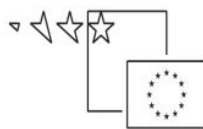




REPUBLIKA SLOVENIJA  
**MINISTRSTVO ZA ŠOLSTVO IN ŠPORT**



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

# MATERIALI

MARIJA KISIN

Višješolski strokovni program: Strojništvo  
Učbenik: Materiali  
Gradivo za 1. letnik

**Avtorica:**

Dr. mag. Marija Kisin, univ. dipl. inž.  
ŠOLSKI CENTER NOVO MESTO  
Višja strokovna šola



**Strokovni recenzent:**

Prof. dr. Ladislav Kosec, univ. dipl. inž.

**Lektorica:**

Gabrijela Šturm, prof. slov.

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

Izdajatelj: Konzorcij višjih strokovnih šol za izvedbo projekta IMPLETUM  
Založnik: Zavod IRC, Ljubljana  
Ljubljana, 2010

*Strokovni svet RS za poklicno in strokovno izobraževanje je na svoji \_\_\_ seji dne \_\_\_ 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. \_\_\_\_\_ 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 PREIZKUŠANJE IN MERITVE .....	5
1.1 NATEZNI PREIZKUS.....	6
1.2 MERJENJE TRDOTE.....	9
1.3 PREIZKUS UDARNE ŽILAVOSTI OB ZAREZI.....	12
1.4 PREISKAVE Z METALOGRAFSKIM MIKROSKOPOM .....	13
1.5 NEPORUŠNE METODE PREIZKUŠANJA.....	14
2 KOVINE IN ZLITINE .....	18
2.1 LASTNOSTI IN UPORABA NEŽELEZNIH KOVIN IN ZLITIN .....	20
3 JEKLA IN ŽELEZOVE LITINE .....	25
3.1 BINARNI FAZNI DIAGRAM STANJA Fe – Fe <sub>3</sub> C.....	25
3.2 RAZDELITEV IN IZBIRA JEKEL .....	28
3.2.1 Konstruktivna jekla .....	30
3.2.2 Orodna jekla .....	31
3.2.3 Posebna jekla .....	32
3.2.4 Označevanje jekla.....	32
3.3 ŽELEZOVE LITINE .....	34
3.3.1 Označevanje železovih litin.....	39
4 TOPLOTNA OBDELAVA .....	42
4.1 NORMALIZACIJA.....	42
4.2 ŽARJENJE JEKLA .....	43
4.3 KALJENJE IN POPUŠČANJE JEKLA.....	44
4.3.1 Kaljenje.....	44
4.3.2 Popuščanje kaljenega jekla.....	45
4.4 KINETIKA AVSTENITNE TRANSFORMACIJE.....	45
4.5 POVRŠINSKO UTRJEVANJE JEKLA .....	48
4.5.1 Površinsko kaljenje.....	48
4.5.2 Kemotermična obdelava površin .....	49
4.6 NAPAKE PRI TOPLOTNI OBDELAVI.....	51
5 METALURGIJA PRAHOV .....	53
5.1 PRIPRAVA PRAHOV .....	54
5.2 OBLIKOVANJE IZDELKOV IZ PRAHU .....	54
6 KERAMIČNI MATERIALI .....	58
6.1 VRSTA, LASTNOSTI IN UPORABA KERAMIČNIH MATERIALOV .....	58
7 CERMETI IN KARBIDNE TRDINE.....	63
7.1 LASTNOSTI IN RAZDELITEV KARBIDNIH TRDIN.....	64
8 TRDE PREVLEKE .....	66
8.1 PRIDOBIVANJE, LASTNOSTI IN UPORABA TRDIH PREVLEK .....	66
9 UMETNE MASE .....	70
9.1 RAZDELITEV, LASTNOSTI IN UPORABA UMETNIH MAS .....	71
9.2 PENJENE UMETNE MASE .....	76
10 KOROZIJA.....	78
10.1 VRSTA KOROZIJE.....	78
10.2 ZAŠČITA PROTI KOROZIJI.....	83
11 LITERATURA.....	85

KAZALO SLIK

Slika 1: Preizkušaneč okroglega prereza za natezni preizkus.....	6
Slika 2a: Diagram napetost ( $\sigma$ ) – raztezek( $\epsilon$ ) .....	7
Slika 2b: Določanje dogovorjene napetosti tečenja $R_{p0,2}$ .....	8
Slika 3: Preizkus trdote po Brinellu .....	9
Slika 4: Preizkus trdote po Vickersu .....	10
Slika 5: Preizkus trdote po Rockwellu C .....	11
Slika 6: Oblike in dimenzije preizkušanca za udarni preizkus žilavosti ob zarezi (levo).....	12
Slika 7: Optični metalografski mikroskop .....	13
Slika 8: Vrstični elektronski mikroskop Quanta 200 3D .....	14
Slika 9: Prikaz ultrazvočne preiskave zvara .....	15
Slika 10: Odklon magnetnih silnic zaradi napake v preizkušancu.....	15
Slika 11: Razdelitev kovinskih materialov .....	18
Slika 12: Shematski potek kristalizacije, nastanek kristalnih zrn in kristalnih mej.....	19
Slika 13: Shematična oblika trdne raztopine: substitucijska (a) in intersticijska (b).....	20
Slika 14: Ulitki iz aluminijevih zlitin.....	21
Slika 15: Različni izdelki iz bakrovih zlitin.....	22
Slika 16: Ulitka iz cinkove zlitine.....	23
Slika 17: Metastabilni fazni diagram železo – cementit ( $Fe - Fe_3C$ ) in stabilni fazni diagram železo – grafit ( $Fe - C$ ) .....	26
Slika 18: Mikrostruktura ledeburita, perlita, avstenita in ferita (500 : 1) .....	27
Slika 19: Razdelitev jekel glede na kemično sestavo, mikrostrukturo in uporabo .....	29
Slika 20: Kakovostna orodja iz orodnega jekla .....	31
Slika 21: Rezalna orodja iz hitroreznega jekla.....	32
Slika 22: Greiner – Klingensteinov diagram.....	35
Slika 23: Razdelitev železovih litin .....	35
Slika 24: Siva litina z lamelarnim grafitom vrste A (50 : 1).....	35
Slika 25: Ulitka iz sive litine.....	36
Slika 26: Mikrostruktura nodularne litine. Levo – feritne (500 : 1) in desno – perlitne (100 : 1) .....	36
Slika 27: Mikrostruktura bele litine .....	37
Slika 28: Oblika grafita v temprani litini (100 : 1) .....	37
Slika 29: Ulitki iz jeklene litine .....	38
Slika 30: Razdelitev postopkov toplotne obdelave.....	42
Slika 31: Mikrostruktura evtektoidnega jekla po sferoidizacijskem žarjenju.....	43
Slika 32: Mikrostruktura jekla C45: tetragonalni martenzit .....	44
Slika 33: Diagram izotermne transformacije avstenita za jeklo evtektoidne sestave .....	46
Slika 34: Bainitno poboljšanje (austempering).....	47
Slika 35: Breznapetostno kaljenje (martempering).....	47
Slika 36: Primeri plamenskega površinskega kaljenja.....	48
Slika 37: Primeri induktivnega površinskega kaljenja.....	49
Slika 38: Različne globine cementacije .....	50
Slika 39: Interkristalni potek kalilne razpoke pri orodnem jeklu (500 : 1).....	51
Slika 40: Enostransko (a) in dvostransko (b) stiskanje .....	55
Slika 41: Različne možnosti izdelave izdelka iz prahov.....	55
Slika 42: Rezalna orodja različnih oblik iz korundne in nitridne keramike.....	59
Slika 43: Različni keramični izdelki .....	61
Slika 44: Oplaščena rezalna ploščica, pritrjena na držalo orodja .....	65
Slika 45: Osnovna shema reaktivnega ionskega prekrivanja s titanovim nitridom .....	67
Slika 46: Izdelki s trdo zaščitno prevleko .....	68
Slika 47: Struktura makromolekul pri duroplastih in termoplastih.....	72

Slika 48: Sendvič konstrukcija s polnilom iz satja .....	75
Slika 49: Stroj za brizganje termoplastov .....	76
Slika 50: EPS lončki za enkratno uporabo .....	77
Slika 51: Primer splošne površinske korozije .....	80
Slika 52: Kontaktna korozija .....	81
Slika 53: Primer interkristalne korozije .....	81
Slika 54: Primer transkristalne korozije .....	82
Slika 55: Jamičasta korozija vlečene jeklene cevi .....	82
Slika 56: Delovanje erozivne korozije na steno kondenzatorske cevi .....	82

## KAZALO TABEL

Tabela 1: Merilne dolžine $L_0$ glede na vrsto preizkušanca .....	6
Tabela 2: Načini preizkušanja trdote po Rockwellu .....	11
Tabela 3: Mehanske lastnosti: trdota HV, natezna trdnost $R_m$ ( $N/mm^2$ ) .....	27
Tabela 4: Vrednost koeficienta glede na legirni element .....	34
Tabela 5: Modul elastičnosti in temperatura tališča nekaterih keramičnih materialov .....	61
Tabela 6: Mehanske in fizikalne lastnosti nekaterih termoplastov .....	73
Tabela 7: Modul elastičnosti in natezna trdnost duroplastov .....	73
Tabela 8: Normalni potencial kovin do vodikove electrode .....	79









## PREDGOVOR

Učno gradivo MATERIALI nas seznanja z najvažnejšimi kovinskimi in nekovinskimi materiali. Vsebinsko je usklajeno s katalogom znanj za predmet Materiali. Razdeljeno je na deset poglavij in predstavlja pregled nad celotnim znanjem. Posamezna poglavja sestavljajo trije vsebinski sklopi, in sicer: uvod, osrednji vsebinski del in povzetek.

Poglavja se zaključujejo z vprašanji, nalogami in praktičnimi primeri za preverjanje ter utrjevanje snovi. Iz podobnih vprašanj in primerov, kot so navedena v učnem gradivu, so oblikovana tudi izpitna vprašanja.









Materiali imajo velik tehnični in gospodarski pomen, zato je poznavanje njihovih lastnosti pomembna naloga strojnega inženirja. Konstruktorju strojev, orodij, naprav in drugih izdelkov omogoča ustrezno izbiro materiala, to pa je zelo pomembno tudi za tehnologa, ki načrtuje izdelovalne tehnologije. Nemogoče pa je uresničiti še tako izvirne projekte in doseči konkurenčnost sodobnih tehnologij, če lastnosti izbranega materiala in njegovih vplivov na okolje ne poznamo dovolj dobro. Glede na ekološko neoporečnost, izbrani material ne sme imeti škodljivega vpliva na okolje, na zdravje ljudi in živali. Pri tem je zelo pomembna sledljivost materiala, ki zagotavlja identifikacijo materiala pri vstopu v proizvodni sistem, kakor tudi pri razstavljanju izdelka in razvrščanju sestavnih delov za namen recikliranja.

Ker moramo za ustrezno izbiro materiala poznati njegove lastnosti, se bomo najprej, v prvem poglavju, seznanili z metodami preizkušanja lastnosti materialov. Če želimo razumeti lastnosti in uporabo kovinskih materialov, potem moramo poznati njihovo notranjo zgradbo, kristalno strukturo in mikrostrukturo, kar obravnava drugo in tretje poglavje. Postopke, s katerimi spreminjamo lastnosti jekla, železovih litin in možne napake teh postopkov, obravnava poglavje štiri. Peto poglavje je namenjeno materialom, ki jih izbiramo v primeru, ko izdelke oblikujemo s postopkom metalurgije prahov.

Drugi del učnih gradiv, poglavja šest, sedem, osem in devet, je namenjeno nekovinskim materialom, kot so: keramika, cermeti, karbidne trdine, trde prevleke in umetne mase. Ker pa je od izbire materiala odvisna tudi ustrezna površinska zaščita in obratovalna doba ter cena izdelka, stroja ali naprave, je zaključno poglavje, deseto, poglavje o koroziji in protikorozijski zaščiti.

Za preverjanje in poglobitev znanja ter v pomoč pri reševanju praktičnih primerov, so v posamezna poglavja učnega gradiva vključeni tudi elektronski viri in dodatni viri strokovne literature.

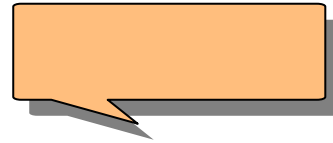
*Po katalogu znanj so pridobljene kompetence študentov naslednje:*

-  *izberejo ustrezn material za konkreten izdelek;*
-  *pri izbiri materialov uporabljajo kataloge in standarde;*
-  *odločajo o primernosti izbranega materiala za določen element;*
-  *izbirajo med alternativnimi materiali;*
-  *poznajo vpliv posameznih materialov na okolje;*
-  *odločajo o uporabi postopkov protikorozijske zaščite;*
-  *odločajo o nanašanju trdih prevlek za razne izdelke;*
-  *poznajo umetne mase in njihove lastnosti.*

## Materiali

V učnem gradivu boste srečali štiri oznake, in sicer:

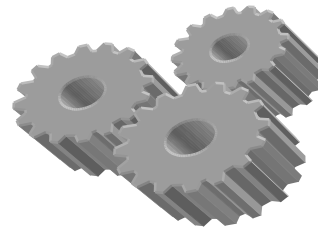
Nekatere osnovne definicije, ki si jih je potrebno zapomniti:



Vprašanja in naloge za razmislek:



Vprašanja, naloge in praktični primeri za preverjanje in utrjevanje snovi ob zaključku posameznih poglavij:



Oznaka v obliki vertikalne črte, na desni strani besedila opozarja, da boste osnovno znanje, ki ga poglavje obravnava, potrebovali in nadgrajevali tudi pri drugih predmetih vašega študija.

Iskreno se zahvaljujem prof. dr. Ladislavu Koscu za strokovno recenzijo in prof. Gabrijeli Šturm za lektoriranje učnega gradiva.

# 1 PREIZKUŠANJE IN MERITVE

## Uvod v poglavje

Različni postopki preizkušanja lastnosti materialov nam omogočajo zagotavljanje kakovosti izdelkov ali posameznih konstrukcijskih elementov. Na ta način lahko pravočasno ugotovimo morebitne nepravilnosti med procesi izdelave, kakor tudi kasneje med obratovanjem, da preprečimo škodne dogodke. V primeru okvar pa lahko s postopki preizkušanja potrdimo ali ovržemo vzroke za nastalo škodo in izpad proizvodnje. Prav tako pa so postopki preizkušanja lastnosti vedno vključeni tudi v raziskovalno delo pri študiju in razvoju novih materialov.

Razmere pri preizkušanju vplivajo na rezultate, zato morajo biti metode in pogoji preizkušanja mednarodno primerljivi in so predpisani z veljavnimi standardi za preizkušanje lastnosti materialov (SIST EN in SIST ISO).

Standard natančno predpisuje način preizkušanja, dimenzije in tolerance izdelanih vzorcev, način vrednotenja rezultatov preizkusa in sklicevanje na ostale standarde, ki jih je pri preizkušanju potrebno upoštevati.

Razlikujemo med **porušnimi in neporušnimi** metodami preizkušanja. Med **porušnimi** metodami preizkušanja se preizkušavec med preizkusom poruši oziroma zlomi.

Med najpomembnejše porušne metode preizkušanja uvrščamo mehanske preizkuse in metalografsko preiskavo materiala.

Glede na način obremenjevanja preizkušanca med preizkušanjem ločimo dve vrsti mehanskih preizkusov, in sicer: *statične in dinamične preizkuse*. Pri *statičnih* preizkusih je sila, ki deluje na preizkušanca, mirujoča ali pa počasi in enakomerno naraščajoča (natezni, tlačni, upogibni in strižni preizkus).




*Dinamični* preizkusi so preizkusi, kjer se sila, ki deluje na preizkušanca, ponavlja v določenih časovnih zaporedjih ali pa deluje sunkovito (udarni preizkus). Med dinamične preizkuse uvrščamo: preizkus udarne žilavosti ob zarezi in trajno nihajne preizkuse (preizkušanje trajne dinamične trdnosti).

Z mehanskimi preizkusi ugotavljamo mehanske lastnosti, kot so: trdnost, napetost tečenja, trdota, udarna žilavost in trajna dinamična trdnost. Metalografska preiskava vzorcev nam omogoča analizo mikrostrukture glede na vrsto in uporabne lastnosti materiala oziroma izdelka.

Postopki **neporušnega** preizkušanja potekajo brez porušitve ali okvare preizkušanca in so lahko: vizualni, s penetranti, radiografski, ultrazvočni, magnetni in elektromagnetni postopki preizkušanja.

Z neporušnim preizkušanjem odkrivamo nepravilnosti, kot so npr.: poroznost, razpoke in druge nehomogenosti na površini in v notranjosti preizkušanca ali izdelka.

*V tem poglavju boste spoznali in razumeli:*

-  *najpomembnejše mehanske preizkuse za določanje mehanskih lastnosti,*
-  *kako poteka analiza vzorcev z optičnim metalografskim mikroskopom za določanje mikrostrukture materiala oziroma izdelkov in*
-  *uporabo rezultatov postopkov preizkušanja lastnosti materialov.*

## 1.1 NATEZNI PREIZKUS

Natezni preizkus je najvažnejši mehanski statični preizkus, s katerim ugotavljamo:

- ✚ modul elastičnosti,
- ✚ natezno trdnost,
- ✚ napetost tečenja,
- ✚ raztezek ob prelomu in
- ✚ zoženost ali kontrakcijo.

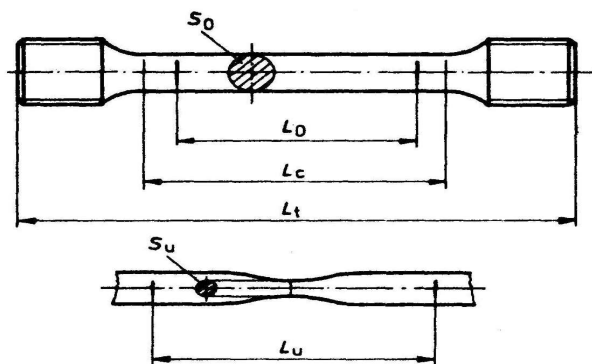
Dobljene številčne podatke lahko neposredno uporabimo pri trdnostnih izračunih gradbenih in drugih konstrukcijskih elementov oziroma jih primerjamo z vrednostmi, ki so podane v standardih in katalogih.

Izvajanje nateznega preizkusa predpisuje standard: *SIST EN 10002-1: 2002 – Kovinski materiali – Natezni preskus – 1. del.*

Za preizkus uporabljamo predvsem vzorce okroglega ali pravokotnega prereza. Glede na začetno merilno dolžino  $L_0$ , ki jo pred začetkom preizkušanja označimo na vzorcu, in glede na prerez vzorcev, razlikujemo med normalnimi in proporcionalnimi preizkušanci (tabela 1).

Na sliki 1 je prikazan preizkušanelec za natezni preizkus z označenim:

začetnim prerezom preizkušanca  $S_0$  in končnim prerezom po pretrgu  $S_u$ , dolžino preizkušanca  $L_t$ , preizkusno dolžino  $L_c$ , začetno merilno dolžino  $L_0$  in končno merilno dolžino po pretrgu  $L_u$ .



Slika 1: Preizkušanelec okroglega prereza za natezni preizkus

Vir: Krautov strojniški priročnik, 2007, 356

Tabela 1: Merilne dolžine  $L_0$  glede na vrsto preizkušanca

VRSTA PREIZKUŠANCA	MERILNA DOLŽINA [mm]	PREMER $d_0$ [mm]
Normalni	$L_0 = 10 d_0 = 200$	20
Normalni – kratek	$L_0 = 5 d_0 = 100$	20
Proporcionalni	$L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$	Poljuben
Proporcionalni – kratek	$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$	Poljuben

Vir: Prirejeno po: Krautov strojniški priročnik, 2007, 356

Natezni preizkus izvajamo na posebnih strojih za natezni preizkus. Preizkušanelec vpneemo v čeljusti nateznega stroja, kjer ga izpostavimo enakomerno naraščajoči obremenitvi, praviloma do pretrga preizkušanca, lahko pa tudi le do zahtevane obremenitve ali raztega.

Zaradi obremenjevanja z enakomerno naraščajočo silo  $F$ , nastanejo v materialu napetosti ( $\sigma$ ), ki povzročajo deformacijo, to je raztezanje preizkušanca. Med obremenjevanjem preizkušanca vgrajene merilne naprave merijo silo ( $F$ ) in razteg ( $\Delta L$ ). Vrednost sile se nanaša na ordinatno os in razteg na abscisno os koordinatnega sistema.

Rezultat grafičnega zapisa preizkusa je diagram **sila (F) – razteg ( $\Delta L$ )** oziroma pri sprotne preračunavanju: **diagram napetost ( $\sigma$ ) – raztezek (e)**, prikazan na sliki 2a.

Pri začetnem obremenjevanju se večina kovin in zlitin najprej razteza elastično. V tem območju velja **Hookov zakon** in elastična deformacija je premosorazmerna z napetostjo:

$$e = \alpha \cdot \sigma \quad (1)$$

Faktor  $\alpha$  imenujemo razteznostno število. Njegovo recipročno vrednost:  $1/\alpha = E$  v  $N/mm^2$  imenujemo **modul elastičnosti** in pomeni tisto napetost, pri kateri bi se (teoretično) preizkušanelec elastično podaljšal za 100 %. Pri kovinskih materialih te elastične napetosti nikdar ne dosežemo, ker se material že prej plastično deformira ali poruši. Običajna oblika Hookovega zakona je:

$$\sigma = e \cdot E \quad (2)$$

Pri plastični deformaciji v hladnem se kovine utrjujejo, zato je za nadaljevanje deformacije potrebna vedno večja sila. Obremenitev (silo), na enoto prereza imenujemo napetost:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3)$$

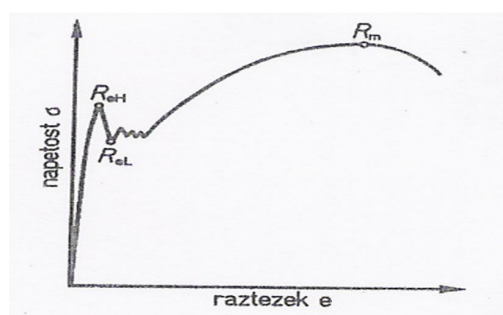
kjer pomenijo:

$\sigma$  – napetost v  $N/mm^2$ ,  $F$  – obremenitev v N in  $S$  – prerez preizkušanca v  $mm^2$ .

Značilne napetosti pri nateznem preizkusu označujemo z veliko črko **R**:

- ✚ natezna trdnost **R<sub>m</sub>** [ $N/mm^2$ ],
- ✚ zgornja napetost tečenja **R<sub>eH</sub>** [ $N/mm^2$ ],
- ✚ spodnja napetost tečenja **R<sub>eL</sub>** [ $N/mm^2$ ] in
- ✚ dogovorjena napetost tečenja **R<sub>p0.2</sub>** [ $N/mm^2$ ].

Na sliki 2a je prikazan diagram napetost – raztezek ali  $\sigma - e$  diagram. Mejno napetost, pri kateri nastopi plastična deformacija materiala, imenujemo **napetost tečenja**. Zgornja napetost tečenja ima oznako **R<sub>eH</sub>** in spodnja **R<sub>eL</sub>**.



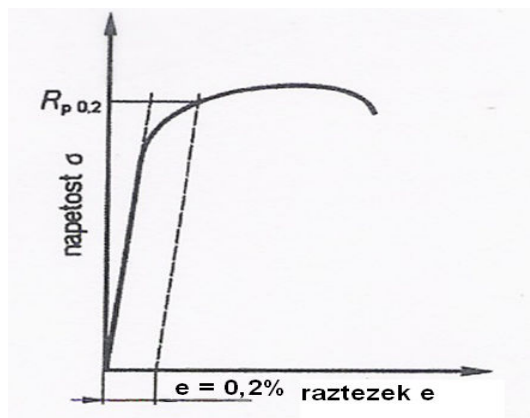
Slika 2a: Diagram napetost ( $\sigma$ ) – raztezek (e)

Vir: Prirejeno po: Strojno tehnološki priročnik, 1998, 149

V primeru, ko je napetost tečenja neizrazita, jo določamo z napetostjo, pri kateri po razbremenitvi ostane določen najmanjši delež trajnega raztezka. Označimo jo npr. **R<sub>p0.2</sub>**, kar pomeni dogovorno napetost tečenja, pri kateri po razbremenitvi ostane 0,2 % trajnega raztezka. Določanje dogovorne napetosti tečenja **R<sub>p0.2</sub>** na diagramu napetost – raztezek, kaže

## Materiali

slika 2b. Iz izbrane točke na abscisi povlečemo vzporednico z začetnim (linearnim) delom krivulje raztezanja.



Slika 2b: Določanje dogovorjene napetosti tečenja  $R_{p0,2}$   
Vir: Prirejeno po: Strojno tehnološki priročnik, 1998, 149

Iz največje obremenitve, preden se vzorec poruši, izračunamo natezno trdnost  $R_m$ . Natezna trdnost  $R_m$  je največja napetost, ki jo vzdrži material, preden se poruši.

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [N/mm^2] \quad (4)$$

kjer pomenijo:

$R_m$  – natezna trdnost [ $N/mm^2$ ],  $F_{\max}$  – največjo obremenitev [N] in  $S_0$  – začetni prerez vzorca [ $mm^2$ ]

### **POMNI**

**Na velikost natezne trdnosti materiala vpliva:**

- ⊕ kemična sestava materiala (pri jeklu vsebnost ogljika in legirnih elementov),
- ⊕ mikrostruktura, ki je posledica toplotne obdelave,
- ⊕ temperatura in hitrost preizkušanja.

Deformacijo, izraženo na enoto dolžine, imenujemo specifični *raztezek*  $e$  ( $e = \Delta L / L_0$ ), kjer pomeni  $\Delta L$  spremembo dolžine vzorca.

Raztezek vzorca pri pretrgu označujemo z **A** in z ustreznim indeksom, npr.  $A_{10}$ ,  $A_5$ ,  $A_{11,3}$  oziroma  $A_{5,65}$ :

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

kjer pomenijo:

$L_u$  – končna dolžina preizkušanca ob prelomu preizkušanca v mm in  $L_0$  – začetno merilno dolžino preizkušanca v mm.

**Zoženje** ali kontrakcijo (**Z**) prereza izračunamo po formuli 6:

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (6)$$

kjer pomenijo:

$\Delta S = (S_0 - S_u)$  – največje zoženje po pretrgu,  $S_0$  – začetni prerez preizkušanca in  $S_u$  – končni prerez preizkušanca v  $\text{mm}^2$ .

Natezno trdnost pogosto imenujemo le trdnost; trdnosti pri drugih načinih preizkušanja pa označimo še s pridevnikom, npr.: pri tlaku – tlačna trdnost.

Običajno lahko na prirejenih strojih za natezni preizkus opravljamo tudi tlačni, upogibni in strižni preizkus za določanje tlačne, upogibne in strižne trdnosti.

S tlačnim in upogibnim preizkusom določamo lastnosti materialov, ki so v uporabi obremenjeni predvsem na *tlak*, ali pa so *krhki* in ne prenesejo nateznih deformacij. Na primer siva litina ima bistveno večjo tlačno trdnost kakor natezno. Preizkušanci za tlačni preizkus so pri kovinah valjaste oblike, z razmerjem premera in višine 1 : 2, pri nekovinah, npr. betonu, pa ima preizkušavec obliko kocke.

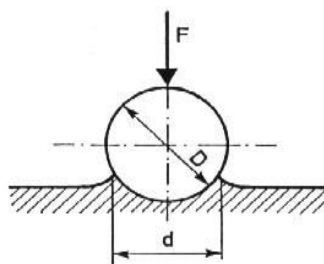
Upogibni preizkus je primeren predvsem za določanje mehanskih lastnosti krhkih materialov (siva litina) ali materialov, ki so namenjeni za izdelavo vzmeti. Preizkušanje izvedemo tako, da preizkušavec na sredini med dvema podpornima valjema obremenjujemo s trnom določenega premera. Preizkus izvedemo do določene deformacije (povesa) ali pa do porušitve, ko izračunamo upogibno trdnost materiala.

## 1.2 MERJENJE TRDOTE

Pri merjenju trdote ugotavljamo odpornost materiala proti vdiranju (vtiskanju) drugega, tršega telesa v njegovo površino. Merjenje trdote je posebej primerno za sprotno preverjanje v vmesnih ali končni fazi predelave in obdelave izdelkov, da ugotovimo, ali trdota ustreza predpisanim zahtevam glede na postopek predelave in toplotne obdelave.

Posebno oblikovano in trdo telo vtiskamo z določeno silo v površino materiala, po razbremenitvi pa je izmerjena površina ali globina nastalega vtiska merilo trdote materiala. Ta definicija temelji na standardiziranih postopkih za merjenje trdote. Za preizkušanje z vtiskavanjem so se uveljavili trije standardizirani načini merjenja trdote, in sicer: po Brinellu, Vickersu in po Rockwellu.

Merjenje trdote po *BRINELLU* predpisujeta standarda: SIST EN 10003-1 in SIST EN ISO (6506-1: 2000): Preizkus trdote po Brinellu.



Slika 3: Preizkus trdote po Brinellu

Vir: Krautov strojniški priročnik, 2007, 364

V površino preizkušanca vtiskamo z ustrežno silo vdiralno telo – kroglico s premerom **D**. Silo vtiskanja ( $F$ ) in premer kroglice ( $D$ ) izberemo glede na predvideno trdoto in debelino vzorca. Kroglica je iz kaljenega jekla ali karbidne trdine. Premeri kroglice ( $D$ ) so standardizirani in znašajo: **10, 5, 2.5, 2 in 1 mm**. V odvisnosti od premera kroglice so standardizirane tudi sile vtiskanja, in sicer:  $30 D^2$ ,  $10 D^2$ ,  $5 D^2$ ,  $2.5 D^2$ ,  $1 D^2$ .

## Materiali

Večina aparatov za merjenje trdote po Brinellu ima merilni optični okular za neposredno merjenje **premera (d)** nastalega vtiska. Opraviti moramo najmanj tri meritve in nato izračunati srednjo vrednost trdote.

Trdoto po Brinellu označujemo s **HB S** (kaljena kroglica) oziroma **HB W**, če je kroglica iz karbidne trdine. Izražena je s količnikom med silo vtiskanja (F) in površino nastale kalote (A):  
 $HB = 0,204F / \pi D [D - (D^2 - d^2)^{1/2}]$ .

V tabelah, ki so priložene aparatom za merjenje trdote, lahko odčitamo že izračunano vrednost trdote.

Primer oznake izmerjene trdote po Brinellu: *120 HB S 5/250* pomeni:

trdoto 120 HB pri uporabi jeklene kroglice premera  $D = 5$  mm in pri obremenitvi  $F = 250$  s trajanjem 10 do 15 s.

Iz znane trdote po Brinellu HB lahko ocenimo natezno trdnost  $R_m$  jekla in neželeznih kovin in zlitin:

$$R_m = f \cdot HB \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (7)$$

za jeklo:  $R_m = 3,5 \cdot HB \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ,

za hladno predelane neželezne kovine (baker, med, nikelj, bron):  $R_m = 4 \cdot HB \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ,

za žarjene neželezne kovine (baker, med, nikelj, bron):  $R_m = 5,5 \cdot HB \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ,

za zlitine AlMg:  $R_m = 4,4 \cdot HB \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ,

za neželezne litine:  $2,4 \cdot HB \text{ (N/mm}^2\text{)}$  in

za sivo litino:  $1,6 \cdot HB \text{ (N/mm}^2\text{)}$ .

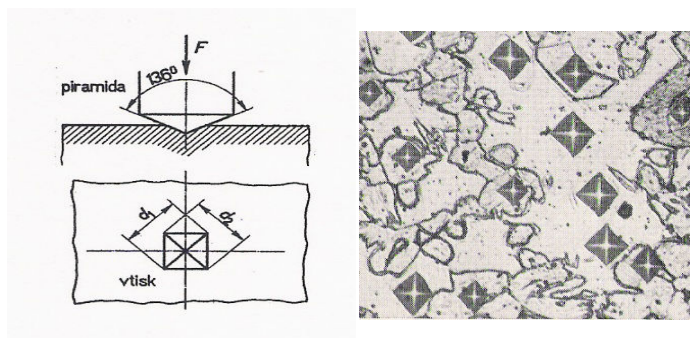
Za merjenje trdote po *VICKERSU* sta v veljavi standarda: SIST ISO 6507-1: Preizkus trdote po Vickersu – 1. del: HV 5 do HV 100 in SIST ISO 6507-2: Preizkus trdote po Vickersu – 2. del: HV 0,2 do manj kot HV 5.

Vtiskovano telo je štiristrana diamantna piramida s kotom ob vrhu  $136^\circ$ . Trdota, ki jo označujemo s HV, je izražena s količnikom med silo vtiskanja F in površino nastalega vtiska A:

$$HV = 0,102 F/A = 0,1891 F/d^2 \quad (8)$$

kjer pomeni: F – sila vtiskanja v N,

d – srednjo vrednost obeh diagonal ( $d_1$  in  $d_2$ ) vtiska v mm.



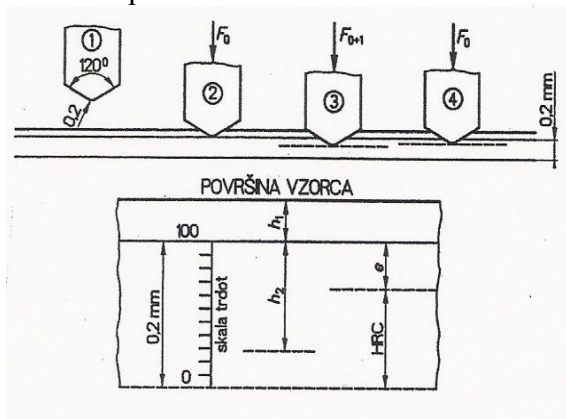
Slika 4: Preizkus trdote po Vickersu

Vir: Strojno tehnološki priročnik, 1998, 165 (levo) in Metallographie, 1958, 378 (desno)



Sile vtiskanja so od 1,92 N (HV 2) do 980,7 N (HV 100) in za mikrotrdoto od 0,098 N (HV od 0,1 dalje), izbiramo glede na debelino materiala in predvideno trdoto. Najbolj pogosto uporabljena obremenitev je 98,1 N (HV 10) in 294,2 N (HV 30). Za merjenje mora biti površina materiala čista in gladka.

Merjenje trdote po *ROCKWELLU* predpisuje standard: SIST EN 10009-1: Preizkus trdote – 1. del: Preizkus po Rockwellu (skale A, B, C, D, E, F, G, H in K) in preizkus površinske trdote po Rockwellu (skale 15 N, 30 N, 45 N, 15 T, 30 T in 45 T) združuje v enotnem standardu vse vrste meritev trdote po Rockwellu.



