogljika, vrinjeni v rešetke gama železa, bodo prehod iz kubično ploskovno centrirane v kubično prostorsko centrirano rešetko zavirali. Več jih bo, kasneje (pri nižji temperaturi) bodo prehajali. Če je ogljika 0,77 %, bo prehod šele pri temperaturi 727 °C. V diagramu Fe-Fe₃C nam torej linija GS kaže temperaturo premene, odvisno od koncentracije ogljika v jeklu.



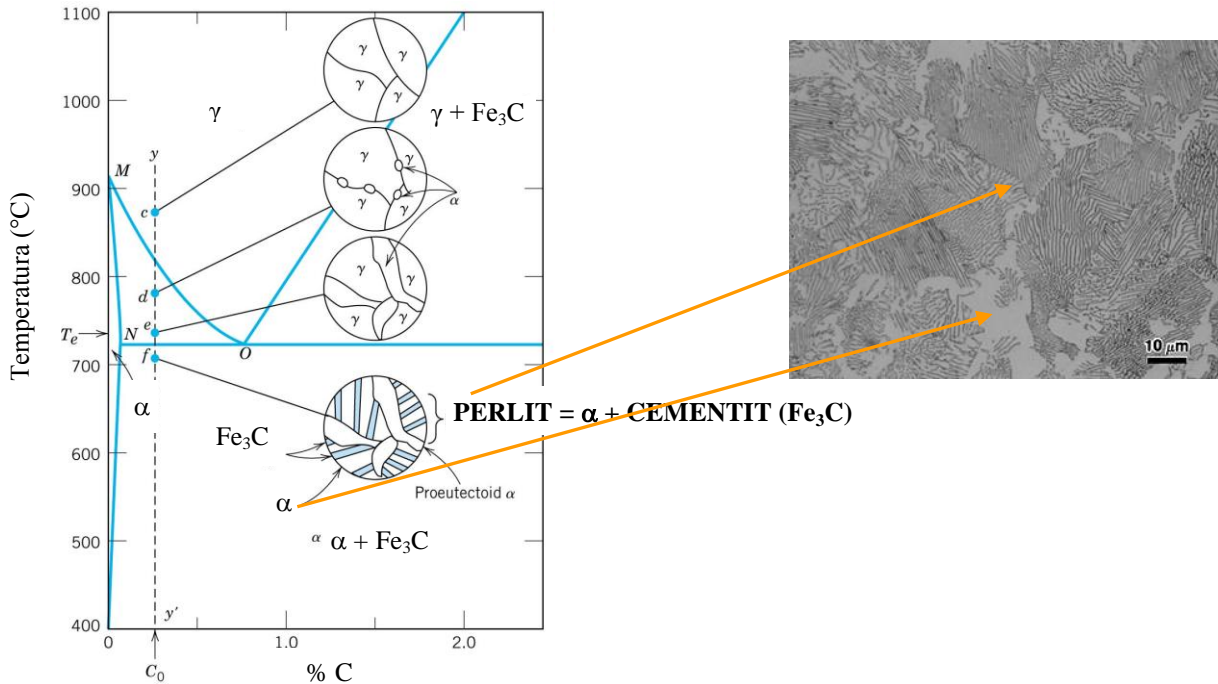
Slika 5 prikazuje diagram metastabilnega ravnotežnega stanja železo-železokarbid (Fe-Fe₃C). Kubična ploskovno centrirana rešetka z raztopljenim ogljikom, imenovana avstenit predstavlja stabilno fazo v temperaturnem območju okoli 900 °C do 1100 °C pri vsebnosti ogljika večji od 0.02 %. Pri sobni temperaturi imamo stabilno fazo s kubično prostorsko centrirano rešetko alfa α-železo z raztopljenim ogljikom, imenovano ferit, ter metastabilno fazo imenovano cementit. Volumski delež cementita narašča z vsebnostjo ogljika. Stabilni sistem železo-ogljik, v katerem sta pri sobni temperaturi tako ferit kot grafit stabilni fazi, je za jekla nezanimiv. Pri zelo počasnem ohlajanju jekla z 0.5 % ogljika s temperature 1000 °C prihaja najprej do izločanja padevtektoidnega ferita iz homogenega avstenita, nakar sledi izločanje ferita in cementita v grobozrnato evtektično fazo na temperaturi 723 °C.



Slika 5: Fazni diagram stanja železo-železovkarbid
Vir: Lasten

2.1.1 Mikrostrukture znotraj diagrama Fe-Fe₃C za jekla

Pri podvektoidnih jeklih se transformacija v podvektoidni *ferit* prične na mejah avstenitnih zrn. Hitrost širjenja feritnih zrn pada z upadanjem temperature. Zaradi tega volumski delež feritnih zrn, transformiran pri temperaturi pod linijo Ac₁ narašča z upadanjem velikosti predhodnih avstenitnih zrn (slika 6).



Slika 6: Kristalizacija podvektoidnega jekla
Vir: Prirejeno po: <http://www.ccm.udel.edu/Personnel/homepage/> (10. 8. 2010)

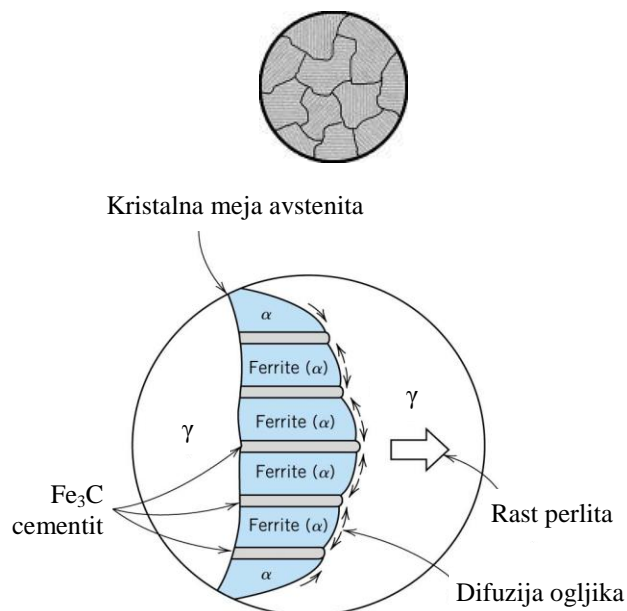
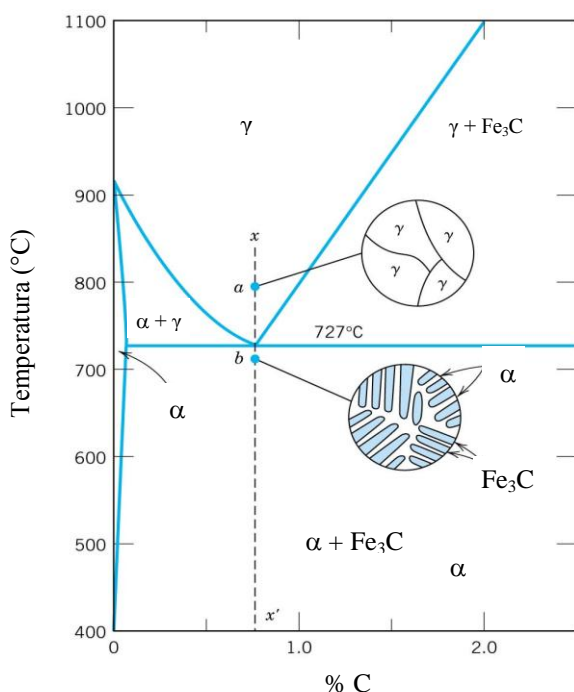
Ferit

- Izloča se pred začetkom eutektoidne reakcije.
- Tvorijo se na nekoherentnih mejah.
- Feritna zrna rastejo enakomerno v vseh smereh.
- Z večanjem podhladitve se večja težnja da bi rasel v obliki ploščic.

Pri nelegiranih jeklih z eutektično koncentracijo, katerih vsebnost ogljika sovpada z najnižjo temperaturno točko obstojnosti avstenita, se avstenit sočasno transformira v ferit in cementit (<http://www.struers.com/>, 2. 7. 2010). Takšno izločanje, ki se dogaja v temperaturnem območju okoli 700 °C in 600 °C, privede do nastanka metastabilne lamelarne oblike oziroma mikrostrukture imenovane *Perlit*, prikazane na sliki 7. Medlamelarna razdalja v perlitni mikrostrukturi kot funkcija debeline ferita oziroma cementita se zmanjšuje z nižjimi transformacijskimi temperaturami. Področje s paralelno razvrščenimi cementitnimi lamelami v feritni osnovi, se imenuje kolona.

Perlit - eutektoidna reakcija,

- Nastane z eutektoidno transformacijo avstenita:
- $\gamma \Leftrightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$
- V običajnih razmerah nastane lamelni perlit.
- Z večanjem podhladitve se povečuje nukleacijska hitrost.

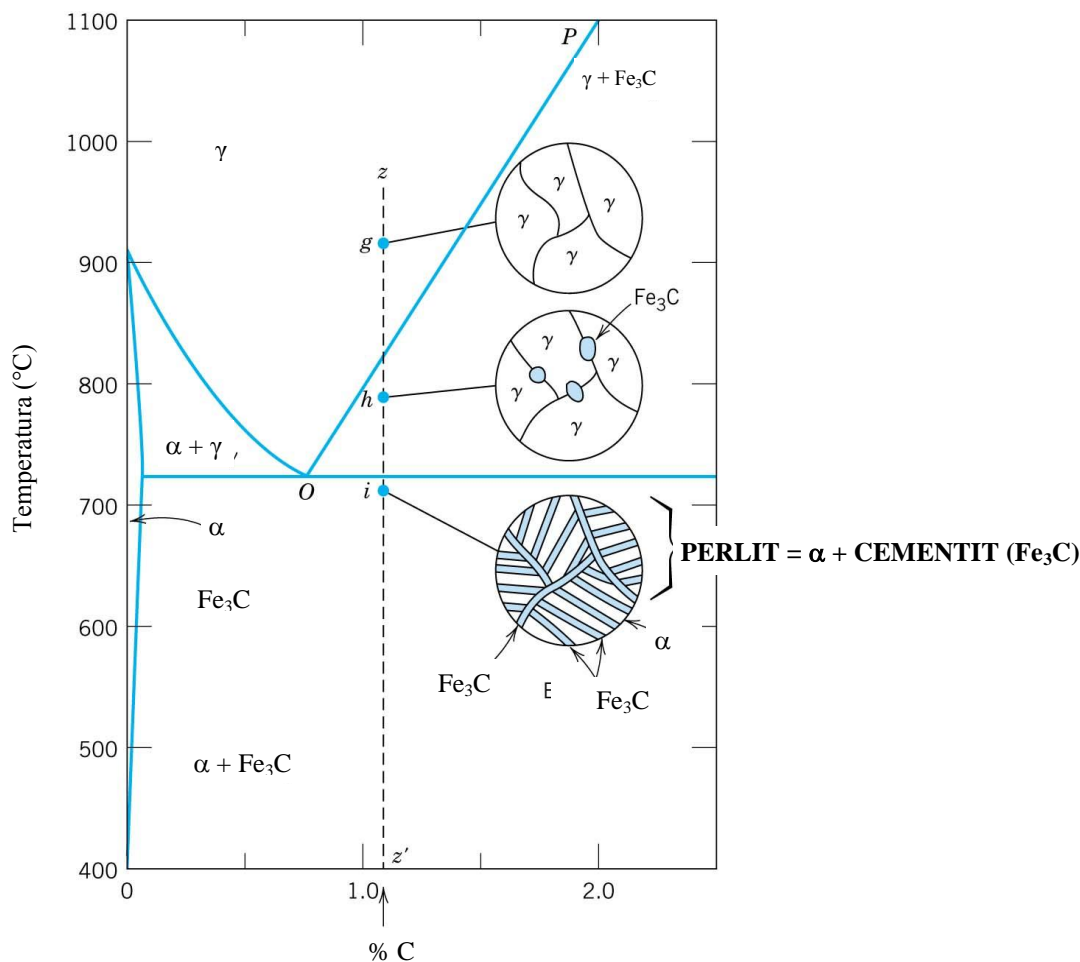


Slika 7: Kristalizacija eutektoidnega jekla

Vir: Prirejeno po: <http://www.ccm.udel.edu/Personnel/homepage/> (10. 8. 2010)

Nadeutektoidna jekla – sekundarni cementit

- Izloča se iz avstenita (slika 8).
- Mrežasto obda kristalna zrna perlita.
- Neugodna mikrostruktura (trd, krhek).



Slika 8: Kristalizacija nadevtektoidnega jekla

Vir: Prirejeno po: <http://www.ccm.udel.edu/Personnel/homepage/> (10. 8. 2010)

2.2 OSNOVE O FAZNIH PREMENAH – FAZNIH TRANSFORMACIJAH

Ohlajanje oziroma gašenje strojnega dela s hitrostjo ohlajanja, ki je večja od hitrosti ohlajanja na mirnem zraku je zelo pomembna faza pri določevanju njegovih lastnosti. Vsem vrstam so skupne novo nastale mikrostrukture, ki se ne ujemajo s termodinamičnim ravnotežnim ohlajanjem. Na lastnosti strojnega dela lahko vplivamo tudi z izbiro vrste in količine legirnih elementov, torej z izbiro različnih jekel, s čimer vplivamo na spreminjanje termodinamičnih stanj oziroma vplivamo na temperaturne premene pri segrevanju in ohlajanju. Pri jeklih lahko z različnimi vrstami sredstev za gašenje dosežemo celoten razpon hitrosti ohlajanja in s tem tudi različne mikrostrukture od martenzitne do feritno-cementitno-karbidne mikrostrukture (Schumann, 1983, 25). Ugotovimo lahko, da je za zagotavljanje ustreznih lastnosti strojnih delov potrebna pravilna izbira hitrosti ohlajanja oziroma izbira ustreznega sredstva za gašenje jekel pri kaljenju.

Fazne transformacije popisujemo s časovno difuzijo ogljika, železa in legirnih elementov. Ohlajanje trdne raztopine avstenita s hitrostjo ohlajanja, ki je večja od kritične hitrosti, zagotavlja brezdifuzijske procese v jeklu pri toplotnih obdelavah. Posledica tega so nižje transformacijske temperature, kot je ta pri ravnotežnem ohlajanju in omogoča nastanek prenasočene trdne raztopine ogljika v tetragonalni kristalni rešetki in mikrostrukturo imenovano martenzit. Rezultat takega ohlajanja je povezan z nastankom metastabilnih faz, ki nastane pri pogoju neravnotežnega ohlajanja. V industrijski proizvodnji različnih strojnih

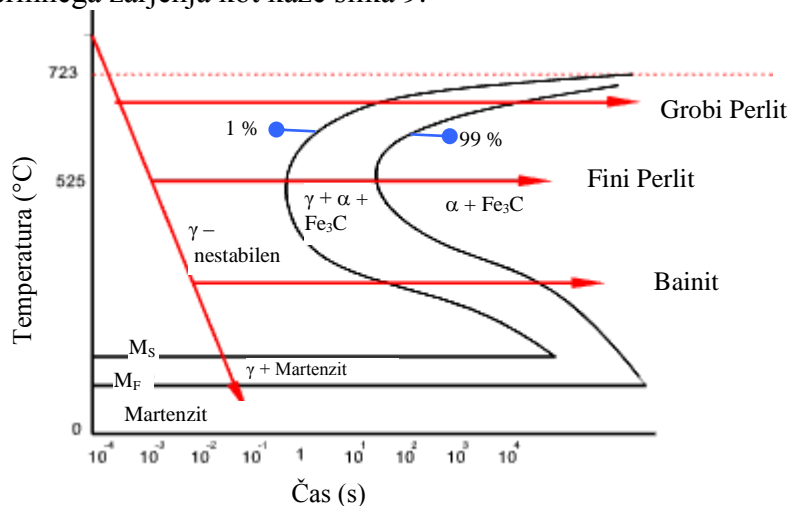
delov iz jekel lahko torej z neravnotežnimi pogoji ohlajanja dosežemo v njih želene mehanske lastnosti. Pri vrednotenju procesa toplotne obdelave popisujemo želene mikrostrukturne spremembe in možne stranske vplive, kot so velikost in oblika deformacij in/ali notranje napetosti po gašenju. Želene in nezaželene spremembe po gašenju lahko znatno vplivajo na obratovalno sposobnost strojnih delov. Glavni namen toplotne obdelave je torej zagotovitev predvsem želene lastnosti strojnega dela, včasih pa omejujemo tudi stranske vplive kot npr. velikost in potek zaostalih napetosti.



Pomembno orodje za razumevanje določenih mikrostruktur nam podajajo različni transformacijski diagrami. Fazne preme delimo na *difuzijske* in *brezdifuzijske* (martenzitne). Potek faznih premen lahko pregledno prikažemo s transformacijskimi diagrami. Ti diagrami nam dajo informacijo o tem, kaj pri neki premeni nastane in kako hitro potekajo reakcije. Procese, ki potekajo pri konstantni temperaturi, prikažemo v *izotermnih premenskih diagramih*, ki so znani kot diagrami TTT (*t*ime-*t*ransformation-*t*emperature). Kadar poteka premena v temperaturnem intervalu, uporabljamo *kontinuirne premenske diagrame*, ki so znani kot diagrami CCT (*c*ontinuous-*c*ooling-*t*ransformation).

a) TTT diagrami

V izotermnih premenskih diagramih potekajo preme *pri konstantni temperaturi*. V najenostavnejšem primeru dobimo samo eno homogeno začetno fazo. Nato hitro ohladimo (lahko tudi segrejemo) na neko temperaturo, pri kateri začetna faza ni termodinamsko stabilna in zato postopoma razpada. Pri tem se pretvarja v termodinamsko bolj stabilno fazo (lahko tudi v več faz). Proces poteka, dokler se ne doseže **termodinamsko ravnotežje** pri temperaturi izotermnega žarjenja kot kaže slika 9.



Slika 9: Izotermni premenski diagram

Vir: Prirejeno po: iert.in/iron-and-its-phases/ (22. 5. 2010)

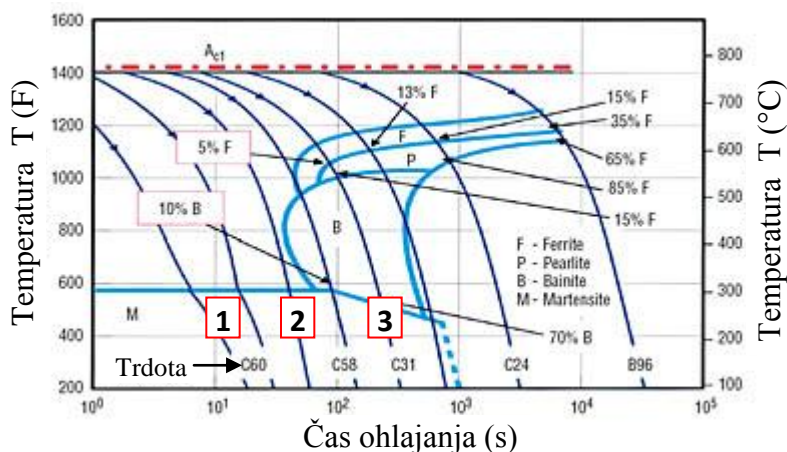
Leva krivulja, ki je označena z 1 %, povezuje čase, ko pri različnih temperaturah nastane 1 % nove faze, krivulja označena z 99 % pa čase, ko nastane 99 % nove faze. Krivulji imata obliko črke C – hitrost preme je največja v srednjem temperaturnem območju. Pri višjih temperaturah je majhna gonilna sila za premo, pri nizkih pa difuzija. Spodnji diagram kaže povečevanje deleža nove faze s časom. Prikazuje kinetiko preme, to je njeno hitrost. Krivulji imata obliko črke S.

b) CCT diagrami

Pri kontinuirnem premenskem diagramu ohlajamo z začetne temperature z različnimi ohlajevalnimi hitrostmi. Začetna faza postane pri nižjih temperaturah termodinamsko

nestabilna in se začne pretvarjati v stabilnejše faze. Med ohlajanjem merimo temperaturo in ugotavljamo čase začetka premen. V primerjavi z izotermnim diagramom je krivulja za isto reakcijo v kontinuirnem diagramu pomaknjena k daljšim časom in nižjim temperaturam.

Na sliki 10 je značilen kontinuirni diagram. Krivulje označene z 1, 2 in 3 kažejo spreminjanje temperature s časom – to so ohlajevalne krivulje. Krivulja 1 prikazuje izmed vseh treh najhitrejše, krivulja 3 pa najpočasnejše ohlajanje. Če ohladimo material dovolj hitro do nizkih temperatur, lahko preprečimo difuzijo. Ta diagram kaže, da se z dovolj hitrim ohlajanjem (krivulji 1 in 2) lahko izognemo premeni. Premena poteče le pri krivulji 3, medtem ko pri ohlajanju po krivuljah 1 in 2 ni premene. Difuzijskim premenam se lahko izognemo z dovolj hitrim ohlajanjem.



Slika 10: Kontinuirni premenski diagram

Vir: Prirejeno po: <http://www.industrialheating.com/> (21. 5. 2010)

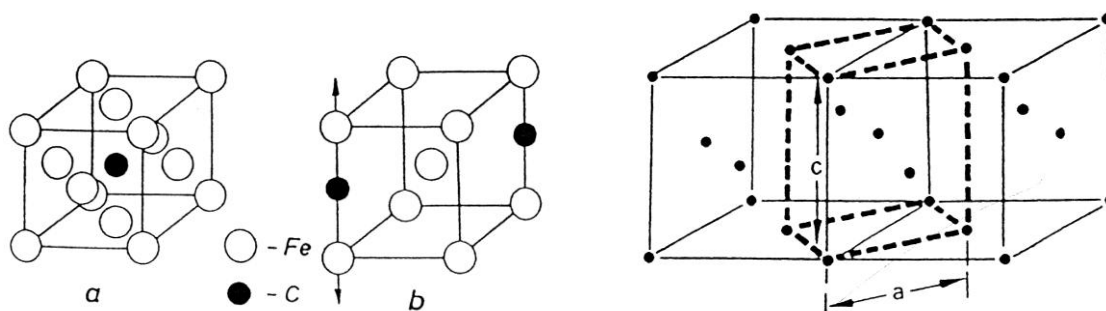
Pri brezdifuzijskih premenah, kot že ime pove, ni difuzije. Premena ne poteka s posamičnim premikanjem atomov (difuzija), temveč se v neki prostornini atomi hkrati koordinirano premaknejo (ne vsak po svoje!). Brezdifuzijske premene lahko potekajo, če nek material zelo hitro ohladimo do temperatur, kjer je hitrost difuzije zanemarljiva. Navadno jo lahko dosežemo v sistemih, v katerih poteka eutektoidna reakcija.

Pri hitrostih nad zgornjo kritično hitrostjo ohlajanja se avstenit s ploskovno centrirano kristalno rešetko (slika 11a) transformira v tetragonalno, ki je pravzaprav deformirana ploskovno centrirana kristalna rešetka železa alfa, v kateri ostane ves ogljik prisilno raztopljen. Zaradi pomanjkanja časa difuzija ne poteka, ogljik se ne more izločiti in ostane ujet v prisilni prenasičeni trdni raztopini. To mikrostrukturo imenujemo Martenzit.

Martenzit



- Brezdifuzijska pramena.
- Značilna velika trdota.
- Trdota sorazmerna deležu ogljika.
- Delež martenzita odvisen samo od temperature.



Slika 11: Nastanek martenzita (a in b) in nastanek ploskovno centriranega tetragonalnega martenzita (c)

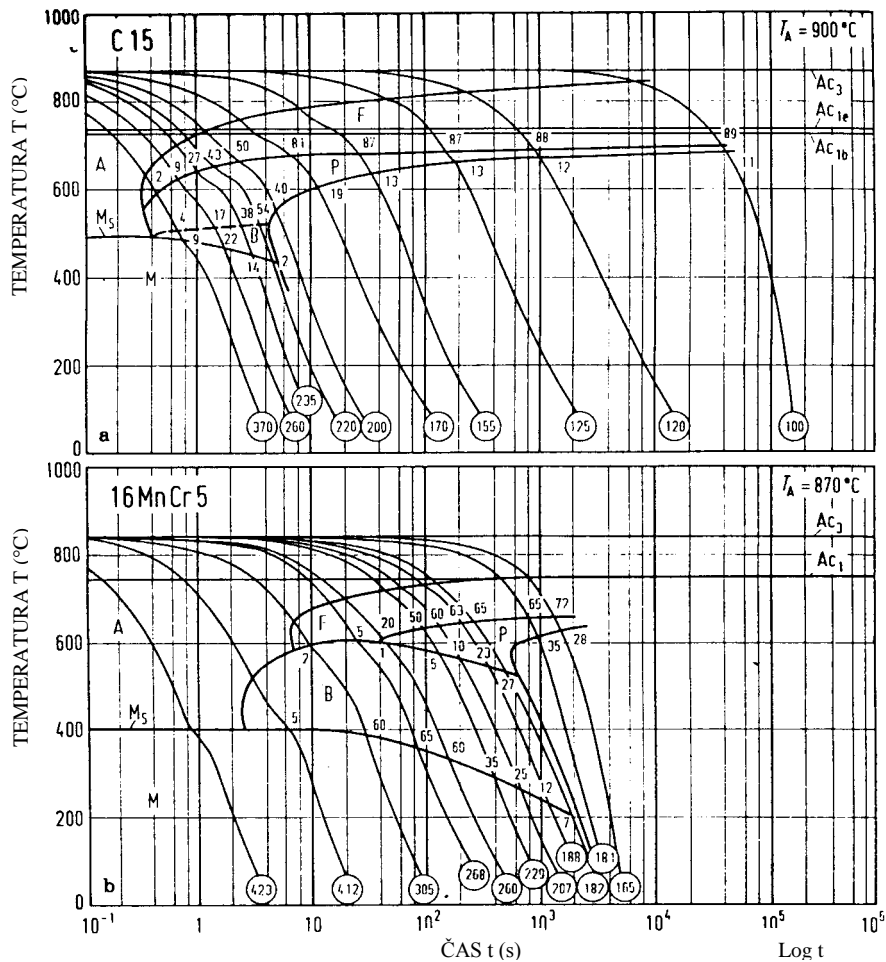
Vir: Kovač, 1999, 75

Bainit

- Nastane pri večjih podhladitvah, ko postaja gonilna sila za razpad avstenita vedno večja, difuzivnost pa vedno manjša.
- Zgornji peresasti bainit (na mejah z avstenitom se izločajo drobne ploščice cementita).
- Spodnji igličasti (še drobnejše ploščice karbida znotraj ferita).
- Drobna disperzna mikrostruktura.

Znotraj temperaturnega območja med martenzitom in perlitom se avstenit pretvori v bainit z mehanizmom delno kontrolirane difuzije. V področju zgornjega bainita se avstenit najprej transformira v bainitni ferit z obliko grobega igličastega martenzita. Med feritnimi conami imamo še vedno z ogljikom obogateni zaostali avstenit, ki se z nadaljno transformacijo izloča v cementit in ostale karbide. Tako dobimo feritno osnovo obogateno s karbidi.

Transformacijsko obnašanje jekel pri ohlajanju/gašenju iz avstenitnega področja tako najpogosteje zasledujemo v CCT diagramih. Slika 12 prikazuje dva tipična primera. Zgornji diagram velja za ogljikovo jeklo za cementacijo C15, medtem ko velja spodnji diagram za malolegirano jeklo 16MnCr5. Temperaturna linija začetka martenzitne transformacije M_s je pri malolegiranim jeklu za okoli $100\text{ }^\circ\text{C}$ nižja kot pri ogljikovem jeklu. Poleg tega opazimo, da se prva difuzijska transformacija na istem jeklu 16MnCr5 prične s približno desetkratno zakasnitvijo v primerjavi z jeklom C15. Zaključimo lahko, da je pri legiranih jeklih potek transformacijskega diagrama pomaknjen k nižjim temperaturam in v desno stran, to je k daljšim časom transformacije. Lokalne transformacije lahko napovemo le pri pogoju, da se ohlajanje na različnih mestih valjastega vzorca ujema z ohlajevalno krivuljo, ki ustreza CCT diagramu.



Slika 12: CCT diagram z vrisanimi ohlajevalnimi krivuljami za jeklo za cementacijo C15 in malolegirano jeklo 16MnCr5
Vir: Rose in Hougardy, 1972, 33

Povzetek

Fazne preme so sestavljene iz dveh osnovnih korakov: nastanka nove faze in rasti nove faze. Za nastanek nove faze je potrebna podhladitev pod termodinamsko ravnotežno temperature preme, kajti med osnovno in novo fazo nastane fazna meja, ki ima višjo energijo. V trdnem je potek faznih premen še težavnejši, ker jih ovira deformacijska energija. Hitrost nastajanja nove faze je majhna pri malih podhladitvah zaradi majhne gonilne sile, pri velikih pa zaradi majhne difuzivnosti. Proces nastajanja in rasti sta lahko ločene ali pa se prepletata. Pri faznih premenah se atomi ali premaknejo samo za nekaj medatomskega razdalja ali pa morajo prepotovati velike razdalje.

Fazne preme delimo na difuzijske in brezdifuzijske. Kinetiko premen lahko nazorno prikazemo v premenskih diagramih: izotermnih in kontinuirnih.



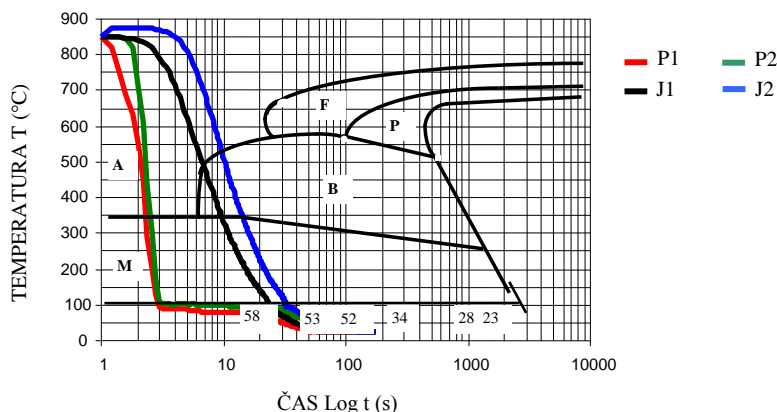
Razmislite, rešite, odgovorite:

- Zakaj je pred potekom strjevanja potrebna podhladitev taline?
- Podajte podobnosti in razlike med homogeno in heterogeno nukleacijo.
- Zakaj se kritična velikost delca zmanjšuje z večanjem podhladitve?
- V čem se razlikuje nastanek nove faze v tekočem in trdnem?
- Kakšen vpliv imajo kristalne napake na nastanek in rast faz v trdnem?
- V taline aluminijevih zlitin dodajamo zlitino Al-Ti-B, ki povzroči nastanek velikega števila enakoosnih kristalnih zrn. Kako lahko na osnovi študija tega poglavja pojasnite njen učinek?

- Zakaj uporabljamo premenske diagrame?
- Poiščite podobnosti in razlike med izotermnim in kontinuirnim premenskim diagramom! Poiščite te diagrame v tem učbeniku.
- Kaj se zgodi, ko delna dislokacija drsi skozi kristal?
- Poiščite podobnosti in razlike med difuzijsko in martenzitno premeno.

3 TOPLOTNA OBDELAVA

Na sliki 13 je v diagramu kontinuiranega ohlajanja vrisana transformacija podhlajenega avstenita in dejanske ohlajevalne krivulje na štirih mestih toplotno obdelanega zobnika.

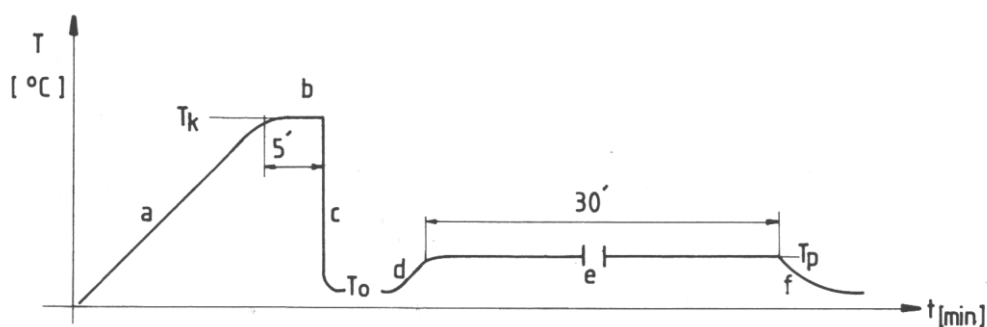


Slika 13: Diagram kontinuiranega ohlajanja CCT z vrisanimi krivuljami ohlajanja merjenimi na 4 posameznih merilnih mestih, gašenje v vodi, testiranje pri 25 °C, brez mešanja
Vir: Lasten

Z gašenjem zobnika v vodi smo dobimo v površini martenzitno mikrostrukturno, ki pa v osrednjem delu postopno preide v neznaten delež bainitne mikrostrukture. Trdota je zato v osrednjem delu valjastih vzorcev nekoliko nižja in se giblje okoli 55 HRC. Iz analize ohlajevalnih hitrosti vrisanih v CCT diagramu lahko ugotovimo maksimalne temperaturne razlike med merilnima mestima P1 in J1 za primer gašenja v vodi ...

Lastnosti materiala so odvisne od lastnosti kristalnih zrn, njihove velikosti in razporeditve. Kemična sestava zlitine lastnosti opredeli le približno (določi topnost, tip kristalne rešetke itd.). Natančneje pa opredeli mikrostrukturno materiala šele tehnološki postopek, ki določa razmere pri strjevanju zlitine, segrevanju in ohlajanju, plastičnem preoblikovanju ...

Postopek, pri katerem s spreminjanjem temperature materiala (odločilni sta tudi hitrost in trajanje sprememb temperature) spreminjamo lastnosti materiala, imenujemo toplotna obdelava. Toplotna obdelava je opredeljena predvsem s temperaturo in časom, zato jo nazorno prikazujemo v temperaturno-časovnih (T-t) diagramih, kot prikazuje slika 14. Temperaturno-časovni diagram na sliki predstavlja: a – počasno segrevanje, b – zadrževanje na temperaturi kaljenja T_k pet minut, c – hitro ohlajanje na temperature okolice T_o , d – počasno segrevanje na temperature popuščanja T_p , e – zadrževanje na temperaturi T_p trideset minut in f – ohlajanje na T_o .



Slika 14: Temperaturno časovni diagram
Vir: Grum in Ferlan, 1987, 55



S toplotnimi obdelavami v industrijskih razmerah lahko dosežemo različne mikrostrukture, ki morajo glede na obratovalne razmere strojnega dela zagotoviti ustrezno žilavost in natezno trdnost. Najugodnejša razmerja med žilavostjo in natezno trdnostjo lahko zagotovimo s homogeno porazdelitvijo legirnih elementov, fino zrnatostjo mikrostrukture osnovnega materiala in primerno gostoto dislokacij. Fino zrnatost je eden od pomembnih mehanizmov, s katerim lahko povečujemo žilavost kot tudi razmerje med žilavostjo in natezno trdnostjo. Od vseh zgoraj omenjenih mikrostruktur po toplotni obdelavi oziroma gašenju ima popuščeni martenzit najbolj homogeno porazdelitev in s tem največje razmerje med žilavostjo in natezno trdnostjo, temu sledi popuščeni bainit, transformiran pri nižjih temperaturah. Najslabše trdnostne lastnosti ima feritno-perlitna mikrostruktura, kar pomeni, da je za strojne dele potrebna toplotna obdelava, zato pa se znižuje žilavost. Ferit je skoraj čisto železo z zelo majhno količino ogljika in nizko natezno trdnostjo, perlit pa je cementitno-feritna mikrostrukturalna kombinacija z visoko natezno trdnostjo. Posledica takšnega stanja je nehomogeno porazdeljena natezna trdnost na mikronivoju glede na volumen materiala oziroma strojnega dela.

Glede na omenjeno razlago lahko ugotovimo, da nam popuščeni martenzit daje optimalno mikrostrukturo, toda zagotovitev te mikrostrukture po celotnem prerezu velikih komponent je nemogoče. Na srečo pa nam v številnih aplikacijah feritno-perlitne mikrostrukture še zagotavljajo ustrezno žilavost in natezno trdnost, zato v takih primerih toplotna obdelava ni potrebna. Izdelki so tako cenejši, ostane pa pomembno vprašanje, kako je z obdelovalnostjo tega materiala.

S toplotno obdelavo razumemo različne načine segrevanja obdelovancev do določene temperature, zahteve pri pregrevanju na določeni temperaturi in končno ponovno ohlajanje strojnih delov. Pri toplotni obdelavi strojnih delov je zelo pomembno, da uskladimo segrevanje z vidika pravilne izbire temperature in časa segrevanja oziroma pregrevanja, da zagotovimo zelene mikrostrukturne spremembe. Pri toplotni obdelavi strojnih delov pa je potrebno izvajati tudi ohlajanje z ustrezno hitrostjo ohlajanja, da zagotovimo tudi po ohlajanju pričakovane mikrostrukturne spremembe. Toplotna obdelava jekel je z današnjo razvojno strojno tehniko in tehnologije v popolnosti obvladljiva in pogosto visoko avtomatizirana. Za procese toplotne obdelave, ki potekajo pri visokih hitrostih ohlajanja, je potrebno izbrati ustrezno hladilno sredstvo. Ohlajanje oziroma gašenje jekla pri toplotni obdelavi je tehnološka faza, ki v znatni meri vpliva na mikrostrukturne spremembe in s tem na kvaliteto strojnega dela. Končne lastnosti strojnega dela so torej odvisne od doseženih hitrosti ohlajanja, katere pogojujejo ustrezne mikrostrukturne spremembe.

