

Tehnički materijali : metalni materijali

Golubić, Stjepan

Authored book / Autorska knjiga

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Publication year / Godina izdavanja: **2019**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:144:251933>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository of Bjelovar University of Applied Sciences](#)

Stjepan Golubić

TEHNIČKI MATERIJALI

I. dio

metalni materijali



Bjelovar, 2019.

dr. sc. Stjepan Golubić

Tehnički materijali

Izdavač

Veleučilište u Bjelovaru

Za izdavača

dr. sc. Zrinka Puharić, dr. med.

Tehnički urednik

dr. sc. Stjepan Golubić

Recenzenti

izv. prof. dr. sc. Darko Landek

Tomislav Pavlic, mag. ing. mech.

Lektura

Valentina Jakopec, mag. educ. croat. et mag. educ. hist.

Tisak

Daruvarska tiskara d.d. Daruvar

Naklada

80 kom.

ISBN 978-953-7676-28-5 (cjelina)

ISBN 978-953-7676-29-2 (dio 1)

CIP zapis je dostupan u računalnome katalogu Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu pod brojem 001043048.

© Nijedan dio ove knjige ne smije se preslikavati, umnožavati ni na bilo koji način reproducirati bez prethodne suglasnosti autora, osim u slučajevima kratkih navoda u stručnim člancima

Stjepan Golubić

TEHNIČKI MATERIJALI

I. dio

metalni materijali



Bjelovar, 2019.

Predgovor

Ovaj udžbenik namijenjen je prvenstveno studentima mehatronike Veleučilišta u Bjelovaru. Sadržaj je usklađen s nastavnim programom predmeta Tehnički materijali. Predmet Tehnički materijali studenti mehatronike Veleučilišta u Bjelovaru slušaju u I. semestru.

Programom studija predviđen je sljedeći sadržaj predmeta:

- Osnove metalografije
- Metalni materijali
- Željezni materijali
- Toplinska obrada
- Neželjezni (laki i obojeni) materijali
- Sinterirani metali
- Nemetali
- Polimeri
- Keramički materijali
- Ostali nemetali
- Ispitivanja mehaničkih i tehnoloških svojstava
- Ispitivanje statičke i dinamičke izdržljivosti
- Ispitivanje tehnoloških svojstava materijala
- Ispitivanje tvrdoće
- Statički vlačni i tlačni pokus
- Označavanje materijala i primjena
- Označavanje prema različitim normama
- Primjena

Sadržaj

UVOD	1
1. KRISTALNI SUSTAVI	2
1.1 Građa materijala.....	2
1.2 Struktura metalnih materijala	4
1.2.1 Izgradnja rešetki kod legura	7
1.3 Kristalizacija.....	9
1.3.1 Nepravilnosti u kristalima	12
1.3.2 Dijagrami stanja	14
1.3.2.1 Izomorfni dijagram stanja	16
1.3.2.2 Eutektički dijagram stanja.....	17
1.3.2.3 Peritektički dijagram stanja.....	18
1.3.2.4 Eutektoidni dijagram stanja	19
1.3.2.5 Monotektički dijagram stanja.....	20
1.3.2.6 Dijagram stanja željezo – ugljik.....	21
1.3.2.7 Procjena mehaničkih svojstava ugljičnih čelika na temelju sastava i mikrostrukture	29
1.3.3 Računsko određivanje tvrdoće čelika.....	29
1.3.4 Računsko određivanje vlačne čvrstoće čelika	30
1.4 Karakterizacija mikrostrukture	30
2. TOPLINSKA OBRADA	36
2.1 Postupci toplinske obrade	42
2.1.1 Postupci žarenja.....	43
2.1.2 Kaljenje čelika.....	51
2.1.3 Popuštanje čelika.....	57
2.1.4 Poboľšavanje čelika	57
2.1.5 Površinsko kaljenje čelika.....	60
2.1.6 Toplinsko-kemijski postupci toplinske obrade.....	61
3. SISTEMATIZACIJA MATERIJALA	73

4.	ŽELJEZNI MATERIJALI.....	75
4.1	Povijest razvoja željeznih legura	75
4.2	Čelici.....	76
4.2.1	Dobivanje čelika.....	76
4.2.2	Djelovanje primjesa na svojstva čelika	78
4.2.3	Djelovanje legiranih elemenata na svojstva čelika	79
4.2.4	Sistematizacija čelika	82
4.2.5	Konstruktivni čelici.....	83
4.2.5.1	Opći konstruktivni čelici	84
4.2.5.2	Čelici povišene čvrstoće.....	86
4.2.5.3	Konstruktivni ugljični čelici za tanke limove	88
4.2.5.4	Konstruktivni niskougljični čelici za trake	89
4.2.5.5	Konstruktivni čelici za žicu	89
4.2.5.6	Čelici za vijke, matice i zakovice.....	90
4.2.5.7	Konstruktivni čelici za cementiranje	91
4.2.5.8	Konstruktivni čelici za poboljšavanje.....	93
4.2.5.9	Konstruktivni čelici za površinsko kaljenje.....	98
4.2.5.10	Čelici za opruge	99
4.2.5.11	Konstruktivni čelici poboljšane rezljivosti	100
4.2.5.12	Konstruktivni korozivni postojani čelici (nehrđajući čelici).....	100
4.2.5.13	Konstruktivni čelici za rad na povišenim i visokim temperaturama	102
4.2.5.14	Vatrootporni čelici	106
4.2.5.15	Konstruktivni čelici za rad na niskim temperaturama	107
4.2.5.16	Visokočvrsti čelici	108
4.2.6	Alatni čelici	108
4.2.6.1	Alatni čelici za hladni rad	109
4.2.7	Brzorezni čelici.....	113
4.3	Željezni ljevovi	114
4.3.1	Čelični ljev	116

4.3.2	Bijeli tvrdi lijev	118
4.3.3	Sivi lijev	118
4.3.4	Nodularni lijev.....	123
4.3.5	Temper-ljev (kovkasti lijev).....	126
5.	NEŽELJEZNI METALI (LAKI I OBOJENI METALI) I LEGURE	128
5.1	Teški obojeni metali	128
5.1.1	Bakar i legure bakra	129
5.1.2	Nikal i legure nikla.....	138
5.1.3	Kobalt i njegove legure	140
5.2	Laki obojeni metali.....	141
5.2.1	Aluminij i njegove legure.....	141
5.2.2	Titan i njegove legure.....	148
5.2.3	Magnezij i njegove legure	150
6.	SINTERIRANI MATERIJALI.....	153
6.1	Postupak sinteriranja.....	153
6.2	Sinterirani dijelovi i alati	155
6.3	Tvrđi metali	159
7.	LITERATURA	163

UVOD

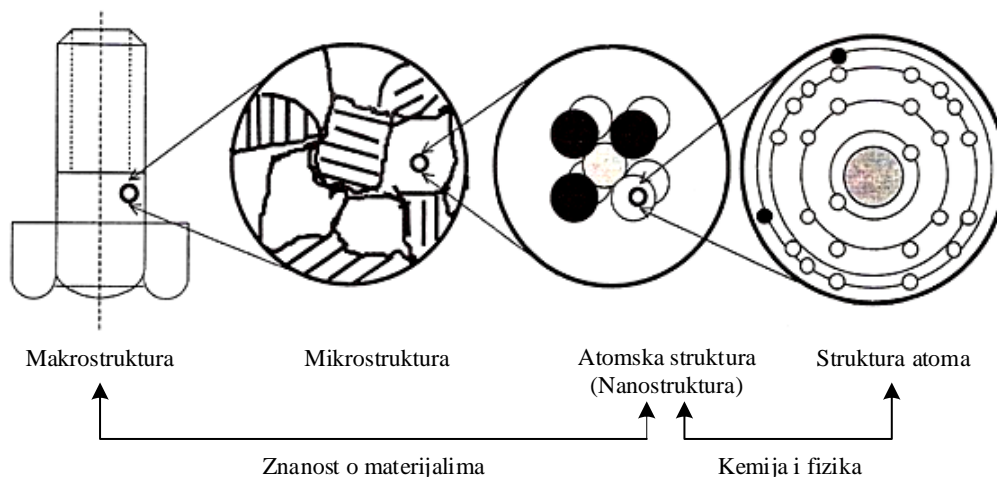
Tehnički su materijali oni materijali od kojih se izrađuju tehnički proizvodi, a posjeduju kombinaciju povoljnih fizikalnih svojstava koja nazivamo tehnička svojstva [1]. Tehnički materijali moraju se moći prerađivati tebiti pristupačni cijenom proizvodnje i prerade. Proizvodnja raznih dobara i prerada materijala u poluproizvode i gotove proizvode znatan je dio inženjerske djelatnosti. Za kreiranje tehničkih proizvoda i proizvodnih sustava uz mnoga druga znanja inženjeri trebaju poznavati i unutarnju građu i svojstva materijala kako bi izabrali optimalan materijal i primjerenu tehnologiju obrade za određeni proizvod.

Svojstva tvari (i materijala) važna za tehničku primjenu obuhvaćaju opća svojstva (gustoća), fizikalna svojstva (npr. toplinska vodljivost, toplinski kapacitet, električna vodljivost/dielektričnost, magnetičnost, modul elastičnosti itd.), kemijska, optička itd. Uz opća, svojstva materijala (i poluproizvoda) obuhvaćaju i: mehanička, tribološka, korozijska, tehnološka, ekonomska i ekološka svojstva. Neka svojstva materijala ovisna su o uvjetima ispitivanja, obliku i dimenzijama ispitne epruvete, mikrostrukturi, stanju materijala itd. Nakon što se materijali ugrade u određeni proizvod, provode se ispitivanja eksploatacijskih svojstava proizvoda i ispitivanja ponašanja materijala u složenim eksploatacijskim uvjetima [2].

1. KRISTALNI SUSTAVI

1.1 Građa materijala

Za razumijevanje svojstava i ponašanja materijala u eksploataciji nužno je poznavanje njegova kemijskog sastava i mikrostrukture. Mikrostruktura materijala nastaje djelovanjem tehnoloških postupaka praoblikovanja, preoblikovanja i oplemenjivanja na materijal određenog kemijskog sastava. Svojstva materijala određena su njegovom mikrostrukturom i kemijskim sastavom. U proučavanju mikrostrukture i svojstava metala, legura i keramike polazna razina proučavanja bit će njihova kristalna rešetka, odnosno njoj pripadna jedinična ćelija [2].

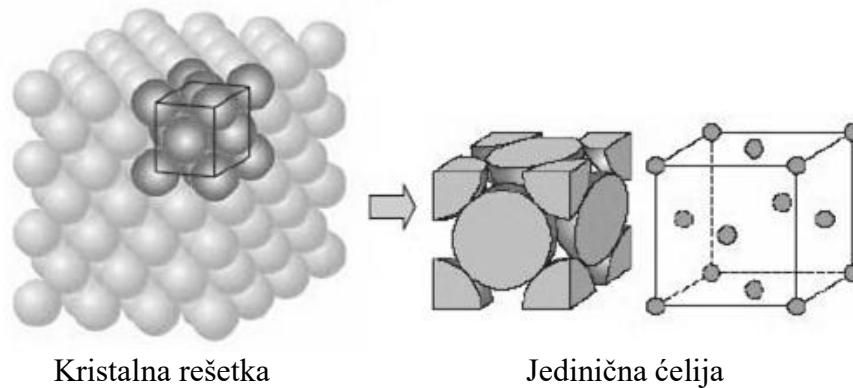


Slika 1.1 Prikaz razina građe materijala i područje istraživanja znanosti o materijalima [1]

Pravilno raspoređivanje atoma zovemo kristalizacijom, a nastale tvorevine nazivamo kristalima. Čiste tvari u čvrstom stanju pokazuju karakterističnu građu: od kristalinične do amorfne. Metalni materijali imaju kristalnu građu. Polimerni materijali imaju amorfnu ili kristaliničnu građu. Karakteristika kristala stalna je i pravilan raspored atoma koji se ponavlja u prostoru. Kristaliti su osnovni agregati skrućenog stanja kod kojih pravilan raspored vlada samo u unutrašnjosti, bez pravilnosti na vanjskim plohama. Proučavanjem nanostrukture, rasporeda atoma u kristalima i kristalitima bavi se kristalografija. Osim toga, kristalografija proučava vanjski geometrijski oblik i unutarnju građu kristala, rast kristala, pogreške u kristalima, površinska svojstva kristala i dr. Za predočavanje rasporeda atoma (iona) u kristalnoj rešetki služimo se geometrijskim modelima u kojima su atomi predočeni kuglama i složeni u geometrijsko tijelo određenog oblika prema vani omeđeni pravilnim plohama.

Svaki kristal ima određen geometrijski oblik i kutove između određenih ploha koji su posljedica unutrašnje građe, tj. rasporeda strukturnih jedinica – atoma, iona, molekula.

Prostorni raspored strukturnih jedinica ponavlja se u svim smjerovima u prostoru i naziva se prostorna rešetka (slika 1.2). Najmanji dio prostorne rešetke koji se ponavlja u prostoru naziva se jedinična ili elementarna ćelija [2].



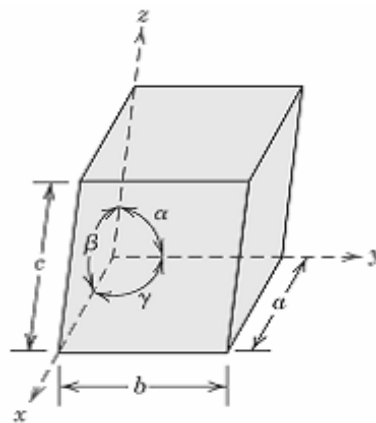
Kristalna rešetka

Jedinična ćelija

Slika 1.2 Izdvajanje jedinične ćelije iz kristalne rešetke [2]

Za opis i ispitivanje kristalne građe definira se kristalni sustav (analogno definiranju geometrijskog koordinatnog sustava). Kristalni sustav (slika 1.3) sastoji se od:

- kristalnih osi simetrije: x , y , z (poklapaju se sa stranicama jedinične ćelije)
- kutova između osi: α , β , γ
- parametara po kristalnim osima: a , b , c (najmanja međusobna udaljenost atoma).



Slika 1.3 Osnovni elementi kristalnog sustava [2]

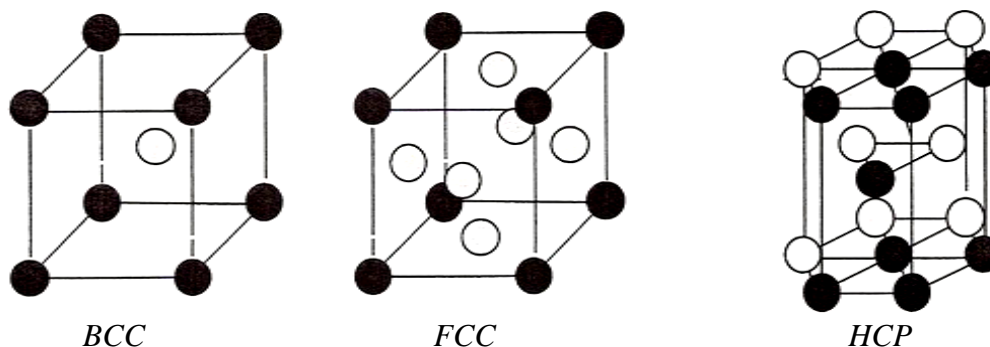
Osim osnovnih elementa, za svaki kristalni sustav mogu se izvesti dodatni parametri:

- pripadni broj atoma (PBA): broj atoma koji pripada jednoj jediničnoj ćeliji
- koordinacijski broj (KB): broj atoma koji „dodiruju“ pojedini atomi ili broj najbližih susjednih atoma
- faktor gustoće slaganja atoma (FGSA): pokazuje kako je iskorišten prostor kojim atomi raspolažu u promatranom koordinatnom sustavu.

1.2 Struktura metalnih materijala

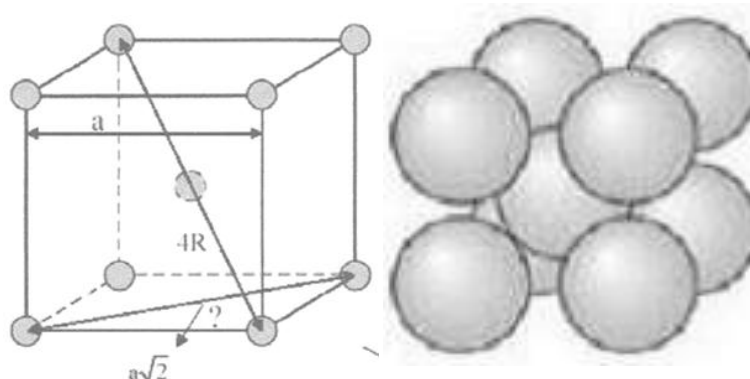
Sve kristalne strukture mogu se prikazati s četrnaest vrsta jediničnih ćelija razvrstanih u sedam kristalnih sustava: kubni, heksagonski, tetragonski, rompski, romboedarski, triklinski i monoklinski sustav.

Metale možemo opisati kao materijale kristalne strukture kod kojih su ioni povezani indirektno, poljem slobodnih elektrona koji ih okružuju. Svaki ion privlači susjedne ione tvoreći gusto složene strukture kratkih veza koje daju dobru čvrstoću i relativno visoku gustoću, dobru električnu i toplinsku vodljivost, duktilnost i sposobnost refleksije svjetlosti. Većina tehničkih metalnih materijala kristalizira u kubičnom kristalnom sustavu, a samo njih nekoliko u heksagonskom sustavu. U kubičnom kristalnom sustavu metali kristaliziraju u obliku prostorno centrirane jedinične ćelije ili u obliku plošno centrirane jedinične ćelije. U heksagonskom kristalnom sustavu za tehničke materijale najvažnija je gusto složena heksagonska jedinična ćelija u kojoj su atomi različito složeni u dvije naizmjenično ponavljane ravnine [2].



Slika 1.4 Oblici najvažnijih jediničnih ćelija [1]

Prostorno centrirana kubna ćelija - BCC

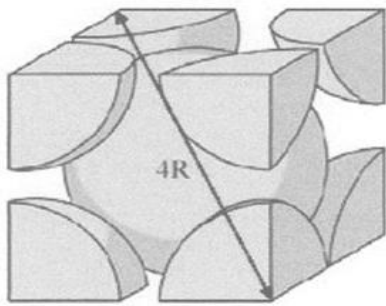


Slika 1.5 Prostorno centrirana kubna ćelija (BCC)

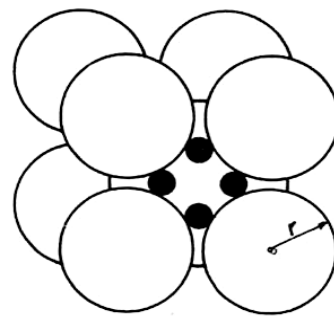
Prostorno centriranu kubnu ćeliju (BCC, engl. *body-centred cubic*) čini 9 atoma (8 na vrhovima i jedan u sjecištu dijagonala). Od tih 9 atoma jediničnoj ćeliji pripada u cijelosti samo jedan atom (u središtu), a ostalih 8 atoma (na vrhovima) pripada djelomično i susjednim ćelijama. Jednoj kristalnoj BCC ćeliji pripadaju ukupno 2 atoma. Srednji atom dotiče svih 8 atoma koji se nalaze na vrhovima, a atomi na vrhovima ne dodiruju se. U prostorno centriranu kubnu ćeliju mogu stati 24 strana atoma polumjera $0,3 r$ bez izvitoperenja ćelije. Prema ovom tipu kristaliziraju α -željezo, Cr, Mo, V, W,

Parametar a izražen polumjerom atoma R za BCC jediničnu ćeliju je prema [3]:

$$a = 4R/\sqrt{3}$$

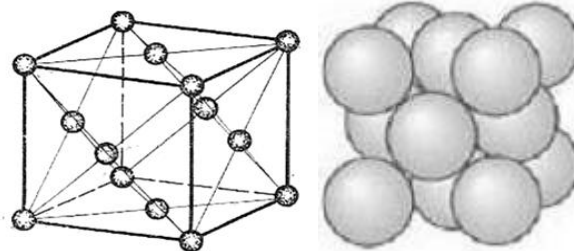


Slika 1.6 Pripadnost atoma BCC ćeliji



Slika 1.7 Položaj stranih atoma u BCC ćeliji [4]

Plošno centrirana kubna rešetka – FCC



Slika 1.8 Plošno centrirana kubna ćelija (FCC)

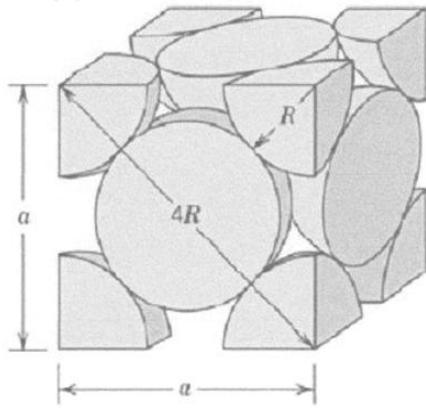
Plošno centriranu kubnu ćeliju (FCC, engl. *face-centred cubic*) čini 14 atoma: 8 na vrhovima i 6 u sjecištu dijagonala ploha.

Jednoj osnovnoj plošno centriranoj kubnoj ćeliji pripadaju ukupno 4 atoma ($8 \times 1/8$ atoma u vrhovima = 1, i $6 \times 1/2$ atoma u sjecištu dijagonala ploha = 3).

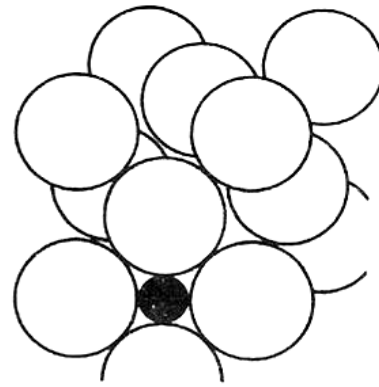
Atomi se dotiču po dijagonalama bočnih ploha. Svaki atom u središtu dijagonale plohe dodiruje 4 atoma u vrhovima.

Parametar a izražen polumjerom atoma R za FCC jediničnu ćeliju je prema [3]:

$$a = 4R/\sqrt{2}$$



Slika 1.9 Pripadnost atoma FCC ćeliji



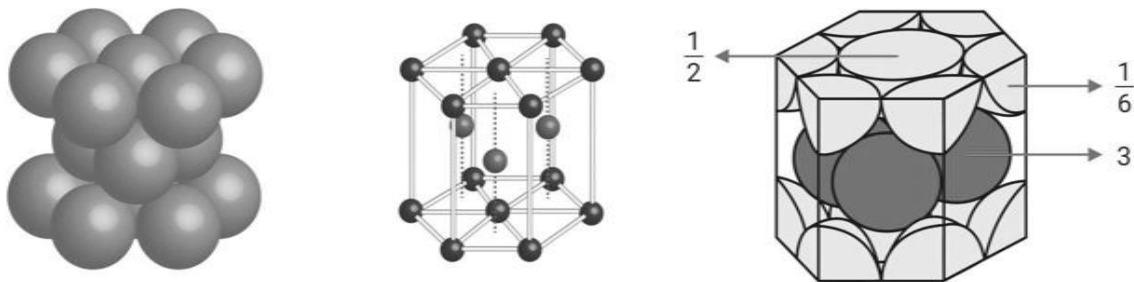
Slika 1.10 Položaj stranih atoma u FCC ćeliji [4]

Atomi u vrhovima međusobno se ne dodiruju. Međusobne udaljenosti atoma veće su nego kod prostorno centrirane kubne rešetke.

U plošno centriranu kubnu rešetku može se smjestiti 13 stranih atoma polumjera $0,4 r$ bez izvitoperenja rešetke.

Prema ovom tipu rešetke kristaliziraju γ -željezo, Al, Cu, Ni, Ag, Au, Pt,

Heksagonska kompaktna ćelija – HCP



Slika 1.11 Heksagonska kompaktna ćelija [5]

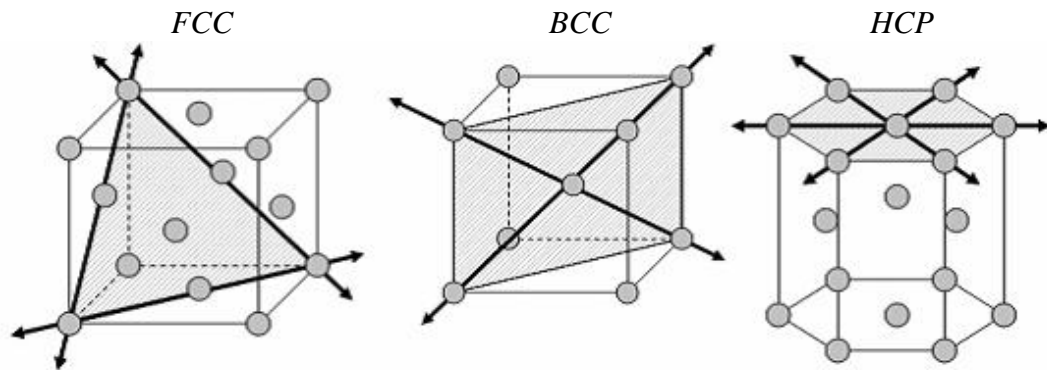
Heksagonsku kompaktnu ćeliju (HCP, engl. *hexagonal close-packed*) čini 17 atoma, i to 12 atoma u vrhovima, 2 atoma u sredini gornje i donje plohe (po jedan na svakoj plohi) i 3 atoma u sredini. Osnovnoj jediničnoj ćeliji pripada ukupno 6 atoma. Atomi gornje i donje plohe međusobno se dodiruju, 6 atoma međusobno se dodiruje i svi dodiruju sedmi atom. Tri atoma u sredini također se dodiruju, a isto tako dodiruju i tri gornja i tri donja atoma. Kod ovog tipa ima vrlo malo mjesta za smještaj stranih atoma u tu ćeliju. Prema ovom tipu kristaliziraju Zn, Cd, Mg, Ti,

Parametri a i c izraženi polumjerom atoma R za HCP jediničnu ćeliju jesu [3]:

$$a = b = 2R; \quad c = 1,633 a; \quad \gamma = 120^\circ$$

Klizne ravnine i klizni pravci

Unutar svake jedinične ćelije mogu se uočiti ravnine i pravci najgušće zaposjednutosti atomima koji čine klizni sustav metala (ili legure). Klizni sustav omogućava deformaciju metala pojedinačnim pomacima atoma ili linija atoma na kliznoj ravnini ili pravcu. Za ovakav pomak potrebne su znatno manje sile nego za istodobno pomicanje svih atoma na nekoj ravnini u cijelom kristalu. U makroskopskoj pojavi plastična deformacija sastoji se od niza uzastopnih pomaka atoma u kliznom sustavu prostorne rešetke.



Slika 1.12 Primjeri kliznih sustava FCC, BCC i HCP jedinične ćelije [2]

Neka svojstva kristala određene tvari različita su u različitim smjerovima. Ta pojava naziva se anizotropija, a pojava kada su svojstva ista u svim smjerovima naziva se izotropija. Kristalna zrna mogu pojedinačno imati anizotropna svojstva, ali zbog različite orijentacije zrna u prostoru tvar se može makroskopski ponašati izotropno.

1.2.1 Izgradnja rešetki kod legura

U tehničkoj praksi najčešće se ne koriste čisti metali. Samo nekoliko metala upotrebljava se u čistom ili u približno čistom stanju (npr. tehnički bakar i aluminij). Metalima se obično dodaju drugi elementi koji mijenjaju svojstva osnovnog metala. Tada govorimo o legurama ili slitinama.

Sa stajališta formiranja kristalnih rešetki legura, od atoma različitih elemenata, razlikujemo tri kombinacije [4]:

- a) miješane kristale
- b) kristale mješance
- c) kristale intermetalnog spoja.

Veličina atoma, relativnost valencije i električna suprotnost valencije čimbenici su o kojima ovisi hoće li legura biti građena od kristala mješanaca, miješanih kristala ili intermetalnih spojeva.

Miješani kristali nastaju u načelu od elemenata koji se uopće međusobno ne rastvaraju, odnosno jedna je komponenta potpuno netopiva u drugoj (npr. Cu-Pb legure). Svaki element razvija svoju rešetku neovisno o drugom elementu. Kristali su izmiješani po čitavoj masi legure te nastaje kruta smjesa raznovrsnih kristala.

Kada je riječ o miješanim kristalima, karakteristike legure negdje su između svojstava njezinih sastavnih elemenata jer svaki od njih pokazuje svoje značajke (sl. 1.14.a).

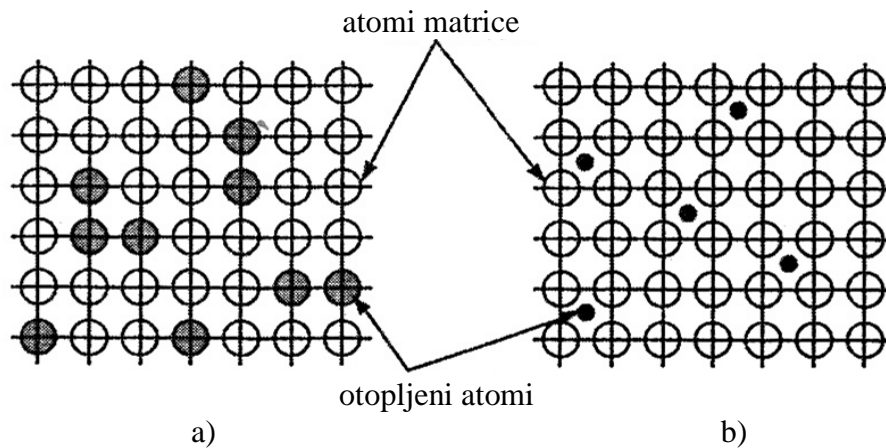
Kristali mješanci nastaju kada dolazi do izvanredno finog miješanja atoma osnovnog metala i dodanog legirnog elementa. Većina metala ima svojstvo da prima druge metalne ione, s pripadnim valentnim elektronima u svoju kristalnu rešetku. Ovako nastali kristali mješanci imaju istu građu rešetke kao i osnovni metal. Uobičajeno je da se kristali mješanci obilježavaju grčkim slovima α , β , γ -mješanci. Tada govorimo o α -mješancima, β -mješancima, γ -mješancima. Kod kristala mješanaca svojstva nelinearno ovise o koncentraciji legiranih elemenata (slika 1.14.b).

Kada atomi dodatnog elementa zauzimaju mjesta atoma osnovnog elementa, nastaju *supstitucijski ili zamjenski* kristali mješanci (slika 1.13.a). Zamjena atoma osnovne rešetke zbiva se uz izvjesne poremećaje. Poremećaji nastaju zbog različite veličine atoma. Ako su atomi dodatnog elementa veći od osnovnog, rešetka se širi, a ako su manji, rešetka se skuplja. U oba se slučaja u rešetki pojavljuju naprezanja koja rastu s porastom koncentracije atoma dodatnog elementa. Koncentracija dodatnog elementa u osnovnom je ograničena, a granična vrijednost naziva se *rastvorljivost*. Na veličinu granične rastvorljivosti utječu veličina atoma i građa vanjske elektronske ljuske.

Druga vrsta kristala mješanaca su *intersticijski* ili *uključinski* kristali mješanci. Intersticijski kristali mješanci nastaju kada atomi dodatnog elementa imaju svojstvo da se ugrađuju u međuprostore osnovne rešetke. Intersticijski atomi znatno poremećuju rešetku i njihova je rastvorljivost u osnovnoj rešetki vrlo mala, npr. u α -željezu može se otopiti najviše 0,025 % C na temperaturi 723 °C, a u γ -željezu 2,03 % C na temperaturi 1147 °C.

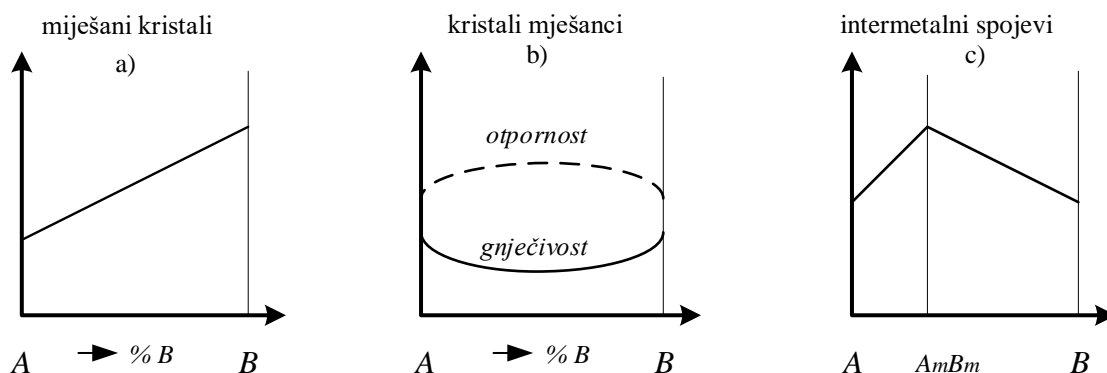
Ako osnovna rešetka sadrži samo jednu vrstu stranih atoma, onda je to dvojni ili binarni mješanac, a ako sadrži dvije ili više vrsta stranih atoma, onda govorimo o trojnom (ternarnom), kvaternarnom ili o kompleksnom kristalu mješancu.

Dodatni atomi mogu u osnovnoj rešetki zauzimati pravilan ili nepravilan raspored. Sređeni raspored naziva se i *superstruktura*. Kod superstrukture uklopljene su na određen način dvije različite rešetke jedna u drugu. Zagrijavanjem se mogu sređeni mješanci pretvoriti u nesređene i obrnuto. Pritom se mijenja niz svojstava (čvrstoća, tvrdoća, žilavost i sl.).



Slika 1.13 Kristali mješanci: a) supstitucijski, b) intersticijski [6]

Kristali intermetalnog spoja nastaju kada se dva metala spajaju u kemijski spoj. U tom slučaju elementi tvore zajedničku rešetku, ali različitu od rešetke sastavnih elemenata. To su intermetalni ili kemijski spojevi s vrlo složenim rešetkama. Obje su komponente u čvrstoj otopini metali (npr. β -CuZn, γ -Cu₅Zn₈). Svojstva kristala intermetalnog spoja mijenjaju se pod jakim utjecajem osnovnog metala do određenog kritičnog udjela legirnog elementa kada nastupa prevladavajući utjecaj udjela dodanog legirnog elementa (slika 1.14.c).



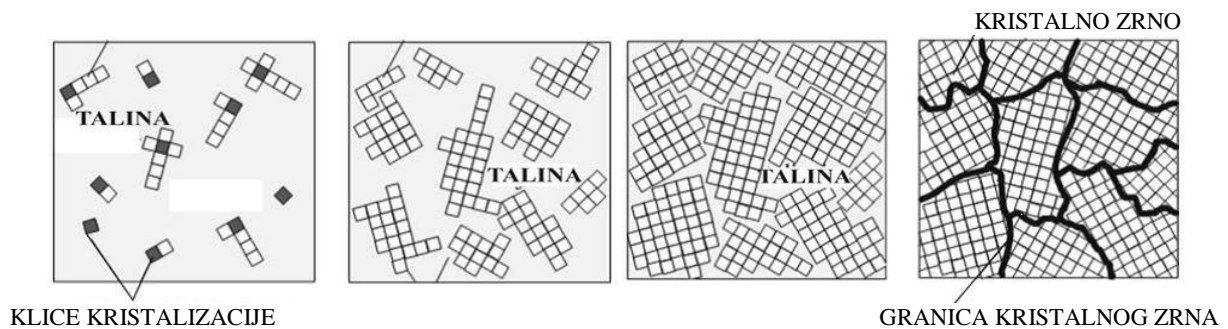
Slika 1.14 Utjecaj kristalnih oblika na opća svojstva legura [4]

1.3 Kristalizacija

Kristalizacija je stvaranje kristala, odnosno prijelaz tvari iz nesređenog u sređeno kristalno stanje. Kristalizacija može nastati u plinskoj i tekućoj fazi. Pojam kristalizacije

obuhvaća i nastajanje i rast kristala unutar čvrste faze što se naziva rekristalizacija. Riječ kristalizacija dolazi od grčke riječi *krystallos* – led.