Slika 5: Preizkus trdote po Rockwellu C

Vir: Strojno tehnološki priročnik, 1998, 166

V površino materiala vtisnemo vdiralno telo (diamantni stožec ali jekleno kroglico) z začetno obremenitvijo  $F_0$ . Nato v času 2 do 8 s polagoma dodamo glavno obremenitev  $F_{0+1}$  in po nekaj sekundah (4 do 5 s) razbremenimo do začetne obremenitve  $F_0$ . Merilo za trdoto je globina nastalega vtiska. Izmerimo jo z merilno urico, ki je sestavni del aparata za merjenje trdote po Rockwellu. Čim večja je trdota, tem manjša je globina vtiska.

Tabela 2: Načini preizkušanja trdote po Rockwellu

POSTOPEK	VTISNO TELO	SKUPNA OBREMENITEV	UPORABA
Rockwell C	diamantni stožec	1471 N	srednje trde in trde kovine
Rockwell A	diamantni stožec	588,4 N	izredno trde kovine in tanke plasti
Rockwell B	jeklena kroglica	980,7 N	mehke kovine
Rockwell F	jeklena kroglica	588,4 N	zelo mehke kovine
Rockwell G	jeklena kroglica	1471 N	zlitine bakra s fosforjem
Rockwell 15 N	diamantni stožec	147,1 N	površinske trdote – obremenitev izbiramo glede na debelino in predvideno trdoto površinske plasti
30 N	diamantni stožec	294,2 N	
45 N	diamantni stožec	441,3 N	
Rockwell 15 T	jeklena kroglica	147,1 N	tanki preizkušanci in majhne preizkusne ploskve
30 T	jeklena kroglica	294,2 N	
45 T	jeklena kroglica	441,3 N	

Vir: Strojno tehnološki priročnik, 1998, 166

Izbira načina merjenja trdote je odvisna od predvidene trdote materiala in od vrste aparatov, ki jih imamo na razpolago. Za merjenje trdote na terenu ali izdelkov velikih dimenzij, uporabljamo običajno dinamični način merjenja trdote in prenosne elektronske merilnike, ki merijo razliko med hitrostjo udarca in hitrostjo odboja padalnega telesa ali npr. višino odskoka kroglice pri postopku Shore.

### 1.3 PREIZKUS UDARNE ŽILAVOSTI OB ZAREZI

Udarne žilavost je lastnost materiala, da ima pri dovolj veliki trdnosti tudi veliko sposobnost deformacije. Žilave so tiste kovine in zlitine, ki se pred poružitvijo močno plastično deformirajo, nasprotno se krhki materiali porušijo z zelo majhno deformacijo ali celo brez poprejšnje plastične deformacije.

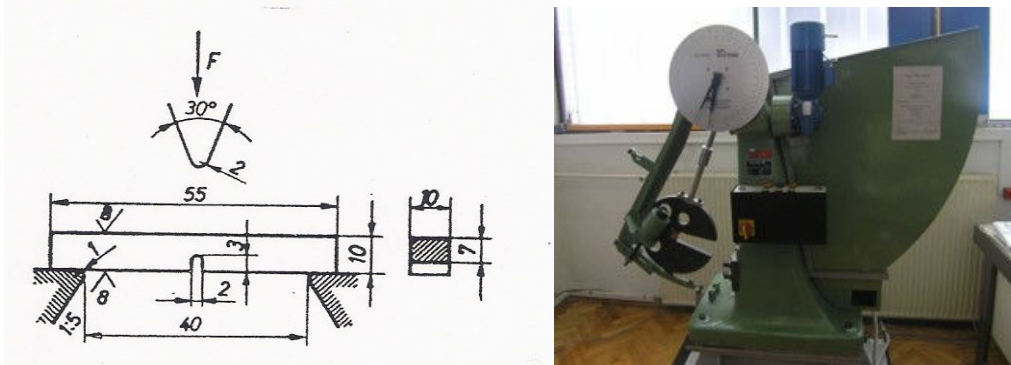
Dogovorjeno merilo za žilavost je delo, potrebno do preloma preizkušanca določene oblike. Žilavost materiala je odvisna od napetostnega stanja, od temperature in od hitrosti obremenitve, zlasti udarne. Preizkušamo jo z udarno obremenitvijo ob zarezi. Preizkus udarne žilavosti ob zarezi izvajamo po standardu *SIST EN 10045-1*, po Charpyjevi metodi. Preizkušanec, ki ima s standardom predpisane oblike in mere, leži med dvema podporama, oddaljenima 40 mm. Nihajno kladivo, ki ga spustimo z določene višine, v svoji najnižji legi udari na sredo preizkušanca med podporama in ga prelomi, nato pa zaniha v nasprotno smer. Iz razlike med višino, iz katere smo spustili nihajno kladivo, in višino, do katere je nihalo po prelomu preizkušanca zanihalo, lahko izračunamo **udarno delo**, ki je bilo porabljeno za prelom preizkušanca.

Preizkušanci imajo kvadratni prerez 10 x 10 mm in dolžino 55 mm z ustrezno zarezo na sredini dolžine. Standard navaja dve vrsti zarez, in sicer:

- ✚ zarezo V 2 mm globoko s polmerom 0,25 mm na vrhu zareze; označba KV;
- ✚ zarezo U 5 mm globoko s polmerom 1 mm v globini zareze; označba KU.

Rezultat žilavosti označujemo z označbo preizkušanca in udarnim delom za prelom, na primer: *KV 35 J*.

Žilavost preizkušamo vedno (vzporedno) z več (običajno liho število) preizkušanci. Kot žilavost navajamo povprečno vrednost meritev.



Slika 6: Oblike in dimenzije preizkušanca za udarni preizkus žilavosti ob zarezi (levo) in Charpy kladivo za preizkušanje udarne žilavosti (desno)

Vir: Strojno tehnološki priročnik, 1998, 159

Vir: [www.imk.si/html/mehanske.htm](http://www.imk.si/html/mehanske.htm) (30. 08. 2010)

Pri večini jekel je žilavost odvisna od temperature preizkušanja. Pod določeno temperaturo postanejo nekatera, pri temperaturi okolice žilava jekla, popolnoma krhka. Temperaturo, pri kateri jeklo pri preizkušanju prehaja iz žilavega v krhko stanje, imenujemo prehodna temperatura žilavosti. Poleg temperature vpliva na žilavost predvsem kemična sestava in mikrostruktura jekla.

## 1.4 PREISKAVE Z METALOGRAFSKIM MIKROSKOPOM

Preiskave vzorcev z metalografskim mikroskopom nam omogočajo analizo mikrostrukture v povezavi s kemično sestavo kovine in njihovimi lastnostmi. Pri tem ugotovimo velikost, obliko in porazdelitev kristalnih zrn in mikrostrukturnih sestavin.

Namen mikroskopske ali metalografske preiskave je ugotoviti mikrostrukturo, od katere so odvisne uporabne lastnosti materiala oziroma izdelkov. Na velikost, obliko, vrsto in porazdelitev mikrostrukturnih sestavin vplivajo tudi predhodni postopki toplotne obdelave, oblikovanja in preoblikovanja kovine.

Metalografske preiskave kovin in zlitin vključujejo:

- ✚ makro in mikroskopske preiskave ter
- ✚ preiskave s strukturnim rentgenom in elektronskim mikroskopom.

Pri makroskopskih preiskavah opazujemo vzorec (prelomne površine, zware ipd.) s prostim očesom, lupo ali z mikroskopom pri manjših povečavah (do 50 : 1).

Priprava raziskovalne površine metalografskih vzorcev vključuje:

- ✚ izbiro in razrez vzorcev,
- ✚ brušenje in poliranje ter
- ✚ jedkanje.

Odvzemu in razrezu vzorcev sledi brušenje in poliranje. Poliramo s polirnim sredstvom z namenom, da odstranimo vse raze na površini vzorca, ki so nastale pri brušenju. Med ročnim poliranjem vzorec stalno obračamo in premikamo v nasprotni smeri premikanja polirnega koluta. Na ta način dosežemo enakomerno polirano površino in preprečimo, da bi se mehkejše mikrostrukturne sestavine polirale globlje kakor trše.

Po končanem poliranju je površina vzorca zrcalno gladka, vendar mikrostruktura pod mikroskopom še ni vidna. Zato je potrebno jedkanje z ustreznim kemičnim sredstvom oziroma jedkalom.

Zaradi jedkanja postanejo kristalna zrna in kristalne meje ter ostale mikrostrukturne sestavine pri opazovanju z mikroskopom razpoznavne. Pri mikroskopskih preiskavah uporabljamo optični ali vrstični elektronski mikroskop, ki sta prikazana na slikah 7 in 8.



Slika 7: Optični metalografski mikroskop

Vir: <http://iskraemeco-lab.si/show/metalografija/> (30. 08. 2010)



Slika 8: Vrstični elektronski mikroskop Quanta 200 3D  
Vir: <http://ucem.uni-mb.si/Quanta.htm/> (30. 08. 2010)

## 1.5 NEPORUŠNE METODE PREIZKUŠANJA

Neporušne metode preizkušanja uporabljamo za odkrivanje napak in drugih nehomogenosti, ki lahko poslabšajo kakovost in uporabnost izdelkov, sestavnih delov ipd. Metode preizkušanja brez okvare materiala predpisujejo številni nacionalni ter mednarodni standardi npr.: EN, ISO, ASME, JSI.

Neporušno preizkušanje je nepogrešljivo povsod tam, kjer izbrana metoda preizkušanja ne sme vplivati na funkcionalnost izdelka ali sestavnega dela konstrukcije (npr. v letalstvu, jedrskih elektrarnah, kemijski industriji in industriji prometnih sredstev, v gradbeništvu, po postopku varjenja, kontrole cevovodov, ipd.).

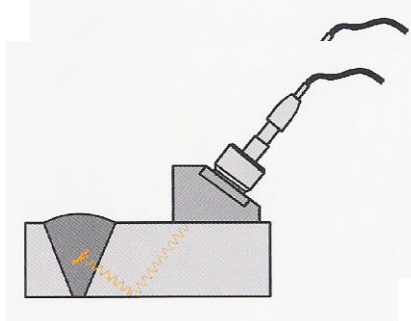
Najpomembnejše metode so: vizualna, penetrantska, magnetna, radiografska, ultrazvočna in metoda vrtilnih tokov. Najstarejša neporušna metoda preizkušanja je *vizualno* preverjanje površinskih napak. Vizualno kontrolo je možno izvajati v vseh fazah proizvodnje, kakor tudi med rednim vzdrževanjem strojev in naprav, kjer je za težko dostopna mesta danes povsem uveljavljena metoda industrijske endoskopije.

Pri *penetrantskem* preizkušanja uporabljamo penetrant, čistilec in razvijalec, običajno v obliki razpršila. Penetrant nanese na očiščeno preiskovalno površino, kjer zaradi dobre omočljivosti in kapilarnosti pronica v napako. Po določenem času, ki je odvisen od uporabljenega penetranta, površino očistimo odvečnega penetranta in nanese suhi ali mokri razvijalec. Preizkušanje s penetranti je primerno za odkrivanje površinskih napak, kot so razpoke, poroznost in zajede, ne glede na vrsto materiala in mesto preizkušanja.

Preizkušanje z *rentgenskimi žarki* se lahko uporablja za merjenje debeline pločevine ali trakov, predvsem pa za kontrolo ulitkov in zvarov pri odkrivanju notranjih napak, kot so npr.: pore, razpoke, vključki, nespojena mesta, robne zareze ipd. Rentgenski žarki so elektromagnetno valovanje kratkih valovnih dolžin. Prodirajo skozi preizkušane in se bolj ali manj, odvisno od lege napake glede na smer obsevanja in od absorpcijskega koeficienta materiala, absorbirajo. Po prehodu žarkov skozi preizkušane, merimo njihovo intenzivnost sevanja.



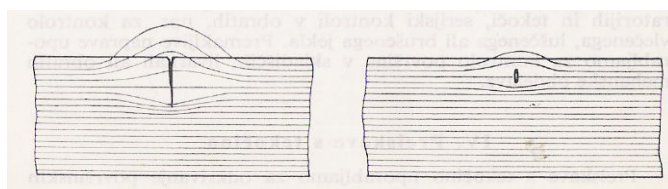
Ultrazvočne preiskave nam omogočajo odkrivanje notranjih napak in nehomogenosti, kot so poroznost, plinski mehurčki, dvoplastnost, notranje razpoke ipd. Metoda se uporablja pri redni ali občasni serijski kontroli zvarov, ulitkov, sestavnih delov in izdelkov različnih oblik ter velikosti. Za pridobivanje ultrazvoka običajno uporabljamo piezoelektrični efekt barijevega titanata ( $\text{BaTiO}_3$ ) ali kremenovega kristala. Pod vplivom električne napetosti visokih frekvenc, se kremenov kristal razteza in krči, kar ima za posledico mehansko valovanje – ultrazvok.



Slika 9: Prikaz ultrazvočne preiskave zvara  
Vir: Varilna tehnika, 2010, 30

Frekvenčno območje preizkušanja je 0,5 do 14 MHz. Najbolj uporabljena je impulzno-odbojna metoda, kjer sta združena oddajnik in sprejemnik ultrazvoka. Oddajnik oziroma sprejemnik imenujemo tudi vibrator, v katerem je nameščena ploščica iz barijevega titanata ( $\text{BaTiO}_3$ ) ali kremenovega kristala. Ultrazvočne valove, ki se odbijejo od napake oziroma od nasprotne strani preizkušanca, sprejme vibrator in jih spremeni v izmenične električne napetosti, katerih ojačani signali so vidni na zaslonu ultrazvočnega aparata. Glede na razporeditev odbitih signalov lahko ocenimo velikost in lego napake v materialu.

Magnetne metode uporabljamo za odkrivanje površinskih napak ali napak tik pod površino pri feromagnetnih kovinah in zlitinah. Pri preizkušanju moramo najprej v preizkušancu ustvariti magnetno polje. Glede na obliko preizkušanca lahko izbiramo med različnimi načini magnetenja npr.: magnetenje z magnetnima poloma, magnetenje z magnetnim prahom ali pa preizkušaneč vključimo neposredno v tokokrog ipd.



Slika 10: Odklon magnetnih silnic zaradi napake v preizkušancu  
Vir: Metalurški priročnik, 1972, 211

Morebitne napake, kot so razpoke, vključki ipd., na površini ali tik pod površino spremenijo permeabilnost materiala in odklonijo magnetne silnice. Velikost odklona je odvisna od smeri in jakosti magnetnega polja ter od položaja, velikosti in oblike napake. Odklanjanje magnetnega polja je posebno močno pri odkrivanju napak, ki leže pravokotno na magnetno polje. V primeru, če potekajo magnetne silnice vzporedno z morebitno napako, lahko napako prezremo (slika 10).

Na osnovi elektromagnetne indukcije temelji metoda *vrtinčnih tokov*. Metoda se uporablja za odkrivanje pomembnih podatkov o preizkušancu, kakor so npr. toplotna obdelava, trdota, globina razogljivenja, legiranje in za kontrolo napak ter razpok. Na rezultate preizkušanja vpliva električna prevodnost, velikost in magnetna permeabilnost preizkušanca ter pogoji

## Materiali

preizkušanja. Ker je metoda izredno hitra in zanesljiva, je zelo primerna za kontrolo izdelkov v avtomatizirani proizvodnji ([http://www.suz.si/si\\_povrsinska\\_kontrola/](http://www.suz.si/si_povrsinska_kontrola/) (30. 08. 2010).

*Na izdelanem strojnem delu morate,  
preden ga prevzame naročnik, preveriti morebitno  
poroznost izdelka.*

*Katero metodo preizkušanja boste uporabili in zakaj?  
Za izbrano metodo predpišite potek preizkušanja.*

Uporabite spletno stran:

<http://www2.arnes.si/~sspjeme/Neporusitvene%20metode/neporusi.htm>



RAZMISLITE

Metoda *akustične emisije* ima nekatere značilne uporabnosti, npr.: v tehniki odrezavanja za zaznavanje obrabe orodja, zaznavanje pojavov med varjenjem, zaznavanje napak med plastično deformacijo materiala in podobno (<http://www.qtechna.si/> (31. 08. 2010).

## Povzetek

Rezultati preizkušanja lastnosti materialov so pomembni podatki za konstruktorje pri izbiri ustreznega materiala kakor tudi za tehnologe pri načrtovanju proizvodnje in zagotavljanju kakovostnih izdelkov.

Razlikujemo med **porušnimi in neporušnimi preiskavami**. Med **porušnimi** metodami preizkušanja se preizkušavec med preizkusom poruši oziroma zlomi. Najpomembnejše porušne metode preizkušanja lastnosti so mehanski preizkusi, s katerimi ugotavljamo mehanske lastnosti, trdnost, trdoto in udarno žilavost.

**Trdnost** je največja napetost, ki jo lahko prenese določen material, ne da bi prišlo do porušitve. Pri tem lahko delujejo zunanje sile na nateg, tlak, upogib, uklon, strig, zvoj ali pa je obremenitev kombinirana. Glede na preizkus, s katerim merimo delujočo silo, razlikujemo med natezno, tlačno, strižno in upogibno trdnostjo.

**Trdota** je odpor materiala proti vdoru drugega telesa skozi njegovo površino. Merimo jo na razne načine in je relativna lastnost ter pomembna za oceno odpornosti proti obrabi.

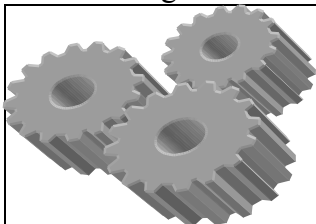
**Udarna žilavost** je sposobnost materiala za deformacijo. Krhki material, se v nasprotju z žilavim, poruši skoraj brez predhodne ali pa z zelo majhno predhodno deformacijo. Dogovorjeno merilo za žilavost je delo, ki ga je potrebno opraviti do preloma materiala.

Z metalografsko preiskavo natančno opredelimo **mikrostrukturo** materiala, kar nam omogoča presojo o uporabnih lastnosti in vzroke morebitnih odstopanj oziroma napak.

**Fizikalne lastnosti** (gostota, tališče, toplotna in električna prevodnost, električna upornost, specifična toplota, magnetne lastnosti) se preizkušajo v atestiranih laboratorijih. V praksi nam običajno zadoščajo podatki o fizikalnih lastnostih različnih materialov, ki so zbrani v strokovni literaturi v obliki tabel (Krautov strojniški priročnik, 2001).

Postopki **preizkušanja brez okvare** materiala so nepogrešljivi v primerih, ko metoda preizkušanja ne sme poškodovati ali kako drugače vplivati na izdelek npr. v letalstvu, jedrskih elektrarnah, kemijski industriji in industriji prometnih sredstev, gradbeništvo ipd. Lahko so vizualni, s penetranti, magnetni, z rentgenskimi žarki, ultrazvočni ali z vrtinčnimi tokovi. Vsaka metoda ima svoje prednosti in slabosti, zato se v praksi običajno kombinirajo in jih opravljajo posebej pooblaščen kontrolni organi s certifikatom.

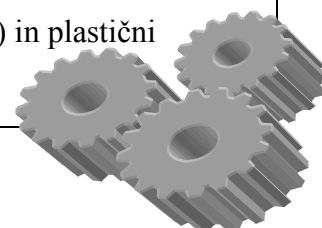
Neporušne metode preizkušanja uporabljamo za odkrivanje napak, nehomogenosti in drugih nepravilnosti, kot so npr. poroznost, razpoke, vključki, ipd., na površini in v notranjosti preizkušanca med redno kontrolo izdelkov, pred ali med vzdrževalnimi deli ali v primeru škodnih dogodkov.



### Vprašanja za preverjanje razumevanja

1. Primerjajte uporabnost porušnih in neporušnih postopkov preizkušanja materiala v praksi. Navedite prednosti in slabosti.
2. Narišite krivulje nateznega preizkusa za: a) jekli C15 in C60 ter b) za aluminijevo zlitino AlMg2. Narisane krivulje primerjajte in pojasnite vaše ugotovitve.
3. Navedi glavne vplive na natezno trdnost materiala in jih prikažite ter utemeljite v diagramu Napetost – raztezek.
4. Za normalni natezni preizkušanelec izračunajte raztezek  $A_{10}$ , če je podaljšanje preizkušanca po pretrgu znašalo 2 mm.
5. Primerjajte in analizirajte mehanske lastnosti jekla C55 in aluminijeve zlitine AlCu4Mg in utemeljite, v katerih primerih izbire bi se odločili za C55 oziroma AlCu4Mg.
6. a) Narišite poljubne oblike metalografskih vzorcev in pojasnite potek metalografske analize.  
b) Shematsko narišite grobo in drobno zrnato mikrostrukturo.
7. Izmerjena trdota jekla C35 znaša HBW 195. Ocenite njegovo trdnost.
8. Shematsko narišite in komentirajte diagram napetost – raztezek za jeklo in za aluminijevo zlitino, če znaša: a) napetost tečenja jekla  $600 \text{ N/mm}^2$  ( $R_m = 950 \text{ N/mm}^2$ ) in b) napetost tečenja aluminijeve zlitine  $320 \text{ N/mm}^2$  ( $R_m = 450 \text{ N/mm}^2$ ).  
c) Na narisanih krivuljah pojasnite izraza natezna in porušna trdnost.  
d) Pojasnite razliko med elastično in plastično deformacijo.
9. Izberite ustrezno metodo in pogoje merjenja trdote za vzorec pločevino iz medi, debeline 1,5 mm.
10. Jekleni izdelek je kaljen in popuščen pri temperaturi  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Izberite ustrezno metodo merjenja trdote.
11. Izračunajte trdoto HV pri obremenitvi 10 N in izmerjeni diagonali vtiska  $d = 0,135 \text{ mm}$ .
12. Izmeriti morate trdoto aluminijeve zlitine s predvideno trdoto 55 HB. Izberite ustrezno obremenitev F in premer vdiralne kroglice D.
13. Izmerjena žilavost jeklene palice C35 znaša 48 J, sive litine 2,5 J in avstenitnega nerjavnega jekla 217 J. Primerjajte izmerjene vrednosti in razmislite, kolikšna naj bi bila po vaši presoji žilavost orodnega jekla in zakaj.
14. Zakaj je analiza mikrostrukture materiala ali izdelka zelo pomembna in navedite nekaj primerov iz prakse.
15. Za zlitino CuZn30 izračunajte raztezek  $A_{10}$ , če je znašala merilna dolžina normalnega preizkušanca po raztrgu  $L_u = 225 \text{ mm}$ . Glede na izračunani raztezek ugotovite deformacijsko stanje, natezno trdnost in uporabo zlitine.
16. Vzorec s premerom 4,0 mm in začetno merilno dolžino 28 mm je bil obremenjen s silo 18,5 kN. Po preizkusu je sprememba dolžine vzorca znašala 0,2 mm. Izračunajte modul elastičnosti in ugotovite, iz katerega materiala je izdelan vzorec.
17. Na diagramu, ki je prikazan na sliki 2b, označite elastični (sorazmerni) in plastični (nesorazmerni) raztezek.

Uporabite: Krautov strojniški priročnik in Strojno tehnološki priročnik.

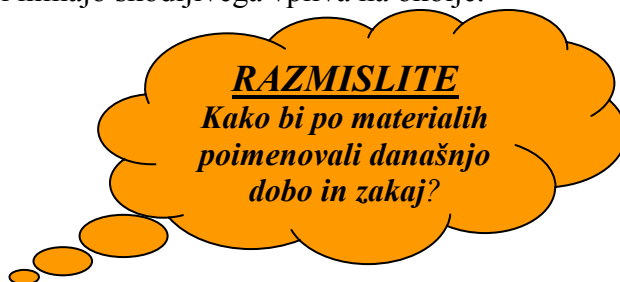


## 2 KOVINE IN ZLITINE

### Uvod v poglavje

Razvoj človeštva je vseskozi zelo tesno povezan z uporabo materialov, saj so po materialih poimenovana kar celotna zgodovinska obdobja od kamene dobe do kovinske bakrene, bronaste in železne dobe.

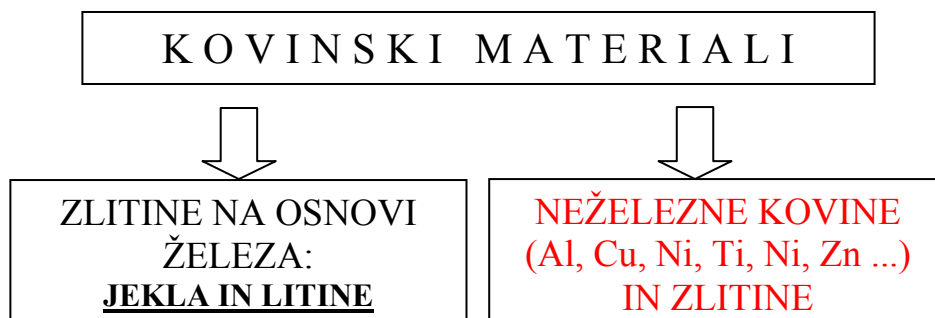
Sodobni tehnični izdelki so izdelani iz materialov, ki jih generacija pred nami še ni poznala. Za izdelavo teh izdelkov so potrebne nove tehnologije in ekološko neoporečni kovinski in nekovinski materiali s prirojenimi lastnostmi. To pomeni, da so lastnosti materiala vnaprej načrtovane, optimirane in prilagojene specifičnim funkcijam izdelka kakor tudi, da pri uporabi ter kasnejši predelavi nimajo škodljivega vpliva na okolje.



*V tem poglavju boste spoznali in razumeli:*

- ✚ *razliko med čisto kovino in zlitino,*
- ✚ *razliko med kristalno strukturo in mikrostrukturo čiste kovine in zlitine,*
- ✚ *nekateri izrazi, kot so: kristalna kal in kristalno zrno z vidika lastnosti materiala,*
- ✚ *zakaj so lastnosti in uporabnost zlitine različne glede na čisto kovino in*
- ✚ *ustrezno izbiro nekaterih barvnih kovin in zlitin.*

Med kovinske materiale uvrščamo čiste kovine in njihove zlitine. Zlitine so sestavljene iz osnovne kovine in vsaj ene namenoma dodane zlitinske kovine ali legirnega elementa. Ker imajo zlitine večjo trdnost kot čiste kovine, se v strojništvu uporabljajo predvsem zlitine. Zlitine izdelamo s taljenjem in mešanjem dveh ali več kovin, ki so v staljenem stanju medsebojno popolnoma topne.



Slika 11: Razdelitev kovinskih materialov  
 Vir: Lasten



Za večino kovin je značilno, da pri strjevanju kristalizirajo. Pogoj za začetek kristalizacije je metastabilno stanje taline, ki se doseže z ohlajevanjem taline, s podhladitvijo taline in s prisotnostjo kristalnih kali.

Med strjevanjem poteka kristalizacija tako, da v staljeni kovini, ki jo imenujemo tudi talina, nastane določeno število kristalizacijskih centrov oziroma kristalnih kali. Kristalna kal pomeni začetek zbiranja in razporejanja atomov po geometrijski zakonitosti, ki odgovarja določenemu geometrijskemu liku oziroma telesu.

V industrijskih razmerah poteka kristalizacija običajno *heterogeno*, kar pomeni, da tvorba kali poteka s pomočjo „tujih kali“, kot so nečistoč oziroma netopnih primesi, ki so v tehničnih materialih vedno prisotne, seveda v omejenem deležu. Dodajamo lahko tudi «umetne» kristalne kali v obliki prahov (*modificiranje taline*).

Kristalizacija napreduje tako, da se med ohlajanjem stabilnim kristalnim kalem pridruži vedno več atomov, kar privede do tega, da množinsko razmerje trdne kovine raste na račun taline. Ko taline zmanjka, je strjevanje s kristalizacijo zaključeno in kovina je v trdnem agregatnem stanju.

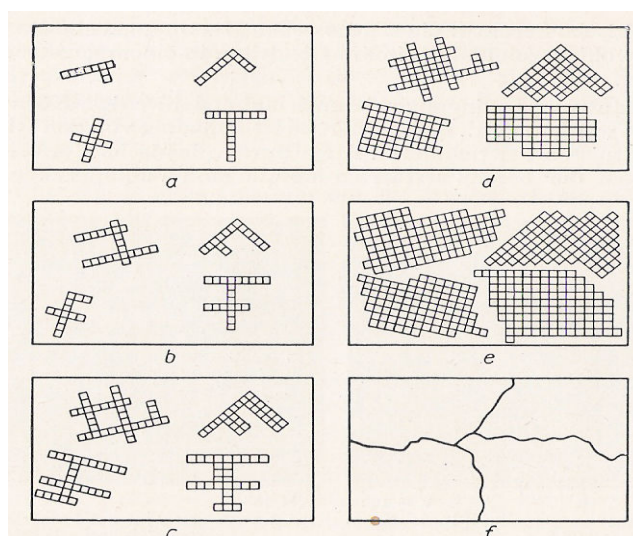
### **POMNI**

- ✚ **Kristalno zrno je množica atomov, medsebojno urejena v prostorskem geometrijskem redu, določene orientacije in omejena s kristalnimi mejami.**
- ✚ **Mikrostruktura kovine ali zlitine je sestavljena iz velikega števila kristalnih zrn, ki so medsebojno ločena s kristalnimi mejami, kot je prikazano na sliki 12.**
- ✚ **Različni pogoji strjevanja vplivajo na velikost (drobnozrnata ali grobozrnata) in obliko (globulitna ali stebrasta) kristalnih zrn, kar je pomembno za mehanske ter tehnološke lastnosti izdelka.**

Velikost kristalnih zrn ( $V$ ) je funkcija kristalizacijske hitrosti ( $kH$ ) in števila kristalnih kali ( $kK$ ):

$$V = f\left(\frac{kH}{kK}\right) \quad (9)$$

Kristalizacijska hitrost ( $kH$ ) in število kristalnih kali ( $kK$ ) sta odvisni predvsem od podhladitve taline in hitrosti ohlajanja taline.

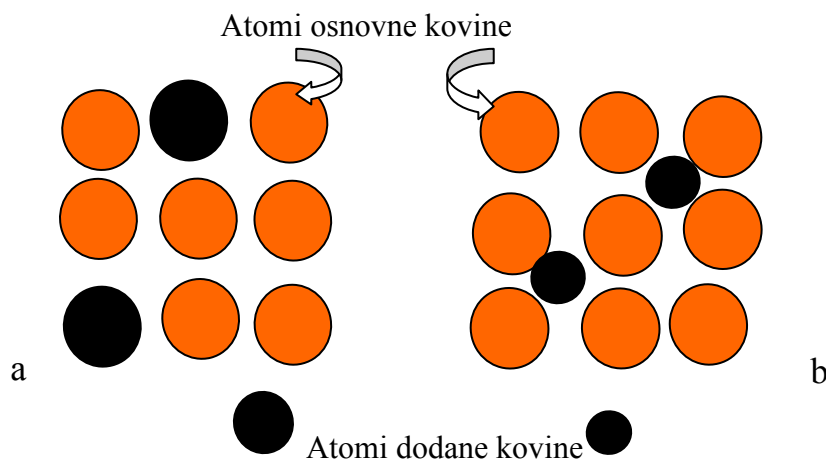


Slika 12: Shematski potek kristalizacije, nastanek kristalnih zrn in kristalnih mej  
Vir: Metallographie, 1958, 103

**Zlitine** so sestavljene iz osnovne kovine in vsaj ene namenoma dodane druge kovine ali legirnega elementa. Izdelamo jih v talilnih pečeh s taljenjem in mešanjem dveh ali več kovin, ki so v staljenem stanju medsebojno topne. Ker imajo zlitine večjo trdnost kot čiste kovine, se v strojništvu uporabljajo predvsem zlitine.

Po končanem strjevanju je kristalno zrno zlitine zgrajeno iz atomov dveh ali več kovin. V primeru, ko atomi dodane kovine popolnoma enakopravno nadomeščajo atome osnovne kovine, govorimo o **substitucijski (nadomestni)** trdni raztopini in je prikazana na sliki 13 a.

V kolikor so atomi dodane kovine veliko manjši od atomov osnovne kovine, atomi dodanega elementa zasedejo intersticijska mesta med atomi osnovne kovine. To vrsto trdne raztopine imenujemo **intersticijska (vrinjena)** trdna raztopina in je prikazana na sliki 13 b.



Slika 13: Shematična oblika trdne raztopine: substitucijska (a) in intersticijska (b)

Vir: Lasten

**POMNI**

✚ **Trdna raztopina je sestavljena iz atomov osnovne kovine in atomov dodanega elementa v razmerju, ki ga zahteva kemična sestava zlitine. Označujemo jo z grškimi črkami  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  itd.**

V primerih, ko atomi osnovne kovine „sprejmejo“ v kristalno mrežo le določeno koncentracijo ali pa tudi nič atomov dodanega zlitinskega elementa, govorimo o delni topnosti ali pa o popolni netopnosti v trdnem stanju.

Pojavi, ki potekajo v zlitini med strjevanjem, se popišejo z ravnotežnim faznim diagramom. S pojmom ravnotežni binarni (ternarni) zlitinski sistem označujemo vse možne zlitine, ki jih lahko tvorijo določene dve ali tri kovine. Ravnotežni fazni diagram nam grafično ponazarja številne možnosti legiranja osnovne kovine z dodano kovino in omogoča študij zlitin. V strokovni literaturi npr.: Metals Handbook, Alloy Phase Diagrams (ASM), so zbrani medsebojni fazni diagrami zlitin vseh kovin.

Diagrame konstruiramo na osnovi podatkov ohlajevalnih krivulj, ki so rezultat termične analize. Ohlajevalne krivulje dobimo, če med ohlajanjem kovine ali zlitine od staljenega stanja do temperature okolice merimo temperaturo v odvisnosti od časa.

## 2.1 LASTNOSTI IN UPORABA NEŽELEZNIH KOVIN IN ZLITIN

### Aluminij in aluminijeve zlitine

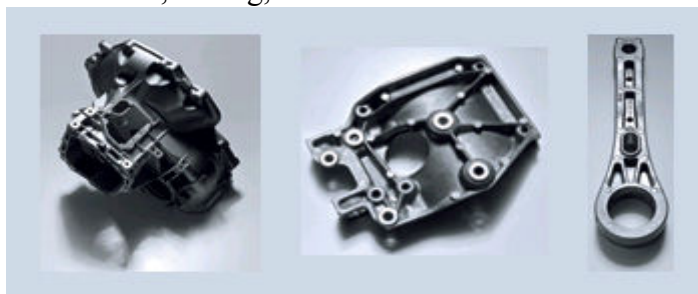
Tališče čistega aluminija je 660 °C. Najvažnejša lastnost aluminija je njegova majhna gostota 2699 kg/m<sup>3</sup>, dobra električna in toplotna prevodnost ter nemagnetičnost.

Mehanske lastnosti tehnično čistega aluminija so odvisne od kemijske čistoče in od deformacijskega stanja, ki je definirano s trdnostjo in trdoto kot trdo, poltrdo, valjano ali vlečeno in mehko žarjeno, kar pomeni natezno trdnost ( $R_m$ ) 120 do 70 N/mm<sup>2</sup> in trdoto 50 do 30 HB.

Najvažnejši kemijski elementi, s katerimi tvori aluminij zlitine, so: baker (**Cu**), silicij (**Si**), magnezij (**Mg**), cink (**Zn**), mangan (**Mn**) in litij (**Li**).