Pri spreminjanju temperature nastajajo spremembe v materialu. Brez oklevanja lahko navedemo naslednje vzroke:

- nekatere snovi imajo pri različni temperaturi različni tip kristalne rešetke (glej ohlajevalno krivuljo železa);
- pri višji temperaturi lažje poteka difuzija, to je premik atomov po kristalnih mrežah;
- pri višjih temperaturah rastejo kristalna zrna in mikrostruktura postaja grobozrnata.

Kako pa vplivata čas in hitrost sprememb temperature?

- Difuzija in rast kristalnih zrn sta počasna pojava. Zaradi tega bo odločilen tudi čas zadrževanja na temperaturah, pri katerih potekata omenjena pojava.
- Posledica sprememb topnosti in kristalnih rešetk je izločanje posameznih faz ali raztapljanje. Oboje je vezano na premike atomov v kristalnih mrežah in prav tako zahteva čas. Hitrost segrevanja in ohlajanja je lahko tako počasna, da te spremembe dopušča, ali pa tako hitra, da jih ne dopušča (kaljenje jekla).

- Pri nekaterih toplotnih obdelavah se pomembno spremeni kemična sestava materiala (cementiranje, nitriranje). Spremembe sestave so zaradi počasnosti omejene le na površino. Zaradi tega izvajamo takšne toplotne obdelave šele proti koncu tehnoloških procesov, ko imajo izdelki že domala končno obliko.

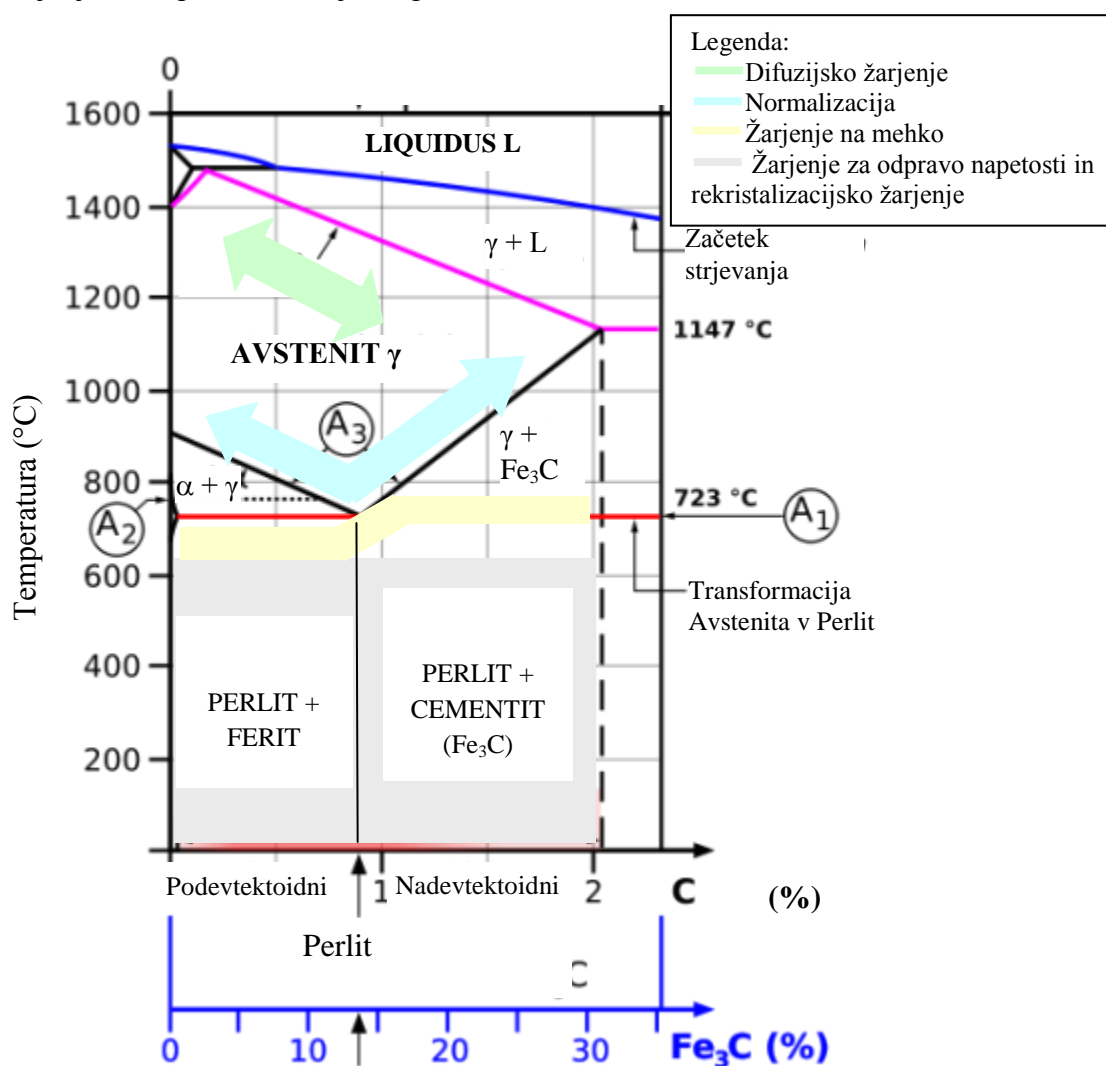
Spoznajmo se z najpomembnejšimi vrstami toplotne obdelave!

3.1 VRSTE TOPLOTNIH OBDELAV

3.1.1 Žarjenje

Žarjenje je toplotna obdelava, pri kateri predmet segrejemo in ga pri določeni temperaturi zadržujemo toliko časa, da se izvršijo nekatere spremembe. Na koncu predmet brez posebne naglice ohladimo na zraku ali celo v peči. Po namenu ločimo vrste žarjenja kot jih prikazuje slika 15 na:

- difuzijsko žarjenje ali homogeniziranje,
- normalizacijsko žarjenje ali normaliziranje,
- žarjenje na mehko,
- rekristalizacijsko žarjenje ali rekristaliziranje,
- žarjenje za odpravo notranjih napetosti.



Slika 15: Diagram Fe-Fe₃C in temperaturna polja posamezne vrste žarjenja

Vir: juliocorrea.wordpress.com/.../ (22. 7. 2010)

a) Difuzijsko žarjenje

Pri strjevanju zlitin z delno ali popolno topnostjo v trdnem stanju imajo raztopinski kristali, ki se strde najprej, drugačno kemično sestavo od kristalnih zrn, ki nastanejo kasneje. Med strjevanjem poteka difuzija, s katero se sestave kristalov izenačujejo.

Predmet segrejemo na visoko temperaturo, saj poteka difuzija pri višjih temperaturah hitreje. Čas žarjenja je odvisen od mikrostrukture in vrste materiala, ki ga žarimo (različne hitrosti difuzije). Med difuzijskim žarjenjem seveda rastejo kristalna zrna, večja se tudi debelina sloja oksidov na površini predmeta. Tako dobimo po difuzijskem žarjenju predmet z enakomerno kemično sestavo, grobozrnato strukturo in oksidirano površino.

b) Normalizacijsko žarjenje

Normalizacijsko žarjenje je toplotna obdelava, s katero popravljamo strukturo (ne sestavo) materiala. Namen je dobiti fino zrnato strukturo z enakimi lastnostmi v vseh smereh. Tehnološki postopki, pri katerih dobimo neprimerno strukturo, ki jo z normaliziranjem popravimo, so valjanje (grobozrnata in plastna struktura), kovanje (grobozrnata struktura), litje (grobozrnata in usmerjena struktura), varjenje (različna struktura zvara, prehodne cone in osnovnega materiala).

Tem postopkom sledi normalizacijsko žarjenje. Princip normaliziranja je, da segrejemo material do temperature, pri kateri se struktura spremeni v avstenit, zadržujemo na tej temperaturi 5–10 minut, da dobimo homogen avstenit, in nato ohladimo. Segrevamo torej nad linijo GSE.

c) Žarjenje na mehko

Pri razpadu avstenita (raztopina C v Fe γ) v perlit (evtektoid iz ferita in cementita) se običajno cementit oblikuje v sloje – lamele. Vmes so sloji ferita. Perlit je torej nekakšen sendvič, sestavljen iz slojev mehkega ferita in trdega cementita. Pri obdelavi z odrezavanjem mora na primer stružni nož rezati mehke in trde sloje. Orodje se hitreje obrabi zaradi rezanja trdih slojev cementita v perlitu. Prav tako nam trde lamele cementita povzročajo težave pri postopkih preoblikovanja. Veliko boljša je obdelovalnost, če obdelovanec poprej žarimo na mehko. Med takim žarjenjem namreč preide perlit iz lamelarne oblike v zrnato. To dosežemo z žarjenjem predmetov okrog temperature Ac1 (prehod perlit – avstenit). Struktura, ki jo dobimo pri žarjenju na mehko, je sestavljena iz dokaj mehke feritne osnove in zrnatega cementita. Pri obdelavi z odrezavanjem reže nož mehko feritno osnovo, trša zrna cementita pa večinoma odriva v mehko osnovo obdelovanca ali odrezka. Obraba orodij je zaradi tega bistveno manjša. Manj težav je tudi pri preoblikovanju, saj material lepše »teše«. Pri kaljenju občutljivih jekel se zmanjša nevarnost pokanja.

c) Rekrystalizacijsko žarjenje

Pri preoblikovanju jekla v hladnem stanju (hladno valjanje pločevine in trakov, vlečenje) se jeklo zelo utrdi. Zmanjša se mu duktilnost, povečata pa se trdota in trdnost. Da bi takšno stanje popravili, moramo jeklo žariti. Pri žarjenju utrjenega jekla se pri temperaturah nad 400 °C začne rekrystalizacija. To pomeni, da začno rasti nova nedeformirana kristalna zrna. Temperatura rekrystalizacijskega žarjenja ni odvisna le od vrste jekla, temveč tudi od stopnje deformiranosti (torej utrditve) jekla. Bolj je material utrjen, nižja je temperatura rekrystalizacijskega žarjenja (proti 400 °C za podeltektoidna jekla).

d) Žarjenje za odpravo notranjih napetosti

Nekateri tehnološki postopki so za obdelovanec zelo grobi – varjenje zaradi krčenja zvara pri ohlajanju, grobo odrezavanje zaradi velikih sil in temperatur, hitro ohlajanje pri toplotnih obdelavah zaradi neenakomernosti ohlajanj itd. Pri takšnih postopkih imajo obdelovanci notranje napetosti, ki jih krivijo. Na kritičnih mestih lahko celo počijo. Zato obdelovance žarimo, da odpravimo napetosti.

Žarjenje za odpravo notranjih napetosti strukture skoraj ne spremeni. S segrevanjem smo znižali mejo plastičnosti materiala. Vse notranje napetosti, ki segajo čez mejo plastičnosti, povzročijo plastične deformacije in se sprostijo. Po žarjenju predmete počasi ohlajamo na zraku ali v peči.

3.1.2 Kaljenje

Najpomembnejši vplivi za uspešno kaljenje strojnih delov so vpliv materiala in vpliv hladilnega sredstva.

1. Vpliv materiala:

- kemična sestava jekla;
- specifična toplota jekla;
- toplotna prevodnost jekla;
- temperatura avstenitizacije;
- čas segrevanja do izenačevanja temperature med površino in jedrom;
- čas pregrevanja na temperaturi avstenitizacije, da zagotovimo homogeno avstenitno mikrostrukturo;
- masa obdelovanca oziroma strojnega dela;
- oblika obdelovanca oziroma strojnega dela;
- odnos med površino in volumnom strojnega dela;
- stanje površine strojnega dela;
- gibanje strojnega dela v hladilnem sredstvu.

2. Vpliv hladilnega sredstva:

- vrsta hladilnega sredstva;
- temperatura hladilnega sredstva;
- temperatura uparjanja, latentna toplota, specifična toplota, toplotna prevodnost, viskoznost in druge lastnosti hladilnega sredstva;
- načini gašenja, kot je potopno gašenje ali gašenje z brizganjem.

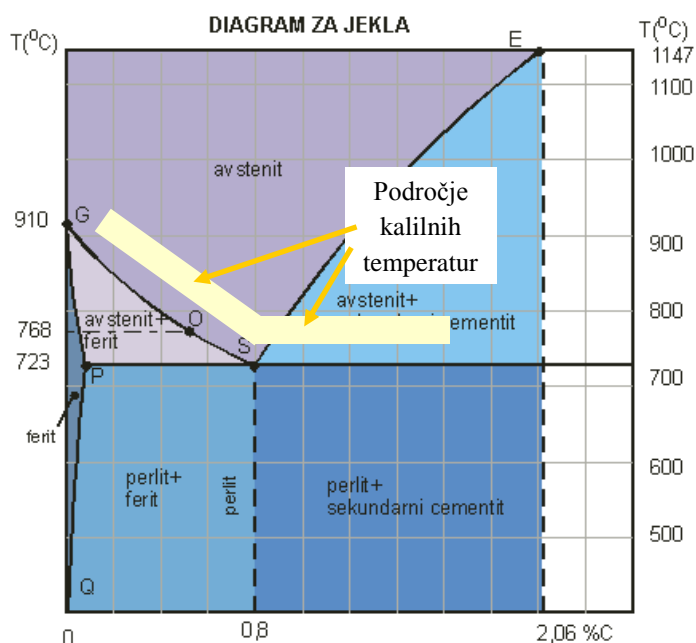
Vplivnost posameznih značilnosti obdelovanca oziroma strojnega dela je zelo različna, zato je tudi zelo težavna izbira pravih pogojev toplotne obdelave, da zagotovimo želene mehanske lastnosti. Vendar pa pri kaljenju danega strojnega dela iz določenega jekla lahko vplivamo le z izbiro hladilnega sredstva in z gibanjem strojnega dela in/ali hladilnega sredstva.

V praktičnih aplikacijah se standardna (predpisana) temperatura avstenitizacije običajno pri ogljikovih in malolegiranih jeklih giblje od 30–50 °C nad linijo Ac_3 pri času 30 minut. Pri teh pogojih zagotovimo proces segrevanja strojnih delov v področju homogenega avstenita, ki omogoča optimalne mehanske lastnosti po toplotni obdelavi. Po zaključeni fazi avstenitizacije se velikost kristalnih zrn lahko močno spreminja v odvisnosti od časa in temperature. V splošnem naraščanje velikosti avstenitnih zrn povzroča upadanje transformacijskih hitrosti oziroma večja zrna ferita, perlita, bainita in martenzita. Hitrost ohlajanja ima bistveni vpliv na nastanek mikrostrukture po gašenju. Visoke hitrosti ohlajanja avstenit transformirajo v martenzit, nizke v ferit oziroma perlit, vmesne hitrosti pa v ferit, perlit, bainit, martenzit in v nekaterih primerih pri močno oziroma malolegiranih jeklih pa ostane tudi nekaj zaostalega avstenita.

Če avstenit počasi ohlajamo, pod temperature Ac_1 , razpade v evtektoid, imenovan perlit. Razlog za razpad raztopinskih kristalov je v prostorsko centrirani kristalni rešetki $Fe\alpha$, kjer

ogljik ni topen. Razpad avstenita v perlit zahteva čas, saj gre za premike atomov po kristalnih rešetkah. Zato razpade v perlit le, če je ohlajanje dovolj počasno. Pri hitrem ohlajanju za razpad ni dovolj časa. Atomi ogljika ostanejo ujeti v kristalnih rešetkah Fe α . Prisilno raztopino ogljika v alfa železu imenujemo martenzit. Vrtnjen atom ogljika v Fe α razrine rešetko, ki ni več kubična, temveč tetragonalna. Toplotno obdelavo, pri kateri s hitrim ohlajanjem preprečimo razpad avstenita v perlit, imenujemo kaljenje. Martenzitna struktura, ki jo dobimo, se odlikuje z visoko trdoto. Slaba stran martenzitne strukture so nizka žilavost in notranje napetosti. Slednje z naknadnim popuščanjem nekoliko zmanjšamo.

Kaljenje je torej sestavljeno iz segrevanja na kalilno temperaturo, zadrževanja na tej temperaturi (homogeniziranje) in ohlajanja z nadkritično hitrostjo. Kaljenju sledi popuščanje do 200 °C, s katerim nekoliko zmanjšamo notranje napetosti, a obdržimo martenzitno strukturo. Področja kalilnih temperatur v Fe-Fe $_3$ C diagramu prikazuje slika 16.



Slika 16: Področje kalilnih temperatur v Fe-Fe $_3$ C diagramu (levo) in kaljenje padevtektoidnega jekla v T, t diagramu (desno)

Vir: Prirejeno po: www2.sts.si/.../desni_del_diagrama_med_2.htm/ (10. 5. 2010)

Iz diagrama je razvidno, da kalimo padevtektoidna jekla s temperatur, ki so 30 do 50 °C višje od GS linije, torej s področja čistega avstenita. Če bi kalili z nižje temperature, bi dobili poleg martenzita v strukturi še feritna zrna, ki so zelo mehka. Pri nadevtektoidnih jeklih je podoben primer, vendar nas nastanek sekundarnega cementita ne moti, saj je že sam po sebi trd. Področje kalilnih temperatur je torej od 30 do 50 °C nad GSK linijo.

Časa, ki je potreben za pregretje obdelovanca, ne smemo po nepotrebem podaljševati. Dobili bi namreč grobozrnat avstenit, po kaljenju pa grobozrnat martenzit.

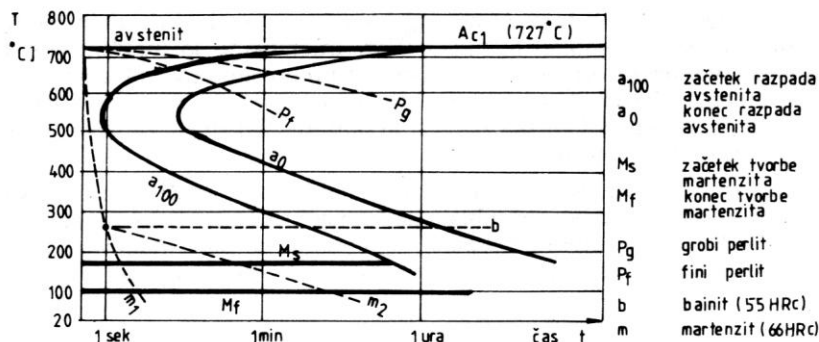
Pomudimo se se pri ohlajanju. Hitrost ohlajanja, ki je ravno dovolj velika, da avstenit ne more razpasti v perlit, se imenuje kritična hitrost ohlajanja in je značilna za zlitino (jeklo ali litino). Če zlitino ohlajamo z nadkritično hitrostjo, dobimo martenzitno strukturo. V resnici so možni tudi vmesni rezultati. Odvisnost hitrosti ohlajanja in strukture, ki jo dobimo pri tem, kaže TTT diagram (slika 17). Tudi TTT diagram je odvisen od sestave zlitine.



Če v področju podhlajenega avstenita prenehamo ohlajati, se podhlajeni avstenit izotermno preoblikuje v bainit. Bainit je struktura, ki je manj trda od martenzita, a bolj žilava. Takšno toplotno obdelavo imenujemo izotermno poboljšanje. Pri

izotermnih transformacijah so krivulje, ki zaznamujejo začetek in konec razpada avstenita, drugačne.

Pri jeklih z manjšim odstotkom ogljika je kritična hitrost ohlajanja tako velika, da jo dosežemo le z ohlajanjem v vodi. Legirana jekla imajo manjšo kritično hitrost ohlajanja in jih lahko kalimo v olju, ki počasneje odvaja toploto kot voda. Nekatera posebno močno legirana jekla so kaljiva kar na zraku. Pri takšnih jeklih je vprašanje, kako jih ne zakaliti (zaradi lažje obdelave). Kalilna sredstva so torej voda, olje ali zrak. Podatke o kalilnih temperaturah, ustreznem kalilnem sredstvu in temperaturah popuščanja najdete v priročnikih in katalogih.



Slika 17: TTT diagram in različni načini ohlajanja

Vir: Grum in Ferlan, 1987, 66

Pri počasnem ohlajanju nastane običajni perlit (P_g). Z nekoliko hitrejšim ohlajanjem povzročimo razpad avstenita v drobnolamelarni perlit (P_f). Če ohlajamo z nadkritično hitrostjo, preidemo v področje martenzita (m_1). Iz diagrama vidimo, da smemo med ohlajanjem hitrost tudi nekoliko zmanjšati. To izvedemo tako, da spremenimo sredstvo, v katerem ohlajamo. Pri takšnem načinu dobimo še vedno martenzit (m_2), ki pa ima nekoliko manjše notranje napetosti.

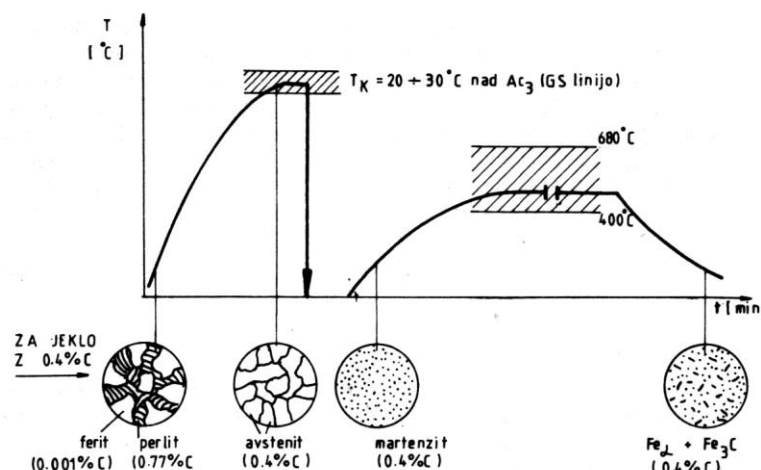
Kaljenju sledi popuščanje, s katerim želimo zmanjšati notranje napetosti. Pri tem spremenimo tetragonalni martenzit v kubični martenzit. Pri popuščanju smo omejeni s temperaturo razpada martenzita. Martenzit (prisilna raztopina C v $Fe\alpha$) je pri ogljikovih jeklih obstojen le do 200 °C. Pri višji temperaturi začne razpadati v popuščeni martenzit. Če hočemo torej ohraniti visoko trdoto obdelovanca, ga smemo popuščati (in uporabljati) le do temperatur, ki so nižje od temperature razpada martenzita.

Pri legiranih jeklih so razmere drugačne in jih smemo popuščati tudi pri višjih temperaturah. Prav tako popuščamo nekatera podevtektoidna jekla pri temperaturah med 530 in 680 °C, kadar trdota ni pomembna. Kaljenje s tako visokim popuščanjem imenujemo *poboljšanje*.

3.1.3 Poboljšanje

Trdnost jekla je odvisna predvsem od vsebnosti ogljika. Z naraščanjem odstotka ogljika pa ne raste le trdnost, temveč se obenem povečuje tudi trdota jekla, manjša pa se njegova žilavost. Da bi dobili jekla s primerno žilavostjo in še ustrezno trdnostjo, uporabljamo toplotno obdelavo, ki jo imenujemo poboljšanje. Jekla za poboljšanje vsebujejo od 0,35 do 0,6 % C. Struktura takšnega jekla v žarjenem stanju sestoji iz mehkih feritnih zrn (50 do 25 %) in tršega perlita (50 do 75 %). S poboljšanjem dobimo strukturo, ki je podobna perlitni. To pomeni, da je ves ferit enakomerno pomešan s cementitom. Takšno strukturo dosežemo s kaljenjem in popuščanjem pri visokih temperaturah, kot prikazuje slika 18.

Lastnosti jekla so po poboljšanju močno odvisne od temperature popuščenja, ki v bistvu določi, koliko in v kaj bo razpadel martenzitet. Čim višja bo temperatura popuščenja, tem večje bodo žilavost, razteznost in kontrakcija. Hkrati se seveda močno zmanjšujeta trdota in trdnost.



Slika 18: T-t diagram poboljšanja in sheme mikrostruktur v posameznih fazah poboljšanja

Vir: Grum in Ferlan, 1987, 67

3.1.4 Površinsko utrjevanje

S toplotnimi obdelavami, ki smo jih do sedaj obravnavali (žarjenje, kaljenje in poboljšanje), smo spreminjali lastnosti po vsej prostornini izdelka. Pri površinskem utrjevanju bomo spoznali nekaj postopkov, s katerimi bomo spreminjali le lastnosti površinskega sloja materiala. Postopke uporabljamo vedno proti koncu proizvodnega procesa, ko imajo izdelki že precej dokončno obliko.

Načeloma imajo izdelki po površinskem utrjevanju površino, ki je trda, odporna proti obrabi in včasih še proti koroziji ter ima bolj ali manj žilavo jedro. Površinsko utrjevanje lahko izvedemo z lokalno toplotno obdelavo (a) in toplotno-kemičnimi obdelavami, pri katerih med obdelavo spremenimo tudi kemično sestavo površinskega sloja (b, c, d):

- lokalno kaljenje – toplotno obdelamo le določen površinski sloj materiala;
- cementiranje – površinski sloj obogatimo z ogljikom in toplotno obdelamo;
- nitiranje – površinski sloj obogatimo z dušikom; sloj je naravno trd;
- karbonitriranje – površinski sloj obogatimo z ogljikom in dušikom ter ga toplotno obdelamo.

Izbira posameznega postopka je odvisna od zaželenosti površine izdelka in jedra izdelka.

a) Lokalno kaljenje

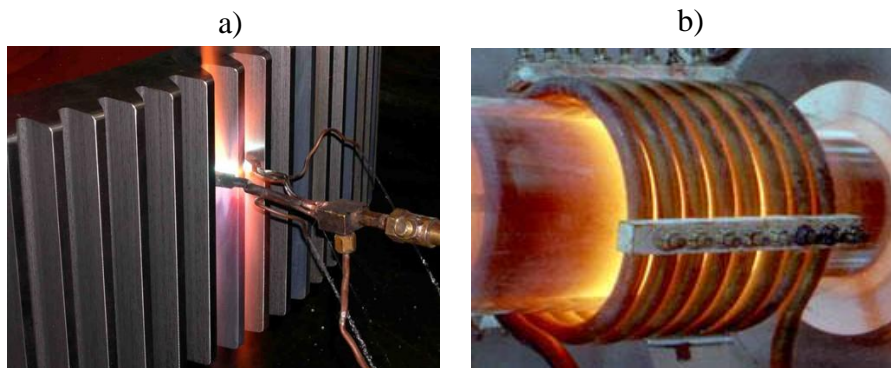
Lokalno kaljenje uporabljamo, kadar potrebujemo trdo površino in žilavo jedro, ki bo sposobno prenesti tudi dinamične obremenitve. Pri najzahtevnejših primerih delamo tako, da izdelek najprej poboljšamo, nato na posameznih delih še površinsko kalimo. Tako izdelujejo motorne gredi, odmične gredi, zobnike in druge strojne dele.

Lokalno površinsko kaljenje lahko izvedemo kot plamensko ali kot indukcijsko kaljenje.

Pri *plamenskem* kaljenju z acetilenskimi gorilniki segrejemo površinski sloj na kalilno temperaturo, nato ga s prho ali potapljanjem hitro ohladimo (slika 19a). Martenzitno strukturo

dobimo le v sloju, ki je bil segret do dovolj visoke temperature, to je do kalilne temperature T_k .

Med slojem zakaljenega materiala (martenzit) in osnovno strukturo (perlit + ferit ali sam perlit) je prehodni sloj delno kaljene strukture. Poleg jekel za poboljšanje lahko plamensko kalimo tudi sivo in temprano litino. Drugi način lokalnega kaljenja je *induktivno* kaljenje, kjer z induktorjem vzbujaemo v površini vrtilne tokove. Le-ti zaradi električne upornosti segrejejo površinski sloj na kalilno temperature (slika 19b). Oblika induktorja mora biti prilagojena načinu segrevanja. Globino segretega sloja določajo frekvenca vzbujevalne napetosti (skin efekt), specifična moč in čas segrevanja. Način ohlajanja je podoben kot pri plamenskem kaljenju.



Slika 19: a) Plamensko kaljenje površin zob s pomikom, b) Induktor prilagojen površini obdelovanca s pomikom

Vir: a) www.thermobondflame.com/Services.page?i=3/ (6. 7. 2010)
 b) www.prestigetthermal.com/induction-div.htm/ (6. 7. 2010)

b) Cementiranje

Cementiranje je toplotno-kemični postopek površinskega utrjevanja. Uporablja se pri izdelkih, ki so dinamično in obrabno bolj obremenjeni kot v primeru površinsko kaljenih. Jekla za cementiranje vsebujejo 0,05 do 0,2 % C, zato so dovolj plastična in žilava. Boljše mehanske lastnosti dosežejo jekla, ki vsebujejo legirne elemente (Cr, V, Nb, Ni, Mo). Cementiranje se sestoji iz dveh faz. V prvi fazi (ogljčenje) se površina izdelka obogati z zadostno količino ogljika. Druga faza je kaljenje.

Kadar želimo pri takšnih obdelovancih doseči trdo površino, jih moramo v površinskem sloju najprej naogljčiti. Ker je difuzija ogljika mogoča le pri višjih temperaturah, ogljčimo površino pri temperaturah med 850 in 950 °C. Čas ogljčenja je odvisen od načina dela (sredstva), temperature, materiala in želene globine plasti. Običajne globine ogljčenja so od 0,5 do 1 mm, hitrosti ogljčenja pa od 0,1 mm/uro v trdnih sredstvih do 0,5 mm/uro v solnih kopelih. Naogljčen sloj vsebuje do 0,9 % ogljika. Temu primerna bo tudi kalilna temperatura za površino. Če želimo kaliti tudi jedro, ga moramo kaliti pred kaljenjem površine, saj ga segrejemo na višjo temperaturo.

Pri lokalnem kaljenju in pri cementiranju dosežemo na površini trdote med 62 in 66 HRC. Poleg povečanja trdote naraste tudi odpornost proti dinamičnim obremenitvam, saj se pojavijo v površinskem sloju tlačne zaostale napetosti (martenzit ima večji specifični volumen), ki preprečujejo nastanek razpok.

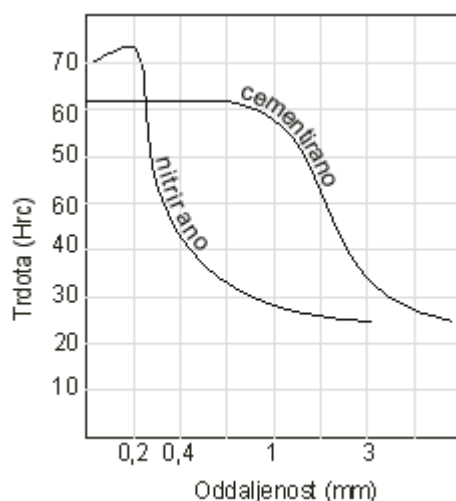
c) Nitiranje

Nitiranje je toplotno-kemična obdelava, pri kateri obdelovanec segrevamo v amoniaku (NH_3) toliko časa, da se v površinskem sloju ustvarijo nitridi z veliko naravno trdoto (do 1300 HV). Nitiran sloj je debel le nekaj desetink milimetra, proces pa počasen, saj dosežemo 0,3 mm debel sloj šele v dvajsetih urah.

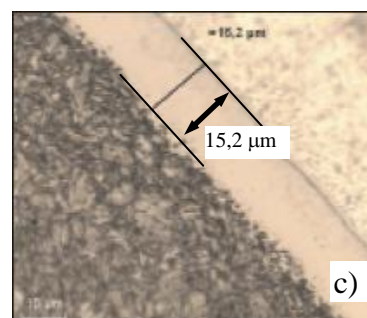
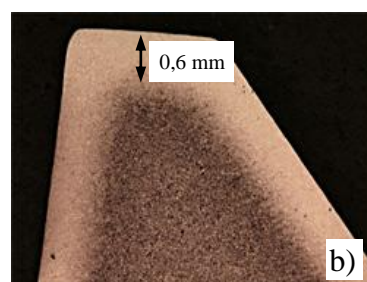
Temperatura nitiranja je nižja od temperature ogljičenja in znaša od 500 do 600 °C. Jekla za nitiranje so v bistvu jekla za poboljšanje. Boljše rezultate nitiranja dobimo, če so legirana s Cr, Al, Mo ali V. Nitiramo jih v poboljšanem stanju. Primerjalni diagram doseženih trdot in globin pri nitiranju in cementiranju je na sliki 20. Pri nitiranju dobimo na površini tanek sloj naravno trdih nitridov. S cementiranjem dosežemo manjše trdote, a na večjih globinah.

Nitiramo tudi orodna in hitrezna jekla. Pri takih jeklih nitiramo po kaljenju. Veliko površinsko trdoto ohranijo tudi pri višjih temperaturah (500 °C).

Znan je postopek Tenifer, pri katerem dosežemo poleg tanke spojinske cone še do 0,3 milimetra debelo difuzijsko cono. Največja kvaliteta mehkega nitiranja je povečana obstojnost proti obrabi in povečanje korozijske obstojnosti.



a)



Slika 20: a) Odvisnost nitiranega in cementiranega sloja v odvisnosti od oddaljenosti od površine; b) Primer površinskega sloja cementiranja; c) Primer površinskega sloja nitiranja

Vir: Prirejeno po: www.ipsenusa.com/nitride.shtml/ (6. 7. 2010)

d) Karbonitriranje

Razmerje med difuzijo ogljika in dušika je odvisno od temperature. Pri višjih temperaturah karbonitriranja dobimo v površini več ogljika, pri nižjih pa več dušika. Ustrezne so tudi lastnosti izdelka. Po visokotemperaturnem karbonitriranju (830 °C) dobimo martenzitni površinski sloj s površino, ki ima nekaj večjo obrabno obstojnost zaradi nitridov. Po nizkotemperaturnem karbonitriranju (700 °C) dobimo podoben, a tanjši površinski sloj, vendar kalimo z nižje temperature in na zraku. V obeh primerih tudi povečamo obstojnost površine proti koroziji.



Vprašanja in naloge:

- Kaj je podevtektoidno jeklo?
- Kakšna premena se dogaja pod linijo GS v diagramu Fe-Fe₃C?
- Iz katerih faz sestoji mikrostruktura nadevtektoidnih jekel?

- Katere faze sestavljajo mikrostrukturo feritne sive litine?
- Po katerih lastnostih se feritna in perlitna siva litina najbolj razlikujeta?
- Kaj določa tehnološki postopek toplotne obdelave?
- Zakaj pri toplotni obdelavi sploh nastajajo spremembe v materialu?
- Po difuzijskem žarjenju dobimo grobozrnato strukturo. Razložite, kako in zakaj jo odpravimo.
- Zakaj se pri žarjenju zmanjšajo notranje napetosti?
- Kaj je martenzit?
- Kalite kos jekla. Ali je možno, da boste v različnih delih obdelovanca dobili različne strukture?
- Kaj je kritična hitrost ohlajanja? Ali bi jo lahko razbrali iz TTT diagrama?
- Poboljšanje je sestavljeno iz kaljenja in popuščenja pri temperaturah nad 200 °C. Katero od obeh faz spreminjamo in zakaj?
- V čem je bistvena razlika med lokalnim kaljenjem in cementiranjem?

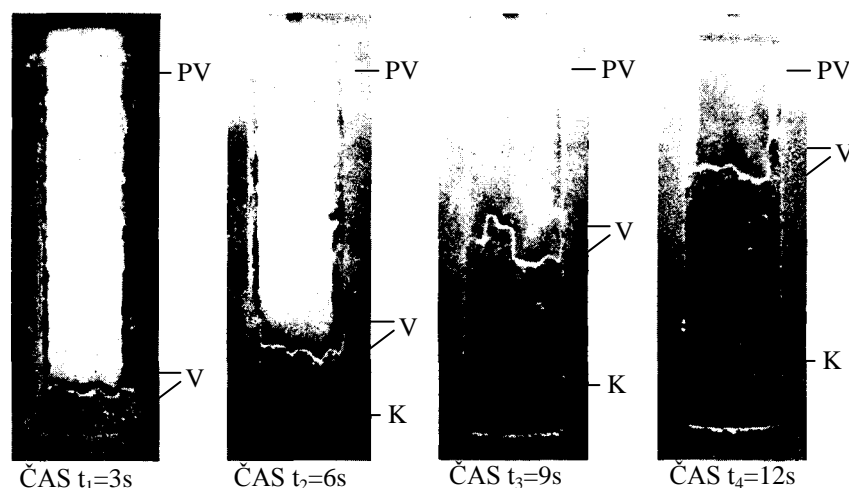
3.1.5 Mehanizem gašenja pri toplotni obdelavi

Mehanizem prenosa toplote med imerzijskim oziroma potopnim ohlajanjem pogosto povezujemo s procesom vrenja, kajti temperatura obdelovanca, ki ga ohlajamo, običajno presega vrelnu temperaturo hladilnega sredstva. Že prvi sistematični eksperimenti raziskovalca Nukiyame iz leta 1930 so potrdili opisane razmere v okolici segretega obdelovanca, ki ga obdaja hladilno sredstvo.