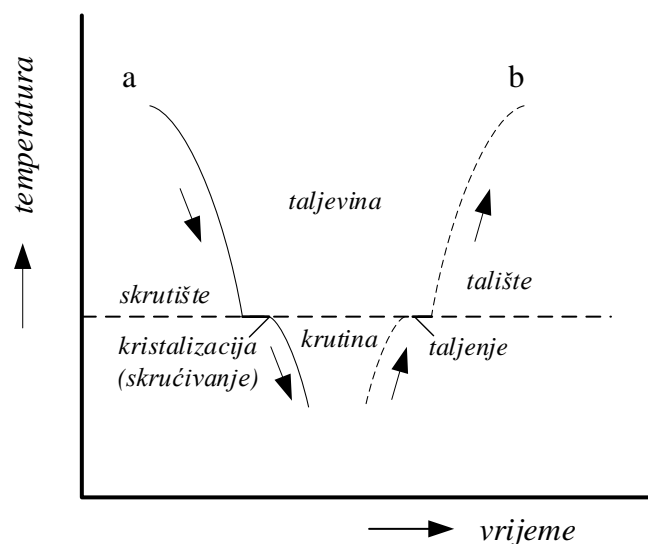
U rastaljenom stanju atomi se nalaze u neprekidnom slobodnom gibanju, a u krutom stanju atomi metalu rešetkastom su rasporedu. Područja od kojih počinje ustaljivanje atoma u rešetkastom rasporedu zovu se „začeci kristalizacije“. U osnovi se kristalizacija (skrućivanje) sastoji od dvaju procesa: nastanka začetaka (klica) nove faze i od rasta kristala. Nakon što se stvore vrlo sitne čestice s određenom kristalnom rešetkom, one rastu u veće kristale nalijeganjem atoma na određena mjesta.



Slika 1.15 Tijek kristalizacije [7]

Proces kristalizacije – prijelaz taljevine u krutninu – i obrnuto, može se pratiti u koordinatnom sustavu vrijeme-temperatura.

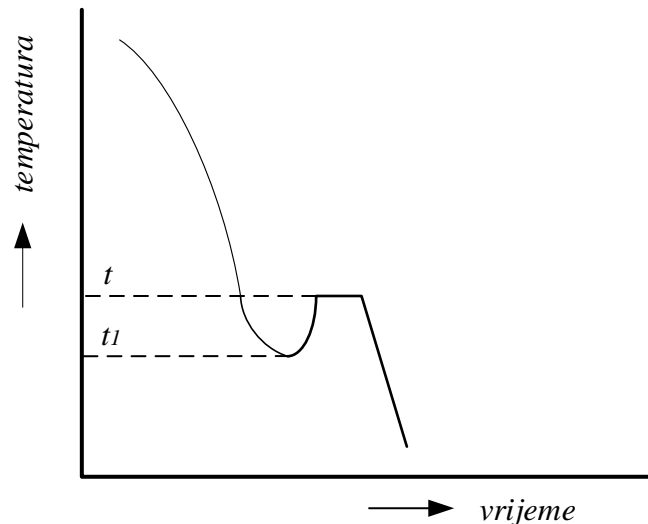
Homogena kristalizacija jest kristalizacija koja nastaje od malih jezgri što čine male skupine atoma dotične tvari koje se rešetkasto raspoređuju i postupno rastu. To je kristalizacija kemijskog elementa.



Slika 1.16 Kristalizacija i taljenje elemenata [4]

Heterogena kristalizacija nastaje kod tehničkih legura iz jezgri koje se po kemijskom sastavu razlikuju od tvari koja kristalizira. Takve se jezgre nazivaju klicama kristalizacije. To su obično neka strana tijela u leguri (slitini).

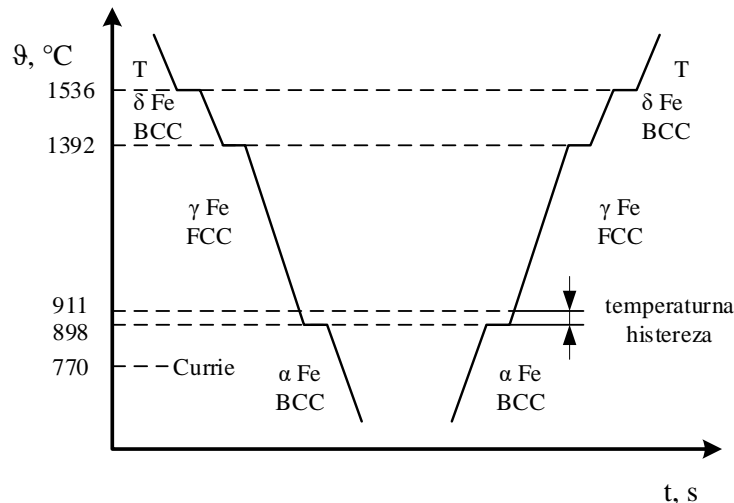
Prve klice kristalizacije kod legura mogu se aktivirati s malim zakašnjenjem, tj. ispod temperature skrućivanja. Razlika između temperature stvarnog skrućišta i temperature nastanka prvih klica naziva se pothlađenje. Pothlađenje je izraženije kod većih brzina hlađenja. Kod malih brzina hlađenja praktički nema pothlađenja.



Slika 1.17 Toplinska histereza [4]

Brzinom ohlađivanja utječemo na raspored i veličinu kristalita. U pravilu veća brzina ohlađivanja daje sitnije zrno, a manja krupnije. Praktičnu primjenu toga imamo u toplinskoj obradi čelika i lijeva, a osobito u ljevarstvu gdje se većom brzinom hlađenja postižu veće tvrdoće odljevaka. Kristaliti se kod nekih elemenata pri daljnjem hlađenju modificiraju i u krutom stanju, što se naziva *alotropna modifikacija*. Alotropne modifikacije vezane su uz oslobađanje latentne topline i promjenu specifičnog volumena pri svakoj prekrizaciji.

Najvažnije alotropske modifikacije u tehnici su alotropske modifikacije čistog željeza u krutom stanju. Neposredno nakon skrućivanja željezo ima prostorno centriranu kubnu rešetku. To je δ -željezo koje nastaje pri 1536 °C. Pri 1392 °C prostorno centrirana kubna rešetka (BCC) prelazi u plošno centriranu kubnu rešetku (FCC) ili γ -željezo. Pri 898 °C, kod hlađenja, plošno centrirana rešetka prelazi u prostorno centriranu kubnu rešetku ili α -željezo, a kod zagrijavanja α -željezo prelazi u γ -željezo na 911 °C. Ova pojava naziva se histereza. Željezo ima još jedno svojstvo, a to je da je ispod temperature 770 °C magnetski, a iznad je nemagnetski –Kiri (*Currie*) točka.



Slika 1.18 Alotropske modifikacije čistog željeza [8]

Drugi važni metali kod kojih dolazi do alotropske modifikacije su kobalt i nikal koji se mijenjaju iz heksagonske kompaktne rešetke u plošno centriranu rešetku. Titanij i cirkonij pretvaraju se iz kompaktne heksagonske u prostorno centriranu kubnu rešetku.

1.3.1 Nepravilnosti u kristalima

Kristalna građa čistih tvari i legura u pravilu je nesavršena. Unutar kristalnih zrna i na granicama postoji niz nepravilnosti ili nesavršenosti. Odstupanja od savršene kristalne rešetke idealnih kristala nazivaju se defektima. Nepravilnosti (defekti) unutar kristalne rešetke mogu se prema njihovom opsegu razvrstati na:

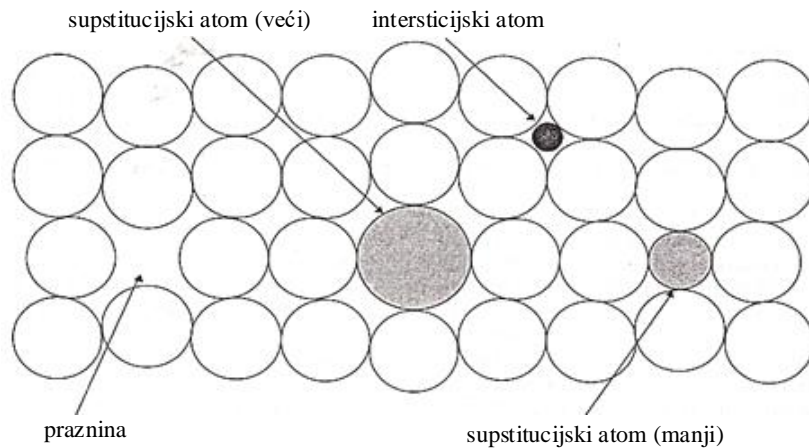
- točkaste ili nuldimenzijske nepravilnosti (praznine ili vakancije i uključke ili intersticije)
- linearne ili jednodimenzijske nepravilnosti (dislokacije)
- površinske nepravilnosti ili dvodimenzijske nepravilnosti (granice zrna, nepravilnosti sloga...)
- prostorne (volumne) ili trodimenzijske nepravilnosti (pore, uključine...).

Općenito nepravilnosti u kristalnoj rešetki nastaju zbog vanjskih utjecaja, npr. nastaju pri rastu kristala iz taline, za vrijeme ozračivanja metala i legura ili pri plastičnoj deformaciji. U grupu točkastih nepravilnosti (defekata) spadaju energetske, elektronske i atomske defekti.

Točkaste nepravilnosti

Točkaste nepravilnosti mogu biti fizikalne ili kemijske. Fizikalne su nepravilnosti **praznine** ili **vakancije** koje nastaju kada u osnovnoj rešetki nedostaje atom ili je atom osnovne rešetke na pogrešnom mjestu, tj. ne u čvoru (točki) rešetke, nego se nalazi između drugih atoma. Kemijske nepravilnosti nastaju kada strani atomi zamijene osnovne atome u

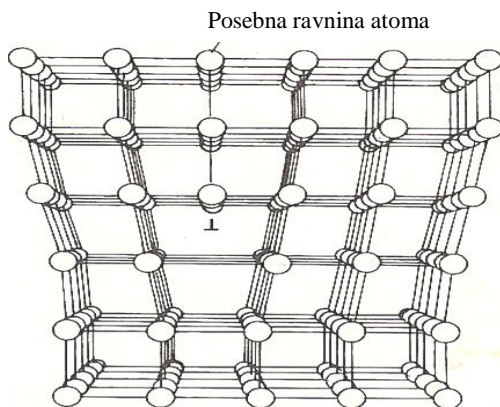
osnovnoj rešetki (**supstitucijski** ili **zamjenski** atomi) ili se strani atomi ugrađuju u međuprostore između atoma osnovne rešetke (**intersticijski** ili **uključinski** atomi). Supstitucijski ili zamjenski atomi mogu se ugraditi u rešetku ako razlika u veličini atoma nije veća od $\pm 15\%$. Intersticijski ili uključinski atomi mogu se ugraditi u međuprostore osnovne rešetke samo ako su puno manji od atoma osnovne rešetke.



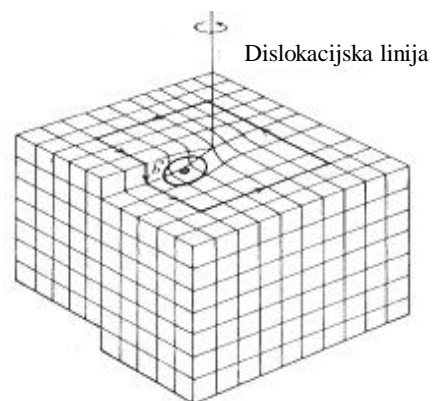
Slika 1.19 Točkaste nepravilnosti unutar kristalne rešetke [1]

Linearne nepravilnosti

Linearne nepravilnosti ili *dislokacije* nesavršenosti su dugačke u jednom smjeru, a nastaju u rešetki izravno prilikom kristalizacije ili pri plastičnom oblikovanju materijala. U metalima su ove nepravilnosti najčešće. Ove nepravilnosti znatno utječu na mehanička svojstva metalnih kristala i omogućavaju tumačenje nesklada između teorijski potrebnog naprezanja za plastičnu deformaciju u odnosu na stvarno potrebno naprezanje koje je 100 do 10.000 puta manje od teorijski izračunatog naprezanja. Stupanjska i vijčana dislokacija granični su slučajevi svih mogućih linijskih nepravilnosti u kristalnoj rešetki.



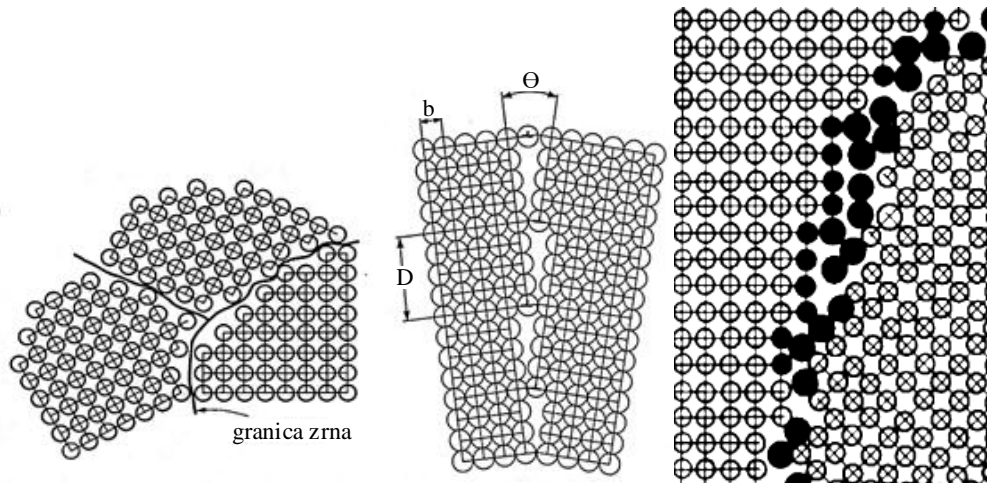
Slika 1.20 Stupanjska dislokacija [9]



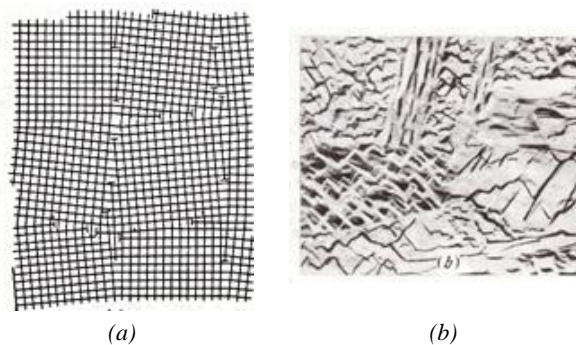
Slika 1.21 Vijčana dislokacija [9]

Površinske nepravilnosti

Površinske (ravninske) nepravilnosti nastaju kao redovi dislokacija ili kao skupovi dislokacija u obliku mozaičnih stanica. Granične plohe između zrna, tj. granice kristala, spadaju među najčešće dvodimenzijske nepravilnosti koje predstavljaju prijelazno područje s narušenom strukturom rešetke. Površina kristala također se može smatrati defektom jer na samoj površini kristala postoji drukčija energetska situacija nego u njegovoj unutrašnjosti.



Slika 1.22 Granice zrna kao površinske nepravilnosti [6]



Slika 1.23 Mozaična struktura (a) shematski dijagram; (b) stvarna mozaična struktura Fe-Ni legure (povećanje 50 000 x) [10]

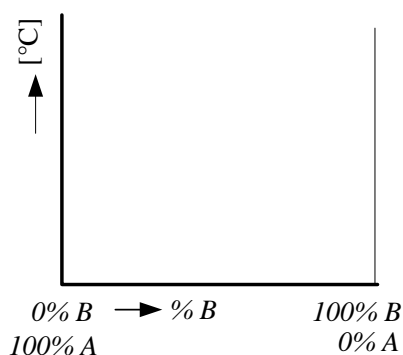
1.3.2 Dijagrami stanja

Legure su tvari koje se sastoje od dvaju ili više elemenata od kojih je barem jedan metal. Legure su najbrojniji tehnički metali koji se upotrebljavaju u praksi. Elemente koji čine leguru nazivamo komponente. Postoje dvokomponentne, trokomponentne, četverokomponentne i višekomponentne legure. Kod legura se pojavljuje drukčiji tijek krivulja taljenja i kristalizacije jer se promjena agregatnog stanja i modifikacija kristalnih rešetki ne zbivaju pri određenoj temperaturi kao kod čistog metala, nego se pojavljuje

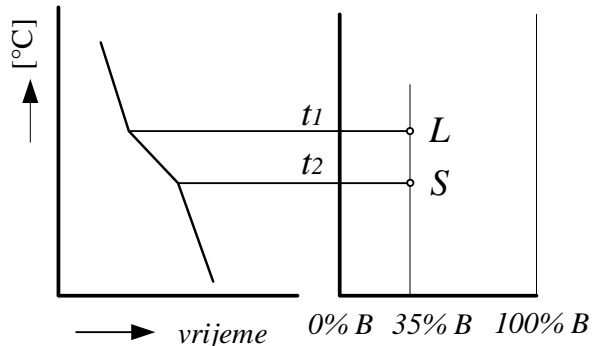
temperaturni interval s usporenim sniženjem temperature. Općepoznato je da većina legura nema točno određenu temperaturu tališta i skrutišta nego temperaturni interval skrućivanja, odnosno taljenja.

Dijagrami stanja ili **fazni dijagrami** ili **dijagrami slijevanja** grafički su prikazi koji pokazuju koje su faze i pojavni oblici faza (konstituenti) prisutni u materijalnim sustavima na različitim temperaturama i tlakovima za različite kemijske sastave legura. Faza je fizikalno i kemijski homogeni dio legure koji se po strukturi i/ili po kemijskom sastavu razlikuje od drugih dijelova. Dijagrami stanja služe inženjerima i znanstvenicima za razumijevanje i predviđanje ponašanja materijala u različitim uvjetima. Većina dijagrama stanja konstruirana je za ravnotežne uvjete ili za nominalno ravnotežne uvjete.

S obzirom na to da se skrućivanje i taljenje legura odvijaju pri atmosferskom tlaku, tlak se zanemaruje. Na apscisu koordinatnog sustava unosimo koncentracije, a na ordinatu unosimo temperaturu. Koncentracija je udio komponente (B) u leguri ili u fazi. Udio komponenata izražava se masenim postocima. Zbroj udjela faza mora biti 100 %. Dijagrami stanja (slijevanja) dobiju se na osnovi niza krivulja hlađenja za različite koncentracije komponenata.



Slika 1.24 Koordinatni sustav za dijagrame stanja (slijevanja) [4]



Slika 1.25 Nastanak dijagrama stanja [4]

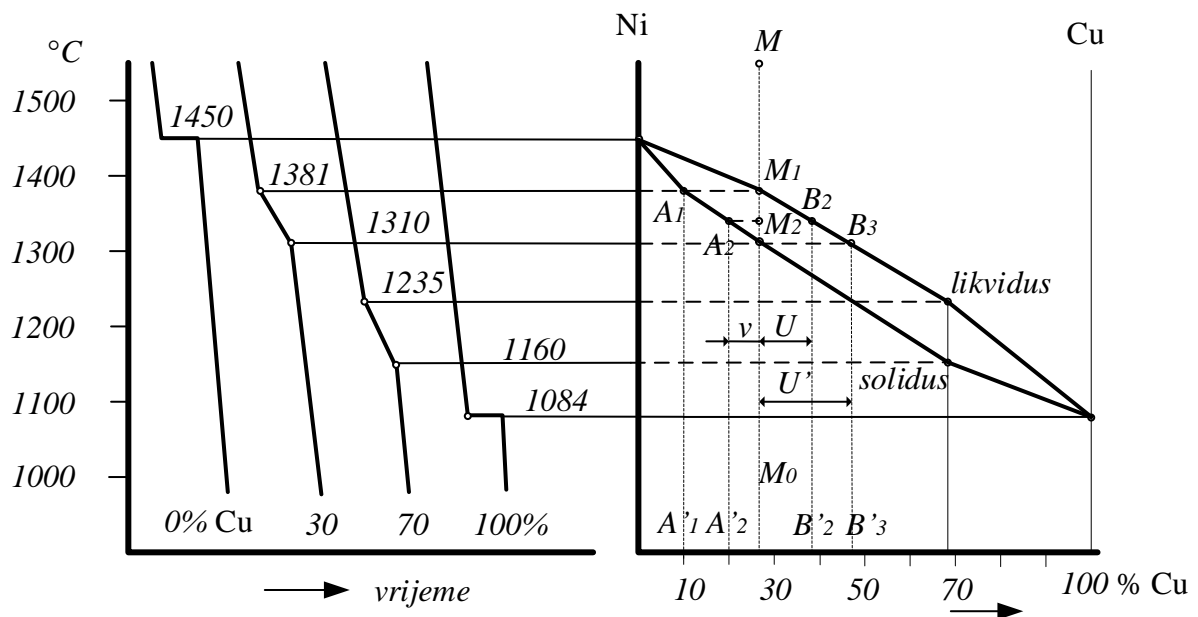
Točke *L* i *S* predstavljaju područje između taljevine i krutnine. Iznad *L* je taljevina, a ispod *S* je krutnina. Između *L* i *S* su taljevina i kristali mješanci. Gornja krivulja koja povezuje sve *L* točke naziva se linija *likvidus*, a donja krivulja koja povezuje sve *S* točke naziva se linija *solidus*. Kod nekih sustava imamo potpunu rastvorljivost jednog elementa u drugom kod svih koncentracija, a kod nekih je ta rastvorljivost ograničena. Kada se sustav legura sastoji od dviju komponenti, stanje takva sustava definira binarni dijagram stanja.

Razlikujemo sljedeće oblike dijagrama stanja [8]:

- **izomorfni dijagram stanja** (sustav potpune rastvorljivosti u rastaljenom i u krutom stanju)
- **eutektički dijagram stanja** (sustav potpune rastvorljivosti u rastaljenom stanju, a djelomične rastvorljivosti u krutom stanju)
- **peritektički dijagram stanja** (sustav potpune rastvorljivosti u rastaljenom stanju, a djelomične rastvorljivosti u krutom stanju)
- **eutektoidni dijagram stanja** (sustav potpune rastvorljivosti u rastaljenom stanju s pretvorbom – prekristalizacijom u krutom stanju)
- **monotektički dijagram stanja** (sustav s nepotpunom topivošću komponenti u rastaljenom i u krutom stanju).

1.3.2.1 Izomorfni dijagram stanja

Ovaj tip dijagrama dobije se kod elemenata s istim tipom kristalne rešetke, bliskim promjerima atoma, bliskom atomskom masom i valencijom. Dijagram stanja (slijevanja) Ni–Cu tipičan je primjer potpune rastvorljivosti u krutom i rastaljenom stanju i daje samo kristale mješance s istom rešetkom u bilo kojoj koncentraciji. U području između linija likvidus i solidus zbiva se kristalizacija i tu imamo dvije faze: taljevinu i krutninu.

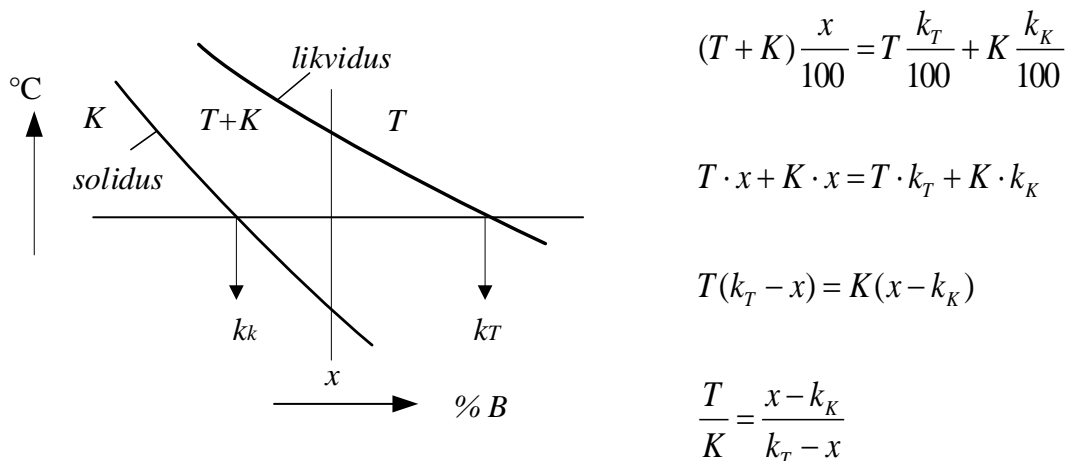


Slika 1.26 Konstrukcija dijagrama stanja legura Ni–Cu [4]

Na lijevoj strani dijagrama prikazana je grupa krivulja hlađenja, a desno je dijagram stanja koji se konstruira s pomoću krivulja hlađenja. U ovom sustavu postoji samo jedna kruta

faza označena s α , a čine je supstitucijski kristali mješanci s rešetkom nikla, odnosno bakra. Budući da i nikal i bakar imaju FCC rešetku, a radijusi atoma veoma im se malo razlikuju, atomi bez problema zamjenjuju mjesta bez obzira na sastav.

Za proračun o količini pojedine faze koristimo se polužnim pravilom. Na ovaj način možemo za bilo koju koncentraciju na bilo kojoj temperaturi izračunati količinski odnos faza.

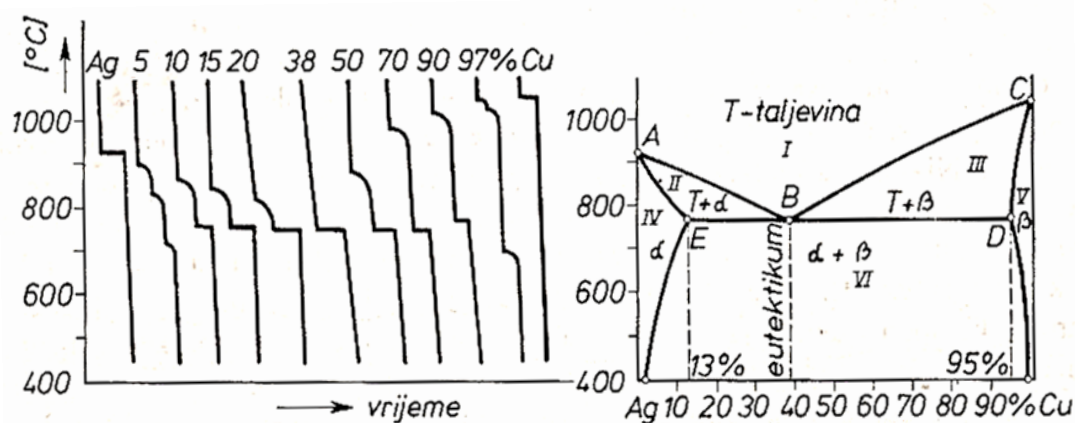


Slika 1.27 Polužno pravilo faza [4]

1.3.2.2 Eutektički dijagram stanja

Sustav potpune rastvorljivosti u rastaljenom stanju i djelomične rastvorljivosti u krutom stanju javlja se kod komponenata koje imaju različite kristalne rešetke ili rešetke istog tipa, ali s većim razlikama u parametrima rešetke. Kod eutektičkog sustava riječ je o komponentama s bliskim talištima.

Primjer za ovaj slučaj je sustav Ag–Cu. U ovom ćemo sustavu pri potpunom skrućivanju imati dvije vrste mješanaca (i to smjesu mješanaca α i β). U općenitom se slučaju može reći da je α -mješanac s rešetkom komponente A, a β -faza mješanac je s rešetkom komponente B.



Slika 1.28 Nastanak eutektičkog dijagrama stanja (za sustav Ag-Cu) [4]

Kod eutektičkog sustava imamo šest područja:

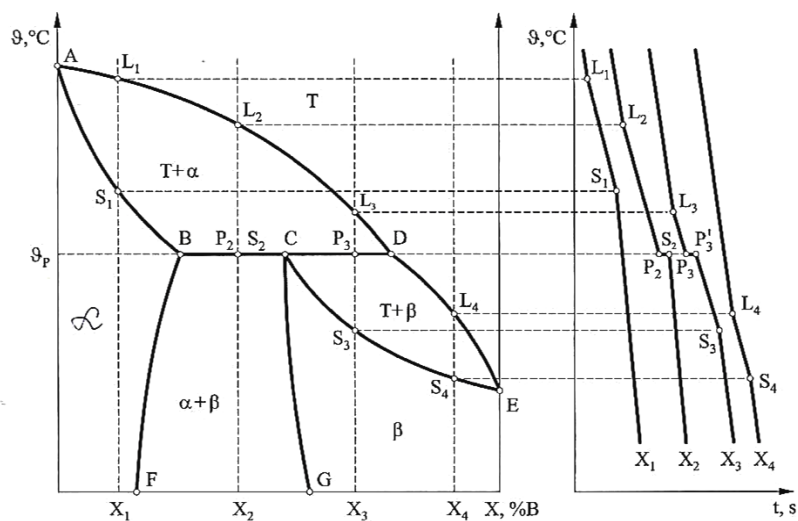
- I – taljevina
- II – α -kristali mješanci + taljevina
- III – β -kristali mješanci + taljevina
- IV – α -kristali mješanci
- V – β -kristali mješanci
- VI – α i β -kristali mješanci.

Kod eutektičke koncentracije i temperature u točki B taljevina pri postupnom hlađenju izravno prelazi u krutninu, bez primarnog izlučivanja. Mješanci koji nastaju u toj etapi zovu se eutektički mješanci (α i β), temperatura eutektička i eutektička koncentracija. Linija ABC predstavlja liniju likvidus, a linija CDBEA liniju solidus.

1.3.2.3 Peritektički dijagram stanja

Peritektički sustav čine komponente sa znatnim razlikama tališta. Dio dijagrama s komponentom koja ima više talište prekriva dio dijagrama komponente koja ima niže talište. Skrućivanje se odvija ovim redom: kad temperatura padne ispod linije likvidus, stvaraju se primarni kristali mješanci. Na peritektičkoj temperaturi β -kristali u talini prelaze u α -kristale u određenom području koncentracija.

U peritektičkom dijagramu stanja tijekom kristalizacije potrebno je promatrati za različite koncentracije.



Slika 1.29 Peritektički dijagram stanja [8]

Za leguru koncentracije X_1 na krivulji hlađenja dvije su točke koje označuju interval skrućivanja s usporenjem pada temperature. U točki L_1 počinje skrućivanje stvaranjem α -

kristala mješanaca, a završetak skrućivanja je u točki S_1 , a kod daljnjeg hlađenja nema promjena.

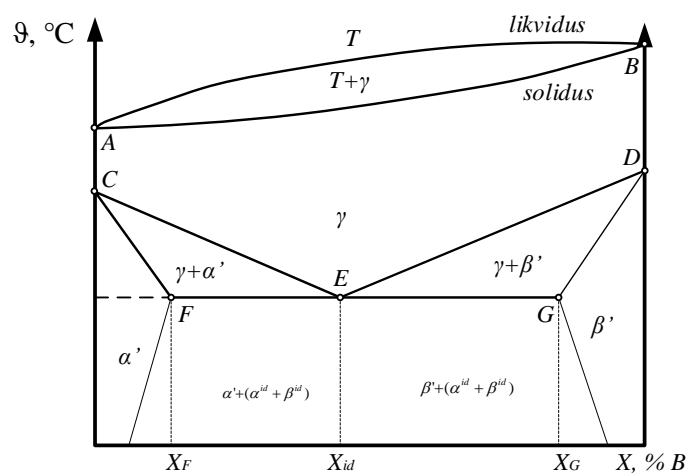
Za leguru koncentracije X_2 na krivulji hlađenja su tri točke. Točka L_2 označuje početak skrućivanja, P_2 označuje početak peritektičke reakcije u kojoj se β -kristali mješanci s rešetkom komponente B stvaraju iz preostale taljevine i oko ruba već prije kristaliziranih α -mješanaca. Kod određenih koncentracija dolazi kod hlađenja ispod peritektičke temperature do manjih promjena masenih udjela α -kristala i β -kristala.

Za leguru koncentracije X_3 imamo dva intervala usporenja, i to prije i poslije peritektičke reakcije. U ovom slučaju peritektičkom reakcijom ne završava skrućivanje. Nakon potpune prekrystalizacije α -kristala mješanaca u β -kristale mješance preostaje i jedan dio taljevine koji ispod peritektičke temperature kristalizira u β -kristale mješance. Ispod točke S_3 nema promjena.

Legura koncentracije X_4 kristalizira između točaka L_4 i S_4 u β -kristale mješance, a nakon toga u krutom stanju nema više promjena.

1.3.2.4 Eutektoidni dijagram stanja

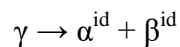
Eutektoidni dijagram stanja takav je dijagram kod kojeg postoji i pretvorba (prekristalizacija) u krutom stanju. Sve legure iz ovog sustava nakon primarne kristalizacije imaju monofaznu strukturu koja se sastoji od kristala mješanaca s kristalnom rešetkom komponente A, označenih s γ koji su stabilni samo na višim temperaturama. Daljnje pretvorbe u krutom stanju spadaju u *sekundarnu* kristalizaciju. Eutektoidni sastav legure označuje se s X_{id} . Legure koje sadrže manje od X_{id} komponente B podeutektoidne su legure, a one koje sadrže više X_{id} komponente B nadeutektoidne su legure.



Slika 1.30 Opći oblik eutektoidnog dijagrama stanja [8]

Kod svih podeutektoidnih legura iz γ -kristala mješanaca po krivulji C – E počinje izlučivanje kristala mješanaca s kristalnom rešetkom komponente A. Ti kristali označuju se s α' i stabilni su na nižim temperaturama. Podeutektoidne legure čiji sastav leži lijevo od točke F završavaju sekundarnu kristalizaciju kao monofazne legure koje se sastoje od kristala α' . Kod podeutektoidnih legura čiji sastav leži između točaka F i E pri eutektoidnoj temperaturi (\mathcal{G}_{id}) nastupa eutektoidna pretvorba kod koje preostali γ -kristali prelaze u smjesu kristala s kristalnom rešetkom komponente A (α^{id}) i s kristalnom rešetkom komponente B (β^{id}). Ta smjesa kristala naziva se **eutektoid**. Eutektoid je pseudofaza jer ima neka obilježja prave faze (prosječni sastav, tvrdoću, oblik zrna) ali nije prava faza jer se sastoji od raznovrsnih konstituenata (α^{id} i β^{id}).

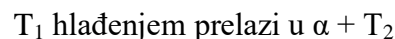
Eutektoidna legura ($X = X_{id}$) prekrystalizira na eutektoidnoj temperaturi (\mathcal{G}_{id}) direktno u čisti eutektoid:



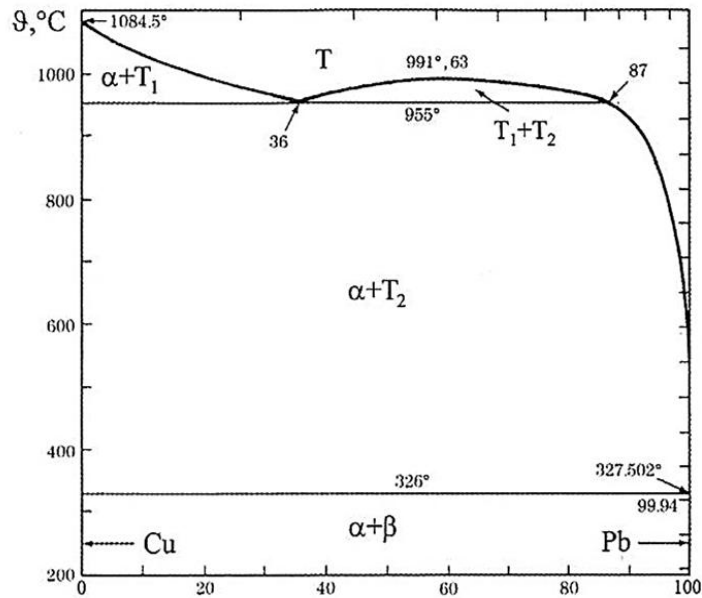
Kod svih nadeutektoidnih legura na temperaturnoj granici E – D počinje izlučivanje kristala mješanaca s kristalnom rešetkom komponente B, označenih s β' . Kod nadeutektoidnih legura čiji sastav leži između točaka E i G pri eutektoidnoj temperaturi nastupa eutektoidna pretvorba kod koje preostali γ -kristali prelaze u smjesu kristala s kristalnom rešetkom komponente A (α^{id}) i s kristalnom rešetkom komponente B (β^{id}), tj. nastaje eutektoid ($\alpha^{id} + \beta^{id}$). Nadeutektoidne legure čiji sastav komponente B leži desno od točke G završavaju sekundarnu kristalizaciju kao monofazne legure koje se sastoje od β' -kristala.