Glede na tehnološke lastnosti in način predelave izbiramo med zlitinami **za litje** in zlitinami **za gnetenje**. Glede na mehanizem nadaljnjega povišanja mehanskih lastnosti je možna še delitev na tiste zlitine, ki so primerne za izločevalno utrjevanje, in zlitine, ki te sposobnosti nimajo, in jim mehanske lastnosti lahko izboljšamo le z deformacijskim utrjevanjem (AlMg in AlMn). Zlitine, ki so sposobne izločevalnega utrjevanja, lahko v kombinaciji z deformacijskim utrjevanjem dosežejo natezno trdnost do 550 N/mm<sup>2</sup> in trdoto do 120 HB.

Pri aluminijevih zlitinah za **litje** je v ospredju zahteva po ugodnih livnih lastnostih. Ob pravilni izbiri so zlitine primerne za tlačno (T) litje, litje v pesek (P), kokilo (K) in litje v maske. Glede na kemično sestavo so aluminijeve zlitine za litje razdeljene na osnovne zlitinske sisteme, in sicer: Al-Si, Al-Mg, Al-Cu in Al-Zn.



Slika 14: Ulitki iz aluminijevih zlitin

Vir: [http://www.mlm-mb.si/alutec\\_proizvodi\\_tlacna\\_livarna/](http://www.mlm-mb.si/alutec_proizvodi_tlacna_livarna/) (20. 05. 2010)

### RAZMISLITE

*Katere aluminijeve zlitine se uporabljajo za izdelavo polizdelkov v obliki palic, cevi in profilov, ki se uporabljajo v avtomobilski in letalski industriji, transportu, gradbeništvu ipd.*

*Navedite podatke, ki jih morate navesti pri naročanju omenjenih polizdelkov. Uporabite spletni strani:*

*[http://www.impol.si/izdelki/palice\\_in\\_cevi/](http://www.impol.si/izdelki/palice_in_cevi/) (20. 05. 2010)*

*[http://www.talum.si/si/proizvodi/livarske\\_zlitine.php](http://www.talum.si/si/proizvodi/livarske_zlitine.php) (20. 05. 2010)*

### Baker in bakrove zlitine

Tališče bakra je 1084 °C in gostota 8960 kg/m<sup>3</sup>. Baker ima zelo dobro električno in toplotno prevodnost ter dobro preoblikovalnost v hladnem in vročem med 680 do 790 °C, dobro obdelovalnost, ni pa ugoden za litje v končne izdelke zaradi poroznosti ulitkov. Pomembna lastnost bakra in njegovih zlitin je obstojnost proti koroziji, dobra varivost in sposobnost spajkanja.

Uporaba: v elektrotehniko se uporablja predvsem čisti baker (99,99 %), ker zlitinski elementi zmanjšujejo električno, manj pa toplotno prevodnost, in za zlitine, ki se uporabljajo kot konstrukcijski material. Iz bakra izdelujemo tehnično uporabne polizdelke v obliki pločevine, trakov, palic, žice ali cevi.

Zlitine na osnovi bakra imajo dobro odpornost proti koroziji in obrabi, dobro obdelovalnost, dobro električno in toplotno prevodnost in so nemagnetične.

## Materiali

Po načinu tehnologije predelave delimo bakrove zlitine na zlitine za **litje** in zlitine za preoblikovanje ali **gnetenje**, po kemični sestavi pa na **medi** in **brone**.

Zlitine bakra s cinkom imenujemo **medi** in vsebujejo od **5 do 45 % Zn**, oziroma nad 50 % Cu. Odlikuje jih dobra korozijska odpornost in dobre mehanske lastnosti in se v strojništvu veliko uporabljajo. Če je cinka med **33 % in 46 % Zn**, so medi primerne za **litje**, z manj kot 33 % Zn so medi za **gnetenje v hladnem**.



Slika 15: Različni izdelki iz bakrovih zlitin

Vir: <http://www.mlm-mb.si/baker> (22. 05. 2010)

V primeru, ko je več kot 80 % Cu oziroma manj kot 20 % Zn, govorimo o tombaku. Z dodatki zlitinskih elementov, kot so: Al, Ni, Mn, Fe in Si, dobimo posebne - **specialne medi**, ki imajo odlične mehanske in kemične lastnosti ter dobro odpornost proti morski vodi. Uporabljamo jih v industriji merilnih naprav, armatur, parnih turbin in v kemični industriji.

Na tem mestu je potrebno omeniti tudi medi, ki se pogosto uporabljajo kot zlitine za trdo spajkanje, pri delovni temperaturi 845 do 1020 °C.

Zlitine bakra, v katerih cink ni glavni zlitinski element, imenujemo **broni** (kositrovi, fosforjevi, svinčevi, aluminijevi, silicijevi, manganovi in berilijevi broni). Po načinu oblikovanja ločimo brone za **litje** in brone za **preoblikovanje**. Za izdelavo manometriških vzmeti in drsnih ležajev se uporablja zlitina bakra z dodatki cinka (3 do 5 % Zn) in kositra (3 do 5 % Sn), ki je poznana z imenom *rdeča kovina*.

### Magnezij in magnezijeve zlitine

Magnezij je lahka kovina, ki ima gostoto 1740 kg/m<sup>3</sup> in tališče pri 650 °C. Magnezijeve zlitine so lahke in se uporabljajo za dele letalskih motorjev in v avtomobilski industriji. Poleg magnezija vsebujejo še do 10 % **Al** (poveča trdnost, trdoto in zmanjša kristalno zrno), do 4,5 % **Zn** (poveča trdnost, trdoto in zmanjša kristalno zrno), do 2,2 % **Mn** (poveča odpornost proti koroziji in varivost) in dosežejo trdnost Rm 300 do 475 N/mm<sup>2</sup>. Po načinu oblikovanja razlikujemo zlitine za litje in zlitine za preoblikovanje.

### Titan in titanove zlitine

Titan je srebrno bela kovina z visoko temperaturo tališča 1668 °C in z relativno majhno gostoto 4540 kg/m<sup>3</sup>. Lastnosti čistega titana se izboljšajo z dodatki Al, Mo, V, Mn, Cr, Sn, Fe in Zr. Varivost titana je zelo dobra in ima nizek toplotno razteznostni koeficient.

V primerjavi z drugimi kovinami odlikuje titan še velika trdnost pri navadni in visokih temperaturah, dobra korozijska obstojnost pri sobni in povišani temperaturi, kakor tudi v sladki in morski vodi. Odporen je proti napetostni koroziji in nekaterim kislinam.

Titanove zlitine za **litje** imajo dobre livarsko-tehnološke lastnosti in so primerne za izdelavo ulitkov zapletenih oblik.

Titanove zlitine za **preoblikovanje** se uporabljajo v letalski, raketni in kemični industriji, ladjedelništvu ter na področju medicinskih orodij in pripomočkov. Zlitina TiAl6V4 je zaradi



velike trdnosti  $R_m = 890 \text{ N/mm}^2$  pri temperaturi do  $490 \text{ }^\circ\text{C}$ , namenjena trdnostno zahtevnejšim konstrukcijam v korozijsko zahtevnih okoljih.

### Nikelj in zlitine niklja

Čisti nikelj ima veliko trdnost  $R_m = 400 \text{ do } 500 \text{ N/mm}^2$ , gostoto  $8900 \text{ kg/m}^3$  in tališče pri  $1452 \text{ }^\circ\text{C}$ . Največ niklja se porabi za izdelavo jekel, predvsem nerjavnih avstenitnih jekel. Nikelj tvori s številnimi elementi zlitine za različno uporabo, na primer: *zlitine uporabne pri visokih temperaturah, zlitine z majhnim temperaturnim raztežkom in zlitine s spominom oblike*.

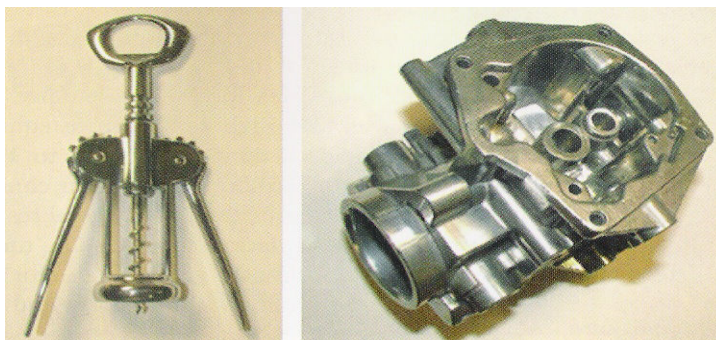
V trdnem stanju topi železo, krom, kobalt, baker, cink, mangan, molibden in titan. Najvažnejša prednost zlitin na osnovi niklja je velika odpornost proti koroziji in dobra mehanska odpornost pri povišanih temperaturah, velika električna upornost, dobra toplotna obstojnost in pogosto zelo zaželeno temperaturna razteznost. Nikljeve zlitine razdelimo glede na tehnološki namen na zlitine za litje in na zlitine za gnetenje, po namenu uporabe pa v: *konstrukcijske zlitine, zlitine za elektrotehniko, zlitine s posebnimi fizikalno-kemičnimi lastnostmi in temperaturno obstojne zlitine*.

Uporabljajo se za konstrukcijske elemente v naftni, farmacevtski in kemični industriji, za črpalke za luge in morsko vodo, za konstrukcijske dele, ki so izpostavljeni trenju v agresivnem okolju in za dele v oksidativni atmosferi pri visokih temperaturah.

### Cink in cinkove zlitine

Cink (Zn) je najcenejša korozijsko odporna kovina, je slab prevodnik toplote in elektrike. Tališče cinka je pri  $419 \text{ }^\circ\text{C}$ . Glavne zlitine tvori z aluminijem **Al** (3 do 30 %) in bakrom **Cu** (do 3,2 %). Zlitini ZnAl4 in ZnAl4Cu1 se uporabljata za tlačno tanke stene ulitke in tlačno kokilno litje v industriji igrač in avtomobilski industriji, za manj obremenjene izdelke, drobnih in zapletenih oblik. Pri naraščanju temperature se trdnost hitro zmanjšuje.

Zlitini se odlikujeta zaradi nizkih temperatur litja, izredno dobro livnostjo, ugodnimi mehanskimi lastnostmi in dimenzijsko obstojnostjo.



Slika 16: Ulitka iz cinkove zlitine  
Vir: Materials&Environment, 2009, 279

### Povzetek

Ustrezna izbira materiala za strojne dele, različne sestavne komponente in izdelke zahteva poznavanje in razumevanje **lastnosti** ter »obnašanje« materiala pri določenem tehnološkem postopku pod vplivom obremenitve, glede na predpisano izdelovalno tehnologijo.

Če se fizikalne lastnosti materiala nanašajo na električno in toplotno prevodnost, gostoto in temperaturo tališča, je za mehanske in tehnološke lastnosti pomembna sprememba mikrostrukture materiala (velikost in oblika kristalnih zrn).

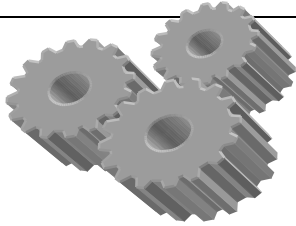
Pri odločanju o primernosti izbranega materiala za ustrezen sestavni element oziroma izdelek, je zato zelo pomembno poznavanje odnosov med kemično sestavo izbranega materiala

## Materiali

(kristalno strukturo) in tehnologijo izdelave bodočega izdelka v povezavi z njegovim mikrostrukturnim stanjem in uporabnimi lastnostmi izdelka.

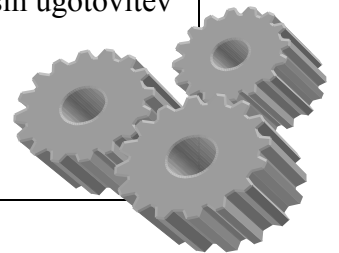
Če nimamo dovolj lastnih izkušenj, je potreben dogovor s proizvajalcem materiala ali uporaba katalogov, strokovne literature (Jocić, 2008), spletnih strani proizvajalcev in predpisanih standardov, kajti pomanjkanje ustreznih informacij je lahko vzrok za slabo ali povsem napačno izbiro in naročilo.

**Zlitine** so kovinski materiali, sestavljeni iz osnovne kovine in vsaj ene namenoma dodane kovine ali legirnega elementa. Ker imajo zlitine večjo trdnost kot čiste kovine, se v strojništvu uporabljajo predvsem zlitine. Najpomembnejše neželezne zlitine so zlitine aluminija, bakra, magnezija, niklja, titana in cinka.



### Vprašanja za preverjanje razumevanja

1. Pojasnite razliko med čisto kovino in zlitino. Primerjate mehanske in fizikalne lastnosti aluminija in aluminijeve zlitine AlCu4MgSi.
2. Narišite in pojasnite razliko med kristalno strukturo in mikrostrukturno čiste kovine in zlitine.
3. Navedite vaše argumente za uporabo cinka in cinkovih zlitin.
4. Pojasnite razliko med zlitinami za litje in zlitinami za gnetenje in navedite primer uporabe.
5. Primerjajte mehanske lastnosti aluminijevih zlitin v trdem, poltrdem in mehkem (deformacijskem) stanju. Vaše ugotovitve pojasnite in navedite ukrepe za spremembo lastnosti.
6. Primerjajte mehanske lastnosti modificirane in nemodificirane aluminijeve zlitine AlSi12 in pojasnite vzrok za različne mehanske lastnosti.
7. Utemeljite, zakaj so pri različnih pogojih strjevanja kristalna zrna različna po velikosti in obliki in kako razlika v zrnatosti vpliva na mehanske lastnosti materiala.
8. Narišite grobozrnato in drobnozrnato mikrostrukturno čiste kovine in zlitine.
9. Primerjajte mehanske lastnosti aluminijevih in bakrovih zlitin. Na osnovi vaših ugotovitev utemeljite uporabo zlitin.
10. Pojasnite zahteve glede lastnosti zlitin, ki se uporabljajo v letalski industriji.
11. Zakaj uporaba magnezijevih zlitin v industriji vozil narašča?
12. Na sprejemni listini v podjetju je bila napisana oznaka GK-MgAl9Zn2. Pojasnite oznako. Uporabite Krautov strojniški priročnik ali spletne strani.



### 3 JEKLA IN ŽELEZOVE LITINE

#### Uvod v poglavje

Zaradi dobrih mehanskih in tehnoloških lastnosti, kakor tudi zaradi uporabe sekundarnih surovin pri pridobivanju, so jekla in železove litine, tudi v svetovnem merilu, v tehniki še vedno najbolj uporabljeni kovinski materiali.

Pri izbiri in uporabi jekel in železovih litin so nam poleg strokovne literature in spletnih strani v pomoč priročniki in katalogi, po potrebi, pa tudi nasveti proizvajalcev. Toda uporaba razpoložljivih številnih strokovnih virov bo uspešna in odločitev izbire optimalna le v primerih, če poznamo lastnosti in znamo odgovoriti na naslednja osnovna vprašanja:

*Kakšna je razlika med litino in jeklom?*

*Če se odločimo za jeklo, katero jeklo je najprimernejše: legirano ali nelegirano, ki je nekoliko cenejše?*

*Kako izbrati ustrezno jeklo ali železovo litino glede na zahtevane uporabne lastnosti, težo in dimenzije načrtovanega izdelka?*

*Katero jeklo bo uspešno prenašalo dinamične obremenitve, ki jim bo izpostavljen bodoči izdelek?*




*Kaj pomeni oznaka jekla ali litine, ki je napisana na dostavljenem materialu ali v katalogu?*

*Katera železova litina je primernješa za litje turbinske lopatice?*

*Katero jeklo ali litina bo primerna za sestavne dele naprave, ki je izpostavljena agresivnim medijem v kemični industriji?*

*Težka odločitev izbire za strojnega inženirja, konstruktorja ali tehnologa, v primeru, če ne poznajo lastnosti in uporabo jekel in litin.*

*V tem poglavju boste spoznali in razumeli:*

-  binarni fazni diagram stanja Fe – Fe<sub>3</sub>C in razliko med jeklom in železovimi litinami;
-  razdelitev, lastnosti in uporabnost jekel in železovih litin z vidika zahtevanih lastnosti izdelka;
-  označevanje jekel in železovih litin.

#### 3.1 BINARNI FAZNI DIAGRAM STANJA Fe – Fe<sub>3</sub>C

Trdno železo (Fe) je kovina z značilnim pojavom **alotropije**, kar pomeni, da ima več **kristalografskih oblik ali modifikacij**, in sicer s kubično prostorsko in s kubično ploskovno centrirano kristalno mrežo. To lastnost ima tudi veliko število železovih zlitin in se imenuje **polimorfizem**. Temperature, pri katerih se spremeni oblika kristalne mreže ali magnetne lastnosti, imenujemo temperature **premene** in se označijo s črko **A**:

A<sub>2</sub> – magnetna premena,

A<sub>3</sub> – premena iz železa alfa (Fe – α) v železo gama (Fe – γ) in obratno ter

A<sub>4</sub> – premena iz železa gama (Fe – γ) v železo delta (Fe – δ) in obratno.

Tališče železa je pri temperaturi 1536 °C. Ko taline zmanjka, je strjevanje zaključeno, atomi železa pa so razporejeni v obliki *prostorsko centrirane kubične mreže*. To kristalno obliko železa imenujemo železo **δ (Fe – δ)** in je obstojna do temperature 1392 °C, ko se prostorsko centrirana kubična mreža železa delta (**Fe – δ**) premeni v *ploskovno centrirano kubično mrežo* železa **γ (Fe – γ)**. Pri prehodu iz prostorsko centrirane kubične mreže v ploskovno centrirano kubično mrežo se volumen zmanjša, kar pomeni, da so v ploskovno centrirani mreži atomi

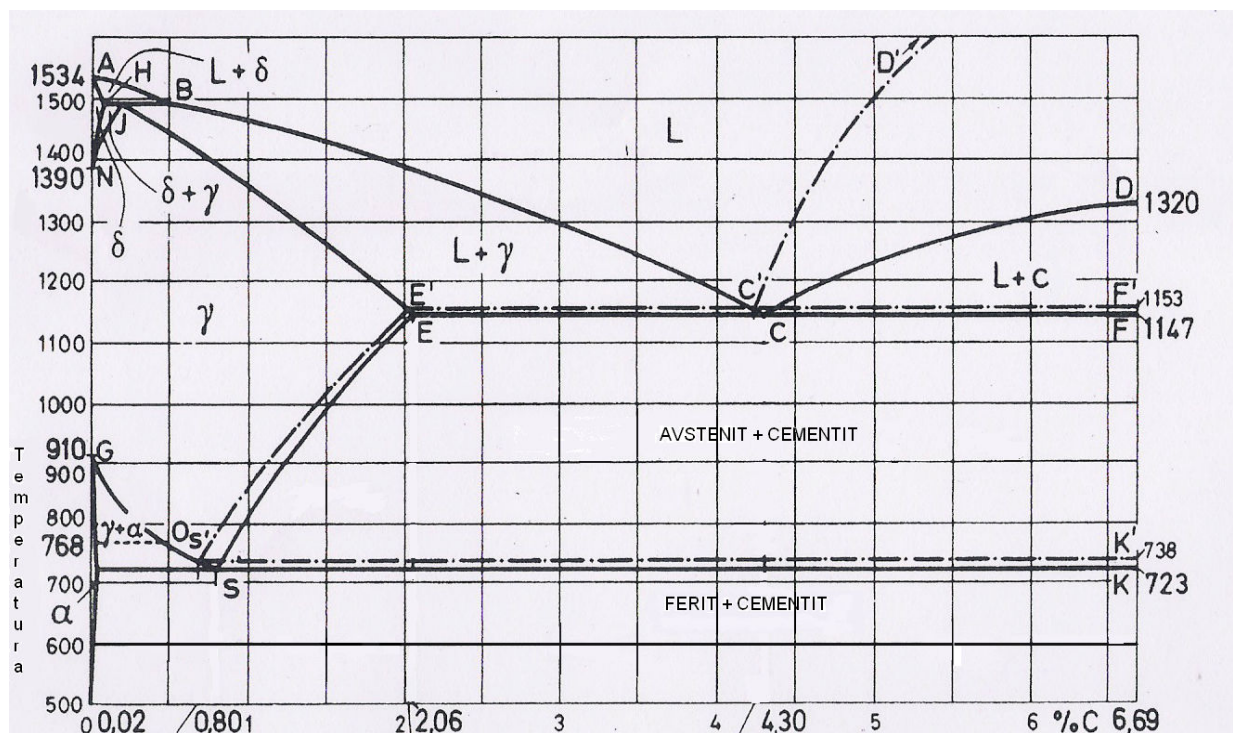
bolj gosto zloženi. Pri nadaljnjem ohlajanju preide pri temperaturi 906 °C ploskovno centrirana kubična mreža železa gama ponovno v prostorsko centrirano kubično mrežo. To kristalno obliko železa imenujemo železo  $\alpha$  (**Fe –  $\alpha$** ). Obrnjene premene oziroma prehode iz ene kristalne oblike v drugo ima železo pri segrevanju. Poleg kristalnih premen pa ima železo še **magnetno premeno**  $A_2$  pri temperaturi 769 °C. Nad to temperaturo je nemagnetno, pod njo pa magnetno.

✚ V diagramu temperatura – čas ( $T-t$ ) narišite, označite in pojasnite krivuljo ohlajanja in krivuljo segrevanja čistega železa. Uporabite Krautov strojniški priročnik.

Metastabilni binarni fazni **diagram Fe – Fe<sub>3</sub>C** je prikazan na sliki 17 s polnimi (izvlečenimi) črtami. Uporaben je za ogljikova jekla oziroma za nelegirana jekla, kjer je ogljik edini zlitinski element in je v mikrostrukturi jekla izločen kot **cementit Fe<sub>3</sub>C**. Črtkane črte predstavljajo stabilni fazni diagram sistema **Fe – C** (železo – grafit), ki je uporaben za železove litine.

Posamezne oznake v diagramu **Fe – Fe<sub>3</sub>C** na sliki 17 pomenijo:

**L** – talina,  **$\delta$**  – trdna raztopina ogljika na osnovi železa,  **$\gamma$**  – avstenit (trdna raztopina ogljika na osnovi železa),  **$\alpha$**  – ferit (trdna raztopina ogljika na osnovi železa), **C** – primarni cementit.



Slika 17: Metastabilni fazni diagram železo – cementit (Fe – Fe<sub>3</sub>C) in stabilni fazni diagram železo – grafit (Fe – C)

Vir: Prirejeno po: Krautov strojniški priročnik, 2007, 388

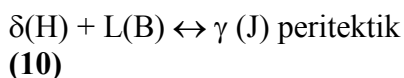
V diagramu na sliki 15 je črta AB, BC in CD, črta **likvidus**. Na krivulji likvidus odčitamo temperaturo, pri kateri se začne strjevanje posamezne železove zlitine oziroma temperaturo, pri kateri so zlitine pri segrevanju popolnoma staljene.

Črte AH, HJ, JE in EF so črte **solidus**. Na njih odčitamo temperaturo, pri kateri je strjevanje določene zlitine zaključeno, če se zlitina ohlaja. V primeru, da zlitino segrevamo, lahko na črti solidus odčitamo temperaturo, pri kateri se začne nataljevanje zlitine.

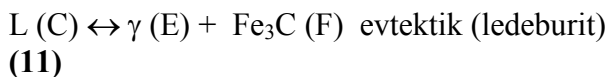


V diagramu Fe – Fe<sub>3</sub>C potekajo tri izotermne reakcije, in sicer: *peritektična*, *evtektična* in *evtektoidna*.

*Peritektična* reakcija poteka pri temperaturi 1493 °C:



*Evtektična* reakcija poteka pri temperaturi 1147 °C:



*Evtektoidna* reakcija pri temperaturi 723 °C (temperatura premene A<sub>1</sub>):

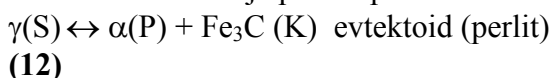
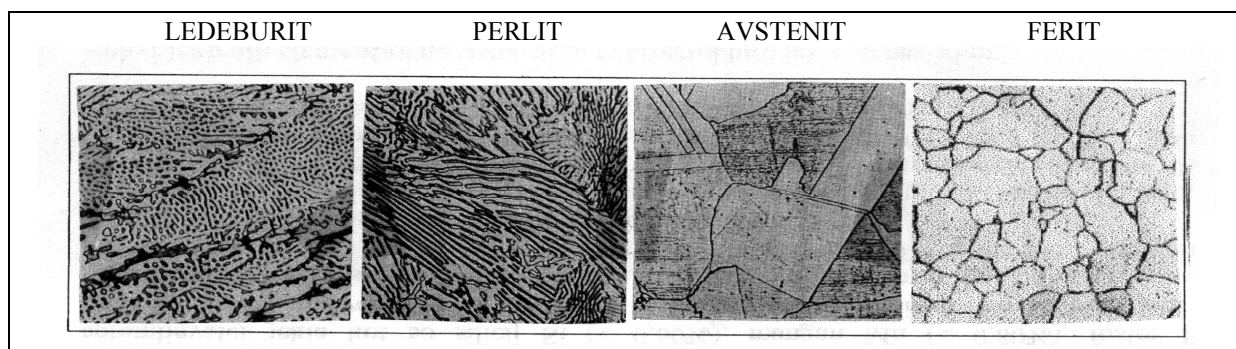


Tabela 3: Mehanske lastnosti: trdota HV, natezna trdnost Rm (N/mm<sup>2</sup>) in razteznost A (%) mikrostrukturnih sestavin zlitin na osnovi železa.

Mikrostrukturna sestavina	Trdota HV	Natezna trdnost Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	Razteznost [A %]
FERIT	90	250–300	35
PERLIT	220	700–900	10
AVSTENIT	210	750	/
CEMENTIT	850	/	/

Vir: Prirejeno po: Krautov strojniški priročnik 2007, 388

Mehanske lastnosti zlitin na osnovi železa so odvisne od *kemične sestave* in od deleža posamezne mikrostrukture, kot so: *ferit*, *cementit*, *perlit*, *avstenit* in *ledeburit*. Povprečne vrednosti mehanskih lastnosti so navedene v tabeli 3.



Slika 18: Mikrostruktura ledeburita, perlita, avstenita in ferita (500 : 1)

Vir: Prirejeno po: Kovine v strojništvu, 1975, 15

V diagramu Fe – Fe<sub>3</sub>C označite in pojasnite temperaturo premen A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> in A<sub>4</sub>, če jeklo vsebuje 0,45 % C.

RAZMISLITE

Na spletni strani:

[http://www2.sts.si/arhiv/tehnolo/Projekt7/diagrami\\_stanj\\_zlitin\\_zeleza\\_z\\_o.htm](http://www2.sts.si/arhiv/tehnolo/Projekt7/diagrami_stanj_zlitin_zeleza_z_o.htm) (25. 04. 2010)

je dostopen diagram  $Fe - Fe_3C$ , ki se lahko uporablja za razumevanje in oceno mikrostruktur jekla in železovih litin, glede na koncentracijo ogljika.

RAZMISLITE

Narišite diagram  $Fe - Fe_3C$  in mikrostrukturo podvtektoidnega (0,3 % C) in nadvtektoidnega jekla (1,2 % C). Pojasnite razliko v mikrostrukturi in uporabi jekla.

#### POMNI

- ✚ **Ferit ali  $\alpha$**  – trdna raztopina ima majhno trdoto, relativno majhno trdnost in dobro duktilnost.
- ✚ **Cementit  $Fe_3C$**  se loči od ostalih mikrostrukturnih sestavin po veliki trdoti. Cementit je zelo krhek. Delež cementita v mikrostrukturi železovih zlitin je tem večji, čim več vsebujejo ogljika. Primarni cementit se pri ohlajanju taline izloča, če litina vsebuje 4,3 % C do 6,7 % C.
- ✚ **Perlit** sestoji iz ferita in cementita. Oblika samega perlita vpliva na mehanske lastnosti v tem smislu, da ima drobno lamelarni perlit večjo trdnost in trdoto kot grobi lamelarni perlit.
- ✚ **Avstenit** je trdna raztopina ogljika v železu gama ( $\gamma$ ). Pri ohlajanju nelegiranega jekla je obstojen le do temperature 723 °C.
- ✚ **Ledeburit** je v diagramu  $Fe - Fe_3C$  evtektik. Pod temperaturo 723 °C je sestavljen iz perlita in cementita  $Fe_3C$ . Za ledeburit je značilna velika trdota.

### 3.2 RAZDELITEV IN IZBIRA JEKEL

Jeklo je zlitina železa in ogljika. Koncentracija ogljika je lahko do 2 % oziroma do 2,06 % (glej metastabilni fazni diagram  $Fe - Fe_3C$ , slika 17, stran 26).

Jekla lahko razdelimo na več načinov, vendar je najbolj pregledna razdelitev, ki upošteva:

- koncentracijo ogljika v jeklu oziroma **kemično sestavo** jekla,
- **mikrostrukturo** jekla in
- **namen uporabe** jekla.

Glede na **kemično sestavo** razlikujemo med: **ogljikovimi (nelegiranimi)** jekli in **legiranimi** jekli.

**Nelegirana** jekla so izdelana brez dodanih legirnih elementov s stalnimi spremljevalci jekla, kot so silicij Si (< 0,60 %), mangan Mn (< 0,80 %), fosfor P ( $\leq$  0,045 %) in žveplo S ( $\leq$  0,045 %).

To skupino jekel imenujemo tudi **ogljikova jekla**, saj je ogljik edini legirni element in ima odločilni vpliv na mikrostrukturo in lastnosti jekla.

V skupino nelegiranih jekel uvrščamo: **osnovna** nelegirana jekla, **kakovostna** in **specialna** nelegirana jekla.

**Legirana jekla** vsebujejo še določen delež legirnih elementov, ki odločilno vplivajo na mikrostrukturo in lastnosti določenega legiranega jekla. Najbolj pogosti legirni elementi so:

krom (Cr), mangan (Mn), molibden (Mo), nikelj (Ni), silicij (Si), vanadij (V), volfram (W), titan (Ti) in kobalt (Co).

Med **legirana** jekla uvrščamo: kakovostna **legirana jekla** in specialna – **posebna legirana jekla**).



Slika 19: Razdelitev jekel glede na kemično sestavo, mikrostrukturo in uporabo

Vir: Lasten

### **POMNI**

***Vplivi legirnih elementov na mikrostrukturo in lastnosti jekla so naslednji:***

- ✚ *izboljšajo mehanske lastnosti (natezno trdnost, napetost tečenja, trdoto, raztezek, žilavost, mejo elastičnosti, dinamično in trajno trdnost),*
- ✚ *poboljšajo korozijsko obstojnost,*
- ✚ *toplotno obstojnost, vplivajo na električno prevodnost in magnetne lastnosti,*
- ✚ *vplivajo na prekaljivost jekla, ker zmanjšujejo kritično ohlajevalno hitrost,*
- ✚ *nekateri legirni elementi širijo področje avstenita (gamageni elementi Ni, Mn, Co) ali ferita (alfageni elementi Si, Cr, Mo, V, W, Ti).*

**MIKROSTRUKTURO** podevtektoidnega jekla sestavljajo feritna in perlitna kristalna zrna. Delež perlita v mikrostrukturi podevtektoidnega jekla je odvisen od koncentracije ogljika v jeklu.

Mikrostruktura **nadevtektoidnih** jekel sestoji iz perlita in sekundarnega cementita  $\text{Fe}_3\text{C}$ , ki je običajno na kristalnih mejah. Ogljikovo jeklo z 0,8 % C ima **evtektoidno** oziroma perlitno mikrostrukturo.

**Feritna** jekla so legirana jekla, ki imajo zaradi dodanega **alfagenega** elementa **feritno mikrostrukturo**. Legirni elementi silicij (Si), krom (Cr), volfram (W), molibden (Mo), vanadij (V) imajo lastnost, da zožijo avstenitno območje. Ker pri segrevanju in ohlajanju feritnih jekel premena  $\alpha \rightarrow \gamma$  in  $\gamma \rightarrow \alpha$  izostane, so jekla nekaljiva. Velikokrat imajo grobo zrno, ker se ne normalizirajo in se prekristalizacija lahko izvrši samo s hladno plastično deformacijo in naknadno rekristalizacijo.

**Avstenitna** jekla so jekla, ki imajo zaradi dodanih gamagenih legirnih elementov **avstenitno mikrostrukturo** od tališča do temperature okolice. Legirni elementi, kakor so mangan (Mn),

nikelj (Ni) in kobalt (Co) imajo to lastnost, da področje avstenita  $\gamma$ , ki sega pri ogljikovih jeklih le do temperature 723 °C, razširijo do temperature okolice.

Pri avstenitnih jeklih ni možna sprememba mikrostrukture  $\alpha$  v  $\gamma$  in obratno, zaradi tega ta jekla ni mogoče kaliti, kakor tudi ne normalizirati. Mikrostrukturo avstenitnih jekel in s tem tudi lastnosti lahko spremenimo samo s plastično deformacijo in rekristalizacijo jekla.

### 3.2.1 Konstruktivna jekla

Konstruktivna jekla so glede mikrostrukture podvektoidna jekla in predstavljajo po količini ter številu največji delež vseh jekel. Glede na kemično sestavo so konstruktivna jekla lahko nelegirana in legirana. Glavne vrste nelegiranih konstruktivnih jekel so: osnovna, kakovostna in plemenita. Med legiranimi konstruktivnimi jekli pa razlikujemo med kakovostnimi in plemenitimi (Standard SIST EN 10020: 2000).

V skupini splošnih konstruktivnih jekel so posebne podskupine, ki so upoštevane tudi v standardih. Osnovni kriterij za kakovost in izbiro teh jekel predstavlja napetost tečenja in natezna trdnost jekla. Primerna so za natančno določene namene, in sicer: jekla za splošno strojogradnjo, jekla za gradbeništvo (betonsko jeklo), jekla za ladjedelništvo ( $R_m = 400 - 500 \text{ N/mm}^2$ ), jekla za izdelavo tirnic (0,4 do 0,8 % C in Mn do 1,2 %), jekla za tanko pločevino, hladno valjane trakove, jeklo za cevovode, jekla za gradnjo parnih kotlov, jekla za tlačne posode, jekla za globoki vlek (0,1 do 0,15 % C), jekla za verige, jeklene vrvi, žico in jeklene konstrukcije (do 0,2 % C, dobro variva, pomembna je napetost tečenja, ker zagotavlja mejo varnosti izdelane konstrukcije).

**Jekla za cementacijo** so konstruktivna jekla s koncentracijo ogljika, največkrat do 0,25 % C. Cementacijsko jeklo izbiramo glede na zahtevano trdnost in žilavost jedra in glede na odpornost površine proti obrabi.

Jekla za cementacijo, ki so legirana s kromom (Cr) so primerna za tiste strojne dele, od katerih se zahteva dobra odpornost površine proti obrabi. Krom-manganova in krom-nikljeva cementacijska jekla uporabljamo za močno obremenjene konstruktivske dele, za katere je potrebna trda površina in večja trdnost jedra, ki pa mora biti tudi žilavo.