Omočljivost obdelovanca med kaljenjem je zelo kompleksen pojav, na katerega vplivajo številni faktorji, ki še niso natančno določeni. Sprememba temperatur v steni obdelovanca, rezultirajoča iz geometrije in stanja površine, plasti oksidov in razlike tlakov v okolici sloja površina/hladilno sredstvo, zagotavlja popis pojava omočljivosti le s spreminjanjem koeficienta toplotne prestopnosti. Izhlapevanje hladilnega sredstva v smislu gravitacijskega premika parnih mehurčkov v okolici segrete površine obdelovanca povzroča ekstremno intenzivno konvekcijo in maksimalni odvod toplote na hladilno sredstvo. Od trenutka, ko se temperatura površine obdelovanca spusti pod temperaturo vrelišča hladilnega sredstva, je stena obdelovanca stalno omočena s fluidom. Hitrost širjenja omočljive fronte je določena s fizikalnimi lastnostmi hladilnega sredstva in obdelovanca. Te so:

- distribucija temperatur na površini obdelovanca;
- toplotna difuzivnost materiala obdelovanca;
- hrapavost površine in geometrija obdelovanca;
- temperatura vrelišča in Leidenfrostova temperatura za dano hladilno sredstvo;
- dinamična viskoznost, toplotna kapacitivnost in površinska napetost;
- temperatura kopeli;
- prisilna konvekcija.

Tipični primer časovnega premika omočljive fronte na obdelovancu opisuje slika 21. Čas, potreben za popolno omočljivost od spodnjega do zgornjega robu vzorca, je okoli 20 sekund.



Slika 21: Procesi prehoda med tremi fazami plastnega vrenja – PV, vrenja – V in konvekcije – K med imerzijskim ohlajanjem CrNi vzorca, $\phi 25 \times 100$ mm; temperatura vzorca pred imerzijo je bila 860 °C v destilirani vodi s temperaturo 35 °C

Vir: Lasten

Za simetrične, oblikovno podobne obdelovance, enakih dimenzij in/ali mase, lahko zagotovimo želene lastnosti v njem po toplotni obdelavi. V praksi pa imamo različne izdelke/obdelovance, različnih velikosti in kompleksnosti oblik, zato je težje doseči želene lastnosti v njih. V tem primeru je oblika obdelovanca ter hladilna sposobnost sredstva za gašenje odločilnega pomena. Mehanizem imerzijskega gašenja lahko popišemo z naslednjimi fazami:

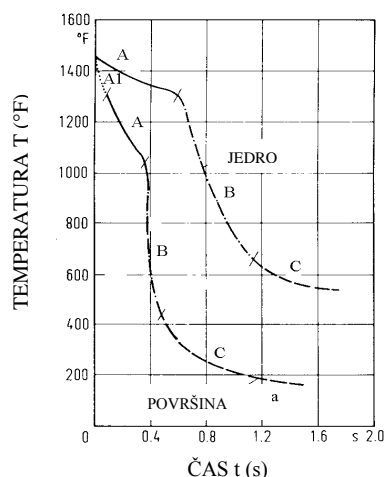
- volumen obdelovanca, ki ima določeno toploto pri segrevanju do temperature avstenitizacije;
- površina obdelovanca, preko katerega še poteka proces segrevanja oziroma ohlajanja;
- sposobnost hladilnega sredstva, ki mora zagotoviti prevzem toplote iz obdelovanca;
- sprememba sposobnosti hladilnega sredstva glede na temperaturo, način in pogoje mešanja in glede na pritisk hladilnega sredstva, ki obdaja obdelovanec.

Med potopitvijo obdelovanca v hladilno sredstvo prihaja med procesom imerzijskega ohlajanja do pomika parnega filma in s tem do turbulence vrenja in konvekcije. Minimalno gibanje hladilnega sredstva omogoča prenos akumulirane toplote na okolico, medtem ko se hladilno sredstvo lokalno pregreje in lahko celo izpari. V primerih, ko temperatura hladilnega sredstva prekorači vrelni temperaturo so ustvarjeni pogoji za nastanek in razvoj parnih mehurčkov okoli površine obdelovanca. Pri takšnih pogojih ohlajanja nastane izolacijski sloj v področju, ki se imenuje parni film. Obstoječnost parnega filma je definirana s trenutno temperaturo hladilnega sredstva na mejni površini med obdelovancem in hladilnim sredstvom. Nastanek in zadrževanje parnih mehurčkov ovira prestop toplote preko površine obdelovanca.

Pojasnjevanje mehanizma gašenja lahko izvedemo tudi na osnovi posnetih ohlajevalnih krivulj za posamezno hladilno sredstvo z ustrezno standardno metodo. Razvrščanje različnih sredstev za gašenje glede njegovih lastnosti pri ohlajanju lahko izvedemo z uporabo testnih vzorcev iz določenega materiala, velikosti in oblike. Testni vzorci so običajno iz materialov, ki nimajo faznih transformacij. Tako se izognemo napakam pri določevanju intenzivnosti ohlajanja določenega hladilnega sredstva zaradi dodatnega izvora toplote v temperaturnem

intervalu ohlajanja vzorca, nastale zaradi faznih transformacij. Temperaturne spremembe v testnem vzorcu zaznavamo z namestitvijo enega ali več termoelementov na značilnih mestih vzorca. Izmerjena temperaturno-časovna odvisnost ponazarja prenos toplote iz jedra obdelovanca ter preko mejne površine obdelovanca na hladilno sredstvo. Grafični prikaz izmerjenih faznih prehodov v jedru in na površini vzorca glede na izmerjeno temperaturo je prikazano na sliki 22. Iz slike lahko ugotovimo in popišemo prestop toplote iz obdelovanca na hladilno sredstvo s štirimi fazami in sicer:

Temperaturno področje A1 predstavlja začetno kontaktno fazo z relativno nepomembnim toplotnim prestopom. V tem ozkem časovnem intervalu, potrebnem za nastanek faze parnega filma prihaja do oblikovanja parnih mehurčkov. V primerih uporabe viskozni hladilnih sredstev temperaturnega področja A1 ne zasledimo, ker se že v času potopitve okoli vzorca formira faza parnega filma A. Leidenfrostov pojav oziroma oblikovanje nepretrganega izolacijskega parnega filma okoli testnega vzorca se pojavi v trenutku, ko odvedena toplote iz površine vzorca prekorači količino toplote potrebne za nastanek ustrezne stopnje nasičenosti parnih mehurčkov na enoto površine vzorca. V področju A se prenos toplote na hladilno sredstvo tako v principu dogaja z radiacijo oziroma sevanjem skozi izolacijski parni film. Področje B predstavlja fazo porušitve parnega filma in s tem pogoje najhitrejšega prevoda toplote iz obdelovanca na hladilno sredstvo. V trenutku porušitve parnega filma nastopi burno vrenje hladilnega sredstva zaradi intenzivnega prenosa toplote iz površine vzorca na okoliško hladilno sredstvo.



Slika 22: Značilne faze toplotnega prehoda znotraj ohlajevalnih krivulj
Vir: Lasten

Hitrost ohlajanja in velikost ter oblika parnih mehurčkov imajo pomemben vpliv na potek faze B, ki poteka do vrelna temperature hladilnega sredstva. Sledi področje popolne omočljivosti, ki je na diagramu označeno s fazo C. V tem področju je dosežena manjša hitrost ohlajanja predvsem zaradi odvajanja toplote preko površine vzorca na hladilni medij s prevodom in konvekcijo. Temperaturna razlika med točko vrenja in delovno temperaturo hladilnega sredstva določa hitrost prestopa toplote med procesom gašenja.

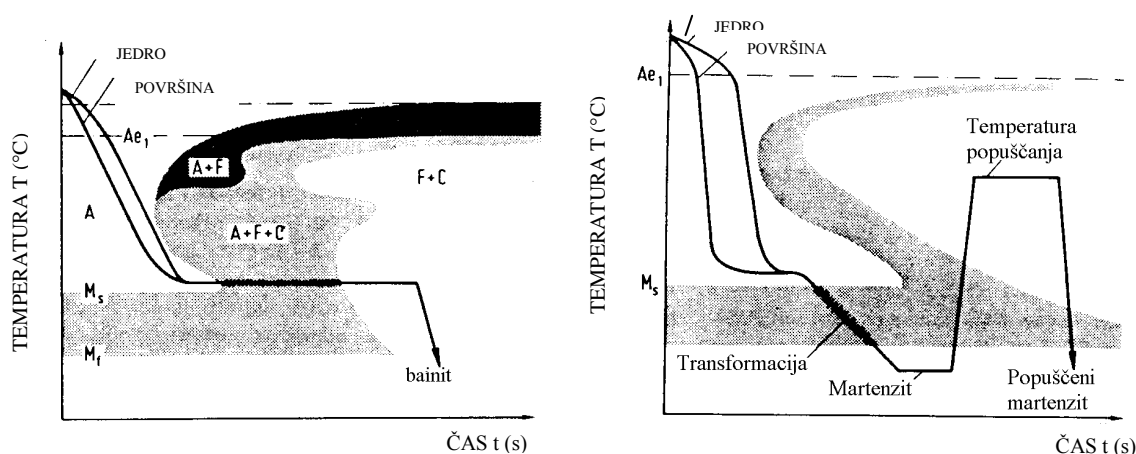
Čprav so dobljene ohlajevalne krivulje karakteristične za dani vzorec in hladilno sredstvo pa lahko primerjalno sklepamo na razmere pri ohlajanju različnih vrst in mas materialov testnih vzorcev. Z ustrezno namestitvijo termoelementov za merjenje temperature lahko preko izmerjenih ohlajevalnih krivulj določimo želene podatke. Če je potrebno lahko celoten oziroma izbran interval ohlajevalnih krivulj transformiramo v hitrosti ohlajanja podane v stopinjah celzija na sekundo.

Zelo pomemben vpliv na lastnosti prenosa toplote ima hitrost mešanja, to je zunanje izvedeno gibanje hladilnega sredstva. S prisilnim gibanjem hladilnega sredstva omogočamo hitrejšo, tako imenovano mehansko prekinitvev parnega filma v področju A in hkrati dosežemo tudi večje hitrosti ohlajanja v področju B in C. Sposobnost prestopa toplotne iz površine obdelovanca na hladilno sredstvo odvisi tudi od temperature hladilnega sredstva. Višje temperature hladilnega sredstva, naprimer v polimernih raztopinah, znižujejo karakteristične temperature prehodnih področij, kar podaljšuje trajanje faze A.

Kalilna olja postanejo pri višjih temperaturah bolj tekoča in sposobnejša za hitrejšo ohlajanje vzorcev. Višje temperature obdelovancev znižujejo viskoznosti in temperaturo plamenišča hladilnih olj oziroma drugih hladilnih sredstev. Povišanje začetne temperature obdelovanca na temperaturo avstenitizacije ima relativno majhen vpliv na odvod toplote s hladilnim sredstvom. Hitrost prestopa toplote lahko v splošnem naraste le zaradi večjih temperaturnih razlik na mejni površini obdelovanec/hladilno sredstvo. Najbolj opazno spremembo koeficienta toplotne prestopnosti lahko dobimo zaradi zelo hitre oksidacije na meji med vzorcem in hladilnim sredstvom pri višjih temperaturah. Hitrost prestopa toplote iz površine obdelovanca na hladilno sredstvo odvisi od debeline nastalih oksidov na površini obdelovanca.

3.1.6 Tehnike gašenja

Komercialno zelo pomembna je tehnika neprekinjenega ohlajanja do temperature podhlajenega avstenita v hladilnem sredstvu s temperaturo, ki omogoča izotermno transformacijo podhlajenega avstenita v bainit. S poznavanjem procesov faznih transformacij v določenem jeklu lahko dobimo zelo pomembne informacije za določevanje toplotne obdelave. Transformacija iz podhlajenega avstenita v druge mikrostrukture omogoča dobiti obdelovance z različnimi lastnostmi, ki jih lahko ločimo z različnimi vrednostmi trdot. Pri nižjih transformacijskih temperaturah, kjer nastane martenzitna premena, pa dosežemo največjo trdoto obdelovanca. Najprimernejšo mikrostrukturo dobimo po izotermični transformaciji na temperaturi v kljunu transformacijske krivulje, kot je prikazano na sliki 23.



Slika 23: a) Izotermična toplotna obdelava s področja podhlajenega avstenita – bainitno poboljšanje; b) Postopek kaljenja jekel z enako hitrostjo ohlajanja površine in jedra

Vir: Lasten

Postopek za poboljšanje jekla poteka po naslednjih fazah:

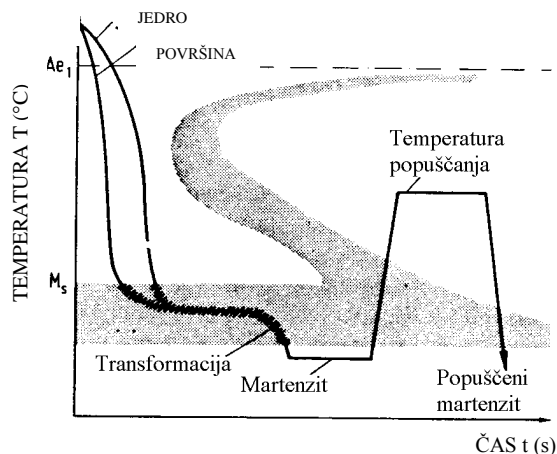
- segrevanje na temperaturo avstenitizacije (običajno v temperaturnem intervalu 788 °C do 871 °C);
- ohlajanje v hladilnem sredstvu s standardno temperaturo v območju 260 °C do 400 °C;
- izotermna transformacija podhlajenega avstenita v bainitno mikrostrukturo;
- nadaljno ohlajanje do sobne temperature, ki poteka običajno na zraku.

Glavni namen izotermne toplotne obdelave je v lastnostih obdelovanca, saj dosežemo večjo trdnost, duktilnost in zarezno žilavost pri dovolj visoki trdoti. Med ohlajanjem moramo zagotoviti, da je obdelovanec ohlajen na temperaturo hladilnega sredstva s hitrostjo ohlajanja v področju podhlajenega avstenita, ki ne dovoljuje vmestnih transformacij avstenita in da pri tej temperaturi zagotovimo popolno transformacijo podhlajenega avstenita v bainit.

Poboljšanje lastnosti obdelovanca s kaljenjem v martenzitni osnovi je tehnika neprekinjenega gašenja, ki ga sestavljata kaljenje in popuščanje. Obdelovance najprej ohlajamo v vročem olju ali vroči solni kopeli na temperaturo tik nad pričetkom nastajanja martenzitne mikrostrukture, kot je prikazano na sliki 23b. Na tej temperaturi, to je temperaturi hladilnega sredstva, držimo določen čas, ki je potreben za izenačevanje temperature po celotnem prerezu obdelovanca. Sledi ohlajanje obdelovancev z zmerno hitrostjo ohlajanja, da preprečimo dodatno povečanje zaostalih napetosti v obdelovancu med ohlajanjem. Med ohlajanjem do sobne temperature omogočamo enakomerno oblikovanje martenzita po prerezu obdelovanca. Po kaljenju obdelovanec dodatno popuščamo s ponovnim segrevanjem na temperaturo popuščanja.

Po kaljenju se površina in jedro obdelovanca sočasno transformirata v martenzitno mikrostrukturo. Enake transformacijske hitrosti po celotnem prerezu obdelovanca dajejo manjše deformacije obdelovanca in preprečujejo nastanek večjih zaostalih notranjih napetosti. Pri konvencionalnem gašenju se v transformacijskem prehodu pojavljajo velike temperaturne razlike po prerezu obdelovanca, kar povzroča znatno večje zaostale notranje napetosti zaradi temperaturnih in mikrostrukturnih razlik v fazi nastajanja martenzitne mikrostrukture.

Poznamo tudi tako imenovano *modificirano kaljenje*. Temperatura hladilnega sredstva je v primerjavi z zgoraj omenjenim postopkom kaljenja iz slike 24 nižja, zato zagotovimo večje ohlajevalne hitrosti v obdelovancu. Ta način toplotne obdelave se zato uporablja le v primerih, kjer želimo doseči večje globine prakaljenih slojev oziroma na materialih z manjšo sposobnostjo transformacijskega utrjevanja s toplotno obdelavo.



Slika 24: Modificiran postopek kaljenja jekel z enako hitrostjo ohlajanja površine in jedra
Vir: Lasten

3.1.7 Metode in standardi za laboratorijsko testiranje hladilnih sredstev

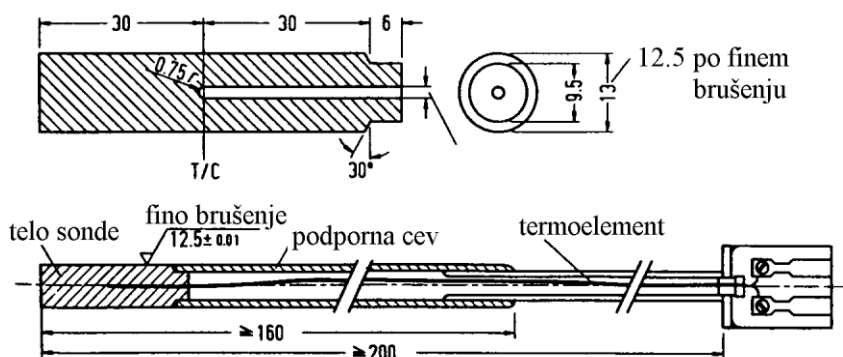
Izdelava strojnih delov običajno poteka na več obdelovalnih strojih za mehansko obdelavo, zato napake izmed delov v procesu toplotne obdelave povzročajo povečanje proizvodnih stroškov in zmanjšanje tržne sposobnosti podjetja. Velik pomen za toplotno obdelavo predstavlja razvoj in testiranje različnih hladilnih sredstev v smislu njihove klasifikacije glede hitrosti ohlajanja temperatur v posameznih intervalih pri ohlajanju. Z raziskavo ohlajevalnih procesov in izbiro najprimernejšega hladilnega sredstva se lahko izognemo napakam pri toplotni obdelavi in s tem dodatnim stroškom pri izdelavi delov (Rose in Hougardy, 1972, 12). Praktične razloge za uvajanje klasifikacije različnih hladilnih sredstev lahko popišemo z ugotovitvami:

- razvoj metod za izbiro hladilnih sredstev mora temeljiti na zahtevanih mehanskih lastnostih materiala izdelka pri poznanih toplotnih lastnostih materiala obdelovanca, ki mora zagotoviti želeno mikrostrukturno stanje v izdelku;
- razvoj metod za računalniško podporo za napovedovanje poteka trdote glede na optimizacijo procesa ohlajanja.

Za popis pojavov na mejni površini med vzorcem/obdelovancem in hladilnim sredstvom se danes uporabljajo različne metode. Tehnični komite znanstveno tehnološkega razvoja o hladilnih sredstvih je znotraj mednarodne zveze za toplotno obdelavo, s kratico IFHT (International Federation of Heat Treatment) predstavil dva predloga za standardizacijo in sicer:

- laboratorijsko testiranje hladilnih olj, ki je že predložen kot mednarodni standard ISO/DIS 9950;
- laboratorijsko testiranje polimernih raztopin, ki bo sprejet v bližnji prihodnosti.

Razvrščanje različnih sredstev za gašenje glede njegovih lastnosti pri ohlajanju lahko izvedemo z uporabo testnih vzorcev iz določenega materiala, ki imajo prirejeno velikost in obliko vzorca. Testni vzorci, v nadaljevanju sonda, so običajno iz materialov brez faznih transformacij. Tako se izognemo napakam pri določevanju intenzivnosti ohlajanja določenega hladilnega sredstva zaradi dodatnega izvora toplote vsled faznih transformacij v temperaturnem intervalu ohlajanja vzorca. Sondo potopimo v hladilno sredstvo z avtomatskim pomikom, da zagotovimo enake razmere pri imerziji in s tem realne ter primerljive rezultate. Oblika sonde z izmerami je podana na sliki 25.



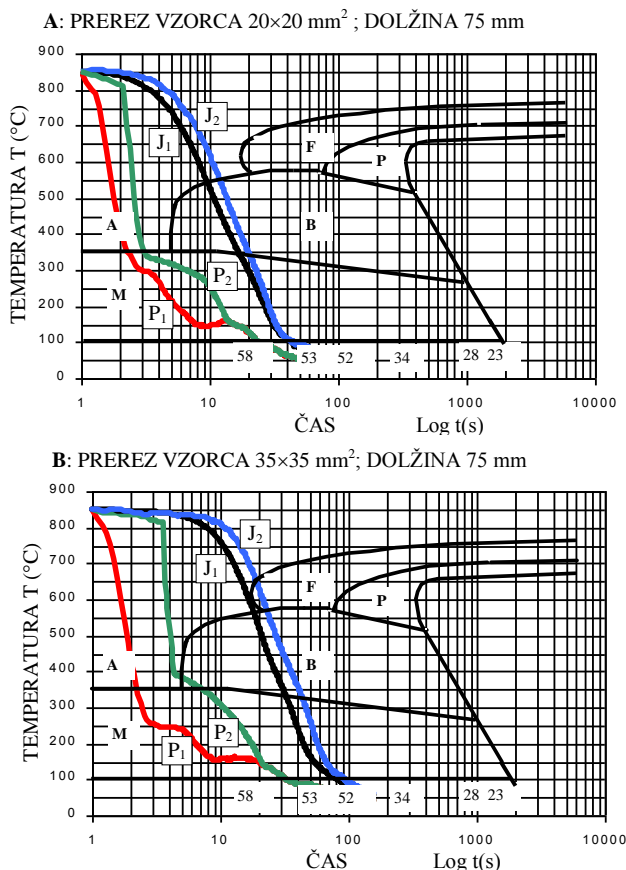
Slika 25: Sonda za merjenje ohlajevalnih krivulj in intenzivnosti hladilnih sredstev

Vir: Božič, 2000, 55



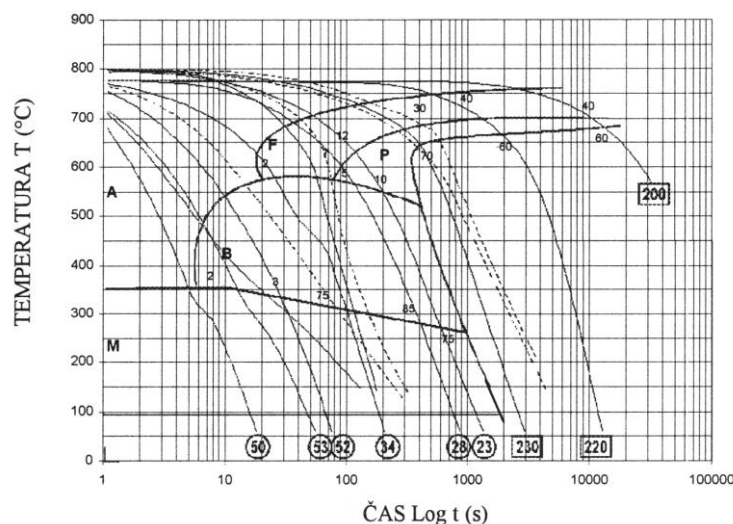
Naloga : Vpliv mase in hladilnega sredstva na mehanske lastnosti in razvoj zaostalih napetosti po toplotni obdelavi

Glede na potek ohlajevalnih krivulj v specifični točki vzorca analizirajte dobljeno mikrostrukturno stanje in potek trdote po prerezu preko diagrama na sliki 26. Glede na potek ohlajevalnih krivulj v specifični točki vzorca analizirajte potek zaostalih notranjih napetosti. Analizirajte rezultate.



Slika 26: Primerjava krivulj hitrosti ohlajanja med kaljenjem dveh različnih obdelovancev različnih dimenzij
Vir: Lasten

Zaradi zahtev po napovedovanju mikrostrukturnih sprememb po kaljenju vzorcev z različnimi masami in z gašenjem v različnih hladilnih sredstvih smo uporabili kontinuirani ohlajevalni diagram transformacij (CCT) za obravnavano jeklo. Na sliki 27 je prikazan kontinuirani ohlajevalni diagram transformacij za obravnavano legirano jeklo za poboljšanje 42CrMo4. V diagramu so vrisane ohlajevalne krivulje pri ohlajanju jeklene palice premera 95 mm v različnih ohlajevalnih sredstvih, kot so: voda, olje, zrak. Povprečna ali pričakovana trdota na površini je 58 HRC pri gašenju v vodi, ki zagotavlja na površini popolno transformacijo v martenzit. Povprečna trdota, dosežena na površini po gašenju v olju, zagotavlja martenzitno bainitno mikrostrukturo s trdoto okoli 30 HRC in pri najpočasnejšem ohlajanju vzorca na zraku, ko zagotovimo perlitno-feritno mikrostrukturo tako na površini kot v jedru z doseženo trdoto okoli 220 HB.



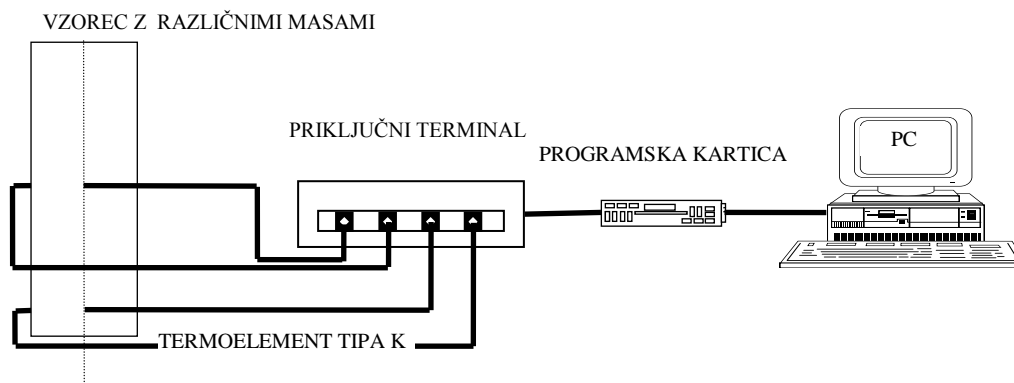
Slika 27: Ohlajevalne krivulje gašenja okrogle palice premera 95 mm vrisane v diagramu kontinuiranega ohlajanja za jeklo 42CrMo4 (po SIST EN) ali AISI 4140

Vir: Lasten

V našem primeru smo se omejili na ohlajanje valjastih vzorcev istega jekla za poboljšanje z enotno višino 75 mm. Premer valjastih vzorcev smo stopnjevali od 20 mm s stopnjo po 5 mm. Tako smo imeli premere vzorcev 20; 25; 30 in 35 mm. Hladne vzorce smo vstavili v pregreto peč na temperaturo 600 °C in po izenačenju te temperature med površino in jedrom pa smo nato postopno segrevali do kalilne temperature 850 °C. Valjasti vzorci so bili na štirih merilnih mestih opremljeni s termoelementi, s katerimi smo določili dve ohlajevalni krivulji na značilnih mestih površine in dve ohlajevalni krivulji na značilnih mestih jedra. Segrete valjaste vzorce smo nato pazljivo prenesli v ohlajevalno kopel oziroma jih potopili v hladilno sredstvo. S prej predstavljenim eksperimentalnim sistemom smo zajeli ohlajevalne krivulje med ohlajanjem valjastih vzorcev v:

- vodi;
- 10 % polimerni vodni raztopini Aquatensida;
- 30 % polimerni vodni raztopini Aquatensida;
- olju Rapid Extra.

Za merjenje temperature med procesom ohlajanja smo izbrali vzorce z enotno višino ($L = 75$ mm) in z različnimi premeri, in sicer $D = 20; 25; 30$ in 35 mm. Z izbranimi dimenzijami vzorcev vplivamo zaradi vpliva mase na potek temperature na merilnih mestih v vzorcih pri ohlajanju z različnimi hladilnimi sredstvi. Pri tako izbranem eksperimentalnem postopku želimo določiti vpliv intenzivnosti ohlajanja hladilnega sredstva na različnih masah valjastih vzorcev. Zaradi zahtev po napovedovanju dosežene mikrostrukture in v napovedovanju poteka trdot oziroma dosežene trdnosti v različnih masah vzorcev smo v našem laboratoriju za toplotno obdelavo izdelali računalniško podprt eksperimentalni sistem. Eksperimentalni sistem je predstavljen na sliki 28 in ga sestavljajo vzorci različnih mas. Na izbrana merilna mesta so bili vstavljeni termoelementi za merjenje ohlajevalnih krivulj, kar smo preko večkanalnega temperaturnega pretvornika prenesli v računalnik za kasnejšo obdelavo podatkov. Tako smo sposobni preko posnetih ohlajevalnih krivulj zasledovati fizikalne pojave v mejni plasti za posamezno vrsto ohlajevalnega sredstva.



Slika 28: Merilni sistem za zasledovanje ohlajevalnih krivulj na različnih merilnih mestih termoelementov NiCr/Ni

Vir: Lasten

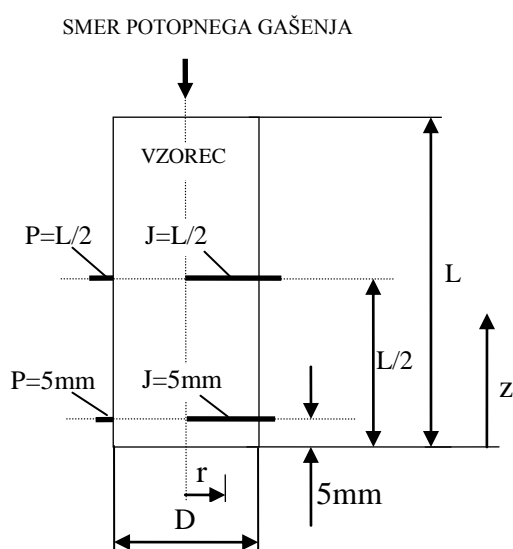
Eksperimentalni sistem je sestavljen iz:

- vzorcev z različnimi masami;
- priključitev termoelementov na štirih značilnih merilnih mestih;
- priključni terminal SC2071;
- povezovalni kabel za vodenje signalov v računalnik;
- programska kartica LAB-PC-1200/AI;
- programski paket LabVIEW.

Merilni sistem je sestavljen iz priključnega terminala SC2071, ki omogoča povezavo analogno-digitalnih signalov preko povezovalnega kabla NBI na kompatibilni računalnik. V računalniku s pomočjo kartice LAB-PC-1200/AI in programskega paketa LabVIEW zajamemo merjenje temperaturnih sprememb pri gašenju vzorcev. Programski paket zagotavlja vnos podatkov in risanje ohlajevalnih krivulj v kontinuirano transformacijskem (CCT) diagramu za posamezna hladilna sredstva in za posamezna merilna mesta v vzorcih. Izmerjene podatke o časovnem spreminjanju temperature – to je ohlajevalne krivulje, smo nato obdelali s programskim paketom Excel 5.0 in izdelali ustrezne prikaze rezultatov v obliki tabel in stolpičnih diagramov. Izmerjene ohlajevalne krivulje na različnih merilnih mestih vzorcev z različnimi masami nam omogočajo številne prikaze v diagramih, in sicer:

- ohlajevalne krivulje;
- hitrosti ohlajanja v odvisnosti od temperature;
- prikazi ohlajevalnih krivulj v kontinuiranem diagramu ohlajanja z vrisanimi transformacijami CCT;
- napovedovanje mikrostrukturnih deležev posameznih faz;
- napovedovanje trdote po ohlajanju različnih mas v različnih hladilnih sredstvih.

Zaradi velikega števila vzorcev z različnimi izmerami smo se odločili za enotno označevanje vzorcev in posameznih merilnih mest. Označevanje vzorcev nam omogoča enostavnejše simbolne zapise v diagramih in prav tako enostavnejšo obravnavo podatkov. Na sliki 29 je prikazan način označevanja posameznih merilnih mest z vstavljenimi termoelementi za merjenje temperature oziroma za določevanje hitrosti ohlajanja.

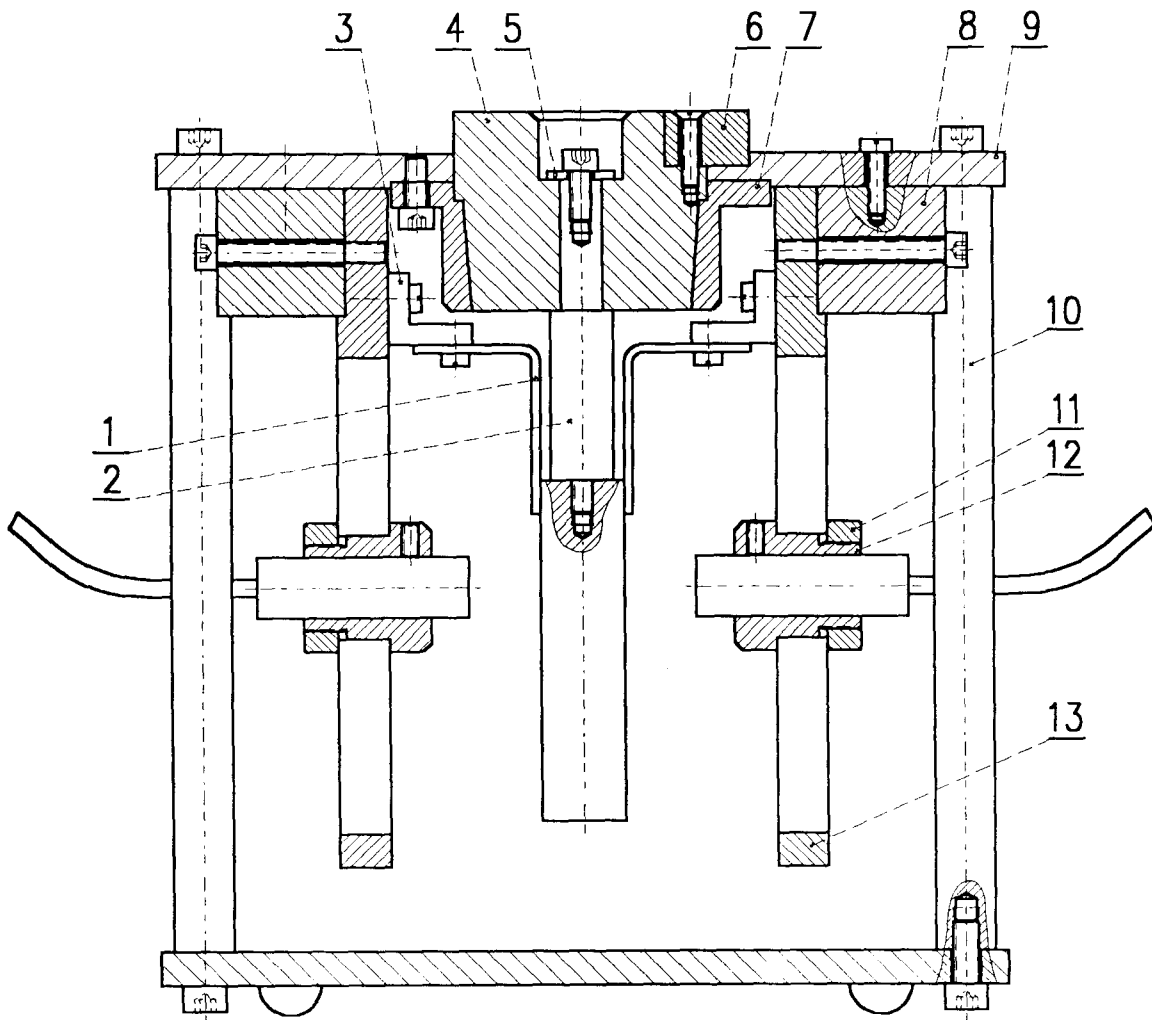


D ... premer vzorca;
 r ... razdalja od središča vzorca v radialni smeri;
 z ... razdalja od spodnjega robu vzorca;
 $P = L/2$; namestitev termoelementa na površini vzorca na razdalji $L/2$ od spodnjega robu vzorca;
 $J = L/2$; namestitev termoelementa v jedru vzorca na razdalji $L/2$ od spodnjega robu vzorca;
 $P = 5\text{mm}$; namestitev termoelementa na površini vzorca na razdalji 5 mm od spodnjega robu vzorca;
 $J = 5\text{mm}$; namestitev termoelementa v jedru vzorca na razdalji 5 mm od spodnjega robu vzorca;
 Dimenzije vzorca: $D = 20; 25; 30; 35\text{ mm}$
 $L = 75\text{ mm}$

Slika 29: Sistem za označevanje posameznih vzorcev danih merilnih mest
 Vir: Lasten

Na sliki 30 je prikazana konstrukcija naprave za potopno gašenje vzorcev v hladilno sredstvo. Vzorec, ki je nameščen na držalu – pozicija 2, pozicioniramo, ter preko drsnih vodil na poziciji 7 potopimo v hladilno sredstvo, da zagotovimo enake razmere pri imerziji in s tem realne ter primerljive rezultate pri gašenju v različnih hladilnih sredstvih pri različnih pogojih.