1.3.2.5 Monotektički dijagram stanja

Monotektički dijagram stanja dijagram je koji prikazuje sustav s nepotpunom topljivošću komponenti i u kapljevitoj i u krutom stanju. Prilikom skrućivanja jedna kapljevita faza pretvara se u krutu fazu i u drugu kapljevitu fazu:



U određenom se području dvije kapljevite faze ne miješaju i čine dvije odvojene faze (npr. kao voda i ulje). Primjer za ovakav sustav je dijagram stanja bakar – olovo (slika 1.31).



Slika 1.31 Dijagram stanja bakar – olovo [8]

1.3.2.6 Dijagram stanja željezo–ugljik

Jedan od najpoznatijih i najviše korištenih dijagrama stanja dijagram je koji prikazuje kristalizaciju legure željezo-ugljik (Fe-C). To je složen dijagram stanja koji ima peritektički, eutektički i eutektoidni dio. To je binarni sustav (iako realne legure toga sustava nikada nisu čisto binarne), a dvije komponente koje čine ovaj sustav su željezo i ugljik.

Željezo je metal koji ima najširu primjenu. Čisto željezo magnetično je, sivo bijele je boje, duktilno i mekano, srednje čvrstoće. Željezo ima 26 elektrona, od čega su dva vanjska u četvrtoj ljusci.

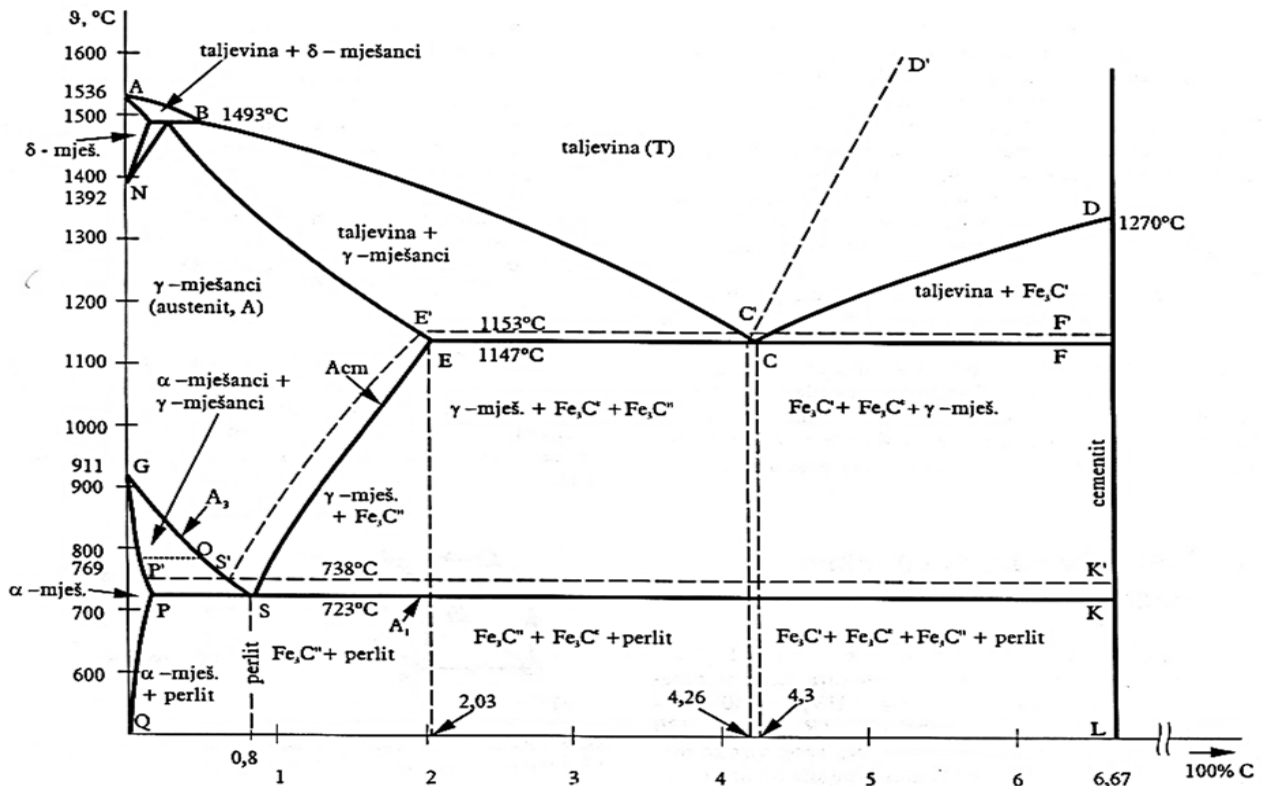
Ugljik je najvažniji legirni element za materijale na bazi željeza. Pojavljuje se u trima alotropskim modifikacijama: amorfna (koks) i dvije kristalne – grafit i dijamant. Ugljik ima 6 elektrona (četiri vanjska u drugoj ljusci). Ugljik se u legure željeza i ugljika (Fe-C legure) uključuje na tri načina, što ovisi o načinu kristalizacije.

Postoje dva tipa kristalizacije kod Fe-C legura: *stabilna* i *metastabilna kristalizacija*.

Stabilna kristalizacija čistih Fe-C legura može nastupiti samo kod ekstremno sporog hlađenja. Ovisno o temperaturi i sastavu, atomi ugljika u tom slučaju ulaze u rešetku željeza tvoreći intersticijske kristale mješance (δ , γ , α) ili tvore kristale grafita (C).

Metastabilna kristalizacija Fe-C legura nastupa kod konačnih i čak relativno sporih brzina hlađenja. Ugljik i kod ovakve kristalizacije tvori intersticijske kristale mješance (δ , γ , α), a umjesto grafita pojavljuje se cementit (Fe_3C).

Cementit je intermetalni spoj nepromjenjivog sastava sa 6,67 % C. Ima kompliciranu ortorombsku rešetku koja nema kliznih ravnina pa je zato cementit tvrd i krhak. U većini praktičnih slučajeva cementit je jako stabilan pa se zato može smatrati ravnotežnom fazom. Ugljik se u ravnotežno skrućenim Fe–C legurama pojavljuje u kristalima mješancima (δ , γ , α) i kao grafit (C) kod stabilne kristalizacije ili u cementitu (Fe_3C) kod metastabilne kristalizacije.



Slika 1.32 Dijagram stanja željezo – ugljik (— sustav Fe–Fe₃C, - - - - sustav Fe–C) [6]

Fe-C dijagram za stabilnu kristalizaciju

Kod stabilne kristalizacije Fe-C legura, tj. kod ekstremno sporog hlađenja ostatak ugljika koji nije u mješancima (δ , γ , α) kristalizirat će u obliku grafita. Činjenica je da se brojčani podaci u dijagramima stanja željezo–ugljik donekle razlikuju, ovisno o izvoru, ali te razlike ne utječu na praktičnu primjenjivost bez obzira na izvor.

Primarna kristalizacija legura željeza i ugljika iz taline eutektička je, a sekundarna kristalizacija je eutektoidna.

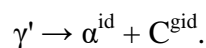
Eutektički je sastav 4,26 % C, a eutektička je temperatura 1153 °C. Legure koje sadrže više od 4,26 % C nadeutektičke su legure, a legure koje sadrže od 2,01 % C do 4,26 % C podeutektičke su legure.

Eutektoidni je sastav 0,68 % C, a eutektoidna je temperatura 738 °C. Legure koje sadrže od 0,68 % C do 2,01 % C nadeutektoidne su legure, a one koje sadrže manje od 0,68 % C podeutektoidne su legure.

Zbog male tehničke važnosti izostavljena je analiza peritektičkog dijela dijagrama (dio A – B – N).

Tijekom kristalizacije legura prikazanih u dijagramu područjem B – C' počinje izlučivanje intersticijskih kristala mješanaca ugljika u FCC rešetki γ -željeza. Taj kristal mješanac zove se **austenit**, a onaj koji nastaje tijekom primarne kristalizacije naziva se primarni austenit i označuje se s γ' . Maksimalna topljivost ugljika u austenitu je 2,01 % C na temperaturi 1153 °C, a na temperaturi od 738 °C topljivost pada na 0,68 % C. Završetak kristalizacije u ovom području prikazuje krivulja od peritektičkog područja (A – B – N) do E'. Legure čiji je sastav manji od 2,01 % C završavaju primarnu kristalizaciju kao monofazne s primarnim austenitom.

Kod podeutektoidnih legura (< 0,68 % C) na granici G – S' počinje izlučivanje intersticijskih kristala mješanaca ugljika u BCC rešetki α -željeza. Kristal koji nastaje između granice G – S' i do 738 °C naziva se primarni ferit i označuje se s α' . Maksimalna topljivost ugljika u feritu je 0,018 % na temperaturi 738 °C, a na sobnoj temperaturi topljivost ugljika u feritu je $6 \cdot 10^{-11}$ % C, što je praktički jednako nuli. Udio α' -kristala u ukupnom sadržaju legure mijenja se s padom temperature tj. ispod 911 °C po granici G – P', povećava se maseni udio α' , a smanjuje se maseni udio γ' kristala. Sve podeutektoidne legure osim onih s manje od 0,018 % C, na temperaturi od 738 °C doživljavaju eutektoidnu pretvorbu u kojoj preostali γ' -kristali, koji na 738 °C imaju upravo 0,68 % C, prelaze u eutektoid koji se sastoji od eutektoidnog ferita (α^{id}) i eutektoidnog grafitita (C^{gid}). To znači da na 738 °C imamo **eutektoidnu pretvorbu:**



Struktura podeutektoidnih legura nakon završetka eutektoidne pretvorbe sastoji se od α' , α^{id} i C^{gid} i ostaje takva do sobne temperature jer se daljnje promjene mogu praktički zanemariti.

Kod nadeutektoidnih legura (> 0,68 % C do 2,01 % C) počinje se na granici E' – S' izlučivati sekundarni grafit ($C^{\text{g''}}$) zbog smanjenja topljivosti ugljika u austenitu. Maseni udio sekundarnog grafitita povećava se u odnosu na austenit sve do 738 °C kada preostali austenit poprima sastav od 0,68 % C i doživljava eutektoidnu pretvorbu identičnu kao i kod

podeutektoidnih legura. Nakon završetka pretvorbe nadeutektoidne legure imaju strukturu koja je $C^{gn} + \alpha^{id} + C^{gid}$.

Kod podeutektičkih legura ($> 2,01\% \text{ C}$ do $4,26\% \text{ C}$) na temperaturi $1153\text{ }^\circ\text{C}$ preostala taljevina koja je poprimila sastav $4,26\% \text{ C}$, kristalizira u eutektikum koji se sastoji od eutektičkog austenita (γ^e) i eutektičkog grafita (C^{ge}). To znači da imamo **eutektičku pretvorbu**: $T \rightarrow \gamma^e + C^{ge}$. Struktura podeutektičkih legura, neposredno nakon završetka eutektičke pretvorbe, sastoji se od γ' , γ^e i C^{ge} . Tijekom hlađenja ispod temperature od $1153\text{ }^\circ\text{C}$, a zbog smanjenja topljivosti ugljika u austenitu (granica $E' - S'$), izlazi dio atoma ugljika iz γ' i γ^e i nastaje sekundarni grafit C^{gn} . Ova pretvorba traje do temperature od $738\text{ }^\circ\text{C}$ kada se u eutektoidnoj pretvorbi preostali γ' i γ^e kristali koji su upravo poprimili sastav $0,68\% \text{ C}$, transformiraju u eutektoid ($\alpha^{id} + C^{gid}$). Nakon završetka eutektoidne pretvorbe struktura podeutektičkih legura je $C^{ge} + C^{gn} + \alpha^{id} + C^{gid}$.

Kod nadeutektičkih legura na likvidus krivulji ($C' - D'$) počinje izlučivanje ugljika u obliku primarnog grafita $C^{g'}$. Kako raste udio primarnog grafita ($C^{g'}$), pada udio taljevine kojoj se sastav mijenja sve do $4,26\% \text{ C}$ na temperaturi $1153\text{ }^\circ\text{C}$ kada se eutektičkom pretvorbom talina transformira u eutektikum (γ^e i C^{ge}). Daljim hlađenjem eutektički austenit (γ^e) otpušta ugljikove atome koji tvore sekundarni grafit (C^{gn}), a na temperaturi $738\text{ }^\circ\text{C}$ preostali eutektički austenit (γ^e) transformira se u eutektoid ($\alpha^{id} + C^{gid}$). Hlađenjem do sobne temperature struktura nadeutektičkih legura je: $C^{g'} + C^{ge} + C^{gn} + \alpha^{id} + C^{gid}$.

Sve stabilno kristalizirane Fe-C legure na sobnoj temperaturi sastoje se od raznih konstituenata feritne i grafitne faze. Konstituenti i faze koje nastaju stabilnom kristalizacijom Fe-C legura sljedeći su:

- konstituenti: γ' ; $\gamma^e \rightarrow$ faza A (austenit)
- konstituent: $\gamma^e + C^{ge} \rightarrow$ „faza“ E (eutektikum) – pseudofaza
- konstituenti: C^{ge} ; $C^{g'}$; C^{gn} i $C^{gid} \rightarrow$ faza G (grafit)
- konstituenti: $\alpha^{id} + C^{gid} \rightarrow$ „faza“ E_{id} (eutektoid) – pseudofaza
- konstituenti: α' ; α^{id} i $\delta \rightarrow$ faza F (ferit).

Konstituenti koji tvore pseudofaze ($\gamma^e + C^{ge}$) i ($\alpha^{id} + C^{gid}$) vezani su konstituenti, dok su svi ostali slobodni konstituenti.

Kod Fe-C dijagrama stanja za stabilnu kristalizaciju od praktične je važnosti područje od oko $2\% \text{ C}$ do oko $5\% \text{ C}$, što je područje željeznih ljevova kod kojih je barem dio ugljika izlučen u obliku grafita.

Najvažnija legura koja kristalizira stabilno je *sivi lijev*. Sivi lijev ima u sastavu i kemijske elemente (Si, P) koji omogućuju izlučivanje ugljika u obliku grafita i kod realnih brzina hlađenja, za razliku od čisto binarnih Fe-C legura kod kojih je za stabilnu kristalizaciju nužno ekstremno sporo hlađenje.

Fe –C dijagram za metastabilnu kristalizaciju

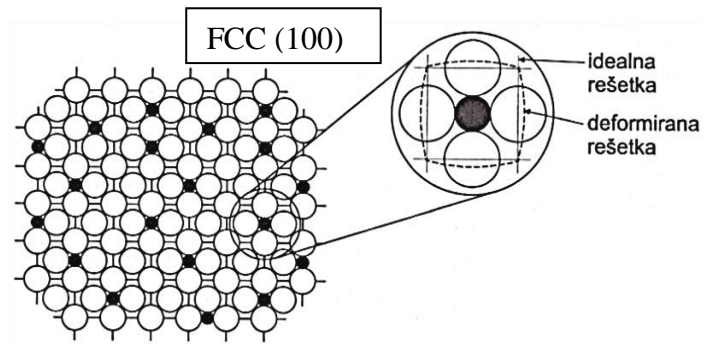
U slučaju i kod realno sporog ohlađivanja, tj. kod metastabilne kristalizacije čistih Fe - C legura, ostatak ugljika koji nije u kristalima mješancima (δ , γ , α) kristalizirat će se u obliku intermetalnog spoja Fe_3C , cementita. Kao i u slučaju dijagrama stanja za stabilnu kristalizaciju, i ovdje postoje manje razlike u različitim literaturnim izvorima.

Kod metastabilnog skrućivanja eutektički je sastav 4,3 % C, a eutektička temperatura je 1147 °C. Legure koje sadrže više od 4,3 % C nadeutektičke su legure, a legure koje sadrže manje od 4,3 % C, a više od 2,03 % C podeutektičke su legure. Eutektoidni je sastav 0,8 % C, a eutektoidna temperatura 723 °C. Legure koje sadrže manje od 2,03 % C, a više od 0,8 % C nadeutektoidne su legure, a legure koje sadrže manje od 0,8 % C podeutektoidne su legure.

Uobičajena podjela Fe - C legura je na **čelike** (legure s manje od 2,03 % C) i na **bijele ljevove** (legure s više od 2,03 % C).

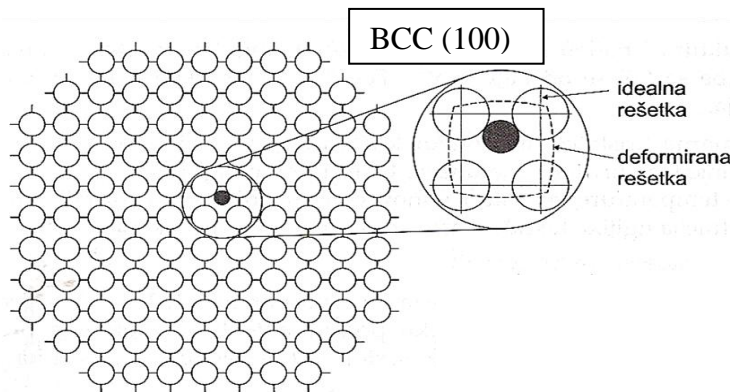
Kod analize dijagrama stanja Fe – C za metastabilnu kristalizaciju izostavlja se peritektički dio dijagrama (dio A – B – N), zato što nema važnost u praktičnoj primjeni.

Kristali primarnog austenita počinju se izlučivati po liniji likvidus B –C,(kao i kod stabilne kristalizacije). Kod metastabilne kristalizacije maksimalna topljivost ugljika u austenitu je 2,03 % C na 1147 °C, a na temperaturi 723 °C topljivost pada na 0,8 % C. Austenit nije idealan kristal zbog toga što u neke praznine FCC rešetke γ -željeza ulazi atom ugljika. Budući da je atom ugljika veći od raspoložive praznine, izazvana deformacija rešetke onemogućuje ulazak ugljikovih atoma u svaku jediničnu ćeliju γ -željeza pa je kod maksimalne koncentracije ugljika od 2,03 % približno svaka treća jedinična ćelija zauzeta atomom ugljika.



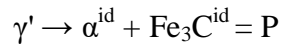
Slika 1.33 Shematski prikaz zauzetosti kristalnog zrna austenita atomima ugljika u jediničnim ćelijama γ -željeza [8]

Kristali mješanci primarnog ferita (α') izlučuju se tijekom sekundarne kristalizacije iz primarnog austenita (γ') u podeutektoidnom području, po krivulji G –S. Kod metastabilne kristalizacije maksimalna topljivost ugljika u feritu je 0,025 % C na temperaturi od 723 °C, dok je na sobnoj temperaturi topljivost ugljika u feritu samo 2×10^{-7} % C, što je praktički jednako nuli. Ni ferit nije idealni kristal pa se ne može definirati kristalno zрно, nego samo jedinična ćelija. Kristalno zрно ferita nastaje tako da u vrlo rijetke praznine BCC rešetke α -željeza ulazi atom ugljika. Atom ugljika mnogo je veći od raspoložive praznine, izazvana deformacija veća je nego kod austenita, a kod maksimalne koncentracije od 0,025 % C tek na približno svakih petsto jediničnih BCC ćelija dolazi jedan atom ugljika.



Slika 1.34 Shematski prikaz zauzetosti zrna ferita atomima ugljika u jediničnim ćelijama α -željeza [8]

Promjena sastava α' -kristala mješanaca nastaje s padom temperature. Do temperature od 723 °C povećava se maseni udio α' -kristala mješanaca na račun smanjenja masenog udjela γ' -kristala mješanaca. Sve podeutektoidne legure osim onih s manje od 0,025 % C, na temperaturi od 723 °C imaju eutektoidnu pretvorbu u kojoj se preostali udio γ' -kristala mješanaca, koji je upravo poprimio sastav od 0,8 % C, pretvara u eutektoid, pseudofazu koja se sastoji od eutektoidnog ferita (α^{id}) i eutektoidnog cementita ($\text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$). Kod metastabilnog skrućivanja na temperaturi 723 °C imamo eutektoidnu pretvorbu:



Nastalieutektoid naziva se **perlit** (P).

Struktura podeutektidnih legura nakon završetka eutektoidne pretvorbe sastoji se od primarnog ferita (α') i perlita ($\alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$) i ostaje takva do sobne temperature jer se daljnje promjene izazvane promjenom topljivosti ferita mogu zanemariti.

Kod nadeutektoidnih legura (> 0,8 % C do 2,03 % C) na granici D –E počinje se izlučivati sekundarni cementit ($\text{Fe}_3\text{C}''$). Maseni udio sekundarnog cementita povećava se u odnosu na austenit sve do 723 °C kada preostali austenit poprima sastav od 0,8 % C i doživljava eutektoidnu pretvorbu identičnu kao i kod podeutektoidnih legura. Nakon završetka pretvorbe nadeutektoidne legure imaju strukturu koja je $\text{Fe}_3\text{C}'' + \alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$ i takva ostaje do završetka hlađenja.

Primarna kristalizacija podeutektičkih legura odvija se po krivulji B –C. U području od 2,03 % C do 4,3 % C i na temperaturi 1147 °C preostala taljevina koja je poprimila sastav 4,3 % C, kristalizira u eutektikum, pseudofazu koja se sastoji od eutektičkog austenita (γ^{e}) i eutektičkog cementita ($\text{Fe}_3\text{C}^{\text{e}}$). To znači da imamo **eutektičku pretvorbu**:



Ovaj eutektikum naziva se **ledeburit** (L). Struktura podeutektičkih legura, neposredno nakon završetka eutektičke pretvorbe, sastoji se od γ' , γ^{e} i $\text{Fe}_3\text{C}^{\text{e}}$. Tijekom hlađenja ispod 1147 °C, a zbog smanjenja topljivosti ugljika u austenitu (granica E –S), izlazi dio atoma ugljika iz γ' i γ^{e} te nastaje sekundarni cementit $\text{Fe}_3\text{C}''$. Ova pretvorba traje do temperature od 723 °C kada se u eutektoidnoj pretvorbi preostali γ' i γ^{e} kristali koji su upravo poprimili sastav 0,8 % C transformiraju u perlit ($\alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$). Nakon završetka eutektoidne pretvorbe struktura podeutektičkih legura je $\text{Fe}_3\text{C}^{\text{e}} + \text{Fe}_3\text{C}'' + \alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$.

Kod nadeutektičkih legura na linijili kvidus (C –D) počinje izlučivanje ugljika u obliku primarnog cementita $\text{Fe}_3\text{C}'$. Kako hlađenjem raste udio primarnog cementita ($\text{Fe}_3\text{C}'$), pada udio taljevine kojoj se sastav mijenja sve do 4,3 % C na temperaturi 1147 °C kada se eutektičkom pretvorbom talina transformira u ledeburit (γ^{e} i $\text{Fe}_3\text{C}^{\text{e}}$). Daljim hlađenjem eutektički austenit (γ^{e}) otpušta ugljikove atome koji tvore sekundarni cementit ($\text{Fe}_3\text{C}''$), a na temperaturi 723 °C preostali eutektički austenit (γ^{e}) transformira se u perlit ($\alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$). Hlađenjem do sobne temperature struktura nadeutektičkih legura je: $\text{Fe}_3\text{C}' + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{e}} + \text{Fe}_3\text{C}'' + \alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$.

Sve metastabilno kristalizirane Fe-C legure na sobnoj temperaturi sastoje se od raznih konstituenata feritne i cementitne (karbidne) faze. Konstituenti i faze koje nastaju metastabilnom kristalizacijom Fe-C legura sljedeće su:

- konstituenti: γ' ; $\gamma^e \rightarrow$ faza A (austenit)
- konstituent: $\gamma^e + \text{Fe}_3\text{C}^e \rightarrow$ „faza“ L (ledeburit) – pseudofaza
- konstituenti: $\text{Fe}_3\text{C}'$; $\text{Fe}_3\text{C}''$; Fe_3C^e ; $\text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}} \rightarrow$ faza K (karbid) cementit
- konstituenti: $\alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}} \rightarrow$ „faza“ P (perlit) – pseudofaza
- konstituenti: α' ; α^{id} i $\delta \rightarrow$ faza F (ferit).

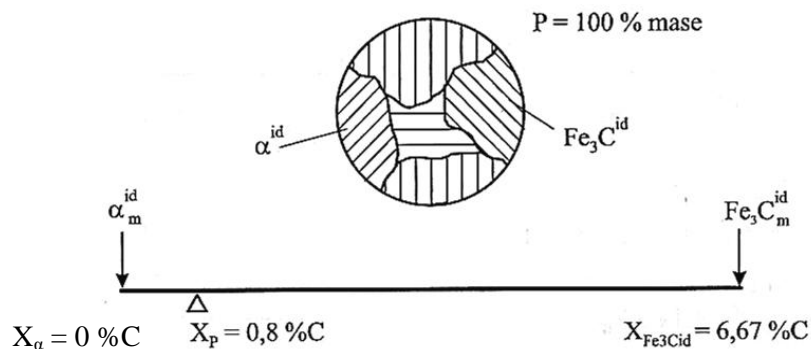
Konstituenti koji tvore pseudofaze ($\gamma^e + \text{Fe}_3\text{C}^e$) i ($\alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$) vezani su konstituenti, dok su svi ostali slobodni konstituenti.

Za bilo koju točku Fe –C dijagrama stanja, odnosno za bilo koju leguru, na bilo kojoj temperaturi, moguće je primjenom polužnog pravila računski odrediti masene udjele prisutnih faza (pseudofaza), odnosno konstituenata.

Primjer 1 [8]: Određivanje udjela konstituenata u perlitu

Treba odrediti udjele konstituenata na temperaturi $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ za Fe-C leguru koja sadrži 0,8 % C?

Rješenje:



Primjena polužnog pravila:

$$\alpha_m^{\text{id}} (0,8 - 0) = \text{Fe}_3\text{C}_m^{\text{id}} (6,67 - 0,8) \quad (1.1)$$

Prema zakonu o održanju mase:

$$\alpha_m^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}_m^{\text{id}} = 100 \quad (1.2)$$

iz (1.1) $\alpha_m^{\text{id}} = \text{Fe}_3\text{C}_m^{\text{id}} (5,87 : 0,8)$

u (1.2) $\text{Fe}_3\text{C}_m^{\text{id}} (5,87 : 0,8) + \text{Fe}_3\text{C}_m^{\text{id}} = 100$

$$\text{Fe}_3\text{C}_m^{\text{id}} ((5,87:0,8) + 1) = 100$$

$$\text{Fe}_3\text{C}_m^{\text{id}} = 12 \% \text{ mase}$$

$$\alpha_m^{\text{id}} = 100 - \text{Fe}_3\text{C}_m^{\text{id}} = 88 \% \text{ mase}$$

Pseudofaza perlit sastoji se od 12 % mase eutektoidnog cementita i 88 % mase eutektoidnog ferita.

1.3.2.7 Procjena mehaničkih svojstava ugljičnih čelika na temelju sastava i mikrostrukture

Mehanička svojstva materijala i njihova struktura u čvrstoj su vezi, i to toliko čvrstoj da se može reći da struktura određuje svojstva. Poznavanje pojedinačnih svojstava ferita i cementita omogućava računsko određivanje svojstava čelika. Uz svojstva ferita i cementita na svojstva čelika utječu sljedeći dijelovi strukture:

- vrsta
- udio
- raspored
- oblik
- veličina zrna
- prisutne nesavršenosti kristala.

Računski se u obzir mogu dovoljno jednostavno uzeti u obzir samo vrsta i udio konstituenata, odnosno faza, pa je rezultat takva računanja orijentacijski te i kao takav katkad predstavlja vrijednu informaciju.

Mehanička svojstva metala ovise o strukturi i o njezinim defektima. Struktura opet ovisi o kemijskom sastavu i o stanju obrade pa prema tome i mehanička svojstva ovise o kemijskom sastavu i stanju obrade (sastav → struktura → stanje → svojstva → primjena).

1.3.3 Računsko određivanje tvrdoće čelika

Polazi se od vrijednosti tvrdoće (po Vickersu) za sastavne dijelove strukture čelika [8]:

$$\text{HV}_\alpha = 100 \text{ (tvrdoća ferita)}$$

$$\text{HV}_P = 210 \text{ (tvrdoća perlita)}$$

$$\text{HV}_{\text{Fe}_3\text{C}} = 1000 \text{ (tvrdoća cementita)}$$

Treba napomenuti da ovo vrijedi samo za čelike kao „čiste“ Fe-C legure. Svaki dodatni element posebno djeluje čak i kod nelegiranih čelika.

Orijentacijska tvrdoća podeutektoidnog čelika određuje se prema izrazu:

$$HV = \alpha'_m \cdot HV_\alpha + P_m \cdot HV_P \quad (1.3)$$

gdje je:

HV – tvrdoća čelika

α'_m – udio ferita ($\alpha'_m = 1 - P_m$)

HV_α – tvrdoća ferita

P_m – udio perlita ($P_m = 1 - \alpha'_m$)

HV_P – tvrdoća perlita

Za nadeutektoidne čelike račun je sličan:

$$HV = P_m \cdot HV_P + Fe_3C''_m \cdot HV_{Fe_3C} \quad (1.4)$$

gdje je:

HV – tvrdoća čelika

P_m – udio perlita ($= 1 - Fe_3C''_m$)

HV_P – tvrdoća perlita

$Fe_3C''_m$ – udio sekundarnog cementita ($Fe_3C''_m = 1 - P_m$)

HV_{Fe_3C} – tvrdoća cementita

1.3.4 Računsko određivanje vlačne čvrstoće čelika

Za čelike do uključivo 0,8 % C vrijedi iskustvena relacija:

$$R_m = \frac{10}{3} \cdot HV \text{ (vlačna čvrstoća čelika, N/mm}^2\text{)} \quad (1.5)$$

Relacija ne vrijedi za nadeutektoidne čelike zbog utjecaja sekundarnog cementita koji izrazito djeluje i svojim rasporedom, a ne samo udjelom.

Proračun tvrdoće i vlačne čvrstoće vrijedi samo za metastabilno skrućene čelike koji nisu posebno toplinski obrađeni [8].

1.4 Karakterizacija mikrostrukture

Mikrostrukturna građa metala utvrđuje se ispitivanjem površine odgovarajućeg uzorka optičkim metodama. Metoda koja obuhvaća optičko istraživanje mikrostrukture sa svrhom njezina kvalitativnog i kvantitativnog opisa naziva se metalografija [6].

Metalografija je znanstvena disciplina koja se bavi građom legirajućih (slitinskih) sustava i istraživanjem svojstava metalnih materijala s obzirom na njihovu mikrostrukturu u određenom temperaturnom području. Metalografija se danas smatra dijelom šireg područja fizikalne metalurgije koje obrađuje vezu ravnotežnog dijagrama stanja sa strukturom i mehaničkim, odnosno fizikalnim svojstvima metala i legura (slitina). Metalografija se bavi metodama s kojima povećavamo vidljivost kristalita da bismo omogućili opis, klasifikaciju i analizu kristalne građe metala. Budući da su metali nepropusni za svjetlo, metalni uzorci promatraju se u reflektiranome svjetlu.

Promatranju građe metala prethodi odabiranje i priprema metalografskog uzorka. Dobro pripremljen uzorak je:

- jednak materijalu koji predstavlja
- odvojen, brušen i poliran tako da su uklonjena sva oštećenja površine metala zbog mehaničke deformacije kako bi se omogućilo otkrivanje prave mikrostrukture u postupku nagrivanja
- bez ogrebotina i jamica od poliranja te bez vodenih mrlja
- poliran tako da su neoštećeni svi uključci
- dovoljno ravan da omogući promatranje pri velikim povećanjima.

Priprema uzoraka dijeli se na mehaničku i kemijsku. Mehanička priprema uzoraka sastoji se od „grube“ strojne obrade (tokarenje, glodanje i sl.), nakon koje slijedi brušenje i poliranje u nekoliko stupnjeva da bi se dobila ravna i glatka (ispolirana) površina. Kemijska priprema obuhvaća nagrivanje (travljenje, najedanje, jetkanje) ispolirane površine odgovarajućim sredstvom za nagrivanje (travilom). Rezultat djelovanja sredstva za nagrivanje je metalografska struktura metala. Općenito se priprema uzoraka sastoji od sljedećih pet koraka:

1. odvajanje ispitnog uzorka iz ispitivanog materijala
2. ulaganje u odgovarajuću masu
3. brušenje
4. poliranje
5. nagrivanje.

Struktura može biti:

- a) nanostruktura (mjerenje udaljenosti u nanometrima)
- b) mikrostruktura (mjerenje udaljenosti mikrometrima)
- c) makrostruktura (struktura je vidljiva golim okom).

Makronagrivanje daje strukturu vidljivu golim okom, a mikronagrivanje daje strukturu vidljivu s pomoću mikroskopa.

Djelovanje travila dvojako je:

- a) najedanje granica kristalita
- b) najedanje ploha kristala.

Djelovanje travila ovisi i o trajanju najedanja.

Osnovna sredstva za nagrivanje prikazana su u tablici 1.1:

Tablica 1.1 Pregled osnovnih sredstava za nagrivanje [4]

Metal	Osnovna komponenta	Travilo
Željezo i njegove legure	Dušična kiselina HNO ₃	2 ml HNO ₃ 100 ml etilnog alkohola NITAL
Bakar i njegove legure	Željezni klorid FeCl ₃ , solna kiselina HCl	5 g FeCl ₃ 30 ml HCl 100 ml destil. vode
Aluminij i njegove legure	Fluorovodična kiselina HF	0,5 ml HF 100 ml destil. vode

Za promatranje metalografske strukture upotrebljavaju se svjetlosni, elektronski i ionski mikroskopi.

Svjetlosni mikroskop primjenjuje se za metalografsko promatranje, a elektronski i ionski mikroskopi služe za proučavanje unutrašnje građe pojedinih kristalita.

Svrha je svakoga mikroskopa da pojedine detalje na uzorku što bolje razdvoji jedan od drugoga. Osnovna jednadžba za sve mikroskope daje podatak o granici moći razlučivanja dvaju susjednih predmeta (d_m) koje promatramo mikroskopom.

Dvije točke koje leže jedna uz drugu mogu se i dalje vidjeti kad njihov razmak iznosi:

$$d_m = \frac{\lambda}{2n \cdot \sin \alpha} \quad (1.6)$$

Gdje je:

λ – valna duljina zraka za osvjetljivanje (za vidljivu svjetlost $\lambda = 0,4$ do $0,8 \mu\text{m}$),

n – indeks loma između objekta i objektiva (za svjetlost $n = 1$),

α – polovina kuta upadanja zraka koje se reflektiraju s objekta na objektiv.

Povećanje mikroskopa omjer je veličine slike mikroskopa i stvarne veličine predmeta. Objektiv daje virtualnu sliku predmeta, povećanu i rastvorenu (sadržanu) pojedinostima. Okular povećava virtualnu sliku u realnu, ali bez daljnjeg rastvaranja. Objektiv na sebi nosi dvije oznake: za povećanje i numeričku aperturu, a okular ima samo oznaku za povećanje.

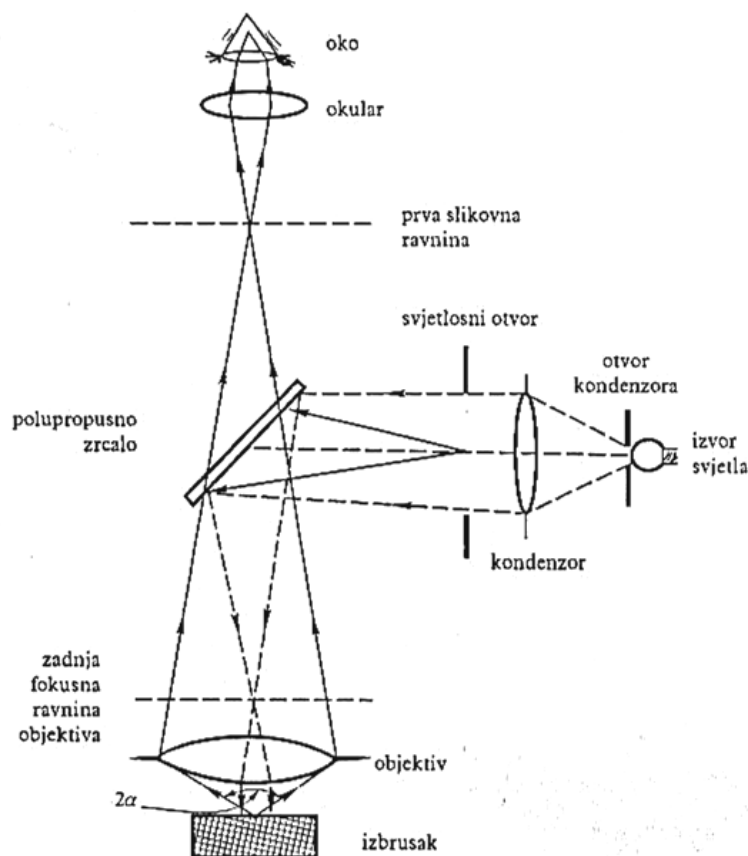
Najvažniji podatak pri izboru mikroskopskih objektivna jest *numerička apertura* (zaslon, otvor) N.A. ili NA. Numerička apertura mjera je moći razlučivanja objektivna, a definira se kao kutni otvor stošca svjetla koje leća objektivna prihvaća i označava snagu skupljanja svjetla za tu leću.

$$NA = 2n \cdot \sin \alpha \quad (1.7)$$

Velika numerička apertura potrebna je da se dobije veća količina svjetla i da se dobije što veća moć razlučivanja. Moć razlučivanja ljudskog oka (oko je prijammnik slike koju stvara instrument) jest 0,084 μm (zaokruženo $\sim 0,1$ mm). To znači da zdravo ljudsko oko razlučuje dvije točke, kao točke, ako su razmaknute $\sim 0,1$ mm.