**Jekla za poboljšanje** so ogljikova ali malolegirana konstruktivna jekla s koncentracijo ogljika 0,25 do 0,6 % C. Uporabljamo jih za izdelavo konstruktivskih delov, ki so po ustrezni toplotni obdelavi – poboljšanju, izpostavljeni velikim in kompleksnim obremenitvam. Mehanske lastnosti so odvisne od temperature popuščenja. Poboljšana jekla imajo v primerjavi z natezno trdnostjo veliko napetost tečenja in veliko žilavost. Ta lastnost ugodno vpliva na trajno dinamično trdnost. Dobro so odporna proti dinamičnim obremenitvam, posebno proti izmeničnim obremenitvam in udaru. Poleg ogljika lahko vsebujejo še določeno količino ostalih zlitinskih elementov, kot so: mangan, silicij, krom, vanadij, molibden in nikelj. Pri izbiri ustreznega jekla sta osnovna podatka zahtevana minimalna napetost tečenja, ki jo moramo doseči s toplotno obdelavo, in dimenzije oziroma debelina strojnega dela.

Ogljikova jekla za poboljšanje uporabljamo za izdelavo strojnih delov, katerih premer znaša do 40 mm. Pri večjih premerih izdelkov mehanske lastnosti zaradi slabe prekaljivosti niso več zagotovljene.

Legirana jekla za poboljšanje so lahko:

✚ **manganova**, mangan-silicijeva in mangan-vanadijeva,

✚ **kromova**, krom-vanadijeva, krom–molibdenova in krom-nikelj-molibdenova jekla.

Mangan povečuje natezno trdnost, napetost tečenja in prekaljivost jekla. Manganova jekla uporabljamo za strojne dele z večjo trdnostjo in z nekoliko večjimi premeri.

Za povečanje odpornosti proti obrabi izbiramo med mangan-silicijevimi jekli, ki imajo v normaliziranem kakor tudi v poboljšanem stanju večjo napetost tečenja, zato so ta jekla posebno primerna za pogonske dele. Mangan-vanadijevo jeklo ima veliko natezno trdnost in veliko napetost tečenja, zato ga uporabljamo za strojne dele, kjer se zahteva velika trdnost. Krom in molibden se kot legirna elementa v jeklu zelo dobro dopolnjujeta. Krom povečuje trdnost in prekaljivost, molibden pa popustno obstojnost.

### RAZMISLITE

*Zakaj se podevtektoidna jekla imenujejo tudi konstrukcijska?*

*Kako razdelimo konstrukcijska jekla glede uporabe?*

*Katero jeklo bi izbrali za izdelavo ležajnih obročev in zakaj?*

*Katere mehanske lastnosti jekel so za konstruktorje pomembne in zakaj?*

Uporabite spletno stran:

<http://www.metalravne.com/kvalitete/konstrukcijska-jekla.html>

### 3.2.2 Orodna jekla

Orodna jekla so vsa tista nelegirana in legirana jekla, ki se uporabljajo za izdelavo vseh vrst orodij – ročnih in strojnih, kakor tudi orodij, ki so primerna za delo pod posebnimi pogoji. Orodja za preoblikovanje uporabljamo v hladnem ali pa v vročem stanju. Zelo pogosta obremenitev orodij je obraba zaradi abrazije, vendar se nekatera orodja uporabljajo pri visokih temperaturah, v korozijskih medijih ali pa v stiku s kovinskimi talinami in podobno. Zato imajo jekla za orodja zelo različno kemijsko sestavo, odpornost proti koroziji, obrabno obstojnost in ustrezno trdoto pri povišani temperaturi.



Slika 20: Kakovostna orodja iz orodnega jekla

Vir: Materials and the Environment, 2009, 287

Med orodji za obdelavo in predelavo razlikujemo dve glavni vrsti in sicer:

- ✚ orodja za preoblikovanje (utopi, matrice, orodja za tlačno litje) in
- ✚ orodja za odrezavanje.

Osnovni lastnosti, po katerih ocenjujemo orodna jekla, sta **trdota** in **žilavost**. Orodna jekla razdelimo glede na uporabo v naslednje skupine:

- ✚ ogljikova orodna jekla za delo v hladnem stanju (0,5 do 1,4 % C),
- ✚ legirana orodna jekla za delo v hladnem stanju,
- ✚ legirana orodna jekla za delo v vročem,
- ✚ nerjavna orodna jekla vsebujejo ogljika 0,2 do 0,5 C in do 15 % Cr,
- ✚ hitroreznna jekla.



**Hitrorezna jekla** se uporabljajo za izdelavo orodij za obdelavo materialov z odrezovanjem in za izdelavo orodij za hladno preoblikovanje (matrice ipd). Od hitroreznih jekel zahtevamo visoko trdoto, ustrezno žilavost in obstojnost proti obrabi v vročem stanju.



Slika 21: Rezalna orodja iz hitroreznega jekla

Vir: <http://www2.sts.si/arhiv/tehn/odrezovanje/41.htm> (14. 05. 2010)

Pri procesu odrezovanja se rezila orodij zaradi velike rezalne in podajalne hitrosti močno segrejejo, zato morajo obdržati ustrezno trdoto do zelo visokih temperatur. Zelo pomembna lastnost hitroreznih jekel je popustna obstojnost ali pojav sekundarne trdote, kar pomeni, da se trdota in s tem rezalna sposobnost ne zmanjšata, četudi se orodje med procesom odrezavanja segreje do 500 °C. Popustna obstojnost hitroreznih jekel je odvisna od vpliva pravilne kombinacije legirnih elementov, na primer: volfram (12 % W), krom (min. 3 % Cr), molibden (4 %–2 % Mo), vanadij (1,5 % V), kobalt Co in zadostne količine ogljika (0,7 % –1 % C). Glede na osnovni legirni element lahko hitrorezna jekla razdelimo v dve osnovni skupini, in sicer: jekla legirana z molibdenom in jekla legirana z volframom.

### 3.2.3 Posebna jekla

Posebna jekla so jekla, kjer je mogoče z legirnimi elementi in toplotno obdelavo bistveno vplivati na njihove posebne lastnosti. Jekla s posebnimi lastnostmi razdelimo glede na pogoje pri uporabi na naslednje vrste:

- ✚ jekla, odporna proti koroziji,
- ✚ jekla, obstojna pri povišanih temperaturah,
- ✚ jekla, odporna proti obrabi,
- ✚ jekla s posebnimi fizikalnimi lastnostmi in
- ✚ pri nizkih temperaturah žilava jekla.

### 3.2.4 Označevanje jekla

Jekla izbiramo in naročamo na osnovi standardnih oznak, saj so standardizirana jekla nekoliko cenejša. Oznaka jekla mora biti nedvoumna. V začetni fazi izbiranja jekla za določeno aplikacijo, običajno uporabljamo oznake glede na uporabo in mehanske lastnosti. Kasneje pa je smiselna uporaba številčne oznake.

Poznavanje standardnih oznak materiala je posebno pomembno pri zagotavljanju kakovosti izdelkov, vmesni kontroli ali prevzemu izdelkov, posebno v primerih, če se naročnik izdelka izjemoma sklicuje na interne standarde.

V nadaljevanju je podano nekaj osnovnih primerov oznak po standardu SIST EN. Kadar se privzame mednarodni, evropski ali tuj nacionalni standard, se pred izvorno oznako privzetega

standarda doda kratica SIST npr.: SIST DIN XXXX, SIST ISO XXX-X (<http://www.sist.si/> 11. 06. 2010)

Na tem mestu naj omenim, da bomo standarde uporabljali tudi pri vajah, kjer bomo izbirali *jekla, železove litine in zlitine neželeznih kovin* ter medsebojno primerjali različne standardne oznake.

### Sistemi označevanja jekel – 1. del: Oznake jekel (SIST EN 10027-1: 2005)

Pri označevanju jekla lahko oznake jekla razdelimo v dve skupini, in sicer:

- oznake glede na *uporabo in mehanske ter fizikalne lastnosti* in
- oznake glede na *kemijsko sestavo* jekel.
- Oznako jekla glede na uporabo in mehanske ter fizikalne lastnosti sestavljajo:
  - ✚ osnovni znak,
  - ✚ dodatni znaki za jeklo in
  - ✚ dodatni znaki za jeklene izdelke.

*Osnovne znake* sestavljata velika **črka** in številčni znak (**nnn**). Začetna velika črka pomeni **namen uporabe** jekla, in sicer:

S – konstrukcijska jekla (za gradbeništvo),

P – jekla za tlačne posode,

L – jekla za cevovode,

E – konstrukcijska jekla za strojogradnjo,

B – jekla za armiranje betonov,

R – jekla za tirnice ali v obliki tirnic,

H – hladno valjani ploščati izdelki,

T – bela pločevina,

M – jekla za elektropločevino,

Y – jeklo za prednapeti beton.

Nato sledi številčni znak (**nnn**), to je **število**, ki označuje minimalno **napetost tečenja** v  $N/mm^2$  za najmanjšo debelino (npr. **S355**).

Lahko pa so dodani tudi dodatni znaki za jeklo, na primer: za udarno žilavost ali za način toplotne ali druge obdelave.

Tako pomeni celotna oznaka npr. za jeklo **S355JR** naslednje: *konstrukcijsko jeklo za gradbeništvo, minimalna napetost tečenja  $R_e = 355 N/mm^2$ , JR pomeni udarno žilavost 27 J, pri temperaturi 20 °C.*

Primer oznake jekla, npr. **S255N**, pa pomeni: *konstrukcijsko jeklo za gradbeništvo, minimalna napetost tečenja  $R_e = 255 N/mm^2$ , nato sledi črka N, ki pomeni normalizirano jeklo.*

- Primeri oznake glede na kemijsko sestavo, ki velja za:
  - ✚ **nelegirana jekla**, npr. C35,
  - ✚ **nelegirana jekla** s povprečnim deležem mangana  $Mn \geq 1 \%$ , npr.: 6CrMo15-5,
  - ✚ **legirana jekla** s koncentracijo legirnih elementov nad 5 %, npr.: X5CrNi18-10,
  - ✚ **hitrorezno jeklo**, npr.: HS2-9-1-8.

Primer oznake za nelegirano (ogljikovo) jeklo: **C35:**

## Materiali

črka C pomeni ogljik, število 35 pa 100-kratni povprečni delež ogljika v odstotkih, torej 0,35 % C.

Oznaka: **6CrMo15-5** pomeni: 0,06 % C, 3,7 % Cr in 0,5 % Mo.

Oznaka: **28Mn6** pomeni: 0,28 % C in 1,5 % Mn (število 6 smo delili s koeficientom 4).

**Pomni:** Števila, ločena z vezajem in sledijo kemijskemu znaku legirnega elementa, podajajo povprečni delež elementov v odstotkih, pomnožen s koeficientom 4 oziroma 10 ali 100.

Tabela 4 nam podaja „koeficient vpliva” glede na vrsto legirnega elementa.

Tabela 4: Vrednost koeficienta glede na legirni element

Legirni element	Koeficient
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb Ta, Ti, V, Zr	10
C, N, P, S	100

Vir: Prirejeno po: SIST EN 10027-1

Primer oznake za **legirano jeklo: X5CrNi18-10**

Če je jeklo legirano in je delež vsaj enega od legirnih elementov > 5 %, je na prvem mestu črka **X**, sledi delež ogljika 0,05 % C ( $5 : 100 = 0,05$ ), nato najvplivnejši legirni element, in sicer 18 % kroma (Cr) in nato 10 % niklja (Ni).

Primer oznake za **hitrorežno jeklo: HS2-9-1-8**

Hitrorežna jekla imajo oznako HS, nato pa sledijo z vezajem ločena števila, ki podajajo delež legirnih elementov v odstotkih v naslednjem zaporedju: volfram (W) – molibden (Mo) – vanadij (V) – cobalt (Co).

### SIST EN 10027-2:2005 - Označevanja jekel s številkami

Številčna oznaka jekla ima pet mest in je primerna predvsem za naročanje jekla in za bazo podatkov. Vsakemu jeklu pripada samo eno število.

Na primer: 1.XXXX

1 - glavna številka skupine materiala in je za jekla vedno 1.

(Številke od 2 do 9 veljajo za druge materiale, ki niso jekla).

1. 01 xx do 1. 07 xx – pomeni nelegirana kakovostna jekla.

Na primer: jeklo **S255N** ima številko: 1.0461

1.04 xx – jekla s poprečno koncentracijo ogljika 0,25 % < 0,55 % C ali  $R_m 500 < 700 \text{ N/mm}^2$ .

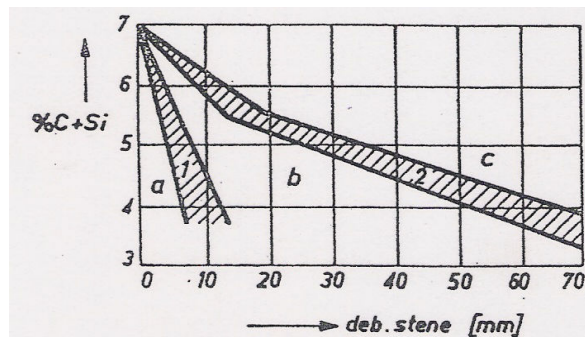
1. xx **61** – pomeni zaporedno številko jekla v njegovi skupini.

## 3.3 ŽELEZOVE LITINE

Železove *litine* so glede na tehnološki namen *zlitine za litje*. Običajno vsebujejo od 2 do 4 % C. Za poboljšanje mehanskih lastnosti, za povečanje odpornosti proti obrabi in koroziji ter za doseganje posebnih lastnosti pa so lahko dodani tudi drugi zlitinski elementi, kot so: nikelj (Ni), krom (Cr), molibden (Mo) ali mangan (Mn).



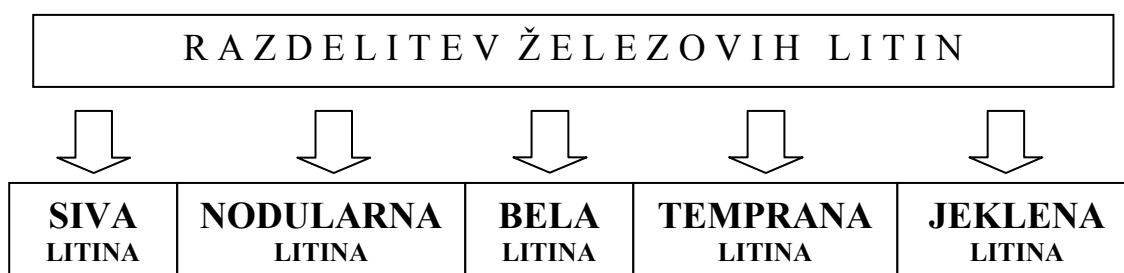
Največji vpliv na mikrostrukturo in na uporabne lastnosti litin ima kemična sestava litine in hitrost ohlajanja ulitka, ker vplivata na obliko in porazdelitev ogljika v mikrostrukturi litine. Pri kemični sestavi ima poleg ogljika glavno vlogo še silicij (1 % do 3 % Si), ker preprečuje izločanje ogljika v obliki cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) in pospešuje nastajanje grafita. Grafit je kristalna oblika ogljika. Glede na hitrost ohlajanja odlitka oziroma tehnologijo litja, se ogljik pojavlja v mikrostrukturi kot grafit (C) ali cementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).



Slika 22: Greiner-Klingensteinov diagram

Vir: Gradiva I, 1978, 173

Za razumevanje mikrostruktur železovih litin se uporablja stabilni fazni diagram železo (Fe) – grafit (C) na sliki 17, (stran 26) in Greiner-Klingensteinov diagram na sliki 22, kjer pomeni področje: a – belo litino, b – perlitno sivo litino in področje c – feritno sivo litino.



Slika 23: Razdelitev železovih litin

Vir: Lasten

Glede na mikrostrukturo železovih litin, razlikujemo med sivo, nodularno, belo in temprano litino. Na tem mestu moram opozoriti na *jekleno litino*, ki je glede na kemično sestavo enaka istovrstnemu jeklu. Zato je mikrostruktura jeklene litine odvisna od vsebnosti ogljika in legirnih elementov ter od toplotne obdelave ulitka.

#### Siva litina

Mehanske in tehnološke lastnosti sive litine so odvisne od kemične sestave, hitrosti ohlajanja in od oblike, velikosti ter porazdelitve grafita v mikrostrukturi litine. Čim večje so lamele grafita, tem manjšo natezno trdnost ima siva litina.

Glede na kemično sestavo in hitrost ohlajanja oziroma debelino stene odlitka, (slika 22) razlikujemo med feritno, feritno – perlitno in perlitno sivo litino.

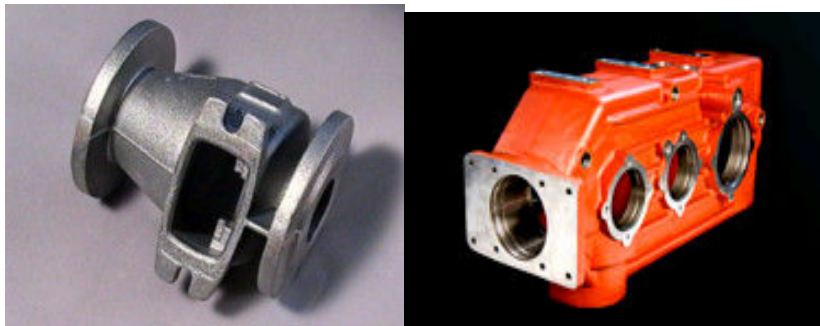


Slika 24: Siva litina z lamelarnim grafitom vrste A (50 : 1)

Vir: Kovine v strojništvu, 1975, 25

Siva litina s perlitno mikrostrukturo je trdnostno boljša od feritne. Pri izbiri vrste sive litine moramo biti zato pozorni na zahtevano trdnost odlitka.

Prav tako pa oblika, velikost in porazdelitev grafita v mikrostrukturi sive litine, vpliva na vrsto lastnosti, kot so odpornost proti obrabi, sposobnost oblikovanja z odrezavanjem, dušenje zvoka in sposobnost litja.

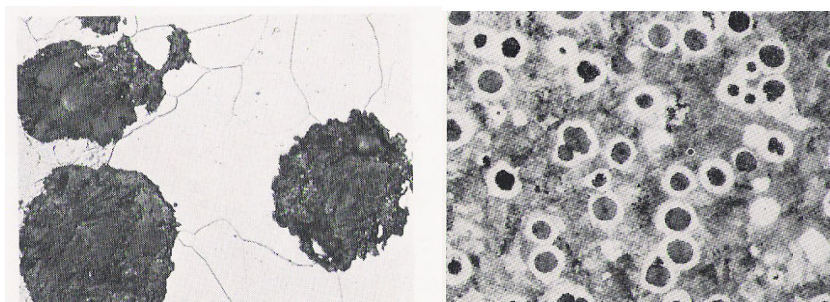


Slika 25: Ulitka iz sive litine  
Vir: <http://www.livar.si/> (24. 05. 2010)

Grafit v sivi litini zagotavlja dobre drsne in mazalne lastnosti, zato je uporabna tudi za ležaje. Povečanje deleža grafita v sivi litini zmanjša njeno trdoto, trdnost in razteznost, hitrost širjenja zvoka, poveča pa dušenje.

Siva litina **EN-GJL-150** se uporablja za manj obremenjene strojne dele. Na primer: siva litina **EN-GJL-350** (natezna trdnost:  $R_m$  300–380  $N/mm^2$ ) se uporablja kot konstrukcijski material za gradnjo strojev.

**Siva litina s kroglastim grafitom ali nodularna litina** je po kemični sestavi enaka sivi litini z lamelnim grafitom. Z dodajanjem manjše količine modifikatorja (0,03 %–0,05 % Mg ali 0,02 % Ce – cer) v raztaljeno sivo litino neposredno pred izlitjem v kalupe se doseže kroglasto izločanje grafita. Zato ima nodularna litina mnogo boljše mehanske lastnosti kot siva z lamelnim grafitom. Natezna trdnost nodularne litine lahko znaša 300 do 800 (1200)  $N/mm^2$  z razponom trdote med HB 140 do 480 HB.



Slika 26: Mikrostruktura nodularne litine. Levo – feritne (500 : 1) in desno – perlitne (100 : 1)  
Vir: Kovine v strojništvu, 1975, 25

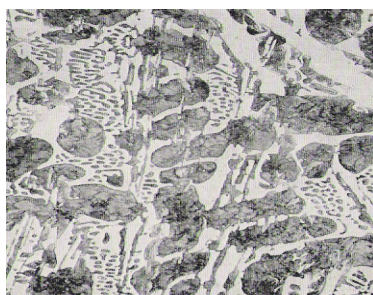
Mehanske lastnosti lahko še dodatno izboljšamo z dodatki zlitinskih elementov, kot sta **nikelj** in **molibden**, in s postopki toplotne obdelave.

**Uporaba:** za ohišja strojev, dele drsnih ležajev in drugih delov zglobnih spojev, ki so izpostavljeni trenju in velikim pritiskom, za valje in za dele strojev za valjanje, kovanje in

stiskanje, v avtomobilski industriji za kolenčaste gredi, osi in dele motorjev, armature, ventile, črpalke ipd.

**Bela litina** ima svetel prelom, ker je ogljik izločen v obliki **cementita**  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Cementit poveča trdoto in obrabno odpornost litine, hkrati pa otežuje obdelavo. Odlitki iz bele litine so trdi in krhki. Uporablja se za litje različnih delovnih elementov in orodja, ki morajo biti odporna proti obrabi, na primer za bate pri težkih hidravličnih stiskalnicah, za izdelavo valjev za valjanje pločevine, profilov, mlinskih valjev za žito, za kemično in papirno ter gumarsko industrijo pa tudi za dele, ki so izpostavljeni koroziji, kot na primer deli črpalk.

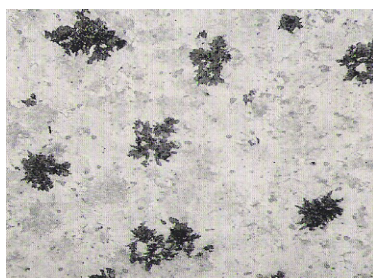
Določeno kakovost in lastnosti bele litine lahko dosežemo z ustrezno kemično sestavo in hitrostjo ohlajanja. Z dodatkom legirnih elementov, kot so krom, nikelj, molibden, vanadij, titan, dosežemo posebne lastnosti bele litine.



Slika 27: Mikrostruktura bele litine

Vir: Handbuch der Giesserei Technik, 1960, 12

Izhodiščni material za **temprano litino** je **bela** litina, kjer je celoten ogljik izločen v obliki  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Bela litina je zelo trda in krhka, zato je težko obdelovalna. Temprana litina je rezultat žarjenja ali tempranja ulitkov iz bele litine pri visoki temperaturi. Pri temprani litini so mehanske lastnosti neodvisne od debeline stene ulitka, pač pa od temperature žarjenja litine.



Slika 28: Oblika grafita v temprani litini (100 : 1)

Vir: Handbuch der Giesserei Technik, 1960, 7

Če smo žarili ulitek iz bele litine v **nevtralni atmosferi**, to je v atmosferi na osnovi dušika  $\text{N}_2$  ali vodika  $\text{H}_2$  in pri temperaturi  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , od 80 do 120 ur oziroma 3 do 5 dni, potem pri žarjenju ves cementit  $\text{Fe}_3\text{C}$  razpade v tako imenovani temprani ogljik (ogljje), in govorimo o črni oziroma ameriški temprani litini.

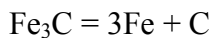


V primeru, ko ulitke iz bele litine žarimo v **oksidacijski atmosferi**, to je v atmosferi, ki je na primer sestavljena iz plinske mešanice naslednjih plinov:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$  in  $\text{H}_2$ , pri višji temperaturi  $800\text{ }^\circ\text{C}$  do  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , 2 do 3 dni, cementit razpade, vendar se nato ogljik C veže s kisikom. Zaradi tega nastane 2 do 4 mm debeli razogljjičeni površinski sloj ulitka. Ob prelomu

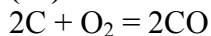
## Materiali

je površinski sloj svetel, v jedru pa ostane temprani ogljik, delno vezan tudi na cementit-perlit in govorimo o **beli** ali evropski **temprani litini**. Pri beli temprani litini se proces tempranja deli na dva dela, in sicer:

- ✚ na razpad cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) in
- ✚ na razogljčenje površinskega sloja ulitka.



(14)



**Uporabnost** temprane litine: za tankostene odlitke v avtomobilski industriji, za dele kmetijskih in gradbenih delovnih strojev, za fine strojne dele, ventile; torej za izdelke, ki morajo biti poceni, trdni in žilavi ter dobro obdelovalni.

Po kemični sestavi je **jeklena litina** enaka istovrstnemu jeklu za predelavo, le črka **G** pred simbolno označbo nakazuje, da je jeklo namenjeno za litje v dokončni uporabni izdelek.

Za ulivanje je primerno vsako jeklo, vendar se v obliki litine uporabljajo samo nekatere vrste jekla, in sicer: nelegirana jeklena litina za splošno uporabo, nelegirana in legirana jeklena litina za poboljšanje, proti obrabi odporna malo legirana in veliko legirana, toplotno odporna litina ter litina odporna proti koroziji. Znana so lita orodja iz legiranega jekla, na primer rezalna orodja za odrezavanje – ulita frezala in sestavni deli za vodne, plinske ter parne turbine. Toplotno odporne in nerjavne jeklene litine so legirane s kromom, nikljem in molibdenom.

V ulitem stanju imajo ulitki iz jeklene litine slabše mehanske lastnosti od preoblikovanega jekla s podobno kemijsko sestavo. Manjša je predvsem žilavost zaradi neenakomernih in grobih kristalnih zrn. Zato ulitke toplotno obdelamo, običajno normaliziramo.



Slika 29: Ulitki iz jeklene litine

Vir: <http://www.litostrojgroup.com/> (23. 09. 2010)

Ulitki morajo biti brez livarskih napak (lunkerji, razpoke ipd.), ki vplivajo na obdelovalnost in uporabnost jeklene litine.

Glede na namen uporabe so se izoblikovale predvsem štiri osnovne vrste jeklene litine:

- ✚ konstrukcijske, ogljikove in malo legirane,
- ✚ nerjavne,
- ✚ ledeburitne in
- ✚ posebne litine.

Jeklene litine se uporabljajo za različne dele strojev in naprav. V termoenergetskih napravah se uporabljajo temperaturno obstojne jeklene litine, ki so odporne proti spremembi dimenzije

zaradi deformacije z lezenjem med uporabo. Te vrste jeklene litine so legirane z molibdenom, s kromom in z vanadijem v različnih kombinacijah, glede na temperature uporabe.

### 3.3.1 Označevanje železovih litin

Železove litine so standardizirane. (**SIST EN 1560: 1998 – Livarstvo – Sistem označevanja železove litine – Označevalni simboli in številke za material**).

Oznake železove litine so:

- ✚ črkovno-številčni znaki ali
- ✚ številke.

Označevanje s črkovno-številčnimi znaki je lahko na podlagi *mehanskih lastnosti litine ali kemijske sestave litine*.

Črkovno-številčno označevanje litin na podlagi *mehanskih lastnosti* npr. EN-GJL-250

1. mesto: začetni dve črki **EN** le v primeru standardiziranih vrst litine
2. mesto: **GJ** (G-litina, J-litina na osnovi železa)
3. mesto: vrsta oziroma oblika grafitu  
(**L** – lamelarni grafit, **M** – temprani grafit, **S** – krogličast grafit, **V** – vermikularni grafit) in
4. mesto: natezna trdnost ( $R_m = 250 \text{ N/mm}^2$ ).

Oznaki bele in črne temprane litine (**SIST EN 1562: 1998/A1: 2006 – Livarstvo – Temprana litina**) glede na **mehanske lastnosti** sta npr.:

✚ BELA TEMPRANA LITINA: EN-GJMW-350-4S  
( $R_m = 350 \text{ N/mm}^2$ , raztezek  $A = 4 \%$ , S posebej uliti vzorec)

✚ ČRNA TEMPRANA LITINA: EN-GJMB-HV250  
(trdota  $HV = 250$ )

Začetni dve črki **EN** sta v rabi le za standardizirane vrste sive litine, nato sledita črki **GJ**.

Takoj nato sledi označba za vrsto in obliko grafitu, in sicer:

**MW** – temprani grafit v beli temprani litini in črka **B**, ki pomeni **črno** temprano litino.

Označba za *mehanske lastnosti* je številka vrednost, ki sledi osnovni črkovni označbi in pomeni natezno trdnost, če pa je pred njo označba HBW, HV, pa le-ta pomeni trdoto po Brinellu ali Vickersu. Ločena s pomišljajem je lahko dodana zahtevana vrednost razteznosti litine. Mehanske lastnosti ugotavljamo s preizkušanci, izdelanimi iz vzorcev, ki so lahko: **posebej uliti (S)**, **priliti na uliti izdelek (U)** ali **izrezani iz njega (C)**.

Primer oznake litine glede na *kemijsko sestavo*, npr.: EN-GJL-XCr28

Če se oznaka litine nanaša na kemijsko sestavo, potem črkam EN-GJL, ki pomenijo standardizirano litino na osnovi železa z lamelarnim grafitom, sledi črka **X** in nato glavni legirni elementi. V zgornjem primeru je to *krom Cr*, povprečni delež kroma je 28 %.

Primer **številčne** oznake železove litine: EN-JS1020

(standardizirana železova litina s kroglastim grafitom, **1** – natezna trdnost kot glavna lastnost litine, **0** – oznaka materiala v skupini in **0** – brez podanih posebnih zahtev).



Standard SIST EN 1561: 1998 – Livarstvo – Siva litina (z lamelastim grafitom) obravnava lastnosti nelegirane in nizko legirane sive litine (razen sive litine za cevovode in armature) in sicer opredeljuje vrste sive litine na podlagi mehanskih lastnosti: natezne trdnosti, razteznosti, napetosti tečenja in trdote.

Razvrščanje ostalih železovih litin glede na mehanske lastnosti obravnavajo standardi:

SIST EN 1563:1998/A1: 2003 – Livarstvo – (Siva) litina s kroglastim grafitom – Dopolnilo A1

SIST EN 1563:1998/A2: 2005 – Livarstvo – (Siva) litina s kroglastim grafitom – Dopolnilo A2

SIST EN 1564: 1998 – Livarstvo – Bainitna železova litina

SIST EN 1564:1998/A1: 2006 – Livarstvo – V bainitni stopnji poboljšana železova litina

## Povzetek

Poznavanje jekla in železovih litin je odločilno za presojo pri ustrezni izbiri glede na zahteve izdelovalnih tehnologij in uporabne lastnosti izdelkov. V pomoč za razumevanje mikrostrukturnih sestavin ogljikovih jekel je diagram Fe – Fe<sub>3</sub>C. Opozoriti vas moram, da boste znanje o poznavanju jekel in železovih litin potrebovali pri naslednjem poglavju o toplotni obdelavi, kakor tudi v drugem letniku pri predmetu Tehnologija, pri izbiri ustreznih tehnoloških pogojev za spremembo lastnosti določenega izdelka.

Najštevilčnejša je skupina **konstrukcijskih** nelegiranih in legiranih jekel. V to skupino uvrščamo jekla za poboljšanje in jekla za površinsko utrjevanje (jekla za cementacijo, nitridiranje in površinsko kaljenje).

Pri **orodnih** jeklih moramo razlikovati med ogljikovimi (nelegiranimi) orodnimi jekli in legiranimi orodnimi jekli za delo v hladnem in v vročem stanju. Posebna skupina orodnih jekel so **hitrorezna jekla**, ki se danes izdelujejo predvsem po tehnologiji prahu.

**Nerjavna, kemično in toplotno obstojna** jekla uvrščamo glede na kemijsko sestavo med legirana jekla, ker dodani legirni elementi vplivajo na posebne lastnosti jekla.

Od vseh vrst železovih **litin** je najbolj razširjena **siva** litina. Glede na kemično sestavo sive litine in hitrost ohlajanja odlitka, ogljik kristalizira v obliki grafita, delno pa lahko tudi v obliki cementita (Fe<sub>3</sub>C), ki je sestavina perlita.

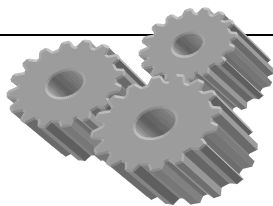
Pri izbiri vrste sive litine moramo biti pozorni na zahtevano **trdnost** odlitka, ki je poleg kemične sestave odvisen tudi od debeline sten odlitka oziroma od hitrosti ohlajanja.

Za poboljšanje mehanskih lastnosti, za povečanje odpornosti proti obrabi in koroziji ter za doseganje posebnih lastnosti so lahko tudi litinam dodani drugi zlitinski elementi, kot so: nikelj (Ni), krom (Cr), molibden (Mo) ali mangan (Mn).

**Bela litina** je zelo trda in krhka ter težko obdelovalna, zato jo izbiramo za izdelke, kjer se zahteva visoka odpornost proti obrabi.

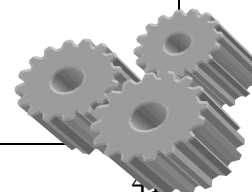
**Temprana litina** je pomemben, sorazmerno cenen material, ki zaradi dobrih lastnosti, kot so: livnost, korozijska odpornost, obdelovalnost z rezanjem in sorazmerno dobra žilavost, zadošča vsem trdnostnim zahtevam.

Za izdelavo jeklenih izdelkov zapletenih oblik, ki jih je sicer mogoče izdelati le s kombinacijo postopkov plastičnega preoblikovanja, je litje **jeklene litine** cenejši postopek. Jeklena litina pa ni primerna za litje tankostenskih in majhnih odlitkov.