Uporaba naprave dopušča spreminjanje parametrov procesa (temperatura hladilnega sredstva, mešanje hladilnega sredstva) in s tem spreminjanje intenzivnosti ohlajanja vzorcev med potopitvijo v hladilno sredstvo. Vodila ultrazvočne glave na poziciji 13 so namenjena pritrditvi oddajne in sprejemne ultrazvočne glave znamke MB4T, ki sta namenjeni za neporušne preiskave pri potopnem gašenju vzorcev.



POZ	KOS	NAZIV	MATERIAL	DIMENZIJE (mm)
1	2	KOTNIK - VODILNI	ALUMINIJ	60 × 25 × 2
2	1	DRŽALO VZORCA	Fe 360 - C	φ15 × 80
3	2	KOTNIK	ALUMINIJ	60 × 25 × 20
4	1	NOSILEC	Fe 360 - C	φ65 × 46
5	1	PODLOŽKA	Fe 360 - C	φ20 × 3
6	1	VODILNI VLOŽEK	Fe 360 - C	30 × 16
7	1	VODILO	ALUMINIJ	φ90 ^{±0.1} × 30
8	2	PRIZMA	ALUMINIJ	80 × 30 × 25
9	1	PLOŠČA	ALUMINIJ	200 × 200 × 8
10	4	VEZNI ELEMENT	ALUMINIJ	φ15 × 190
11	2	MATICA	CuZn40	M22×1
12	2	PUŠA	CuZn40	φ30 × 27
13	2	VODILO ULTRAZVOČNE GLAVE	ALUMINIJ	160 × 60 × 10

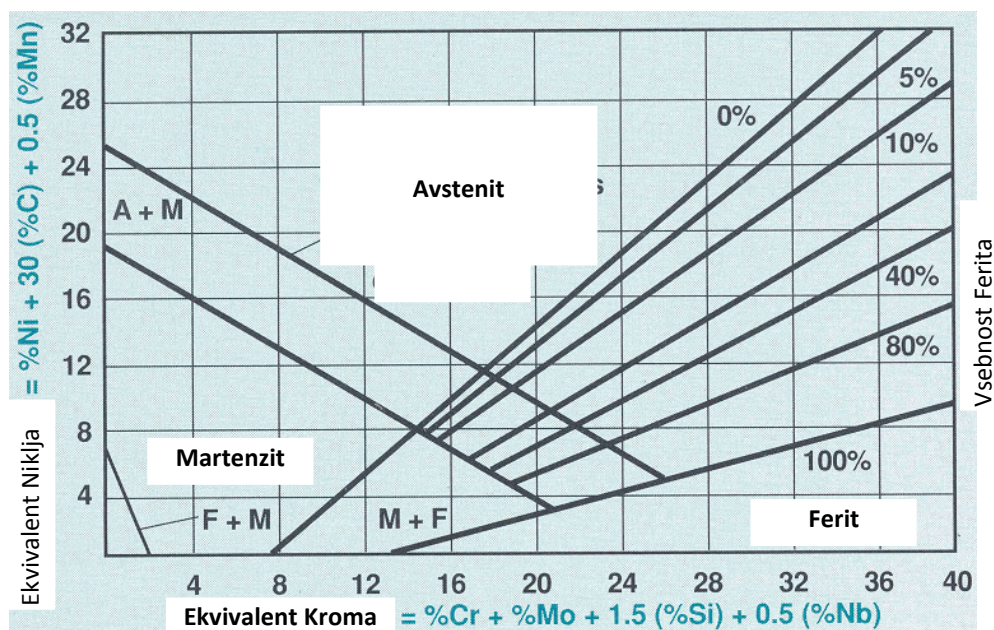
Slika 30: Konstrukcija naprave za imerzijsko gašenje vzorcev v hladilno sredstvo
Vir: Lasten

3.2 LEGIRANA JEKLA IN LITINE

V legiranih jeklih in litinah so količine zlitinskih elementov tolikšne, da bistveno spremenijo fazna ravnotežja v sistemih Fe-C in Fe-Fe₃C. Nekateri zlitinski elementi kot npr. Ni stabilizirajo fazo γ (Avstenit). Te elemente imenujemo *gamageni*. Drugi zlitinski elementi kot npr. Cr stabilizirajo fazo α (Ferit). Te elemente imenujemo *alfageni*.

V jeklih, ki vsebujejo tako alfagene kot gamagene elemente, je struktura jekel odvisna od njihovega deleža. To prikazuje *Schaefflerjev diagram* (slika 31), ki ima na abscisi kromov ekvivalent, na ordinati pa nikljev ekvivalent. Nikljev ekvivalent je tisti delež niklja, ki ima enak učinek kot vsi gamageni elementi v zlitini. Glede na enačbo na ordinati na sliki 51 ima ogljik 30-krat močnejši učinek kot nikelj.

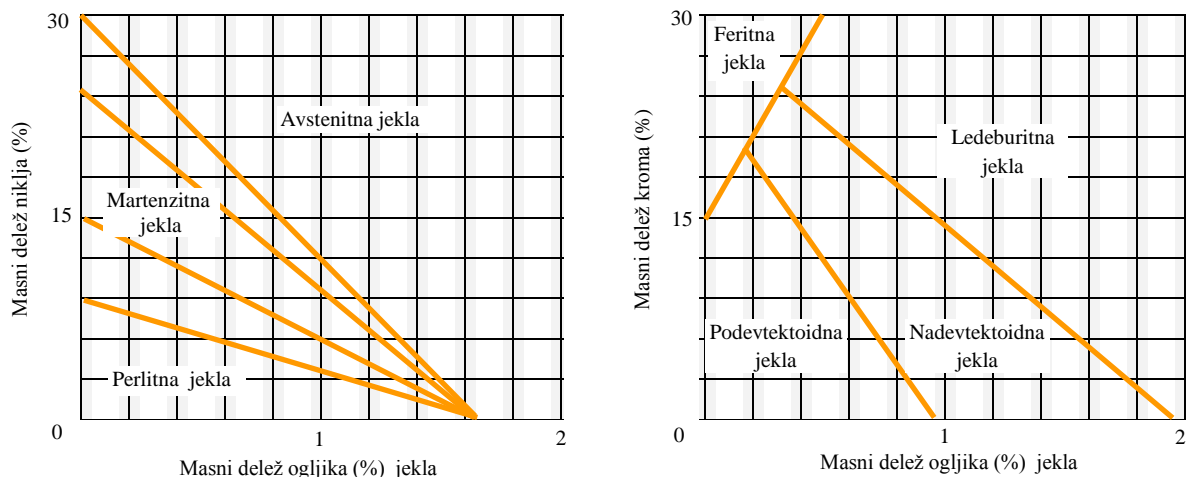
Kadar v jeklu prevladujejo gamageni elementi, je lahko pri navadni temperaturi obstojen avstenit, čeprav je v ogljikovih jeklih obstojen le nad 727 °C. To so *avstenitna jekla*. Kadar prevladujejo alfageni elementi, je jeklo pri navadni temperaturi iz ferita. To so *feritna jekla*. *Martenzitna jekla* so pri povišanih temperaturah sestavljena iz avstenita. Pri ohlajanju se zaradi zelo majhne kritične ohlajevalne hitrosti pretvorijo v martenzit tudi pri ohlajanju na zraku. Martenzitna jekla so samokaljiva. Ta diagram je zelo pomemben pri nerjavnih jeklih.



Slika 31: Schaefflerjev diagram

Vir: Prirejeno po: <http://www.nhml.com/resources/2002/1/1/martensite-in-austenitic-stainless-steel-welds/> (2. 7. 2010)

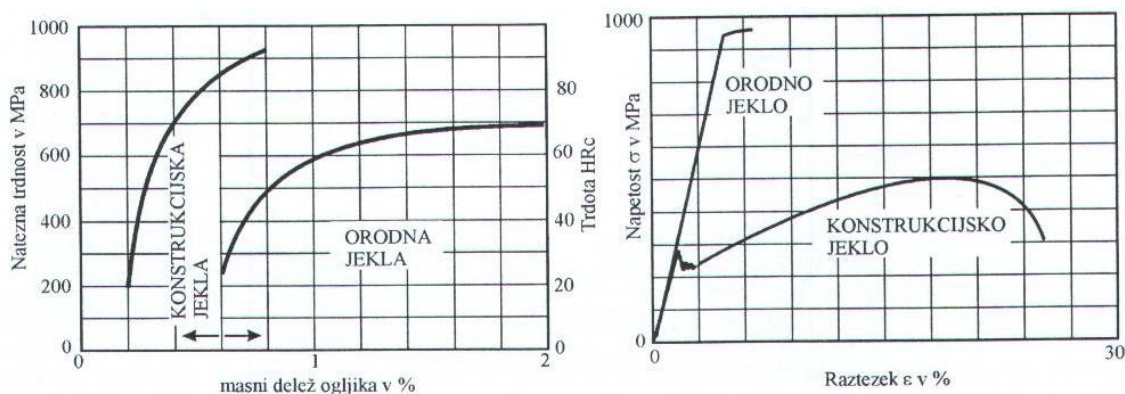
Zlitinske elemente lahko delimo tudi po tem, ali tvorijo z ogljikom karbide ali ne. Primer za elemente, ki ne tvorijo karbidov, je *nikelj*. Glede na delež niklja in ogljika lahko dobimo *perlitna*, *martenzitna* in *avstenitna jekla*. Po drugi strani je krom *karbidotvorni element*. Ob majhnem dodatku krom zamenja del železa v cementitu in dobimo *zmesni karbid* (Fe,Cr)₃C. Pri večjem dodatku tvori lastne karbide; npr. Cr₂3C₆. Značilno za dodatek kroma je tudi, da pomakne evtektično reakcijo k manjšim odstotkom C. Iz diagrama na sliki 32b lahko odberemo, da se pri 25 % Cr, ledeburit pojavi že pod 0,4 % C.



Slika 32: Vpliv deleža a) niklja in ogljika ter b) kroma in ogljika na strukturo jekla
Vir: Lasten

Tako Ni kot C sta gamagena elementa, zato močno povečata področje stabilnosti avstenita. Cr je alfa-geni, C pa gamageni element, zato si njuna učinka nasprotujeta. Z večanjem deleža ogljika je potrebno za doseganje feritne mikrostrukture povečati tudi delež Cr. Krom je tudi karbidotvorni element. Z ogljikom tvori več vrst karbidov. Dodatek kroma pomakne eutektično reakcijo k manjšim odstotkom ogljika. Tako se v jeklu s ~25 % Cr pojavi ledeburit tudi v jeklih, ki vsebujejo le okoli 0,4 % C. Ledeburitna jekla spadajo k orodnim jeklom in so močno odporna proti obrabi.

Jekla pogosto delimo tudi po namenu uporabe na *konstrukcijska* in *orodna jekla*. Glavna lastnost konstrukcijskih jekel je napetost tečenja in/ali *natezna trdnost*, medtem ko je pri orodnih jeklih bistvena trdota. Na sliki 33b je prikazana značilna razlika med nateznima krivuljama obeh vrst jekel.

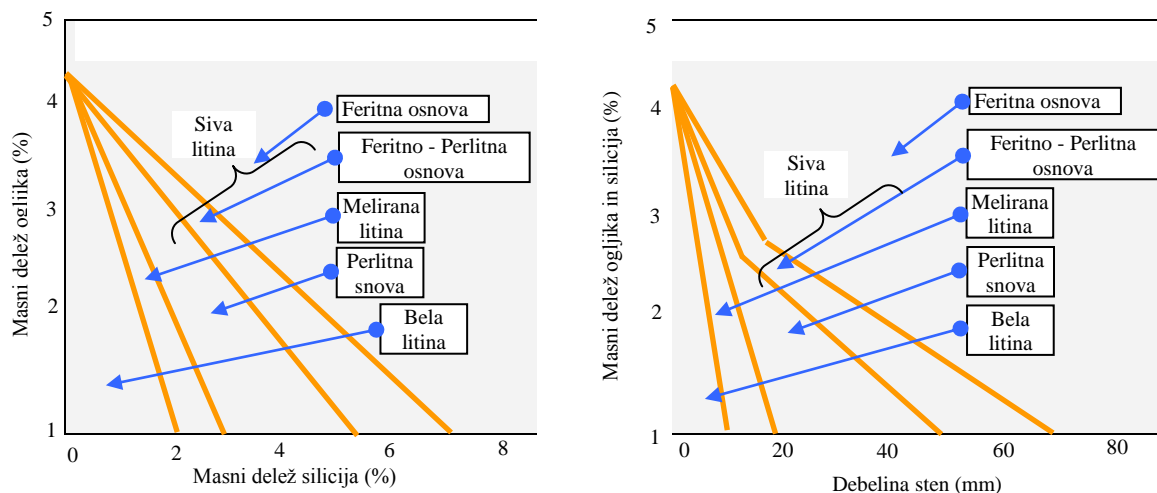


Slika 33: a) Odvisnost natezne trdnosti in masnega deleža ogljika od vrste jekla; b) Odvisnost natezne trdnosti in raztezka od vrste jekla
Vir: Zupanič in Anžel, 2007, 202

Značilna lastnost za konstrukcijska jekla je natezna trdnost, ki narašča z večanjem deleža ogljika. Po drugi strani je temeljna lastnost orodnih jekel trdota, ki prav tako narašča z deležem ogljika v jeklu. Konstrukcijska jekla imajo razmeroma majhno napetost tečenja in natezno trdnost, vendar se dajo močno plastifino preoblikovati. Po drugi strani je napetost tečenja orodnih jekel zelo velika in tudi skoraj enaka natezni trdnosti, vendar so ta jekla zelo slabo preoblikovalna.

Železove litine

Najbolj grobo delimo železove litine na bele litine (ogljik je izločen v obliki cementita), sive litine (ogljik je izločen v obliki grafitu) ter temprane litine, pri katerih pri žarjenju cementit razpade v železo in temprani (vozlasti) grafit. Katero vrsto litine dobimo je najbolj odvisno od deleža silicija ter od hitrosti ohlajanja (slika 34). Večji delež silicija in počasnejše ohlajanje stimulirata nastanek sive litine oziroma potek procesov skladno z diagramom Fe-C.



Slika 34: Maurerjev diagram

Vir: Lasten

Mikrostruktura železovih litin je močno odvisna od njihove kemične sestave in hitrosti ohlajanja (debeline sten).

a) Maurerjev diagram prikazuje vpliv C in Si na vrsto litine, ki jo dobimo pri strjevanju. Pri majhnem deležu silicija dobimo belo litino: ogljik je vezan v obliki cementita Fe_3C . Večji delež silicija omogoča, da tako eutektična kot tudi eutektoidna reakcija potekata skladno z diagramom Fe-C (dobimo sivo litino s feritno osnovo). V melirani litini se pri strjevanju del ogljika izloči v obliki grafitu, del pa v obliki cementita.

b) Počasnejša hitrost ohlajanja (večja debelina sten ulitka) ima podoben učinek kot večja skupna koncentracija C in Si.

Bela litina

V beli litini je ogljik vezan v obliki cementita. Zato je zelo trda. Posledično ima veliko obrabno obstojnost in se uporablja v drobilnih mlinih ter za valje s trdo skorjo.

Siva litina

Ko smo podrobneje spoznali Fe- Fe_3C diagram, vemo, iz česa sestojeta jekla (ferit in perlit, perlit in sekundarni cementit) in bele litine (predvsem perlit, sekundarni cementit in ledeburit). Nič pa še nismo govorili o sivi litini. Če se v litini, ki vsebuje od 3 do 4 % ogljika, izloči del ogljika v obliki grafitnih lamel, dobimo litino, ki je na prelomu sive barve (grafit) in jo zato imenujemo siva litina. Povedali smo že, da so jekla žilava in da se dajo kovati v vročem stanju. Nekatera jekla z manj ogljika lahko preoblikujemo celo v hladnem stanju.

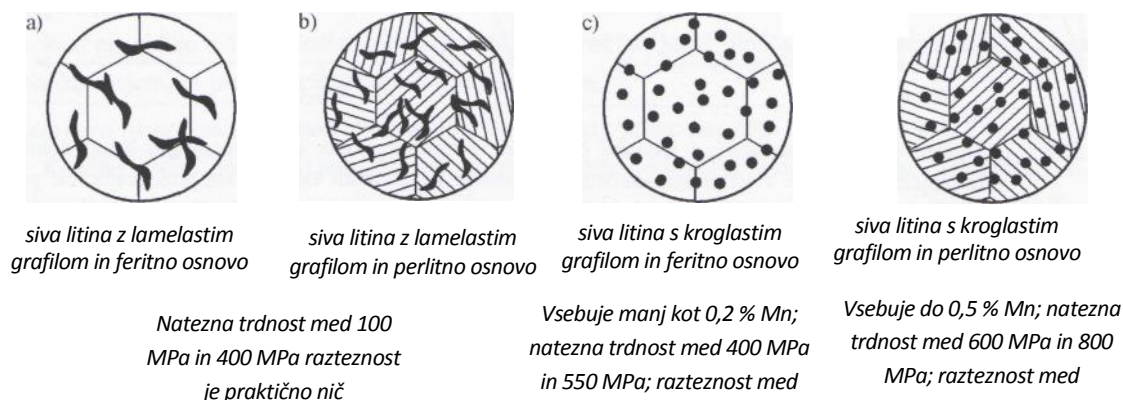
Prav tako smo povedali, da je bela litina krhka in trda in jo zato preoblikujemo le z litjem.

Siva litina je še vedno primerna le za litje, ni pa tako krhka in trda kot bela litina. Sivo litino tudi brez težav obdelujemo z odrezavanjem (stružimo, vrtamo itd.). Zaradi opisanih lastnosti in dobre livnosti je siva litina pri izdelovanju strojev še vedno cenjen material.

Najpomembnejši sta *siva litina* z lamelastim grafitom ter *siva litina* s kroglastim grafitom, ki jo imenujemo tudi *nodularna litina* (slika 35c, d). *Grafit* v litini predstavlja tujek, ki povzroča močan zarezni učinek, in močno zmanjša natezno trdnost (slika 35a). Le-to izboljšamo z *modificiranjem*, pri katerem bistveno zmanjšamo velikost lamel. Mnogo



boljše lastnosti dosežemo pri nodularni litini, kjer z modificiranjem in dodajanjem *magnezija* povzročimo, da se pri eutektski reakciji izloča grafit v obliki kroglic. *Dušilnost* (sposobnost dušenja mehanskih nihanj) sive litine, zlasti z lamelastim grafitom, bistveno presega dušilnost drugih litin (slika 35b).



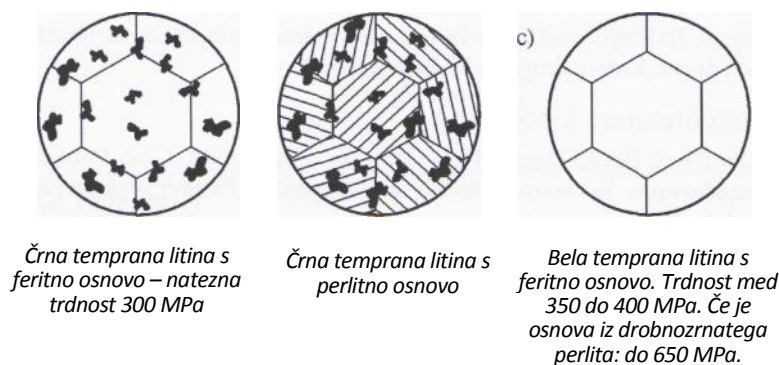
Slika 35: Značilne mikrostrukture sive litine z lamelastim in kroglastim grafitom
Vir: Prirejeno po: Zupanič in Anžel, 2007, 203

S pojavom grafita v mikrostrukturi se natezna trdnost litine zmanjšuje. Zmanjšanje je dosti bolj izrazito v litini z lamelastim grafitom (sivi litini), saj lamele povzročijo mnogo večji zarezni učinek kot kroglice. Dušilnost (dušenje mehanskih nihanj) je največje pri sivi litini (litini z lamelastim grafitom), zato se ta pogosto uporablja za podnožja obdelovalnih strojev.

Temprana litina

Ločimo *črno* in *belo temprano litino*. Izdelamo ju iz litine, ki se strjuje belo. Črno temprano litino dobimo pri žarjenju v nevtralni atmosferi, kjer povzročimo razpad *cementita* v železo in temprani grafit, kot prikazuje slika 36. Glede na postopek ohlajanja ima lahko črna temprana litina feritno ali perlitno osnovo. Pri izdelavi bele temprane litine žarimo v oksidativni atmosferi. Najprej razpade cementit, nato pa ogljik difundira na površino, kjer zgori. V idealnem primeru je bela temprana litina povsem razogljčena zlitina železa s silicijem in še nekaterimi drugimi elementi.

Črno temprano litino dobimo z žarjenjem bele litine v nevtralni atmosferi. Belo temprano litino dobimo z žarjenjem bele litine v oksidativni atmosferi.



Slika 36: Značilne mikrostrukture tempranih litin
Vir: Prirejeno po: Zupanič in Anžel, 2007, 205

Pri črni temprani litini s feritno osnovo nastane temprani (vozlasti) grafit z razpadom cementita Fe_3C . Počasno ohlajanje s temperature tempranja omogoči, da se ves presežni

ogljik izloči iz avstenita in ferita in da kristalizira na tempranem grafitu. Celoten proces poteka skladno z diagramom Fe-C. Pri črni temprani litini najprej razpade cementit Fe_3C v temprani grafit. Nadaljnje ohlajanje poteka pretežno po diagramu Fe- Fe_3C , torej iz avstenita nastane z evtektoidno reakcijo perlit. Pri beli temprani litini s feritno osnovo najprej cementit razpade v temprani (vozlasti) grafit. Ogljik z difuzijo potuje do površine obdelovanca, kjer zgori. Torej se njegova koncentracija v litini s časom zmanjšuje. V idealnem primeru po koncu tempranja v beli litini ni več ogljika in dobimo binarno zlitino Fe-Si.

Povzetek

Jekla so tiste železove zlitine, pri katerih je poleg samega železa najpomembnejši zlitinski element ogljik. V jeklih je ogljika navadno manj kot 1 %, toda kljub temu ima najpomembnejši vpliv na lastnosti ogljikovih jekel. Legirana jekla vsebujejo še znatne količine kroma, niklja, molibdena ali katerega drugega elementa, ki dajo jeklom posebne lastnosti. Legirana jekla, ki so znana kot nerjavna, vsebujejo najmanj 11,5 % Cr. Orodna jekla so namenjena odrezovanju in oblikovanju kovinskih in nekovinskih materialov v želeno obliko. Nekatera jekla dobijo svojo končno obliko z litjem (jeklena litina), medtem ko večino jekel oblikujemo v končno obliko z gnetenjem (preoblikovanjem) in jih lahko prištevamo h gnetnim zlitinam.

Železove litine vsebujejo mnogo več ogljika in silicija kot jekla; navadno med 2 % in 4 % C ter med 1 % in 3 % Si. Končno obliko dobijo z litjem. Delimo jih na bele litine (ogljik je izločen v obliki cementita), sive litine (ogljik je izločen v obliki grafita, najboljšo trdnost in žilavost ima nodularna litina, ki ima grafit v obliki kroglic) ter temprane litine, pri katerih pri žarjenju cementit razpade v železo in temprani (vozlasti) grafit. Na vrsto litine najbolj vplivata delež silicija ter hitrost ohlajanja. Večji delež silicija in počasnejše ohlajanje stimulirata nastanek sive litine oziroma potek procesov, skladno z diagramom Fe-C.



Razmislite, odgovorite, rešite:

- Kaj imajo skupnega jekla in železove litine?
- V čem se razlikujejo konstrukcijska in orodna jekla?
- Jeklo vsebuje 5 % Ni in 15 % Cr. Iz katerih faz bo sestavljeno?
- Kaj pomenijo pojmi: alfageni, gamageni in karbidotvorni element?
- Ugotovite podobnosti in razlike med različnimi vrstami železovih litin.
- Zakaj belo litino žarimo v oksidacijski, črno pa v nevtralni atmosferi?
- Podrobno opišite razliko med nateznima krivuljama za konstrukcijsko in orodno jeklo.
- Kako lahko dosežemo pretvorbo lamelnega grafita v kroglastega?
- Kakšna je razlika med jekli in železovimi litinami?
- Kako legiranje jekel vpliva na njihovo mikrostrukturo?
- V čem se razlikujejo konstrukcijska in orodna jekla?
- V čem se razlikujeta bela in siva litina?
- Kako lahko vplivamo na obliko grafita pri sivem strjevanju? Kakšno spremembo lastnosti s tem dosežemo?
- Kako izdelamo temprane litine?
- Kaj pomeni pojem samokaljivo jeklo?
- Zakaj je osnovna lastnost orodnih jekel trdota? Na kakšen način lahko dosežemo njihovo veliko trdoto?
- Ali lahko toplotno obdelamo tudi železove litine? Pomislite, kakšne bi bile lahko razlike v primerjavi s toplotno obdelavo jekel.
- Ali lahko toplotno obdelamo tudi železove litine? Pomisli, kakšne bi bile lahko razlike v primerjavi s toplotno obdelavo jekel!

3.3 BARVNE KOVINE

Izbira neželeznih kovin in zlitin, ki jih uporabljamo v tehniki, je pestra. Med mnogimi kovinami in zlitinami, ki sodijo v to skupino, bomo posebno pozornost posvetili aluminiju in bakru. Obe kovini in njune zlitine imajo dobro obstojnost proti koroziji. Poleg tega imajo aluminij in njegove zlitine zelo ugodno razmerje med gostoto in trdnostjo, baker pa je dober prevodnik električnega toka.

Tudi pri neželeznih kovinah poznamo več sistemov delitve v posamezne skupine. Delimo jih po gostoti, temperaturi tališča, korozijski obstojnosti, uporabi in podobno. Ob sočasni uporabi različnih kriterijev lahko razdelimo neželezne kovine tudi takole:

- težke kovine (Cu, Zn, Pb, Sn ...),
- lahke kovine (Al, Mg, Be ...),
- plemenite kovine (Ag, Au, Pt .. .),
- druge kovine (Hg, Cd ...).

Spoznava bomo tudi zlitine, v katerih je poleg osnovne kovine še nekaj deset odstotkov drugih kovin (ležajne zlitine, loti). Takšne zlitine imajo precej drugačne lastnosti in ceno od osnovne kovine. Pogosto so tudi uporabnejše in bolj znane od osnovnih kovin. Zaradi preglednosti jih bomo obravnavali v sklopu osnovnih kovin.

Na kratko, uporabnost posameznih neželeznih kovin in njihovih zlitin:

- dobri prevodniki električnega toka (Ag, Cu, Au),
- dobri konstrukcijski material! (Al zlitine, Cu zlitine),
- obstojne proti koroziji (vse plemenite kovine in Cu, Al, Sn),
- uporabne kot ležajne zlitine,
- uporabne kot loti in zlitine z nizkim tališčem,
- imajo dobro livnost (Zn zlitine, Al-Si zlitine, bronji).

Aluminij in aluminijeve zlitine

(Al) tališče 660,4 °C, gostota 2699 kg/m³

Aluminij in aluminijeve zlitine so za razne namene najustreznejša gradiva. Naštejmo lastnosti, ki jih uvrščajo tako visoko.

Majhna gostota (2699 kg/m³) je pomembna povsod, kjer želimo zmanjšati skupno tezo izdelka (v industriji transportnih sredstev, gradbeništvu, izdelkih za široko uporabo) ali zmanjšati maso hitro gibajočih se delov (bati v motorjih z notranjim izgorevanjem, platišča koles itd.).

Dobra električna prevodnost omogoča izdelavo daljnovodnih kablov. Glede na gostoto ima namreč aluminij skoraj dvakrat boljšo električno prevodnost kot baker.

Obstojnost proti koroziji pomeni manjše proizvodne stroške, manj vzdrževalnih del in daljšo življenjsko dobo izdelka. Aluminij je odporen proti atmosferskim vplivom, vodi (tudi slani), oljem in nekaterim kemikalijam.

Trdnost nekaterih aluminijevih zlitin dosega trdnost konstrukcijskih jekel.

Toplotna prevodnost (od 50 do 60 % toplotne prevodnosti bakra) omogoča uporabo aluminija za izdelavo izmenjevalcev toplote pri hladilnikih, zamrzovalnih skrinjah, avtomobilih, klimatskih napravah idr.

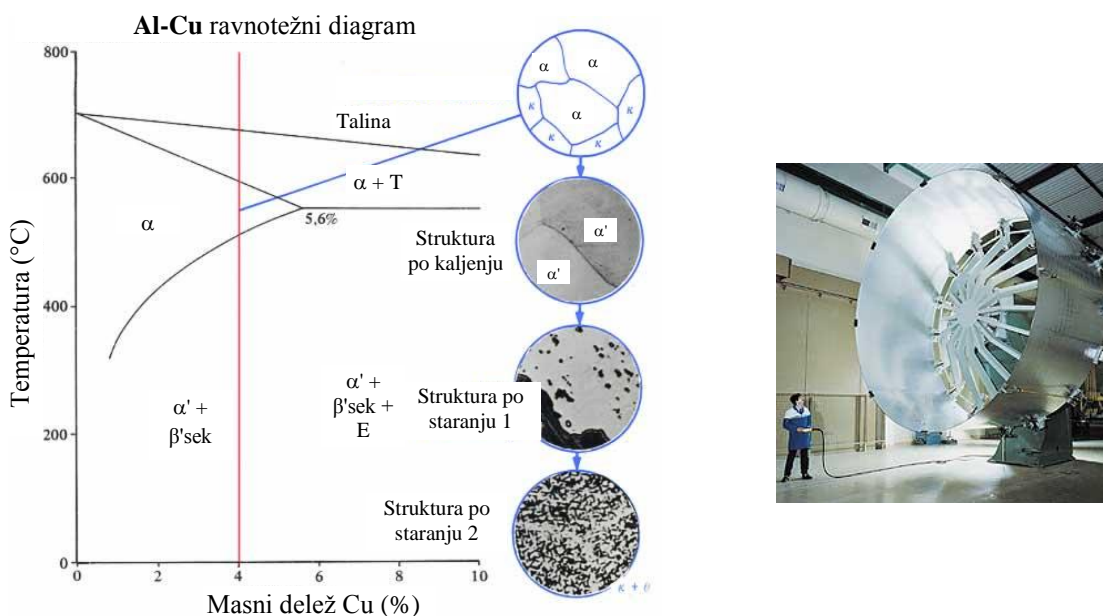
Zaradi dobre *reflektivnosti* uporabljamo aluminijaste folije za toplotno izolacijo.

Obdelovalnost aluminija je zelo dobra. Pri nekaterih zlitinah bomo spoznali, da so primernejše za obdelavo z odrezavanjem, druge za litje in tretje za preoblikovanje v hladnem.

Aluminijeve zlitine uporabljamo, kadar ne zadoščajo lastnosti čistega aluminija. Najpogosteje izboljšujemo mehanske lastnosti. Najboljše mehanske lastnosti dosežemo pri zlitinah AlCu, AlCuNiMg, AlCuMg in AlMgSi, saj jih lahko tudi toplotno obdelamo.



Toplotna obdelava, s katero pri aluminijevih zlitinah dosežemo večjo trdnost in trdoto, temelji na izločevalnem utrjanju. Sestoji iz žarjenja pri temperaturi največje topnosti. Temu sledi hitro ohlajanje – kaljenje. Ker ni dovolj časa, se legirani element ne more izločiti iz prenasičenih raztopinskih kristalov (slika 37). Izloči se šele kasneje.



Slika 37: Primer izločevalnega utrjevanja aluminijeve zlitine iz serije 2XXX
Vir: Prirejeno po: www.hsc.csu.edu.au/./aluminium_alloys.html/ (28. 5. 2010)

Majhni delci, bogati z legirnim elementom, se sčasoma izločijo na mejah in znotraj kristalnih zrn. Izločanje bakra in magnezija povzroči znatno povečanje trdnosti. Pri nekaterih drugih elementih je mehanizem enak (Mn, Si), vendar tudi po izločanju trdnost zlitine ne naraste. Za takšne zlitine rečemo, da jih ne moremo toplotno obdelati.

Izločanje legirnega elementa pri temperaturi okolice imenujemo naravno staranje. Z naravnim staranjem dosežejo AlCu zlitine v štirih do petih dneh 80 do 90 odstotkov nazivne trdnosti. Izločevalno utrjanje pa lahko pospešimo tako, da izdelke segrevamo pri temperaturi 120 do 160 °C od osem do šestnajst ur. Takšno toplotno obdelavo imenujemo umetno staranje.

Kot zanimivost naj omenimo še možnost, da pri nekaterih zlitinah obdelovance po kaljenju ohladimo na temperaturo okrog -20 °C. S tem zavremo proces izločevalnega utrjanja za nekaj dni. Tako pripravljene kovice potem zlahka kovičimo in po nekaj dneh doseže spoj nazivno trdnost.

Dodatno povečamo trdnost tudi pri toplotno obdelanih aluminijevih zlitinah s hladnim utrjevanjem. S kombinacijo navedenih obdelav lahko dosežemo trdnosti do 550 N/mm².

Pregled nekaterih aluminijevih zlitin bomo strnili v dva dela. V prvem bomo opisali aluminijeve zlitine za gnetenje in v drugem aluminijeve zlitine za litje.

Aluminijeve zlitine za gnetenje so legirane predvsem z magnezijem in bakrom. Magnezij povečuje trdnost (ob ustrezni obdelavi) in odpornost proti koroziji. Sočasno pa magnezij zmanjšuje livnost, preoblikovalnost in električno prevodnost aluminija. Baker močno poveča trdnost in zmanjša odpornost proti koroziji.

Aluminijeve zlitine za litje temelje predvsem na dodatkih silicija. Zlitine aluminija in silicija imenujemo silumini. Silumine odlikuje dobra livnost in obstojnost proti koroziji. Če

dodajamo aluminiju poleg silicija še baker, dobimo zlitino, ki ima nekoliko slabšo livnost in korozijsko odpornost, a večjo trdnost. Pri AlCuSi zlitinah vsebnost silicija pogosto presega 12,4 %. Presežek silicija se izloči v obliki primarnih kristalov silicija, ki znatno povečajo obrabno odpornost zlitine.

Zlitine aluminija in magnezija so težje livne, vendar odporne proti koroziji morske vode. Če jim dodamo še cink (AlMgZn zlitine), so sposobne za naravno (20 do 30 dni) ali umetno staranje, ki jim izboljša mehanske lastnosti.

Aluminijeve zlitine so posebno primerne za tlačno litje (T) in litje v kokile (K). Kljub temu jih še vedno lijemo tudi v pesek (P). Aluminij uporabljamo tudi za izdelavo sintranih izdelkov. Natezna trdnost sintranega aluminija znaša od 75 do 350 N/mm² in je odvisna od sestave, gostote in toplotne obdelave izdelka.

Aluminij lahko prenaša velike toplotne obremenitve zaradi velike toplotne prevodnosti samega materiala. Čisti aluminij dosega skromne mehanske lastnosti in ni uporaben za nosilne konstrukcije. Material je zato pogosto zlitinski, toplotno obdelan ali utrjen in tako ustreza zahtevanim lastnostim.

Največje skupine Al zlitin so: Al-Cu, Al-Mn, Al-Si, Al-Mg, Al-Si Mg, Al-Zn. V Evropi velja klasifikacija za osnovni material po AA klasifikaciji.

1XXX, 3XXX, 4XXX in 5XXX zlitine so deformacijsko utrjevalne, medtem ko 2XXX, 6XXX in 7XXX so toplotno obdelane zlitine. Najbolj uporabne oznake za preoblikovalne zlitine Al so naslednje:

»H«; velja za deformacijsko utrjevalne zlitine,

»T«; velja za toplotno obdelane (T4 – izločevalno utrjevalne in naravno starane; T6 – izločevalno utrjevalne in umetno starane).



Razmislite, rešite, odgovorite:

- Naštejte glavne lastnosti aluminija in aluminijevih zlitin.
- Opišite tri načine, s katerimi lahko izboljšamo trdnostne lastnosti gradiv na osnovi aluminija.
- Ali lahko zadržimo naravno staranje aluminijeve zlitine?
- Kateri legirni element ima največji vpliv na povečanje trdnosti aluminijevih zlitin pri izločevalnem utrjanju?
- Kateri legirni element izboljšuje livnost aluminijevih zlitin?
- Kateri legirni element izboljša Al zlitinam odpornost proti koroziji v morski vodi?
- Odprite spletno stran www.hsc.csu.edu.au/.../aluminium_alloys.html, ki govori o uporabi aluminija v letalski industriji. Izdelajte kratko poročilo.

Baker in bakrove zlitine

(Cu) tališče 1084,9 °C, gostota 8930 kg/m³

Baker in bakrove zlitine so naslednja skupina neželeznih zlitin. Kljub razmeroma visoki ceni jih tudi danes uporabljamo v mnogih vejah tehnike. Baker in bakrove zlitine odlikuje več lastnosti.

Dobra električna in toplotna prevodnost. Največ bakra in bakrovih zlitin porabimo za izdelke, pri katerih sta odločilni ti dve lastnosti. Legirni elementi zmanjšujejo električno, manj pa toplotno prevodnost bakra. Zaradi tega uporabljamo v elektrotehniki predvsem čisti baker z več kot 99,90 % Cu.