Ukupno povećanje mikroskopa jest *povećanje objektivna x povećanje okulara*. Optimalno povećanje iznosi (250÷500) NA.

Svjetlosni mikroskop koristi se svjetlosnim zrakama koje sa strane ulaze iz izvora u mikroskop, padaju na zrcalni reflektor i odbijaju se do uzorka. Tada se reflektiraju od uzorka, prolaze kroz leću i zaslone, lome se i dolaze do oka u kojem se stvara slika. Svjetlosni mikroskop korisno povećava uglavnom do 1000 puta.



Slika 1.35 Osnovne optičke komponente svjetlosnog mikroskopa [9]

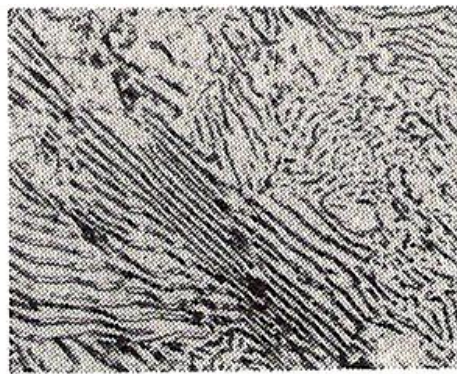
Elektronski mikroskop umjesto svjetlosnih zraka upotrebljava brze elektrone koji imaju valnu prirodu kao i vidljiva svjetlost. Pri naponu od 50 kV elektroni dostižu brzinu veću od 33,3 km/s i valnu duljinu od 5 pm. S pomoću elektromagnetskog polja elektroni se mogu usmjeriti i upotrijebiti slično zrakama svjetlosti. Povećanje elektronskog mikroskopa iznosi do $150 \cdot 10^3$ puta.

Ionski mikroskop za promatranje se koristi snopom iona, a ukupno povećanje iznosi do $25 \cdot 10^5$ puta. Kod ovakva povećanja mogu se razlikovati pojedini atomi u kristalnoj rešetki.

Uzrok vidljivosti metalografske strukture jest u tome jer su zrna različito najedena pa je površina postala hrapava, zato se upadne zrake različito odbijaju. Različita otpornost na travilo uzrokovana je anizotropijom (usmjerenošću) kristalnih zrna. Zbog različite usmjerenosti vide se granice zrna i struktura nalik na mozaik s raznim tonovima bijelog i crnog područja. Efekt raznih tonova bijelog i crnog područja nastaje odrazom (refleksijom) i raspršivanjem (disperezijom) svjetlosnih zraka koje se odbijaju s hrapave površine. Cilj metalografske analize utvrđivanje je vrste strukturnih sastojaka, njihove prosječne veličine i oblika. Promatrane slike uspoređujemo s već postojećim snimkama u metalografskim atlasima.



Ferit (500:1)



Lamelarni perlit 0,85 % C (500:1)

Slika 1.36 Uzorci travljenih metala i povećanih mikroskopom [4]



Čelični lijev – 0,28 % C (100:1)



Čelični lijev – 0,28 % C normaliziran (100:1)

Slika 1.37 Uzorci travljenih metala i povećanih mikroskopom [4]



Sivi lijev (50:1)



Sivi lijev (500:1)

Slika 1.38 Uzorci travljenih metala i povećanih mikroskopom [4]

2. TOPLINSKA OBRADA

Toplinska obrada niz je postupaka u tijeku kojih se metalni proizvod u čvrstome stanju namjerno podvrgava djelovanju niza **temperaturno-vremenskih** promjena kako bi se postigla željena mikrostruktura, a time i željena (mehanička, fizička, kemijska) svojstva.

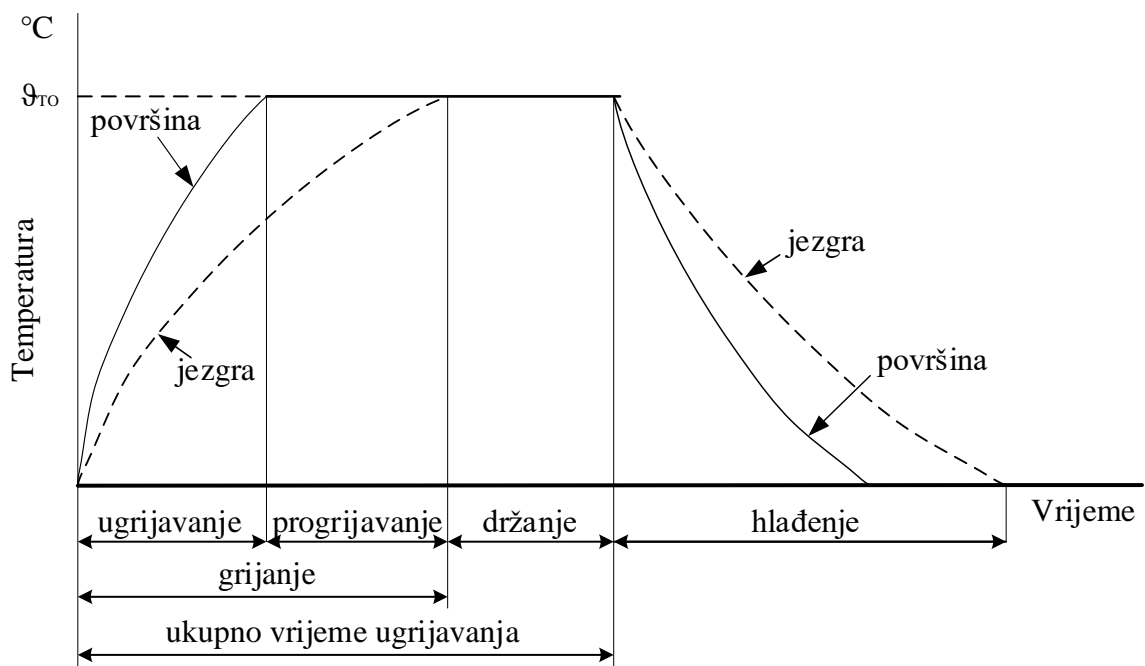
Temeljni parametri toplinske obrade su:

- temperatura, T (K), ϑ ($^{\circ}\text{C}$),
- trajanje (vrijeme), t (s, min, h).

Iz osnovnih parametara toplinske obrade izvodi se parametar $dT/dt = v$ ($^{\circ}\text{C/s}$, $^{\circ}\text{C/min}$, $^{\circ}\text{C/h}$) koji se naziva brzinom ohlađivanja ili brzinom ugrijavanja.

Postupak se provodi u konačnom vremenu. Toplinskom obradom mijenja se mikrostruktura materijala, što kao posljedicu ima promjenu svojstava. Mikrostrukture čelika koje se postižu toplinskom obradom bit će različite od onih koje se postižu u ravnotežnim uvjetima i onima koje se prikazuju u Fe – Fe₃C dijagramu. Lijevanje, kovanje, valjanje i zavarivanje nisu toplinske obrade jer im temeljna svrha nije promjena mikrostrukture (svojstava), nego promjena oblika.

S pomoću osnovnih parametara toplinske obrade: temperature, vremena i izvedenog parametra v (brzina ohlađivanja) može se prikazati svaki postupak toplinske obrade u tzv. dijagramu postupka (ϑ - t , dijagram).

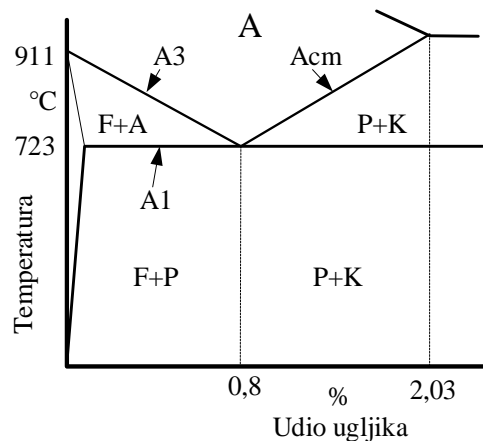


Slika 2.1 Dijagramski prikaz postupaka toplinske obrade (općenito) [11]

Navedene veličine na slici 2.1 znače:

- ϑ_{TO} , temperatura toplinske obrade (općenito)
- ugrijavanje, trajanje zagrijavanja do trena kada površinski slojevi postignu ϑ_{TO}
- progrijavanje, odsječak vremena (trajanje) od trena ugrijanja površine do trena kada i slojevi jezgre postignu ϑ_{TO} , tj. kada je temperatura po presjeku izjednačena ($\vartheta = \text{konst.}$)
- grijanje, suma trajanja ugrijavanja i progrijavanja
- držanje, trajanje držanja predmeta na ϑ_{TO} od trena kada je predmet progrijan do trena početka ohlađivanja
- hlađenje, trajanje snižavanja temperature predmeta sve dok slojevi jezgre ne dostignu zadanu temperaturu, tj. izjednače je s temperaturom površinskih slojeva i okoliša.

Za tumačenje osnova toplinske obrade čelika služimo se samo isječkom dijagrama Fe – Fe₃C, i to do 2,03 % C i do temperature 1200 °C.



Slika 2.2 Isječak dijagrama Fe– Fe₃C važan za toplinsku obradu čelika [11]

Važne temperature za opisivanje postupaka toplinske obrade su:

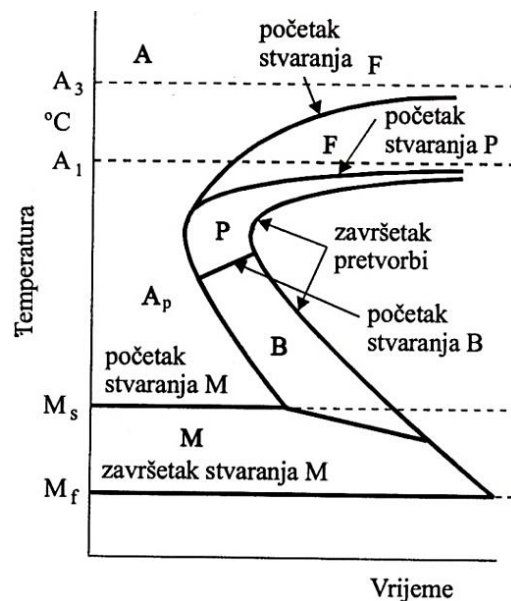
- A₁ (723 °C), temperatura pri kojoj se austenit pretvara u perlit pri hlađenju, odnosno pri kojoj se perlit pretvara u austenit pri zagrijavanju
- A₃, temperatura početka pretvorbe austenita u ferit pri hlađenju i završetka pretvorbe ferita u austenit pri grijanju.

Pri ugrijavanju čelika uz simbol A stavlja se indeks *c*, a pri hlađenju indeks *r*.

Fazne pretvorbe kod čelika (u krutom stanju) nastaju kao posljedica promjene temperature. U mikrostrukturi čelika pojavljuju se sljedeće faze odnosno pseudofaze:

- austenit, kruta otopina ugljika u γ -željezu (plošno centrirana kubna rešetka)
- ferit, α -željezo (prostorno centrirana kubna rešetka)
- martenzit, kruta prisilna otopina ugljika u prostorno centriranoj rešetki tetragonskog tipa koja nastaje pretvorbom iz austenita
- perlit, eutektoidna smjesa ferita i cementita (tzv. visokotemperaturni eutektoid) s lamelarnom strukturom
- bainit, eutektoidna smjesa ferita i cementita (tzv. niskotemperaturni eutektoid) s igličastom strukturom.

Prikaz nastanka mikrostrukturnih pretvorbi pri raspadu austenita za određeni čelik može se pratiti u dijagramu temperatura– vrijeme– pretvorba (TTT dijagram, engl. **T**ime – **T**emperature – **T**ransformation). TTT dijagram pokazuje transformacijska zbivanja u jednom čeliku ako se taj čelik ohlađuje iz područja austenita različitim brzinama hlađenja.



Slika 2.3 TTT dijagram [11]

Gdje je: **A** austenit

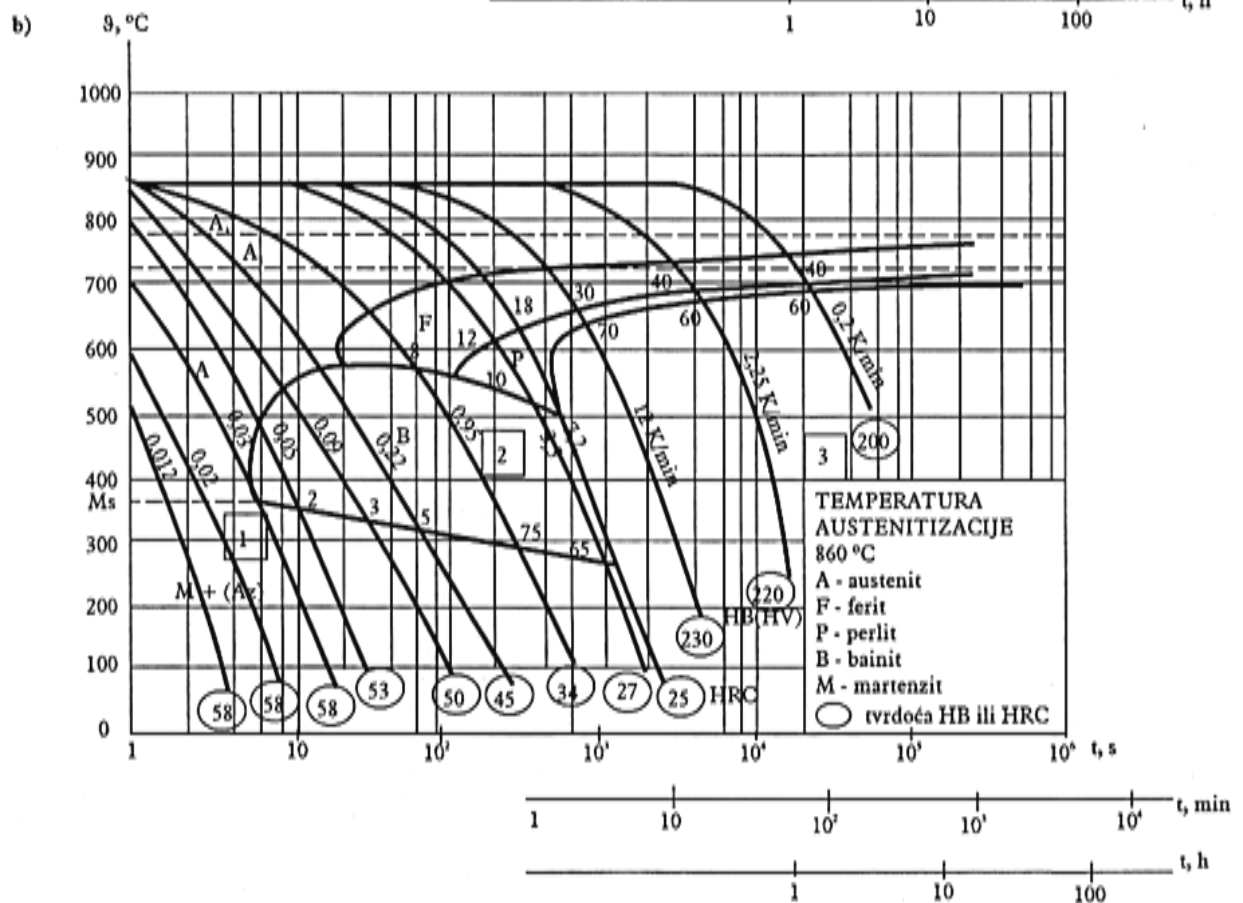
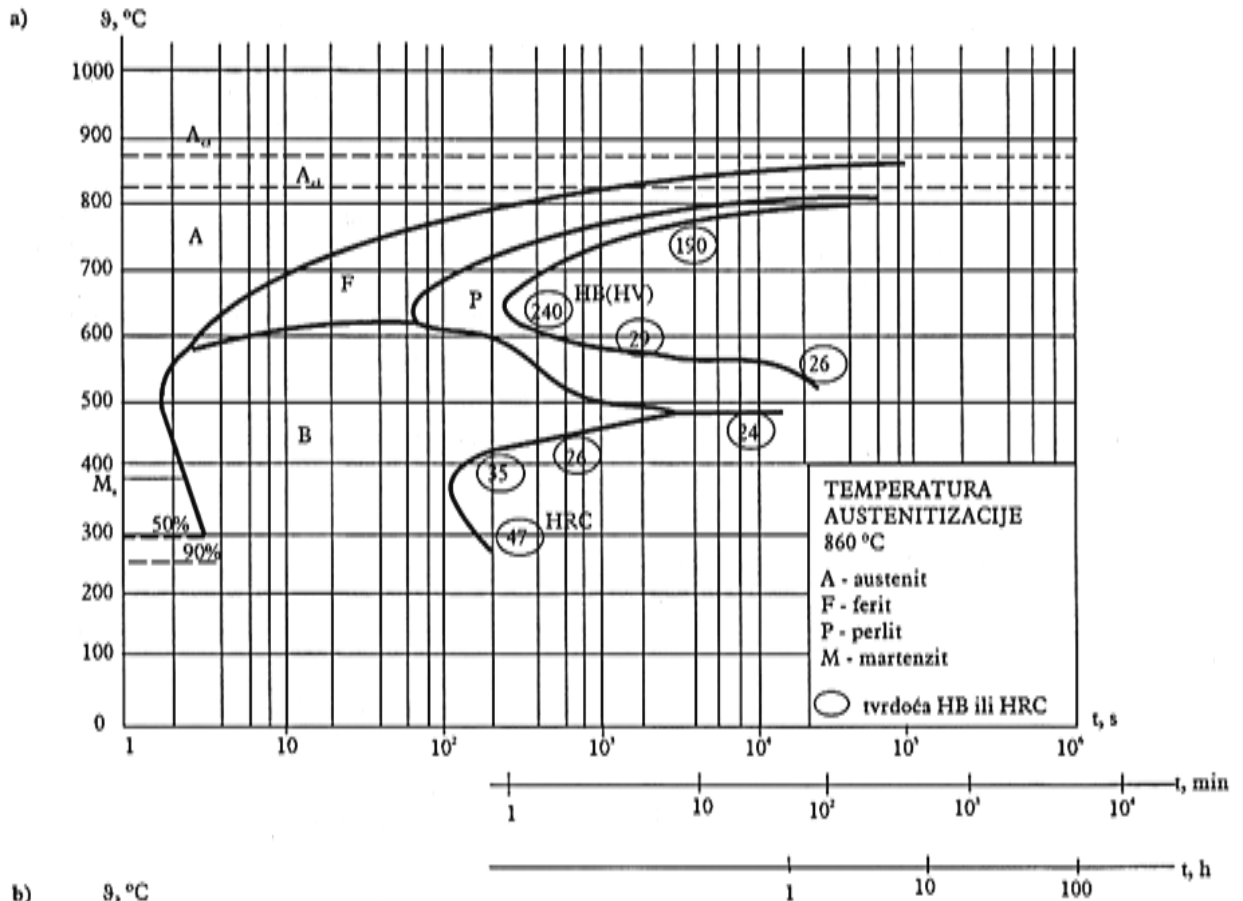
M martenzit

B bainit

P perlit

F ferit

Pretvorbe austenita uz kontinuirano hlađenje prate se u kontinuiranom TTT dijagramu, dok se pretvorbe austenita uz držanje na određenoj temperaturi prate u izotermičkom TTT dijagramu (slika 2.4).



Slika 2.4 Izotermički (a) i kontinuirani (b) TTT dijagram za čelik 42CrMo4 [6]

Prijelaz iz jedne u drugu fazu (pseudofazu) čine sljedeće pretvorbe:

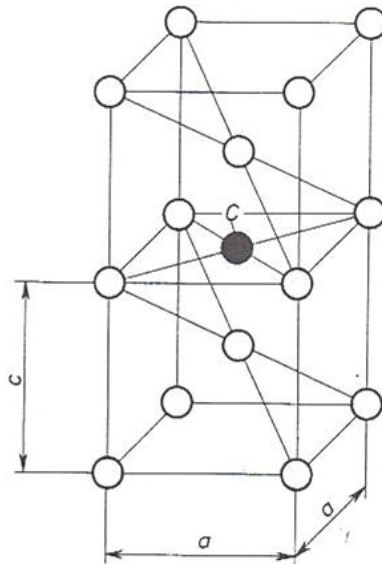
- a) Pretvorba perlita u austenit ($\alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}} \rightarrow \gamma'$) nastaje pri ugrijavanju čelika pri temperaturi A_{c1} . Kod ove pretvorbe istodobno se odvija i alotropska modifikacija iz BCC rešetke u FCC rešetku. Pretvorba austenita u perlit odvija se u temperaturnom intervalu koji ovisi o brzini ugrijavanja.
- b) Pretvorba austenita u perlit ($\gamma' \rightarrow \alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$) nastaje pri sporom hlađenju čelika na temperaturama nižim od A_1 , tj. na temperaturi $A_{r1} < A_1$. Plošno centrirana kubna rešetka (FCC) prelazi u prostorno centriranu kubnu rešetku (BCC) uz istodobno nastajanje željeznog karbida (Fe_3C). S povećanjem brzine hlađenja austenit se pothlađuje te pri kontinuiranom hlađenju pothlađeni i nestabilni austenit na nekoj graničnoj temperaturi prelazi u martenzit (ili barem počinje prelaziti u martenzit). Temperaturna histereza koja pri prijelazu iz γ -Fe u α -Fe čistog željeza iznosi $13\text{ }^\circ\text{C}$ postaje sve veća s povećanjem brzine hlađenja. Kod brzina hlađenja $v_{\text{ohl}} \geq 600\text{ }^\circ\text{C/s}$ postiže se granična temperatura prekrystalizacije γ -Fe u α -Fe na $\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ (tako da maksimalni iznos temperaturne histereze iznosi oko $410\text{ }^\circ\text{C}$).
- c) Pretvorba austenita u martenzit ($\gamma \rightarrow \alpha'$) jedna je od najvažnijih za toplinsku obradu čelika. Ova pretvorba dolazi do izražaja pri kaljenju. Pokusi ubrzanog hlađenja čelika (metastabilne legure željeza i ugljika) pokazuju kao i kod čistog željeza prisutnost povećanja temperaturne histereze. Temperatura početka prekrystalizacije γ/α sve je niža što je sadržaj ugljika u čeliku viši. Kod kaljenja nastaje novi strukturni oblik – **martenzit**, nepoznat iz metastabilnog Fe– Fe_3C dijagrama. Kod vrlo brzog hlađenja martenzitna rešetka nastaje od austenitne. U slučaju austenitne rešetke, a prije početka hlađenja, ugljikov atom intersticijski je otopljen u sustavu γ -rešetke pri nekoj temperaturi toplinske obrade iznad temperature A_1 . Nakon vrlo brzog hlađenja atom ugljika ostaje prisilno otopljen (zarobljen) u sustavu α -rešetke. Nastaje nova tetragonalno prizmatična („tetragonalna“) rešetka. Prema tome martenzit ima tetragonalnu rešetku (BCT – body centred tetragonal) koja nastaje preklapanjem austenitne FCC rešetke i zadržavanjem atoma ugljika u prisilnoj čvrstoj otopini. Atom ugljika prisilno rastvoren u M rešetki uzrokuje njezinu distorziju u jednom smjeru (povećanje dimenzije stranice c u odnosu na stranicu a). Ova je distorzija rešetke uzrokom:
- da čelik s martenzitnom strukturom ima visoku tvrdoću (i čvrstoću), ali vrlo nisku duktilnost i žilavost

- da čelik martenzitne strukture ima veći volumen nego čelik u feritno-perlitnoj (ili perlitno-cementitnoj) mikrostrukturi.



Slika 2.5 Martenzitna struktura ugljičnog čelika s 0,8 % C (povećanje 500x) [9]

Čelik s martenzitnom strukturom zakaljen je, a postupak toplinske obrade naziva se kaljenje.



Slika 2.6 Rešetka martenzita [4]

- d) Pretvorba martenzita u martenzit popuštanja. Ovisno o vrsti čelika, ugrijavanje se izvodi u temperaturnom intervalu od 80 °C do 723 °C, nakon čega slijedi sporo hlađenje. Pri ugrijavanju martenzita cementit se izlučuje u obliku kuglica, zbog čega se smanjuje čvrstoća, ali povećava se žilavost. Ova toplinska obrada naziva se i popuštanje, a izvodi se zato da bi se smanjila unutrašnja naprezanja i poboljšala žilavost kaljenog čelika.

2.1 Postupci toplinske obrade

Postupci toplinske obrade mogu se sistematizirati na sljedeći način [12]:

- **Prava ili „čista“ toplinska obrada:**
 - **postupci žarenja**
 - žarenje I. reda
 - žarenje II. reda
 - **postupci kaljenja** (gašenje legura s polimorfnim promjenama) i popuštanja čelika
 - **umjetno starenje** (dozrijevanje).
- **Toplinska obrada površinskih slojeva:**
 - **bez promjene sastava:**
 - plameno ugrijavanje
 - indukcijsko ugrijavanje
 - ugrijavanje unošenjem visoke gustoće energije (impulsno, lasersko, elektronskim mlazom)
 - **termodifuzijske (termokemijske) obrade:**
 - pougljičenje (cementiranje)
 - karbonitriranje
 - nitriranje
 - nitrokarburiranje
 - boriranje
 - termodifuzija metala itd.
 - **prevlačenje izlučivanjem iz plinske faze:**
 - PVD (*Physical Vapour Deposition*), fizikalno taloženje iz parne faze
 - CVD (*Chemical Vapour Deposition*), kemijsko taloženje iz parne faze
 - PACVD (*Plasma Asisted CVD*), plazmom potpomognut CVD postupak.

„Čista“ ili „prava“ toplinska obrada postupak je pri kojem se ugrijava cijela masa proizvoda i ne mijenja se namjerno kemijski sastav nijednog mjesta na proizvodu.

Toplinsko-kemijskim (termokemijskim, termodifuzijskim) obradama namjerno se mijenja kemijski sastav površinskih slojeva radi promjene njihove konačne strukture, a time i svojstava.

Postupci žarenja I. reda ne uzrokuju fazne transformacije (promjene unutar kristalne rešetke) ili pak one nisu od veće važnosti za ona svojstva koja se takvim postupcima toplinske obrade žele postići.

Pri postupcima žarenja II. reda redovito se izazivaju fazne transformacije kako bi se nakon završetka postupka toplinske obrade postigli željeni strukturni oblici proizvoda (materijala).

Postupci gašenja legura bez polimorfних pretvorbi „fiksiraju“ stanje postignuto pri temperaturi postupka, a gašenje legura s polimorfnim pretvorbama uzrokuje pothlađenje i bezdifuzijsku pretvorbu (kod čelika to je pretvorba austenita u martenzit, kaljenje).

Postupci (umjetnog) starenja ili dozrijevanja uzrokuju precipitaciju sastojaka iz prezasićene otopine te njihovo spajanje u čestice međumetalnih spojeva. Te čestice očvršćuju otopinu jer otežavaju gibanje dislokacija.

Većina željeznih legura koje se koriste u tehnici, osim željeza i ugljika, sadrže još i legirajuće elemente koji će katkad znatno mijenjati svojstva i strukturu dvofaznih legura. Ipak se i u takvim slučajevima iz dijagrama „željezo– ugljik“ mogu donijeti određeni općeniti zaključci.

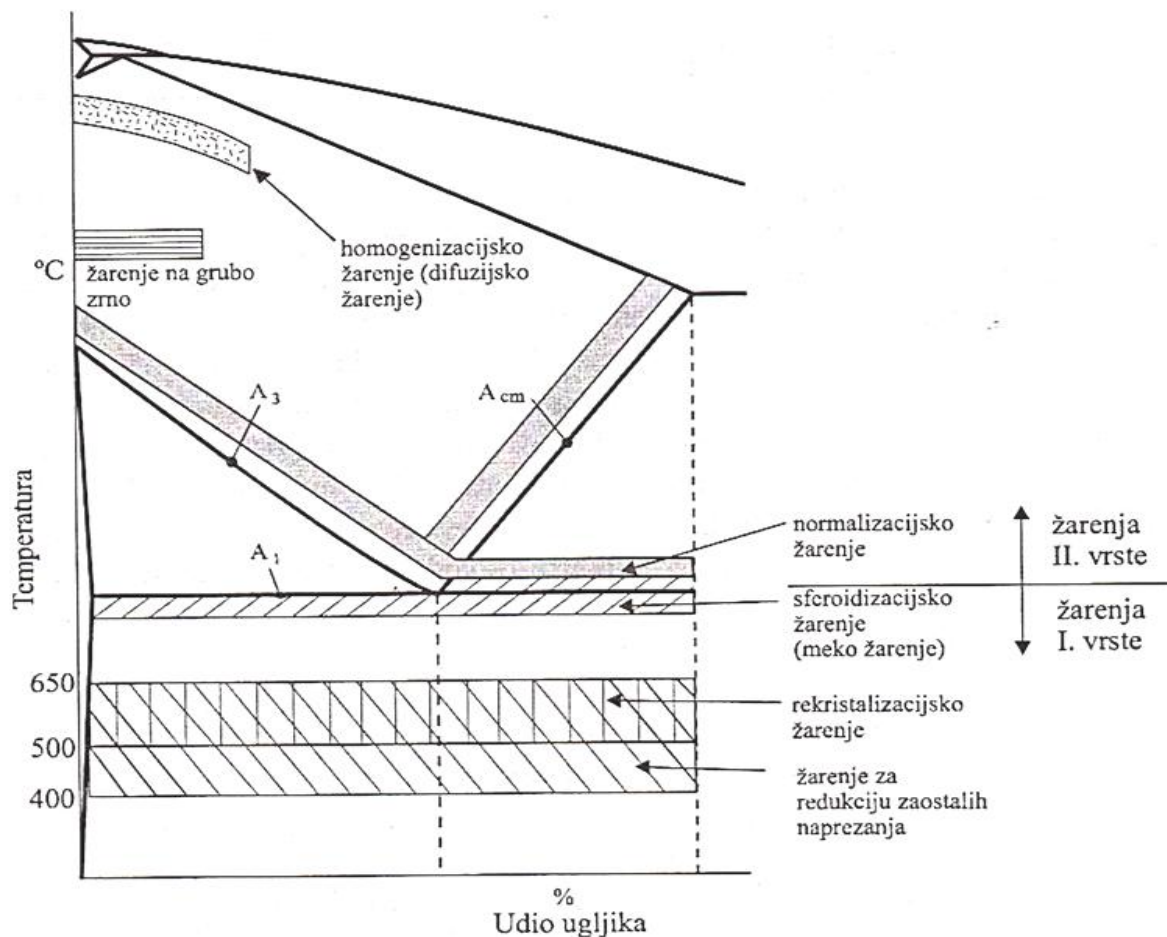
Što je veća brzina ohlađivanja legure te što je ona više legirana, dijagram „željezo– ugljik“ bit će manje podoban za kvantitativne zaključke.

2.1.1 Postupci žarenja

Postupci žarenja primjenjuju se pri preradi raznih metala i njihovih legura s ciljem postizanja specifičnih tehnoloških svojstava. Postupci žarenja dovode čelik bliže stanju metastabilne ravnoteže, a postupcima žarenja nekih vrsta željeznih legura njihova se struktura dovodi praktički u stanje stabilne ravnoteže.

Postupci žarenja I. reda provode se na temperaturama ispod A_1 . Hlađenje se nakon žarenja obično izvodi sporo ili barem „normalno“, tj. na mirnome zraku. Kod postupaka žarenja I. reda ne dolazi do prekrizalizacije, tj. nema promjene kristalne rešetke.

Kod postupaka žarenja II. reda dolazi do prekrizalizacije mikrostrukture. Cilj je postići točno definirano strukturno stanje legure jer strukturne promjene igraju odlučujuću ulogu. Postupci žarenja II. vrste provode se na temperaturama oko ili iznad temperature A_1 . Kod postupaka žarenja II. reda dolazi do prekrizalizacije, a strukturne promjene igraju odlučujuću ulogu.



Slika 2.7 Područja uobičajenih temperatura žarenja čelika [11]

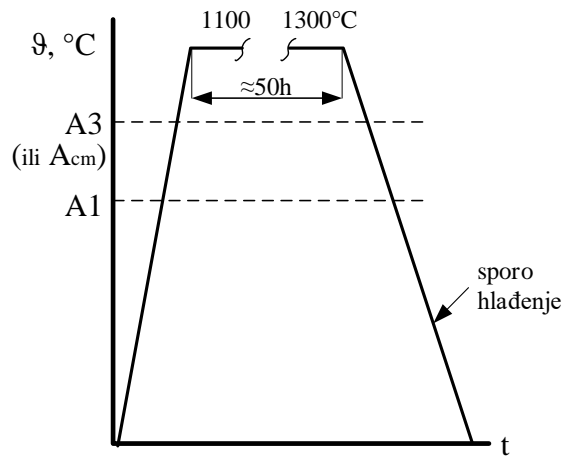
Difuzijsko žarenje (homogenizacijsko žarenje)

Difuzijsko žarenje postupak je toplinske obrade kojim se uklanjaju razlike kemijskog sastava nastale pri primarnoj kristalizaciji (kristalne segregacije).

Koncentracijska izjednačenja sastava difuzijom postižu se tek pri vrlo visokim temperaturama (od 1100 °C do 1300 °C) i tijekom dugih trajanja žarenja (oko 50 sati).

Ovaj se postupak prvenstveno primjenjuje za čelične ljevove.

Difuzijskim se žarenjem poboljšavaju mehanička svojstva kasnijih čeličnih proizvoda, s obzirom na to da će se topive nečistoće otopiti u austenitu, a netopivi će sastojci kao oksidi, nitridi i karbidi koagulirati, odnosno poprimiti kuglaste oblike. Difuzijsko se žarenje obično izvodi u jamskim pećima, a u slučaju posebno osjetljivih proizvoda žarenje se provodi u zaštitnoj atmosferi radi sprečavanja oksidacije i razugljičenja.



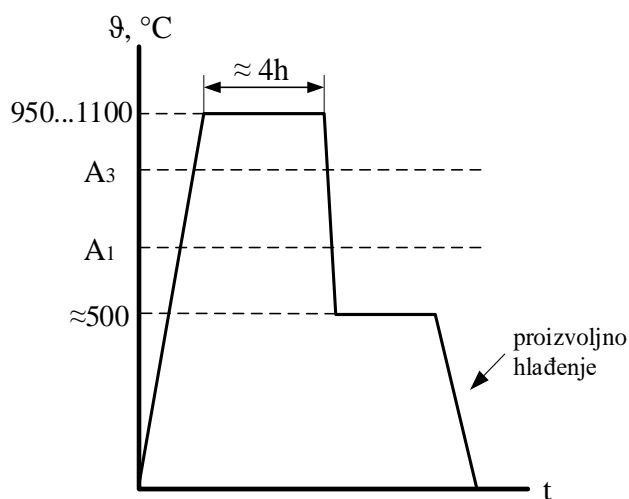
Slika 2.8 Dijagram postupka difuzijskog žarenja [6]

Struktura postignuta difuzijskim žarenjem nije podobna kao završna struktura proizvoda pa se difuzijski žareni blokovi redovito normaliziraju, radi postizanja završne strukture ili radi pripreme za završnu toplinsku obradbu (npr. za poboljšavanje) [6].