### Vprašanja za preverjanje razumevanja

1. Narišite in pojasnite kristalno strukturo ferita in avstenita.
2. Primerjajte kemijsko sestavo, mehanske in fizikalne lastnosti: železa, jekla C15, jekla C60 in SL250. Uporabite Krautov strojniški priročnik.
3. a) Narišite in označite diagram Fe – Fe<sub>3</sub>C.  
b) Za padevtektoidna jekla C15, C45 in C55 narišite in opišite grobo ter drobno zrnato mikrostrukturo.  
c) Pojasnite in navedite vaše argumente glede uporabe navedenih jekel.
4. V katerih primerih uporabe in zakaj izbiramo med legiranimi in nelegiranimi jekli?
5. Utemeljite, v katerih primerih uporabe se odločimo za poboljšano jeklo in kdaj za jeklo za cementacijo?
6. Utemeljite glavne razlike med konstrukcijskimi in orodnimi jekli.
7. V katerih primerih uporabe so konstrukcijska jekla edina možna izbira?
8. Katere železove litine poznate?
9. Primerjajte oznake, mehanske lastnosti, mikrostrukture in uporabo železovih litin.
10. Navedite uporabo in pojasnite oznako ter narišite mikrostrukturo za nodularno litino:  
a) s feritno mikrostrukturno EN-GJS–400 in b) s perlitno mikrostrukturno EN-GJS–800.
11. Pojasnite oznake: EN-GJMW-550-12 in EN-GJMB-350–10.
12. Presodite in utemeljite, v katerih primerih uporabe se odločimo za nelegirano jeklo in kdaj za kakovostno nelegirano jeklo. Primerjajte mehanske lastnosti.
13. Lopatice vodnih, plinskih in letalskih turbin so močno obremenjeni deli z visokimi zahtevami glede obremenitve pri uporabi. Predlagajte jeklo za njihovo izdelavo. Uporabite spletno stran: (<http://www.metalravne.com/katalogi.html>).
14. Za jeklo z oznako 13Mo4-5 (jeklo za strojegradnjo), primerjajte oznake po DIN in ISO Standardu. Uporabite spletno stran: (<http://www.metalravne.com/katalogi.html>).
15. Navedite argumente, zakaj jeklena litina ni primerna za litje tankostenih odlitkov.
16. Navedite nekaj primerov uporabe legiranih železovih litin.
17. Jeklo C45 smo iz avstenitna ohlajali do temperature okolice:  
a) v peči, b) na zraku in c) v vodi.  
Za posamezne primere ohlajanja jekla narišite, označite in pojasnite mikrostrukturo jekla. Katere so vaše ugotovitve glede trdnosti, trdote in uporabe jekla?
18. Presodite, katera siva litina ima boljše mehanske lastnosti: feritna ali perlitna siva litina in zakaj?
19. Navedite razloge zakaj na tržišču prevladujejo sintrana hitrorezna jekla.
20. Izberite jeklo, ki bo primerno za izdelavo navojnega svendra. Navedite oznako jekla in zahtevane lastnosti.  
Poiščite in uporabite spletno stran:  
<http://www.metalravne.com/kvalitete/orodna-in-hitrorezna-jekla.html>
21. Jeklenemu konstrukcijskemu sestavnemu delu z okroglim prerezom je potrebno povečati nosilnost. Navedite vaše možne rešitve.

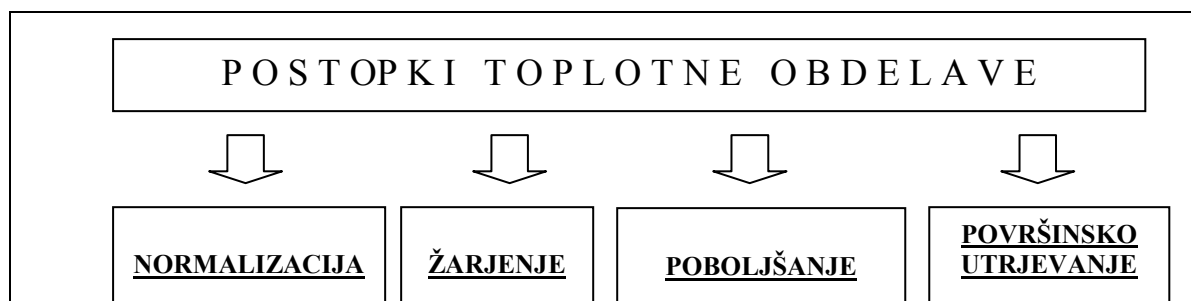


## 4 TOPLOTNA OBDELAVA

### Uvod v poglavje

Postopki toplotne obdelave nam omogočajo spremembo **mikrostrukture** in s tem spremembo mehanskih **lastnosti** celotnega izdelka ali samo površine oziroma posameznih delov površine. Zato konstruktorji različnih kovinskih izdelkov in orodij, kakor tudi tehnologi v proizvodnji, morajo poznati ustrezne postopke in pogoje toplotne obdelave za spremembo mehanskih in tehnoloških lastnosti izdelkov. Iz navedenih razlogov boste temeljna znanja o toplotni obdelavi uporabili in nadgrajevali tudi pri predmetu Tehnologija v 2. letniku.

Postopke toplotne obdelave razdelimo na: normalizacijo, žarjenje, poboljšanje in površinsko utrjevanje. Postopek poboljšanja jekla združuje postopek kaljenja in popuščanja. Za površinsko utrjevanje jeklenih izdelkov pa obstajata, glede na zahtevane uporabne lastnosti izdelka, predvsem dve osnovni metodi, in sicer: površinsko kaljenje in kemotermična obdelava površine.



Slika 30: Razdelitev postopkov toplotne obdelave

Vir: Lasten

*V tem poglavju boste spoznali in razumeli:*

- ✚ postopke toplotne obdelave jekel, ki se uporabljajo pri raziskovalnem delu in v tehnološki proizvodnji;
- ✚ razloge za uporabo teh postopkov z vidika izbranega materiala in uporabnih lastnosti izdelka.

### 4.1 NORMALIZACIJA

V primeru, ko se material npr. jekleni ulitki ali izkovki, ogreva v avstenitnem območju pri previsoki temperaturi ali predolgo časa, kristalno zrno naraste in govorimo o grobozrnatni mikrostrukturi. Odpravimo jo z **normalizacijo** ali z gnetenjem in rekristalizacijo v toplem stanju.

- ✚ **Normalizacija** je toplotna obdelava, pri kateri jeklo popolnoma prekrystalizira. Tak proces prekrystalizacije, ki ustvarja bolj drobno zrno in izboljša mehanske lastnosti, poteka, če jeklo kratek čas segrevamo v avstenitno področje pri temperaturi ( $T_N$ ) 30 do 50 °C, in sicer samo toliko, da jeklo prekrystalizira (5 do 10 min).

$$T_N = A_{c3} + (30 - 50) [^{\circ}\text{C}]$$

(15)



## 4.2 ŽARJENJE JEKLA

Žarjenje je postopek toplotne obdelave, pri katerem jeklo v peči ogrevamo, na določeni temperaturi, določen čas in ga nato običajno počasi ohlajamo. Namen žarjenja je, da bi dosegli v mikrostrukturi jekla določene spremembe in s tem tudi spremembe v mehanskih lastnostih.

Med postopke žarjenja uvrščamo: difuzijsko ali homogenizacijsko žarjenje, rekristalizacijsko, sferoidizacijsko ali žarjenje na mehko in žarjenje za odpravo notranjih napetosti.

*Difuzijsko ali homogenizacijsko žarjenje* je dolgotrajno žarjenje jekla na visokih temperaturah, in sicer 1000 °C do 1300 °C z namenom, da se z difuzijo atomov izenačijo pri litju nastale neenakomernosti v kemični sestavi jekla.

*Rekristalizacijsko žarjenje* je žarjenje hladno deformiranega jekla z namenom, da odpravimo sledove deformacijske utrditve oziroma jeklo usposobimo za nadaljnjo deformacijo v hladnem stanju. Na ta način jeklo doseže ustrezno mikrostrukturo in mehanske lastnosti.

Deformacija v hladnem stanju, na primer hladno valjanje pločevine, ima za posledico, da se mehanske lastnosti pločevine ali žice povečajo. Tako se na primer pri maloogljičnem jeklu z rastočo hladno deformacijo povečujejo trdnost, trdota, napetost tečenja, zmanjšujejo pa se raztezek in žilavost. Pravimo, da se jeklo s hladno deformacijo **utrdi**. V mikrostrukturi se hladna deformacija odraža na ta način, da se kristalna zrna razpotegnejo v smeri deformacije. Temperaturo rekristalizacije ( $T_R$ ) za tehnično čiste kovine lahko približno ocenimo iz enačbe:

$$T_R = 0,4 \cdot T_L \text{ [K]}, \quad (16)$$

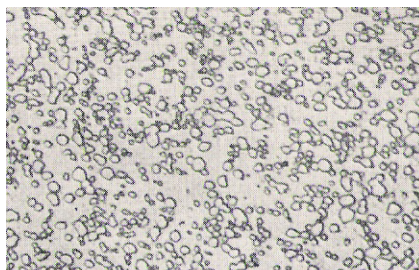
kjer je  $T_L$  temperatura tališča v K.

*Sferoidizacijsko žarjenje* imenujemo žarjenje jekla pri temperaturi tik pod temperaturo  $A_{c1}$ , večurno zadrževanje pri tej temperaturi, ki mu sledi zelo počasno ohlajanje. Temperaturo sferoidizacijskega žarjenja *podvektoidnega* jekla lahko ocenimo s pomočjo enačbe.

$$T_{SF} = A_{c1} - 10 \text{ °C} \quad (17)$$

*Evtektoidno* jeklo sferoidizacijsko žarimo tik nad temperaturo  $A_{c1}$  in nato temperaturo počasi znižamo, medtem ko *nadevtektoidna in legirana* jekla žarimo tik nad temperaturo premene  $A_{c1}$ , nato temperaturo počasi znižamo in ponovno, večkrat (dva do štirikrat) zvišamo.

$$T_{SF} = A_{c1} \pm 10 \text{ °C} \quad (18)$$



Slika 3: Mikrostruktura evtaktoidnega jekla po sferoidizacijskem žarjenju

Vir: Metallographie, 1958, 365

Sferoidizacijsko žarjenje spremeni mikrostrukturo jekla tako, da nastane iz lamelarne perlitne mikrostrukture zrnati perlit t. j. zrnca cementita v feritu. S tem se znižata trdota in trdnost jekla, ki ga nato lažje preoblikujemo v hladnem, nadevtektoidnemu in evtaktoidnemu jeklu pa poboljšamo tudi obdelovalnost z odrezavanjem.

Napetosti v jeklu in jeklenih izdelkih nastajajo iz več vzrokov. Odpravimo jih z *žarjenjem za odpravo notranjih napetosti*. Na primer zaradi grobe mehanske obdelave ali pa pri varjenju nastanejo notranje napetosti zaradi neenakomernega segrevanja in še posebno zaradi krčenja zvara pri ohlajanju, kar lahko povzroči občutne deformacije ali lom izdelka pri uporabi. Za odpravo notranjih napetosti žarimo jeklo v temperaturnem območju 450 °C do 650 °C (npr. 4 ure) in nato počasi ohlajamo, da se izognemo ponovnemu pojavu temperaturnih napetosti.

### 4.3 KALJENJE IN POPUŠČANJE JEKLA

#### 4.3.1 Kaljenje

Kaljenje jekla imenujemo postopek toplotne obdelave, pri katerem jeklo ogrevamo do kalilne temperature (temperatura avstenitizacije), zadržimo določen čas in nato ohladimo s hitrostjo, ki je enaka ali večja zgornji kritični ohlajevalni hitrosti (v vodi ali olju) z namenom, da dobi **martenzitno** mikrostrukturo. Kalilna temperatura je odvisna od kemične sestave jekla. Za podvektoidna ogljikova jekla znaša kalilna temperatura 20 do 40 °C nad temperaturo premene  $A_{c3}$  (19), za evtektoidna in nadevtektoidna pa 50 do 70 °C nad temperaturo premene  $A_{c1}$  (20).

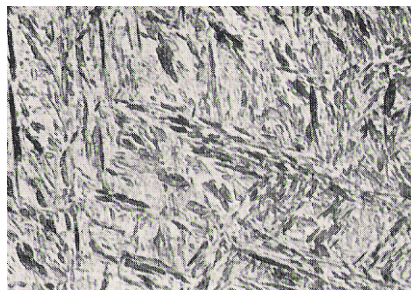
$$T_K = A_{c3} + (20 \dots 40 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (19)$$

$$T_K = A_{c1} + (50 \dots 70 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (20)$$

Pri ohlajanju jekla s hitrostjo, ki je enaka ali večja zgornji kritični ohlajevalni hitrosti, popolnoma izostane perlitna premena in se ves avstenit premeni v martenzit. Na temperaturni interval, v katerem se oblikuje martenzit, vpliva kemična sestava jekla, najbolj pa koncentracija ogljika v avstenitu.

Pri hitrem ohlajanju jekla iz avstenitnega področja se ploskovno centrirana kubična mreža avstenita sicer premeni v prostorsko centrirano kubično mrežo alfa, vendar v njej ostanejo ogljikovi atomi prisilno raztopljeni, zato kristalno mrežo deformirajo v tetragonalno prostorsko centrirano kristalno mrežo martenzita. Posledica tega so velike notranje napetosti in martenzitna mikrostruktura. Na sliki 32 je prikazana mikrostruktura jekla C45, po kaljenju v vodi.

- ✚ Kalilno sredstvo izberemo glede na vrsto jekla in glede na zahtevano mikrostrukturo in trdoto po kaljenju. Če kalimo jeklo na martenzit, ga moramo ohlajevati s hitrostjo, ki je večja kot zgornja kritična ohlajevalna hitrost za to jeklo. Ta hitrost pa je odvisna od količine ogljika in legirnih elementov v jeklu in od temperature kaljenja.



Slika 32: Mikrostruktura jekla C45: tetragonalni martenzit  
Vir: Metallographie, 1958, 398

Naslednji kriterij, ki ga moramo upoštevati pri izbiri kalilnega sredstva, je, da je hitrost ohlajanja pri kaljenju odvisna od specifične toplote in toplotne prevodnosti jekla, hladilne

sposobnosti kalilnega sredstva, od velikosti in oblike predmeta oziroma izdelka ter stanja površine. Kalilna sredstva, ki jih izbiramo za kaljenje jekla, so:

- + voda in vodne raztopine,
- + olja,
- + zrak,
- + solne in kovinske kopeli.

### **POMNI**

***Kaljivost je lastnost jekla, da pri kaljenju doseže martenzitno mikrostrukturo. Merili kaljivosti jekla sta:***

- + ***največja trdota, ki jo doseže jeklo pri kaljenju in***
- + ***kalilna globina, ki jo doseže jeklo pri določenem preseku in ustreznih ohlajevalnih razmerah.***

Največja trdota, ki jo doseže jeklo pri kaljenju na martenzit, je skoraj izključno odvisna od koncentracije ogljika, ki se je na kalilni temperaturi raztopil v avstenitu. Od hitrosti ohlajanja je odvisna tudi debelina martenzitne plasti na prerezu.

*Prekaljivost* je sposobnost jekla, da se lahko kali v globino. Merilo prekaljivosti je globina prekaljivosti, to je razdalja od površine do tistega mesta, do katerega je v mikrostrukturi 50 % martenzita. Legirni elementi, kot so Mn, Mo, Cr, Si in Ni, povečajo **prekaljivost** jekla. Za oceno kaljivosti in prekaljivosti jekla imamo več postopkov, vendar sta najbolj uveljavljena dva preizkusa, in sicer po Grossmannu in po Jominyju.

### **4.3.2 Popuščanje kaljenega jekla**

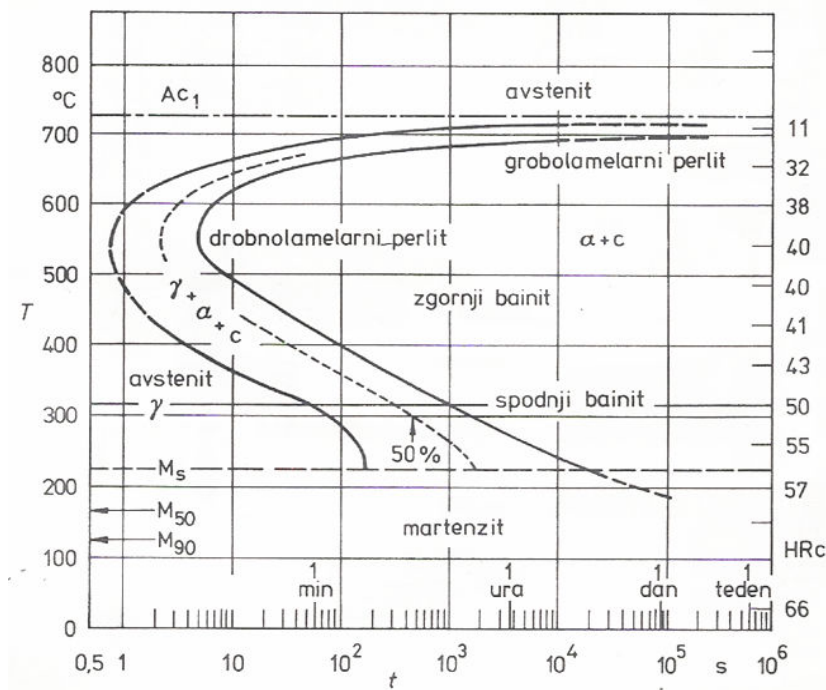
Kaljena jekla so krhka, zato jih po kaljenju popuščamo. Popuščanje jekla je ponovno segrevanje kaljenega jekla na temperaturo pod temperaturo  $A_{c1}$ , z ohlajanjem na zraku z namenom, da dobi jeklo tudi zadostno žilavost in sposobnost prenašanja dinamične obremenitve. Temperatura popuščanja je zato kompromis med zmanjšano trdoto, trdnostjo in povečano žilavostjo jekla. Proces popuščanja lahko razdelimo glede na temperaturo, do katere kaljeno jeklo segrevamo v več značilnih stopenj, ki se medsebojno ločijo po *temperaturi popuščanja, mikrostrukturi in mehanskih lastnostih*. Pri nekaterih vrstah jekla mora ohlajanje po popuščanju skozi temperaturno območje 600 do 300 °C potekati dovolj hitro (v vodi ali olju), da preprečimo nastanek popustne krhkosti. Proces toplotne obdelave, ki je sestavljen iz dveh postopkov, in sicer: *kaljenja*, ki mu nato takoj sledi ponovno segrevanje – *popuščanje*, imenujemo tudi *poboljšanje* jekla.

### **4.4 KINETIKA AVSTENITNE TRANSFORMACIJE**

Na transformacijo avstenita vplivajo temperature transformacije in vrsta oziroma kemična sestava jekla. Vpliv temperature transformacije avstenita pri konstantnih temperaturah prikazuje izotermni diagram TTT (Time – Temperature – Transformation). Slika 33 prikazuje diagram TTT za jeklo evtektoidne sestave. Iz diagrama lahko za jeklo določene kemične sestave odčitamo,

## Materiali

glede na zahtevano mikrostrukturo in trdoto jekla oziroma izdelka, ustrezen čas in temperaturo avstenitne transformacije. Začetek razpada avstenita predstavlja leva vrisana krivulja, konec razpada avstenita pa desna vrisana krivulja. Levo od tega področja je avstenit obstojen le omejeni čas.



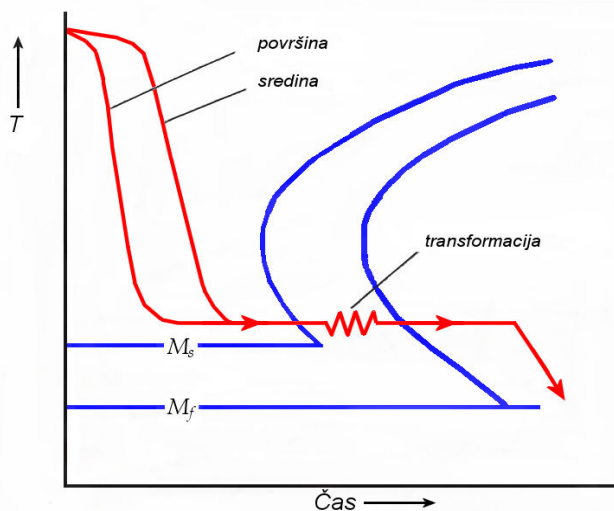
Slika 33: Diagram izotermne transformacije avstenita za jeklo evtektoidne sestave

Vir: Prirejeno po: Krautov strojniški priročnik, 2007, 393

Pri perlitni stopnji dobimo kot rezultat izotermne avstenitne transformacije perlitno mikrostrukturo, ki je glede na temperaturo transformacije grobo ali drobno lamelarni.

Pri izotermni transformaciji avstenita v bainit se krivulji začetne in končne premene avstenita obrneta v desno, to pomeni, da se avstenit začne transformirati tem kasneje, čim večja je stopnja podhladitve. Vodoravna črta (M<sub>s</sub>), ki je običajno vrisana na spodnji strani diagrama, praviloma ne sodi v diagram TTT, pomeni pa začetek premene avstenita v martenzit.

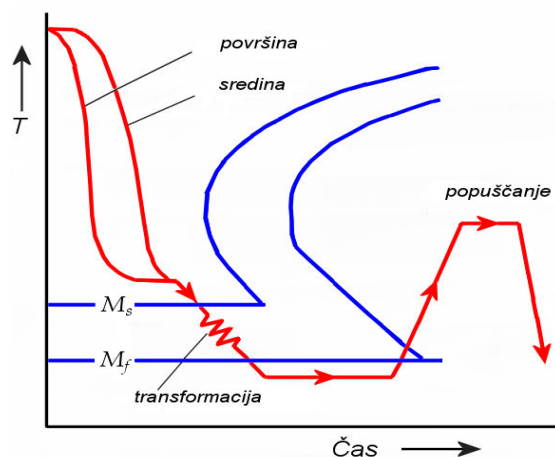
Na izotermni transformaciji avstenita temeljijo postopki toplotne obdelave *konstrukcijskih jekel* npr. bainitno poboljšanje ali austempering (slika 34) in breznapetostno kaljenje ali martempering (slika 35). Na sliki 34 je shematsko prikazan potek toplotne obdelave pri bainitnem poboljšanju jekla. Iz temperature avstenitizacije ohladimo izdelek na temperaturo bainitne transformacije npr. v solni kopeli, nato pa ga ohladimo do temperature okolice.



Slika 34: Bainitno poboljšanje (austempering)

Vir: Prirejeno po: Llewellyn, 1992, 13

Breznapetostno kaljenje (slika 35) je postopek, pri katerem jeklo ohladimo iz temperature avstenitizacije v solni kopeli malo nad točko  $M_s$ . V kopeli ga zadržimo toliko časa, da se temperatura izenači po vsem prerezu izdelka, nakar sledi ohlajanje do temperature okolice. Na ta način preprečimo razpoke in deformacije izdelkov.



Slika 35: Breznapetostno kaljenje (martempering)

Vir: Prirejeno po: Llewellyn, 1992, 13

Izotermni diagrami TTT zelo nazorno prikazujejo kinetiko avstenitne transformacije, ki pa jo lahko opazujemo tudi pri zveznem oziroma kontinuirnem ohlajanju jekla z večjo ali manjšo ohlajevalno hitrostjo. Kontinuirni diagrami CCT (Continuous – Cooling – Transformation) so podobno kot diagrami TTT pomembni za vse, ki se ukvarjajo s toplotno obdelavo jekel.



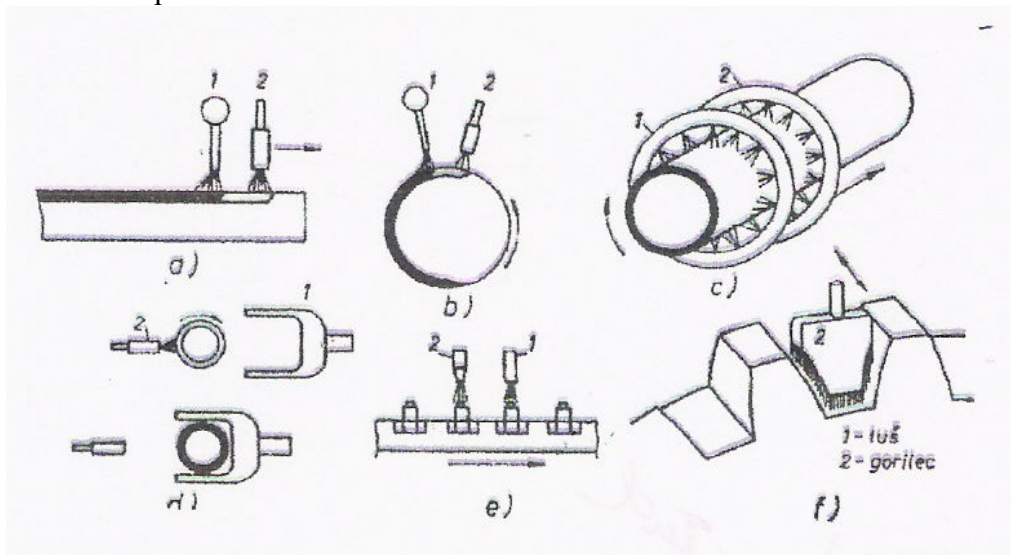
## 4.5 POVRŠINSKO UTRJEVANJE JEKLA

### 4.5.1 Površinsko kaljenje

Površinsko kaljenje jekla je omejeno samo na površino oziroma samo na določena mesta na površini izdelka. Površina se mora ogreti na temperature avstenitizacije hitreje, kot pa se toplota širi v notranjost oziroma proti jedru izdelka. Hitremu ogretju površine takoj sledi kaljenje s kalilnim medijem ali samozakaljenje. Jeklo je zakaljeno do globine, do katere je bila temperatura zadostna za avstenitizacijo.

Za površinsko kaljenje so primerna jekla, ki so kaljiva v vodi in vsebujejo 0,3 % do 0,6 % ogljika ter so slabo prekaljiva. Glede na kemično sestavo so lahko nelegirana ali legirana jekla. Glede na uporabo uvrščamo ta jekla med konstrukcijska jekla za poboljšanje, ki po poboljšanju zagotavljajo izdelku zahtevano trdnost jedra in po površinskem kaljenju tudi ustrezno trdoto površine, izboljšano obrabno odpornost in trajno dinamično trdnost.

**Pri plamenskem kaljenju** površino izdelka ogrejemo s plamenom plinskega gorilnika (slika 36 a–f). Ogrevanju sledi kaljenje z vodno prho. Debelina zakaljenega sloja je odvisna od hitrosti pomika gorilnika in temperature plamena. Če se med procesom segrevanja in ohlajanja lahko cev za dovod plamena in cev za dovod vode gibljeta skupaj, govorimo o neprekinjenem kaljenju. Pri prekinjenem kaljenju pa se površinski del najprej ogreje in šele nato hladi z vodno prho.

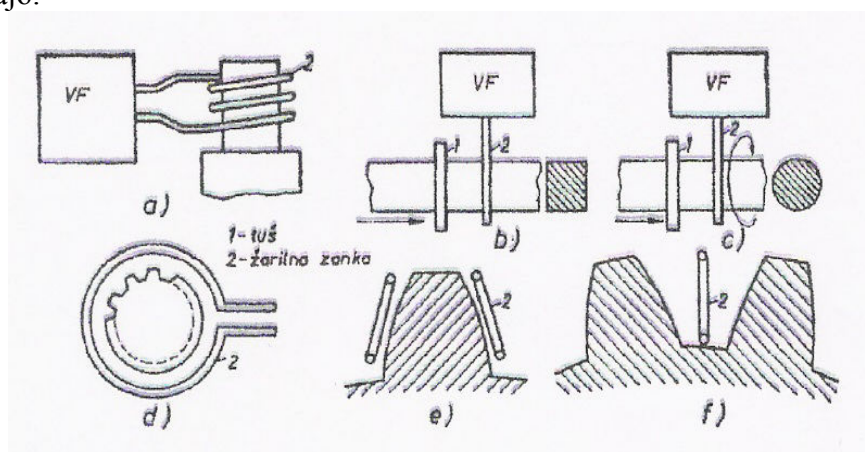


Slika 36: Primeri plamenskega površinskega kaljenja

Vir: Metalurški priročnik, 1972, 772

**Induktivno kaljenje** je postopek površinskega kaljenja, pri katerem segrevamo površinski sloj jekla oziroma izdelka s tokom velikih frekvenc nad temperaturo premene  $A_{c3}$ , nato pa običajno z vodno prho hitro ohladimo. Osnovna značilnost induktivnega segrevanja v primerjavi z drugimi postopki je ta, da toplota nastaja neposredno v samem izdelku. Izdelek oziroma samo določen del izdelka vstavimo v žarilno zanko, ki jo napaja srednje ali visokofrekvenčni izmenični tok, kot je

prikazano na sliki 37 a–f. V površinskem sloju izdelka se pojavijo vrtnični tokovi (skin efekt), ki ga segrevajo.



Slika 37: Primeri induktivnega površinskega kaljenja  
Vir: Metalurški priročnik, 1972, 775

Globina kaljenja je odvisna od frekvence izmeničnega toka (0,5 do 30 MHz). Čim višja je frekvenca, tem tanjši je ogreti sloj. Na globino kaljenja vpliva tudi toplotna prevodnost jekla in hitrost ter čas ogrevanja. Postopek je izredno hiter, avtomatiziran in zelo primeren za velike serije kakovostnih izdelkov.

Na spletni strani: [www.st-ravne.si/toplotna-obdelava/indukcijsko-kaljenje-valjev.aspx](http://www.st-ravne.si/toplotna-obdelava/indukcijsko-kaljenje-valjev.aspx) in <http://www.inel.si/> (18. 08. 2010), si lahko ogledate primere površinskega kaljenja v industrijskih razmerah.

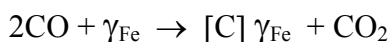
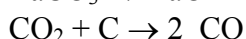
#### 4.5.2 Kemotermična obdelava površin

**Cementacija** je postopek toplotnokemične obdelave površin, ki jo uporabljamo za zobnike, gredi, čepe, osi ipd. Postopek sestoji iz dveh delov, in sicer iz:

- ✚ naogljichenja in
- ✚ toplotne obdelave.

Površino različnih strojnih delov utrdimo na ta način, da jo najprej naogljichimo v trdnem, tekočem ali plinastem cementacijskem sredstvu. Zaradi ogljika, ki ga sprošča cementacijsko sredstvo, se na površini in v podpovršinskem sloju delež ogljika poveča (0,7 do 0,8 % C).

Najbolj poznano trdno cementacijsko sredstvo je lesno oglje, pomešano z barijevim karbonatom ( $\text{BaCO}_3$ ) v razmerju 60 : 40 do 90 : 10 (10 do 40 m. %  $\text{BaCO}_3$ ). Zaradi visokih temperatur barijev karbonat razpade v barijev oksid in ogljikov dioksid  $\text{CO}_2$ . Nastali  $\text{CO}_2$  se z žarečim ogljikom lesnega oglja reducira v ogljikov monoksid  $\text{CO}$ , preko katerega poteka naogljichenje jekla. Pri tem potekajo naslednje reakcije:



(21)

Temperatura cementacije je odvisna predvsem od izbire sredstva, v katerem cementiramo. V trdnih cementacijskih sredstvih ogljichimo pri temperaturi med 850 in 930 °C, v solnih kopelih pa okoli 50 °C nižje. Čas naogljichenja je odvisen od vrste jekla, cementacijskega sredstva in od zelene debeline cementacijske plasti. Globino naogljichenega površinskega sloja uravnava temperatura in čas ogljichenja (slika 38).



## Materiali

Po končanem naogljčenju površine in površinskega sloja sledi, glede na zahtevane mehanske lastnosti izdelka, neposredno, enojno ali dvojno kaljenje.



Slika 38: Različne globine cementacije

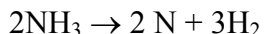
Vir: <http://www.steel.si/Steel-vstopSlo.html> (31. 05. 2010)

**Nitridiranje** je kemotermična obdelava površin in je poleg cementacije najbolj razširjen postopek za površinsko utrjevanje. Uporablja se za izboljšanje proti obrabnih in drsnih lastnosti površin (zmanjša se koeficient trenja), trajne dinamične trdnosti in korozijske odpornosti nekaterih strojnih delov, izdelkov ter orodij.

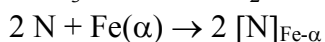
Postopek temelji na obogatitvi površine z dušikom, pri čemer nastane na površini tanka plast **nitridov** in **difuzijska cona** (plast), ki je trdna raztopina dušika v Fe- $\alpha$ . Ta cona je močno utrjena, ker je dušik eden najbolj učinkovitih utrjevalcev železa.

V primerjavi z ogljčenjem poteka nitridiranje pri relativno nizkih temperaturah, v območju od 550 do 600 °C. Ker ne zahteva dodatne toplotne obdelave, lahko nitridiramo že obdelane in dokončno brušene izdelke oziroma sestavne dele.

Obdelovance segrevamo počasi v toku amonijaka (NH<sub>3</sub>), ki je nosilec dušika na temperaturo 550 °C, kjer amonijak (NH<sub>3</sub>) razpade. Posledica razpada je tvorba atomskega dušika, ki difundira v feritno osnovo.



(22)



Nitridiranje je dolgotrajni postopek in traja več dni (20 do 100 ur), pri tem pa dosežemo le nekaj desetink milimetra debele nitridirane plasti. Po končanem nitridiranju se izdelki v toku amonijaka počasi ohlajajo na sobno temperaturo.

Postopek nitridiranja lahko pospešimo, če uporabimo dvojno nitridiranje ali ionsko nitridiranje, kjer površino izdelka izpostavimo ionizirani atmosferi oziroma atomom dušika v plazmi.

**Karbonitriranje** je kombinacija naogljčenja (carbon = ogljik) in nitridiranja. Površina izdelka se obogati z ogljikom in dušikom, ki difundirata iz karbonitrnega sredstva na površino jeklenega izdelka. Poteka pri temperaturi med 670 in 870 °C in ga izvajamo v solnih kopelih ali v pečeh s plinsko mešanico, ki vsebuje ogljik (C) in dušik (N). Sestavi plina, ki je običajna za plinsko cementiranje, je dodano še 10 % do 30 % amoniaka NH<sub>3</sub>.

## 4.6 NAPAKE PRI TOPLOTNI OBDELAVI

Napake toplotne obdelave, ki so posledica neustrezno izbranih tehnoloških pogojev obdelave ali neupoštevanje le-teh, so naslednje:

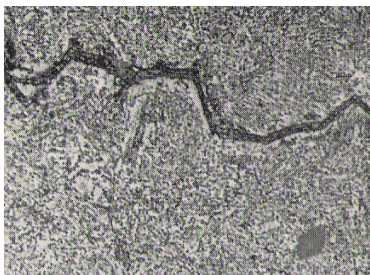
- ✚ pregretje jekla in groba kristalna zrna,
- ✚ razogljichenje površine,
- ✚ prenizka trdota po kaljenju in
- ✚ kalilne razpoke.

**Pregretje jekla in groba kristalna zrna** so posledica dolgotrajnega segrevanja ali previsoke temperature v peči. Pregreto jeklo z grobimi kristalnimi zrna bo manj žilavo, verjetnost nastanka kalilnih razpok po kaljenju pa bo večja.

**Razogljichenje površine** je zmanjšanje količine ogljika tik pod površino jekla. Pri višjih temperaturah (posebno med temperaturo premene  $A_1$  in  $A_3$ ) se ogljik na površini oksidira v ogljikov monoksid ali dioksid, iz notranjosti pa nepretrgoma difundirajo proti površini nove količine ogljika. V nevtralni atmosferi razogljichenja seveda ni.

Vzroki **preнизke trdote** po kaljenju jekla so naslednji:

- ✚ nepravilna ohlajevalna hitrost oziroma neustrezno izbrano kalilno sredstvo,
- ✚ prenizka kalilna temperatura,
- ✚ previsoka kalilna temperatura,
- ✚ prekratek čas segrevanja jekla,
- ✚ razogljichenje, zaostali avstenit.



Slika 39: Interkristalni potek kalilne razpoke pri orodnem jeklu (500 : 1)

Vir: Metallographie, 1958, 385

**Kalilne razpoke** lahko nastanejo zaradi:

- ✚ nepravilne toplotne obdelave, kot so previsoka kalilna temperatura, prehitro ogretje na kalilno temperaturo (legirana jekla imajo manjšo toplotno prevodnost), neenakomerno segrevanja na kalilno temperaturo, prehitro ohlajanje,
- ✚ neprimerne oblike izdelkov, kot so ostri prehodi in velike razlike v presekih.