Obstojnost proti koroziji je druga pomembna kvaliteta bakra in bakrovih zlitin. Sloj bakrovega karbonata, ki nastane na površju, je tako gost, da v večini primerov (okolij) prepreči nadaljnje širjenje korozije.

Dobre sposobnosti za predelavo omogočajo plastično preoblikovanje v vročem in hladnem stanju in obdelavo z odrezavanjem.

Posamezne skupine bakrovih zlitin so namenjene litju. Tudi baker lahko utrdimo s hladnim preoblikovanjem. Pri tem meja plastičnosti močno naraste (tudi do petkrat). Utrjen material povrnemo v prvotno stanje z žarjenjem.

Nekatere bakrove zlitine (denimo berilijev bron) lahko tudi izločevalno utrjujemo. Toplotna obdelava je v bistvu enaka kot pri Al-Cu zlitinah.

Baker za elektrotehniko vsebuje manj kot 0,1 % nečistoč. Električna prevodnost je predpisana in ne sme biti manjša od 58 m/Qmm^2 . Trdnostne lastnosti elektrotehničnega bakra so odvisne od načina predelave oziroma stopnje utrditve.

Razen v elektrotehniko in izdelovanju strojev uporabljamo čisti baker kot legirni element pri aluminiju, srebru in zlatu. Pri postopkih galvanske zaščite pred korozijo ga pogosto uporabimo kot vmesni sloj med jeklom in vrhnjim slojem iz niklja, kroma ali srebra.

Medi so zlitine bakra s cinkom. Medi za gnetenje lahko preoblikujemo v hladnem in toplim stanju. Stopnja deformiranosti označuje stanje zlitine in s tem tudi njene mehanske lastnosti. Polizdelki so v obliki plošč, palic, pločevine, trakov, profilov, cevi in žice. Medi z večjo vsebnostjo cinka so primernejše za preoblikovanje v vročem, tiste z manj cinka pa za predelovanje v hladnem stanju.

Medi za litje vsebujejo poleg cinka še silicij, svinec in kositer. Zaradi svinca imajo zelo dobro obdelovalnost z odrezavanjem. Oznaka pred imenom zlitine podaja način litja: P – litje v pesek, K – litje v kokile in T – tlačno litje.

Kositrovi bronji za gnetenje vsebujejo od 3 do 10 % kositra. Vsebnost fosforja je omejena na 0,4 %. Imajo večjo natezno trdnost od medi. Kositrovi bronji za litje vsebujejo od 11 do 15 % kositra. Uporabljamo jih za litje v pesku (P), centrifugalno litje (C) in neprekinjeno litje (N). Kositrove brone z dodatkom cinka ali cinka in svinca poznamo pod imenom rdeča litina. Uporabljamo jih za izdelavo drsnih ležajev.

Aluminijevi bronji za gnetenje vsebujejo od 4 do 12 % aluminija, ki izboljša mehanske lastnosti in odpornost proti koroziji tudi pri povišanih temperaturah. Podobno sestavo in lastnosti imajo tudi aluminijevi bronji za litje, le da vsebujejo tudi več (do 7 %) železa in niklja.

Baker-nikljeve zlitine za gnetenje in litje so uporabne predvsem zaradi obstojnosti proti koroziji v morski vodi. Lahko jih preoblikujemo v hladnem stanju. Dajo se dobro spajati (variti). Baker-nikljeve zlitine uporabljamo za izdelavo cevi, armatur in konstrukcijskih elementov pri kondenzatorjih, izmenjevalcih toplote, uparjevalnikih, napeljavah za slano vodo in drugod. Vsebujejo 5 do 45 % niklja ter železo in mangan.

Baker-nikljeve zlitine za litje imajo podobno kemično sestavo in lastnosti. Nekoliko slabšo natezno trdnost lahko bistveno popravimo z dodatkom 0,5 % berilija.

Med drugimi pomembnejšimi bakrovimi zlitinami omenimo še berilijev bron, silicijev bron in zlitine bakra z nikljem in cinkom, imenovane novo srebro.

Berilijev bron vsebuje od 1,5 do 2,5 % berilija. Z izločevalnim utrjanjem dosežemo visoko natezno trdnost (do 900 N/mm^2) in mejo plastičnosti do 800 N/mm^2 . Pri tem ima berilijev bron dobro obstojnost proti koroziji. Uporabljamo ga za električne kontakte, vzmeti, elektrode

za uporovno varjenje in podobno. Predelava berilijevega bronca – taljenje, litje, brušenje in poliranje zahteva posebne ukrepe za zaščito zdravja (prezračevanje).

Silicijev bron vsebuje od 0,8 do 3,8 % silicija. Hladno deformiran doseže natezno trdnost do 750 N/mm^2 . Preoblikujemo ga v hladnem ali v vročem stanju. Uporabljamo ga za visokotlačno hidravliko v letalstvu, izdelavo vijačnega blaga, delov opreme za kemično industrijo, propelerskih gredi pri ladjah in podobnega.

Zlitine bakra z nikljem in cinkom imenujemo tudi »novo srebro«. Zaradi dobre preoblikovalnosti v hladnem stanju, odpornosti proti koroziji in kvalitetne površine (po obdelavi) ga uporabljajo za izdelavo delov optičnih naprav, delov za finomehaniko, jedilnega pribora in okrasnih predmetov. Vsebuje od 10 do 18 % niklja in od 19 do 45 % cinka.



Razmislite, rešite, odgovorite:

- Naštejte glavne lastnosti bakra in bakrovih zlitin.
- Kako lahko izboljšamo trdnostne lastnosti bakra in bakrovih zlitin?
- Kako vpliva legiranje na električno prevodnost bakra?
- Opišite glavne razlike v sestavi in uporabi medi in kositrovih bronov.
- Kaj dosežemo z dodajanjem berilija?
- Na spletni strani <http://www.imt.si/Revija/> raziščite vpliv vsebnosti bakra na mikrostrukturo aluminijevih zlitin. Izdelajte kratko poročilo.

Magnezij in magnezijeve zlitine

(Mg) tališče $650 \text{ }^\circ\text{C}$, gostota 1738 kg/m^3

Magnezij in magnezijeve zlitine imajo ob majhni gostoti dobro trdnost, ki jo obdrže tudi pri povišanih temperaturah. V letalstvu, tekstilni industriji in tiskarstvu jih uporabljamo za hitro gibajoče se dele strojev. Majhna teža teh delov bistveno zmanjša obremenitve zaradi vztrajnostnih in centrifugalnih sil. Kljub odlikam porabimo pri izdelovanju strojev le manjši del magnezija. Največ magnezija porabimo za legiranje aluminija. Poleg tega ga uporabljamo še v livarnah sive litine, kjer ga dodajamo v talino tik pred litjem. Precejšen del magnezija uporabljamo še za izdelavo anod pri katodni zaščiti pred korozijo, kot reducent pri proizvodnji kovin (Ti, Zr, Hf, U, Be) in v kemični industriji.

Magnezijeve zlitine za gnetenje so običajno legirane z aluminijem in cinkom. Trdnost takšnih zlitin narašča z vsebnostjo aluminija. Nekatere od njih lahko tudi toplotno obdelamo z izločevalnim utrjanjem in umetnim staranjem. Večji del magnezijevih zlitin za gnetenje je namenjen ekstrudiranju v palice in profile. Druge lahko valjamo v plošče in pločevino, ki je primerna tudi za globoki vlek.

Magnezijeve zlitine za litje so legirane z aluminijem, manganom, cirkonijem, cinkom in drugimi elementi. Nekaj jih je namenjenih litju v pesek in kokile, druge pa tlačnemu litju.



Razmislite, rešite, odgovorite:

- Kje porabimo večino proizvedenega magnezija?
- Kako izboljšamo mehanske lastnosti magnezijevih zlitin?
- Kaj dosežemo z dodajanjem magnezija pri proizvodnji sive litine?

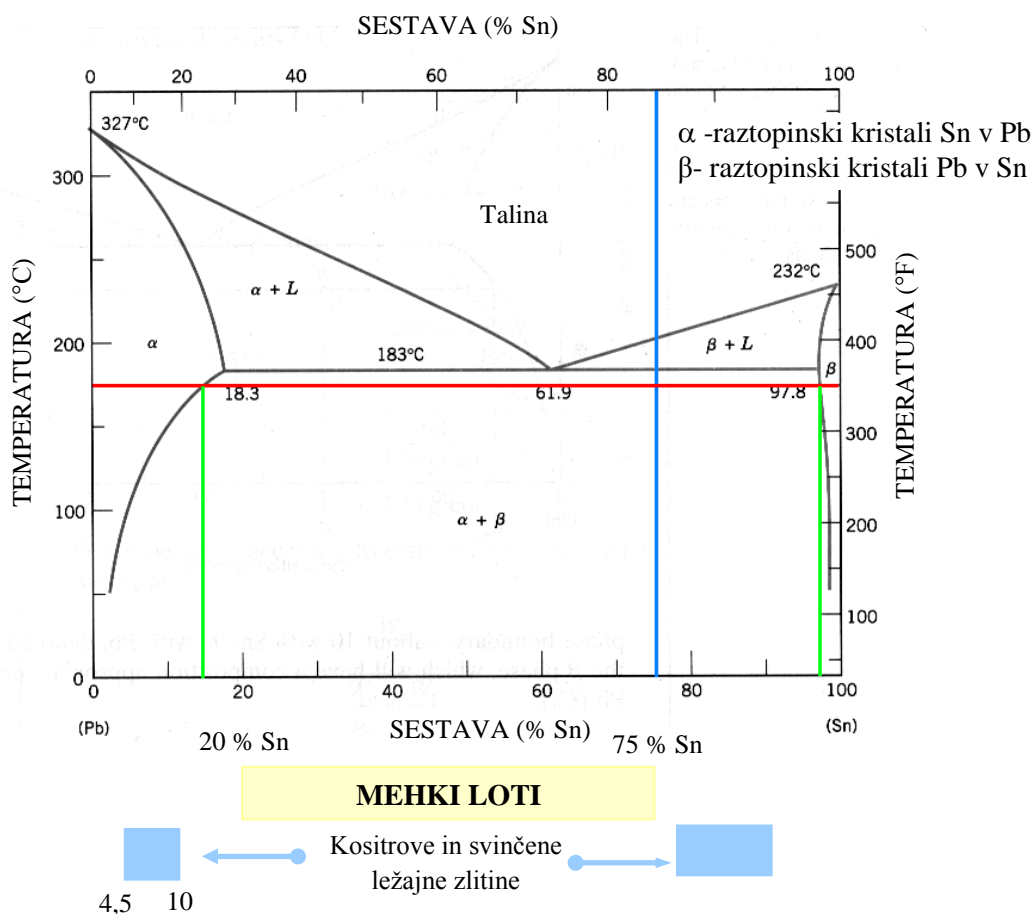
Svinec

(Pb) tališče 327,4 °C, gostota 11 340 kg/m³

Svinec je kovina z veliko gostoto in odlično odpornostjo proti koroziji. Zlahka jo lijemo in preoblikujemo. Mehanske lastnosti svinca so slabe, saj ima majhno natezno trdnost in trdoto. Svinec uporabljamo za izdelavo akumulatorjev, zaščitnih plaščev za kable, optičnega stekla, cevi, tiskarskih črk, ležajnih zlitin, zlitin z nizkim tališčem, za zaščito pred radioaktivnim sevanjem in pri izdelavi barv. Svinec in svinčeve pare so zdravju škodljivi.

Čisti svinec uporabljamo za izdelavo cevi, stekla, zaščite kablov ... Odlikuje ga obstojnost proti koroziji. Natezna trdnost čistega svinca znaša le 12 do 15 N/mm². Svinčeve zlitine imajo večjo natezno trdnost in trdoto zaradi dodatka antimona, kositra in bakra.

Zlitine svinca in kositra imajo poleg višje trdnosti in dobre livnosti tudi nižje tališče, saj je temperatura tališča evtektika Pb-Sn že pri 183 °C (slika 38).



Slika 38: Binarni diagram stanja Pb-Sn

Vir: Lasten

Osnovna zlitina za izdelavo mehkih lotov in ležajnih zlitin je največkrat zlitina svinca in kositra. Zlitine Pb-Sn, ki so po sestavi bliže evtektiku, uporabljamo kot mehke lote. Vsebujejo od 20 do 75 % Sn. Zlitine z leve in desne strani diagrama Pb-Sn pa uporabljamo kot ležajne zlitine.

Cink

(Zn) tališče 420 °C, gostota 7133 kg/m³

Cink je v tehniki pomemben predvsem zaradi odpornosti proti koroziji. Poleg tega porabimo velik del cinka pri proizvodnji medi (Cu-Zn zlitine) in v drugih zlitinah. Zaradi dobre livnosti ga srečamo v obliki zlitin za tlačno litje.

Cink, ki ga uporabljamo za protikorozijsko zaščito jeklenih polizdelkov (pločevine, cevi, profilov in oblikovnih kosov), ima čistočo od 97,5 do 99,95 % Zn. Na polizdelke ga nanašamo z galvanskim postopkom ali pa s potapljanjem v kopel raztaljenega cinka.

Cinkove zlitine za tlačno litje vsebujejo še aluminij (od 3,5 do 4,3 %) in baker (do 1,2 %). Poleg dobre livnosti, ki omogoča izdelavo ulitkov s tankimi stenami, se odlikujejo tudi z dobro površino. Ulitkom lahko s kromiranjem še izboljšamo videz in trajnost.

Za potrebe gradbeništva, tiskarstva in proizvajalcev baterij (za baterijske čašice) izdelujejo valjano pločevino in trakove ter vlečene ali ekstrudirane palice in profile iz cinka Zn 98,5 do Zn 99,2.



Razmislite, poiščite, rešite:

- Naštejte tri skupine proizvodov, pri katerih porabimo večji del proizvedenega cinka.
- Kako cinkamo pločevino?
- Zakaj so igrače, na primer modeli avtomobilov, narejene ravno iz cinkove zlitine za tlačno litje?
- Na svetovnem spletu raziščite vpliv cinka na okolje in ljudi. Poiščite članek na temo elektrokemijskih tehnologij za čisto okolje ter nove razvojne poti na naslovu: <http://www.imt.si/Revija/>

4 PREIZKUŠANJE MATERIALOV

Postopke preizkušanja ali preiskav materiala izvajamo z namenom, da ugotovimo najpomembnejše lastnosti materiala in sicer:

kontroliramo kvaliteto materiala in določamo njegove lastnosti pred uporabo (primerjava zahtevanih in realnih lastnosti, izločitev materiala pred nadaljevanjem obdelave – zmanjševanje stroškov in izmeta),

iščemo in odkrivamo napake v materialu in na že izgotovljenih strojnih delih in napravah, preizkušanje materiala je tudi vir podatkov za konstruiranje in razvoj konstrukcij ter tehnoloških postopkov,

preizkušanje pa je tudi osnova znanstvenega raziskovanja na področju materialov.

Glede na lastnosti, ki jih želimo spoznati, uvrščamo preizkušanje v naslednje skupine:

- mehanski preizkusi,
- tehnološki preizkusi,
- fizikalno - kemični preizkusi,
- preizkusi brez porušitve / okvare materiala,
- metalografske ali mikrostrukturne preiskave,
- varilni preizkusi (v bistvu tehnološki preizkus, vendar specifičen).

Poleg osnovnih metod, ki jih bomo spoznali v nadaljevanju, obstaja še cela vrsta drugih metod, ki jih tukaj ne bomo obravnavali, so pa opisane v literaturi, ki je podana na koncu poglavja.

4.1. MEHANSKI PREIZKUSI

Mehanski preizkusi so preizkusi kovin in zlitin, pri katerih vzorec ali preizkušavec s posebnimi napravami deformiramo ali porušimo. Glede na različne kriterije mehanske preizkuse delimo v več skupin:

Po načinu obremenjevanja:

- Statični preizkusi; tu deluje mirujoča ali zelo počasi in enakomerno naraščajoča obremenitev;
- Dinamični preizkusi; deluje sunkovita, udarna, nihajoča ali menjajoča obremenitev.

Po trajanju obremenitve:

- Kratkotrajne preizkuse; preizkusi trdnosti, trdote ...;
- Dolgotrajne preizkuse; trajni statični in trajni dinamični preizkusi.

Po temperaturi preizkušanja:

- Preizkuse v hladnem stanju, to je pri normalni temperaturi;
- Preizkuse v vročem stanju, tudi do 1000°C;
- Preizkuse pri nizkih temperaturah; do -200°C (za hladilno tehniko, letalstvo ...).

Definicije nekaterih mehanskih lastnosti

Trdota je odpornost materiala proti razenju. Odvisna je predvsem od jakosti kemijske vezi.

Trdnost:

Maksimalna natezna trdnost je enaka maksimalni natezni napetosti v področju plastičnosti materiala.

Zlomna trdnost je vrednost natezne napetosti pri raztežku, pri katerem pride do zloma materiala.

Žilavost je lastnost materialov, da se težko zlomijo, ko nanje delujejo zunanje sile. Največkrat je povezana z odpornostjo materiala proti udarcem (udarna žilavost) ali pa z odpornostjo materiala proti napredovanju razpok (lomna žilavost). Žilavost materiala je sorazmerna s površino pod krivuljo $\sigma - \epsilon$: čim večja je ta površina, tem večja je žilavost.

Elastičnost je neposredno povezana z elastičnim modulom: čim manjši je elastični modul, tem večja je elastičnost materiala.

Duktilnost je povezana z vrednostjo raztezka pri zlomu materiala (kovine). Več kot se material raztegne, preden se zlomi, bolj je duktilen.

V nadaljevanju si pogledjmo najpomembnejše mehanske preizkuse.

4.1.1 Natezni preizkus

Natezni preizkus pri sobni temperaturi definira standard EN 10002-1:1990+AC1:1990. Z nateznim preizkusom ugotavljamo napetosti v materialu med obremenitvijo.

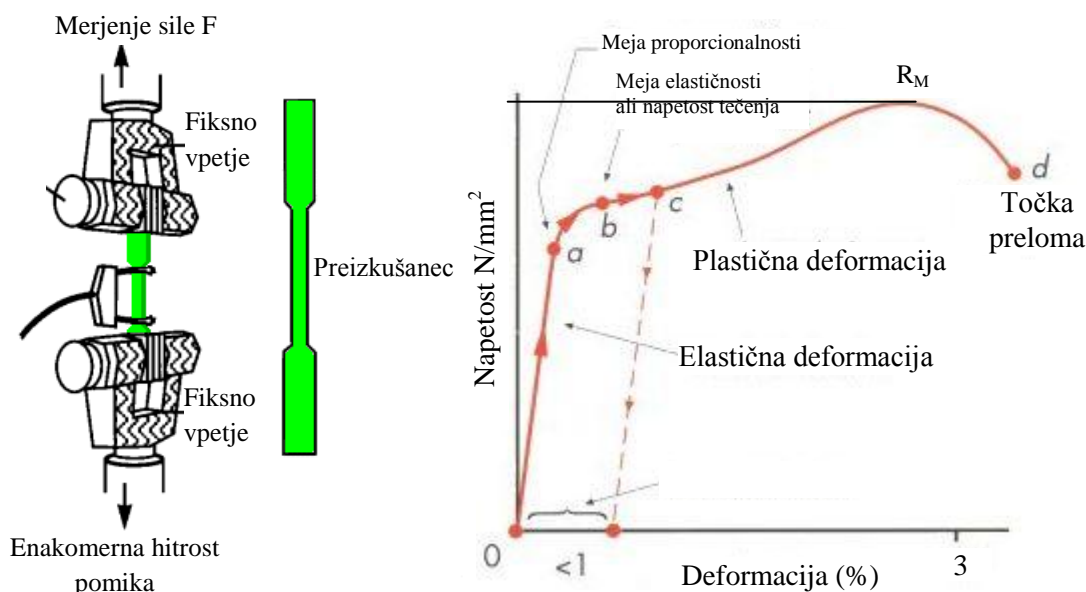
Potek preizkusa:



Preizkušane obremenimo s silo. Obremenitev na enoto površine imenujemo napetost σ . Med potekom povečevanja obremenitve se mu spremeni oblika – govorimo o deformaciji.

Deformacija nastane v dveh smereh. V smeri dolžine jo imenujemo vzdolžna deformacija ali relativni raztezek, v prečni smeri pa prečna deformacija ali kontrakcija. Deformacije so lahko elastične, ki po razbremenitvi izginejo ali pa plastične, ki po razbremenitvi ostanejo. Diagram napetost – raztezek ($\sigma - \epsilon$), ki je predstavljen na sliki 39 nam pokaže obnašanje materiala pri nateznem preizkusu.

Raztezek merimo na srednjem delu preizkušanca. Z meritvijo raztezka in kontrakcije lahko ocenimo preoblikovalne sposobnosti materiala. Pri preizkušanju se moramo ravnati po predpisanem standardu, kjer je določena velikost, natančnost in kvaliteta preizkušanca, način preizkušanja ter način vrednotenja rezultatov. Natezne preizkuse izvajamo na nateznem stroju, ki je sestavljen iz stabilnega okvirja z delovnim cilindrom, ter pulta z manometrom za merjenje obremenitve, lahko v povezavi z računalnikom.



Slika 39: a) Natezni preizkus; b) Krivulja natezne imenske napetosti glede na začetni preizkusni presek S_0

Vir: Prirejeno po: www.nsbri.org/HumanPhysSpace/focus6/student2.html/ (25. 5. 2010)

V diagramu brez izrazite napetosti tečenja prehod iz področja elastičnosti ni izrazit – glej sliko – točka b (jasno razločen), zato je dogovorjen prehod pri dogovorni napetosti tečenja $R_{p0,2}$. Plastična deformacija se začne ob prehodu epruvete v odebeljeni del. Tam se material utrdi, zato se plastično deformira področje ob njem. Plastična deformacija pri konstantni napetosti se nadaljuje vse dotlej, dokler se ne deformira material po celotni merilni dolžini.

Lastnosti posameznih parametrov v diagramu:

Natezna trdnost R_m je največja napetost, ki jo vzdrži preizkušani material.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [N/mm^2]$$

Meja proporcionalnosti R_{pr} je največja napetost, do katere je razmerje med raztezkom in napetostjo nespremenjena konstanta.

Modul elastičnosti E je razmerje med razliko dveh napetosti in ustreznim raztezkom v elastičnem območju.

$$E = \frac{\frac{F_2 - F_1}{S_0}}{\frac{\Delta L_2 - \Delta L_1}{L_0}} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Napetost tečenja R_p je tista napetost pri kateri opazimo prvo močno trajno raztezanje. Pri tem napetost v materialu lahko niha in dobimo zgornjo napetost tečenja R_{eH} ter spodnjo napetost tečenja R_{eL} .

Naravna napetost tečenja je značilna za mehka jekla, ko obremenitev med postopkom zastane ali celo pade.

Neizrazita napetost tečenja $R_{p0,2}$ je napetost, ki po razbremenitvi pusti na materialu 0,2 % trajnega razteзка.

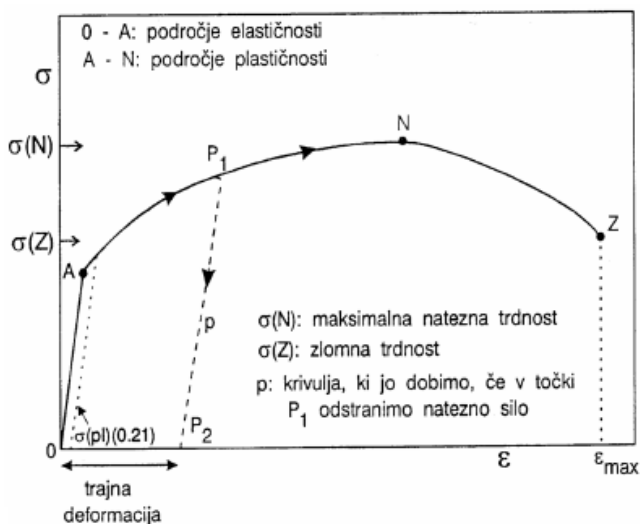
Elastična napetost R_{elast} je tista mejna napetost v materialu, do katere še ne nastopi plastična sprememba oblike. Definirana je kot napetost, pri kateri je dovoljeni raztezek do 0,01 % merilne dolžine ($R_{p0,01}$) oz. do 0,005 % merilne dolžine ($R_{p0,005}$) za natančnejše meritve.

V tehniki nas predvsem zanima prehod v področje makroplastičnosti. V diagramu brez izrazite napetosti tečenja ni jasnega prehoda, zato je bilo sklenjeno, da je ta pri dogovorni napetosti tečenja $R_{p0,2}$, torej pri napetosti, ki povzroči trajno deformacijo $\varepsilon = 0,2$ %. (pri $L_0 = 100$ mm je to pri $\Delta L = 0,2$ mm).

Raztezek ali podaljšek A je razlika med merilno dolžino preizkušanca pri določeni obremenitvi in njegovo začetno dolžino. Za praktično uporabo se navaja ε v %.

Kontraktacija ali zoženost Z je zožitev prečnega prereza preizkušanca (maksimalna v primeru točke pretrga). Izračunamo jo iz primerjave geometrijskih podatkov začetnega prereza in prereza po pretrgu.

Kvalitativno razlago nekaterih točk v diagramu σ - ε nam prikazuje slika 40.



0- Ravnotežje

A- Elastična deformacija: pod vplivom sile se atomi nekoliko premaknejo z ravnotežnih mest; če sila popusti, se atomi vrnejo v ravnotežni položaj

P₁- Plastična deformacija:

pod vplivom sile atomske plasti povsem spremenijo medsebojni položaj;

P₂- Plastična deformacija: ko sila po plastični deformaciji popusti, atomi zdrsnejo v v najbližji minimum; atomi zavzamejo nove ravnotežne položaje.

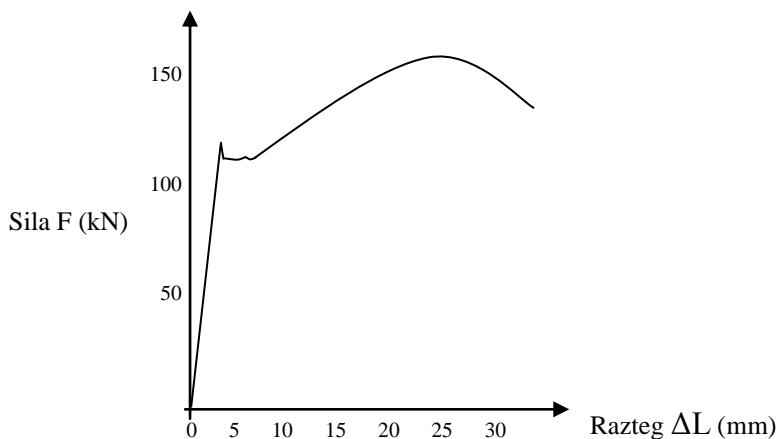
Slika 40: Tipičen prikaz diagrama σ - ϵ

Vir: Prirejeno po: www.ki.si/fileadmin/.../Tehnologija_gradiv_in_keramike_FGG.pdf (25. 5. 2010)



Razmislite, rešite, odgovorite:

- V čem se razlikujeta diagram brez izrazite napetosti tečenja in diagram z izrazito napetostjo tečenja?
- Zakaj se v diagramu $\sigma - \epsilon$ pojavi maksimum na krivulji, v diagramu dejanska napetost raztezek pa ne?
- Pojasnite razliko med skupnim, elastičnim in plastičnim raztezkom konstrukcijsakega jekla.
- Naloga: *Natezni preizkus (slika 41)*. Pri preskusu je bila uporabljena epruveta z naslednjimi dimenzijami: $L_0 = 100$ mm; $d_0 = 20$ mm. Po pretrgu epruvete je bilo izmerjeno, da je premer na mestu pretrga $d_u = 12,32$ mm, ter dolžina epruvete pri pretrgu $L_u = 124,8$ mm.



Slika 41: Krivulja F- ΔL

Vir: Lasten

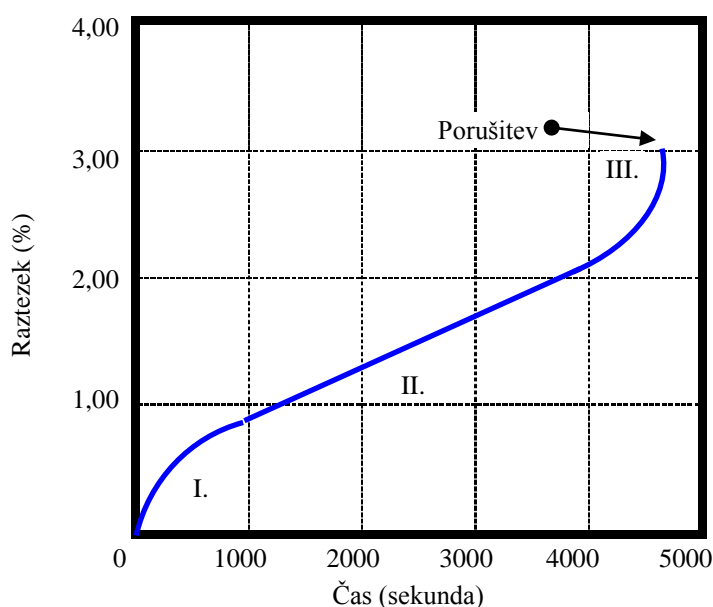
- a) Izračunajte spodnjo napetost tečenja R_{eL} in zgornjo napetost tečenja R_{eH}
- b) Izračunajte natezno trdnost R_m
- c) Izračunajte razteznost A in s pomočjo diagrama določite razteg po pretrgu
- d) Izračunajte porušno napetost σ_u
- e) Izračunajte kontrakcijo Z
- f) Ugotovite skupni, elastični in plastični raztezek pri maksimumu krivulje

4.1.2 Trajni mirujoči preizkus

Lezenje je časovno odvisna deformacija. Pojavi se, ko je temperatura višja od $0,4 \cdot T_t$ (absolutnega tališča kovine – v K), napetosti v materialu pa so manjše od napetosti tečenja pri tisti temperaturi. V takih razmerah se zaradi toplotno aktiviranih procesov, ki potekajo v njem, s časom deformira – trajna deformacija se s časom povečuje, čeprav je obremenjen s konstantno silo (lahko tudi napetostjo).

Pri preizkusu lezenja (trajnem mirujočem preizkusu) dobimo krivuljo lezenja, na kateri je prikazana odvisnost stopnje deformacije preskušanca od trajanja preizkusa (slika 42). Preizkus izvajamo pri konstantni temperaturi ter obremenitvi preskušanca. Na njej so običajno tri področja:

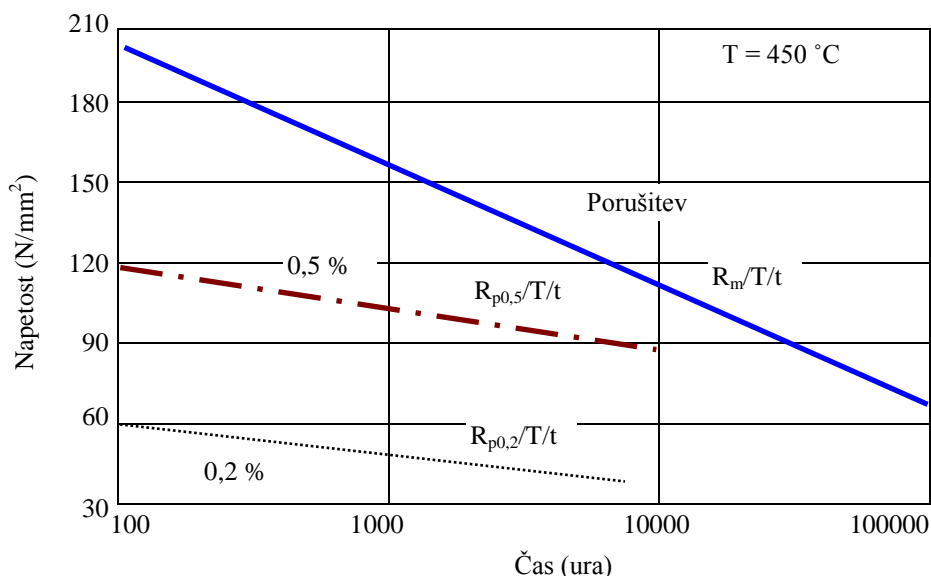
- primarno lezenje, hitrost deformacije s časom pojema,
- sekundarno lezenje, hitrost deformacije se s časom ne spreminja – je konstantna,
- terciarno lezenje, hitrost deformacije s časom narašča in končno privede do loma preskušanca.



Slika 42: Krivulja lezenja
Vir: Lasten

Pri preizkusih lezenja ugotavljamo časovno trdnost materiala, ki jo označimo z $R_m/T/t$. To je napetost, ki pri temperaturi T povzroči porušitev po času t . Časovna napetost tečenja $R_{px}/T/t$ je tista, ki pri temperaturi T povzroči trajno deformacijo x odstotkov po času t .

Z več preizkusi lezenja lahko konstruiramo za prakso pomembnejši diagram napetost - čas, v katerem podamo časovno napetost tečenja (na sliki 43 sta to $R_{p0,2}$ in $R_{p0,5}$) ter časovno trdnost. Če hočemo, da mora material dalj časa zdržati pri neki temperaturi, ne da bi se porušil oziroma ne da bi presegel neke vnaprej dogovorjene deformacije, potem je potrebno zmanjšati napetost, s katero je obremenjen. Po daljšem času preizkušanja povzroči neko deformacijo ali porušitev manjša napetost kot pri krajšem.



Slika 43: Diagram časovne napetosti tečenja in časovne trdnosti
Vir: Lasten

Časovna trdnost R_m je napetost, ki pri temperaturi T povzroči porušitev po času t . Časovna napetost $R_{px}/T/t$ je tista, ki pri temperaturi T povzroči trajno deformacijo x odstotkov po času t . Iz krivulje lahko določimo čase, da dosežemo določen trajni raztezek, čas do zloma, hitrost lezenja v področju sekundarnega lezenja.



Vprašanja:

- Ali je smiselno izvesti preizkus lezenja za material, ki se uporablja le pri sobni temperaturi?
- Ali se tudi monokristal kovine deformira z lezenje?

4.1.3 Preizkus udarne žilavosti

Materiali, ki se uporabljajo za gradnjo strojev, prevoznih sredstev ..., so pogosto izpostavljeni udarnim obremenitvam, ki povzročijo velike deformacijske hitrosti. Pri tem se trdnostno in lomno obnašanje večine gradiv bistveno spremeni. Mnogi materiali se pri statičnih oziroma počasi naraščajočih obremenitvah prelomijo žilavo, pri udarnih pa krhko. Pri udarnih obremenitvah se predvsem zmanjša žilavost materiala, kar se odraža v makroskopsko krhkem lomu – brez opazne plastične deformacije na mestu loma. Poleg povečane hitrosti deformacije povečujeta nagnjenje h krhkemu lomu še nizka temperatura in večosno napetostno stanje. Izredno velik vpliv na pojav krhkega loma ima koncentracija napetosti ob zarezah, zato praviloma izvajamo udarne preizkuse na vzorcih z zarezo. Posebej moramo poudariti, da lomna varnost konstrukcijskega elementa ni odvisna le od zunanjih dejavnikov, temveč tudi od stanja materiala (hladno preoblikovan, toplotno obdelan ...).

Charpyjev udarni preizkus

Pri udarnem preizkusu merimo delo, ki je potrebno za prelom preizkušanca. Za ugotavljanje udarne žilavosti se najpogosteje uporablja udarni preizkus po Charpyju. Uporabljamo preizkušance z zarezo U ali V, ki so standardizirani po standardu SIST EN ISO 179-1:2001/A1:2005. Preizkušanec položimo na podporo, z zarezo obrnjeno stran od udarnega kladiva. Kladivo spustimo. Pri določenem upogibu preizkušanca nastane na natezni strani ob zarezi razpoka, ki napreduje do popolne ločitve obeh delov preizkušanca. Kladivo se po

prelomu preizkušanca dvigne na nasprotno stran do kota, ki je tem manjši, čim več energije se je porabilo za lom. Za plastično deformacijo in napredovanje razpoke porabljena energija kladiva se imenuje udarno delo ali udarna žilavost.