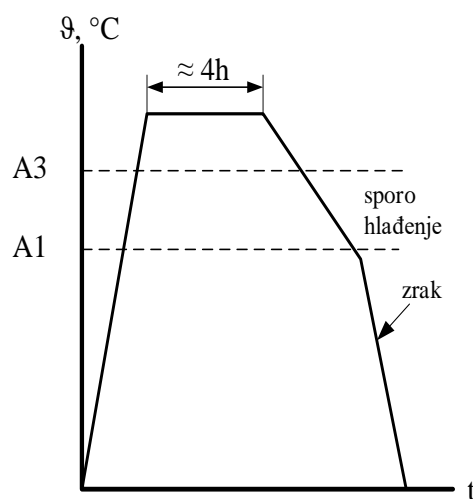
Žarenje na grubo zrno (visokotemperaturno žarenje)

Žarenje na grubo zrno izvodi se kod čelika s manje od 0,4 % C radi poboljšanja obradivosti odvajanjem čestica.

Žarenje na grubo zrno izvodi se pri temperaturama od 950 °C do 1100 °C, (znatno iznad A_{c3}) obično oko 4 sata. Pri tim temperaturama pogrubljuje austenitno zrno, a na njegovim se granicama nakupljaju strani atomi, što će nakon ohlađivanja u gruboj feritno-perlitnoj strukturi sniziti plastičnost granica pa će se zato strugotina lomiti u kratke komadiće [6].



Slika 2.9 Dijagram postupka žarenja na grubo zrno niskougličnih čelika [6]



Slika 2.10 Dijagram postupka žarenja na grubo zrno visokougličnih čelika [6]

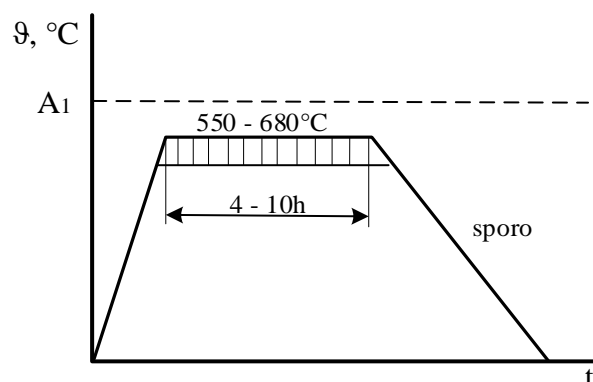
Žarenje na grubo zrno nije završna toplinska obrada jer nakon završene obrade odvajanjem čestica treba proizvode žarene na grubo zrno normalizirati da bi im se zrno ponovno usitnilo.

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja izvodi se na dovoljno visokoj temperaturi kako bi se razgradila unutrašnja naprezanja u materijalu te dovoljno sporim hlađenjem kako se ne bi stvorila nova naprezanja. Pri žarenju za redukciju zaostalih naprezanja ne nastupaju važnije strukturne promjene, a razgrađuju se makronaprezanja i transformacijska naprezanja. Naprezanja u proizvodu koji je potrebno žariti zbog redukcije zaostalih naprezanja nastaju:

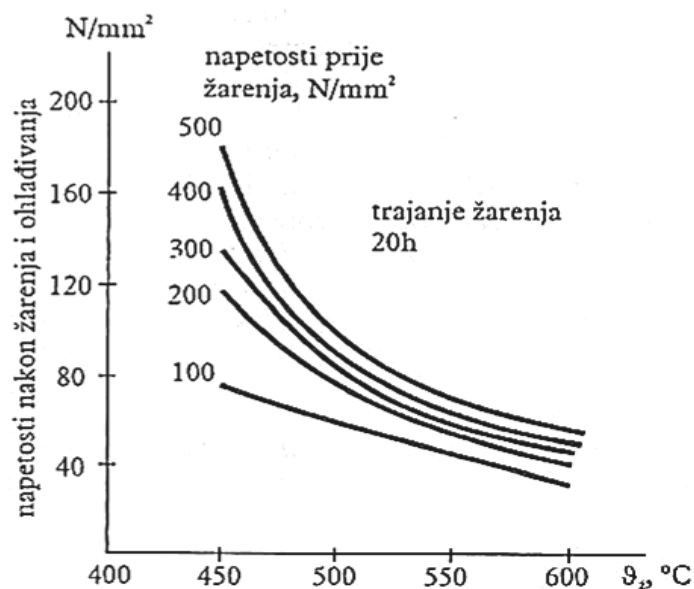
- pri hlađenju nakon lijevanja, kovanja i zavarivanja
- pri oblikovanju hladnom deformacijom
- nakon obrade odvajanjem čestica.

Transformacijska naprezanja nastaju zbog razlika specifičnih volumena austenita i pretvorenih proizvoda ili zbog djelovanja tlaka na materijal kod stvaranja proizvoda. Temperatura žarenja bira se ispod linije A_1 , odnosno u slučaju poboljšanih proizvoda, temperatura žarenja treba biti niža od temperature izvedenog popuštanja. Ugrijavanje do temperature žarenja mora biti sporo.



Slika 2.11 Dijagram postupka žarenja za redukciju naprezanja [6]

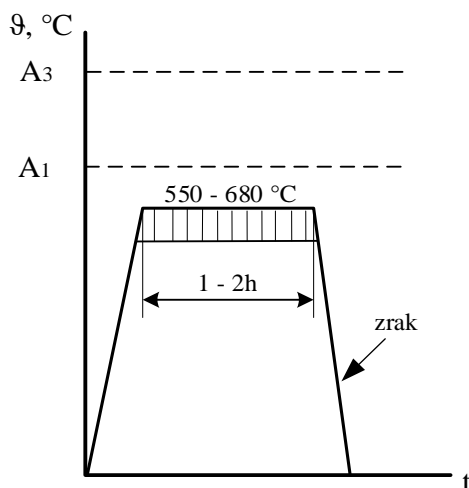
Pri povišenim se temperaturama snižavaju vlačna čvrstoća i granica razvlačenja, a povećavaju se svojstva duktilnosti. Ugrijavanjem se snižava otpor materijala plastičnom deformiranju pa će redovita pojava nakon žarenja biti trajna deformacija proizvoda, što je samo dokaz da je proizvod trebalo žariti. Žarenje je povoljno predvidjeti na početku niza tehnoloških postupaka, najčešće odmah nakon grube strojne obrade.



Slika 2.12 Sniženje naprezanja žarenjem [6]

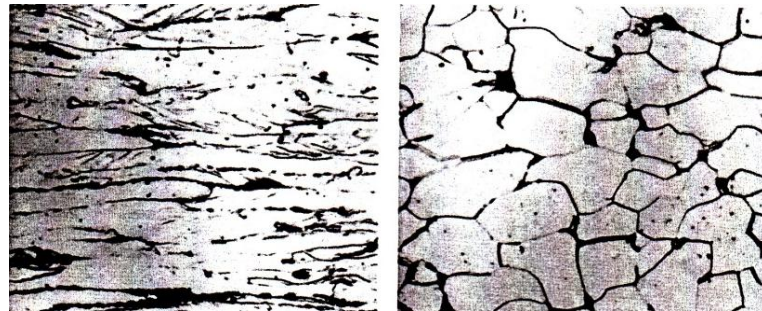
Rekristalizacijsko žarenje

Rekristalizacijsko žarenje postupak je toplinske obrade kojim se stvara novo kristalno zrno hladno deformiranih proizvoda stvaranjem kristalizacijskih klica i njihova rasta, a bez faznih pretvorbi [6]. Provodi se nakon hladnog oblikovanja tijekom kojeg se promijenila tekstura materijala i nastupilo hladno deformacijsko očvrnuće. Rekristalizacija vraća čeliku duktilnost koja se pri hladnom deformiranju smanjila. Temperatura rekristalizacije legura nije neka vrijednost koja je određena za neku leguru jer ovisi i o postojanju čestica karbida, nitrida ili nečistoća, što otežava rekristalizaciju, odnosno traži više temperature i/ili dulja trajanja. Temperatura rekristalizacije ovisi i o početnoj veličini zrna nedeformiranog čelika i o brzini ugrijavanja.



Slika 2.13 Dijagram postupka rekristalizacijskog žarenja [6]

Pri pravilno odabranoj temperaturi rekristalizacijskog žarenja čvrstoća se i tvrdoća snižavaju, duktilnost raste, a naprežanja unesena hladnom deformacijom potpuno se reduciraju. Prekoračenjem pravilne temperature rekristalizacijskog žarenja zрно postupno raste, a svojstva se i čvrstoće i duktilnosti pogoršavaju.



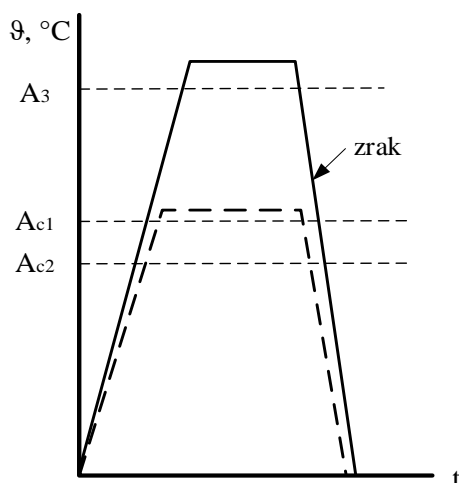
Slika 2.14 Mikrostruktura niskougličnog čelika prije i poslije rekristalizacijskog žarenja [11]

Rekristalizacijsko žarenje primjenjuje se i kod ostalih metala i njihovih legura radi postizanja deformabilnosti koja se smanjila zbog očvršćivanja pri hladnom deformiranju.

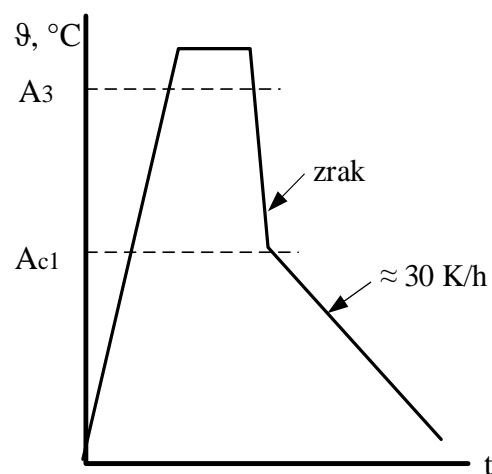
Normalizacijsko žarenje (normalizacija)

Normalizacijsko žarenje (normalizacija) definira se kao postupak toplinske obrade koji se sastoji od austenitiziranja i ohlađivanja na mirnome zraku radi postignuća sitnozrnate i jednolične mikrostrukture (perlit + ferit kod podeutektoidnih, a perlit + karbidi kod nadeutektoidnih čelika).

Normalizacija kontinuiranim ohlađivanjem na zraku prikazana je na slici 2.15, a dijagram normalizacije s usporenim hlađenjem prikazan je na slici 2.16.



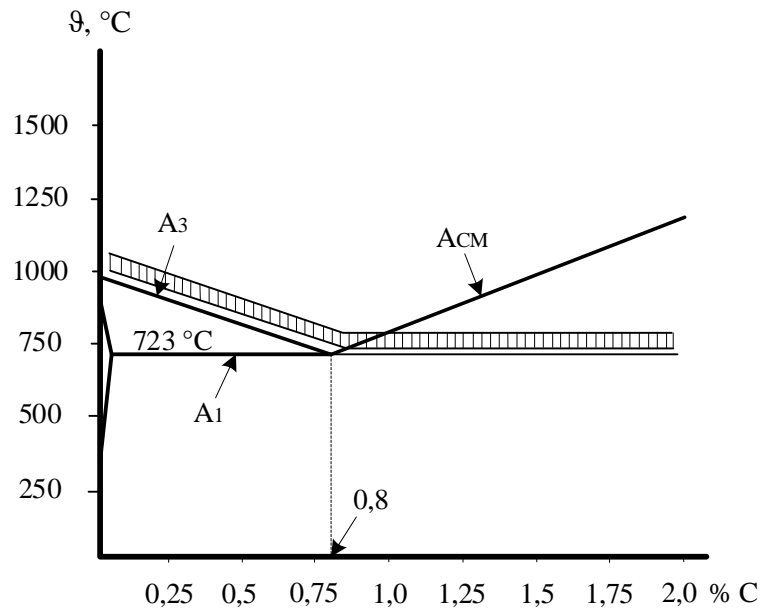
Slika 2.15 Dijagram postupka normalizacije (— — — podeutektoidni čelici, - - - - nadeutektoidni čelici) [6]



Slika 2.16 Dijagram postupka normalizacije s usporenim ohlađivanjem radi sprečavanja unutarnjih naprežanja [6]

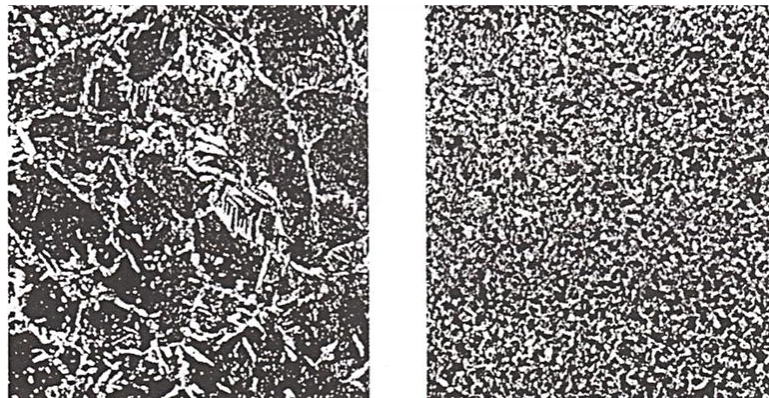
Na učinke normalizacijskog žarenja utječu sljedeći parametri:

- brzina ugrijavanja
- temperatura austenitiziranja
- trajanje držanja na temperaturi austenitiziranja
- brzina hlađenja.



Slika 2.17 Dijagram Fe – C s ucrtanim pojasom temperatura normalizacije ugljičnih čelika [6]

Kako je jedan od glavnih ciljeva normalizacijskog žarenja usitnjenje zrna, želi se već pri ulasku u austenitno područje postići što više klica kristalizacije. Zato treba nastojati da se dio klica ne rastvori već pri ugrijavanju, tj. treba ugrijavati toliko brzo koliko to dopuštaju vrsta materijala i oblik proizvoda. Iz istih razloga izabire se i temperatura austenitiziranja tek malo iznad A₃ (A₁). Trajanje držanja na temperaturi pri normalizacijskom žarenju mora biti što kraće kako se ne bi otopile klice i zrno pogrubilo.



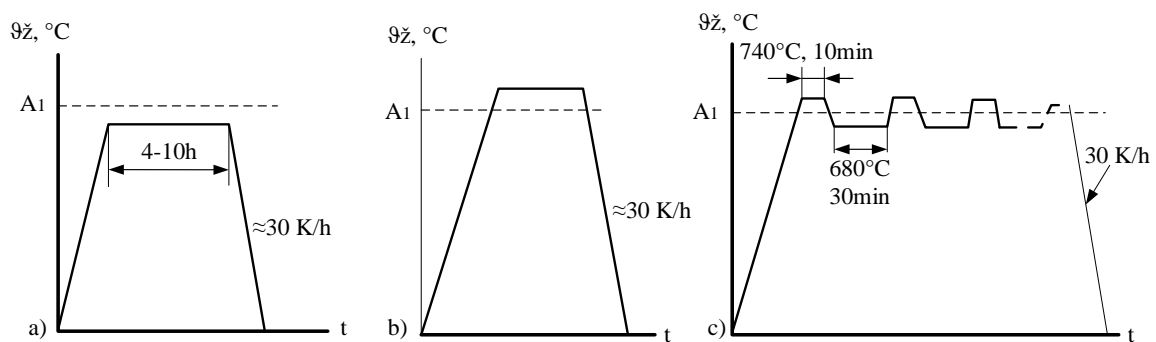
Slika 2.18 Mikrostruktura srednjegljičnog (podeutektoidnog) čelika prije i poslije normalizacijskog žarenja [11]

Normalizacijskim se žarenjem isto tako:

- reduciraju učinci različitih pogrešaka u strukturi
- poboljšavaju se svojstva hladnooblikovanih proizvoda s pre niskim stupnjem oblikovanja
- poboljšavaju se svojstva zavarenih spojeva
- poboljšava se obradivost odvajanjem čestica (posebno nelegiranih i niskolegiranih čelika).

Sferoidizacijsko žarenje (sferoidizacija)

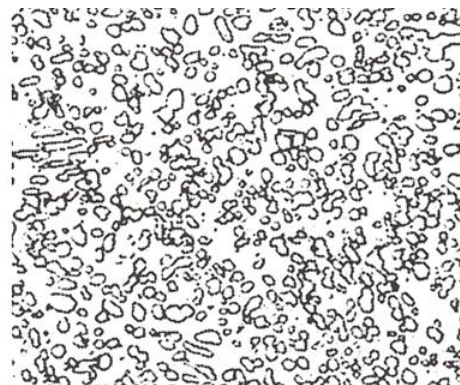
Svrha sferoidizacijskog žarenja jest uobličiti karbide iz lamelnog ili iz mrežastog oblika u kuglasti. Sferoidizacijsko žarenje izvodi se dužim držanjem pri temperaturi A_1 , (nešto nižoj, nešto višoj ili oscilirajućoj oko A_1). Struktura postignuta sferoidizacijskim žarenjem olakšava obradu odvajanjem čestica čelika s više od 0,4 % C, a oblikovanje deformiranjem olakšano je kod svih čelika. Sitne čestice sferoidiziranih karbida optimalna su početna podloga za buduće kaljenje proizvoda.



Slika 2.19 Glavne inačice postupaka sferoidizacijskog žarenja [6]



lamelarni (i mrežasti) oblik karbidnih čestica



sferoidalni oblik karbidnih čestica

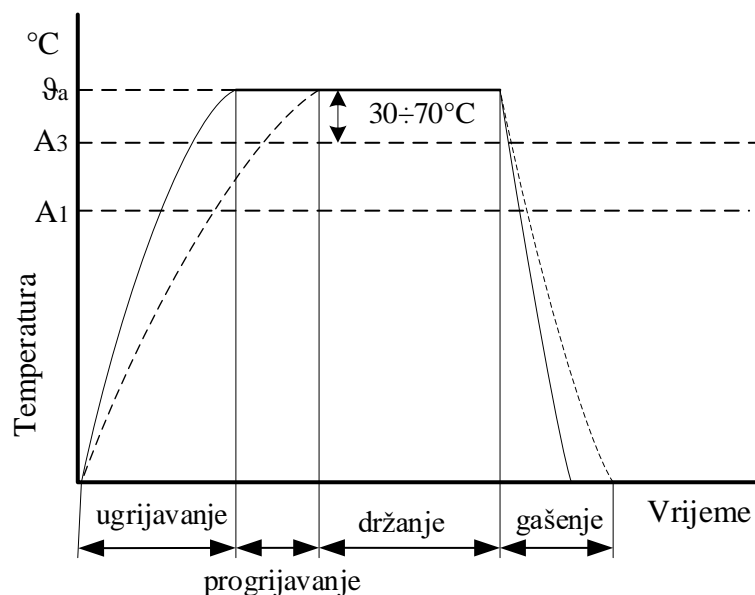
Slika 2.20 Mikrostruktura visokougličnog alatnog čelika prije i poslije sferoidizacijskog žarenja [11]

2.1.2 Kaljenje čelika

Kaljenje čelika toplinska je obrada s ciljem postizanja što veće tvrdoće nakon gašenja i postizanje što jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku. Kaljivost čelika se prema euronormi 52-83 definira samo kao sposobnost pretvorbe u austenit [12].

Postupak kaljenja sastoji se od:

- ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i progrijavanja na toj temperaturi
- držanja na temperaturi austenitizacije (sa svrhom otapanja ugljika i legirajućih elemenata u austenitu)
- gašenja (sa svrhom postizanja martenzitne mikrostrukture).

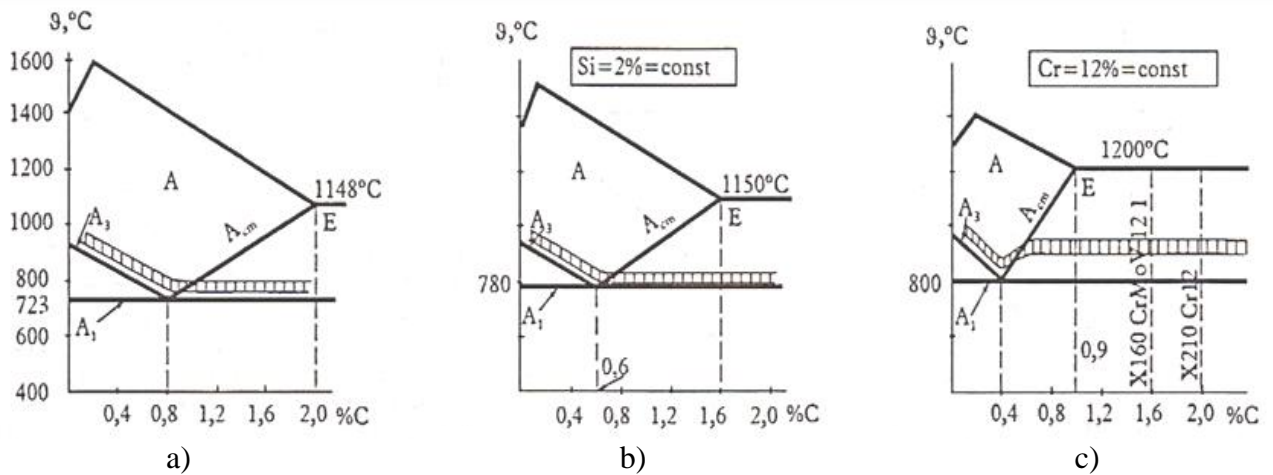


Slika 2.21 Dijagram postupka kaljenja nekog podutektoidnog čelika [11]

Uvjeti zakaljivosti čelika sljedeći su [11]:

1. postojanje mikrostrukturne pretvorbe ferita u austenit i obrnuto
2. čelik mora sadržavati (dogovorno) najmanje 0,35 % C da bi dovoljan broj kristalnih rešetki γ -željeza otopio atom ugljika
3. čelik treba ugrijati u austenitno područje dijagrama stanja, tj. na optimalnu temperaturu austenitizacije
4. austenitizirani čelik treba dovoljno intenzivno hladiti kako bi se spriječila difuzija ugljikovih atoma iz austenitne rešetke i ostvarilo prisilno zadržavanje atoma ugljika u novonastaloj kristalnoj rešetki martenzita.

Slika 2.22 prikazuje načela izbora temperature austenitizacije za različite vrste čelika.



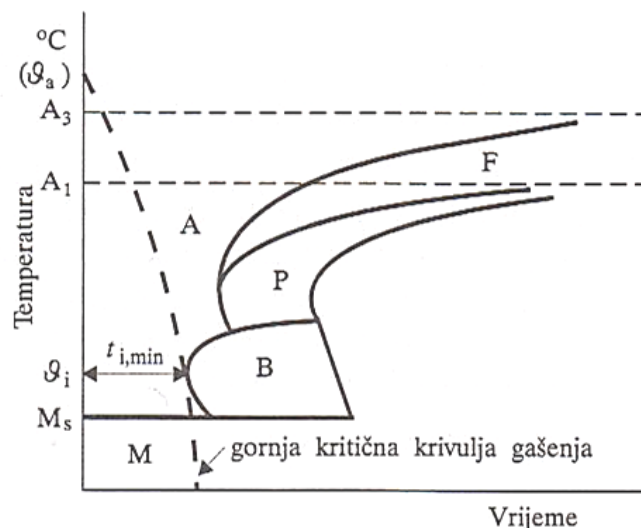
Slika 2.22 Područje optimalne temperature austenitizacije za: a) nelegirane čelike, b) niskolegirane čelike s 2 % Si, c) visokolegirane čelike s 12 % Cr [6]

Gornja kritična brzina gašenja jest ona najmanja brzina hlađenja kod koje se dobiva potpuno martenzitna struktura, a izračunava se iz odgovarajućeg TTT (engl. Time – Temperature – Transformation) dijagrama prema izrazu (2.1) [11].

$$v_{kg} = \frac{\vartheta_a - \vartheta_i}{t_{i,min}} \quad (2.1)$$

Gdje je:

- v_{kg} , gornja kritična brzina gašenja
- ϑ_a , temperatura austenitizacije
- ϑ_i , temperatura na kojoj je trajanje inkubacije pothlađenog austenita najkraće
- $t_{i,min}$, minimalno trajanje inkubacije pothlađenog austenita.



Slika 2.23 Utvrđivanje gornje kritične brzine gašenja (kvalitativno) [11]

Izbor sredstva za gašenje slijedi iz vrijednosti potrebne brzine gašenja. Za praksu vrijede sljedeća pravila [11]:

- za $v_{kg} > 150$ °C/s čelik treba gasiti u vodi
- za $v_{kg} 150 > v_{kg} > 5$ °C/s čelik treba gasiti u ulju ili u uljnoj emulziji, odnosno u toploj kupki
- za $v_{kg} < 5$ °C/s čelik se smije hladiti na zraku ili (bolje) u inertnom plinu (npr. dušiku).

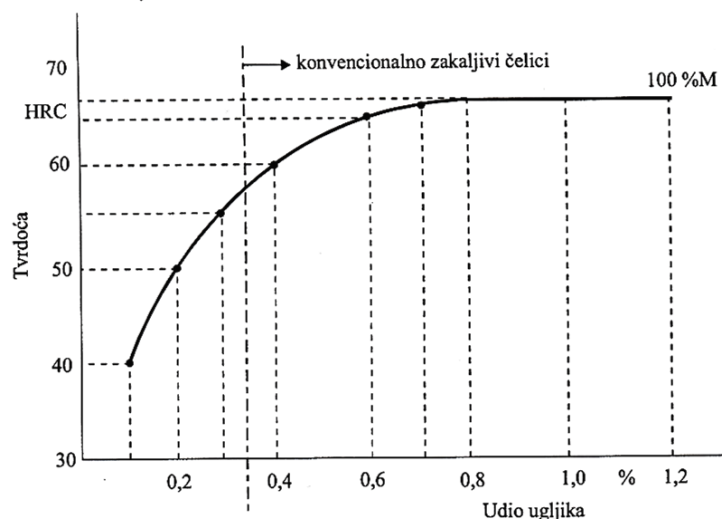
Sredstvo za gašenje mora se birati i prema dimenzijama predmeta koji želimo **zakaliti** i **prokaliti**.

Kaljivost je svojstvo čelika da se može zakaliti, a obuhvaća pojmove **zakaljivost** i **prokaljivost**.

Zakaljivošću se smatra visina postizive tvrdoće nakon gašenja u idealnim uvjetima. Postiziva tvrdoća čelika ovisi samo o onom udjelu ugljika koji je bio otopljen u austenitu prije gašenja te koji je ostao prisilno otopljen u martenzitu nakon gašenja. Prisutnost legirajućih elemenata u čeliku ne utječe na postizivu tvrdoću nakon gašenja, nego samo na iznos gornje kritične brzine gašenja [6]. Ovisnost zakaljivosti o sadržaju ugljika pokazuje Burnsov dijagram, sl. 2.24. U praksi se kontrola kvalitete zakaljenog predmeta izvodi u pravilu mjerenjem tvrdoće nakon gašenja te usporedbom postignute tvrdoće s postizivom tvrdoćom prema Burnsovu dijagramu.

Tvrdoća potpuno zakaljenog čelika ovisi o:

- sadržaju ugljika koji je na temperaturi austenitizacije otopljen u primarnom austenitu
- intenzivnosti gašenja (treba gasiti nadkritičnom brzinom da bi se postigla maksimalno postiziva tvrdoća).



Slika 2.24 Maksimalno postizive tvrdoće kaljenih čelika u ovisnosti o udjelu ugljika u čeliku (Burnsov dijagram) [11]

Maksimalno postiziva tvrdoća može se izračunati na osnovi sadržaja ugljika [6].

$$(HRC_g)_{\max} = 20 + 60\sqrt{\% C} \quad (2.2)$$

Omjer postignute i postizive tvrdoće (S_Z) zadanog čelika naziva se stupnjem zakaljenosti [6].

$$S_Z = (HRC_g)_{\text{stv}} / (HRC_g)_{\max} \quad (2.3)$$

Prokaljivost čelika (tehnoško svojstvo) predstavlja sposobnost čelika da postigne jednoličnu tvrdoću po poprečnom presjeku predmeta.

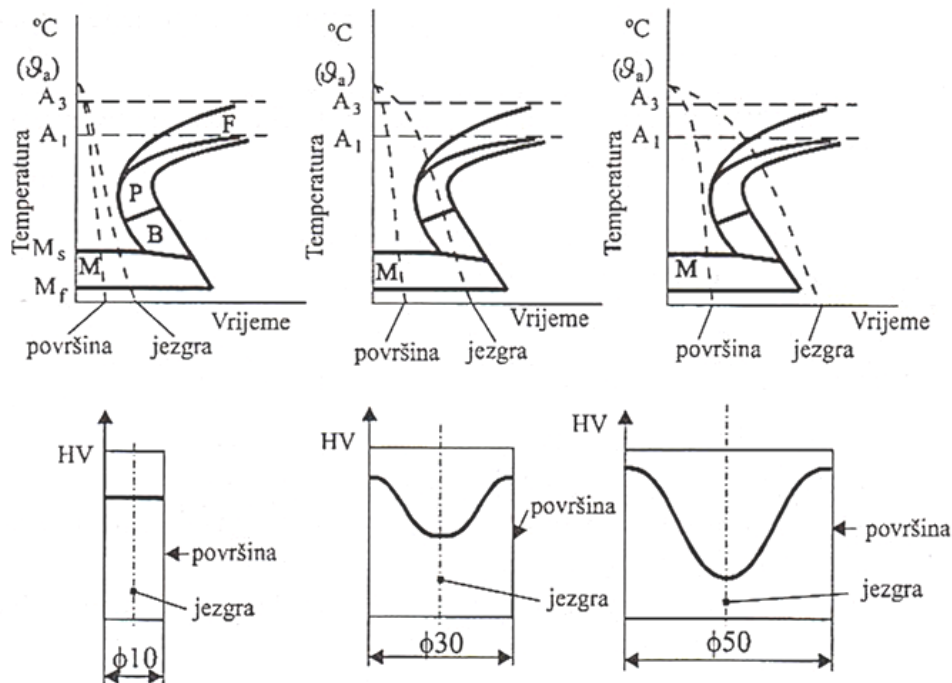
Čelik će biti potpuno prokaljen, ako je u svakoj točki svoga presjeka i maksimalno zakaljen, tako da se u svakoj točki presjeka postigla struktura sa 100 % martenzita. Visina tvrdoće ne može prekoračiti maksimalnu tvrdoću zakaljenosti (maksimalnu zakaljivost). Ovdje treba uočiti razliku između tehnološkog svojstva prokaljivosti čelika i prokaljenosti – stanja postignutog nakon kaljenja.

Prokaljenost predmeta izrađenog od zakaljivog čelika ovisi o:

- dimenziji proizvoda
- sastavu čelika, odnosno njegovoj prokaljivosti
- intenzivnosti („brzini“) gašenja.

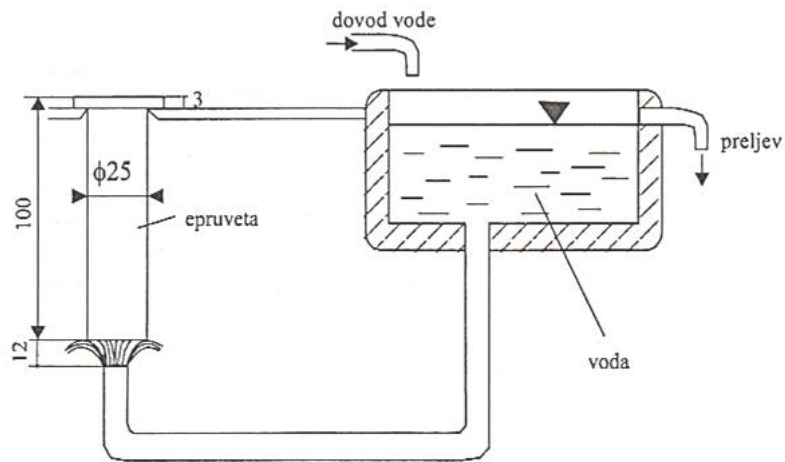
Prokaljivost nekog čelika može se eksperimentalno utvrditi pokusima kaljenja valjkastih uzoraka različitih promjera i primjenom različitih sredstava za gašenje (voda, ulje...) koja

imaju određenu intenzivnost ohlađivanja. Najčešće se kao kriterij prokaljivanja primjenjuje tzv. „kritična tvrdoća“, a to je ona tvrdoća čelika zadanog udjela ugljika kod kojeg se postiglo 50 % martenzita u mikrostrukturi. Krivulje ohlađivanja za površinu i jezgru bit će različite s obzirom na debljinu presjeka. Prokaljenost čelika tim je bolja što je kaljeni predmet manjih dimenzija i što je primijenjeno intenzivnije gašenje. Slika 2.25 prikazuje utjecaj dimenzija čeličnog predmeta na njegovu prokaljenost.



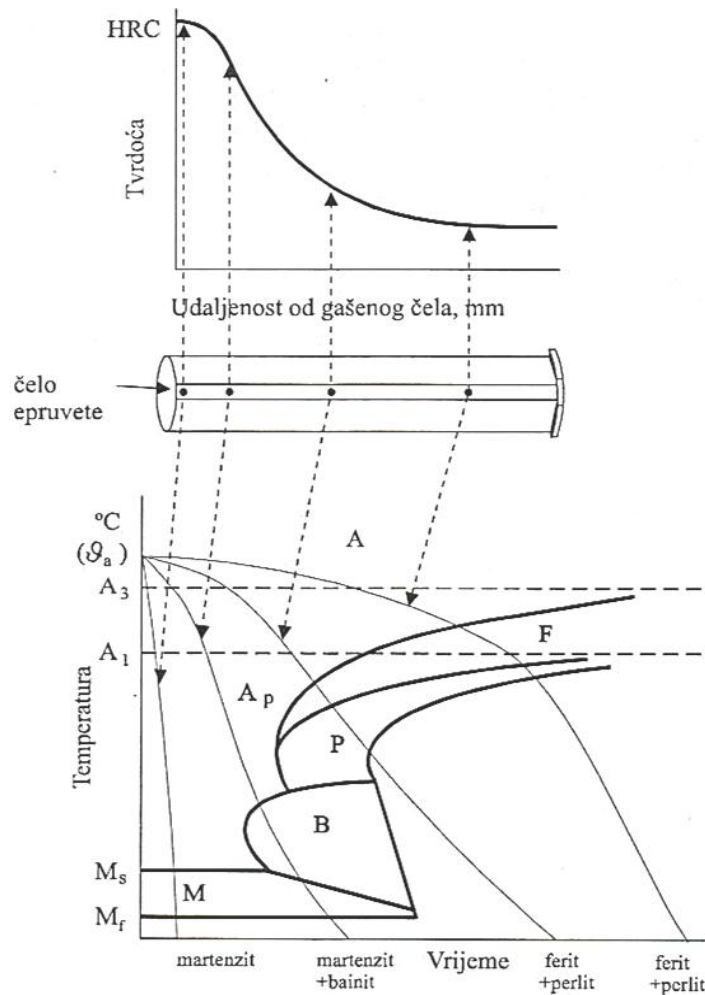
Slika 2.25 Utjecaj dimenzija čeličnog predmeta na njegovu prokaljenost [11]

Općeprihvaćeni način ispitivanja prokaljivosti jest eksperimentalna metoda **Jominy** (prema DIN 50191). Ova metoda temelji se na pokusu s jednom epruvetom. Epruveta je propisanog oblika i dimenzija (promjera 25 mm, duljine 100 mm) i nakon austenitiziranja intenzivno joj se hladi samo čelo. Tako se na jednom uzorku postižu različite brzine ohlađivanja, mikrostrukture i tvrdoće čelika. Shema uređaja za ispitivanje prokaljivosti po Jominyju prikazana je na slici 2.26.



Slika 2.26 Shema uređaja za ispitivanje ohladivanja epruvete po Jominyju [11]

Na osnovi rezultata Jominyjeva testa može se predvidjeti prokaljenost čeličnih dijelova (raspored tvrdoće po poprečnim presjecima) ovisno o dimenzijama dotičnog čeličnog predmeta i intenzivnosti hlađenja sredstva za gašenje (kaljenje).