### Povzetek

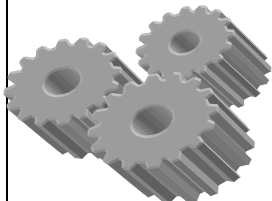
Postopki toplotne obdelave (normalizacija, žarjenje, kaljenje in popuščanje, poboljšanje) nam omogočajo spremembo *mikrostrukture* in s tem spremembo *mehanskih lastnosti* celotnega izdelka ali samo površine oziroma posameznih delov površine. Zato morajo konstruktorji različnih kovinskih izdelkov kakor tudi tehnologi v proizvodnji poznati vse možnosti spreminjanja mehanskih in tehnoloških lastnosti.

Postopki površinskega utrjevanja jekla so postopki površinskega kaljenja in kemotermične obdelave površine. Namen utrjevanja je povečanje trdote na površini in v površinskem sloju.

## Materiali

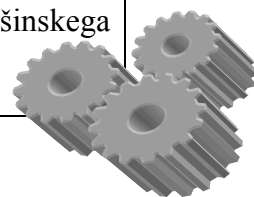
Površinsko utrjujemo predvsem vse tiste izdelke oziroma strojne dele in elemente (osi, gredi, zobniki), kjer je površina obremenjena na obrabo, morajo pa imeti veliko trajno dinamično trdnost.

*Na tem mestu moram omeniti, da tehnološka proizvodnja zahteva ustrezno izbiro postopkov toplotne obdelave in površinskega utrjevanja, vključno z novejšimi postopki, npr. lasersko kaljenje, kaljenje z elektronskim snopom, ogljičenje in nitridiranje v plazmi. Tehnologijo in uporabo omenjenih postopkov boste obravnavali v drugem letniku pri predmetu Tehnologija.*



### Vprašanja za preverjanje razumevanja

1. Pri kaljenju v vodi so se na izdelku pojavile razpoke. Navedite možne vzroke.
2. Po opravljeni toplotni obdelavi izdelek nima ustreznih lastnosti – navedite možne vzroke in predlagajte potek in metodo preizkušanja, s katero bi potrdili »glavnega krivca«.
3. Katere spremembe mikrostrukture in s tem lastnosti dosežemo z normalizacijo jekla? Navedite pogoje toplotne obdelave in opišite potek.
4. Narišite in pojasnite diagram napetost – raztezek za: sivo litino, kaljeno jeklo, poboljšano jeklo in sferoidizacijsko žarjeno jeklo C55.
5. Narišite, primerjajte in pojasnite mikrostrukturo padevtektoidnega in nadevtektoidnega jekla pred sferoidizacijskim žarjenjem in po žarjenju.
6. V katerih primerih tehnološke prakse moramo izdelke sferoidizacijsko žariti?
7. Izdelek mora imeti trdoto 64 HRc. Predlagajte postopek. Potek in opis toplotne obdelave prikažite v diagramu temperatura (T) – čas (t).
8. Navedite jekla in oznake jekel po SIST EN, ki so primerna za površinsko utrjevanje.
9. Utemeljite, zakaj je po cementiranju potrebno še neposredno, enojno ali dvojno kaljenje.
10. V diagramu T – t narišite in pojasnite potek kaljenja in popuščanja jekla C45.
11. V diagramu T – t narišite in komentirajte potek in pogoje sferoidizacijskega žarjenja jekla C105.
12. Za izdelek iz jekla C45 predpišite pogoje za postopek toplotne obdelave normalizacije in kaljenja. Primerjajte potek obeh postopkov.
13. S katerim postopkom žarjenja lahko bistveno izboljšamo mehanske lastnosti grobo zrnatega jeklenega ulitka?
14. Pojasnite, zakaj se pri žarjenju za odpravo notranjih napetosti ne spremeni mikrostruktura jekla.
15. V katerih primerih tehnološke prakse uporabimo postopek rekristalizacijskega žarjenja in zakaj? Navedite pogoje žarjenja.
16. V diagramu T – t prikažite, opišite in pojasnite postopek poboljšanja jekla.
17. Katera jekla so primerna za poboljšanje in zakaj?
18. Kdaj in zakaj je potrebno površinsko utrjevanje jekla?
19. Narišite in označite diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C in za jekli C35 in C100 ocenite temperaturo normalizacije, kaljenja in sferoidizacijskega žarjenja. Potek toplotne obdelave prikažite v diagramu T – t.
20. Za dinamično obremenjeni strojni del (npr. zobnik) izberite postopek površinskega utrjevanja.  
Izbrani postopek pojasnite in ga primerjajte z ostalimi možnimi postopki.



## 5 METALURGIJA PRAHOV

### Uvod v poglavje

Različne izdelke in manjše konstrukcijske elemente lahko oblikujemo tudi iz prahu oziroma drobnih zrn, velikosti 0,5 do 300  $\mu\text{m}$ , po postopku metalurgije prahov (Powder metallurgy).

Metalurgija prahov vključuje:

- ✚ izdelavo prahov,
- ✚ karakteriziranje prahov,
- ✚ pripravo prahov za stiskanje (konsolidacija),
- ✚ stiskanje,
- ✚ sintranje ter
- ✚ sekundarne postopke.

Osnovne skupine materialov oziroma izdelkov, ki jih izdelujemo s postopkom metalurgije prahov, imajo prav posebne lastnosti in jih razdelimo v sedem glavnih skupin.

1. Kovine in zlitine z visokim tališčem (W, Mo, Ta, Nb, Pt).
2. Izdelki iz zlitin, ki jih zaradi medsebojne netopnosti v tekočem stanju ni možno izdelati, na primer baker-grafit, ali pa s postopki sintranja dosežemo večjo homogenost in s tem boljše lastnosti (kvalitetna orodna in hitrorezna jekla, izdelki iz aluminijevih zlitin).
3. Cermeti (cermeti  $\rightarrow$  »ceramic« $+$  »metal«) in sintrane karbidne trdine. Cermeti so sestavljeni iz ene ali več keramičnih faz (od 15 % do 85 %) in kovinske faze, ki je lahko čista kovina ali zlitina. Karbidne trdine so kombinacija kovinskih karbidov (TiC, WC, TaC) s kovino (Co ali Ni) kot vezivo.
4. Porozni izdelki, kot so katalizatorji, samomazalni ležaji (s poroznostjo 30 % do 60 %) iz železa in grafita, ležaji iz bakra, grafita in kositra ter različni filtri za filtriranje tekočin in plinov, dušenje plamena in zvoka, za prezračevanje tekočin ipd. Filtri so izdelani iz prahu bronov, zlitine niklja z bakrom in nerjavnih jekel. Pore v filtrih so velike od 2  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$ .
5. Obrabno in temperaturno obstojni konstrukcijski elementi, ki morajo imeti zelo majhen (0,004 do 0,008) ali pa velik koeficient drsnega trenja v kombinaciji z jeklom v oljni kopeli ( $\eta = 0,1$  do 0,15). Izdelani so na osnovi železa ali bakra in komponent, ki povečajo koeficient trenja (kremenčev prah) oziroma so sposobne mazati na suho na primer, grafit, sulfidi, barit, svinec. Osnova teh materialov sta železo ali baker z dodatki grafita in z ustreznim deležem drobnih luknjic od 15 % do 20 % prostornine, zapoljenih z mazivom (samomazalni ležaji).
6. Posebne zlitine, ki se uporabljajo za komponente v elektrotehniki npr. mehki in trdi sintrani magneti in električni kontakti (Cu – grafit) ipd.
7. Konstrukcijski deli, ki imajo maso manjšo od 1 kg, kot so razne prirobnice, sklopke, zatiči, različni sestavni deli za finomehaniko, ki bi jih drugače težko izdelali in obdelali (Strojnotehnoški priročnik, 1998, 114).

*V tem poglavju boste spoznali in razumeli:*

- ✚ posamezne izdelovalne faze tehnologije prahov,
- ✚ kateri materiali in izdelki so primerni za tehnologijo prahov in zakaj,
- ✚ kateri kriteriji so pomembni pri izbiri tehnologije prahov in
- ✚ lastnosti sintranih izdelkov.

## 5.1 PRIPRAVA PRAHOV

Namen **priprave prahu** pred stiskanjem je, da sestavimo tako mešanico prahu, ki bo sintranemu izdelku zagotovila zahtevane mehanske in fizikalno-kemične lastnosti.

Metode določevanja lastnosti prahov so predpisane in opisane v standardih npr.: **MPIF** (Metal Powder, Industries Federation, Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products).

Priprava prahov vključuje:

- ✚ kemično analizo prahu,
- ✚ klasifikacijo prahu (določevanje oblike in velikosti prašnih delcev),
- ✚ merjenje nasipne gostote,
- ✚ merjenje pretoka prahu in
- ✚ merjenje stisljivosti prahu.

**Oblika in velikost** prašnih delcev vplivata na obnašanje prahu med izdelavo izdelka in na končne lastnosti izdelka. Prašni delci so lahko okrogle, igličaste ali gobaste oblike, kar je seveda odvisno od pogojev izdelave prahu.

**Nasipna gostota ( $\text{g/cm}^3$ )** je zelo pomembna tehnološka lastnost in vpliva na višino stiskalnega orodja. Nasipna gostota mora biti zaradi volumetričnega doziranja prahov v orodje, pri isti vrsti prahov čimbolj enakomerna.

**Pretok** prahu podaja sposobnost, da hitro in enakomerno zapolni orodje, ki ima obliko bodočega izdelka. To tehnološko lastnost izražamo v sekundah, v katerih steče 50 g prahu skozi normirano - standardizirano šobo. Postopek določevanja nasipne gostote in pretoka prahu mora potekati v skladu s standardi.

**Stisljivost** prahu pomeni zmožnost prahu ali mešance prahu z dodatki za oblikovanje pod tlakom v stiskanec z določeno gostoto. Dosežena gostota vpliva na trdnostne lastnosti in na kvaliteto sintranega izdelka.

Poleg določevanja kemičnih in tehnoloških lastnosti obsega priprava prahu tudi:

- ✚ *pripravo mešanice*, saj ja kvaliteta končnega izdelka odvisna tudi od tega, kako so različni prahovi in dodatki za zmanjševanje trenja med zrni medsebojno pomešani in
- ✚ *toplotno obdelavo* prahu. To pomeni, da prah ali mešanico segrevamo običajno v redukcijski atmosferi zaradi odprave površinskega oksida pri temperaturi 400 do 1000 °C. Pri tem odpravimo tudi vlago in notranje napetosti, ki spremljajo prah zaradi mehanskih deformacij zrcn pri procesu pridobivanja prahu.

## 5.2 OBLIKOVANJE IZDELKOV IZ PRAHU

Eden izmen pomembnih načinov oblikovanja izdelkov iz prahu je stiskanje v maticah. Pripravljeni mešanico prahu in dodatkov nasujemo v matrico, ki ima obliko bodočega izdelka. Tlak stiskanja (100 do 200 MPa) mora ustrezati vrsti prahu, načinu stiskanja, velikosti zrn in zahtevani gostoti oziroma lastnostim izdelka.

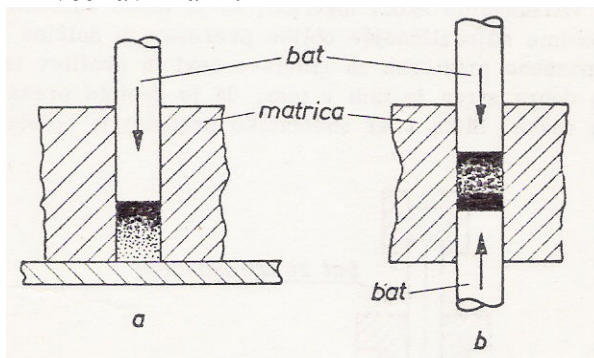
Pri stiskanju mora bat opraviti določeno pot, ki je podana z višino nasutega prahu  $H$  in višino stisnjenca  $h$ . Razmerje med višino nasutega prahu (**H**) in višino stiskanca (**h**) imenujemo **stiskalno razmerje** in je zelo pomemben tehnološki parameter. Njegova vrednost (**2,2 do 2,7**) določa višino orodja oziroma višino izdelka, ki ga še lahko izdelamo v stiskalnici s polnilno višino orodja ( $H$ ). Pri tem je pomembna tudi velikost stiskanca, ker razmerje med premerom in višino stiskanca naj ne bi bilo večje kot **1 : 3**.

Med drugimi delovnimi pogoji, ki vplivajo na gostoto stiskanca, moramo omeniti trenje med zrcni prahu in stenami matrice – orodja. Trenje je seveda odvisno tudi od kakovosti prahu, ki ga stiskamo in od kvalitete orodja. Zmanjšamo ga na ta način, da prahu dodamo ustrezno

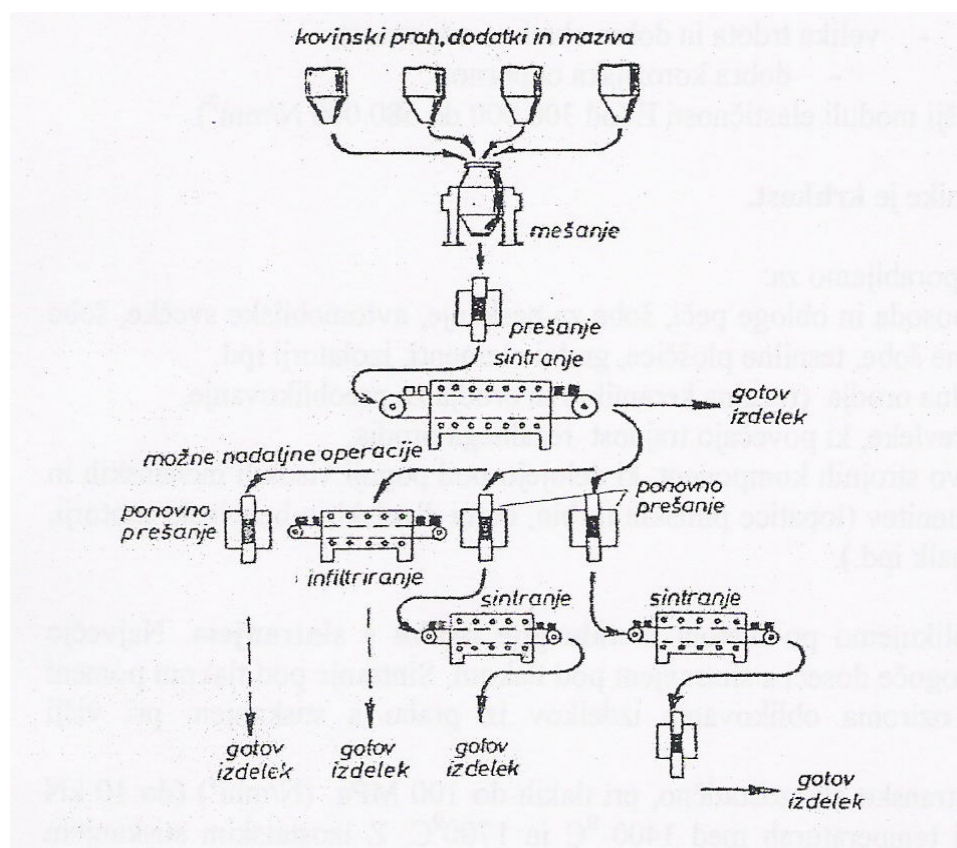


mazivo. Poleg tega se z oddaljenostjo od delovnega bata, sila stiskanja zelo hitro zmanjšuje, kar lahko povzroči neenakomerno gostoto stiskanca, ki jo imenujemo tudi *zelena gostota*. Te neenakomernosti imajo škodljive posledice na krčenje pri sintranju in s tem povezano deformacijo izdelka ter nastanek razpok.

Da dosežemo čimbolj enakomerno gostoto izdelka, mora biti vrednost **stiskalnega razmerja** enaka v vseh fazah stiskanja in za vse preseke, tudi pri bolj zapletenih oblikah izdelkov. S tem dosežemo čimbolj enakomerno gostoto, kar pa zahteva poleg **dvostranskega stiskanja** tudi delitev batov pri izdelkih z več ravninami.



Slika 40: Enostransko (a) in dvostransko (b) stiskanje  
Vir: Gradiva I, 1978, 105



Slika 41: Različne možnosti izdelave izdelka iz prahov  
Vir: Gradiva I, 1978, 111

Poroznost že stiskanega izdelka lahko zmanjšamo na dopustno mejo s ponovnim stiskanjem z večjimi tlaki (do 60 %). Na ta način se lahko zmanjšajo tudi tolerance izdelka do 0,01 mm.

Stiskanju sledi **sintranje** izdelka. Temperatura sintranja je nižja od temperature tališča osnovnih sestavin prahu ( $2/3 T_{\text{tališča}}$ ) npr. za Fe 1100 °C, bron 760 °C do 860 °C itd. Sintranje poteka v električnih pečeh, kjer je zaščitna atmosfera, npr. vodik, dušik, argon ali helij.

## Materiali

Čas sintranja je odvisen od velikosti izdelka in vrste prahu ter znaša 20 do 60 minut.

Poleg sintranja v trdnem stanju, se pogosto uporablja tudi sintranje s tekočo fazo. To pomeni, da sintranje poteka pri temperaturi, pri kateri je ena ali več komponent, ki sestavljajo stiskanec, že staljena.

Postopek stiskanja, sintranja in ponovno stiskanje (kalibriranje) lahko po potrebi ponavljamo in kombiniramo. To nam omogoča izdelavo sintranih izdelkov s širokim spektrom trdnostnih lastnosti in toleranc, kar lahko uporabimo pri številnih tehničnih rešitvah.

Pri tem moramo omeniti, da za visoko kakovostne izdelke lahko izbiramo med različnimi postopki sintranja, npr. hladno izostatsko stiskanje (Cold Isostatic Pressing) ali vroče izostatsko stiskanje (Hot Isostatic Pressing). Pri slednjem poteka pri temperaturi stiskanja tudi sintranje. Kot primerna tehnologija za izdelavo velikih serij majhnih kakovostnih izdelkov, zelo zapletenih oblik se uveljavlja postopek brizganja prašnatih delcev, medtem ko se novejši postopek neposrednega laserskega sintranja kovinskih prahov uporablja predvsem za izdelavo sintranih orodij za litje barvnih kovin in orodij za brizganje umetnih mas.

Po sintranju so možni tudi vsi nadaljnji sekundarni postopki obdelave, kot so: toplotna obdelava, površinsko utrjevanje, spajanje in mehanska obdelava na primer: vrtanje in struženje.

## Povzetek

Postopek metalurgije prahov uporabljamo povsod tam, kjer omogoča določene tehnično ekonomske prednosti ob najmanjši ekološki obremenitvi okolja, ob največjem izkoristku osnovnih surovin in pri najmanjši porabi energije na enoto mase izdelka.

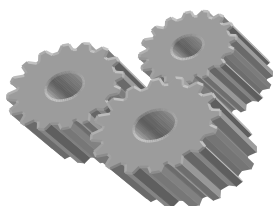
Na gostoto oziroma lastnosti sintranih izdelkov vpliva vrsta in velikost prahu, tlak stiskanja in temperatura sintranja.

Iz prahov izdelujemo tudi keramične izdelke, cermete, karbidne trdine in nekatere značilne izdelke, za katere je postopek metalurgije prahov edina možna izbira.

Pri odločitvi za tehnologijo prahov so odločujoči naslednji kriteriji:

- ✚ lastnosti izdelka pri uporabi,
- ✚ oblika, velikost, dimenzije in gostota izdelka,
- ✚ število oziroma serija izdelkov,
- ✚ zahtevana natančnost izdelave in
- ✚ ekonomičnost postopka.

Tehnologija izdelave sintranih izdelkov vključuje le tri glavne delovne faze, in sicer: pripravo prahu, stiskanje in sintranje. Poznavanje lastnosti sintranih izdelkov boste potrebovali tudi pri predmetu Tehnologija pri načrtovanju in omejitvah tehnologije prahu.



### Vprašanja za preverjanje razumevanja

1. Pojasnite vplivne kriterije pri odločanju za tehnologijo prahov.



2. Izdelati je potrebno izdelek v obliki valja z višino 25 mm. Izračunajte potrebno višino nasutega prahu v orodju.

Uporabite spletne strani, npr.: <http://unior-sinter.com/proizvodnja> (24. 04. 2010)

3. Za katere izdelke in zakaj je postopek tehnologije prahov najboljša izbira?

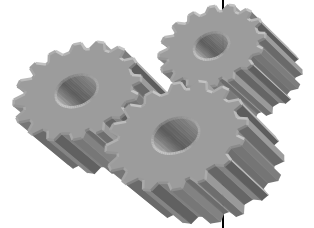
4. Navedite in pojasnite tehnološke pogoje procesa sintranja.

5. Shematsko narišite delitev stiskalnih batov za izdelek z več ravninami.

6. Pojasnite postopek neposrednega laserskega sintranja.

Uporabite spletno stran:

<http://www.rp-center.si/strani/TehnologijaKovina.html> (24. 06. 2010)



## 6 KERAMIČNI MATERIALI

### Uvod v poglavje

Keramični materiali so nekovinski anorganski materiali, v glavnem sestavljeni iz kovinskih in nekovinskih elementov. V poglavju z naslovom Keramični materiali bomo spoznali konstrukcijsko oziroma industrijsko keramiko za razliko od biokeramike, ki se danes uporablja v medicini za umetne sklepe, vsadke ipd. Pojem »konstrukcijska keramika« zajema keramične izdelke, ki morajo prenašati predvsem mehanske obremenitve in jih zato vrednotimo s stališča inženirja – konstruktorja.

Keramični materiali imajo v primerjavi z ostalimi kovinskimi in nekovinskimi materiali nekatere značilne lastnosti, zaradi katerih je keramika nenadomestljiv sodoben inženirski material. Prednost keramike pred drugimi materiali je predvsem visoka temperatura tališča, temperaturna in korozijska obstojnost, obstojnost proti oksidaciji in velika trdota.

Prednost keramičnih izdelkov z izboljšanimi trdnostnimi lastnostmi, je daljša uporabna doba v agresivnih sredinah in zaradi naravnih, široko dosegljivih osnovnih surovin, manjše ogrožanje okolja (Kolar, 1993, 374).

Zaradi velike trdote imajo keramični materiali tudi dobro obstojnost proti obrabi, zato so dobri abrazivi in zelo primerni za izdelavo rezalnih in preoblikovalnih orodij, kot so rezalne ploščice, matrice in podobno.

Pri tem je potrebno opozoriti na poznavanje in uporabo keramičnih rezalnih orodij pri postopkih ločevanja materiala v tehnološki praksi. Zato boste pri predmetu Tehnologija v drugem letniku študija znanje s področja rezalne keramike uporabili in dopolnjevali z vidika ustrezne izbire keramičnih rezalnih in preoblikovalnih orodij.

Vrsta in geometrija izbranega rezalnega orodja mora zadovoljiti določene kriterije glede na vrsto materiala obdelovanca in glede na obdelovalne pogoje, z vidika zahtevane kakovosti obdelane površine ter glede na ekonomski vidik obdelave.

*V tem poglavju boste spoznali in razumeli:*

- ✚ osnovne surovine in sestavo industrijske keramike,
- ✚ lastnosti in uporabo keramičnih izdelkov v različnih vejah industrije.

### 6.1 VRSTA, LASTNOSTI IN UPORABA KERAMIČNIH MATERIALOV

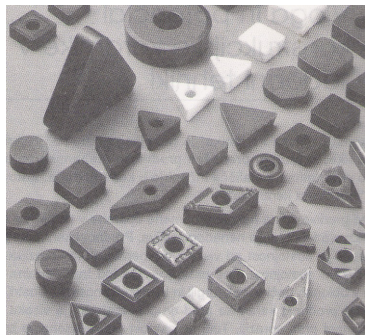
Keramični materiali so spojine **kovine in nekovine**. V najpomembnejšo skupino industrijske keramike uvrščamo:

- ✚ **oksidno keramiko npr.:** korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), kremen ( $\text{SiO}_2$ ), cirkonijev oksid ( $\text{ZrO}_2$ ),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ) in
- ✚ **neoksidno keramiko**, to so kovinski karbidi in nitridi, npr.: TiC (titanov karbid), SiC (silicijev karbid),  $\text{B}_4\text{C}$  (borov karbid) TiN (titanov nitrid),  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (silicijev nitrid).

Značilnost **korundne keramike** z velikim deležem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $> 90\%$ ) so velika trdota in tlačna trdnost, kemična odpornost in odpornost proti abraziji. Čisti korund ima visoko tališče ( $2050\text{ }^\circ\text{C}$ ) in do visokih temperatur ohrani dobre lastnosti.

Izhodna surovina za izdelke iz korundne keramike z veliko gostoto in trdnostjo, ki se uporabljajo za rezalna orodja, tesnilke, izdelke za elektroniko ipd., je kakovostna, čista glinica ( $\text{Al}_2\text{O}_3 > 99\%$ ), drobnozrnata s srednjo velikostjo aglomeratov pod  $10\ \mu\text{m}$ .

Iz manj čistih in bolj grobozrnatih vrst glinic, so izdelki za svečke motorjev, talilni lonci, abrazijsko odporni konstrukcijski deli, kot so obloge mlinov in mlevna telesa, obloge cevi, šobe za peskanje, opeke odporne proti ognju, laboratorijska keramika in številni drugi izdelki (Strojno tehnološki priročnik, 1998, 137).



Slika 42: Rezalna orodja različnih oblik iz korundne in nitridne keramike  
Vir: Tehnična keramika 2, 1993, 374

Zaradi visokega tališča ( $2760\ \text{°C}$ ) je **keramika iz  $\text{ZrO}_2$**  uporabna pri višjih temperaturah kot keramika z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Cirkonijev dioksid  $\text{ZrO}_2$  je korozijsko odporen, zato iz njega izdelujejo obloge talilnih peči in je ognjevzdržni material (Strojno tehnološki priročnik, 1998, 137).

Neoksidna keramika, kot sta **silicijev karbid ( $\text{SiC}$ )** in **silicijev nitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )**, se uporabljata predvsem za izdelavo delov črpalk za agresivne tekočine in povsod tam, kjer se zahtevajo dobre drsne lastnosti in odpornost proti obrabi, npr.: izdelava orodij za vlečenje žic, cevi, izdelava krogelnih in drsnih ležajev, ki jih ni potrebno mazati in so v agresivnem mediju uporabni do temperature  $700\ \text{°C}$ , za dele motorjev z notranjim izgorevanjem, dele plinskih turbin ipd.

Kot keramični materiali za **rezalna orodja** se uporabljajo korundne rezalne ploščice  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ki so poznane kot **oksidne** ali **bele** keramične rezalne ploščice z veliko trdoto HV 1800–2400. Dodatek  $\text{ZrO}_2$  izboljša žilavost in obrabno odpornost.

Med **mešano ali črno keramiko** uvrščamo rezalna orodja iz aluminijevega oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in neoksidov, kot so dodatki TiN, TiC in WC. Dodatki povečajo korundu toplotno prevodnost in odpornost proti toplotnemu šoku, povečajo trdoto (HV 2100–2400) in izboljšajo lomno žilavost (ISCAR katalog, 2004, G237).

Med neoksidno rezalno keramiko je poznan kubični borov nitrid (CBN) in rezalni material na osnovi čistega silicijevega nitrida ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) (Kopač in Sokovič, 1993, I–56).

Keramične izdelke oblikujemo s tehnologijo prahu oziroma s stiskanjem in sintranjem. Izbrana tehnika je odvisna predvsem od: velikosti, oblike, zahtevane dimenzijske tolerance in zahtevanih lastnosti ter števila izdelkov. Pomemben pogoj za uspešno oblikovanje s stiskanjem je enakomerna in ponovljiva polnitev orodja s prahom.

Slabost enoosnega stiskanja je lahko neenakomerna porazdelitev gostote v stiskancu. Napako lahko preprečimo, če izberemo postopek vročega stiskanja, ki je lahko enoosno ali hladno

## Materiali

izostatsko stiskanje (Cold Isostatic Pressing) oziroma vroče izostatsko stiskanje (Hot Isostatic Pressing).

Vročje stiskanje pomeni sintranje pod tlakom. Ob vzajemnem delovanju tlaka poteka zgoščevanje pri nižji temperaturi kot pri običajnem atmosferskem tlaku. Zato pri vročem stiskanju lahko dosežemo skoraj teoretično gostoto izdelka (Kolar, 1993, 270).

Veliko gostoto in trdnost je mogoče doseči z dvostranskim izostatskim stiskanjem, npr.: za izdelke zapletenih oblik, avtomobilske svečke in izdelke z velikim razmerjem dolžina/premer (cevi).

V primerih, ko oblika keramičnega izdelka to dovoljuje, ga lahko oblikujemo tudi z iztiskavanjem (ekstruzijo). Oblikovanje keramike z injekcijskim brizganjem je podobno brizganju polimernih materialov. Vročje, viskozno maso vbrizgamo v hladno matrico, kjer se masa strdi (Kolar, 1993, 275).

Zaradi močnih **ionskih** in **kovalentnih vezi** je za keramične materiale značilna visoka mehanska trdnost in trdota ter obstojnost pri visokih temperaturah.

Keramični materiali so slabi prevodniki toplote in elektrike. V trdnem stanju so električni in toplotni izolatorji, ker so elektroni lokalizirani in niso prosto gibljivi kot pri kovinah.

Največja slabost keramičnih materialov je njihova **krhkost**, medtem ko so njihove prednosti, pred ostalimi standardiziranimi kovinskimi materiali naslednje:

- ✚ **majhna gostota ( $\approx 3000 \text{ kg/m}^3$ ),**
- ✚ **zaradi ionske oziroma kovalentne vezi ne prevajajo električnega toka v trdnem stanju, slabo prevajajo tudi toploto in se veliko uporabljajo kot izolatorji,**
- ✚ **visoka temperatura tališča ( $\approx 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ),**
- ✚ **velika trdota in dobra obrabna odpornost,**
- ✚ **dobra korozijska odpornost,**
- ✚ **največji moduli elastičnosti  $E$  (od  $300.000$  do  $580.000 \text{ N/mm}^2$ ).**

Elastični modul se pri višjih temperaturah nekoliko zmanjša, kar je posledica naraščanja medatomskih razdalj. Elastični modul keramike se prav tako zmanjšuje pri povečani poroznosti izdelka. V keramičnih izdelkih je večja ali manjša poroznost posledica izdelovalnega postopka in jo uravnavamo s tlakom stiskanja ter temperaturo sintranja.

Iz spodnje empirične povezave izhaja, da mora biti keramika z veliko trdnostjo sintrana do velike gostote. Pore večajo krhkost, ker delujejo kot razpoke, hkrati pa zmanjšujejo elastični modul.

$$E = E_0 (1 - 1,9 P + 0,9 P^2) \quad (23)$$

kjer pomenijo:

$E_0$  – modul elastičnosti neporoznega materiala,  $P$  – prostorninski delež poroznosti

Kateri keramični material se v obliki ploščice uporablja v ultrazvočnem aparatu in avdio napravah za pretvarjanje (ultra) zvoka v signal električne napetosti?

**RAZMISLITE**

Keramične materiale uporabljamo za:

- ✚ tesnila za ventile in cevi, tesnilne ploščice,
- ✚ laboratorijsko posodo in obloge peči v procesni industriji,
- ✚ avtomobilske svečke,
- ✚ šobe za goriva, varilne šobe, šobe za peskanje nekaterih izdelkov,
- ✚ grelni elementi, električni in toplotni izolatorji,
- ✚ keramični magneti ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ipd.,
- ✚ keramična rezalna orodja (rezalna keramika), orodja (abrazivi) za brušenje in
- ✚ orodja za preoblikovanje,



Slika 43: Različni keramični izdelki

Vir: <http://www.eti.si/tehnickakeramika.aspx/> (28. 06. 2010)

- ✚ TiN za tanke prevleke, ki povečajo trajnost rezalnega orodja,
- ✚  $\text{Si}_3\text{N}_4$  za izdelavo strojnih komponent, ki delujejo pod pogoji velikih mehanskih in toplotnih obremenitev (lopaticice plinskih turbin, batni dizelski in bencinski motorji, drsni obroči črpalk, krogelni in drsni ležaji ipd.).

Tabela 5: Modul elastičnosti in temperatura tališča nekaterih keramičnih materialov

MATERIAL	Modul elastičnosti [GPa]	Temperatura tališča [°C]
Titanov karbid (TiC)	462	3180
Silicijev karbid (SiC) por. 2 %	414	2800
Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) poroznost 2 %	440	2050
Berilijev oksid (BeO)	311	2585
Silicijev nitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )	304	–
Spinel ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ )	284	2160
Magnezijev oksid (MgO) poroznost 5 %	207	2800

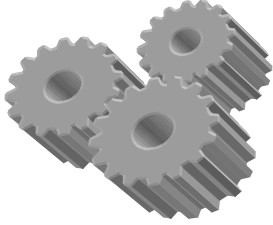
Vir: Prirejeno po: Strojno tehnološki priročnik, 1998, 133

## Povzetek

Keramični materiali imajo v primerjavi z ostalimi materiali nekatere značilne lastnosti, zaradi katerih so v tehniki nenadomestljivi inženirski materiali. Pri tem je potrebno omeniti predvsem visoko temperaturo tališča ( $\geq 2000$  °C), veliko trdoto in dobro obrabno in korozijsko odpornost.

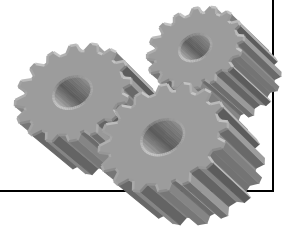
## Materiali

Zaradi izredno majhne toplotne in električne prevodnosti so zelo primerni za izolatorje, zaradi velike trdote in obrabne odpornosti pa zelo primeren material za rezalna in preoblikovalna orodja v tehnološki proizvodnji.



### Vprašanja za preverjanje razumevanja

1. Ugotovite osnovne značilnosti keramičnih materialov in navedite vaše argumente za uporabo keramičnih izdelkov v posameznih industrijskih panogah.
2. Pojasnite glavne prednosti keramičnih materialov in le-te primerjajte s kovinskimi materiali.
3. Navedite izdelke, ki se uporabljajo v tehnološki proizvodnji, za katere so keramični materiali edina prava izbira.
4. Pojasnite, zakaj morajo imeti keramični izdelki, ki bodo prenašali tudi mehanske Obremenitve, veliko gostoto, medtem ko se od keramičnih izdelkov, ki bodo le temperaturno obremenjeni, zahteva določena poroznost.
5. Pojasnite vpliv tlaka stiskanja na gostoto keramičnega izdelka.
6. Kateri keramični material se uporablja v ultrazvočnih aparatih in avdio napravah in zakaj?
7. Pri iztiskanju iz orodja so se na izdelku krušili robovi. Navedite vzroke oziroma navedite ukrepe, s katerimi preprečimo omenjeno napako.