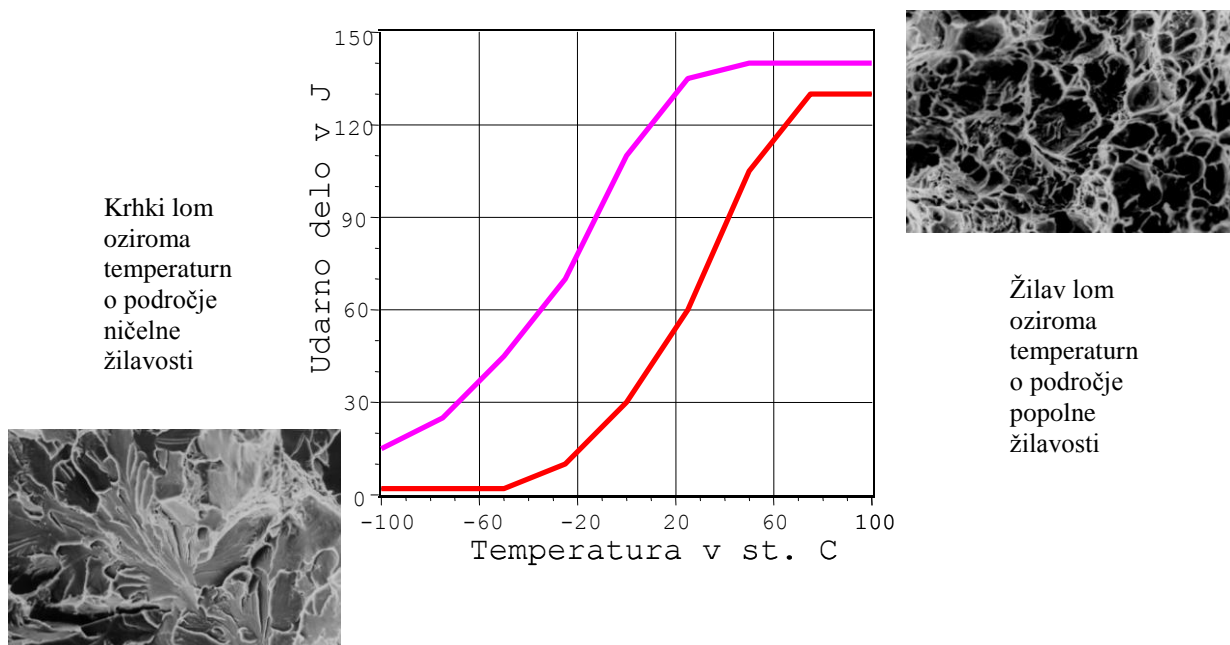


Zapomniti pa si moramo naslednje: udarna energija, izmerjena pri Charpyjevem preizkusu, je le relativna energija in je ne moremo uporabiti neposredno za dimenzioniranje konstrukcij (Tuma, 2002, 142).

Za nekatere materiale (npr. za večino jekel) je značilno, da se udarno delo zmanjšuje s nižanjem temperature. Pri takih jeklih je pomembno, da ugotovimo prehodno temperaturo žilavosti, pod katero jekla naj ne bi uporabljali zaradi nevarnosti krhke porušitve. Obstaja več definicij prehodnih temperatur žilavosti (slika 44). Ena izmed najenostavnejših je določena na osnovi srednje udarne žilavosti.

Prehodna temperatura žilavosti je lahko pomemben kriterij pri izbiri materiala, ki se uporablja pri nizkih temperaturah. Če je predvideno, da se bo nek konstrukcijski element uporabljal npr. pri $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, potem mora imeti jeklo, ki bi ga lahko izbrali, prehodno temperaturo žilavosti pod $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pri zelo nizkih temperaturah (npr. pri temperaturi tekočega dušika $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) lahko izbiramo le med materiali, ki imajo primerno udarno žilavost tudi v takih razmerah. Navadno so najprimernejše kovine in zlitine s kristalno zgradbo PCK (avstenitna jekla, nikelj in nikljeve zlitine ...).



Slika 44: Temperaturna odvisnost udarnega dela z označenimi prehodnimi temperaturami žilavosti

Vir: Lasten



Razmislite, poiščite, odgovorite:

- Kateri so razlogi, da izvajamo udarni preizkus? Ali je smiselno izvajati udarni preizkus pri materialih, ki se pri vseh temperaturah obnašajo krhko?
 - Izdelajte kritično oceno prispevka o udarnem preizkusu različnih polimerov, ki ga najdete na spletni strani www.engineeringpolymers.com/epbb/ch07.html.
 - Naloga, ki jo študent izvede v sklopu [laboratorijskih vaj](#): v tabeli 3 so podatki o udarni žilavosti štirih jekel, ki vsebujejo različne masne deleže mangana.
- a) V Excelu narišite diagram odvisnosti udarnega del od temperature za vsa štiri jekla.

- b) Za vsako jeklo ugotovite prehodno temperaturo žilavosti, če vzamete kot kriterij srednjo žilavost.
 c) Kako masni delež mangana v jeklu vpliva na temperaturo prehoda žilavo – krhko?
 d) Katerega izmed jekel bi izbrali za uporabo pri -20 °C?

Tabela 3: Podatki o udarni žilavosti jekel z različnim deležem mangana

Temperatura (°C)	0,30 % Mn	0,39 % Mn	1,01 % Mn	1,55 % Mn
-100	2	5	5	15
-75	2	5	7	25
-50	2	12	20	45
-25	10	25	40	70
0	30	55	75	110
25	60	100	110	135
50	105	125	130	140
75	130	135	135	140
100	130	135	135	140

Vir: Lasten

4.1.4 Merjenje trdote

Trdota je lastnost materiala, ki je definirana na več načinov. Po eni izmed osnovnih definicij je to odpornost materiala proti vdiranju tujega telesa skozi njegovo površino. Za kovine je praviloma primernejša naslednja definicija: »Trdota je odpornost materiala proti lokalni plastični deformaciji«. Merjenje trdote je praktično zelo uporabna metoda, saj z njo ugotavljamo kvaliteto toplotne obdelave, globino cementirane in nitridirane plasti ..., vendar na osnovi trdote ne moremo dimenzionirati strojnih oziroma konstrukcijskih elementov.

a) Merjenje trdote po Brinellu in Vickersu

Merjenje trdote po Brinellu in Vickersu je zelo podobno, zato bomo obe metodi obravnavali skupaj. Za merjenje trdote po Brinellu uporabljamo kot vtiskalno telo kroglico iz karbidne trdine, medtem ko je pri Vickersovi metodi vtiskalno telo štiristrana diamantna piramida z vršnim kotom 136°. Pri obeh metodah s konstantno silo vtiskujemo vtiskalno telo v površino preskušanca in povzročimo lokalno plastično deformacijo materiala. Po razbremenitvi izmerimo premer vtiska (Brinell) oziroma dolžini obeh diagonal vtiska (Vickers) ter izračunamo trdoto skladno z ustreznimi izrazi. Z Vickersovo metodo lahko ugotavljamo trdoto poljubnega materiala, medtem ko po Brinellu merimo trdoto materialov do 650 enot.

Trdoto izmerjeno po Vickersu in Brinellu navadno navajamo na naslednji način:

150 HV 30/20 – trdota po Vickersu je 150 enot, uporabljena sila je bila 30·g (g je gravitacijski pospešek), čas merjenja 20 s.

120 HBW 5/62,5/30 – trdota po Brinellu je 120 enot, uporabljena je bila kroglica iz karbidne trdine s premerom 5 mm. Sila je bila 62,5·g, čas merjenja pa 30 s.

Kovinski materiali se pri hladni deformaciji utrjujejo. Zato je material okoli vtiska trši kot drugod. Zaradi tega morajo biti zaporedni vtiski na primernih medsebojnih razdaljah. Poleg tega se deformira material tudi v globino (v smeri delovanja sile). Za pravilno meritev mora biti debelina preizkušanca dovolj velika v primerjavi z globino vtiska. Če je premajhna, opazimo na spodnji strani sledove merjenja. Na sliki 45 je prikazan prečni prerez in trije vidni vtiski v osnovi aluminijeve zlitine. V bližini vtiskov vidimo površinsko razpoko.



Slika 45: a) Merjenje trdote po Vickersu
Vir: Lasten

b) Merjenje trdote po Rockwellu

Merjenje trdote po Rockwellu se od merjenja trdote po Vickersu in Brinellu razlikuje predvsem po tem, da merimo globino vtiska. Kot vtiskalno telo se lahko uporablja diamantni stožec z vršnim kotom 120° ali pa jeklena kaljena kroglica. Obstaja cela vrsta metod merjenja trdote po Rockwellu. Najbolj znani sta HRC (C je začetna črka angleške besede cone, ki pomeni stožec) in HRB (B iz ball – kroglica).



Razmislite, rešite, odgovorite:

- Razmislite, zakaj pri metodi po Rockwellu najprej obremenimo vzorec s predobremenitvijo.
- Zakaj je potrebno, da je material pri ugotavljanju globine vtiska obremenjen z enako silo kot pri predobremenitvi?
- Kaj bi lahko storili, če bi ugotovili, da je pri izbranih merilnih parametrih merjenja debelina pločevine premajhna?

c) L-trdota

Merilna metoda Leeb HL je bila razvita 1978.

Pri tej metodi vtiskujemo v material posebno vtiskalo, pri čemer ne merimo površine vtiska, pač pa njegovo globino. Vtiskalo je diamantni stožec (HRC) z vršnim kotom 120° (in polmerom zaoblitve 0,2 mm) ali kaljena kroglica (HRB) s premerom 1,5875 mm ali 3,175 mm. Udarno kroglično telo, narejeno iz volframovega karbida izstrelimo na površino telesa s silo vzmeti. Pri razdalji 1 mm od površine izmerimo odbojno in udarno hitrost. Permanentni magnet, vstavljen v udarnem telesu, povzroči pri prehodu indukcijske tuljave, električno napetost, ki je sorazmerna hitrosti magneta.

Trši material razvije višjo odbojno hitrost kot mehkejši material. Za specifične materiale (jeklo, aluminij) lahko vrednost HL pretvorimo v ostale statične metode merjenja trdote (HB, HV, HRC).

Pri HL-trdoti, kakor tudi pri vseh statičnih merilnikih trdote, spreminjamo velikosti udarnega telesa glede na različne testne materiale. Pri HL-trdoti je možno spreminjati obremenitve na testni površini materiala. Pri HL-trdoti spreminjamo velikosti udarnega telesa glede na različne testne materiale.



Razmislite, odgovorite, rešite:

- Razmislite, zakaj ni dovolj, da bi uporabili samo eno vrsto mehanskih preizkusov.
- Poiščite podobnosti med nateznim preizkusom in poskusom lezenja.

- Ali se modul elastičnosti pri plastični deformaciji spremeni? Kje lahko uporabimo to dejstvo?
- Zakaj ne moremo pri vseh gradivih ugotavljati napetosti tečenja R_{eH} ?
- Kako lahko z dislokacijsko teorijo pojasnite utrjevanje materiala pri plastični deformaciji?
- Ali je natezna trdnost večja od porušitvene napetosti? Podrobneje predstavite odgovor. Ali je preskušavec tudi v plastičnem področju nateznega diagrama elastično deformiran?
- Kaj pomeni pojem prehodna temperatura žilavosti? Ali je vrednost prehodne temperature žilavosti pomembna pri izbiri jekla za uporabo v Sibiriji?
- Jeklo je precej krhko. Ali bi za preizkus udarne žilavosti izbrali preskušavec z zarezo U ali V?
- V čem se razlikujeta preizkusa udarne žilavosti in utrujanja?
- V čem se razlikuje preizkus lomne žilavosti od preizkusa udarne žilavosti?
- V čem je razlika med Wöhlerjevo krivuljo in Smithovim diagramom?
- Kaj pomeni oznaka 300 HBW 5/62,5/30?
- Kako bi zastavili raziskavo, da bi s čim manj preizkusi izdelali Wöhlerjevo krivuljo in Smithov diagram?
- Na kaj moramo paziti, da bo rezultat merjenja trdote veljaven?

4.2 PREISKAVE MATERIALOV BREZ PORUŠITVE

Preiskave potekajo brez porušitve materiala in omogočajo preiskave celotne količine materiala. Fizikalna osnova in skupno tem metodam je dovajanje energije v material oziroma posredovanje le-te skozi njega nepretrgoma ali pa v časovnih presledkih. Ta energija mora biti takšna, da prodira skozi material ali pa samo v površinski sloj in pri tem na napaki spremeni določeno karakteristično veličino, ki je merljiva po velikosti in obliki. Energija je električna, magnetna, v obliki elektromagnetnega valovanja ali pa mehanska. S temi preiskavami ugotavljamo kompaktnost materiala, odkrivamo lunke, vključke, mehurje in razpoke.

Glavne preiskave materialov brez porušitve so:

- a) metoda z magnetnim prahom;
- b) penetracijska metoda;
- c) metoda z ultrazvokom;
- d) radiografska metoda (RTG in preiskave z γ žarki).

a) Magnetna defektoskopija

Odkrivamo napake, ki so na površini ali tik pod njo, do globine 2 mm. Mesto na katerem predvidevamo, da bo napaka, namagnetimo. Če je prisotna napaka, magnetne silnice izstopajo iz površine materiala. Krožno magnetno polje dobimo, če skozi preizkušavec vodimo električni tok velike jakosti in majhne napetosti.

Kot magnetni prah uporabljamo zelo drobno zmlet železov oksid Fe_3O_4 .

Prah lahko posujemo v suhem stanju ali pa ga pomešamo s tekočino – običajno oljem. Je črne barve in nam pokaže napake na belih ali sivih površinah. Metoda je preprosta, hitra in zanesljiva, primerna za odkrivanje napak na feromagnetnih materialih.

b) Penetracijska metoda

Uporabljamo jo za odkrivanje površinskih napak – predvsem razpok, s pomočjo tekočin. Bistvo te metode je, da nekatere tekočine prodirajo v zelo drobne, očesu nevidne razpoke v

materialu. Če nato površino prevlečemo z snovjo, ki tekočino iz razpoke absorbira, postane razpoka vidna.



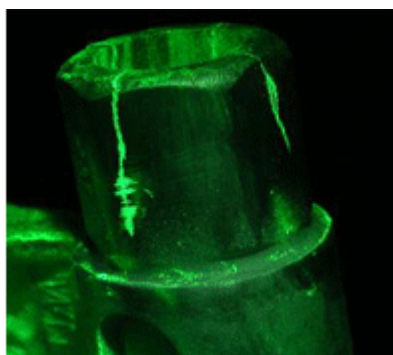
Postopek:

Predmet potopimo v petrolej (tudi redka olja) ali z njim prelijemo samo površino in počakamo (10 do 15 min), da petrolej prodre v razpoke. Predmet nato obrišemo s krpo in površino premažemo z zmesjo krede, premešane z alkoholom ali drugo lahko hlapljivo tekočino. Ko alkohol izhlapi, vsesa posušeni kredni prah petrolej iz razpok, se obarva in nakaže, kje v materialu je razpoka.

Občutljivost povečamo, če predmet segrejemo, pa tudi z uporabo obarvane tekočine. Tekočini dodamo lahko tudi fluorescentno snov, ki povzroči, da razpoke fluorescirajo, če jih osvetlimo z ultravijoličnimi žarki, kot prikazuje slika 46.

Preiskava s tekočino ni primerna za natančne ali serijske preiskave, je pa poceni metoda, ki je primerna za zvarke in ulitke, ko nimamo na razpolago drugih preizkuševalnih metod.

Preizkava je primerna tudi za delo na terenu, za velike zvarjence ali ulitke, kjer moramo kontrolirati površine v različnih legah. Kontroliramo lahko tudi predele, kjer npr. z UZ sondami ne moremo blizu.



Slika 46: Preiskava materiala z MET-L-CHEK fluorescentnim penetrantom

Vir: www.team-trade.si/index.php?location=971 / (17. 8. 2010)

c) Ultrazvočna defektoskopija

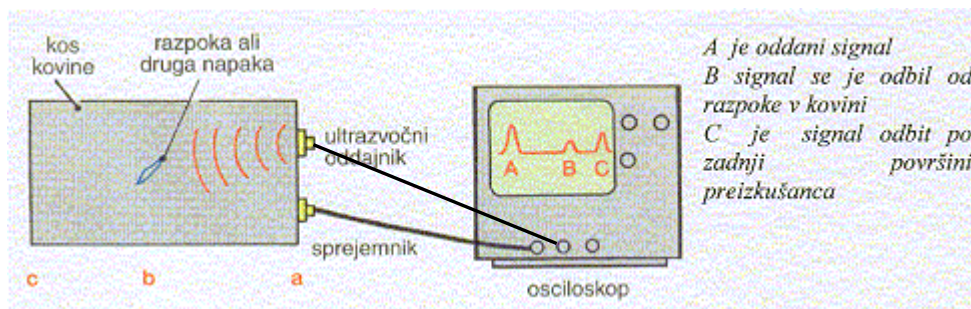
Ugotavlja napake v materialu s pomočjo ultrazvoka. S to metodo odkrivamo napake v notranjosti predmeta, ki se kažejo kot lunckerji, plinski mehurčki, dvoplastnost ... Kontroliramo debele in tanke pločevine, gredice, bloke, platine, žice, ulitke, zvarne spoje ...

Ultrazvočni defektoskop in potek preizkusa:

Te preiskave izkoriščajo pojav delnega odboja ultrazvočnega signala pri prehodu meje med dvema materialoma. Visokofrekvenčni generator v impulzih pošilja visokofrekvenčne signale na vibrator (piezoelektrični kristal v ultrazvočni sondi). Ta začne oscilirati in sproži ultrazvočno valovanje (mehansko valovanje), ki potuje v material. Do prvega delnega odboja pride pri prehodu iz UZ sonde v testni material. Ko doseže ultrazvočni val napako v materialu, se ponovno delno odbije in odbiti del vrne v ultrazvočno sondo, ki sprejema povratne valove in tako deluje kot sprejemnik. Rezultate odčitamo na zaslonu katodne cevi. Na abscisi odčitamo mesta delnih odbojev in tako tudi globino na kateri se nahaja napaka v materialu. Na ordinati prikazovalnika odčitamo jakost odboja in s tem oceno velikosti napake.

Poševna ali kotna UZ sonda omogoča vpad ultrazvočnih valov v material pod določenim kotom. Vrsta UZ sonde, ki jo uporabimo, je odvisna od oblike vzorca in možne lege napake. Boljši so aparati z večjo površino sonde. Frekvenca sonde, ki jo izberemo, je odvisna od več parametrov: vrsta materiala preizkušanca, mikrostruktura, zrnatost, kvaliteta površine ...

Globina prodiranja ultrazvočnih valov je odvisna od jakosti impulza, površine vzorca in kontaktnega sredstva. Slika 47 prikazuje osnovni princip UZ zaznave napake v preizkušancu.

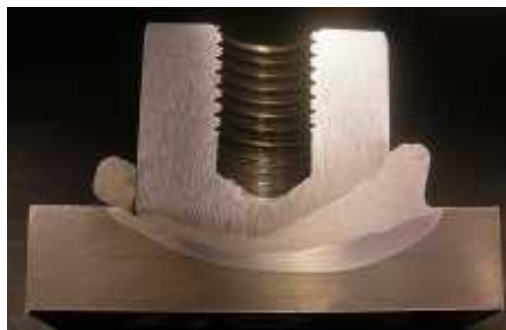


Slika 47: Uporaba ultrazvoka pri iskanju napake v materialu

Vir: <http://zvonko.fgg.uni-lj.si/seminarji/ultrazvok/uzvok11.gif/> (14. 4. 2010)

4.3 METALOGRAFSKE PREISKAVE KOVIN

Za metalografske preiskave je vzorec kovine potrebno ustrezno pripraviti in sicer z brušenjem, poliranjem in jedkanjem. Na mikrostrukturo kovinskega materiala vpliva več faktorjev kot so: kemična sestava, procesi izdelave, predelave in toplotne obdelave jekla, kasnejše mehanske obdelave, varjenje, vplivi okolja in različna področja delovnega okolja ... Seveda so metalografske preiskave pri raziskovalno razvojnem delu ključnega pomena za poznavanje kovinskih materialov. Na sliki 48 je prikazana metalografska preiskava zvarnega spoja.



Slika 48: Metalografska preiskava zvarnega spoja

Vir: <http://www.imk.si/html/metalografske.htm/> (12. 8. 2010)

Glavni namen te preiskave je ugotoviti mikrostrukturne značilnosti, od katerih so odvisne lastnosti in uporabnost materiala. Najpogostejša opazovanja mikrostrukture kovin: tip, vrsta in razvrstitev strukturnih komponent, velikost kristalnih zrn in izločkov, množina, vrsta in velikost ter razvrstitev nekovinskih vključkov, razpoke, pore, mikrolunke v materialu, izceje v zlitinah, neenakomerna porazdelitev legirnih elementov.

Metalografske preiskave so makroskopske in mikroskopske. Pri makroskopskih opazujemo kovino s prostim očesom ali lupo s povečavo do 20-krat. Opazujemo na primerno pripravljene površini ali prelomu. Mikroskopske raziskave opravimo z optičnim mikroskopom, ki poveča do 2.000-krat ali elektronskim, ki poveča do 1.000.000-krat.

Za to opazovanje je potrebno površino skrbno obrusiti, polirati in jedkati. Metalografska preiskava poteka po naslednjem vrstnem redu: jemanje vzorcev, brušenje vzorcev, poliranje in jedkanje obruskov.

- Jemanje vzorcev

Izbira je namenska ali sistematska. Izrežemo jih iz mest, ki jih hočemo preiskati. Vzorce, ki so zelo krhki in porozni, vlagamo v vpenjala, ki jih lahko zalijemo z organskimi ali

anorganskimi snovmi ali spojinami, ki ne smejo reagirati z vzorcem ali jedkalom. Pripravljen vzorec moramo primerno označiti z minimalnimi podatki.

- **Brušenje vzorcev**

Z brušenjem vzorcev odstranjujemo grobo hrapavost na raziskovalni površini vzorca.

Brusimo z abrazivnimi snovmi, ki so nanesene na papir ali platno. Vzorec brusimo po stopnjah hrapavosti, na vsaki stopnji ga obrnemo za 90° in brusimo tako dolgo, da izginejo raze predhodnega brušenja. Brusno sredstvo moramo pravilno izbrati glede na material vzorca. Postopek izvajamo na zraku, v zaščitni atmosferi ali v vakuumu.

- **Poliranje**

Je postopek po brušenju, kjer dobi vzorec bleščečo in gladko površino. Uporabljamo dva postopka poliranja: mehansko in elektrolizno. Po poliranju moramo površino vzorca oprati z vodo in alkoholom ter jo dobro posušiti.

- **Jedkanje obruskov**

Šele postopek jedkanja odkrije pravo mikrostrukturo kovin. Jedkanje je postopek, pri katerem povečamo optični kontrast med različnimi mikrostrukturnimi sestavinami. Ta nastane zaradi selektivnega raztapljanja ali barvanja mikrostrukturnih faz na raziskovalni površini vzorca.

Za različne namene preiskav uporabljamo različne vrste raztopin za jedkanje.



Razmislite, poiščite, rešite:

- Koristne informacije o metalografskih preizkavah materialov najdete na spletnih straneh: <http://www.struers.com/> in <http://www.buehler.com/>. Na teh dveh spletnih straneh poiščite različne sisteme za metalografsko analizo vzorcev in praktične primere.

Povzetek

Najstarejši preizkus določevanja mehanskih lastnosti kovinskih materialov je nedvoumno natezni, o katerem je v svojem času poročal že Leonardo da Vinci. Do danes natezni preizkus ni prav nič izgubil na svojem pomenu; nasprotno, vedno bolj postaja očitno, da z njim lahko pridobimo tudi praktično pomembne informacije. Udarno merjenje žilavosti je drug, močno uporabljen način merjenja mehanskih lastnosti materialov. Pomen preizkušanja materialov je pomemben še posebno v fazi oblikovanja in razvoja novih proizvodov.

V nadaljevanju navajam dva primera podjetij, ki se zavedata pomembnosti preizkušanja materialov za povečanje konkurenčnosti svojih lastnih proizvodov:

...v družbi se zavedamo, da je pogoj za uresničitev ciljev temeljita prenova laboratorijev in razvoj novih storitev. Metalografski laboratorij bo tako postal osrednji laboratorij, v katerem bodo potekale metalografske preiskave, ki povezujejo značilnosti mikrostrukture z razvojem lastnih materialov.

...v mehanskem laboratoriju želimo poleg obstoječega nateznega preizkusa izvajati tudi merjenje ostalih mehanskih lastnosti, kot so tlačni preizkus, upogibna trdnost, udarna žilavost in podobno, kar bi naročnikom iz skupine zagotovilo dodatne informacije o mehanskih lastnostih aluminijevih zlitin, pa tudi boljši servis. V laboratoriju za toplotno obdelavo nameravamo izvajati tudi zahtevnejše toplotne obdelave, ki bi nam omogočale tudi določanje izbranih mehanskih lastnosti pri povišani temperaturi. V ta namen bo potreben nakup naprave za žarjenje vzorcev. V kemijskem laboratoriju pa se bomo osredotočili na implementacijo novejših postopkov določanja sestave aluminijevih zlitin. Skupina mora namreč svojim kupcem ves čas zagotavljati vrhunsko kakovost svojih izdelkov.

5 KOROZIJA

Korozijski poskusi v morski vodi kažejo, da so med nerjavnimi jekli neke razlike. Korozijska hitrost je predvsem očitna v prvi fazi preizkušanja, ko govorimo o pasiviziranju površine. Najbolj očitno je kromovo martenzitno nerjavno jeklo. Razlika med njimi pa je tudi v absolutni izgubi mase med poskusom, saj se je pri nerjavnem jeklu, ki je legirano z bakrom, korodiralo največ materiala.

Preizkušanje nerjavnih jekel v agresivnejšem mediju, v vreli raztopini žveplene kisline, vode in modre galice, pa je pokazalo velike razlike med njimi, saj je martenzitno kromovo jeklo izgubilo v času 24-urnega poizkusa kar 800 mg mase. V primerjavi z najbolj obstojnim jeklom v tem mediju, avstenitnim, ki je izgubilo le okrog enega miligrama mase, je razlika res očitna. Avstenitno krom-nikljevo jeklo je bilo najbolj odporno v obeh preizkušanih medijih, vendar je njegova uporaba omejena zaradi tega, ker je povišanje trdote in natezne trdnosti močno le s hladno predelavo, kar pa je v mnogih primerih zaradi končne oblike izdelka nemogoče, zato se takrat odločimo za uporabo sicer manj korozijsko odpornega martenzitnega jekla.

Korozija (corrodo = nagristi, nagrizenje) je razkroj kovine, ki se začne na površini zaradi kemijskih ali elektrokemijskih procesov. Notranje napetosti in zunanje obremenitve pospešijo napredovanje korozijskih procesov. Korodirajoča kovina se postopoma pretvarja v oksidno obliko. Produkt korozije pri jeklu imenujemo *rja*, proces pa *rjavenje*. Pri bakru je to *patina* in je zelene barve, pri aluminiju pa se tvori kompakten oksidni sloj, ki popolnoma zaščiti površino.

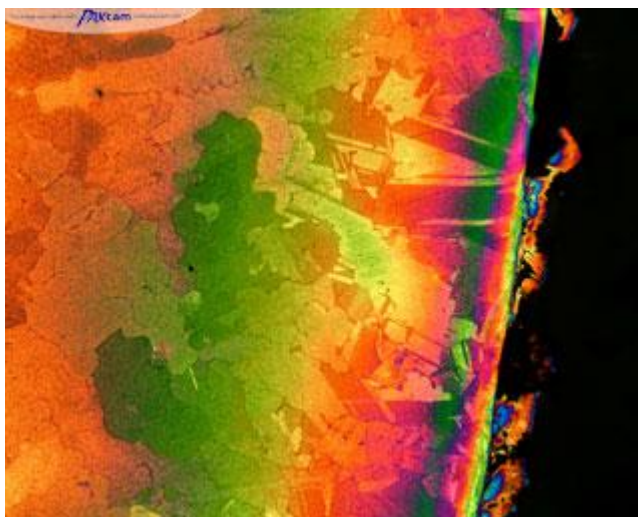
Začetna faza korozije je pri nekaterih kovinah zaželeno, ker na površinah nastanejo goste oksidne naravne pasivne plasti, ki zavirajo nadaljnji proces oksidacije. Te plasti nastanejo v krajšem ali daljšem časovnem obdobju, kar je odvisno od kovine. Pasivnost kovine se zmanjša z razkrojem oksidne plasti, ki ga sprožijo tuji ioni.

Pasivizacija je uspešna le tedaj, kadar so oksidne plasti mehansko dovolj trdne in kemijsko obstojne v obdajajočem mediju. Zelo pomembna je gostota plasti, saj je nadaljnja oksidacija možna skozi porozno plast, zato mora biti poroznost pasivne plasti zelo majhna. Strojni elementi so med obratovanjem izpostavljeni različnim obratovalnim in okoljskim vplivom. Zato nastane korozijska plast, ki je odvisna od različnih vplivov:

- vrste kovine ali zlitine,
- kvalitete površine,
- napetostnih razmer v materialu,
- vrste snovi, ki jo obdajajo (plini, voda, kisline, baze, organske snovi, ...),
- koncentracije snovi v okolici,
- temperature.

Posledice korozije:

- visoki stroški zaščite novih izdelkov,
- visoki stroški vzdrževanja, predvsem pri neprimerno izbranem gradivu, zaščiti ali konstrukciji,
- prekinitev proizvodnje,
- zmanjšana varnost in zanesljivost delovanja pri toksičnih, eksplozivnih, vnetljivih ali radioaktivnih snoveh,
- neprijeten estetski izgled predmeta, ...



Slika 49: Primer korozije kovine, ki je bila posneta s PAXcam digitalno kamero
Vir: www.paxcam.com/images/Metal_Corrosion_71.htm/ (13. 5. 2010)

Vzroki, mehanizmi nastanka korozije in vrste korozije

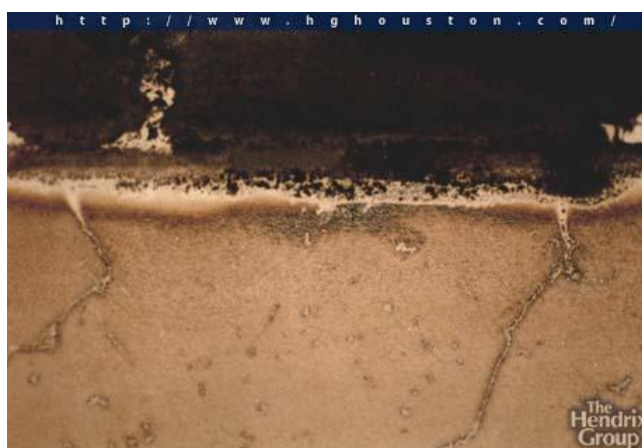
a) Kemična korozija

Poteka v sredstvih, ki niso elektroliti. Nekateri jo imenujejo tudi plinska korozija. Produkt kemične korozije je nova tvorba: oksidi, sulfidi ... Vpliv nekaterih legirnih elementov na razvoj korozije:

- Cr – zmanjšuje oksidacijo, tvori Cr_2O_3 = špinel oksid,
- Mn – zmanjšuje hitrost oksidacije,
- Mo – že majhna količina zmanjšuje oksidacijo,
- Ni – se nabira na površini legure, samo zmanjšuje hitrost oksidacije,
- Ti – zmanjšuje hitrost oksidacije, predvsem v CO in CO_2 atmosferi.

b) Elektrokemična korozija

Pogoj je prisotnost elektrolita. Gonilna sila napredovanja elektrokemične korozije je elektrokemični potencial med dvema kovinama (lahko med različnima strukturama dveh kristalnih zrn). Mikrostrukturo nikljeve zlitine, ki je bila izpostavljena staljenemu natrijevemu sulfatu prikazuje slika 50. Na vrhu fotografije vidimo belo plast z delci sulfida, ki se širi v notranjost materiala.



Slika 50: Primer kemične korozije, povečava 400 X
Vir: www.ghouston.com/x/03.html/ (13. 5. 2010)

Korozija se pojavlja na površini, pa tudi v notranjosti materiala. Glede na to, kako in kje se korozija razvija, ločimo:

- Površinska ali navadna – splošna korozija,
- Lokalna korozija:
 - Točkasta ali jamičasta korozija,
 - Korozija v izvrtinah in ozkih režah in kontaktna korozija,
- Metalurško vplivana korozija:
 - Medkristalna korozija,
 - Selektivno raztapljanje,
- Mehansko podprta korozija:
 - Erozivna korozija,
 - Udarne erozivna korozija,
 - Torna korozija,
 - Kavitacija,
 - Korozijsko utrujanje,
- Pokanje zaradi delovanja okolja:
 - Napetostno korozijsko pokanje,
 - Poškodbe zaradi delovanja vodika,
 - Krhkost zaradi delovanja raztaljene kovine,
 - Krhkost zaradi izločanj pri toplotni obdelavi.

Oglejmo si le nekatere bolj podrobno. Več o koroziji si lahko preberete v knjigi Korozija kovin, ki jo je leta 1991 napisal Leopold Vehovar.

Površinska korozija:

Nastaja na površini materiala in se običajno razvija enakomerno v globino. Pri stiku jekla s kisikom nastane železov oksid in ta korozijska plast je izredno porozna. Železov oksid reagira z vlago, narašča in se drobi. Kisik prihaja iz zraka in prodira v globino in oksidacija se nadaljuje. Oksidacije se pojavljajo v obliki tanke plasti rje, ki se da odstraniti. Hitro jo opazimo zato je manj nevarna, odvisna je od vrste materiala.

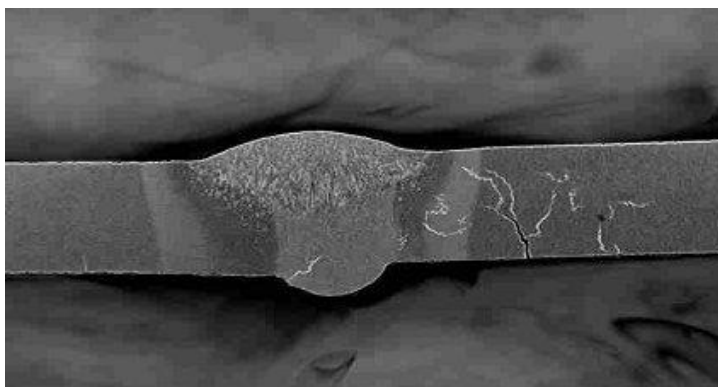


Pri konstrukcijskih jeklih znaša hitrost napredovanja korozije na zraku približno 0,03 mm na leto, v onesnaženem zraku pa do 0,15 mm.

Medkristalna korozija:

Na mejah kristalnih zrn prihaja do napredovanja raztapljanja kot posledica elektrokemičnega korozijskega napada. Posledica je izrazito galvansko delovanje med kristalno mejo in osnovo, kar privede do dekohezije med kristalnimi zrni.

Najslabšo korozijsko odpornost kažejo kristalne meje, na katerih se izcejajo različne faze, nečistoče in atomi. V odvisnosti od izvora izcej so te lahko anode ali katode. Med njimi in osiromašeno okolico pride do intenzivne galvanske aktivnosti. Končna posledica je izrazito zmanjšanje žilavosti in mehanskih lastnosti kovine. Primer medkristalne korozije prikazuje slika 51.



Slika 51: Medkristalna korozija v bližini zvara

Vir: www.hbscc.nl/publications/52%20breda/breda2.htm/ (13. 5. 2010)Kavitacija:

Na površinah vodnih turbin, ladijskih vijakov, pogonskih koles v črpalkah ... se, zaradi velike hitrosti gibanja medija in nenehnih sprememb tlaka, na površini tvorijo mehurčki, ki kondenzirajo ali eksplodirajo v bližini površine. Ob takih eksplozijah, ki lahko povzročijo napetost do 1380 MPa ($=1380 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow 140 \text{ kg/mm}^2$), pride do poškodbe zaščitnega filma ali celo do lokalnih – točkastih iztrganin v obliki jamic. Primer kavitacije na reaktorju prikazuje slika 52.



Slika 52: Kavitacija na reaktorju

Vir: www.nirs.org/photogallery/davisbesseimages.htm/ (13. 5. 2010)**5.1 PROTİKOROZIJSKA ZAŠČITA**

Dele, ki jih želimo zaščititi pred korozijo moramo najprej očistiti, da dosežemo čim boljši oprijem zaščitne plasti z osnovnim materialom. Običajno odstranimo s površine prah, maščobe in okside, če pa obnavljamo predmete, odstranimo staro propadajočo zaščito. Postopek protikorozijske zaščite izvajamo po korakih in sicer:

- Mehansko čiščenje:
 - Brušenje: brusni papir, brusne plošče, lamelni brusni,
 - Poliranje: razne polirne paste; ročno ali strojno,
 - Strganje: žične ščetke, razna strgala,
 - Peskanje: kremenčev pesek ali jeklene kroglice,
- Kemijsko razmaščevanje:
 - Uporabljamo za odstranjevanje maščob s površine predmetov. To opravimo z različnimi organskimi tekočimi sredstvi: petrolej, trikloretilen, čistilni bencin, alkohol, alkalne raztopine ...,
- Elektrokemijsko razmaščevanje:

Uporabno za odstranjevanje maščob. Obdelovance obesimo v kad, ki je napolnjena z raztopinami natrijevega fosfata, hidroksida ali karbonata. Raztopina je segreti na določeno temperaturo. Stena kadi je iz nikljevega jekla, ki je obstojno v bazičnih raztopinah in služi kot anoda (+). Predmeti so vezani na katodi (-); med elektrodama teče električni tok. Po razmaščevanju predmete izpiramo z vodo,

- Kemijsko in elektrokemijsko luženje:

Namenjeno je odstranjevanju oksidov in ogorine s površine predmetov. Kemijsko lužimo v raztopinah soli, kislinah ali lugih (žveplena, solna kislina, kuhinjska sol, ...). Pri kemijskem luženju predmete samo potapljam v kemijsko sredstvo, pri elektrokemijskem postopku pa predmete potopimo v elektrolit in jih vežemo kot katodo (-).