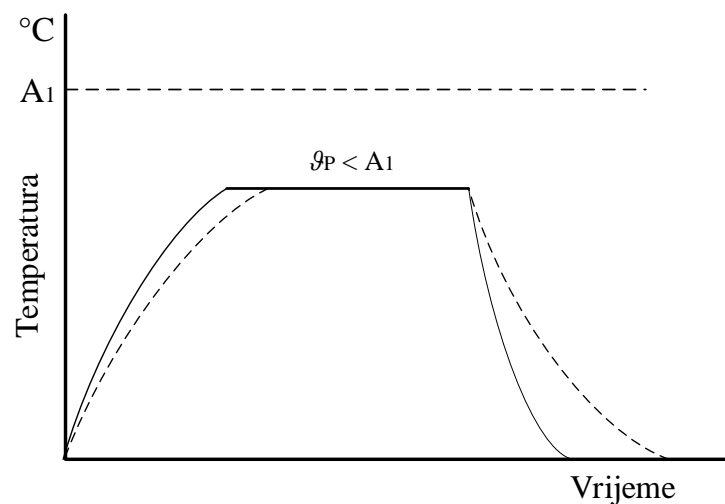
Slika 2.27 Prikaz krivulja hlađenja Jominyjeve epruvete u TTT dijagramu i tijekom postignutih tvrdoća [11]

2.1.3 Popuštanje čelika

Popuštanje je postupak ugrijavanja kaljenog čelika na neku temperaturu ispod temperature A_1 . Svrha popuštanja jest sniženje krhkosti kaljenog čelika, redukcija vlastitih zaostalih naprezanja i postizanje dimenzijske postojanosti (kod visokolegiranih alatnih čelika). Popuštanjem se snižava tvrdoća, no to nije svrha, nego posljedica, tj. neizbježna popratna pojava.

Prema visini temperature popuštanja (ϑ_p) postupci popuštanja dijele se na:

- niskotemperaturno popuštanje ($\vartheta_p < 220 \text{ }^\circ\text{C}$)
- srednjetemperaturno popuštanje ($220 \text{ }^\circ\text{C} < \vartheta_p < 400 \text{ }^\circ\text{C}$)
- visokotemperaturno popuštanje ($400 \text{ }^\circ\text{C} < \vartheta_p < A_1$).



Slika 2.28 Dijagram postupka popuštanja čelika [11]

U ovisnosti o parametrima popuštanja pri popuštanju čelika dolazi do [11]:

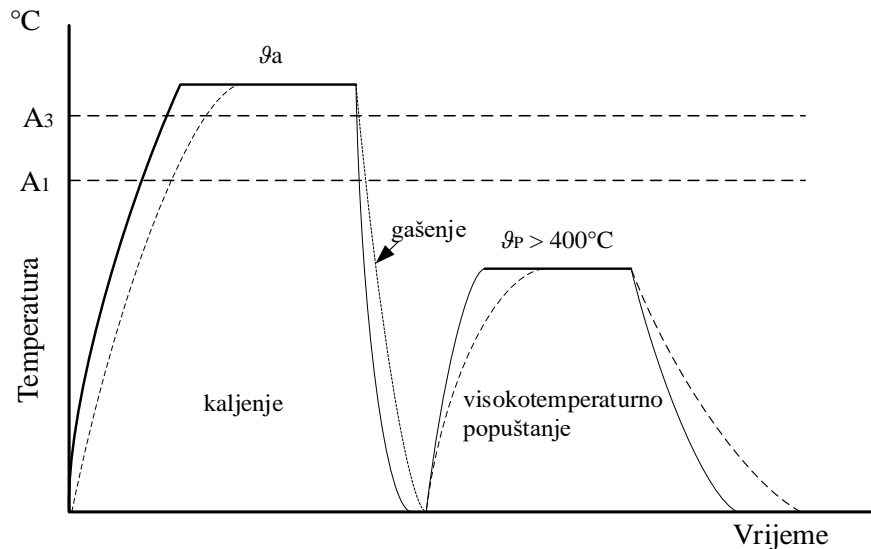
- sniženja prosječnog udjela ugljika u martenzitu na oko 0,25 % C i manje
- stvaranje karbida koji su nastali popuštanjem martenzita
- pretvorbe zaostalog austenita (u martenzit).

Tvrdoća nakon popuštanja ovisi i o vrsti čelika, tako da je pad tvrdoće nakon popuštanja manji kod legiranih nego kod ugljičnih čelika.

2.1.4 Poboljšavanje čelika

Poboljšavanje čelika postupak je toplinske obrade koji se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Glavna je svrha postizanje visoke granice tečenja i visoke

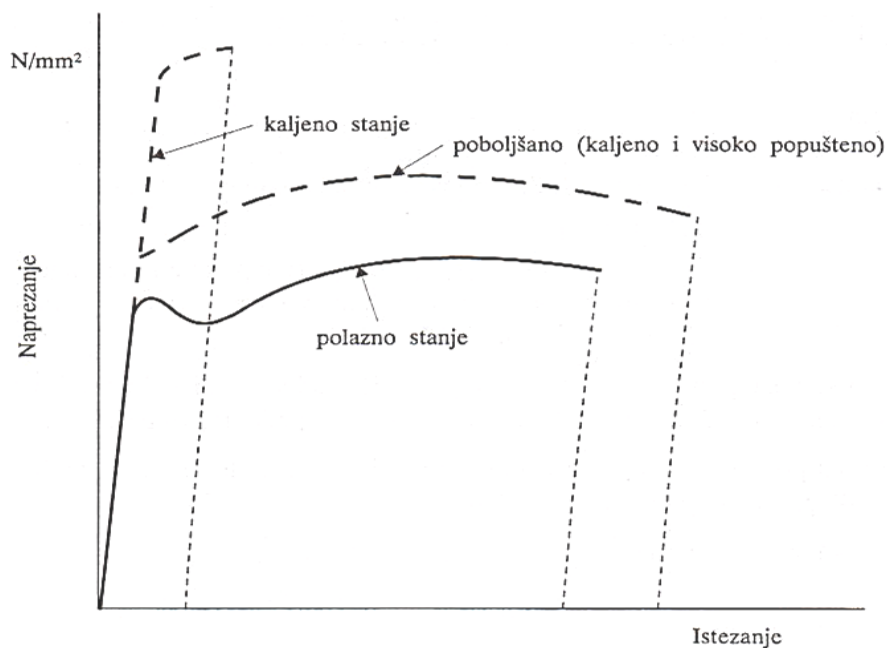
žilavosti. Ovim se postupkom toplinski obrađuju ugljični i niskolegirani podeutektoidni čelici za poboljšavanje. Postupak poboljšavanja može se prikazati u dijagramu temperatura–vrijeme.



Slika 2.29 Dijagram postupka poboljšavanja čelika [11]

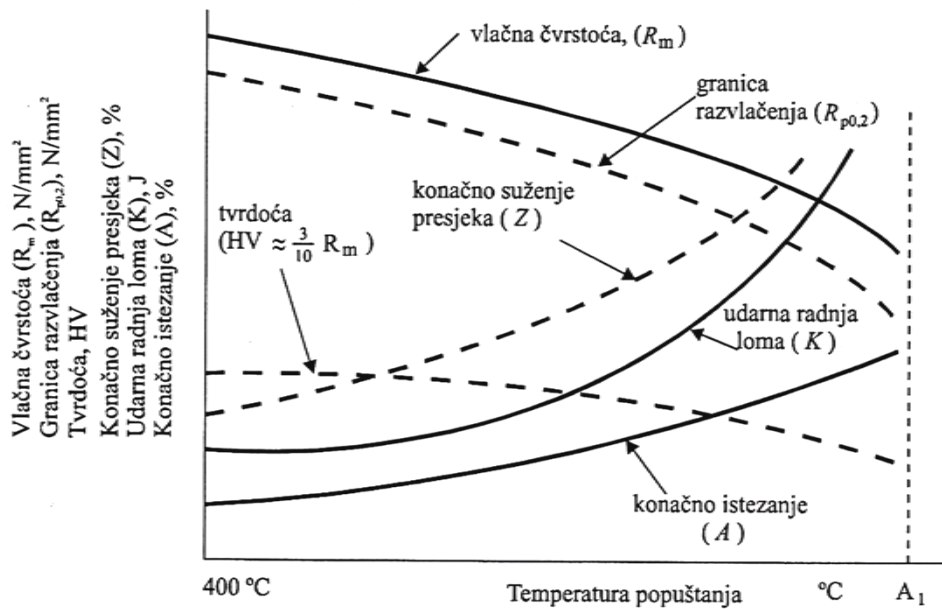
Rezultati poboljšavanja mogu se prikazati u dijagramu naprezanje – istežanje (slika 2.30) i u „dijagramu poboljšavanja“ (slika 2.31) [11].

Čelik u zakaljenom i nepopuštenom stanju ima visoku granicu tečenja, ali duktilnost mu je slaba pa će vjerojatno i žilavost biti niska (mala površina ispod krivulje naprezanje – istežanje). Čelik u poboljšanom stanju ima višu granicu tečenja nego što je ona bila prije kaljenja, ali je i konačno istežanje veće nego što je bilo prije kaljenja, slika 2.30 .



Slika 2.30 Usporedba različitih stanja u postupku poboljšavanja čelika (kvalitativno) [11]

Površina ispod krivulje razvlačenja u poboljšanom stanju znatno je povećana, što ukazuje na znatno povećanje žilavosti u odnosu na stanje prije poboljšavanja.



Slika 2.31 Dijagram poboljšavanja nekog čelika (kvalitativno) [11]

Iz slike 2.31 vidi se ovisnost svojstava o temperaturi popuštanja. Što je viša temperatura popuštanja, to su niže vrijednosti vlačne čvrstoće, granice tečenja i tvrdće, a više su vrijednosti žilavosti, istezanja i kontrakcije.



Slika 2.32 Primjer poboljšanih dijelova [13]

2.1.5 Površinsko kaljenje čelika

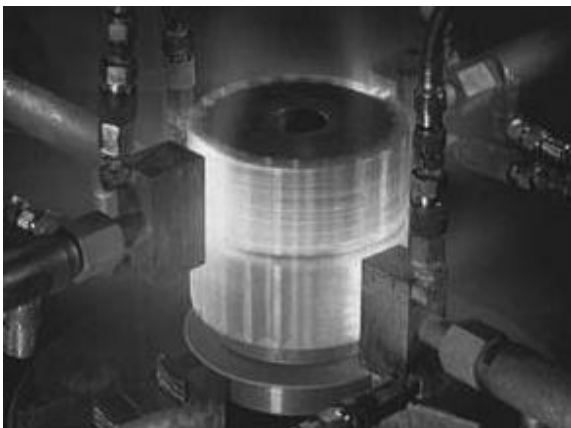
Osim postupaka kaljenja cijele mase strojnog dijela u praksi se primjenjuju i postupci površinskoga kaljenja. Kod primjene ovih postupaka površinski se ugrijavaju samo neki dijelovi proizvoda koje treba kaljenjem otvrdnuti. Za zagrijavanje se primjenjuju izvori topline velike gustoće energije: plinski plamenici, inducirana električna energija, laserski snop i snop elektrona.

Prednosti primjene postupaka površinskoga kaljenja su [12]:

- kratkotrajno ugrijavanje
- moguće kaljenje velikih predmeta koji su preveliki da bi ih se moglo ekonomično ugrijavati u običnim pećima i to samo na određenim dijelovima površine
- kale se samo oni dijelovi površine gdje je za rad važno povećanje tvrdoće
- nema deformacije oblika na mjestu povišenja tvrdoće
- zbog kratkotrajnog ugrijavanja nema opasnosti od oksidacije i razugljičenja te nije potrebna zaštitna atmosfera
- mogućnost uklapanja postupka direktno u proizvodnu liniju
- jednoličnost postignute kvalitete
- induciranje tlačnih naprezanja u površinu, što povišuje dinamičku izdržljivost.

S obzirom na način ugrijavanja površinskog sloja u praksi susrećemo sljedeće postupke površinskoga kaljenja čelika:

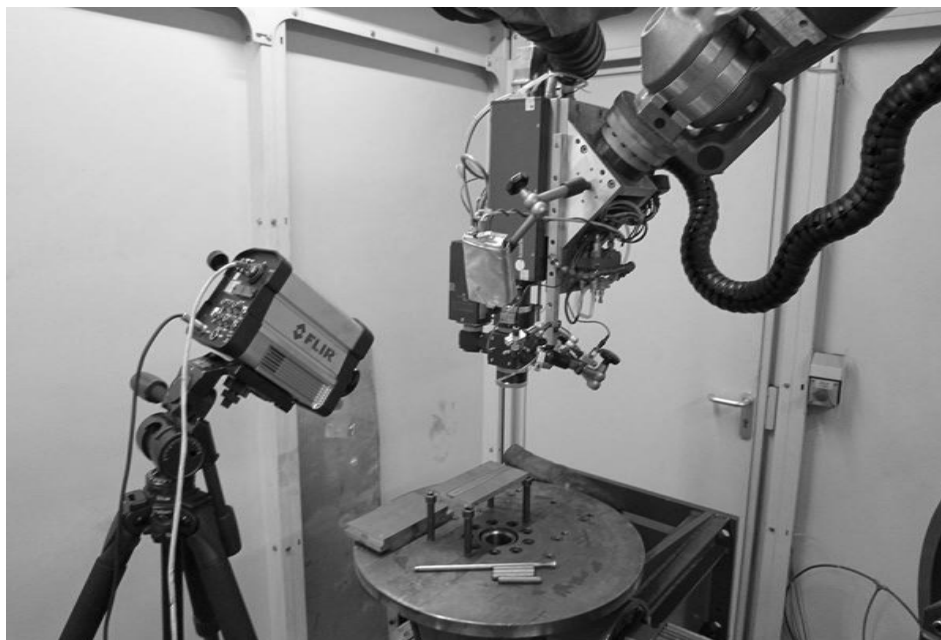
- plameno kaljenje
- indukcijsko kaljenje
- toplinska obrada laserskim snopom.



Slika 2.33 Rotacijsko plameno kaljenje rukavca
[14]



Slika 2.34 Rotacijsko indukcijsko kaljenje koljenaste osovine [14]



Slika 2.35 Kaljenje laserom [15]

2.1.6 Toplinsko-kemijski postupci toplinske obrade

Toplinsko-kemijski (termokemijski) postupci jesu postupci toplinskih obrada koji se provode istodobnim kemijskim i toplinskim djelovanjem radi promjene sastava, strukture i svojstava površinskih slojeva proizvoda. Ugrijavanje i držanje proizvoda izvodi se u aktivnom mediju koji može biti u čvrstom, tekućem, plinovitom ili plazmatičnom stanju. Primjenom ovih postupaka povisuje se otpornost na trošenje, i to više nego što je moguće toplinskim obradama bez promjene sastava površinskog sloja, povisuje se postojanost na korozijsko djelovanje okoline te se induciraju prednaprezanja povoljnog predznaka i veličine u površinskim slojevima predmeta. Ove obrade posebno su aktualne za proizvode nepravilnih geometrijskih oblika za koje je teško ili čak nemoguće izraditi odgovarajući oblik plamenika ili induktora.

Toplinsko-kemijski postupci dijele se na sljedeće skupine [11]:

A - difuzijski postupci

B - toplinski postupci prevlačenja.

A - Difuzijski postupci

Promjena kemijskog sastava površinskih slojeva izvodi se povišenjem udjela metaloida (ugljika, dušika, bora) ili metala (kroma, aluminijska, silicija, vanadijska), često i do potpunog zasićenja.

Cementiranje čelika

Cementiranje čelika postupak je toplinsko-kemijske obrade koji se sastoji od:

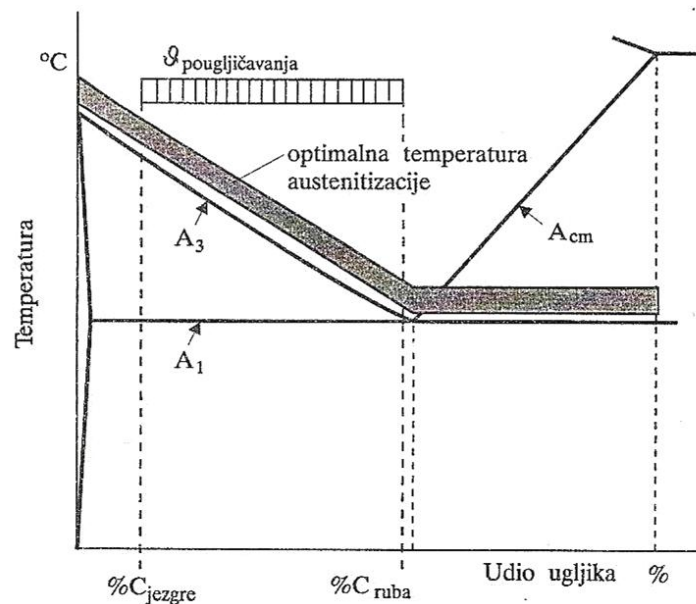
- pougljičenja (obogaćivanje površinskih slojeva proizvoda ugljikom)
- kaljenja pougljičenog proizvoda
- niskotemperaturnog popuštanja.

Osnovni je cilj cementiranja postizanje tvrdih površinskih slojeva strojnog dijela otpornih na trošenje, a da pri tom jezgra strojnog dijela postigne što višu otpornost na udarna opterećenja. Za cementiranje su prikladni ugljični i niskolegirani čelici s najviše 0,25 % C. Postupak pougljičavanja provodi se u sredstvu koje je u stanju na temperaturi austenitizacije čelika predati čeliku ugljik. Dubina površinskih slojeva obogaćenih ugljikom obično iznosi 0,5 do 1,5 mm.

Sredstva za pougljičavanje mogu biti:

- kruta (granulati)
- tekuća (rastaljene soli)
- plinovita (plinske atmosfere)
- plazmatična (ionizirani plinovi).

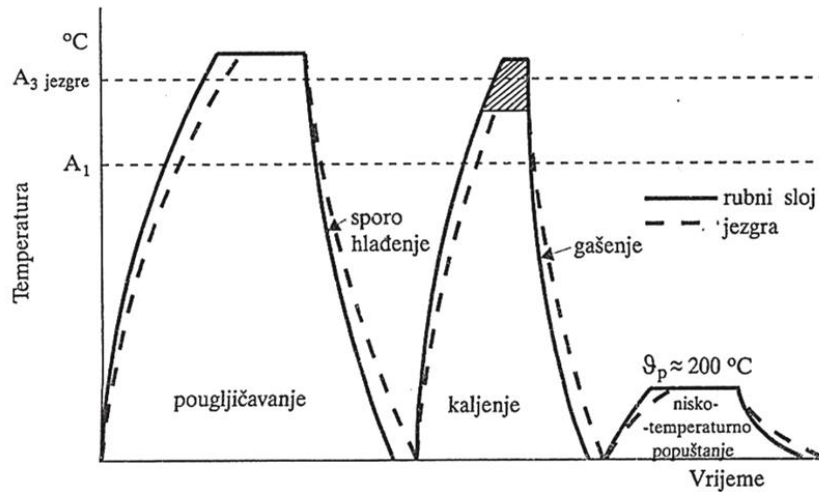
Temperatura pougljičavanja jest između 900 °C i 950 °C i viša je od optimalnih temperature austenitizacije pri kaljenju. Slika 2.36 prikazuje rezultate pougljičenja u Fe – Fe₃C dijagramu.



Slika 2.36 Prikaz rezultata pougljičenja u Fe–Fe₃C dijagramu [11]

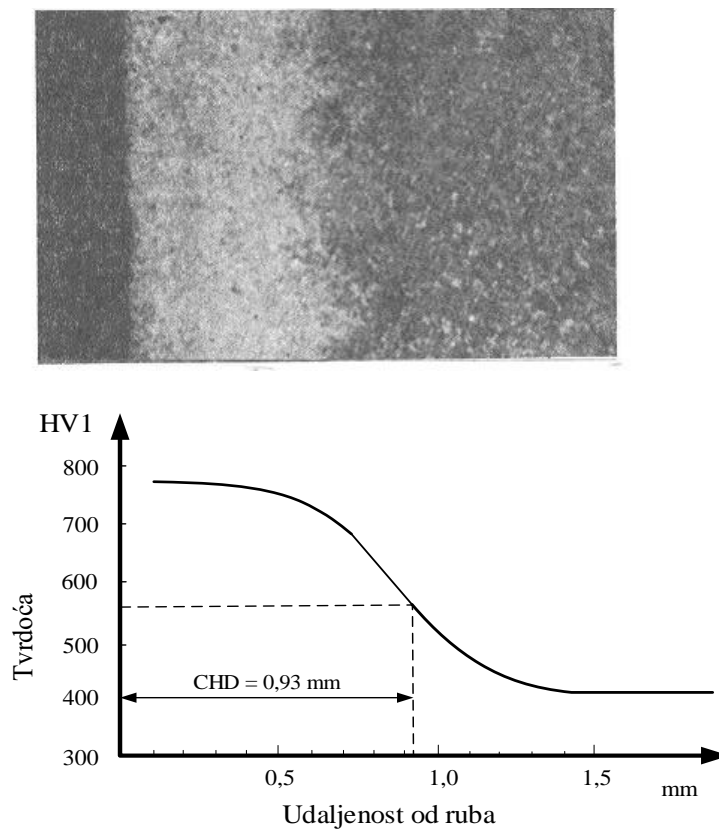
Temperatura pougljičavanja nije uvijek i optimalna temperatura za austenitizaciju te se nakon pougljičavanja predmeti ponovno ugrijavaju na optimalnu temperaturu austenitizacije za kaljenje čelika.

Slika 2.37 prikazuje jedan od uobičajenih postupaka cementiranja čelika.



Slika 2.37 Dijagram jednog od mogućih postupaka cementiranja čelika [11]

Slika 2.38 prikazuje mikrostrukturu i raspored tvrdoće kod pravilno provedenog postupka cementiranja čelika.



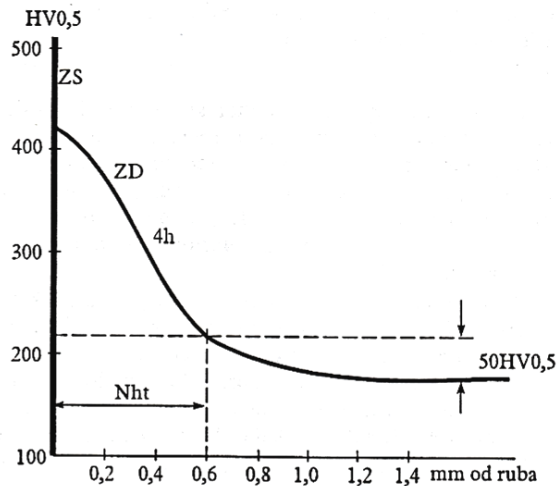
Slika 2.38 Mikrostruktura cementiranog čelika 20MnCr5 s rasporedom tvrdoće [14]



Slika 2.39 Primjer cementiranih dijelova [16]

Nitriranje

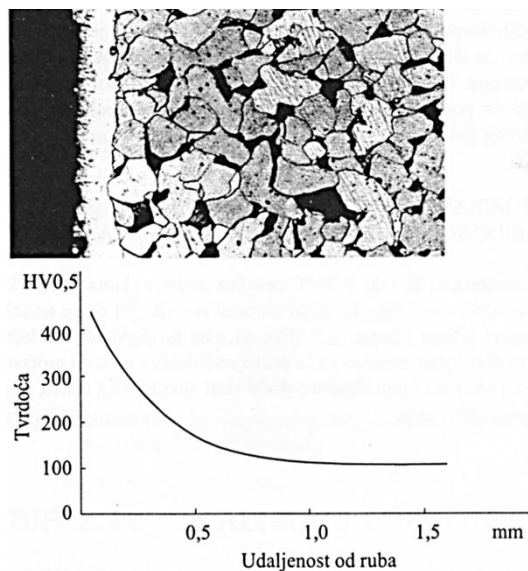
Nitriranje čelika termokemijska je difuzijska obrada kojom se želi obogatiti površinske slojeve dušikom radi povišenja otpornosti na trošenje. Otpornost na trošenje posljedica jest stvaranja nitrida, tj. dušikovih spojeva sa željezom, odnosno dušikovih spojeva s legirajućim elementima kod čelika za nitriranje. Sa željezom dušik stvara nitride Fe_2N i Fe_4N , a s legirajućim elementima dušik stvara nitride kao što su AlN , CrN i drugi. Nitrirati se može svaki, pa i nelegirani čelik i željezni lijevovi, ali do velikog povišenja tvrdoće na površini dolazi samo onda ako u čeliku ima legirajućih elemenata karbidotvoraca. Poslije završenog procesa nitriranja nema potrebe za kaljenjem ni za brzim hlađenjem (gašenjem). Ovi postupci primjenjuju se kao završna toplinska obrada u procesu proizvodnje alata i dijelova, nakon koje se po potrebi izvodi poliranje predmeta. Za dobivanje optimalnih mehaničkih svojstava predmeti se prije nitriranja poboljšavaju temperaturom popuštanja višom od temperature nitriranja. Korisnom se dubinom nitriranja prema DIN 50190 smatra ona udaljenost od ruba presjeka, na kojoj je postignuta tvrdoća za 50 HV_{0,5} viša nego što je tvrdoća jezgre proizvoda.



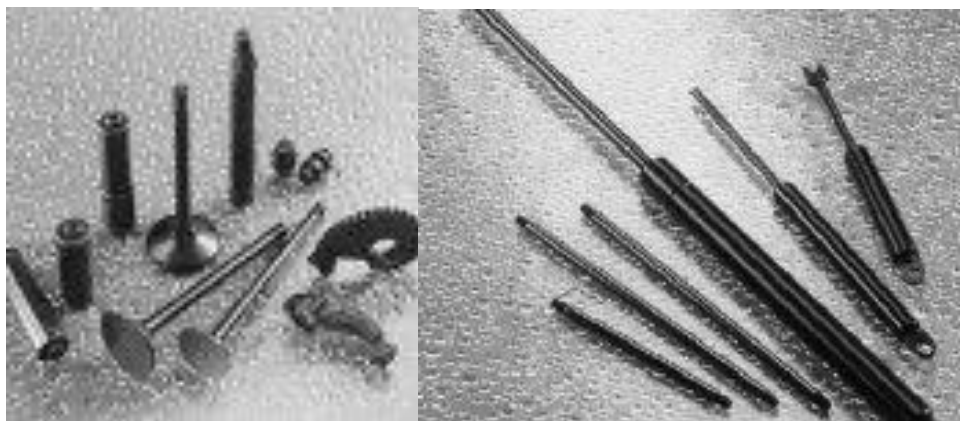
Slika 2.40 Određivanje efektivne dubine nitriranog sloja [6]

Nitriranje u plinu najstariji je postupak nitriranja (A. Fry, 1923. g.). Izvodi se u struji amonijaka pri 490 °C do 550 °C. Trajanje plinskog nitriranja razmjerno je dugo i traje od 20 do 120 sati [6]. Za plinsko nitriranje pogodni su samo legirani čelici.

Nitriranje u solnoj kupki u novije se vrijeme svrstava među postupke nitrokarburiranja jer obično istodobno difundiraju i dušik i ugljik. Donedavno su se ovi postupci nazivali „nitriranje u kupki“, „meko nitriranje“, „postupak TENIFER“, „cijaniranje“. Izvodi se u solnim kupkama uronjavanjem i držanjem predmeta u solima u trajanju od 2 do 4 sata pri uobičajenoj temperaturi 570 °C. Ovim postupkom mogu se nitrokarburirati sve vrste čelika i željezni lijevovi (sivi, nodularni, čelični, temper). Prvenstvena je zadaća nitrokarburiranja u solnoj kupki povišenje otpornosti na trošenje (prije svega adhezijsko), povišenje dinamičke izdržljivosti i povišenje korozijske postojanosti.



Slika 2.41 Mikrostruktura i raspored tvrdoće poprečnog presjeka nitriranog čeličnog predmeta [11]



Slika 2.42 Primjeri nitriranih dijelova [17]



Slika 2.43 Primjer nitriranih dijelova [18]

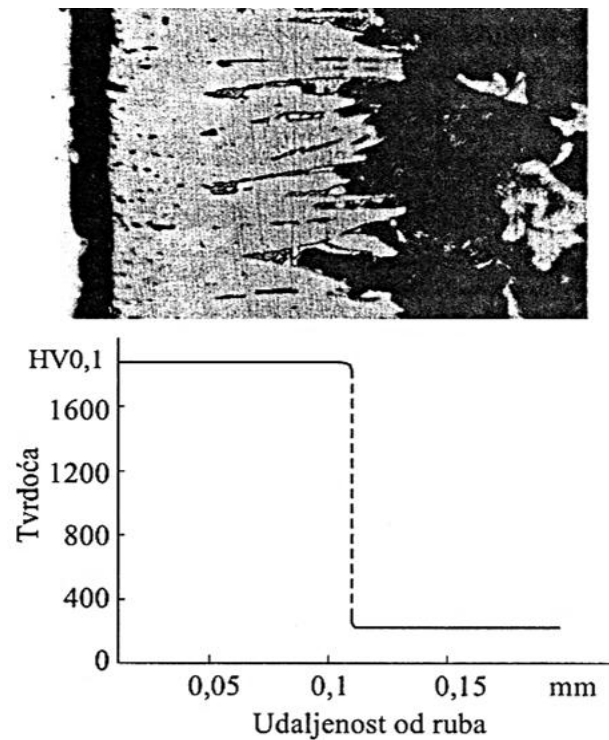
Karbonitriranje je postupak termokemijske obrade čeličnih proizvoda u austenitnom stanju radi istodobnog obogaćenja površinskih slojeva i ugljikom i dušikom. Uobičajene temperature su od 750 °C do 860 °C. Ovaj postupak povisuje otpornost površinskih slojeva predmeta na abrazijsko trošenje.

Nitriranje u plazmi (u ioniziranim plinovima, nazvano i ionitriranje) postupak je nitriranja (ili nitrokarburiranja ili karbonitriranja) ioniziranjem plinova. Temperature postupka ionitriranja kreću se od 350 °C do 580 °C, a uobičajeno trajanje postupka je od 30 minuta pa sve do 40 sati. Ovaj je postupak čist i potpuno neotrovan, a ionizacijski se mogu obraditi sve vrste čelika i željeznih ljevova.

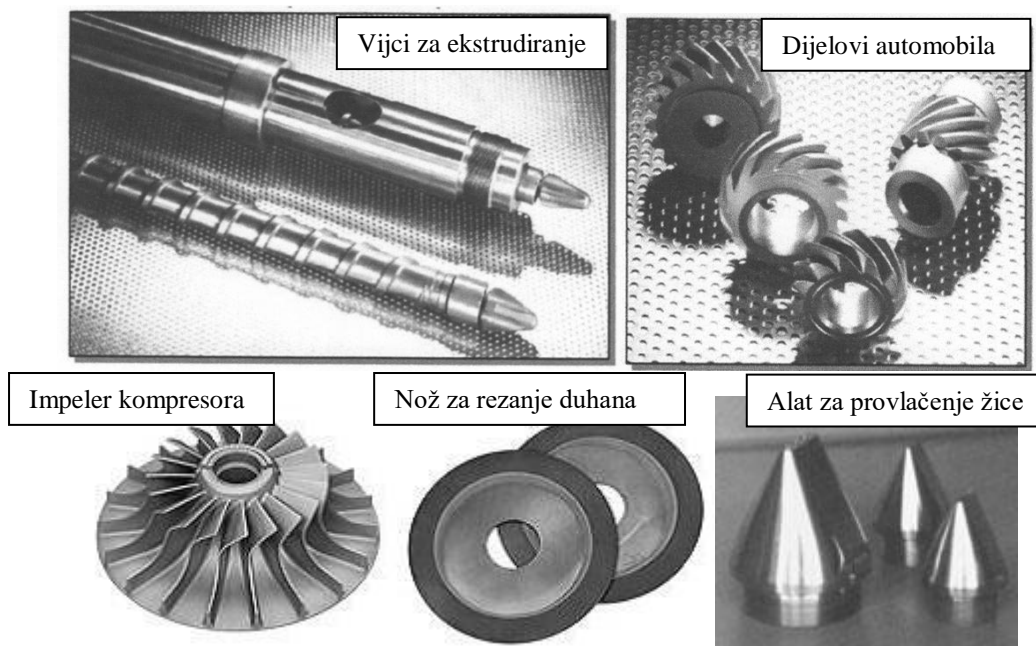
Boriranje

Boriranje čelika termokemijski je difuzijski postupak obrade pri kojem se u površinske slojeve čeličnoga proizvoda ugrijanog na 800 °C do 1000 °C difundira kemijski element bor (B), pri čemu nastaju željezni boridi koji imaju visoku tvrdoću i visoku otpornost na

abrazijsko trošenje. Boriranje se može provesti u različitim sredstvima koja sadrže bor, a sredstva mogu biti u bilo kojem agregatnom stanju (krutom, tekućem ili plinovitom). Debljine i oblik boridnih slojeva ovise o vrsti čelika, temperaturi i trajanju procesa boriranja.



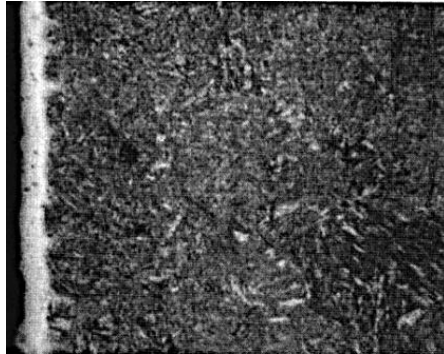
Slika 2.44 Mikrostruktura i raspored tvrdoća poprečnog presjeka boriranog čeličnog predmeta [11]



Slika 2.45 Primjeri boriranih dijelova [19]

Vanadiranje

Vanadiranje čelika termokemijski je difuzijski postupak obrade pri kojem se u površinske slojeve čeličnog proizvoda ugrijanog na 1000 °C do 1200 °C difundira kemijski element vanadij (V), pri čemu nastaju vanadijevi karbidi koji imaju visoku tvrdoću i otpornost na adhezijsko trošenje. Bolji se rezultati otpornosti na trošenje i na odlupljivanje slojeva postižu istodobno difuzijom vanadija i kroma, tako da se stvaraju V–Cr karbidi.



Slika 2.46 Mikrostruktura vanadiranog čelika 34CrAlNi7 [20]



Slika 2.47 Primjer primjene vanadiranih dijelova [21]

B -Toplinski postupci prevlačenja

Svrha toplinskog prevlačenja alata i strojnih dijelova jest zaštita proizvoda od trošenja. Površine proizvoda prevlače se slojevima spojeva metala s nekim od metaloida (C, N, O, B, P, S). Postoje postupci **kemijskog prevlačenja** iz parne faze **CVD** postupci (engl. *Chemical Vapour Deposition*), postupci plazmom potpomognutoga kemijskog prevlačenje iz parne faze **PACVD** (engl. *Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition*) i postupci **fizikalnog prevlačenja** iz parne faze (engl. *Physical Vapour Deposition*). Ovi postupci primjenjuju se kao završna toplinska obrada u procesu proizvodnje alata i dijelova, nakon koje nema dodatnih toplinskih ili mehaničkih obrada. Kada je riječ o parametrima prethodne toplinske obrade, temperatura treba biti viša za 20 °C do 50 °C od temperature prevlačenja kad god je to moguće ostvariti.

Tablica 2.1 Pregled osnovnih svojstava prevlaka u parnoj fazi [22]

	PVD	CVD	PA CVD
Temperatura (°C)	200 – 500	800 – 1000	470 – 580
Kaljenje poslije prevlačenja	ne	potrebno	ne
„line of sight“ postupak*	da	ne	ne
Pomicanje šarže	potrebno	ne	ne
Površina	glatka	gruba	vrlo glatka
Poliranje poslije prevlačenja	ovisno	potrebno	ne
Dupleks proces	ne	ne	moгуće
Prionjivost na tvrde materijale	vrlo dobra	vrlo dobra	prosječna
Troškovi održavanja	vrlo visoki	niski	niski
Troškovi pogona	visoki	niski	niski
Troškovi ulaganja	visoki	niski	prosječni
Uglavnom primjenjivo	narezanim alatima, TC	na dijelovima gdje su prihvatljive deformacije	navelikim alatima i kalupima

* – „Line of sight“ postupak je u kojem će biti prevučene samo one površine koje su od izvora pravocrtno dostizive, to znači one koje se „mogu vidjeti“.