## 7 CERMETI IN KARBIDNE TRDINE

### Uvod v poglavje

*V tem poglavju boste spoznali:*

- ✚ sestavo in lastnosti cermetov,
- ✚ razvoj karbidnih trdin,
- ✚ lastnosti, razdelitev in uporabnost karbidnih trdin.

**Cermeti**, ki jih imenujejo tudi kovinska keramika, so uvrščeni na posebno mesto med rezalno keramiko in karbidne trdine. Keramične komponente so: oksidi, karbidi, nitridi, boridi, karbonitridi, silicidi, sulfidi. Kot vezivo se uporabljata kovini nikelj (Ni) in molibden (Mo).

Zaradi keramičnih faz imajo cermeti dobre uporabne lastnosti, kot so: velika trdota in obrabna ter temperaturna obstojnost. Kovinske sestavine, ki povezujejo keramične faze v enovit material, pa cermetom zagotavljajo prevodnost, žilavost in odpornost proti temperaturnim udarom.

Lastnosti cermetov so odvisne od:

- ✚ lastnosti keramičnih in kovinskih sestavin,
- ✚ deleža keramičnih in kovinskih sestavin ter
- ✚ njihove medsebojne povezave.

Tako kot keramične izdelke tudi cermete izdelujejo po postopku metalurgije prahu. Pripravljeno mešanico zelo drobnih, finih delcev prahu nitridov, karbidov in vezne kovine stiskajo v orodju in nato stiskani izdelek še žarijo oziroma sintrajo.

Rezalna orodja iz cermetov so posebno primerna za končno obdelavo jekla in litin z velikimi rezalnimi hitrostmi pri majhnih podajanjih in globinah rezanja, kar poveča kakovost in gospodarno obdelavo na sodobnih obdelovalnih strojih (Kopač in Sokovič, 1993).

Karbidne trdine so cermeti. Ker pa se v strojništvo zelo veliko uporabljajo, so karbidne trdine uvrščene v posebno skupino materialov. Uporabljajo se za izdelavo vseh vrst rezalnih in preoblikovalnih orodij, ki so toplotno močno obremenjena, kot so rezalne ploščice, rezkala in svedri ter vlečne matrice in druga orodja v tehniki preoblikovanja. Zaradi velike trdote, ki je posledica kemične sestave in obrabne odpornosti, se karbidne trdine uporabljajo tudi pri orodjih delovnih strojev v geologiji in rudarstvu in povsod tam, kjer je potrebna določena površinska odpornost proti mehanski obrabi npr. konice pohodnih palic.

Vse od leta 1923, ko so v Nemčiji izdelali prve rezalne ploščice z imenom Widia, so karbidne trdine predmet številnih raziskav in izboljšav. Vsekakor je razvoj karbidnih trdin bistveno vplival na razvoj obdelovalne tehnike in na povečanje produktivnosti in obratno. Sodobni računalniško vodeni obdelovalni stroji velikih zmogljivosti, zahtevajo tudi sodobna, vzdržljiva rezalna orodja.

Zato boste znanje o *cermetih* in posebej o *karbidnih trdinah* uporabili in nadgrajevali v drugem letniku pri predmetu Tehnologija. Pri obdelavi materiala s struženjem, rezkanjem ipd. je glede na vrsto in lastnosti materiala obdelovanca in glede na značilnosti obdelovalnih strojev ter pogojev obdelave zelo pomembna ustrežna izbira geometrije in vrste rezalnega orodja.



Karbidne trdine so trdi materiali, izdelani po postopku metalurgije prahov. Na njihove lastnosti ni mogoče vplivati s postopki in pogoji toplotne obdelave. Sestavljene so iz zelo trdih kovinskih karbidov, predvsem karbida volframa (WC), titana in tantala (TiC + TaC) ter v manjši meri iz karbida vanadija in niobija. Za vezivo med kovinskimi karbidi je dodan kobalt (Co). Izboljšanje kakovosti oziroma lastnosti in razvoj novih vrst karbidnih trdin se lahko doseže s spreminjanjem kemične sestave in dodanega veziva. Tako je za karbidne trdine na osnovi čistega karbida titana (TiC) in z dodanim Ni-Mo kot vezivom značilna poleg velike trdote ob zadovoljivi žilavosti tudi velika obstojnost rezalnega orodja.

Zaradi velike trdote se karbidne trdine lahko oblikujejo le s postopkom metalurgije prahov in po potrebi z elektroerozijo in brušenjem. Prašnate sestavine v orodju stisnejo z velikim pritiskom in nato stisnjence sintrajo pri temperaturi 1800 do 1900 °C.

## 7.1 LASTNOSTI IN RAZDELITEV KARBIDNIH TRDIN

Glavni odliki karbidnih trdin sta velika trdota, ki jo obdržijo tudi pri temperaturi nad 1000 °C in odpornost proti obrabi ob sorazmerno ugodni žilavosti.

Način označevnja in uporabnost posameznih vrst karbidnih trdin predpisuje standard ISO 513: 2004. dostopno na naslovu: [http://www.sc-nm.com/e-gradivo/ODR/karbidne\\_trdine.html](http://www.sc-nm.com/e-gradivo/ODR/karbidne_trdine.html) (14. 04. 2010)

Karbidne trdine so razdeljene v štiri glavne skupine, in sicer *skupine: G, P, K in M*. Pri tem moramo poudariti, da se karbidne trdine *skupine G* uporabljajo za preoblikovalna orodja, kot so matrice in vodila, medtem ko so karbidne trdine *skupin P, K in M* namenjene za rezalna orodja in se uporabljajo v obdelovalni tehniki za obdelavo nekovinskih in kovinskih materialov.

Vsaka glavna skupina je nato razdeljena še v določeno število podskupin. Te podskupine so označene z vrstno številko, in sicer od **01 do 50** npr.: P01, P02, P03 ... P10 ... P15, P20, P25, P30, P40 in P50 itd. Pri tem moramo biti pozorni, da se z naraščanjem številčne oznake povečuje žilavost karbidne trdine. Če se povečuje žilavost, potem se trdota in s tem odpornost proti obrabi zmanjšuje.

Npr.: trdota HV rezalne ploščice P04 znaša 1700, rezalne ploščice P40 pa 1350 (Kopač in Sokovič, 1993, I-23).

### **POMNI**

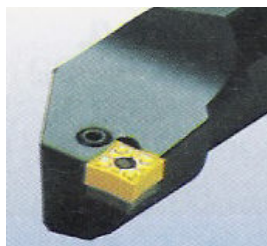
**Karbidne trdine iz skupine P, K ali M izbiramo glede na pogoje obdelave in glede na lastnosti materiala, ki se obdeluje.**

- ✚ Skupina P je označena z modro barvo in se uporablja za obdelavo nelegiranega jekla.**
- ✚ Iz skupine M, ki je označena z rumeno barvo, izbiramo karbidne trdine za obdelavo legirane in trde sive litine.**
- ✚ Za obdelavo nekovinskih materialov, sive litine, neželeznih kovin in zlitin izbiramo v skupini K, ki je označena z rdečo barvo.**

Glavne skupine karbidnih trdin in priporočila za pravilno izbiro ter uporabo glede na material obdelovanca in pogoje obdelav, so podani v strokovni literaturi (standard ISO 513, Strojno tehnološki priročnik, 1998, 288, Krautov strojniški priročnik, 2001, ISCAR katalog).

### Povzetek

Cermete, katerih posebna skupina so karbidne trdine, uvrščamo med tako imenovane rezalne materiale za orodja, ki se uporabljajo za obdelavo kovinskih in nekovinskih materialov. Pri tem moram omeniti, da je rezilo pritrjeno na držalo orodja, ki je običajno iz konstrukcijskega jekla. Na sliki 44 je prikazano držalo orodja, na katerega je z vijačno zvezo pritrjena oplaščena rezalna ploščica karbidne trdine s trdo zaščitno prevleko TiN.

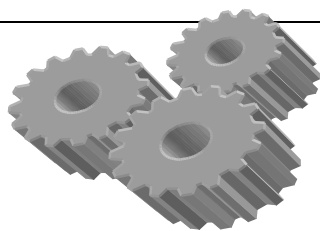


Slika 44: Oplaščena rezalna ploščica, pritrjena na držalo orodja  
Vir: Iscar Turning tools, A17

Mehanske lastnosti karbidnih trdin so odvisne od kemijske sestave in mikrostrukture. Osnovne sestavine karbidnih trdin so: volframov karbid (WC), titanov karbid (TiC), tantalov karbid (TaC) in kobalt (Co) ali nikelj-molibden (Ni-Mo) kot vezivo.

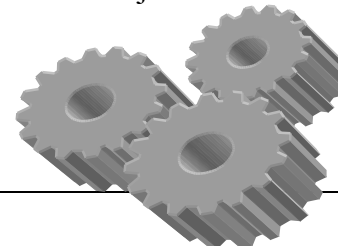
Z naraščanjem vsebnosti veziva (kobalta) narašča žilavost in se zmanjšuje trdota karbidnih trdin. Na povečanje trdote vpliva tudi fina zrnatost karbidnih zrn.

Največji napredek v izboljšanju lastnosti karbidnih trdin je bil dosežen s postopki večplastnega oslojevanja ali prekrivanja z nanosi tankih trdih zaščitnih plasti titanovega nitrida (TiN) in titanovega karbonitrída (TiCN), kar bomo spoznali v naslednjem poglavju o trdih prevlekah.



### Vprašanja za preverjanje razumevanja

1. Navedite glavni razlog, zakaj je za karbidne trdine značilna enakomerna mikrostruktura, ki zagotavlja odlične lastnosti karbidnih trdin.
2. V katerih primerih bi za obdelavo materiala s struženjem izbrali rezalno orodje iz cermetov in ne iz karbidne trdine? Argumentirajte vašo odločitev.



## 8 TRDE PREVLEKE

### Uvod v poglavje

V sedemdesetih letih 20. stoletja je v strokovni javnosti prevladalo prepričanje, da je pri razvoju rezalnih materialov, kot so orodna in hitrorezna jekla ter cermeti in karbidne trdine doseženo vse, kar je možno. Uporabljeni postopki za površinsko utrjevanje in zaščito materiala, kot so nitridiranje, kromanje, boridiranje ipd., pri zahtevnih orodjih za visoko zmogljive, računalniško vodene obdelovalne stroje niso več zadostovali. Postopki površinskega utrjevanja povzročajo med drugim tudi spremembe v mikrostrukturi osnovnega materiala, kar je še dodatno omejilo uporabne možnosti površinsko utrjenega orodja.

Uspešen razvoj vakuumske tehnologije na osnovi mikroskopskih nanosov iz parne faze je razvojna prizadevanja usmeril na različne metode nanašanja trdih zaščitnih prevlek na površine orodij. Na orodje nanešena prevleka ne spremeni lastnosti in mikrostrukturo osnovnega materiala orodja in ima zelo veliko trdoto ter svojstvene značilne lastnosti, bistveno različne od lastnosti orodja. Na ta način orodju poveča obrabno obstojnost in prispeva k zaščiti njegove površine.

Trde prevleke so nekaj mikrometrov debele plasti nitridov, karbidov, karbidonitridov in oksidov kovin titana, volframa, kroma, cirkonija, vanadija, hafnija in aluminija. Z njimi prekrivamo in zaščitimo različna orodja ali strojne dele, kakor tudi nekatere izdelke široke potrošnje v dekorativne namene.

Nanašanje trdih zaščitnih prevlek je pomembno z vidika kakovosti obdelanih površin, povečanja produktivnosti, zmanjšanja porabe energije na enoto proizvoda ipd. (Navinšek, 1993, 3).

### 8.1 PRIDOBIVANJE, LASTNOSTI IN UPORABA TRDIH PREVLEK

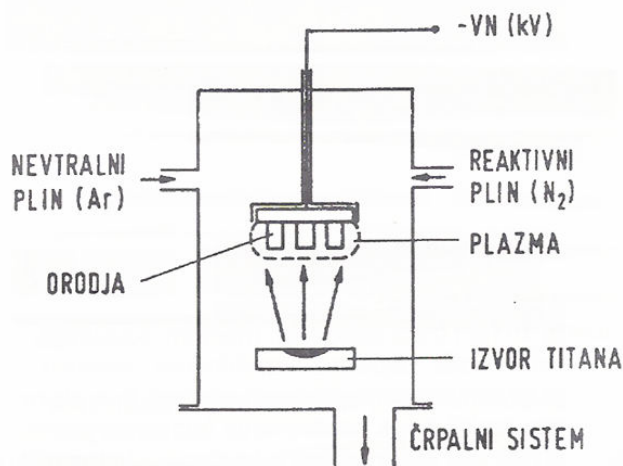
Tehnike nanašanja trdih prevlek so lahko različne. Če upoštevamo glavne kriterije, kot so: temperatura podlage med nanašanjem trde prevleke, oprejemljivost in enakomerno prekrivanje površine, se v proizvodnji uporablja predvsem vakuumska PVD (Physical Vapour Deposition) metoda in v manjši meri tudi CVD (Chemical Vapour Deposition) metoda, predvsem za preoblikovalna orodja (Navinšek, 1993, 6).

Preoblikovalna orodja, ki so izdelana iz karbidne trdine, so običajno oslojene po metodi CVD kemijskega nanašanja iz parne faze pri temperaturi okoli 1000 °C. Zaščitna prevleka TiN nastaja kot produkt kemijske reakcije med ustrezno izbrano plinsko zmesjo npr. TiCl<sub>4</sub> in N<sub>2</sub> ter ogreto površino orodja. Prevleke, ki jih dobimo s kemijskim nanašanjem, so lahko nitridne (TiN), karbidne (TiC), nitridno karbidne (TiCN) ali oksidne (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Zelo uveljavljen je postopek fizikalnega nanašanja iz parne faze – PVD (Physical Vapour Deposition), ki poteka pri temperaturi pod 500 °C in v vakuumski komori. Danes je v uporabi veliko različnih izvedb PVD postopkov, vsi pa potekajo v vakuumu pri temperaturi podlage od 200 °C do 500 °C, debelina prevleke pa je le nekaj mikrometrov.

PVD postopki nanašanja se razlikujejo tudi glede opreme naprav za nanašanje trdih prevlek, ki so dosegljive na tržišču. Najpogosteje uporabljeni sistemi so: magnetronsko naprševanje (za večslojne prevleke TiAlN, TiZrN, TiCrN), nizkonapetostni elektronski lok in katodni točkasti lok).

Na sliki 45 je prikazana osnovna shema reaktivnega ionskega prekrivanja ali ionskega »bombardiranja« površine orodja oziroma izdelka, na katerega želimo nanesti trdo prevleko. Izparjeni material za depozicijo, npr. *titan*, se na poti do površine orodja ali izdelka delno ionizira. Kovinski ioni titana reagirajo z ioniziranim reaktivnim plinom npr. dušikom in tvorijo titanov nitrid (TiN). V primeru, če se kot reaktivni plin uporablja metan (CH<sub>4</sub>), se na površini orodja ob ustreznih pogojih nanaša titanov karbid (TiC).



Slika 45: Osnovna shema reaktivnega ionskega prekrivanja s titanovim nitridom

Vir: Trde zaščitne prevleke, 1993, 9

Najbolj razširjene trde prevleke so na osnovi nitridov kovin (npr. TiN, CrN) in predvsem večkomponentne (TiAlN) in večplastne prevleke (TiN/TiAlN), kakor tudi prevleke na osnovi ogljika (DLC) in diamantnih prevlek.

Najnovejšo generacijo predstavljajo nanokompozitne (TiN + DLC) in samomazivne prevleke (WC + C). (<http://www.ijs.si/ctp/ktrdeprevleke.html-12>, 27. 08. 2010)

#### **POMNI**

*V primerjavi s CVD postopki ima PVD postopek reaktivnega ionskega prekrivanja bistvene prednosti, in sicer:*

- ⚡ *nižja delovna temperatura do 50 °C,*
- ⚡ *čisti delovni pogoji, brez škodljivih vplivov na okolje in*
- ⚡ *dobra kakovost trde prevleke.*

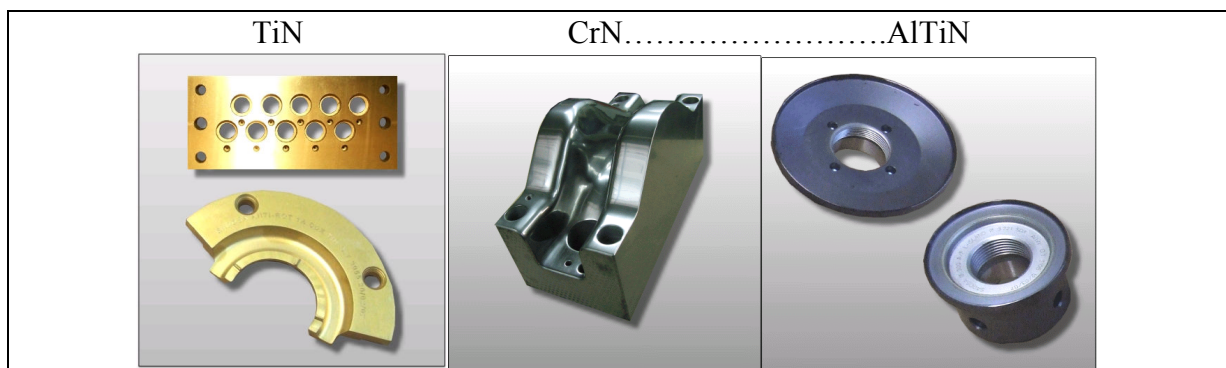
Trda zaščitna prevleka ima bistveno drugačne lastnosti kot osnovni material orodja. Pri orodjih iz hitroreznih jekel so se doslej najbolj uveljavile prevleke iz TiN, TiCN, TiAlN in CrN.

Pri karbidnih trdinah pa so najpogosteje uporabljene trde prevleke iz TiC, TiN, TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in HfN, oziroma njihova kombinacija v primeru večslojnih prevlek, katerih debelina znaša 6 do 12 μm (Kopač in Sokovič, 1993, I-33).

Prednosti trdih prevlek so številne. Zaradi velike trdote (2000 do 3400 HV) imajo zelo dobro odpornost proti obrabi. Majhna toplotna prevodnost in majhen koeficient trenja dovoljujeta velike obdelovalne hitrosti, kar vpliva na občutno povečanje produktivnosti in kakovosti izdelkov.

## Materiali

V industrijski praksi so trde prevleke popolnoma uveljavljene za rezalna in preoblikovalna orodja, kakor tudi za posamezne različne sestavne dele (spojke) ter v dekorativne namene za izdelke široke porabe.



Slika 46: Izdelki s trdo zaščitno prevleko

Vir: <http://www.sadosa.com/HARD%20COATINGS.html/> (16. 05. 2010)

Slabosti so predvsem z ekološkega vidika pri CVD tehniki, kjer se pojavlja problem nevtralizacije odpadnih in strupenih plinov. Iz ekološkega vidika so najbolj čiste in neoporečne samo vakuumske tehnologije, medtem ko so galvanski in različni kemijski postopki ekološko nesprejemljivi.

## Povzetek

Tehnologija nanašanja trdih zaščitnih prevlek ima velik gospodarski pomen. S površinskim nanosom trdih zaščitnih prevlek se lastnosti rezalnih in preoblikovalnih orodij bistveno izboljšajo. Zaradi velike trdote trdih prevlek se poveča obrabna odpornost in obstojnost orodja.

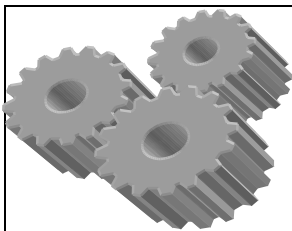
Za nanašanje se uporabljata dve metodi, in sicer: vakuumska PVD (Physical Vapour Deposition) metoda in v manjši meri tudi CVD (Chemical Vapour Deposition) metoda, predvsem za preoblikovalna orodja.

Kemijska CVD metoda se opušča, ker zaradi visokih temperatur spreminja mikrostrukturo osnovnega materiala.

Pri mnogo bolj razširjeni PVD metodi razlikujemo različne postopke, in sicer: magnetronsko naprševanje, naparevanje z laserjem, s katodnim lokom, elektronskim curkom itd. Vsi naštetih postopki so ekološko spejemljivi in potekajo v vakuumu pri temperaturi podlage 200 °C do 450 °C. Debelina nanosa je le nekaj mikrometrov.

Za oslojevanje hitroreznega jekla se uporablja predvsem prevleka titanov nitrid (TiN), zlato rumene barve, medtem ko se za oslojevanje karbidnih trdin najpogosteje odločamo za prevleke titanov karbonitrid (TiCN), titanov karbid (TiC), titanov nitrid (TiN), aluminijev oksid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) in titanov aluminij nitrid (TiAlN).

*Znanje o trdih prevlekah boste potrebovali tudi v drugem letniku pri predmetu Tehnologija, nekateri pa tudi kasneje pri predmetu Izdelava in vzdrževanje orodij in pri predmetu Snovanje in konstruiranje orodij.*



### Vprašanja za preverjanje razumevanja

1. V katerih primerih in zakaj se uporabljajo trde prevleke?
2. Pojasnite bistvene razloge uporabe trdih prevlek za preoblikovalna in rezalna orodja.
3. Za preoblikovalno orodje in za orodje iz hitroreznega jekla je potrebno naročiti trdo zaščitno prevleko. Kateri postopek nanašanja boste izbrali? Navedite vaše argumente.
4. Poiščite spletno stran o trdih taščitnih prevlekah in primerjajte trdote trdih prevlek.
5. Pojasnite slabosti CVD postopka nanašanja trdih prevlek.
6. V prerezu shematsko narišite rezalno orodje z večslojno prevleko in pojasnite prednosti večslojnih trdih prevlek.  
Uporabite spletno stran: <http://www2.sts.si/arhiv/tehno/odrezovanje/43.htm>
7. Utemeljite prednost trdih zaščitnih prevlek v primerjavi s postopki površinskega utrjevanja, kot je npr. nitridiranje, cementiranje ipd.





## 9 UMETNE MASE

### Uvod v poglavje

Umetne mase imajo vsestranske lastnosti. Uporabljajo se za izdelavo kakovostnih in zahtevnih tehničnih izdelkov, ki morajo prenašati visoke mehanske in toplotne obremenitve, kakor tudi za izdelke široke potrošnje, kjer je prednost poroznost in majhna gostota umetne mase. Zato se njihova poraba povečuje hitreje kot poraba drugih materialov. S tem pa se nenehno povečujejo tudi neverjetne količine odpadne embalaže in drugih odpadkov iz umetnih mas.

Umetne mase se razgrajujejo in razpadajo v naravi zelo počasi (200 let) in v naravi odvrženi izdelki predstavljajo veliko nevarnost za zdravo okolje. Posebno v primerih, ko so izdelki sestavljeni iz različnih delov nekompatibilnih umetnih mas, je njihovo recikliranje onemogočeno.

V mnogih državah tako obstajajo zakonsko predpisani programi za nekaterih umetnih mas, kar pa zahteva predhodno ločevanje (<http://sl.wikipedia.org/wiki/Plastika>, 04. 09. 2010).

Izdelava in razvoj do okolja prijaznih umetnih mas, poteka v smeri biorazgradljivosti, ki jo dosežejo z naravnimi dodatki (npr. s koruznim škobom), medtem ko pri kemično razgradljivih umetnih masah dodajajo kemične dodatke. Ker pa kemični dodatki poslabšajo lastnosti umetnih mas in onemogočajo predelavo ostankov, rešitev ni najboljša.

*V tem poglavju boste spoznali in razumeli:*

- ✚ *strukturo, lastnosti, razdelitev in uporabo umetnih mas,*
- ✚ *amorfne in delno kristalinične umetne mase,*
- ✚ *postopke oblikovanja.*

Pri izbiri ustrezne vrste umetne mase glede na zahteve in funkcijo izdelka so strojnemu inženirju lahko v pomoč katalogi, strokovna literature in nasveti proizvajalcev, medtem ko načrtovanje izdelovalne tehnologije, kakor tudi načrtovanje in konstruiranje orodij za oblikovanje izdelkov iz umetnih mas zahteva ustrezne samostojne presoje in rešitve.

Zato vas na tem mestu moram opozoriti, da boste znanje o umetnih masah potrebovali tudi v drugem letniku pri predmetu Tehnologija, nekateri pa tudi kasneje, pri predmetu Snovanje in konstruiranje orodij ter pri predmetu Izdelava in vzdrževanje orodij za oblikovanje umetnih mas.

Umetne mase so skupina materialov, ki jih pridobivamo povsem sintetično s kemijsko predelavo naravnih surovin, kot so nafta, premog, celuloza, naravni kavčuk, naravne smole ipd. Postopki za kemično spajanje temeljijo na osnovnih kemičnih reakcijah, kot so:

- ✚ **Polimerizacija** je proces kemijskega spajanja istovrstnih monomerov v makromolekule.
- ✚ **Polikondenzacija** je proces kemijskega spajanja majhnih molekul na makromolekulo. Pri tem nastanejo stranski produkti, kot so voda ali druge molekule.
- ✚ **Poliadacija** je reakcija kemijskega spajanja različnih molekul nizko molekularnih izhodnih snovi brez stranskih produktov, npr. pridobivanje polietilena iz etana.

- ✚ **Monomer** je majhna organska molekula, v kateri so atomi ogljika povezani z atomi drugih elementov in se ponavlja v obliki verige v večjo molekulo oziroma makromolekulo.
- ✚ **Makromolekule** so kemične spojine, ki so zgrajene iz velikega števila merov. Minimalno število merov v določeni makromolekuli je pogojeno z zahtevanimi lastnostmi umetne mase.

## 9.1 RAZDELITEV, LASTNOSTI IN UPORABA UMETNIH MAS

Zaradi dobrih lastnosti kot so: oblikovalnost, obdelovalnost, kemijska odpornost in dobrih trdnostnih lastnosti na enoto mase, so umetne mase v strojništvu, kakor tudi na vseh ostalih področjih uporabe, nepogrešljive. Uveljavljene se kot konstrukcijski material za najzahtevnejše izdelke, kakor so deli aparatov in strojev, deli letal, avtomobilov in drugih vozil.

Vendar se v osnovni kemični obliki umetne mase le redko uporabljajo. Tehnično uporabne lastnosti pridobijo šele z **dodatki** (adativi). Izbrani dodatki morajo ustrezati tehničnim, varnostnim, higienskimi in drugim zahtevam. Posamezne skupine dodatkov so npr.:

- ✚ stabilizatorji – ščitijo pred toplotnim razpadom pri predelavi, pred oksidacijo in vplivom svetlobnih in ultravijoličnih žarkov,
- ✚ antistatiki – zmanjšujejo površinski naboj,
- ✚ protivžigni dodatki – zmanjšujejo vnetljivost umetnih mas do točke, ki jo zahtevajo predpisi za elektrotehniko, gradbeništvo in proizvodnjo vozil,
- ✚ barvila – v obliki granulata, past ali tekočin.

Mehanske in druge fizikalne lastnosti umetnih mas se lahko spreminjajo s časom, temperaturo in hitrostjo deformacije. Na primer neustrezno izbrani tehnološki pogoji pri oblikovanju (hitra sprememba temperature ali tlaka) imajo lahko za posledico krivljenje izdelka pri uporabi ali pa pojav razpok ali celo porušitev izdelka.

Po drugi strani pa lahko s posebnimi postopki iztiskavanja dosežemo večjo togost izdelka in tako pozitivno vplivamo na mehanske lastnosti.

Za razliko od kovinskih materialov je natezna trdnost plastičnih umetnih mas definirana v točki loma, zato je lahko tudi nižja od napetosti tečenja.

V nasprotju s kovinskimi materiali je za umetne mase posebno pomembna specifična trdnost oziroma primerjava med trdnostjo in gostoto na enoto mase.

### **POMNI**

Tehnološko razdelimo umetne mase glede na obliko molekularne verige na:

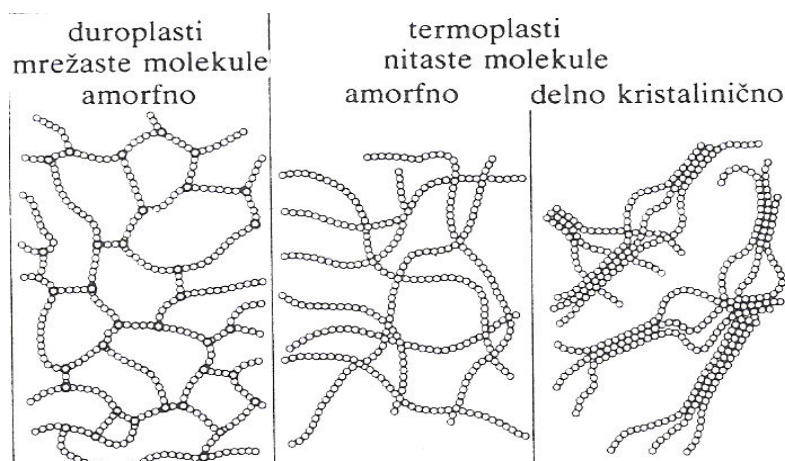
- ✚ **elastoplaste** ali elastomere,
- ✚ **termoplaste** ali plastomere in
- ✚ **duroplaste** ali duromere.

Makromolekule **elastoplastov** so šibko zamrežene, zato se že pri manjših obremenitvah raztegnejo in pri razbremenitvi vrnejo v prvotni položaj. Elastična deformacija obremenjenih elastoplastov je zelo velika. Molekule niso razdružljive in regeneracija ni možna. Elastoplaste,

kot so npr.: silikonski kavčuk, poliuretanski kavčuk, poliakrilatni, naravni kavčuk, stiren butadienski kavčuk, uporabljamo za izdelavo različnih tesnil, mehkih cevi, za proizvodnjo membran, zračnic, pnevmatik, transportnih trakov, gumiranih valjev in kablov.

(<http://klander.over.net/proizvodnja.htm>, 24. 08. 2010).

**Termoplasti** imajo dolge in močno razvejane molekularne verige. Pri segrevanju med 100–180 °C se omehčajo. Lahko jih varimo, segrevamo do staljenega stanja, oblikujemo in po ohladitvi ponovno segrevamo ter preoblikujemo. Razlikujemo med amornimi in delno kristaliničnimi termoplasti. (<http://sl.wikipedia.org/wiki/Material>, 24. 08. 2010).



Slika 47: Struktura makromolekul pri duroplastih in termoplastih  
Vir: Plastik-Orodjar, 1998, 9

Med amorfne termoplaste uvrščamo:

**Polivinilklorid (PVC)** različnih trdot, se enostavno predeluje, temperaturno območje uporabe je –30 do 70 °C. Uporablja se za talne obloge, umetno usnje, za posodo, cevi za odvajanje vode in cevne spojke, rezervoarje, steklenice, igrače, folije ipd.

**Polistiren (PS)** je uporaben v temperaturnem območju –50 do 75 °C. Uporablja se v gospodinjstvu za embalaže, zaboje, za pakiranje farmacevtskih izdelkov, dele gospodinskih aparatov, dele in ohišja aparatov, telefone, sesalce za prah, sanitarne predmete ipd.

**Akrilonitril butadien stiren (ABS)** se uporablja za ohišja fotoaparatorov, telefonov, armaturne plošče, kovčke.

**Polimetilmetakrilat (PMMA)** se uporablja predvsem za urna stekla, leče, prizme, v elektrotehniki za dele stikal, za vzvratne luči pri avtomobilih, zasteklitve za vozila itd.

Med delno kristalinične termoplaste uvrščamo:

**Polietilen (PE)** se uporablja v temperaturnem območju –50 do 120 °C, za tesnila, pokrove za zapiranje, prevleke žic in kablov, zaboje za steklenice, npr.: PE80 in PE100 – cevi različnih premerov za pitno in odpadne vode, cevi za plin, igrače vseh vrst, koše za smeti, ...

**Poliamidi (PA)** imajo vrsto dobrih lastnosti npr. odpornost proti obrabi, lahko so ojačani s steklenimi vlakni, zato se veliko uporabljajo kot konstrukcijski material zahtevnih sestavnih delov in komponent, za izdelke široke porabe npr.: kot tekstilna vlakna (Nylon, Perlon, Kevlar), za lego kocke, vijake, ležaje, zobnike, tesnila, vodila, ventilatorje ipd. Temperaturno področje uporabe je –40 do 120 °C, odvisno od vrste poliamida. Pri navzemanju vlage se njihove lastnosti spremenijo in če vsebujejo določena mehčala, niso primerni za stik z živili.

**Polioksimetilen (POM)** uporabljamo za števec, zobnike, krmilne naprave, krmilne plošče, sklopke, vijake, kletke ležajev, dele pralnih in pomivalnih strojev.

**Politetrafluoretilen (PTFE)** uporabljamo za tesnila, cevi, ovoje, dele črpalk, membrane, drsne ležaje, navojne tesnilne trakove, lonce, varilne čeljusti, pri zaščiti letal pred niskimi temperaturami ipd.

**Polipropilen (PP)** je lažji od polietilena in ima višje tališče (160 do 176 °C), uporablja se za folije, posode in predmete v gospodinjstvu, kuhinjske aparate, za ohišja, prevleke kablov, ohišja za baterije, pete čevljev, kovčke ipd.

Tabela 6: Mehanske in fizikalne lastnosti nekaterih termoplastov

Material	Modul elastičnosti [MPa ]	Natezna trdnost $R_m$ [MPa ]	Trdota	Gostota [kg/m <sup>3</sup> ]	Temperatura zmečičišča $T_m$ [ °C ]
Polivinilklorid (PVC)	1000–3500	45–70	75–150	1200–1400	210
Polietilen (PE)	700–1400	15–30	40–60	910–950	110–130
Polipropilen (PP)	1100–1300	20–35	35	910	175
Poliamid (PA)	1000–2000	55–85	75–100	1100–1350	317
Polistiren(PS)	3100–3300	45–60	115–130	1050	240

Vir: Strojno tehnološki priročnik, 1998, 119

Za drugo skupino umetnih mas, **duroplaste**, je značilna razvejana, prečno močno zamrežena oblika molekularne verige. Uporabljamo jih v obliki vlivnih smol ali oblikovalnih mas, kot so: **poliestrska smola (UP)**, **fenolna smola (PF)** in **epoksi smola (EP)** v elektrotehnik in elektroniki, tiskano vezje, v gradbeništvu za fasadne elemente, obloge in premaze za tla, dodatek betonu, v ladjedelništvu, plovila za posebne namene, čolni, deli karoserij, kovčki, cevi, steklenice, zobniki, ležaji, ipd.

Tabela 7: Modul elastičnosti in natezna trdnost duroplastov

Material	Modul elastičnosti [MPa]	Natezna trdnost $R_m$ [Mpa]
Poliester	3500	45
Poliester s steklenimi vlakni	10000	70–100
Fenolna smola	700	25
Fenolna smola s steklenimi vlakni	15000	100
Epoksi	3800	55
Epoksi smola s steklenimi vlakni	17000	210

Vir: Strojno tehnološki priročnik, 1998, 119

## *Materiali*

Pri določeni temperaturi duroplasti za razliko od termoplastov, utrdijo in jih s ponovnim segrevanjem tehnično ni možno več preoblikovati ali reciklirati (npr. bakelit), kar je njihova največja slabost. Oblikujemo jih s taljenjem in ulivanjem in jih ni možno spajati z varjenjem. Pri višjih temperaturah razpadejo, zato je njihova uporaba omejena.