Postopki zaščite kovin pred korozijo so naslednji:

- Mehanski postopki,
- Legiranje,
- Umetno ustvarjanje oksidnega sloja,
- Nanos kovinskih prevlek,
- Nanos nekovinskih prevlek.

Poznamo več vrst površinske zaščite s kovinskimi prevlekami in sicer:

- Potapljanje v kovinski kopeli,
- Galvaniziranje,
- Difuzijski postopki zaščite pred korozijo,
- Platiniranje,
- Metaliziranje,
- Trde kovinske prevleke.

Kovinske prevleke so odporne proti koroziji le takrat, če je osnovni material elektrokemijsko stabilen proti zaščitni kovinski prevleki. Če se na jeklu poškoduje cinkova prevleka in pride do podlage vlaga, postane cink proti osnovnemu materialu negativen, cinkova prevleka razpade, osnovni material ostane brez zaščite in začne počasi korodirati.

Nikelj je plemenitejši kot osnovna kovina – jeklo, zato pri poškodbi prevleke korodira osnovni material. Rja ima večji volumen, zato izpodriva še preostalo prevleko; jeklo oksidira "še hitreje", kot če bi bilo brez prevleke.



Naloga: V svojem okolju poiščite tri primere korozije. V katero skupino bi razvrstili vse tri primere glede na razvoj korozije. Če posamezen primer to dovoljuje, izdelajte metalografsko analizo vzorca. Analizirajte rezultate analize.

Povzetek

Ustrezna izbira materiala ima pomemben vpliv na potek korozije. Njegove kemijske lastnosti namreč določajo spekter kemijskih reakcij, ki potekajo ob stiku s korozivnim medijem. V splošnem želimo, da izbrani material čim manj reagira z okolico in na tak način preprečimo korozijski proces.

Z nanosom prevlek na površino material izoliramo od okolja in ustavimo korozijo. Izbira možnih prevlek je velika in nam omogoča uporabo cenejših materialov z zelenimi mehanskimi lastnostmi. Sem sodijo barvne, plastične in kovinske prevleke, različni premazi, emajli, beton. Zaradi velike obremenitve na okolje se pri korozijski zaščiti pojavljajo težnje po čimbolj neškodljivih in činkovitih rešitvah, ki pogosto mejijo na področje zelene kemije.

6 KERAMIKA

Obstojnost keramike proti obrabi med vsakdanjo uporabo je poleg drugih mehanskih lastnosti – trdote, togosti, tlačne in natezne trdnosti ter žilavosti – velikega pomena. Pri obrabni obstojnosti so pomembne mnoge lastnosti, kot so trdota, žilavost, koeficient trenja med stičnimi površinami, morebitne kemične reakcije zaradi močno povišane temperature in nastanek »triboplasti«, tako da je zelo težko najti enolično povezavo med danimi veličinami.

Med keramične materiale spadajo vse nekovinske in anorganske snovi. Keramike so torej vsi kovinski oksidi (Fe_2O , TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2), diamant, SiN , SiC ... Od kovin se ločijo po predznaku temperaturnega koeficienta električne upornosti – pri kovinah je pozitiven, pri keramiki negativen. Anorganske nekovine na splošno slabo prenašajo natezne obremenitve, po drugi strani pa dobro prenašajo tlačne obremenitve, so odporne proti lezenju pri visokih temperaturah, oksidaciji in koroziji in spadajo med toplotne in električne izolatorje.

V keramičnih snoveh ni diskretnih molekul, temveč prostorske skupine, ki so sestavljene iz ene ali več vrst atomov. Te skupine so lahko urejene – tvorijo kristalno mrežo, ali neurejene amorfne snovi. Pretežni del keramičnih snovi predstavljajo spojine kovin z nekovinskimi elementi. Najznačilnejše lastnosti keramičnih gradiv so:

- velika tlačna trdnost,
- dobra kemična obstojnost,
- visoko tališče,
- majhna električna in toplotna prevodnost,
- majhna žilavost in odpornost proti udarcem.

V skupino keramičnih gradiv sodi poleg lončarske keramike in porcelana še klasična tehnična keramika (npr. okrasna in stavbna keramika) ter sodobna tehnična keramika, npr. korundna ali cirkonijeva keramika.

Keramični materiali so odporni proti kislinam, zato se pogosto uporabljajo v kemični industriji za izdelavo aparatov in strojnih delov za črpalke, ventilatorje ter mešalnike, za izdelavo rezilnih orodij, vlečnih matric ...

Izdelava keramičnih izdelkov

Večino keramičnih izdelkov izdelamo direktno iz taline (npr. steklo) ali pa s sintranjem keramičnega prahu. Pri oblikovanju iz prahov lahko izdelke oblikujemo z mehanskim stiskanjem prahov ali vlivalnim oblikovanjem (angl. slip casting). Vlivalno oblikovanje je postopek, pri katerem suspenzijo prahu v tekočini nalijemo v porozen kalup, ki absorbira (vpija) tekočino, na površini kalupa pa ostane plast delcev, ki že ima določeno trdnost. S sintranjem pri visokih temperaturah zmanjšamo poroznost in zvišamo trdnost. Pri vročem stiskanju istočasno poteka stiskanje in sintranje.

Trdnost keramik

Večina keramik je krhkih. Sintrani materiali vedno vsebujejo pore, ob katerih se napetosti koncentrirajo in kjer se začne proces pokanja (krhki lom). Tudi kadar poroznost odstranimo s pomočjo sintranja s tekočo fazo, prisotnost neprekinjene (kontinuirne) tekoče faze vodi do krhkosti.

Zaradi občutljivosti na praske in zelo majhne sposobnosti za plastično deformacijo pri nizkih temperaturah je natezna trdnost keramik nizka in naključna. Tlačna trdnost pa je velika.

Visokotemperaturno lezenje je prisotno pri večini keramik, nastane pa zaradi termičnega aktiviranja sekundarnih drsnih sistemov, plezanja dislokacij, napetostne difuzije in drsenja po kristalnih mejah. Praviloma ima keramični material veliko večjo odpornost proti lezenju kot kovina s približno enakim tališčem.

Toplotna prevodnost keramik

Toplotna prevodnost običajne keramike pri nižjih temperaturah je zaradi poroznosti manjša kot pri monokristalih. Z zmanjševanjem stopnje kristaliničnosti se toplotna prevodnost zmanjšuje. Pri visokih temperaturah pa velike pore zaradi žarčenja na večje razdalje lahko povečajo toplotno prevodnost.

Tehnologije izdelave keramičnih izdelkov

Klasično tehnologijo uporabljamo za večino izdelkov. Mešanico prahov (osnovni material + dodatki za pospeševanje sintranja in omejevanje rasti zrn) mokro zmeljemo do povprečne zrnatosti 1 μm in nato suspenzijo posušimo v razpršilnih sušilnikih. S stiskanjem prahu oblikujemo izdelke, ki jih nato sintramo. Slabost postopka so visoke temperature sintranja in drage peči.

Sodobne tehnologije izdelave keramičnih izdelkov vključujejo izostatično stiskanje. Izostatično stiskanje prahov v modelu iz elastičnega polimera npr. iz gume ali iz plastičnega polimera poteka s pomočjo hidrostatičnega tlaka olja (do 100 MPa). Postopek omogoča izdelavo po obliki kompliciranih izdelkov s homogeno strukturo.

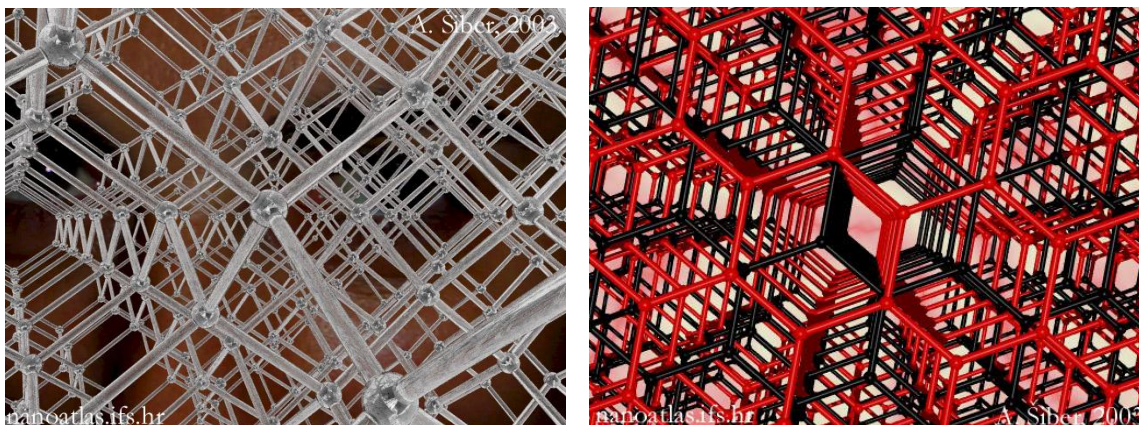
V nadaljevanju si oglejmo nekatere vrste keramičnih materialov:

- Atomska keramična gradiva

V to skupino gradiv spadajo elementi periodnega sistema: C, Si, Ge. Si in Ge sta polprevodnika in se pretežno uporabljata v elektroniki. Ogljik se nahaja v obliki diamanta, grafita, stekla in kot fuleren.

Diamant ima najizrazitejše keramične lastnosti: tališče 4100 $^{\circ}\text{C}$, trdoto 8000 HV. Monokristalni diamant ima trdoto do HV 30 = 70000 N/mm^2 , kar je petkrat več od karbidnih trdin. Upogibna trdnost je le 300 N/mm^2 , tlačna trdnost pa samo 3000 N/mm^2 . Obstojen je do 600 $^{\circ}\text{C}$, pri 800 $^{\circ}\text{C}$ oksidira. V diamantu se vsak atom ogljika nahaja v središču tetraedra. S sosednjimi štirimi atomi je povezan z enojnimi vezmi, kot prikazuje slika 53. Diamant nastane pri visokih tlakih ali pa z naparevanjem ogljika na silicijevo podlago (v elektronski industriji, kjer se uporablja zaradi tega, ker je najboljši električni izolator in toplotni prevodnik). Diamant se najpogosteje uporablja kot brusno sredstvo ter za izdelavo rezil orodij, ki se uporabljajo za vrtnanje in obdelavo trdih snovi. Diamant ni primeren za odrezovanje jekla in drugih materialov na osnovi železa.

Diamant je metastabilna oblika ogljika, ki je stabilna pri visokih tlakih in temperaturah. Pri nižjih tlakih se transformira v grafit pri temperaturah okrog 1200 $^{\circ}\text{C}$.



Slika 53: Atomska struktura diamanta (levo); atomska struktura grafita (desno)

Vir: www.nanotech-now.com/.../antonio-siber.htm / (17. 6. 2010)

Grafit je nekovinski material, ki ga uporabljamo v vedno novih aplikacijah. Poroznost in urejenost strukture sta odvisni od izhodiščnega materiala in izdelovalnega postopka.

Kot mazalno sredstvo pri preoblikovanju kovin daje mazanje z grafitom nizek torni koeficient, toda samo v atmosferi, ki vsebuje kisik ali njegove spojine. Pri dovolj visokih temperaturah pa mazanje z grafitom lahko celo poveča torni koeficient. V vakuumu ali inertnem plinu je torni koeficient razmeroma visok tudi pri sobni temperaturi. Katastrofalna obraba se pojavi v vakuumu, kadar se grafit tare ob baker ali jeklo.

▪ Neoksidna keramika

Snovi iz te skupine so sestavljene iz dveh ali več elementov. To so spojine med C, Si, Ge, B, N in H ter teh elementov s kovinami. Predvsem karbidi (SiC) se že dolgo uporabljajo kot abrazivi. Trdota in tališča teh snovi so takoj za diamantom (tabela 4).

Neoksidna keramična gradiva so možni kandidati za visokotemperaturne materiale v strojništvu. Sedaj se za izdelavo lopatic plinskih turbin in reaktivnih motorjev uporabljajo nikljeve superzlitine, ki obdržijo ustrezne lastnosti do 1100 °C. Spojina Si₃N₄ bi lahko zdržala temperature do 1400 °C. Vendar bo verjetno do uporabe tega materiala minilo še precej časa.

Tabela 4: Lastnosti nekaterih keramičnih snovi

Snov	Kemijska oznaka	Gostota [g/cm ³]	Mikrotrdota po Knoopu HK ₅₀	Temperatura tališča [°C]	Modul elastičnosti [kN/mm ²]	Električna upornost Ohm cm
diamant	C	3,52	7600	4100	890	1014
bornitrid	BN	3,48	4700	3730	590	1012
borkarbid	B ₄ C	2,52	2940	2450	440	1
silicijev karbid	SiC	3,22	2580	2300	470	0.1
silicijev nitrid	Si ₃ N ₄	3,18	1700	1900	206	1012
tantalov karbid	TaC	14,5	1550	3980	550	15 10-6
titanov karbid	TiC	4,93	2800	3070	460	52 10-6
volframov karbid	WC	15,7	2350	2780	700	17 10-6



Osnovna slabost keramičnih gradiv je majhna žilavost. Žilavost se poveča šele nad 0,8·Tt. Kritično je predvsem izmenično ohlajanje in segrevanje strojnih elementov, ko nastanejo v materialu toplotne napetosti. Najmanjšo možnost za nastanek razpok pri izmeničnem ohlajanju in segrevanju imajo materiali, ki imajo veliko upogibno trdnost, majhen modul elastičnosti in majhen temperaturni razteznostni koeficient. Glede na našete lastnosti je najobetavnejši material Si₃N₄ v kombinaciji s Al₂O₃ imenovan Sialon.

Nitridna keramika je odporna proti mehanskim in temperaturnim spremembam, ima veliko lomno žilavost in visoko trdoto pri visokih temperaturah, zato jo uporabljamo za težke pogoje odrezovanja (prekinjen rez pri ulitkih). Nitridna keramika je draga.

▪ Kristalna oksidna keramika

Pri zadrževanju v oksidacijski atmosferi karbidi in nitridi prej ali slej oksidirajo. Pri oksidnih materialih te nevarnosti ni. Oksidna keramika lahko zdrži visoke temperature, vendar ima premajhno odpornost proti temperaturnim spremembam, zato ni možnosti, da bi se uporabljala za gibljive strojne elemente. Največ se uporablja kot ognjevzdržno gradivo - za obzidave talilnih in drugih peči. Ognjevzdržna gradiva morajo imeti naslednje lastnosti:

- visoko tališče,
- kemijsko stabilnost (niso nagnjena h kemijskim reakcijam),
- nimajo transformacij (premen, pretvorb) v trdnem stanju,
- imajo majhen temperaturni razteznostni koeficient.

Te pogoje izpolnjujejo Al₂O₃, CaO, SiO₂, ZrO₂, šamota ... Zgornja temperatura uporabnosti obstoječih gradiv je med 1700-2000 °C. Oksidna keramika je zelo drobnozrnata, odporna

proti obrabi in ima visoko trdoto pri visokih temperaturah. Uporabljamo jo za rezalna orodja za obdelavo železnih kovin.

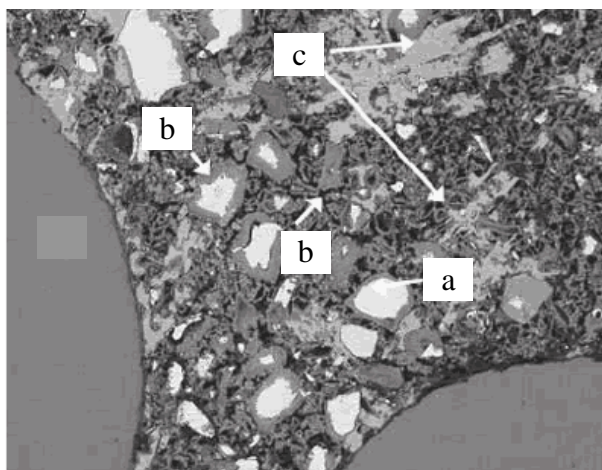
Porcelan je tudi oksidna keramika, ki se izdelava s sintranjem kaolinita. Ima daleč najboljše mehanske lastnosti od vseh keramičnih gradiv. Odlikuje se tudi z veliko kemično odpornostjo in veliko električno upornostjo in dielektričnostjo. Uporablja se kot električni izolator v visokonapetostnih omrežjih.

■ Beton

Beton nastane pri reakciji hidravličnih cementov z vodo. Novonastala spojina – hidrat – poveže vse dodane delce (zrna) v trdno telo. Cement se uporablja od leta 1840. Prej se je kot vezivo uporabljalo gašeno apno.

Shematična predstavitev strukture betone prikazuje slika 54. Sestavine cementa reagirajo z vodo in tvorijo hidratizirani silikat, ki trdno poveže delce peska. Hidratizacija traja okoli 20 dni. Hitrost hidratizacije se lahko poveča, če beton segrevamo s paro.

Beton ima karakteristične lastnosti keramičnih gradiv. Zdrži velike tlačne in zanemarljive natezne obremenitve.



Slika 54: Metalografska slika betona (a – preostanek cementa; b – hidratiziran kalcijev silikat; c – kalcijev hidroksid)

Vir: Prirejeno po: www.fhwa.dot.gov/.../pccp/pubs/04150/chapt14.cfm / (17. 6. 2010)

■ Steklo

Keramična stekla se uporabljajo kot konstrukcijski material v optiki, ker izotropno prepuščajo vidno svetlobo. Stekla so tudi kemično odporna, zato se uporabljajo za gradnjo raznih aparatov v kemijski industriji in laboratorijskih naprav.

Steklo nastane pri neprepočasnem ohlajanju silikatnih talin. Najenostavnejše steklo nastane pri ohlajevanju taline SiO_2 . To steklo imenujemo kvarčno steklo. Kvarčno steklo je popolnoma prepustno za vidno in ultravijolično svetlobo. Kvarčno steklo je težko izdelati, ker ima tališče $1713\text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturni razteznostni koeficient kvarčnega stekla je praktično nič. Zato lahko brez težav zdrži hitre temperaturne spremembe, vendar je zelo krhko.

Steklo lomi svetlobo. Lomni količnik stekla je zelo velik, če vsebuje ione težki elementov Pb^{2+} in Bi^{3+} . Takšno steklo se da brusiti. Imenuje se "kristalno" steklo.

Žilavost stekla je praktično nična. Napake v steklu povzročajo velike intenzitete napetosti in prelom stekla pri zelo majhnih obremenitvah. Z zmanjšanjem velikosti steklenih predmetov - npr. premera vlaken – začne natezna trdnost močno naraščati.

6.1 KERAMIKE ZA REZALNA ORODJA

Orodja, izdelana iz Al_2O_3 , imajo upogibno trdnost 480-690 MPa. Trdota HV 30 = 1800-2100. S keramičnimi rezalnimi ploščicami zaradi njihove krhkosti in občutljivosti na temperaturne spremembe, npr. na hlajenje med odrezavanjem, ne moremo nadomestiti karbidnih trdin. Obraba keramičnega orodja ni odvisna od rezalne hitrosti, kar sicer velja za obrabo orodja iz karbidnih trdin. Zato izbiramo največje rezalne hitrosti (možne bi bile tudi 300-600 m/min) in optimiramo podajanje glede na omejitve obdelovalnega stroja, ki mora imeti veliko togost, sicer bi prišlo do dinamičnih preobremenitev rezilnega roba. V zadnjem času dodajamo korundni keramiki (korund je visokotemperaturna kristalna modifikacija Al_2O_3) dodatke TiC (povečuje trdnost in trdoto – črna keramika) in ZrO₂ (povečuje lomno žilavost – bela keramika). Keramike vseh vrst uporabljamo za obdelavo železnih kovin, ker so do železa inertne in ne prihaja do zvarjanja orodja in kovine, torej dobimo gladkejšo površino.

Značilni izdelki iz keramik so:

- abrazijsko odporne, goste, visoko polirane tesnilne ploščice za armature mešalnih baterij,
- vodila in konusi za vlečenje žice,
- vodila za niti (v tekstilni industriji),
- rezalne ploščice,
- tkanina in volna iz keramičnih vlaken (ki je uporabna do 1600 °C),
- keramične proteze (kompatibilne z živim tkivom),
- ročne škarje za abrazivne materiale.

6.2 KARBIDNE TRDINE

Karbidne trdine so sestavljene iz večjega deleža keramične faze in manjšega dela kovine.

Pojem karbidne trdnine označuje skupino sintranih, trdih in proti obrabi obstojnih materialov, ki temeljijo na karbidih enega ali več naslednjih elementov: W, Ta, Ti, Mo, Nb in V, ki so povezani s kovino, ki ima nižje tališče, navadno Co. Najpogosteje se uporablja wolframov karbid – WC. S spreminjanjem velikosti in vrste karbidnih delcev, deleža vezivne kovine in razmer pri sintranju, lahko optimiziramo obrabno obstojnost, udarno trdnost, odpornost proti sprijemanju in trdoto v vročem. Npr. pri vlečenju žice je obrabna obstojnost matrice ključnega pomena, medtem ko je za rezalna orodja zelo pomembna udarna trdnost.

Izdelava se začne z močnim mešanjem drobnega kobaltovega prahu s karbidnimi prahovi primerne velikosti – navadno med 0,5 μm in 10 μm . Prahovi so zelo drobni v primerjavi z drugimi pri metalurgiji prahov in posledično težko tečejo, če sploh. Zato jih pred polnjenjem forme aglomerirajo. Granule se pomešajo z vezivom in stisnejo v formo. Stisnjene se pedsintra v vodik ali vakuumu pri okoli 900 °C, da se odstrani mazivo, sintra pa med 1200 °C in 1500 °C. V pedsintranem stanju lahko material odrezujemo. To tehniko uporabljamo, ko se za majhne serije ne izplača izdelovati posebnega orodja. Navadno se deli stisnejo in sintrajo v dokončno obliko in mere. Vroče stiskanje v grafitnih formah se tudi uporablja, še posebej za velike kose, tudi vroče izostatsko stiskanje se komercialno uporablja za popolno odstranitev poroznosti.

Drugi materiali, v katerih so boridi in nitridi kovin vezani z vezivnimi kovinami, so tudi znani, vendar se omejeno uporabljajo. Potrebno je zagotoviti osnovo, ki jim daje zadostno podporo, da ostane orodje ostro. Vsak postopek rezanja zahteva posebno obravnavo in material osnove je lahko bron ali pa tudi karbidne trdine.

Karbidne trdine vsebujejo predvsem karbide prehodnih kovin. Karbidi imajo lastnosti med kovinami in keramiko. Odlikujejo jih visoka trdota, tališče ter precejšnja električna in toplotna

prevodnost. Karbidne trdine vsebujejo več kot 85 % karbidov – WC in TiC. Ostalo je žilava kovina. Večinoma se uporablja kobalt, včasih tudi železo in nikelj. Osnovna vloga kovinske faze je v tem, da poveže karbidne delce v celoto in preprečuje širjenje razpok, ki nastanejo v trdih in krhkih karbidih. Karbidne trdine se uporabljajo za izdelavo orodij za odrezovanje, kakor tudi pri orodjih za preoblikovanje. Karbidne trdine omogočajo mnoge večje hitrosti odrezovanja kot hitroreznata jekla. Osnova za to je velika temperaturna stabilnost karbidov, ki dovoljuje dolgotrajnejše segretje na 600-700 °C.



Kermeti spadajo med kompozite s kovinsko osnovo (matrico), in jih uporabljamo za odrezovalna orodja. Kermeti (angl. cermet – ceramic metal) je heterogeno sestavljen material z eno ali več keramičnimi faz, ki predstavljajo 10-90 % volumna kompozitnega materiala in pri katerem je topnost med keramičnimi fazami in kovinskimi fazami pri temperaturah izdelave majhna. Kot keramične faze uporabljamo kovinske okside, boride, karbide, karbonitride in silicide. Silicidi so spojine kovin in silicija.

Kovinska povezovalna faza je lahko na osnovi kovin Ni, Co, Fe, Cr, Mo, W in njihovih zlitin s še ostalimi kovinami.

Kermeti se uporabljajo v obliki rezalnih ploščic. Nikelj kot kovinsko vezivo povezuje: Ti(C,N), TiC, TaC, TiN, WC in NbC. TiC daje rezalnim ploščicam visoko odpornost proti obrabi. TiN zmanjšuje trenje in adhezijo med odrezkom in rezalno ploščico.

Kermete z SiO₂, dodatki Al₂O₃ in grafita uporabljamo kot frikcijske materiale za močno obremenjene sklopke in zavore.

Zgradba kermetov je podobna zgradbi karbidnih trdin. Kermeti vsebujejo pravo keramično snov, običajno je to titanov nitrid TiN ali titanov karbonitrid Ti(C,N). Kermeti se uporabljajo kot visokotemperaturno gradivo in material v jederski tehniki.



Razmislite, poiščite, izdelajte:

- Na spletnem iskalniku google.com poiščite praktični primer uporabe kermetov.
- V sklopu seminarских vaj pri predmetu Materiali izdelajte nalogo z naslovom: Uporaba keramike v avtomobilski industriji.
- V sklopu seminarских vaj pri predmetu Materiali izdelajte nalogo z naslovom: Pomen trajnostnega razvoja keramike in njen vpliv za okolje in ljudi.
- Preberite si prispevek o uporabi dvokomponentne keramike na naslovu http://www.pim-international.com/industrynews/features2cim_parts_production/. Izdelajte kratko poročilo.

Povzetek:

Razvoj keramike poteka od prvih pojavov človeških skupnosti in uporabe najstarejše lončevine, katera se je postopoma razvila v keramiko sodobnega človeka. Danes poznamo več vrst keramike, takšne so: terakota, fajansa, majolika, porcelan.

Vsaka od teh vrst se deli še naprej v grobo keramiko za vsakdanjo uporabo, največ v gospodinjstvu in kuhinjah, umetniško keramiko z izbrano estetsko obliko za posebne predstavitve in uporabo, ter keramiko, ki jo uporabljamo v avtomobilski industriji, gradbeništvu, strojogradnji ...

7 TRDE PREVLEKE

Ključni pomen trdih zaščitnih prevlek je zmanjšanje obrabe in s tem povečana trajnost orodij. Pri tem je pomembno razumevanje, kateri mehanizem največ prispeva k obrabi (abrazija, adhezija, korozija, visoka temperatura, lepljenje materiala ...), tako da lahko določimo optimalno prevleko za dani obdelovalni proces. Kombinacija lastnosti posameznih prevlek nam odpre možnosti za nove tehnološke postopke, npr. nizek koeficient trenja in odpornost proti visokim temperaturam omogočata suho obdelavo brez uporabe hladilno-mazalnih tekočin, ki so zdravju in okolju škodljive.

Razvoj trdih zaščitnih prevlek v ožjem pomenu besede se je začel konec šestdesetih letih s kemijskimi (CVD) in konec sedemdesetih let s fizikalnimi (PVD) postopki nanašanja iz parne faze. Zadnjih 20 do 30 let je bilo razvitih veliko novih trdih prevlek, kakor tudi tehnik za njihovo nanašanje. Tako smo soočeni s plazemsko podprtimi postopki nanašanja ter diamantnimi in diamantu podobnimi prevlekami, ki jih je mogoče nanašati že pri temperaturah, nižjih od 200 °C, in dajejo izjemne tribološke lastnosti.

7.1 POSTOPKI NANAŠANJA TRDIH PREVLEK

- PVD (Physical Vapour Deposition) je postopek fizikalnega nanašanja iz parne faze za izdelavo trdih prevlek. Imenujemo ga tudi ionsko prekrivanje oz. platenje. PVD postopek poteka pri 450–500 °C, zato je primeren za prekrivanje rezalnih orodij iz hitroreznega jekla, ki naj vsebuje 5–10 % Co, orodnih jekel za delo v hladnem in za delo v vročem stanju ter karbidnih trdin K 10 in P 20 do P 40. Titan izparevamo s pomočjo nizkonapetostnega električnega obloka iz žareče katode. Proces opišemo lahko kot vakuumsko reaktivno napanje ioniziranih kovinskih ionov v visokovakuumski plazmi z ionskim bombardiranjem substrata (podlage, orodja). Mikrostruktura TiN je drobnozrnata z velikostjo zrn pod 0,08 µm. Debelina prevleke znaša 2,5–5 µm.
- CVD (Chemical Vapour Deposition) je postopek kemičnega nanašanja iz parne faze pri izdelavi trdih prevlek. Substrat (podlaga, orodje) mora imeti temperaturo 900–1100 °C, zato je postopek primeren za nanašanje na orodja iz karbidnih trdin. Nanašamo TiC, TiN, Ti(C,N), SiC. Prevleka je lahko sestavljena iz več plasti – sendvič prevleka. Plasti prevleke so lahko tudi heterogene z dvema ali več fazami v eni plasti, npr. B₄C mešan z TiB₂ ali Al₂O₃ mešan s Ti(C,O).

Vrstni red nanašanja sendvič prevleke je običajno:

TiC plast nanese direktno na karbidno trdino, ker ima zelo podobno linearno temperaturno razteznost kot karbidna trdina. S tem preprečimo luščenje trde plasti zaradi različnega temperaturnega raztezanja pri visokih temperaturah. TiN plast je zadnja, torej površinska plast, ki ima atraktivno zlato barvo in izjemno kemijsko obstojnost. Struktura teh prevlek je zelo drobna, torni koeficient med TiC in jeklom je le 0,15. To pomeni nizko temperaturo na mestu rezanja, kar preprečuje negativne pojave (difuzijo, oksidacijo, navarjanje, legiranje).

- MTCVD (Moderate Temperature Chemical Vapour Deposition) je postopek kemičnega nanašanja iz parne faze pri zmernih temperaturah (700–900 °C) za izdelavo trdih prevlek. Možno je tudi nanašanje pri 600 °C, vendar je pri tej temperaturi nanašanje počasno. Izvor C in N so trimetilamin, dimetilhidrazin, acetonitril in cianovodik. Zaradi hitrega nanašanja lahko dosežemo velike debeline, kar omogoča naknadno poliranje prevlek. MTCVD postopek lahko uporabljamo pri istih materialih kot CVD postopek, poleg tega pa zaradi nižjih temperatur se pri bakru in njegovih zlitinah, keramiki, stelitih, steklu ter poroznih materialih.

- HTCVD (High Temperature Chemical Vapour Deposition) je visokotemperaturni postopek nanašanja iz parne faze pri temperaturah do 1600 °C za izdelavo trdih prevlek iz SiC. Izvor SiC je lahko SiCl₄. Prevleka iz SiC ni primerna za obdelavo železnih kovin. Njena prednost se pokaže pri obdelavi polimernih materialov, zlitin Al-Si in gradiv, obstojnih v ognju.

Kljub temu, da je ob odlični obrabni odpornosti mogoče doseči tudi razmeroma nizek koeficient trenja, pa je uporaba trdih zaščitnih prevlek v strojništvu še vedno bolj izjema kakor pravilo. Glavni problem pomenijo razmeroma visoki stični tlaki ter zelo zahtevno napetostno-deformacijsko polje, ki so mu strojni elementi izpostavljeni med delovanjem. Mnoge numerične in analitične raziskave so pokazale, da se pri oplaščenih sistemih plastična deformacija prične v podlagi in da je zmožnost prevleke prenašati obremenitev v največji meri odvisna prav od podlage. To pomeni, da ob trdi, obrabno odporni površini, potrebujemo tudi primerno pripravljeno podlago, ki bo zmožna dati oporo trdi in s tem krhki prevleki.

Čeprav imamo neomejeno število mogočih kombinacij priprave podlage in nanosa trde zaščitne prevleke, pa moramo biti pri tem zelo pazljivi. Neprimerna kombinacija lahko, namesto želenega izboljšanja, privede do nepričakovanega poslabšanja lastnosti elementa ali naprave. Prav to je razlog, da se je v praksi uspešno uveljavilo le nekaj postopkov, izmed katerih kombinacija nitriranja v plazmi ter fizikalnega nanašanja iz parne faze kaže največji potencial za uporabo trdih prevlek v strojništvu.

Za spremembo ali oplemenitenje stičnih površin in izboljšanje njihovih lastnosti imamo na razpolago najrazličnejše postopke poboljšanja ter postopke nanosa trde zaščitne prevleke. V primeru, da je na površino nanosena plast novega materiala, govorimo o postopkih nanašanja, če pa pride do spremembe mikrostrukture obstoječe površine, pa o postopkih poboljšanja. Lastnosti površine, kakor so zmožnost nošenja obremenitve, obrabna odpornost ter ustrezen koeficient trenja, so seveda odvisne od uporabljenega postopka oplemenitenja površine (Podgornik in Vižintin, 2003, 243). Izbira najprimernejšega postopka oplemenitenja površine je odvisna od mnogih dejavnikov, pri čemer so najpomembnejši delovne zahteve, izbrani osnovni material in parametri oplemenitenja površine.

Najbolj razširjene trde prevleke so na osnovi nitridov prehodnih kovin (TiN, CrN), v zadnjem desetletju pa je prišlo do pravega razcveta večkomponentnih TiAlN (glej sliko 55) in večplastnih prevlek (TiN/TiAlN), kakor tudi prevlek na osnovi ogljika (DLC) in diamantnih prevlek. Najnovejšo generacijo predstavljajo nanokompozitne (TiN + DLC) in samomazivne prevleke (WC + C).



Slika 55: Rezilno orodje prevlečeno s TiN (a) in TiAlN (b) trdimi prevlekami

Vir: www.sadosa.com/HARD%20COATINGS.html/ (12. 7. 2010)

V prvi vrsti morajo biti postopki oplemenitenja ali spremembe površine združljivi z izbranim osnovnim materialom elementa. To pomeni, da sta poleg trdote površine najpomembnejša parametra za izbiro postopka oplemenitenja površine temperatura oplemenitenja ter debelina modificirane oziroma nanese plasti. Trdota oplemenitenih površin se giblje od 250 do 350 HV za toplotno napršene prevleke, do 1000 HV za nitirana in cementirana jekla, vse do 3500 HV pri trdih keramičnih prevlekah, nanesenih iz faze pare (CVD in PVD), medtem ko diamantne in diamantu podobne prevleke dosegajo celo trdoto naravnega diamanta. Debeline plasti so v območju od nanometra do milimetra, temperature oplemenitenja pa med 20 °C in 1000 °C.

Za doseganje zelenih triboloških lastnosti morajo oplemenitene površine združevati ustrezno kombinacijo lastnosti; primerno trdoto, žilavost, toplotno razteznost, adhezijo, koeficient trenja.

Kljub velikemu razponu razpoložljivih materialov in tehnik oplemenitenja se je izkazalo, da preprosto in z uporabo posameznih postopkov oplemenitenja vseh teh lastnosti ni mogoče doseči hkrati. To spoznanje in vse večje zahteve industrije po uporabi lahkih in cenениh osnovnih materialov je vodilo do razvoja novih zamisli oplemenitenja površine (večkomponentne in večplastne prevleke ter kombinacija kemotoplotne priprave podlage in nanosa trdih prevlek, znana tudi kot tehnologija duplex. Poglavitna zamisel vseh zasnutkov oplemenitenja površine je povečanje odpornosti in optimizacija mikrostrukture kompozita, s čimer je mogoče doseči ustrezne lastnosti tako na površini kakor tudi v podlagi.

Izbira ustreznega postopka oplemenitenja površine je še sama po sebi zelo zahtevna naloga. Z združevanjem različnih tehnik oplemenitenja površine se zahtevnost izbire še precej poveča. Tako izbira ustrezne priprave podlage in nanosa trde zaščitne prevleke terja celovito poznavanje prednosti in pomanjkljivosti posameznih tehnologij oplemenitenja ter možnosti njihove kombinacije. Na drugi strani je končna odločitev o načinu oplemenitenja površine vedno kompromis med tehnološkimi in gospodarskimi zahtevami.


V primeru površin prekritih s trdimi prevlekami, je njihovo tribološko obnašanje odvisno od štirih parametrov, to so:

- trdota prevleke,
- debelina prevleke,
- hrapavost površine,
- velikost in trdota delcev v stiku.

Glede na kombinacijo teh štirih parametrov se lahko srečamo z najrazličnejšimi stičnimi situacijami, ki jih okarakterizirajo specifični obrabni mehanizmi.

7.2 LASTNOSTI TRDIH PREVLEK

Trdota trdih prevlek

Eden najpomembnejših parametrov, ki vplivajo na tribološko obnašanje oplaščenih površin, je  trdota prevleke oziroma razmerje med trdoto prevleke in trdoto podlage. Prednost uporabe mehkih prevlek je v znižanju koeficienta trenja, prav tako pa znižajo tudi natezne napetosti v stiku, ki zelo negativno vplivajo na širjenje razpok in s tem na obrabno odpornost elementa. Po drugi strani mehke prevleke niso zmožne prenašati obremenitve.

Debelina prevleke

Naloga prevleke je ločevati stični površini ter z utrditvijo površine zmanjšati njuno obrabo. Če pri tem podlaga ni dovolj toga, da bi nosila obremenitev in dajala zadostno podporo trdi prevleki, lahko le-ta izgubi svojo vlogo. Pod vplivom obremenitve se bo prevleka deformirala v skladu z deformacijo podlage, pri čemer lahko upogibne napetosti v prevleki ter napetosti na meji med prevleko in podlago presežejo kritične vrednosti. To vodi do nastanka in širjenja razpok ter v končni fazi do odpovedi prevleke.