CVD postupci

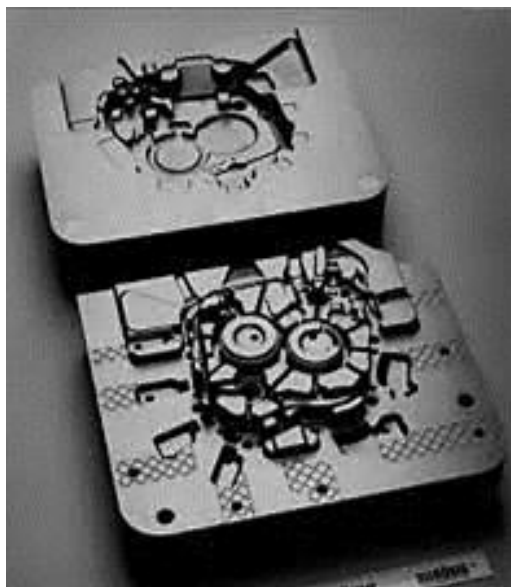
Postupak CVD omogućava postizanje, ovisno o uporabljenom plinu, slojeva karbida, nitrida i/ili karbonitrida. CVD postupci izvode se na temperaturama 800 °C do 1100 °C. Na ugrijanoj plohi čelika raspadaju se plinovi ili pare u čvrstu materiju i leteće (hlapljive) nusproizvode. CVD reakcija heterogena je, tj. ona stvara i difuzijsku zonu u podlozi i rastuće slojeve iznad nje. Za postupak CVD vrlo su prikladni čelici [6]: X155CrVMo12-1 (Č4850), X165CrMoV12-1 (Č4750), X210CrW12-1 (Č4650), X100CrMoV5-1 (Č4756), X38CrMoV5-1 (Č4751), X40CrMoV5-1 (Č4753), X20Cr13 (Č4172), X5CrNi18-9 (Č4580). Nakon prevlačenja CVD postupkom ovi se čelici moraju ponovno kaliti i popuštati ili se može koristiti sigurnija varijanta, a to je prevlačenje PACVD postupkom. Osim nabrojenih čelika, postupkom CVD mogu se obraditi Ni-legure, Co-legure, Steliti, Cu-legure, W-karbidi itd. Najvažniji CVD postupci oni su koji daju TiC zone i TiN zone spojeva. Debljina slojeva postignutih CVD postupkom jest 10 do 30 μm.



Slika 2.48 Rezne pločice od tvrdog metala prevučene višeslojnim CVD prevlakama [14]

PACVD postupci

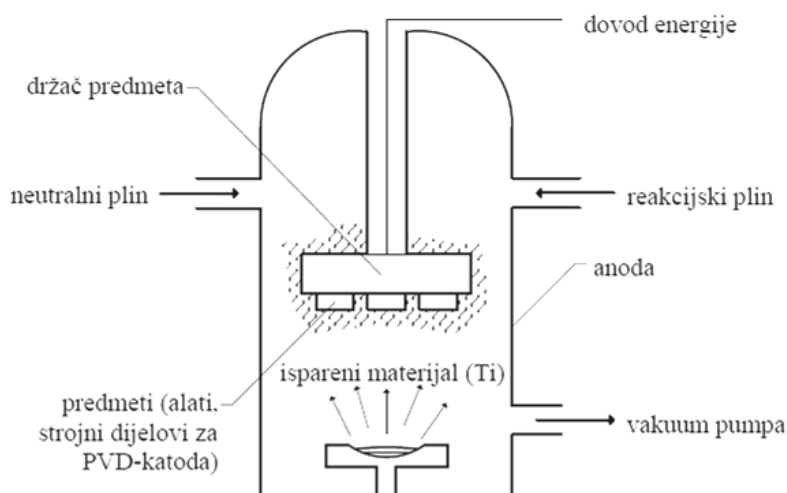
PACVD postupak jest postupak prevlačenja materijala u parnoj fazi kemijskim putem u atmosferi ionizirane plazme. Za proizvodnju prevlake u peć s predmetima za prevlačenje dovode se plinovi i pare kao i kod CVD postupka, a njihov raspad i stvaranje kristala prevlake potpomognuti su omotačem ioniziranih plinova (plazme) koja se uspostavlja u peći. Zbog aktivacije kemijskih i kristalizacijskih procesa plazmom nanošenje prevlaka na električki vodljive podloge provodi se pri temperaturama od 100 °C do 600 °C. Moguće je nanošenje vrlo tankih jednoslojnih i višeslojnih prevlaka i na dijelove složenih oblika bez potrebe za rotacijom obratka unutar reaktora. Ovim postupkom mogu se poboljšati svojstva tvrdoće, otpornosti na koroziju, otpornosti na visoke temperature, otpornosti na trošenje itd. te se tako može znatno produljiti trajnost proizvoda u eksploataciji.



Slika 2.49 PACVD prevlaka na čeliku za topli rad za izradu aluminijskog kućišta pumpe postupkom tlačnog lijeva [23]

PVD postupci

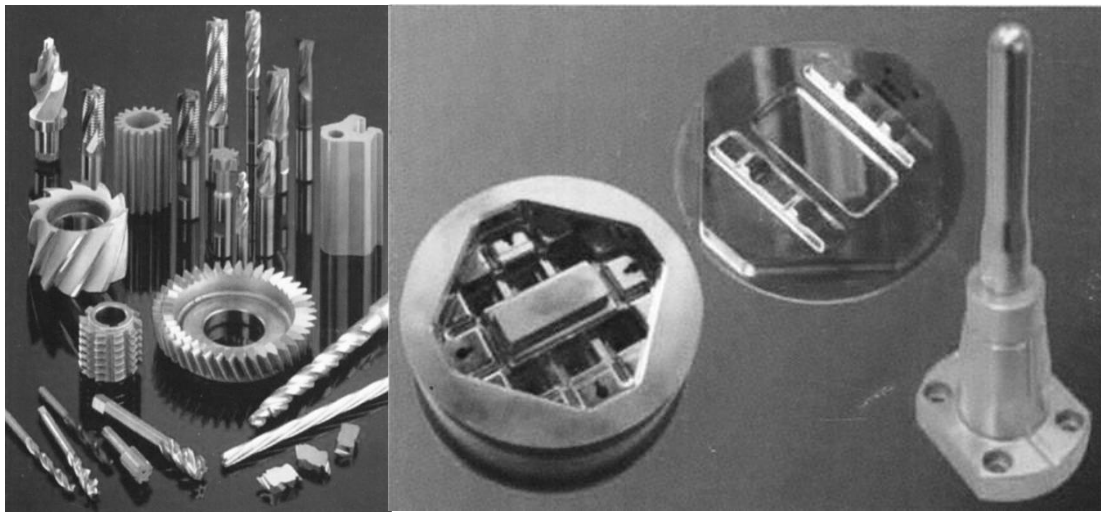
Postupci PVD, kao i CVD postupci, osnivaju se na taloženju plinske faze. Mogu se izvesti neparivanjem, naprašivanjem ili ionskim platiranjem, i to sve u visokom vakuumu. Postupak ionskog platiranja primjenjiv je za zaštitu od trošenja, a postupci neparivanja i naprašivanja koriste se u dekorativne svrhe. Postupci PVD za nanošenje slojeva TiN ili Ti(C,N) izvode se pri temperaturi nižoj od 500 °C pa su za taj postupak prikladni svi čelici kojima su temperature popuštanja više od 500 °C [6]. Važna je i predobrada prije postupka PVD. Površine moraju biti glatke i bez pora, oštri uglovi bez srha, a elektroerodirane površine treba brusiti ili ponovno popuštati. U slučaju ionskog PVD prevlačenja čišćenje treba izvesti mlazom iona plemenitih plinova. Dobiveni su slojevi tanki, ali vrlo tvrdi i otporni na trošenje.



Slika 2.50 Skica uređaja za titaniranje PVD ionskim platiranjem [6]



Slika 2.51 Uređaj za nanošenje PVD prevlaka [14]



Slika 2.52 Primjeri prevlačenja reznih alata i kalupa za injekcijsko prešanje PVD prevlakama [24]

3. SISTEMATIZACIJA MATERIJALA

U literaturi postoji nekoliko pristupa sistematizaciji materijala [25]:

- a) prema sastavu, mikrostrukтури (građi) i načinu dobivanja
- b) prema svojstvima i uvjetima primjene
- c) prema primjeni.

a) **Sistematizacija metalnih materijala prema sastavu, mikrostrukтури (građi) i načinu dobivanja:**

- Željezni materijali

Željezni ljevovi:

- čelični ljev
- bijeli tvrdi ljev
- sivi ljev
- nodularni (žilavi) ljev
- temper (kovkasti) ljev

Konstruktivski čelici:

- opći konstruktivski
- čelici povišene čvrstoće
- ultračvrsti čelici
- čelici za cementiranje
- čelici za poboljšavanje
- čelici za opruge
- čelici poboljšane rezljivosti (čelici za obradu na automatima)
- korozivski postojani čelici
- čelici za rad na povišenim i visokim temperaturama (toplinski čvrsti čelici)
- vatrootporni čelici
- čelici za rad na niskim temperaturama
- čelici posebnih svojstava

Alatni čelici:

- čelici za hladni rad
- čelici za topli rad
- brzorezni čelici

- Laki i obojeni metali i legure (neželjezni metali i legure)

- Al-legure
- Cu-legure
- Ni-legure
- Ti-legure
- Mg-legure
- Zn-legure
- Co-legure.

b) Sistematizacija prema svojstvima i uvjetima primjene:

- materijali postojani na koroziju
- materijali otporni na trošenje
- visokočvrsti čelici
- čelici žilavi pri niskim temperaturama.

c) Sistematizacija prema primjeni:

- materijali za opruge
- materijali za zupčanike
- materijali za klizne ležaje
- materijali za kotrljajuće (valjne) ležaje.

4. ŽELJEZNI MATERIJALI

4.1 Povijest razvoja željeznih legura

Najstariji alati od željeznih legura potječu iz egipatske Velike piramide, a datiraju otprilike 3000 godina prije Krista. Vjerojatno je riječ o nađenome dijelu meteornoga željeza.

Od razdoblja 2000 do 1000 godina prije Krista pa sve do sredine 16. stoljeća zavarljivo se željezo dobivalo redukcijom željezne rudače u tzv. katalonskim pećima iz kojih je proizvod izlazio u obliku spužvastih gromada (0,4 do 0,6 kg/sat) koje su se zatim prekivanjem dovodile u željene oblike [6].

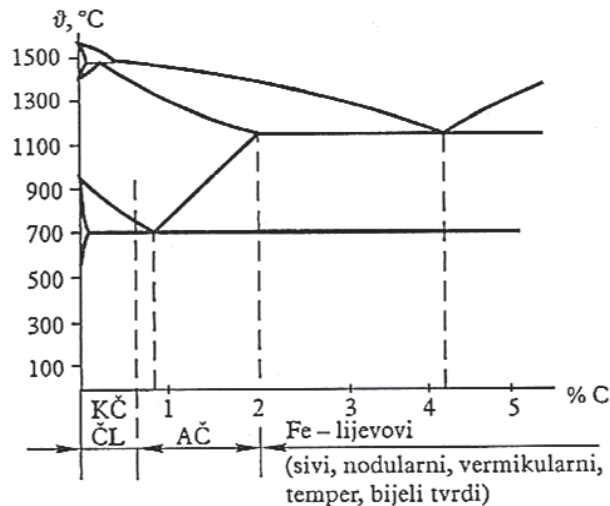
II. etapa razvoja počinje sredinom 16. stoljeća i traje do kraja 18. stoljeća, a karakterizira je pojava visoke peći, tj. dvostupanjsko dobivanje željeza. Proizvod visoke peći jest sivo sirovo ili bijelo sirovo željezo. Sivo sirovo željezo služi za proizvodnju željeznih ljevova (sivog, nodularnog ili vermikularnog), a bijelo sirovo željezo dalje se prerađuje u čelik ili u čelični lijev. Kapaciteti peći za preradu sirovog željeza bili su od 40 do 50 kg/sat.

III. etapu (do kraja 19. stoljeća) proizvodnje željeznih legura karakterizira prelazak na mineralna goriva (s drvenog ugljena), kao i primjena parnih strojeva za pogon puhala. Kapaciteti peći za preradu sirovog željeza u ovoj fazi bili su oko 140 kg/sat.

IV. etapu obilježava uvođenje konvertera (Bessemmerova i poslije Thomasova) te Siemens-Martinove peći, lijevanje niskougljičnih čelika u kokile (dobivanje ingota). Ova etapa traje do sredine 20. stoljeća, a kapaciteti konvertera bili su oko 6 t/sat rastaljenog čelika.

V. razvojna etapa počinje oko 1950. godine višestrukim povećanjem kapaciteta peći. Koristi se propuhivanje kisikom, čelik se proizvodi u elektropečima. Današnje visoke peći daju i do 400 t/sat rastaljenog čelika, konverteri s propuhivanjem kisika do 350 t/sat čelika, a elektropeći do 75 t/sat plemenitog čelika.

Suvremeni postupci dorade „normalno“ taljenih čelika su pretaljivanje pod troskom, pretaljivanje u plazmi, pretaljivanje u elektronskom mlazu, pretaljivanje u vakuumskoj elektrolučnoj peći itd. Postupcima pretaljivanja svodi se udio neželjenih elemenata, ugljika i nečistoća na čak do 70 ppm (od engl. *part per milion*) (do 1960. godine taj udio bio je do 900 ppm).



Slika 4.1 Osnovna podjela željeznih legura: KČ = konstrukcijski čelici, ČL = čelični ljevovi, AČ = alatni čelici [6]

4.2 Čelici

Čelik je metastabilno skrućena legura željeza i ugljika koja sadrži do 2,03 % C, uz pratioce (silicij i mangan), nečistoće (fosfor i sumpor) te eventualno dodatak jednog, dva ili više legiranih elemenata. Nakon lijevanja čelične taljevine prilagođenog sastava u kokile, čelici se dalje oblikuju u konačne oblike proizvoda postupcima deformiranja (valjanjem, prešanjem, kovanjem itd.) u željeni oblik poluproizvoda (limova, traka, šipki, cijevi, profila itd.) [25].

Čelici su i dalje najvažniji tehnički materijal u proizvodnji i primjeni. Čelici sudjeluju s više od 50 % u ukupnoj proizvodnji svih tehničkih materijala, a masa čelika veća je više od deset puta od mase svih drugih proizvedenih metala i njihovih legura [25].

Primat u primjeni čelicima daje kombinacija svojstava, i to: čvrstoće, žilavosti, rezljivosti, spojivosti, oblikovljivosti deformiranjem te:

- mogućnost promjene svojstava legiranjem
- mogućnost promjene svojstava toplinskom obradom
- mogućnost promjene svojstava deformiranjem
- relativno mala cijena i dr.

4.2.1 Dobivanje čelika

Proizvodnja čelika počinje u visokoj peći procesima redukcije (oslobađanje od kisika) željezne rude. Željezne rude su: hematit – Fe_2O_3 , limonit – $\text{FeO}(\text{OH})$, magnetit – Fe_3O_4 , pirit – FeS_2 i siderit – FeCO_3 .

Redukcija pripremljenih rudača odvija se u visokoj peći s pomoću ugljika iz koksa koji služi kao sredstvo za redukciju i kao nosilac toplinske energije procesa. Rastaljeno željezo bilo je u dodiru s koksom, vapnencem, kremenom, zrakom i vatrostalnim zidom peći pa je otopilo određene količine ugljika, dio pratećih elemenata (Mn i Si) i nečistoća (P i S) [25].

Proizvod visoke peći je *sivo* ili *bijelo sirovo* željezo (gvožđe) s relativno visokim masenim udjelom ugljika (od 2 % do 4 %), fosfora i sumpora te ostalih primjesa (od 6 % do 10 %). Sirovo je željezo zbog povišenog udjela ugljika i fosfora krhko i neupotrebljivo za tehničku primjenu [25].

Sivo sirovo željezo ima ugljik izlučen u obliku grafita zbog veće prisutnosti grafitizatora (Si) i zbog sporijeg hlađenja.

Bijelo sirovo željezo ima ugljik izlučen u obliku cementita Fe_3C zbog veće prisutnosti cementatora (Mn) i zbog bržeg hlađenja.

Sivo sirovo željezo pretaljuje se u električnim pećima ili kupolkama i zatim se prilagođenog sastava ulijeva u kalupe za dobivanje nekog od ljevova: sivog lijeva s lističavim grafitom, nodularnog s kuglastim grafitom ili vermikularnog lijeva.

Bijelo sirovo željezo osnovna je sirovina za proizvodnju čelika, čeličnog lijeva i bijelog tvrdog lijeva. Od ukupne proizvodnje oko 90 % proizvodnje sirovog željeza prerađuje se u čelik, a oko 10 % u ljevove. Bijelo sirovo željezo oksidacijski se pročišćuje, lijeva se u kokile, te se dalje prerađuje u finalne poluproizvode. Direktnim lijevanjem pretaljenog i pročišćenog bijelog sirovog željeza u kalupe može se dobiti čelični lijev.

U procesu pretaljivanja sirovog željeza žele se izgaranjem smanjiti maseni udjeli ugljika, fosfora i sumpora, a djelomično i silicija i mangana. Udjeli navedenih elemenata smanjuju se na onu razinu koja odgovara sastavu čelika.

Proces pretaljivanja naziva se i *pročišćavanje* ili *rafinacija*, a provodi se u pećima (konverterima), i to u Thomasovu i Bessemerovu konverteru, u konverteru s upuhivanjem zraka ili kisika, elektrolučnim ili indukcijskim pretaljivanjem, pretaljivanjem u vakuumu, elektropretaljivanjem pod troskom i pretaljivanjem s pomoću plazme. Kvalitetni i plemeniti čelici visoke čistoće dodatno se sekundarno obrađuju u vakuumu propuhivanjem inertnim plinovima. Tako se postiže homogenizacija taljevine, odstranjivanje vodika, ekstremno razugljičenje, odsumporavanje, modifikacija sulfida, visok stupanj dezoksidacije i vrlo dobro iskorištenje legiranih elemenata. Pročišćeni čelik lijeva se u kokile za dobivanje ingota, a sastav ingota odgovara sastavu čelika.

Neželjeni elementi imaju znatan utjecaj na kvalitetu čelika. To su pratioci i nečistoće. Utjecaj na kvalitetu čelika imaju Si, Mn, N, P, S te nemetalni uključci sulfidnog, oksidnog ili silikatnog tipa. Male količine Cu, Cr, Ni, As, Sn dolaze u čelik iz otpada i iz rude.

Primjese u čeliku mogu biti elementi pratioci, skriveni i slučajni elementi. Prateće primjese prisutne su u svakom čeliku, a njihove masene udjele potrebno je svesti na što je moguće manju mjeru.

4.2.2 Djelovanje primjesa na svojstva čelika

Djelovanje primjesa na svojstva čelika sljedeća su [25]:

Mangan je prateći element, a potječe iz rude ili iz dezoksidatora – feromangana. Maseni udio mangana obično je od 0,2 % do 0,8 %. Vrlo je dobar dezoksidans, pozitivno utječe na smanjenje štetnog djelovanja sumpora koji stvara FeS u obliku sulfida jer veže na sebe sumpor tvoreći MnS koji se u najvećoj mjeri odstranjuje šljakom.

Silicij je prateći element, a potječe iz rude ili dezoksidatora – ferosilicija. Slično utječe na proces dobivanja čelika kao i mangan.

Aluminij se dodaje radi dezoksidacije čelika. Povećava krhkost i smanjuje prokaljivost čelika.

Sumpor je nepoželjna primjesa. Dolazi iz rude i produkata izgaranja. Najveći dopušteni maseni udio sumpora je 0,05 %. Sumpor sa željezom tvori željezni sulfid FeS koji je nepoželjan, pojavljuje se po granicama zrna. Čelici s višim masenim udjelom sumpora ne mogu se deformirati u toplom stanju zbog rastaljivanja željeznog sulfida koji dovodi do pojave „crvenog loma“ i smanjuje žilavost. Štetan utjecaj FeS smanjuje se dodavanjem mangana koji tvori MnS. Maseni udio sumpora do 0,3 % može imati i pozitivan utjecaj kada je riječ o čelicima koji trebaju imati povećanu obradivost odvajanjem čestica. Manja čvrstoća sulfidnih uključaka pri obradi pospješuje nastanak kratke i krhke strugotine.

Fosfor je nepoželjna primjesa i njegov maseni udio treba biti ispod 0,06 %. Povišenje masenog udjela fosfora uzrokuje pojavu primarne trakavosti i krhkosti u hladnom stanju.

Dušik je uglavnom nepoželjna primjesa, a maseni je udio od 0,01 % do 0,03 %. Već 0,01 % dušika povisuje granicu razvlačenja i čvrstoću, ali veoma smanjuje deformabilnost i udarni rad loma. Prisutnost dušika izaziva pojavu starenja čiji je rezultat povišena čvrstoća i smanjena žilavost.

Vodik sa željezom čini intersticijske mješance. Uzrokuje pad žilavosti iako čvrstoća ne raste jer iz atomarnog stanja prelazi u molekularnu obliku sitnih mjehurića. Ta pojava naziva se *vodikova krhkost*.

Kisik ima slično djelovanje kao dušik i vodik, povisuje krhkost čelika. Dezoksidacijom se uklanja veći dio kisika, ali nastaju oksidi Al_2O_3 i SiO_2 koji su tvrdi, najčešće kuglastog oblika. Valjanjem se razvlače u redove koji mogu dovesti do problema kod kasnije obrade čelika. Kod čelika s većim masenim udjelom kisika stvara se željezni oksid FeO koji uzrokuje tzv. *crveni lom*, slično kao i FeS.

Nemetalni uključci mogu biti oksidne sulfidne ili silikatne vrste. Količina, vrsta i raspodjela u čeliku prisutnih nemetalnih uključaka određuju svojstva oblikovljivosti i otpornost na širenje pukotina, odnosno otpornosti na lom.

U blizini uključaka dolazi do koncentracije naprezanja pri djelovanju vanjskog opterećenja. Čelici s većim udjelom MnS nemetalnih uključaka imaju u smjeru valjanja dvostruko veći udarni rad loma nego u poprečnom smjeru.

4.2.3 Djelovanje legirnih elemenata na svojstva čelika

Legirani čelik sadrži osim željeza i ugljika jedan ili više legirnih elemenata. Nijedna druga skupina materijala ne može legiranjem u tako širokom opsegu mijenjati svojstva kao čelik. Čelik se legira određenom količinom nekog elementa da bi se dobilo traženo svojstvo ili kombinacija svojstava. Neminovno se legiranjem neka svojstva i pogoršavaju. Prema europskim normama čelik je legiran ako sadrži jedan ili više elemenata čiji maseni udio prelazi vrijednosti navedene u tablici 4.1.

Tablica 4.1 Granični maseni udjeli elemenata koji odjeljuju nelegirane od legiranih čelika [25]

Legirni element	Granični maseni udio %
aluminij	0,10
bor	0,0008
krom	0,30
kobalt	0,10
bakar	0,40
rijetke zemlje – lantanidi (npr. cer, neodim, erbij)	0,05
mangan	1,60
molibden	0,08
nikal	0,30
niobij	0,05
olovo	0,40
selen, telur	0,10
silicij	0,50
titanij	0,05
volfram, vanadij	0,10
cirkonij	0,05
ostali (izuzevši C, P, S, N i O)	0,05

Čelici se prema masenim udjelima legirnih elemenata uobičajeno dijele na:

- niskolegirane (s udjelima legirnih elemenata do 5,00 %)
- visokolegirane (s masenim udjelom barem jednog legirnog elementa više od 5,00 %) [25].

Legirani čelici primjenjuju se u onim slučajevima gdje se traže neka istaknuta svojstva koja se ne mogu postići nelegiranim čelicima.

Najčešći legirni elementi u čelicima su: krom, nikal, mangan, silicij, volfram, vanadij i molibden. U posebnim slučajevima legirni elementi u čelicima su i: kobalt, titanij, aluminij, niobij i drugi.

Legirni se elementi u čelicima mogu pojaviti u različitim oblicima:

- rastvoreni u BCC ili FCC rešetki
- kao spojevi sa željezom (karbidi i intermetalni spojevi)
- kao nemetalni uključci – oksidi, nitridi, sulfidi i fosfidi.

Utjecaji pojedinih legirnih elemenata na svojstva sljedeći su [25]:

Mangan (Mn)

Mangan djeluje dezoksidirajuće, a na sebe veže i sumpor. Povećava granicu razvlačenja kod konstrukcijskih čelika za oko 100 N/mm² za svakih 1 % Mn, a povoljno djeluje i na žilavost. Mn znatno poboljšava prokaljivost čelika. Čelici legirani s Mn skloni su brzom porastu zrna pri visokim temperaturama i krhkosti nakon popuštanja. Mn proširuje područje austenita, tako da su čelici s više od 12 % Mn austenitne strukture i pri normalnoj temperaturi.

Silicij (Si)

Silicij je dobar dezoksidator, povećava čvrstoću i otpornost na trošenje čelika. Tako povećava granicu elastičnosti i dinamičku izdržljivost pa se zbog toga pojavljuje kao legirni element kod čelika za opruge. Pri toplinskoj obradi čelici legirani silicijem pokazuju sklonost razugljenju, a pri cementiranju silicij otežava difuziju ugljika u čelik. Silicij blago povećava prokaljivost čelika.

Krom (Cr)

Krom je jaki karbidotvorac i tvori karbide koji su tvrdi od cementita. Karbidi povećavaju otpornost na tlak i otpornost na abrazivno trošenje. Krom proširuje područje ferita, povećava prokaljivost, tako da se čelici legirani s kromom nakon austenitiziranja mogu hladiti u ulju ili čak na zraku. Kod legura s više od 12 % Cr dobiva se potpuna korozivna postojanost. Legiranje kromom utječe na sklonost krhkosti nakon popuštanja koja se izbjegava legiranjem s molibdenom. Krom djeluje na smanjenje toplinske vodljivosti i toplinske rastezljivosti.

Nikal (Ni)

Nikal ne tvori karbide, nego se otapa u rešetki željeza. Austenitni nehrđajući čelici uobičajeno su legirani s Ni. Nikal je legirni element koji se najviše koristi kod čelika posebnih svojstava – nehrđajući i kemijski postojani čelici, čelici za povišene i niske temperature, vatrootporni čelici, nemagnetični čelici. Zbog visoke cijene koristi se u kombinaciji s nekim drugim elementom.

Volfram (W)

Volfram je jaki karbidotvorac, a karbidi su mu vrlo tvrdi i toplinski postojani. Legiranje volframom povisuje granicu razvlačenja i vlačne čvrstoće, a u manjoj mjeri i žilavost. Djeluje povoljno na čvrstoću i otpornost na trošenje u toplom stanju te sprečava porast zrna pri povišenim temperaturama.

Molibden (Mo)

U pravilu se kombinira s drugim elementima. Utječe na povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, kao i na granice puzanja. Povoljno djeluje na formiranje sitnozrnate strukture i na povećanje prokaljivosti. Kod čelika legiranih s kromom, niklom i manganom dodaje se da bi se smanjila opasnost od pojave krhkosti nakon popuštanja. Mo je jak karbidotvorac i pridonosi poboljšanju reznih karakteristika brzoreznih čelika.

Vanadij (V)

Vanadij je jak karbidotvorac, povisuje tvrdoću i otpornost na trošenje pri normalnim i povišenim temperaturama. Povisuje granicu razvlačenja pa se koristi kod čelika za opruge. Zbog cijene se koristi u kombinaciji s drugim elementima.

Kobalt (Co)

Kobalt proširuje austenitno područje, a rastvara se u rešetki željeza. Omogućava postojanost mikrostrukture te povisuje čvrstoću pri povišenim temperaturama, zbog čega se koristi za legiranje čelika namijenjenih za topli rad i kod brzoreznih čelika.

Titaniј (Ti)

Titaniј je najjači karbidotvorac, a njegovi se karbidi teško raspadaju pri povišenim temperaturama. Titaniј ima jak afinitet prema kisiku, ugljiku, dušiku i sumporu. Usitnjuje zrno i smanjuje opasnost od brzog porasta zrna na visokim temperaturama (pregrijavanje).

Aluminij (Al)

Najčešće se primjenjuje kao element za dezoksidaciju. Veže na sebe dušik i time smanjuje opasnost od starenja (povećanje krhkosti čelika). Ne pridonosi poboljšavanju mehaničkih svojstava čelika.

4.2.4 Sistematizacija čelika

Čelici se mogu karakterizirati s obzirom na sljedeća obilježja [25]:

- a) kemijski sastav
- b) mikrostruktura
- c) način proizvodnje
- d) oblik i stanje
- e) područje primjene
- f) svojstva.

ad a) Prema kemijskom sastavu čelici mogu biti:

- zajamčenog ili nezajamčenog sastava
- ugljični (nelegirani) ili legirani (jednostruko ili višestruko, niskolegirani ili visokolegirani)
- prema vrsti legiranih elemenata razlikujemo: Cr, Ni, Mn, Si, W, Mo, V čelike ili Cr-Ni, Cr-Mn, Cr-Mo, Si-Mn čelike ili Cr-Ni-Mo, W-Cr-V čelike, ...
- prema kvaliteti (maseni udio P i S): masovni, kvalitetni (ujednačena kvaliteta) i plemeniti (visoka kvaliteta).

ad b) Prema tipu mikrostrukture čelici mogu biti: feritni, feritno-perlitni, perlitni, martenzitni, bainitni, austenitni, ledeburitni itd.

ad c) Prema načinu proizvodnje čelici mogu biti proizvedeni različitim postupcima:

- konverterski – Bessemer, Thomas postupak
- elektropretaljivanjem
- kisikovim konverterima (upuhivanjem zraka ili kisika)
- sekundarnom metalurškom obradom (tzv. lončanom metalurgijom)
- vakuumskim pročišćavanjem (VOD – Vacuum Oxygen Degastation)
- otplinjavanjem pod argonom (AOD – Argon Oxygen Degastation)
- pretaljivanjem pod troskom (EPT).

Prema načinu dezoksidacije i lijevanja čelici mogu biti: nesmireni, polusmireni, smireni ili posebno smireni.

ad d) Osnovni oblici čeličnih poluproizvoda su: šipke, limovi, trake, cijevi, specijalni profili itd., a pojavljuju se u sljedećim osnovnim stanjima: lijevani, toplovaljani, hladnovaljani, hladnovučeni, ljušteni, brušeni i polirani, kovani, toplinski obrađeni i sl.

ad e) Prema području primjene čelici mogu biti:

- konstrukcijski čelici za opću namjenu – za nosive zavarene konstrukcije, za strojne elemente
- konstrukcijski čelici posebnih svojstava i primjene – korozijski otporni, otporni na trošenje, toplinski čvrsti, hladnožilavi i sl.
- alatni čelici od kojih se izrađuju alati za toplo i hladno oblikovanje metala i nemetala, rezni i mjerni alati.

ad f) Pojedini čelici ili podskupine čelika imaju neka istaknuta svojstva kao što su: povišena granica razvlačenja i vlačna čvrstoća, žilavost pri niskim temperaturama, oblikovljivost, rezljivost, otpornost na trošenje itd.

Svaki čelik ima određenu kombinaciju navedenih obilježja.

4.2.5 Konstrukcijski čelici

Ovi čelici primjenjuju se za izradu tipičnih konstrukcijskih dijelova strojeva i uređaja koji obavljaju neku funkciju, npr. prenose gibanja preuzimanjem sila i momenata, spremaju ili transportiraju tekućine ili plinove, zatvaraju, spajaju elemente konstrukcije. To su razni elementi ili dijelovi strojeva i uređaja kao što su: osovine, vratila, zupčanici, nosači, opruge, vijci, zatici, klinovi, poklopci, kućišta, ventili itd.

Od konstrukcijskih čelika traže se sljedeća svojstva koja proizlaze iz zahtjeva koji se postavljaju pred konstrukcijske dijelove:

- a- mehanička svojstva
- b- otpornost na trošenje
- c- otpornost na koroziju
- d- tehnološka svojstva.

ad a) Od mehaničkih svojstava konstrukcijskih čelika važna su sljedeća:

- visoka granica razvlačenja (čvrstoća) povezana s plastičnom deformabilnošću – istezljivošću radi sigurnosti od pojave krhkog loma
- dovoljno visoka granica puzanja i čvrstoća pri povišenim temperaturama
- dovoljna žilavost i čvrstoća pri normalnim, sniženim i niskim temperaturama
- otpornost na umor u uvjetima promjenjivog opterećenja – dovoljna dinamička izdržljivost.

ad b) Otpornost na trošenje svojstvo koje se promatra kroz što manji gubitak mase, odnosno kroz promjenu stanja površine zbog međusobnog djelovanja dijelova u dodiru.

ad c) Svojstvo otpornosti na koroziju promatra se kroz korozijsku postojanost u atmosferi ili u agresivnim tekućinama, otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama uz prisutnost različitih plinova.

ad d) Tehnološka svojstva vezana su uz postupke prerade materijala, odnosno oblikovanja dijelova. Važna svojstva su: rezljivost (sposobnost obrade odvajanjem čestica), zavarljivost, hladna oblikovljivost (savijanje, štancanje, duboko vučenje i sl.).

Preduvjet za pravilan izbor čelika jest poznavanje svojstava karakterističnih skupina čelika.

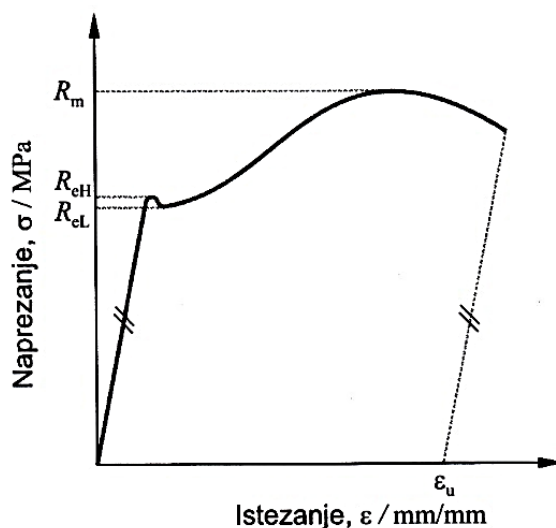
4.2.5.1 Opći konstrukcijski čelici

Od svih čelika najzastupljeniji su u proizvodnji (65 % do 80 % mase), pa i u primjeni za niz nosivih, pretežno zavarenih konstrukcija velike mase, kao što su mostovi, dizalice, nosači, brodske konstrukcije, dijelovi vozila, oprema u industriji nafte i plina, a i za razne druge strojne elemente. Razvrstani su u dvije grupe:

- a) opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije
- b) čelici za strojogradnju.

ad a) Od konstrukcijskih čelika za nosive konstrukcije u primjeni se traži određena nosivost i sigurnost što se želi ostvariti:

- dovoljnom granicom razvlačenja (R_e)
- vlačnom čvrstoćom (R_m)
- tlačnom čvrstoćom (R_{mt})
- savojnom čvrstoćom (R_{ms})
- smičnom čvrstoćom (R_{mu})
- žilavošću (udarni rad loma) – osobito pri nižim temperaturama.



Slika 4.2 Dijagram naprezanje – istezanje konstrukcijskog čelika s diskontinuiranim prelaskom iz elastičnog u plastično područje [26]

Od tehnoloških svojstava općih konstrukcijskih čelika osobito je važna zavarljivost. Preduvjet dobre zavarljivosti jest nizak sadržaj ugljika, odnosno što manja vrijednost ugljičnog ekvivalenta C_e . Za računanje ugljičnog ekvivalenta najčešće se upotrebljava sljedeća formula:

$$C_e = \% C + \frac{\% Mn}{4} + \frac{\% Cr + \% Mo + \% V}{5} + \frac{\% Ni + \% Cu}{10} \quad (4.1)$$

Prihvatljiva je vrijednost $C_e < 0,4$. Čelici s većim ugljičnim ekvivalentom zahtijevaju predgrijavanje za postizanje sporijeg hlađenja nakon zavarivanja radi izbjegavanja spontanog zakaljivanja kod legiranih čelika. Od ostalih svojstava važna je hladna oblikovljivost (prikladnost za savijanje, duboko vučenje, kovanje) i rezljivost.

Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije nelegirani su čelici s feritno-perlitnom mikrostrukturom. Povoljna je sitnozrnata struktura koja se dobije normalizacijom nakon toplog oblikovanja ili posebnim smirivanjem uz dodatak aluminijske.

Kemijski sastav ovih čelika nije propisan, ali zato su zajamčena mehanička svojstva. Ovi čelici nisu predviđeni za toplinsku obradu zbog većeg udjela nečistoće i zbog nehomogenosti u strukturi. Temperaturno područje primjene općih konstrukcijskih čelika je od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pri sniženim temperaturama postoji opasnost od pojave krhkog loma. Norme propisuju sljedeće karakteristike općih konstrukcijskih čelika:

- orijentacijski kemijski sastav
- mehanička svojstva (R_e , R_m , A_5 , KV)
- tehnološka svojstva (kut savijanja).