Uporabne lastnosti umetnih mas so v primerjavi s kovinskimi materiali omejene, ker mehanske obremenitve, toplota, ultraviolečni žarki, svetloba, tlak in nekateri agresivni mediji lahko povzročijo njihovo razpad zaradi porušitve fizikalne ali kemijske medmolekularne vezi. Umetne mase imajo v primerjavi s kovinskimi materiali manjši modul elastičnosti, trdoto in trdnost. Lastnosti umetnih mas pa lahko bistveno izboljšamo z dodajanjem utrjevalne faze, kot so npr. steklena, grafitna ali tekstilna vlakna (tabela 7).

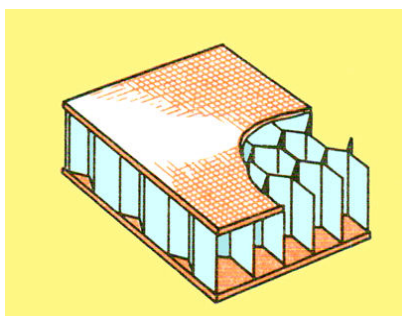
**Nekovinski kompoziti** so sestavljeni iz umetne mase in dodanega utrjevalnega materiala ali utrjevalne faze. Lastnosti nekovinskih kompozitov se razlikujejo od lastnosti materialov, ki kompozit sestavljajo. Dodana utrjevalna faza prispeva k večji trdnosti in togosti kompozita. Umetna masa, ki je osnova ali matrika, pa mora imeti večjo razteznost kot utrjevalna faza. Pri tem je zelo pomembna dobra oprejemljivost smole na utrjevalno fazo.

Za osnovo nekovinskega kompozita se običajno uporabljajo duroplasti npr. fenolne in epoksidne smole ter nekateri termoplasti npr. polipropilen, poliamid, polietilen. Na lastnosti kompozitnih materialov vpliva vrsta, velikost in porazdelitev utrjevalne faze ter pogoji predelave.

Sestavljeni ali kompozitni materiali se danes uporabljajo v izdelkih bele tehnike, računalnikih, audio in video napravah ter opremi za šport in razvedrilo, za sestavne komponente dirkalnih in motornih koles, letal, helikopterjev, delov avtomobilskih karoserij, v medicini za kirurške proteze, palice za baseball, palice za golf, za dele športnih letal in navtične opreme, dele smučarske opreme, npr. sponke smučarskih čevljev, za okvirje očal, ohišja pisalnega pribora, konstrukcijske dele pohištva in različne industrijske hranilnike.

Na tem mestu moramo omeniti še tako imenovane "sendvič konstrukcije". To so posebna vrsta kompozitnih materialov, ki imajo ob majhni gostoti, povečano specifično trdnost ( $R_m/\rho$ ) in togost. Uporabljajo se za izdelavo različnih konstrukcijskih elementov, notranje opreme, garderobne omarice v letalih, v industriji vozil, gradbeništvu ipd.

Sendvič konstrukcija je sestavljena iz dveh tankih zunanjih plošč, med katerima je polnilo oziroma satje. Glavna naloga polnila je, da sendvič konstrukciji zagotovi določeno trdnost. Zunanji plošči sta lahko izdelani iz aluminijeve zlitine, nerjavnega jekla, titana, zlitine niklja ali pa iz umetne mase, ojačane z vlakni (Đorđević, 2000, 344).



Slika 48: Sendvič konstrukcija s polnilom iz satja  
Vir: <http://www.erevija.com/clanek/42/Gradnja-letal> (27. 08. 2010)

### **POMNI**

#### ***Osnovne značilnosti umetnih mas so:***

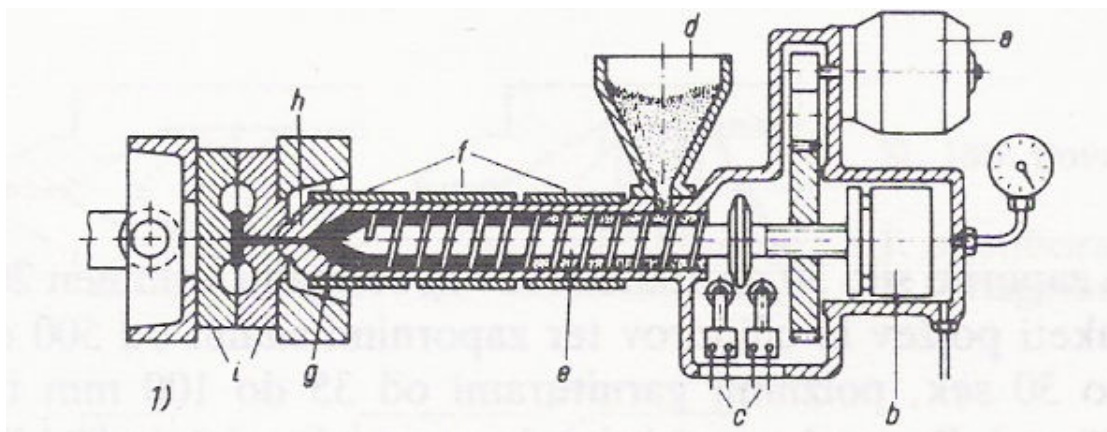
- majhna električna in toplotna prevodnost,
- dobre izolacijske sposobnosti,
- ✚ majhna gostota ( $850\text{--}1800\text{ kg/m}^3$ ),
- ✚ velika specifična trdnost in koeficient toplotnega širjenja,
- ✚ obseg delovnih temperatur je nizek, največ do  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- ✚ dimenzijska stabilnost se s časom zmanjša,
- ✚ dobro dušenje vibracij,
- ✚ prozorne in neprozorne,
- ✚ odpornost proti atmosferskim vplivom, precej neobčutljive za vlago in na splošno odporne proti kislinam in bazam in zelo različno odporne proti organskim topilom,
- ✚ majhen koeficient trenja,
- ✚ ekonomična serijska proizvodnja,
- ✚ enostavno oblikovanje z brizganjem in ekstrudiranjem ob majhni porabi energije,
- ✚ dobra obdelovalnost (struženje, vrtanje, brušenje ipd.).

Za izdelavo številnih različno oblikovanih izdelkov iz umetnih mas lahko izbiramo med postopki brizganja, ekstrudiranja, ulivanja in pihanja.

Na izbiro postopka oblikovanja vplivajo določeni kriteriji, kot so: vrsta in priprava umetne mase, velikost in dimenzije izdelkov, serija, zahtevana dimenzijska natančnost izdelka, razpoložljiva oprema oziroma stroji in podobno.

Ker se tehnološki pogoji in postopki oblikovanja umetnih mas vključno s predstavitvijo strojev obširneje obravnavajo pri predmetu Tehnologija, bomo na tem mestu na kratko predstavili le najbolj razširjen postopek brizganja.





Slika 49: Stroj za brizganje termoplastov

Vir: Plastik-Orodjar, 1998, 201

Brizgalni stroji (slika 49) so sestavljeni iz brizgalnega dela in zapiralnega dela, kjer je orodje. Z vzdolžnim pomikom polža (e) se pripravljena in ogreta masa iz zalogovnika (d) vbrizga skozi komoro za plastificiranje mase (g) in dolivne kanale v dvodelno orodje (i). Med ohlajanjem izdelka polž z manjšim pritiskom dozira dodatno maso za morebitno kompenzacijo skrčkov. Nato polž z obračanjem in vzvratnim pomikom dozira v cilindar novo količino mase za naslednji brizg. Medtem se orodje odpre in izdelek se izbije iz orodja, nakar se orodje ponovno zapre (Navodnik in Kopčič, 1998, 197).

Ekstrudiranje je za brizganjem najbolj razširjen postopek za izdelavo daljših izdelkov oziroma predmetov s konstantnim prerezom, kot so cevi, okenski profili, izolirane električne žice ipd. Ekstruderji so stroji, ki iz zalogovnika prevzeto maso zgostijo, premešajo, stalijo ali tudi kemijsko spremenijo in jo nato kontinuirno iztiskajo skozi matrico in ne v orodje kakor pri injekcijskem brizganju. Po postopku pihanja izdelujemo steklenice, posode za tekoča goriva in kemikalije, sode in druge votle izdelke.

## 9.2 PENJENE UMETNE MASE

Nekaterim umetnim masam lahko občutno spremenimo lastnosti tudi s postopkom penjenja. Pri penjenju dosežemo celično strukturo umetne mase z vmešavanjem plina  $\text{CO}_2$  ali  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  ali pa z vplinjevanjem tekočih penilcev. Umetna masa pri segrevanju ekspandira do zahtevane gostote in oblike oziroma znatosti. Lahko pa sredstvo za penjenje dodamo pod povišanim tlakom v talino, npr. pred ekstrudiranjem. Na ta način zmanjšamo gostoto in dobimo lahek, toplotno in zvočno izolacijski material v industriji in gradbeništvu.

Glede na vrsto umetne mase razlikujemo več postopkov predelave:

- ✚ stiroporni postopek (EPS – ekspaniran polistiren),
- ✚ termoplastične brizgane pene in
- ✚ reakcijske brizgane pene (Navodnik in Kopčič, 1998, 124).

Mehanske lastnosti penjenih umetnih mas so odvisne od izhodnih surovin in gostote pene. Glede na postopek razlikujemo med trdimi in mehкими penami. Najbolj razširjena je lahka (EPS in EPP) pena za embalažo in toplotno ter zvočno izolacijo, medtem ko se mehke pene uporabljajo predvsem v pohištveni in avtomobilski industriji.

([www.fragmat.si/slo/08.htm](http://www.fragmat.si/slo/08.htm), 19. 08. 2010).

Pri termoplastičnih brizganih penah se pogosto uporablja dvokomponentno ali »sendvič« brizganje, medtem ko postopek reakcijskega brizganja uporabljamo za reakcijske tekoče smole poliuretani (PUR), ki jih penimo v blokih ali kalupih (Navodnik in Kopčič, 1998, 125).



Slika 50: EPS lončki za enkratno uporabo

Vir: <http://www.mirkem.si/proizvodnja.php> (19. 08. 2010)

### Povzetek

Umetne mase so organske kemične spojine ogljika (C), vodika (H), dušika (N), kisika (O) in nekaterih drugih elementov.

Pridobivamo jih povsem sintetično, večinoma s postopki kemijskega spajanja, ki temeljijo na osnovnih kemičnih reakcijah, kot so: **polimerizacije, polikondenzacija in poliadicija**. Pri tem se kemično spajajo majhne molekule ali **monomer** v večjo **makromolekulo**.

Molekule umetnih mas so medsebojno povezane v dolge linearne, razvejane ali močno zamrežene verige.

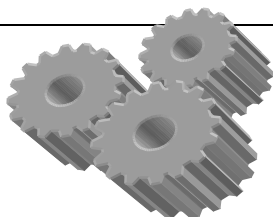
Oblika verige in molekularna sestava ter dodatki vplivajo na lastnosti in uporabo umetne mase.

Glede na obliko verige delimo umetne mase na elastoplaste, termoplaste in duroplaste.

Za **termoplaste** je značilna linearna molekularna veriga. Ker so kemijske vezi med molekulami v primerjavi z **duroplasti** zelo šibke, lahko termoplaste ponovno uporabimo, preoblikujemo in varimo, tudi recikliramo, medtem ko duroplasti teh sposobnosti nimajo.

Nenehna razvojna prizadevanja so usmerjena k izboljšanju nekaterih posebnih lastnosti umetnih mas.

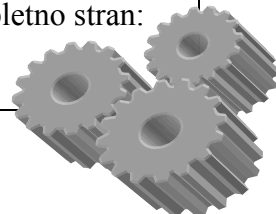
Umetne mase so zelo dobro obdelovalne in preoblikovalne, glede urejenosti notranje zgradbe, so lahko amorfne in delno kristalinične, kar vpliva na njihovo deformacijsko stanje in uporabo.



### Vprašanja za preverjanje razumevanja

- Glede na podane mehanske lastnosti v tabelah 6 in 7 narišite in pojasnite diagram napetost – raztezek za krhko in žilavo umetno maso.  
Narisan diagram primerjajte z diagramom za kovinske materiale in komentirajte vaše ugotovitve.

2. Navedite in pojasnite razlike med termoplasti in duroplasti.
3. Pojasnite razliko med amorfno in kristalinično strukturo umetne mase.
4. Navedite in pojasnite glavne razlike med umetnimi masami, kovinskimi in keramičnimi materiali.
5. Primerjajte in pojasnite mehanske in fizikalne lastnosti kovinskih materialov in umetnih mas.
6. Presodite in navedite glavni razlog, zakaj nekateri avtorji menijo, da so umetne mase material 3. tisočletja.
7. V tabeli primerjajte mehanske in fizikalne lastnosti ter uporabo nekaterih duroplastov in termoplastov. Navedite vaše ugotovitve.
8. Navedite glavne prednosti nekovinskih kompozitnih materialov. Uporabite spletno stran: [http://sl.wikipedia.org/wiki/Kompozit#Polimerni\\_kompoziti](http://sl.wikipedia.org/wiki/Kompozit#Polimerni_kompoziti)
9. Pojasnite izraz zamreženje in posledice zamreženja za lastnosti umetnih mas.



## 10 KOROZIJA




### Uvod v poglavje

Kovinski materiali so v obliki različnih izdelkov, konstrukcijskih elementov, sestavnih delov strojev in naprav izpostavljeni mehanskim in toplotnim kakor tudi različnim **kemičnim in elektrokemičnim vplivom**. Tako imenovani korozijski dejavniki, ki povzročajo nenamerno razpadanje kovin, so najpogosteje vlažna atmosfera, zemeljska tla, morska in sladka voda, razne kemikalije, vodne raztopine, vroči plini, neustrezna maziva, zaradi kemikalij onesnažen zrak, kisli dež, industrijska atmosfera in drugo.

Po definiciji je korozija nenamerni kemični ali elektrokemični vpliv na material, pri čemer se spreminja njegova struktura od površine proti notranjosti (Krautov strojniški priročnik, 2007, 781).

Opazovanje korozijskih pojavov je potrdilo, da je korozija izražena v različnih oblikah. Klasifikacija temelji na morfološkem videzu korozijskih poškodb. Zato je pri reševanju korozijske problematike zelo pomembno, da predvidimo, opredelimo in upoštevamo možno obliko korozijskega delovanja že pri izbiri materiala.



*V poglavju o koroziji boste spoznali in razumeli:*

-  *mehanizem korozijskega procesa,*
-  *vrste in oblike korozije,*
-  *ukrepe in oblike protikorozijske zaščite.*

### 10.1 VRSTA KOROZIJE

Korozija se nenamerno običajno začne na površini kovine, in sicer zaradi **kemičnih ali elektrokemičnih** procesov, ki jih sproži termodinamična nestabilnost kovinskih površin v nekem okolju.

Glede na mehanizem korozijskega procesa razlikujemo:

-  kemično korozijo ali suho korozijo in
-  elektro-kemično korozijo.

Pogoj za kemično ali suho korozijo je delovanje medija, kot so vroči plini in visoko pregrete pare na kovinsko površino.

Najpogostejše kemično delovanje suhega medija na površini kovine je oksidacija, pri kateri se površina prevleče s tanko prevleko oksida. Če je le-ta brez por, trdno in enakomerno razporejena po vsej površini, lahko dobro zaščiti pred napredovanjem korozije. Ob morebitnih razpokah ali poškodovani oksidni prevleki se oksidacija nadaljuje pod površino in material bo korodiral.

**Elektrokemijska** korozija »grozi« povesod tam, kjer se stikata dve kovini in je med njima medij, ki prevaja električni tok. To vlogo lahko vrši tudi morska ali sladka voda, vlaga, rastlinski sokovi, zemlja ali atmosfera. V dotiku s kovino nastajajo soli elektrolitov, kovina pa se razkrajja. Razkroj kovine je pogojen s premeščanjem elektronov z mesta, kjer je njihova koncentracija večja, na mesto z nižjo koncentracijo elektronov.

Če se v raztopini elektrolita nahajata dve različni kovini, obstaja med njima električna napetost ali potencialna razlika. Tako kombinacijo: *kovina1\_raztopina\_kovina2* imenujemo galvanski člen. Manj plemenita kovina elektrone odda, zato so ioni pozitivno nabiti kationi in potujejo kot električno pozitivni skozi elektrolit proti negativni katodi. Manj plemenita kovina – anoda se razkrajja, plemenitejša kovina pa se žaščiti.

Elektrokemični potencial ali standardna napetost je merilo oziroma težnja kovine za oksidacijo. Glede na elektrokemični potencial kovin nasproti vodik, ki ima potencial  $\pm 0$  Voltov, so kovine razvrščene v napetostno vrsto (tabela 8).

Tabela 8: Normalni potencial kovin do vodikove elektrode

KOVINA	NAPETOST [V]
Platina	+1,60
Zlato	+1,31
Srebro	+0,81
Baker	+0,35
VODIK	<b>0,00</b>
Nikelj	-0,25
Kobalt	-0,29
Železo	-0,44
Krom	-0,51
Cink	-0,76
Mangan	-1,10
Aluminij	-1,69
Magnezij	-2,40

Vir: Metalurški priročnik, 1972, 216

Plemenite kovine imajo pozitivni električni potencial in so zelo obstojne proti koroziji. Čim nižji električni potencial ima kovina, tem lažje oksidira. Znanе konstrukcijske kovine so na neplemeniti strani, vendar so na primer aluminij, magnezij in krom na zraku dobro obstojni, ker se prevlečejo s tanko plastjo nepropustnega oksidnega filma, ki jih sicer ščiti pred nadaljnjo oksidacijo, vendar ne vedno.

Za nastanek lokalno kratko sklenjenega galvanskega člena zadostujejo že vključki tujih kovin na kovinski površini. Elektrokemični potencial posameznih sestavin kristalnih zrn je lahko različen zaradi neenakomernosti mehanskih obdelav ali deformacije. Vlogo elektrolita pa lahko prevzame tudi vodni film, ki nastane na vsaki kovinski površini zaradi atmosferske

## Materiali

vlage. Zato moramo pri konstrukcijah preprečevati spoje iz kovin z različnimi elektrokemičnimi potenciali (vijaki, kovice, zvari, čepi itd.).

Glede na okolje, v katerem potekajo korozijski procesi, razlikujemo različne vrste elektrokemične korozije kovin, in sicer:

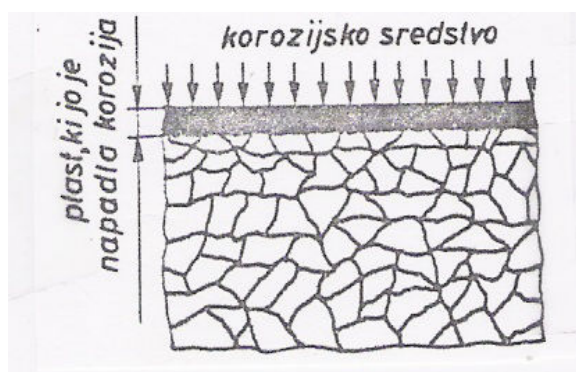
- ✚ korozija v vodnih raztopinah,
- ✚ atmosferska korozija (zajema tudi korozijo zaradi vlažnih plinov),
- ✚ podzemeljska korozija,
- ✚ kontaktna korozija (pri nastanku galvanskih členov) in
- ✚ biokorozija (zaradi delovanja produktov različnih mikroorganizmov).

Glede na pojavne oblike korozije razlikujemo:

- ✚ splošno površinsko korozijo,
- ✚ kontaktno ali galvansko,
- ✚ selektivno,
- ✚ interkristalno,
- ✚ napetostno ali transkristalno,
- ✚ lokalno špranjsko (jamičasto) in
- ✚ erozivno korozijo.

**Površinska enakomerna** korozija poteka s kemičnim mehanizmom, ker jo povzročajo predvsem kemične reakcije, na primer oksidacija površine. Pri železu in jeklu se pojavi najprej v obliki tanke plasti **rje**.

Za korodirajočo kovino je značilna postopna pretvorba v **oksidno** obliko. Tako je na primer pri aluminiju (Al), bakru (Cu) in kromu (Cr) začetna stopnja korozije zaželeno, ker na površini nastajajo goste oksidne naravne plasti, ki zavrejo nadaljnji proces oksidacije. Take plasti nastajajo v trenutku do nekaj desetletij. Za uspešno pasivizacijo je odločilna gostota plasti, saj je napredovanje oksidacije možno skozi porozno plast, zato mora biti poroznost dobre pasivne plasti manjša od 0,01 % celotne površine. To vrsto korozije lahko hitro opazimo.

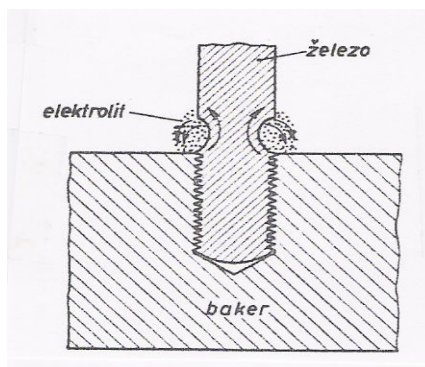


Slika 51: Primer splošne površinske korozije

Vir: Gradiva II, 1978, 313

Napredovanje korozije se zaustavi, če se produkti korozije tesno in trdno oprimejo površine (Cr, Al).

**Kontaktno, galvansko** korozijo povzročajo elektrokemični procesi povsod tam, kjer sta dve kovini v neposredni zvezi v stiku z elektrolitom, ki je lahko tekočina ali atmosfera. Zaradi različnega kemičnega potenciala tvorita lokalni galvanski člen.



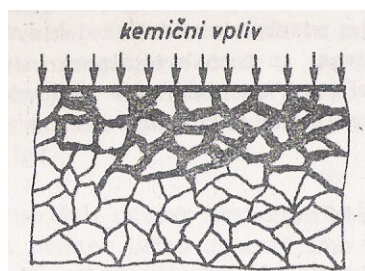
Slika 52: Kontaktna korozija

Vir: Građiva II, 1978, 316

V praksi se pojavlja kontaktna korozija pri konstrukcijah, sestavljenih iz različnih kovin, zlasti pri spojnih elementih, kot so vijaki, kovice, čepi, zvari, loti ipd. Na sliki 52 je prikazan »galvanski člen«, ki ga tvorita vijak iz železa oziroma jekla in baker. Kot elektrolit lahko delujejo že kondenzati iz atmosfere.

Proces kontaktne korozije lahko sprožijo tudi razlike mikrostrukturnih sestavin v večfaznih zlitinah.

**Selektivna** korozija se najpogosteje pojavi pri zlitinah, če korodirajo le določene faze zlitine ali pa poteka korozijski napad vzdolž posebnih nečistoč npr. v sivi litini ferit korodira, grafit ali pa  $Fe_3C$  pa ne.



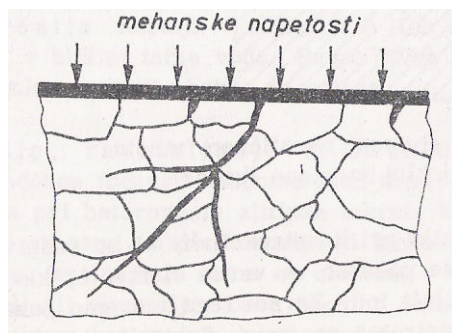
Slika 53: Primer interkristalne korozije

Vir: Građiva II, 1978, 315

O **interkristalni** koroziji govorimo, če korozijski napad poteka vzdolž kristalne meje (slika 53). Stopnja interkristalne korozije je odvisna od mikrostrukture in se lahko pojavi tudi pri korozijsko ali kemično obstojnih jeklih, kot so nerjavna jekla. Vzrok interkristalne korozije je diskontinuiranost elektrokemičnega potenciala na meji med kristalnimi zrnji. V večini primerov gre za spremembo mikrostrukture zaradi toplotnih vplivov, kot je na primer varjenje. Zaradi različne ohlajevalne hitrosti po varjenju se mikrostruktura lahko spremeni tako, da posamezna mesta niso več kemično obstojna, kar pa bi glede na kemično sestavo jekla pričakovali. Krom se veže z ogljikom v  $Cr_{23}C_6$  (kromov karbid). Ker se količina prostega kroma, raztopljenega v železni matici (avstenitu) zmanjša, izgubi sposobnost pasiviranja. Nerjavna jekla, ki so namenjena varjenju, naj zato vsebujejo pod 0,03 % ogljika (Metalurški priročnik, 1972, 221).



**Napetostna ali transkristalna** korozija obravnava celoten kompleks kemičnega, elektrokemičnega in mehanskega delovanja. Posledica so korozijske razpoke (slika 54), zaradi istočasnega delovanja napetosti in agresivnih medijev. Pod vplivom napetosti, ki jih lahko povzročajo zunanje obremenitve, kakor tudi preostale notranje napetosti, se lahko pojavijo najprej interkristalne razpoke, ki prehajajo v transkristalne.

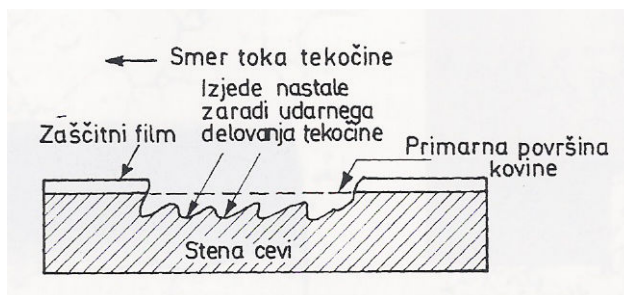


Slika 54: Primer transkristalne korozije  
Vir: Gradiva II, 1978, 315

Lokalna **špranjska** ali jamičasta korozija je v obliki številnih korozijskih izjed ali jamic, ki so posledica delovanja majhne prostornine korozijskega medija v ozki špranji ali na površini, kjer je zaščitna oksidna plast poškodovana (slika 55). Špranja lahko nastane zaradi neustrezne konstrukcijske izvedbe, uporabe tesnil, spojev kovine z nekovino ipd.



Slika 55: Jamičasta korozija vlečene jeklene cevi  
Vir: Engineering Metallurgy, 1967, 273



Slika 56: Delovanje erozivne korozije na steno kondenzatorske cevi  
Vir: Korozija kovin, 1991, 77

O **erozivni** koroziji govorimo v primeru hkratnega delovanja korozije in pretekajočega korozijskega medija npr. agresivna tekočina, ki lahko vsebuje tudi trdne delce. Erozijsko korozijo pospešujeta povečana hitrost gibanja tekočine oziroma turbolenca.

## 10.2 ZAŠČITA PROTI KOROZIJI

Površine kovinskih materialov oziroma izdelkov in konstrukcij lahko zaščitimo proti koroziji z različnimi ukrepi in postopki.

Najvažnejši protikorozijski postopki in ukrepi so:

- ✚ ustrezna izbira materiala glede na kemično sestavo in mikrostrukturo (uporaba katalogov proizvajalcev, spletnih strani in priločnikov, opravljeni korozijski testi materialov),
- ✚ ustrezni konstrukcijski ukrepi,
- ✚ dodatek inhibitorjev – kemijskih dodatkov za nastanek netopnih izločkov,
- ✚ katodna zaščita,
- ✚ površinske prevleke, premazi in
- ✚ redna kontrola oziroma vzdrževanje.

Morebitni nastanek galvanskih členov moramo preprečiti že pri konstruiranju, npr. dve različni kovini ne smeta biti v neposrednem stiku ali pa z ustrežno obliko profilov lahko preprečimo zadrževanje vlage v utorih ipd.

Inhibitorji se običajno uporabljajo v zaprtih sistemih (kemijski aparati, parni kotli, ogrevalni sistemi ipd.) z namenom, da na anodnih oziroma katodnih področjih tvorijo netopne izločke, ki preprečijo ali pa vsaj zmanjšajo hitrost galvanske korozije.

V določenih primerih lahko katodna zaščita popolnoma zaustavi proces korozije. Na primer: katoda je pod zemljo vkopan kovinski cevovod, ki ga povežemo z magnezijevo ali cinkovo (žrtveno) anodo.

Pri izbiri površinskih prevlek razlikujemo med kovinskimi in nekovinskimi prevlekami (emajli) ter organskimi premazi (barve, laki).

Pri odločitvi za kovinsko prevleko lahko izbiramo med postopki, kot so:

- ✚ potapljanje izdelka v kovinsko kopel (kositrenje, pocinkanje),
- ✚ galvanizacija (nikljanje, kromanje, platiniranje ...),
- ✚ difuzijski postopki in
- ✚ metaliziranje za kovinske materiale z nizkim tališčem (razprševanje).

Na izbiro postopka in ustrezne površinske zaščite materiala oziroma izdelka ali konstrukcijskega dela vpliva:

- ✚ kemična sestava in mikrostruktura,
- ✚ velikost, dimenzija, masa, število izdelkov,
- ✚ zahtevana kakovost in barva površine,
- ✚ trdota oziroma zahtevana obrabna odpornost površine,
- ✚ izpostavljenost korozijskim dejavnikom ipd.

Vendar tudi kakovostni nanosi varovalnih prevlek niso trajni, zato je za preprečevanje in upočasnitev korozijskih procesov zelo pomembno redno vzdrževanje.

[http://www.pocinkovalnica.si/korozija\\_in\\_zascita.asp](http://www.pocinkovalnica.si/korozija_in_zascita.asp), 25. 09. 2010).

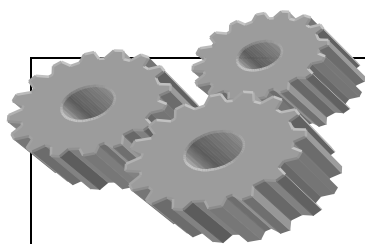
## Povzetek

Vsi materiali, predvsem kovinski, so bolj ali manj občutljivi za korozijo. Povzročajo jo kemični, predvsem pa elektrokemični vplivi okolja. Glede na mehanizem korozije ločimo kemično in elektro-kemično korozijo. Najpogostejše oblike korozije pa so:

- ✚ površinska korozija,
- ✚ lokalna (špranjska, jamičasta, točkasta),
- ✚ selektivna,
- ✚ interkristalna,
- ✚ napetostno ali transkristalna,
- ✚ galvanska ali kontaktna in
- ✚ erozivna korozija.

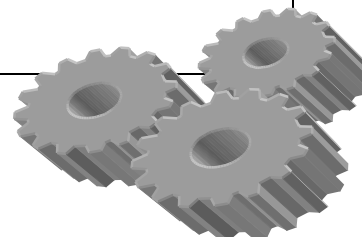
Posledica korozije so različne okvare in zlomi konstrukcij ter strojev, izpad proizvodnje, onesnaženje okolja, neustrezno konstruiranje, kar povzroča ogromno neposredno in posredno gospodarsko škodo. Korodirani materiali, ki jih opazujemo v vsakdanjem življenju, so v glavnem posledica delovanja elektrokemične korozije, ki predstavlja okrog 95 % vse škode (<http://www.sc-nm.com>, 23. 09. 2010).

Za določanje korozijske obstojnosti materialov se v skladu s standardi SIST EN in ISO uporabljajo korozijski testi (<http://iskraemeco-lab.si/> in <http://www.acroni.si>, 23. 09. 2010).



### Vprašanja za preverjanje razumevanja

1. Navedite ukrepe, s katerimi bi omejili korozijo kovinskih materialov.
2. Kateri pogoji so potrebni za potek elektrokemijske korozije?
3. Navedite in pojasnite vzroke za točkovno korozijo.
4. Pri izbiri konstrukcijskega materiala je potrebno upoštevati tudi njegovo korozijsko odpornost. Izberite in navedite oznake jekel, ki so primerna za izdelavo sestavnih delov, ki so izpostavljeni agresivnim medijem v kemični industriji.
5. Za spajanje dveh jeklenih profilov lahko uporabimo kovičenje, spajkanje ali varjenje. Pojasnite in utemeljite, kateri postopek spajanja bi uporabili, da bi preprečili korozijski napad spojenih delov.
6. Izberite ustrezno zaščito proti koroziji za podzemeljsko kovinsko konstrukcijo.
7. Izberite ustrezno zaščito proti koroziji za jekleno pločevino, ki se v prehrabeni industriji uporablja za izdelavo pločevink.



## 11 LITERATURA

- Ashby, M. F. *Materials and the Environment*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009.
- Berginc, B. et al. Brizganje prašnatih materialov. *IRT3000: inovacije razvoj tehnologije*, 2007, let. 2, št. 10, str. 122–124.
- Džordžević, V. *Mašinski materijali*. Beograd: Mašinski fakultet, 2000.
- Jocić, B. *Slovenska jekla: Jekla in železove litine*. Ljubljana: Slovenske železarne d.d.: 1996.
- Kisin, M. Vpliv različnih struktur na obdelovalnost aluminijevih zlitin. *Strojniški vestnik*: 1993, let. 39, št. 3/4, str. 117–119.
- Kolar, D. *Tehnična keramika 1, 2*. Ljubljana: Zavod RS za šolstvo in šport, 1993.
- Kopač, J. Soković, M. *Tehnika odrezavanja: sodobna rezalna orodja*. Ljubljana: UL, Fakulteta za strojništvo, 1993.
- Kosovinc, I. *Metalografija*. Ljubljana: UL Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, 1980.
- Kovač, M.: *Gradiva*. Ljubljana: UL Fakulteta za strojništvo, 1999.
- Kraut, B. *Kovine v strojništvu*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Strojniški vestnik, 1975.
- Leskovar, P. *Gradiva I. in II. del*. Ljubljana: UL Fakulteta za strojništvo, 1978.
- Llewellyn, D.T. *Steels: Metallurgy and Applications*. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd., 1992.
- Malavašič, T. *Polimerni materiali*. Ljubljana, 1992.
- Mondolfo, L. Zmeskal, O. *Engineering Metallurgy*. Zagreb: Tehnična knjiga, 1967.
- Navinšek, B. *Trde zaščitne prevleke*. Ljubljana: Institut Jožef Stefan, 1993.
- Navodnik, J. in Kopčič, M. *Plastik-Orodjar*. Velenje: Navodnik d.o.o, 1998.
- Puhar, J., et al. *Krautov strojniški priročnik*. Ljubljana: Littera picta, 2007.
- Roll, F. *Handbuch der Giesserei Technik*. Muenchen: Carl Hanser Verlag, 1960.
- Schumann, H. *Metallographie*. Leipzig: Fachbuchverlag, 1958.
- Skupina avtorjev. *Metals Handbook Vol. 3*. Ohio: American Society for Metals, 1992.
- Skupina avtorjev. *Metalurški priročnik*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije, 1972.
- Slovenski inštitut za standardizacijo, (online). 2010. (citirano 11. 06. 2010). Dostopno na naslovu: <http://www.sist.si/>

*Materiali*

Šprajc, P. Šola varjenja. *Varilna tehnika*: 2010, letnik 59, št. 1, str. 28–32.

Prodajni katalog. *Iscar Turning tools*. Israel, 2004.

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

## 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.