Poškodbo prevleke, zaradi prekomerne deformacije podlage, je mogoče rešiti s povečanjem debeline prevleke, ki nato sama lahko nosi obremenitev. S tribološkega vidika je uporaba tankih trdih prevlek primernejša, in to iz več vzrokov. Nanos debelih prevlek, še posebej v primeru fizikalnega nanašanja iz faze pare, je povezan z nastankom visokih tlačnih napetosti v prevleki, ki v najslabšem primeru lahko privedejo do luščenja prevleke. Po drugi strani je, ob enakem upogibu, debela prevleka izpostavljena večjim upogibnim napetostim kakor tanka prevleka in nastale razpoke hitreje presežejo kritične vrednosti za porušitev.



Razmislite in analizirajte:

- Ugotovite razliko med PVD in CVD prevlekami.
- Uporabite postopek nanašanja trdih prevlek na izdelek.
- Določite uporabo trdih prevlek na osnovi njih lastnosti in lastnosti materiala izdelka.
- Določite uporabo trdih prevlek za orodja in v ostalih primerih v strojogradnji.

Povzetek

Raziskave trdih zaščitnih prevlek so izrazito aplikativne, saj je osnovni cilj povečanje obstojnosti orodij v obratovalnih razmerah. Ugodno kombinacijo lastnosti, ki jih mora imeti trda prevleka, pa lahko dosežemo le s poglobljenim študijem na več nivojih: razumevanje procesa rasti prevleke, analiza vplivov parametrov priprave na lastnosti prevleke in analiza procesov obrabe prevleke. Področje obsega fiziko in kemijo površin, metalurgijo, vedo o materialih in strojništvo. Poleg tematsko usmerjenega razvoja prevleke za konkreten tehnološki problem pa pridobljeno znanje omenjenih procesov pomaga k širšemu razumevanju nanašanja in uporabe trdih prevlek. Najpomembnejši materiali za trde prevleke so nitridi prehodnih kovin. Pri karakterizaciji prevlek so zelo pomembne mehanske lastnosti, kot so mikro- in nanotrdoča ter adhezija, kjer pa nismo omejeni le na trde prevleke.

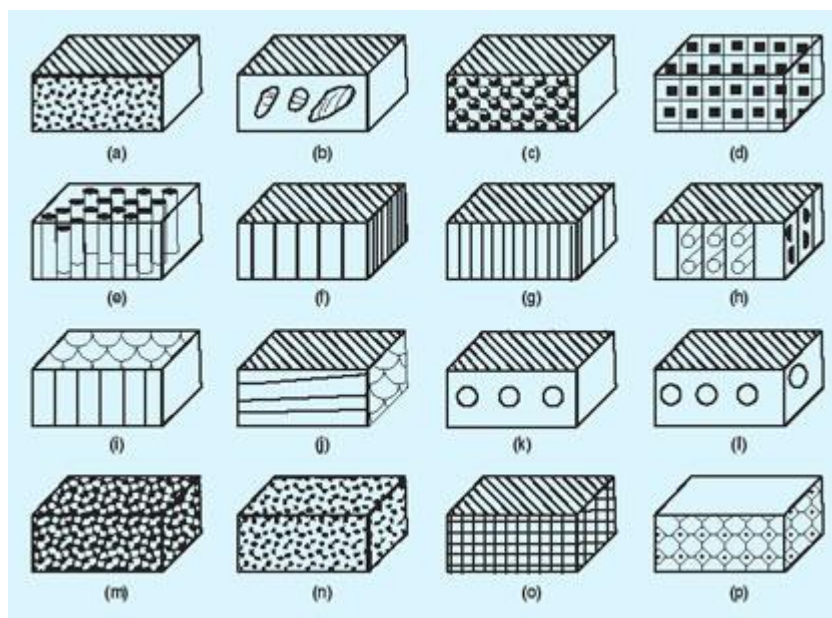
8 KOMPOZITNI MATERIALI

V zadnjem času so postali aluminijevi kompozitni materiali (Al-MMCs) cenejši in tako dosegljivejši tudi za uporabo v avtomobilski industriji. Zaradi vrste odličnih lastnosti: mehanska trdnost, trdota in odpornost proti obrabi, visoka toplotna prevodnost in toplotna kapaciteta, so v primerjavi s sivo litino postali zanimivi tudi za izdelavo zavornih diskov.

Kompozitni material je mešanica vsaj dveh različnih sestavin ali faz, ki mora izpolnjevati še dodatne kriterije:

- posamezne sestavine mora biti vsaj 5 %;
- posamezne sestavine oz. faze morajo imeti bistveno različne lastnosti, tako da ima kompozit drugačne lastnosti od lastnosti posamičnih faz. Zato na primer polimerne materiale z majhnimi dodatki maziv in absorbentov, ki vpijajo ultravijolično svetlobo ipd., ne uvrščamo med kompozite;
- umetne kompozite izdelujemo z namenskim dodajanjem in mešanjem sestavin. Zato npr. dvofazne zlitine, pridobljene iz homogene taline ali po toplotnih obdelavah, ne uvrščamo med kompozite.

Kompozitna gradiva so sestavljena iz dveh ali več vrst materialov. Ena od definicij kompozitov je, da so sestavljeni vsaj iz dveh vrst osnovnih materialov: kovin, keramike ali umetnih snovi. Na osnovi te definicije delimo kompozite na kompozite s kovinsko (MMC), keramično (CMC) in polimerno (PMC) osnovo ali matrico. Matrica običajno predstavlja večinski material, v katerega so vgrajeni drugi materiali. Glede na razporeditev druge faze v matrici delimo kompozite v več skupin skupin: disperzoide, z vlakni ojačane kompozite, laminatne in površinske prevleke, perforirane kompozite ... (Slika 56).



Slika 56: Različne vrste kompozitov

Vir: www.ce-mag.com/.../2000/marapril/Neelakanta.html / (12. 7. 2010)

Matrica in ojačitev

Sestavina, ki je kontinuirna (neprekinjena, zvezna) je matrica. Običajno na kompozit gledamo kot na matrico, ki ji z dodajanjem oziroma vgradnjo druge sestavine izboljšamo lastnosti. Ojačevalna faza je v večini primerov trša, trdnjša in bolj toga, poznamo pa tudi obratno sestavljene kompozite. Vsaj ena od dimenzij oblike delcev ojačevalne faze je majhna – pod

500 μm Ojačevalna faza ima obliko delcev ali obliko vlaken. Delci imajo v vseh treh dimenzijah približno enako velikost. Vlaknata ojačitev ima dolžino znatno večjo od prečnih dimenzij. Hibridi so najčešče mnogoplastni kompoziti z mešanimi vlakni. Pri tem so vlakna lahko mešana v vsaki plasti posebej, lahko pa so plasti različne.

Naravni kompoziti

Les je primer naravnega vlaknatega kompozita. Vzdolžne votle celice lesa so narejene iz spiralno zavrtih celulozskih vlaken pod različnimi koti spirale. Celulozna vlakna so med seboj povezana z ligninom. Lok iz obdobja srednjega veka na sliki 57 je primer dobre konstrukcije iz kompozitnih materialov. Natezna stran loka je bila iz beljave, večji del prereza pa iz črnjave tisovine. Beljava je prozna z visoko natezno trdnostjo, črnjava pa trda z visoko tlačno trdnostjo.

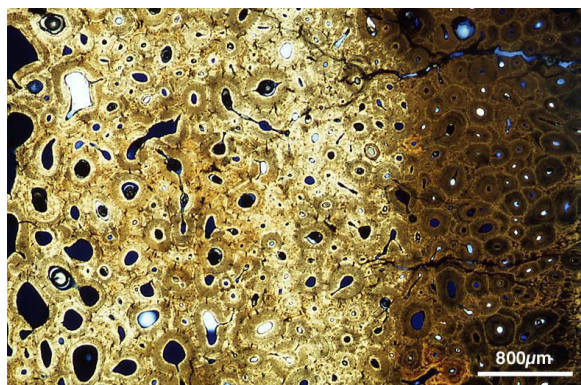


Slika 57: Primer loka, narejenega iz kompozitnih materialov

Vir: www.ancienttouch.com/byzantine%20bone.htm/ (12. 7. 2010)

Kost je tudi kompozitni material, primarno zgrajen iz kolagenskih vlaken. Suha kost brez maščobe vsebuje 35 % kolagena, ki je vlaknata beljakovina oz. vlaknati protein. Z zunanje strani so vlakna obložena z drobnimi paličastimi kristali hidroksiapatita $3 \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})$, z velikostjo $5 \times 5 \times 50 \text{ nm}$. Kosti vsebujejo še vodo in maščobe.

Kost ima visoko stopnjo strukturne hierarhije. V osnovi je organsko-anorganski kompozitni material v katerem so kristali hidroksiapatita razporejeni v matrici iz kolagena. Porozna mikrostruktura omogoča dostop krvnih žil in ima zadovoljivo elastičnost ob majhni gostoti ter znatni trdnosti (Ball, 1997, 34). Različni tipi kosti so posledica različne razporeditve kolagenskih vlaken. Mikrostrukturo luknjičave kosti dinosavra prikazuje slika 58.

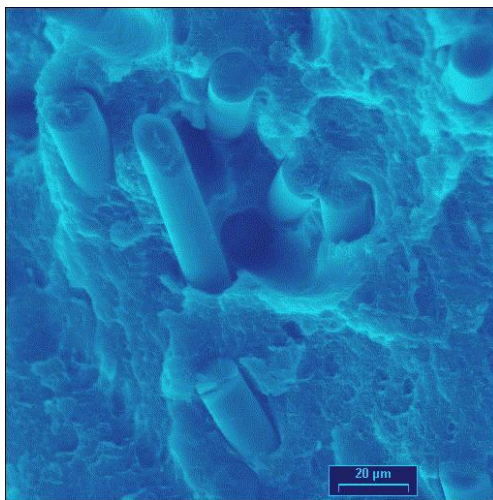


Slika 58: Mikrostruktura luknjičave kosti dinosavra

Vir: [www.geo.ucalgary.ca/.../carbboness/dinobone.html /](http://www.geo.ucalgary.ca/.../carbboness/dinobone.html/) (10. 7. 2010)

Kompoziti, ojačeni z vlakni

Matrica prenaša obremenitve na vlakna, hkrati jih ščiti pred poškodbami in deluje kot medij za zaustavljanje napredovanja razpok. Vlakna z visokimi trdnostmi so draga, ker jih moramo izdelovati v skrbno krmiljenih pogojih. Tudi razporejanje in impregniranje z matrico morata biti natančno izvedena. Posledica je visoka cena, ki jo lahko zniža le razvoj masovnih proizvodnih postopkov. Glavna prednost kompozitov je v manjši masi konstrukcije. Pomanjkljivost kompozitnih konstrukcij so največkrat velike elastične deformacije, ki so posledica manjše togosti (slika 59).



Slika 59: Vlakna armiranega polimernega kompozita, posneto z elektronskim mikroskopom
Vir: www.uni-magdeburg.de/.../wt/13/imgal-eng.html (10. 7. 2010)

V snoveh, ki so utrjene z vlakni, je osnova lahko kovinska, keramična ali polimerna. Vlakna so zvezna ali kontinuirna in prekinjena ali diskontinuirna. Običajno je utrjevalni učinek večji, če je razmerje med dolžino L in premerom d vlaken veliko. Zaradi tehnoloških težav je težko izdelati vlakna, ki so tanjša od $1\ \mu\text{m}$.

Osnovna težnja v razvoju materialov je izdelati material z ugodnim razmerjem med natezno trdnostjo in gostoto, z visoko žarobstojnostjo ter s posebnimi lastnostmi površine. Teoretično bi imele najboljše lastnosti keramične snovi z majhnim povprečnim vrstnim številom: BeO , Al_2O_3 , SiC , B. Toda te snovi imajo majhno preoblikovalnost in veliko zarezno občutljivost. Ustrezno trdnost imajo šele v obliki zelo tankih vlaken, ko se njihova trdnost približuje teoretični vrednosti. Trdnosti $1\text{--}4\ \mu\text{m}$ debelih vlaken nekaterih snovi so podane v tabeli 5:

Tabela 5: Trdnost $1\text{--}4\ \mu\text{m}$ debelih vlaken

Material	Natezna trdnost [N/mm^2]
Ge	12000
Cu	3000
Si	7000
C (grafit)	20000
Al_2O_3	16000
SiC	20000

Vir: Lasten

Prednosti kompozitov

Prednosti kompozitov s polimerno matrico in parametri za primerjavo lastnosti materialov pri različnih načinih obremenitve.

Glavna prednost kompozitov s polimerno matrico (slika 80), je v njihovi majhni gostoti. Specifični elastični modul E/ρ in specifična (natezna) trdnost R_m/ρ sta parametra za primerjavo lastnosti materialov pri različnih načinih obremenitve.

Za elemente v obliki natezno obremenjenih palic bo najlažja palica, ki nosi določeno natezno silo ob določenem maksimalnem raztezku, imela najvišjo vrednost E/ρ .

V primeru na uklon obremenjene palice, bo najlažja palica iz materiala z najvišjo vrednostjo E/ρ . Plošča, obremenjena na upogib, bo pri minimalni masi ob minimalni deformaciji za prenašanje obremenitve iz materiala z najvišjo vrednostjo E/ρ .

Prednosti kompozitov s keramično matrico

Z njimi dosežemo večjo lomno žilavost. Keramike so sicer trde in imajo visoko trdnost, toda zaradi velike verjetnosti pojava razpok pride do lomov pri znatno nižjih obremenitvah.

Prednost kompozitov s keramično matrico je tudi odpornost na visoke temperature (rezalna orodja iz Al_2O_3 , ojačena z lasastimi kristali SiC).



Razmislite, odgovorite, poiščite:

- Kaj je osnovna značilnost kompozitov in kako so sestavljeni?
- Naštejte osnovne vrste umetnih kompozitov in opišite njihove značilnosti.
- Opišite značilnosti ojačitve matrice z disperzijo drobnih delcev.
- Opišite značilnosti ojačitve matrice z razpršenimi delci.
- Opišite značilnosti vlaknasto ojačane matrice.
- Opišite značilnosti lameliranih struktur.
- Pojasnite prednosti projektiranja konstrukcij iz umetnih kompozitov glede na možnosti vpliva projektanta na sestavo materialov.
- Katere so glavne ovire množični uporabi umetnih kompozitov v strojništvu?
- Grafično prikažite primerjavo med gostotami, trdnostmi in moduli elastičnosti tradicionalnih materialov in umetnih kompozitov.
- Pojasnite vlogo polimerne matrice pri umetnih kompozitih in njen vpliv na lastnosti kompozita.
- Opišite način proizvodnje ogljikovih, steklenih in aramidnih vlaken.
- Pojasnite vlogo vlaken v umetnih kompozitih in njihov vpliv na lastnosti kompozita.
- Navedite prednosti in pomanjklivosti kompozitne armature za armiranje betona
- Opišite značilne postopke izdelave umetnih kompozitov.

Povzetek

Kompoziti so materiali, ki so sestavljeni iz dveh ali več komponent. Lahko jih sestavljamo v različne vrste sklopov, pri katerih se lastnosti posameznih komponent optimalno izkoriščajo. Kompozit projektantu omogoča tudi načrtovanje njegovih lastnosti. To pomeni, da se lahko izdelata material, ki bo imel na različnih delih različne lastnosti (glede na predvidene obremenitve in izpostavljenost). Lastnosti kompozitnega materiala se razlikujejo od lastnosti posameznih materialov, ki ga tvorijo. Značilnost kompozitov je, da njihove lastnosti presegajo lastnosti osnovnih materialov zaradi njihovega medsebojnega vpliva v novonastalem materialu. V praksi je večina kompozitov sestavljena iz osnovnega materiala (matrice) in armature (utrditveni material), ki poveča trdnost in togost.

9 POLIMERI – UMETNE MASE

Umetne mase s primernimi lastnostmi postajajo vse bolj pomembne pri zniževanju proizvodne cene avtomobilov, kakor tudi računov za gorivo. Generacije Američanov, ki so nekdanj plačevala za galono goriva dolar, so danes lahko zadovoljne, če najdejo gorivo po ceni 3 dolarje za galono. Američane, ki niso nikoli kupovali avtomobilov zaradi drugih razlogov kot zmogljivost in udobje, danes bombardirajo z oglasi, ki obljublajo ekonomično porabo goriva. Časi se spreminjajo. Proizvajalci iz Detroita morda prodajo manj vozil SUV kot včasih, obstaja pa industrija, ki ji nova religija ekonomičnih vozil prinaša čisti dobiček: predelava umetnih mas.

Zanimiv in informativen članek (<http://www.irt3000.si/P/PDF/IRT3000-22-Avgust2009>) navaja rezultate raziskave ameriškega sveta za kemijo o deležu umetnih mas in kompozitov v povprečnem avtomobilu, izdelanem v Ameriki. Ta se je iz 130 kg leta 2000 (7,3 % teže vozila) povečal na 152 kg leta 2004 (8,3 % teže vozila). Cene goriv dnevno podirajo rekorde, zato so lahke konstrukcije pomembnejše kot kdajkoli prej. Na palec je mogoče oceniti, da 10 % zmanjšanje teže vozila zmanjša porabo goriva za 5 %. Razvoj novih materialov ter spremljajočih postopkov obdelave in preoblikovanja tako postaja prva prioriteta.

Zmanjšanje teže pa ni edini argument za uporabo umetnih mas. Stroški se zmanjšajo tudi kadar plastika zamenja tradicionalne materiale, npr. jeklo. To je še posebej pomembno za podjetja s finančnimi težavami kot sta Ford in General Motors. Nenazadnje pa se lahko proizvajalci z uporabo plastike diferencirajo tudi na področju designa, kot nazorno prikazuje slika 60.



Slika 60: Uporaba umetnih mas v notranjosti avtomobila

Vir: <http://www.irt3000.si/P/PDF/IRT3000-22-Avgust2009/> (23. 8. 2010)

Polimeri so sestavljeni iz velikega števila (od nekaj sto pa do več milijonov) majhnih molekul, ki so med sabo povezane s kemijskimi vezmi. Polimere srečamo praktično na vsakem koraku, pa tudi naše telo je v veliki meri sestavljeno iz polimerov, saj so proteini kemijsko gledano polimeri aminokislin. Poznamo tako naravne kot umetne (sintetične) polimere.

Številni *naravni polimeri* se že tisočletja uporabljajo kot materiali, npr. volna, svila, bombaž.

Umetni polimeri (imenujemo jih tudi sintetični) so plod raziskav, nadomeščajo naravne polimere in imajo posebno kemijsko in fizikalno strukturo, prilagojeno področju uporabe. Plastika je le manjši del ogromne družine umetnih polimerov. Primeri najpogostejših umetnih polimerov so npr. polistiren (PS), polietilen (PE), poliuretan (PU), polietilentereftalat (PET), poliamid (najlon, PA), polimetilmetakrilat (PMMA) ...

V zadnjem času se vse bolj uveljavljajo številni kompozitni materiali, ki so sestavljeni iz polimerov z različnimi dodatki za izboljšanje mehanskih, toplotnih ali električnih lastnosti (npr. steklena vlakna, ogljikova vlakna, silikatni delci ...).

Uporaba polimerov je danes zares široka. Uporabljajo se kot najenostavnejši material za embalažo, izolacijo pa vse do najzahtevnejših aplikacij v biomedicini (implantanti, zobne zalivke, kontaktne leče, nosilci za zdravila...), kot napredni strukturni materiali (kompozitni polimerni materiali v letalih, lahkih športnih rekvizitih...), kot napredni materiali v tekstilstvu (teflonske goretext membrane, polistirenska vlakna za boljše odvajanje vlage ...) in še marsikje. Bolj ko se pomikamo po lestvici od enostavnih poliolefinov (med poliolefine spadajo polietilen, polipropilen, polistiren ...) proti zahtevnejšim polimerom, več znanja potrebujemo za pripravo in obdelavo materiala, vendar pa imajo izdelki iz takih materialov bistveno višjo dodano vrednost. Med najbolj znane primere polimerov z ogromnim komercialnim uspehom sodita kevlar in teflon.

Umetne mase ali polimeri so torej sestavljene iz velikanskih molekul (makromolekul). Makromolekule nastanejo z združevanjem majhnih molekul (monomerov). Značilne lastnosti umetnih snovi - polimerov so naslednje:

- dobra kemijska odpornost,
- majhna gostota (okoli 1 g/cm^3),
- majhen modul elastičnosti,
- majhna trdnost in kemijska odpornost pri povišanih temperaturah,
- dobra preoblikovalnost pri relativno nizkih temperaturah glede na kovine in keramiko.

Umetne mase lahko razdelimo na komercialne ali tehnološke. Tako dobimo plastične mase, kemična vlakna, gume in umetne smole na eni strani, in pa termoplaste, duromere in elastomere na drugi strani. Njihove poglobitve značilnosti so, da so sestavljene iz velikih molekul in imajo majhno gostoto.

Komercialno delimo umetne mase na:

- plastične mase – sem sodijo polimeri za oblikovanje, kot tudi reakcijske smole,
- kemijska vlakna – so zelo tanka vlakna, pridobljena s predenjem iz taline,
- gume – to so z vulkaniziranjem zamreženi elastični materiali,
- umetne smole – so polimerni materiali, ki jih uporabljamo kot veziva, lepila, surovine za lake ...

9.1 TEHNOLOŠKA DELITEV UMETNIH SNOVI

Tehnološko delimo umetne snovi na tri glavne skupine:

- termoplasti, ki so sestavljeni iz nezamreženih makromolekul. Pri segrevanju postanejo plastični, zato jih lahko preoblikujemo. Lahko so amorfn ali delno kristalni.
- elastomeri (gume) imajo šibko zamrežene makromolekule. Lahko se izredno močno elastično deformirajo. Plastično jih ne moremo preoblikovati.
- duroplasti so močno zamrežene makromolekule. So trdi in krhki.

Termoplast ali tudi *plastomer*, je sestavljen iz polimernih verig, ki so lahko rahlo razvejane ali pa dolge linearne. So snovi iz nitkastih molekul, ki so znotraj povezane z močnimi kovalentnimi vezmi, medtem ko so same molekule med seboj povezane s šibkimi Van der Waalsovimi vezmi in so zato občutljivi na toploto. Pri temperaturah med 100-250 stopinj ali pod obremenitvijo postanejo plastični in se zato dajo oblikovati. Pri ohlajevanju postanejo trdi in ohranijo obliko. Vrnitev v novo oz normalno stanje ni mogoča. Termoplasti se pri povišani temperaturi talijo.

Tudi ti (čeprav imajo krhko zasnovo) so izredno uporabni v gradbeništvu, ker se jih da preoblikovati (na molekulski ravni), da se jim izboljša lastnosti, npr. s penjenjem dobimo penasti polimer, ki je izredno uporaben kot toplotna izolacija, razne PVC (polivinilklorid) folije, uporabni so tudi pri raznih inštalacijah (vodovod, plinovod, kanalizacija elektro

inštalacije ...). Dobra lastnost termoplastov je tudi, da se jih večina da reciklirati in ponovno preoblikovati in uporabiti. Lahko pa s sežigom odpadnih polimerov dobimo tudi precejšnjo količino energije, tako npr. v Franciji s sežigom 500.000 ton odpadkov prihranijo 400.000 ton kurilnega olja, saj sta pri izgorevanju količini pridobljene energije enaki.

Duromeri so sestavljeni iz polimernih verig, ki so med seboj povezane z močnimi kovalentnimi vezmi in tvorijo tridimenzionalno mrežasto zgradbo. Pojav, pri katerem se tvorijo kemijske vezi med makromolekulami, imenujemo zamreženje. Obseg oziroma trdnost tega zamreženja določa lastnosti teh materialov. Z naraščanjem stopnje zamreženosti imajo duromeri večjo trdnost, material postaja bolj trd in krhek in ni ga več mogoče staliti. Pri segrevanju razpade prej zamrežena tridimenzionalna zgradba v atome oziroma v maloatomne molekule. Ne moremo jih reciklirati, variti in preoblikovati.

Elastomer je material, ki se lahko po deformaciji sam povrne v prvotno obliko. Elastomeri so iz šibkih zamreženih polimernih verig in stopnja zamreženosti je manjša kot pri duromerih. Med vozlički so odseki polimerne verige močno zaviti. Pri delovanju zunanje sile se verige odvijajo in raztezajo, po razbremenitvi pa ponovno zvijejo. Zato se lahko elastomeri močno elastično deformirajo, ne da bi pred tem spremenili svojo začetno obliko. V neobremenjenem stanju so makromolekulske verige močno zavite, ker je takšno stanje energijsko najugodnejše.

Oblikovanje polimerov

Polimerne materiale oblikujemo in preoblikujemo z različnimi postopki:

- litjem,
- brizgalnim litjem,
- stiskanjem,
- iztiskavanjem,
- varjenjem,
- izpihovanjem,
- izvlačenjem,
- predenjem.

Vmesni ali končni proizvod je lahko v obliki cevi, plošč, folij, strojnih delov, pene za različne namene, vlaken ali pa v obliki sestavin za lake in lepila.

Nekatera dejstva, ki potrjujejo, da so umetne mase materiali 3. tisočletja:

- plastika je povzročila novo industrijsko revolucijo,
- po predvidevanjih bo leta 2020 le še 20 % kovin med industrijskimi materiali – leta 1945 je bil delež kovin 80 %,
- umetne mase so cenejše od jekla, so pa tudi materiali za najdražje izdelke,
- ogromen izbor lastnosti: v prodaji je okoli 6500 vrst umetnih mas, razvrščenih v približno 300 kemijskih spojin.

Umetne snovi predstavljajo glavni funkcionalni del vej industrije:

- *informatika* (trakovi, diski, CD-ji ...),
- *elektronika* (vezja, upori, kondenzatorji, tudi prevodniki, tranzistorji),
- *medicina* (večina aparatov, človeški implantati ...),
- *gradbeništvo* (20–30 % delež plastike v uporabi),
- *proizvodnja embalaže* (prevladujejo poliolefini),
- *kemična industrija* (cevovodi, rezervoarji ...).

Če bi vso embalažo zamenjali s plastično, bi zmanjšali onesnaženje za 25 %.

V vsakdanjem življenju največkrat srečamo naslednje tipe plastike:

- Polipropilen (PP): embalaža, ohišja električnih naprav, avtomobilski odbijači;
- Polistiren (PS): pena za pakiranje, embalaža, pribor za enkratno uporabo, škatle za CD plošče in kasete;
- Polietilen (PE): mnogo cenениh izdelkov za vsakdanjo rabo, npr. plastične vrečke, kozarčki ...;
- Polietilen tereftalat (PET): platenke za gazirane pijače, plastične posode za mikrovalovke Poliester (PES): tekstilna vlakna;
- Poliamid (PA) (najlon): vlakna, ščetine zobnih ščetk, ribiške vrvice;
- Polivinil klorid (PVC): cevi, okenski okvirji, talne obloge;
- Poliuretani (PU): pena za pakiranje, toplotna izolacija, površinske prevleke;
- Polikarbonat (PC): kompaktnе plošče, očala, zaščitna stekla, semaforji;
- Polioksimetilen (POM): avtomobilski deli;
- Polibutilentereftalat (PBT).

9.2 UPORABA POLIMEROV Z DRUGIMI MATERIALI KOT KOMPOZIT

So materiali, ki so sestavljeni iz dveh ali več materialov (matrica + dodatni materiali). Večina vseh materialov v gradbeništvu so kompoziti, saj so praviloma le večfazni materiali (izjema so kovine, čeprav tudi tem dodajamo razne aditive). Prvi umetni kompoziti so bili sestavljeni leta 1915 (elektroizolacijski material iz fenol-papirnatega laminata). Velik napredek je pomenila iznajdba ojačitve epoksidnih in poliestrskih matric s steklenimi vlakni (»fiberglass«), ki je omogočila uporabo kompozitov za konstrukcije. Tehnologija in razvoj kompozitov je še na začetku svojega potenciala, npr. s kombinacijo plastike (ki ima gostoto nekje med lesom in betonom), vlaken (katerih natezna trdnost je primerljiva z jeklom) in raznih drugih polimernih dodatkov lahko dobimo kompozit, ki je izredno lahek, lahko vgradljiv ter ima boljše lastnosti kot armirani beton. Potem imamo takšna in drugačna prepletanja steklenih vlaken (s katerimi dosežemo maksimalno porazdelitev sile in nosilnost v vse smeri), zalitih s trdo epoksi smolo in seveda, najbolj moderni, »sandwich« sistemi (med dvema plastema armirane plastike/epoksija stisnjeno polnilo (razne polimerne pene, aluminijasta satovja, tudi impregnirana satovja iz papirja), katerih kompozit je lahko izredno trda in lahka konstrukcija. Vedno bolj se uporablja kot stropna konstrukcija, saj je izredno lahka ter močna. Uporabnost polimerov v kompozitih je praktično brez meja in se je razvoj šele začel.



Vpliv na okolje in človeka

Plastika je trpežna in kemično inertna, zato se razgrajuje zelo počasi. Odpadna plastika tako predstavlja velik delež odpadkov, ki jih producira človeštvo. V mnogih državah tako obstajajo programi za recikliranje plastike. Težava pri recikliranju plastike je, da različne snovi, ki jim s skupnim imenom pravimo "plastika", zahtevajo ločevanje in različne postopke predelave. Ločevanje je drago, saj poteka večinoma ročno. V ta namen se plastične predmete označuje s standardnimi oznakami za tip plastike:

- Polietilen tereftalat (PET/PETE),
- Polietilen visoke gostote (high-density polyethylene terephthalate, HDPE),
- Polivinil klorid (PVC),
- Polietilen nizke gostote (low-density polyethylene terephthalate, LDPE),
- Polipropilen (PP),
- Polistiren (PS),
- Drugo.

Težava je tudi v tem, da so mnogi predmeti sestavljeni iz delov iz različnih tipov plastike. Odvisno od termostabilnosti se plastiko pri predelavi drobi ali topi. Nekaterih tipov plastike, npr. polistirena, se v glavnem ne reciklira, saj se reciklaža ne izplača.

Plastični predmeti, odvrženi v naravi, zaradi stabilnosti predstavljajo grožnjo naravnemu okolju. Znanih je več primerov, ko so v prebavilu naplavljenih trupel morskih živali ali ptic našli kose plastike, ki so verjetno pripomogli k smrti. Zato raziskujejo biorazgradljivo plastiko, ki razpade ob delovanju UV žarkov, mikroorganizmov, vode ali drugih dejavnikov okolja

Plastika brez dodatkov ob segrevanju razpade na ogljik in vodik, ki reagira z atmosferskim kisikom in nastane voda. Nekateri tipi plastik pa vsebujejo kemikalije za izboljšanje lastnosti, ki se sproščajo ob stiku s tekočinami (npr. pijačo) ali ob sežiganju kot plini. PVC tako vsebuje elemente, ki lahko predstavljajo nevarnost za zdravje ljudi.

Reciklaža polimerov ima kar nekaj dobrih strani, prav tako pa tudi kar nekaj slabih. Dobra lastnost je zagotovo, da lahko večino polimernih mas dokaj hitro pretalimo v drugo zeleno obliko, brez potrebe po velikih napravah. Pravzaprav je postopek reciklaže sledeč:

- polimerne izdelke sortirajo,
- polimerne izdelke s pomočjo mlina zmeljejo na drobne koščke,
- s posebnimi sredstvi dobljeni melj prečistijo,
- melj vsujejo v talilne peči,
- melj stopijo v tekočo maso,
- dobljeno maso v peči stopi in jo po želji obarva,
- maso nalije v kalupe,
- nastal je nov izdelek.

Opisan postopek je le grob oris. V resničnem življenju se koraki lahko izpuščajo ali ponavljajo.

Vendar tudi reciklaža nima samih dobrih strani. Zaradi obsežne palete polimernih mas, s tako raznolikimi lastnostmi, je tudi sortiranje težje. Če pogledamo katerikoli izdelek, bomo na njem videli napis (ABC, PPC, PVC ...). Ta napis pove vrsto polimera. Pomembna lastnost je tudi, da je lahko v masi le ena vrsta polimerov, saj lahko dodatek druge vrste ogrozi integriteto mase. Zaradi tega je pred reciklažo potrebna zelo zapleteno ločevanje odpadkov.



Razmislite, odgovorite, poiščite:

- Kako in zakaj se polimeri uporabljajo za izdelavo cevi?
- Kaj so to polimeri in kako jih razvrščamo po njihovem nastanku?
- Kako na mehanske lastnosti vpliva hitrost in stalnost obremenitve in kako temperatura okolja?

Povzetek

Ob podatkih o proizvodnih količinah sta za vpliv polimernih materialov na okolje pomembni predvsem dve dejstvi. Prvič, da je večina materiala uporabljena za izdelke s kratko ali srednje dolgo uporabno dobo (t.j. manj kot 2 leti), pri čemer je embalaža približno 30 % celotne porabe. Drugič, da so polimeri kemijsko obstojni, tako da obstojnost materiala nekajkrat presega uporabno dobo izdelkov. Iz kombinacije teh dejstev sledi, da bodo na odlagališčih odvržene ogromne količine polimernih materialov dolgo ostale nespremenjene in bodo zasedale prostor. Takšno stanje, ki neizogibno vodi v kopičenje odpadkov, opozarja, da potrebujemo smotrne in ekološko sprejemljive načine odstranjevanja odpadnih polimernih materialov – to pa je tema, s katero se ukvarja reciklaža.

10 LITERATURA

Antona, P.L., et al. Laser Surface Remelting and Alloying of Aluminium Alloys. V: *European Conference on Laser Treatment of Materials*, 1987, str. 133-145.

Božič, S. *Raziskave utrjenega površinskega sloja po laserskem pretaljevanju aluminijevih zlitin*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 1996.

Božič, S. *Vplivi vrste in mase jekel ter ohlajevalnih sredstev na njihove lastnosti po kaljenju*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2000.

Dieter, E. *Mechanical Metallurgy*. London: McGraw-Hill Book Company, 1988.

Grum, J., in Ferlan, D. *Gradiva*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije, 1987.

Inštitut za metalne konstrukcije. *Revija materiali in tehnologije* (online). 2010. (citirano 15. 6. 2010). Dostopno na naslovu: <http://www.imt.si/Revija/>.

Jocić, B. *Slovenska jekla – jekla in železove litine*. Ljubljana: Slovenske železarne, 1996.

Koizumi, Y., et al. Creep life extension of a single crystal superalloy by re-heat-treatment. V: *Fourth International Charles Parsons Turbine Conference on advances in turbine Materials, Design and Manufacturing* Tsukuba, 1997, str. 679–684.

Kos, I., et al. The corrosion resistance of stainless steel. *Materiali in tehnologije*, 2002, št. 5, str. 271–273.

Kovač, M. *Toplotna obdelava*. Slike in zapiski k predavanjem. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 1997.

Kovač, M. *Gradiva*. Zapiski predavanj. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 1999.

Kraut, B. *Strojniški priročnik*. 13. izdaja. Ljubljana: Littera picta, 2002.

Leskovar, P. *Gradiva*. 1. del. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 1986.

Leskovar, P. *Gradiva*. 2. del. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 1986.

Liščić, B. *Steel heat treatment*. New York: Marcel Dekker Incorporation, 1997.

Luft, U., et al. Laser Surface Melting of Aluminium Alloys. V: *European Conference on Laser Treatment of Materials*, 1987, str.147-163.

Mathers, G. *The Aluminium and its alloys*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2002.

Paulin, A. *Mala slovenska enciklopedija metalurgije in materialov*, Ljubljana: Rudarsko-metalurški zbornik, 1997.

Pitch, W., in Sauthof, S. *Microstructure of steels*. Berlin: Springer-Verlag, 1992.

Podgovornik, J., in Vižintin, J. Hard PVD Coatings in Mechanical Engineering – Perspectives. *Strojniški vestnik*, 2003, št. 4, str. 242-249.

Rose, A in Hougardy, H. *Atlas zur warmebehandlung der stahle*. Dusseldorf: Verlag stahleisen M. B. H., 1972.

Struers. *Products – Literature about metalography* (online). 2010. (citirano 2. 7. 2010). Dostopno na naslovu: <http://www.struers.com/>.

Vehovar, L. *Korozija kovin in korozijsko preskušanje*. Ljubljana: samozaložba, 1991.

Vojvodič, J. *Mehanske lastnosti kovin*. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2002.

Zupančič, D. *Označevanje materialov – jekla in železove litine*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 1998.

Zupanič, F., in Anžel, I. *Gradiva*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2007.

Zupanič, F. *Gradiva*. Zbirka nalog in tabel. Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2006.

Projekt **Impletum**

Uvajanje novih izobraževalnih programov na področju višjega strokovnega izobraževanja v obdobju 2008–11

Konzorcijski partnerji:



Operacijo delno financira Evropska unija iz Evropskega socialnega sklada ter Ministrstvo RS za šolstvo in šport. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007–2013, razvojne prioritete Razvoj človeških virov in vseživljenjskega učenja in prednostne usmeritve Izboljšanje kakovosti in učinkovitosti sistemov izobraževanja in usposabljanja.