Zavarivi čelici za nosive konstrukcije podijeljeni su u sljedeće podskupine:

Skupina „0“, čelik S185, trgovačka kvaliteta bez zajamčenih svojstava.

Skupina „A“, čelici S235JRG1, S275JRG2. Čelici za statički manje opterećene konstrukcije, spojene zakovicama i vijcima. Slabije zavarivi.

Skupina „B“, čelici S235JRG2, S275JRG2, S355JRG2. Primjenjuju se za tlačno i savojno opterećene zavarene konstrukcije gdje ne postoji opasnost od krhkog loma. Jamči se udarni rad loma na temperaturi od 20 °C.

Skupina „C“, S235J0G3, S275J0G3, S355J0G3. To su posebno smireni čelici koji se primjenjuju za statički i dinamički opterećene zavarene konstrukcije. Jamči se udarni rad loma na 0 °C.

Skupina „D“ S235J2G3, S275J2G3, S355J2G3. To su posebno smireni i normalizirani čelici koji se primjenjuju za statički i dinamički opterećene zavarene konstrukcije i pri nižim temperaturama jer su otporni na krhki lom. Zajamčena je vrijednost udarnog rada loma od 27 J na temperaturi od -20 °C.

Čelici iz podskupina A, B, C, D zavarivi su jer sadrže do 0,2 % ugljika. Kod čelika zajamčenog udarnog loma propisan je i manji sadržaj **P, S, i N**.

Posebno su zanimljivi čelici najviše čvrstoće: S335JRG3, S355JOG3, i S355J2G3 sa zajamčenom radnjom udarnog loma kod kojih se povećana čvrstoća postiže dodatkom Mn (do 1,5 %) i Si (do 0,55 %), a imaju viši omjer R_e/R_m . Ovi čelici imaju i vrlo dobru lomnu žilavost.

ad b) Čelici za strojogradnju grupa je čelika koji se primjenjuju za strojne dijelove koji se gibaju u odnosu na druge dijelove (osovine u kliznim ležajevima, vretena, manje opterećeni zupčanici itd.) i za dijelove koji prenose sile ili momente (klinovi, zatici, svornjaci, poluge itd.). Kod ovih čelika nema zahtjeva na zavarljivost i žilavost. Vrste općih konstrukcijskih čelika za strojogradnju jesu: E295, E335 i E360.

4.2.5.2 Čelici povišene čvrstoće

Cilj razvoja čelika povišene čvrstoće jest postizanje više granice razvlačenja i više vlačne čvrstoće, na taj način postiže se i više dopušteno naprezanje. Primjenom čelika više čvrstoće smanjuju se masa i volumen konstrukcije, što dovodi i do sniženja ukupnih troškova materijala i do manjeg utroška pogonske energije. U razvoju čelika povišene čvrstoće nastojao se zadržati povoljan omjer R_e/R_m , tako da u slučaju preopterećenja prije dolazi do plastične

deformacije, a ne do iznenadnog loma. Zavarljivost ove grupe čelika je zadovoljavajuća jer se zadržava što niži sadržaj ugljika i niski udio eventualnih legirajućih elemenata. Kod primjene čelika povišene čvrstoće treba uzeti u obzir činjenice koje su karakteristične za pojedina mjesta primjene. Kod nekih tlačno opterećenih konstrukcija tankih presjeka može se pojaviti povećano izvijanje, a kod savijanja veliki progib jer se pojavljuje problem krutosti koja je određena modulom elastičnosti koji je približno jednak za sve čelike (210.000 N/mm²). Korozija može bitno smanjiti debljinu stijenke pa se s vremenom smanjuje i nosivost.

Kod čelika povišene čvrstoće dinamička izdržljivost i otpornost na naglo širenje pukotina nisu proporcionalno povećani s povišenjem granice razvlačenja. Povećanjem granice razvlačenja opada i deformabilnost, a raste i osjetljivost prema pojavi krhkog loma. Posljedica modificiranja mikrostrukture radi povišenja čvrstoće obično je povišenje granice razvlačenja dok vlačna čvrstoća nužno ne mora rasti.

Čelici povišene i visoke čvrstoće podijeljeni su u sljedeće tri skupine:

- sitnozrnati normalizirani s feritno-perlitnom mikrostrukturom (granica tečenja $R_{p0,2}$ je od 360 do 500 N/mm²)
- poboljšani s mikrostrukturom popuštenog martenzita ($R_{p0,2} > 500$ N/mm²)
- termomehanički obrađeni ($R_{p0,2} > 500$ N/mm²).

Tablica 4.2 Svojstva sitnozrnatih normaliziranih čelika prema normama [25]

Oznaka vrsta čelika prema EN			Mehanička svojstva								Orijentacijski kemijski sastav, maseni %		
za normalne temp	za povišene temp	za niske temp	R_m , N/mm ² za debljinu $d < 50$ mm	$R_{p0,2}$, min N/mm ² za d mm			$R_{p0,2}$, N/mm ² pri °C za $d < 50$ mm (samo za Č za povišene temperature)						
				<16	16...35	35...40	100	200	300	400			
S255N	P255NH	S255NL	380...480	250			240	220	190	140	110	<0,20 % C ≤0,60 % Si ≤1,7 % Mn ≤0,60 % Si ≤0,60 % Si ≤0,60 % Si ----- min 0,015 % Al, ili maks 0,05 % Nb, ili maks 0,05 % V, ili maks 0,03 % Ti, ili kombinacije dodatno: Cr, Cu, Mo, Ni	kvalitetni čelici
P275N	P275NH	P275NL1	390...510	290			270	240	210	160	120		
P315N	P315NH	P315NL	440...560	310			300	260	230	180	140		
P355N	P365NH	P355NL1	490...630	350			340	290	250	220	170		
S380NL1	P389NH	S380NL	500...650	380	370	360	320	290	240	190	plemeniti čelici		
S420NL1	P420NH	S420NL	530...680	420	410	400	350	310	260	210			
P480NL2	P460NH	P460NL1	560...730	460	450	440	390	340	290	230			
S500NL1	P500NH	S500NL	610...710	500	470	470	410	360	310	250			

Normalizirani sitnozrnati čelici povišene čvrstoće imaju sitniju feritno-perlitnu mikrostrukturu te dovoljnu zavarljivost. Ovi čelici nisu osjetljivi na krhki lom, a dobra zavarljivost osigurana je niskim masenim udjelom ugljika ($< 0,2 \%$) i $C_e < 0,4$. Kemijski sastav ovih čelika nije propisan, a čelici uz Mn i Ni sadrže još i Cr, Mo, Cu, Nb, V kao mikrolegirne elemente. Klasifikacija ovih čelika provodi se na osnovi vrijednosti granice tečenja, područja radnih temperatura i na osnovi vrijednosti udarnog rada loma pri sniženim temperaturama.

U grupu čelika povišene čvrstoće spadaju i *poboljšani sitnozrnati čelici* kod kojih, kao i kod većine čelika, vrijednosti mehaničkih svojstava ovise o dimenzijama dijela jer se s promjenama dimenzija mijenja i mogućnost postizanja jednolične tvrdoće i ostalih mehaničkih svojstava po poprečnom presjeku. Ovi su čelici kaljeni u vodi s temperature oblikovanja i popušteni u čeličani pri $680 \text{ }^\circ\text{C}$ do $710 \text{ }^\circ\text{C}$. Ovi čelici sadrže manje od $0,2 \%$ C.

4.2.5.3 Konstrukcijski ugljični čelici za tanke limove

Ugljični čelici za izradu limova debljine ispod 3 mm mogu se svrstati u dvije skupine:

- niskougljični čelici – limovi namijenjeni oblikovanju deformiranjem
- ugljični čelici za limove sa zajamčenim mehaničkim svojstvima koji pripadaju skupini općih konstrukcijskih čelika.

Niskougljični čelici za tanke limove imaju oko $0,1 \%$ C. Prikladni su za vučenje, savijanje i utiskivanje. Površina ovih limova tako je obrađena da omogućava nanošenje metalnih i nemetalnih prevlaka (emajliranje, lakiranje, prevlačenje polimerima, pocinčavanje, kromiranje).

Uz svaku vrstu čelika iz ove grupe navode se i dopunske oznake za stanje površine [25]:

P1–površina dobivena žarenjem lima u atmosferi bez zaštite od oksidacije.

Dopuštene su boje popuštanja i labavo prionjena ogorina (oksidi).

P2–površina lima dobivena žarenjem u metalnim sanducima sa zaštitnim poklopcem tako da su dopuštene boje popuštanja i čvrsto prionjena ogorina.

P3–površina lima bez ogorine.

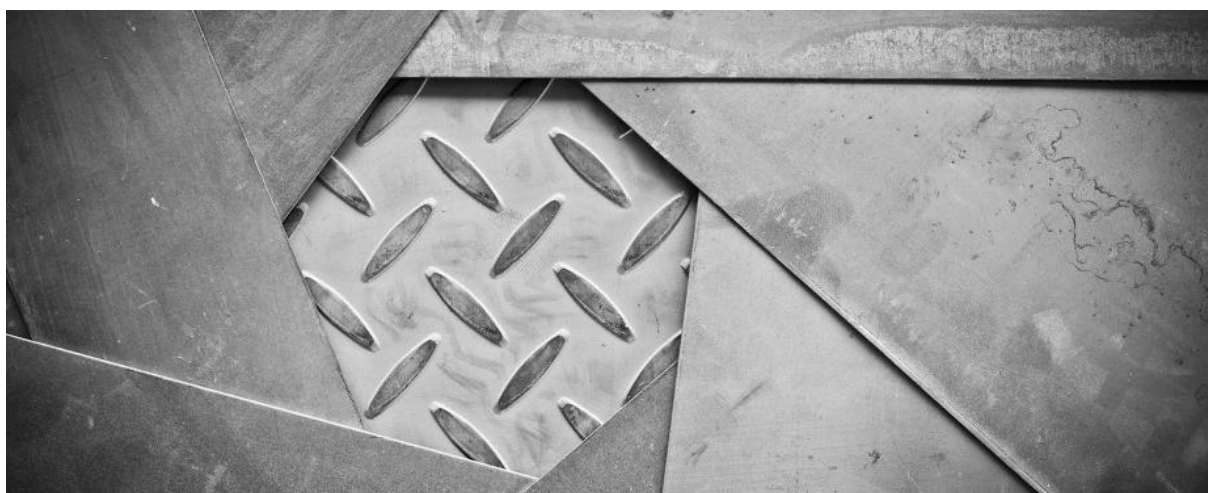
P4–površina lima bez ogorine ili s neznatnom hrapavošću zbog otpale ogorine.

Površina može biti sjajna ili zagasita (mat).

P5–površina lima bez ogorine i s malom hrapavošću. Stanje površine P5 uobičajeno se postiže samo s jedne strane dok je stanje na drugoj strani u pravilu P4.

Tablica 4.3 Vrste čelika za tanke limove i njihova svojstva [25]

Oznaka čelika	Kemijski sastav, %			R_m N/mm ²	R_e N/mm ²	Stanje površine
	C	P	S			
DC01	0,10	0,05	0,05	280...420	-	P2, P3, P4
DC04	0,10	0,045	0,045	280...400	270	P4
DC04	0,10	0,03	0,045	280...380	240	P5



Slika 4.3 Različita stanja površina tankih limova [27]

4.2.5.4 Konstrukcijski niskouglični čelici za trake

Čelici za izradu hladnovaljanih traka imaju maseni udio ugljika manji od 0,1 %. To su čelici **DC01** i **DC04**, a od njih se izrađuju i tanki limovi i žica. Za ove čelike navode se i opisi stupnja tvrdoće: mekožareno, 1/4 tvrdo, 1/2 tvrdo, 3/4 tvrdo, tvrdo i svijetlotvrdo. Zavarljivost rastaljivanjem vrlo je dobra, a moguća je i primjena točkastog zavarivanja [25].

4.2.5.5 Konstrukcijski čelici za žicu

Konstrukcijski čelici za žicu dijele se prema svojstvima i primjeni u tri skupine [25]:

- a) Obične žice, od čelika **DC01** i **DC04** u stanjima meko i svijetlotvrdo, a u stanjima površine: obična svijetla, modrožarena i pocinčana.

- b) Specijalne žice, od čelika **DC01** i **DC04**, s različitim stupnjevima tvrdoće: meko, 1/8 tvrdo, 1/4 tvrdo, 1/2 tvrdo, 3/4 tvrdo, tvrdo. Stanje površine može biti: bijeložarena, obična svijetla, sjajno svijetla, pobakrena, fosfatirana, pocinčana.
- c) Vučene žice za toplinsku obradu i za posebne primjene izrađene od čelika poboljšane rezljivosti, konstrukcijskih i alatnih čelika.

4.2.5.6 Čelici za vijke, matice i zakovice

Za izradu vijaka, matica i zakovica hladnim ili toplim postupcima deformiranja primjenjuju se niskouglični čelici s 0,1 % C do 0,2 % C. Za vijke i matice više tražene čvrstoće primjenjuju se čelici za poboljšavanje.

Konstruktor određuje okvirne vrijednosti čvrstoće, i to izborom klase čvrstoće čelika za vijke. Oznaka klase čvrstoće čelika za vijke sastoji se od dvaju brojevanih simbola. Prvi broj označuje stoti dio vrijednosti minimalne vlačne čvrstoće, a drugi deseterostruku vrijednost omjera granice razvlačenja i vlačne čvrstoće [25]. Primjerice klasa čvrstoće čelika za vijke 8.8 označuje minimalnu vlačnu čvrstoću od 800 N/mm², a najmanja vrijednost granice razvlačenja je 640 N/mm².

Tablica 4.4 Klase čvrstoće čelika za vijke s propisanim svojstvima [25]

Svojstva	Oznaka klase čvrstoće										
	4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	6.8	6.9	8.8	10.9	12.9	14.9
$R_m, \text{N/mm}^2$	400...550		500...700		600...800			800...1000	1000...1200	1200...1400	1400...1600
$R_a, \text{N/mm}^2$	240	320	300	400	360	480	-	-	-	-	-
$R_{p0.2}, \text{N/mm}^2$							540	640	900	1080	1260
$A_5, \%$	25	14	20	10	16	8	12	12	9	8	7
$KV, \text{kJ/m}^2$			500	-	400	-	300	600	400	300	300
HV	110...170		140...215		170...245			225...300	280...370	330...440	400...510
vrste čelika	čelici poboljšane rezljivosti						čelici za poboljšavanje				

Oznaka čelika za matice ima samo jedan broj koji označuje stoti dio vlačne čvrstoće.

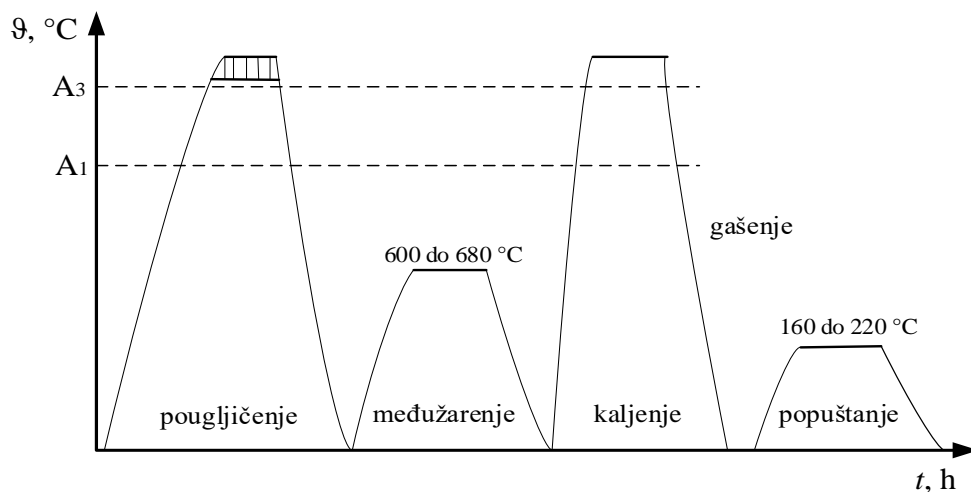
Tablica 4.5 Klase čelika za matice s propisanim svojstvima [25]

Svojstva	Oznaka klase čvrstoće						
	4	5	6	8	10	12	14
$R_m, \text{N/mm}^2$	400	500	600	800	1000	1200	1400
HV matice	302	302	302	302	353	353	380
vrsta čelika	čelici poboljšane rezljivosti				čelici za poboljšavanje		

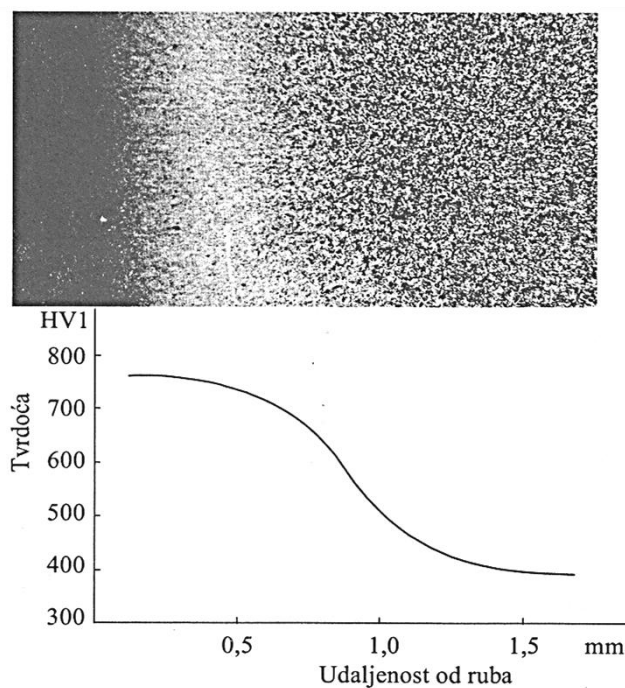
4.2.5.7 Konstrukcijski čelici za cementiranje

Za cementiranje se koriste niskougljični ($< 0,25 \% C$) čelici, i to nelegirani i legirani sa zajamčenim kemijskim sastavom. Prema masenom udjelu nečistoća ovi čelici spadaju u kvalitetne i plemenite čelike. Plemeniti čelici sadrže maseni udio sumpora i fosfora manji od $0,035 \%$, a kvalitetni čelici sadrže manje od $0,045 \%$ sumpora i fosfora.

Čelici za cementiranje podvrgavaju se toplinskoj obradi koja se sastoji od pougljičavanja površinskih slojeva, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Pougljičavanje se provodi u granulatu, plinu ili solnoj kupki pri temperaturi austenitiziranja.



Slika 4.4 Dijagram postupka kaljenja nakon pougljičenja čelika s međuzarenjem [6]



Slika 4.5 Mikrostruktura i raspored tvrdoća na poprečnom presjeku cementiranog čelika [11]

Površinski (rubni) slojevi obogaćuju se ugljikom na oko 0,8 % C do 0,9 % C te tako postaju zakaljivi na maksimalnu tvrdoću (61...64 HRC). Nakon cementiranja površinski su slojevi tvrdi i otporni na trošenje dok sredina presjeka ostaje žilava. Čelici za cementiranje primjenjuju se za izradu onih dijelova koji u radu moraju istodobno biti otporni na trošenje i podnositi dinamička opterećenja. Za izbor ovih čelika odlučujuća su mehanička svojstva jezgre koja ovise o sastavu osnovnog materijala [25].

Glavne vrste čelika za cementiranje sljedeće su:

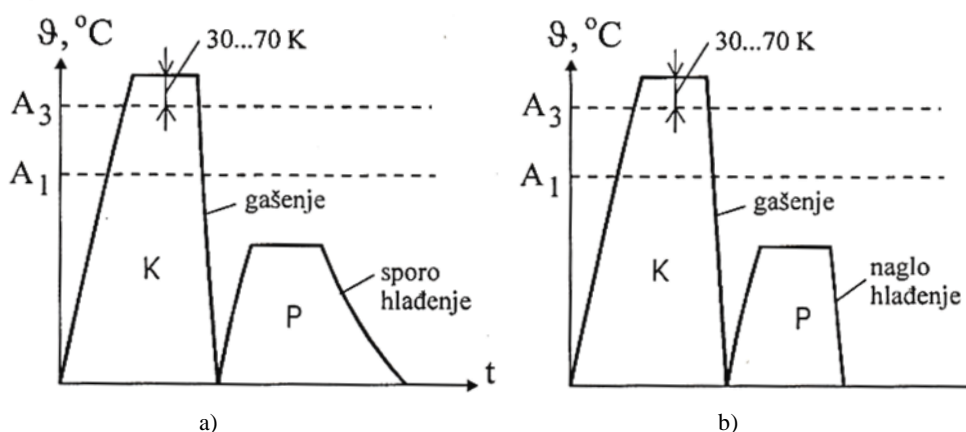
- 1) Nelegirani čelici: C10, C10E, C15 i C15E. Ovi čelici kaljivi su samo u vodi, slabe su prokaljivosti pa se primjenjuju za izradu dijelova malih presjeka (promjera do oko 10 mm) koji nisu jače udarno opterećeni (osovnice, mali zupčanici, poluge, svornjaci, čahure i sl.).
- 2) Čelik legiran s kromom: 15Cr3. Ovaj je čelik dobro zakaljiv i prokaljiv u vodi i u ulju. Primjenjuje se za izradu poluosovina, manjih zupčanika, bregastih osovine, osovine kotača vozila i sl.
- 3) Čelici legirani s manganom i kromom: 16MnCr5 i 20MnCr5. Ovo su čelici dobre prokaljivosti koji se primjenjuju za izradu dijelova srednjih dimenzija (zupčanici, vretena, osovine alatnih strojeva, bregaste osovine i sl.).
- 4) Čelici legirani s kromom i molibdenom: 20CrMo5 i 20MoCr4. Ovo su čelici dobre prokaljivosti i otporni na trošenje. Primjenjuju se za izradu bregastih i koljenastih osovine, zupčanika mjenjačkih kutija, kardanskih zglobova i sl.
- 5) Čelici legirani s niklom i kromom: 14CrNi6 i 18CrNi8. Ovo su vrlo dobro prokaljivi čelici prikladni za izradu dijelova najvećih dimenzija (visokopterećeni zupčanici i vratila, koljenaste osovine, osovine u zrakoplovima, kamionima i sl.) [25].

Tablica 4.6 Čelici za cementiranje - zajamčen kemijski sastav i mehanička svojstva (izvod iz DIN-a 17210) [25]

Oznaka čelika	Kemijski sastav, %							Žareno stanje		Stijepo kaljeno stanje ϕ 30 mm					
	EN	C	Si	Mn	Cr	ostali elem.	P maks	S maks	meko	optimalna rezljivost	R_e N/mm ² min	R_m N/mm ²	A_5 % min	Z % min	KU (DVM) min J
									tvrdoca HB 30, maks						
C10	0,06...0,12	0,15...0,35	0,25...0,5				0,045	0,045	131	90...126	295	490...640	16	45	69
C15	0,12...0,18	0,15...0,35	0,25...0,5				0,045	0,045	131	103...140	355	590...790	14	45	48
C10E	0,06...0,12	0,15...0,35	0,25...0,5				0,035	0,035	140	90...126	295	490...640	16	45	69
C15E	0,12...0,18	0,15...0,35	0,25...0,5				0,035	0,035	140	103...140	355	590...790	14	45	48
15Cr3	0,12...0,18	0,15...0,35	0,40...0,6	0,5...0,8			0,035	0,035	187	118...160	440	690...890	11	40	48
15MnCr5	0,14...0,19	0,15...0,35	1,0...1,3	0,8...1,1			0,035	0,035	207	140...187	590	780...1080	10	40	41
20MnCr5	0,17...0,22	0,15...0,35	1,1...1,4	1,0...1,3			0,035	0,035	217	152...201	685	960...1280	7	35	27
20CrMo5	0,13...0,17	0,15...0,35	0,8...1,1	1,0...1,3	0,2...0,3 Mo		0,035	0,035	217	152...201	785	1060...1380	7	35	27
20MoCr4	0,17...0,22	0,15...0,35	0,9...1,2	1,1...1,4	0,2...0,3 Mo		0,035	0,035	207	140...187	590	780...1080	10	40	48
15CrNi6	0,12...0,17	0,15...0,35	0,4...0,6	1,4...1,7	1,4...1,7 Ni		0,035	0,035	217	152...201	635	880...1180	9	40	41
18CrNi8	0,15...0,20	0,15...0,35	0,4...0,6	1,8...2,1	1,8...2,1 Ni		0,035	0,035	235	170...217	785	1180...1430	7	35	34

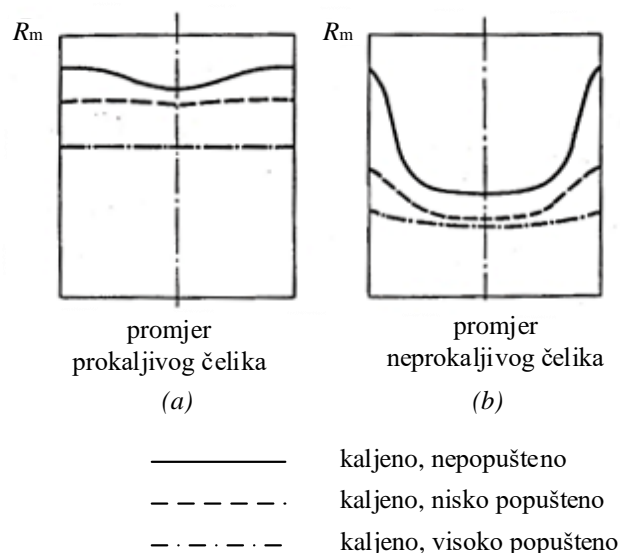
4.2.5.8 Konstrukcijski čelici za poboljšavanje

Ova skupina čelika sadrži od 0,2 % C do 0,6 % C. Prema svom kemijskom sastavu pripadaju kvalitetnim i plemenitim čelicima. Toplinska obrada ovih čelika sastoji se od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja s ciljem postizanja visoke granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, uz visoku žilavost i dinamičku izdržljivost.



Slika 4.6 Dijagram postupka poboljšavanja, a) čelici otporni na krhkost popuštanja, b) čelici sklони krhkosti popuštanja (K = kaljenje, P = popuštanje) [12]

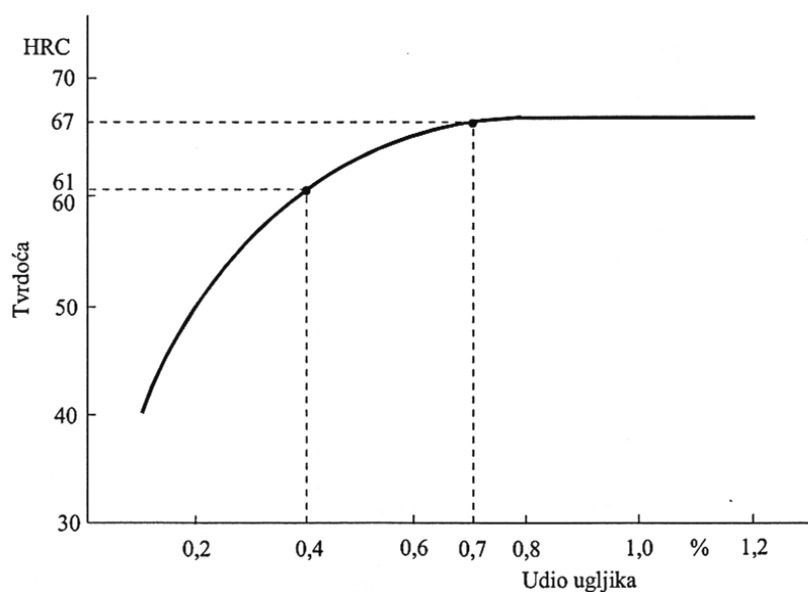
Primjenjuju se za mehanički i dinamički visookopterećene dijelove strojeva i uređaja. Kaljenjem se teži postizanju što potpunije martenzitne mikrostrukture po presjeku (što većoj prokaljenosti). Naknadno visokotemperaturno popuštanje ovih čelika radi se da bi se postigla što veća žilavost.



Slika 4.7 Primjer prokaljenog i neprokaljenog čelika istog promjera [12]

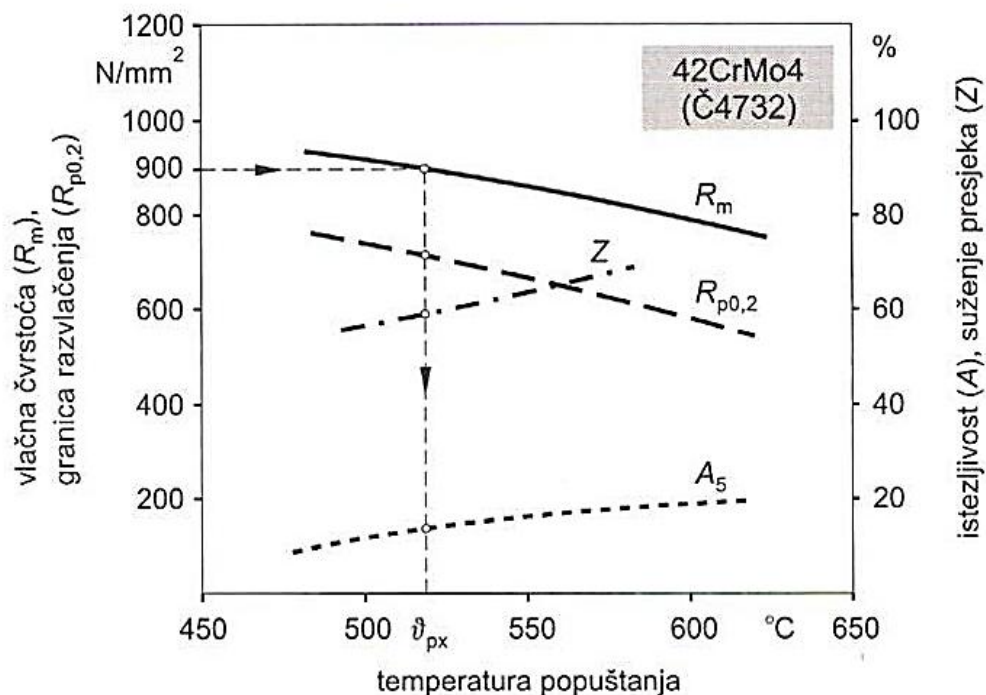
Na prokaljivost čelika primarno utječe maseni dio ugljika i legirnih elemenata i to tako da što je veći maseni udio ugljika i legirnih elemenata veća je i prokaljivost. Mjera prokaljenosti je tzv. stupanj zakaljenosti (stupanj prokaljenosti) S_z koji je definiran kao omjer tvrdoće kaljenja na nekom presjeku i maksimalno postizive tvrdoće za dotični čelik. Vrijednost S_z je od 0,72 do 1,00 [25]. Maksimalno postizive tvrdoće kaljenog čelika ovise o udjelu ugljika, a mogu se odrediti s pomoću Burnsova dijagrama (slika 4.8).

$$S_z = H_{kalj} / H_{maks} \quad (3.2)$$



Slika 4.8 Burnsov dijagram maksimalno postizive tvrdoće zakaljenih čelika u ovisnosti o udjelu ugljika u čeliku [11]

Na prokaljivost čelika primarno utječe maseni udio ugljika i legirnih elemenata: silicija (Si), mangana (Mn), kroma (Cr), nikla (Ni), volframa (W) molibdena (Mo), i to pojedinačno i / ili u interakciji, a sekundarno vrijednost temperature austenitizacije i veličina austenitnog zrna. Što je veći udio ugljika i viši stupanj legiranosti, veća je i prokaljivost. Na raspored tvrdoće po presjeku kaljenog dijela (prokaljenost) utječe prokaljivost čelika, dimenzije dijela i uvjeti gašenja. Što su veće dimenzije i blaži uvjeti hlađenja (za isti čelik), možemo očekivati slabiju prokaljenost. Zbog toga je potrebno za dijelove većih dimenzija birati više legirane čelike čija je prokaljivost bolja. Kod nekih vrsta čelika za poboljšavanje postoji opasnost od pojave krhkosti popuštanja ako se popuštaju u temperaturnom intervalu od 250 °C do 400 °C te od 370 °C do 500 °C.



Slika 4.9 Ovisnost mehaničkih svojstava o temperaturi popuštanja za čelik 42CrMo4 [25]

Glavne vrste čelika za poboljšavanje sljedeće su:

- 1) Ugljični čelici C22, C45. Primjenjuju se za izradu dijelova do promjera od 40 mm, a iznimno do 100 mm, za osovine, vijke, vretena, veće zupčanike u paru, klipnjače itd.
- 2) Jednostruko legirani čelik 34Cr4. Zbog veće prokaljivosti omogućava primjenu do 100 mm za dinamički opterećene strojne dijelove kao što su: koljenaste osovine, poluosovine, osovine u mjenjaču itd.

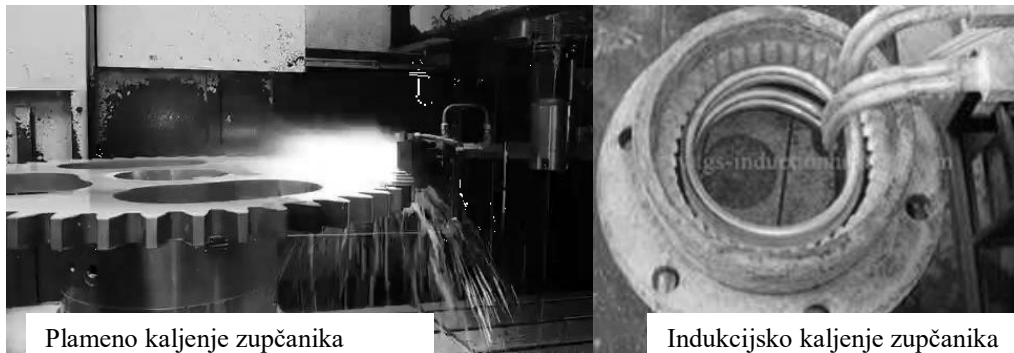
- 3) Dvostruko legirani čelik 42CrMo4. Primjenjuje se za izradu dijelova većih dimenzija i za viša radna opterećenja. Najekonomičniji je za promjere do 100 mm za dijelove vozila i zrakoplova: osovine, klipnjače, koljenaste osovine, poluosovine automobila, kardanske osovine, zupčanike itd.
- 4) Dvostruko legirani čelik 50CrV4. Primjenjuje se za izradu različitih dimenzija dinamički jače opterećenih strojnih dijelova koji su uz to opterećenje jače izloženi i trošenju. To su: osovine, zupčanci, zglobovi, torzijske opruge, alati-ključevi itd.
- 5) Višestruko legirani čelik 36CrNiMo4. Ovo je čelik najbolje prokaljivosti i primjenjuje se za izradu dijelova velikih dimenzija (promjera i većeg od 150 mm) od kojih se traži visoka granica razvlačenja i udarni rad loma. Ovaj je čelik najskuplji od svih čelika za poboljšavanje, a primjenjuje se za osovine turbogeneratora, ekscentar osovine za preše, velike zupčanike itd. [25].

Tablica 4.7 Čelici za poboljšavanje – zajamčena mehanička svojstva u poboljšanom stanju [25]

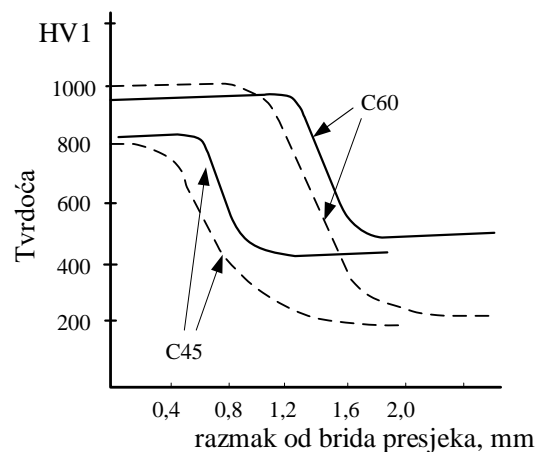
Oznaka EN	Meko žareno stanje	Poboljšano stanje																								
		do 16 mm promjera						16 - 40 mm promjera						40 - 100 mm promjera						100 - 160 mm promjera						
		$R_{p0,2}$	R_m	A_5	Z	KU	$R_{p0,2}$	R_m	A_5	Z	KU	$R_{p0,2}$	R_m	A_5	Z	KU	$R_{p0,2}$	R_m	A_5	Z	KU	$R_{p0,2}$	R_m	A_5	Z	KU
	tvrdooća	N/mm ²	N/mm ²	%	%	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.
	HB30																									
	maks.																									
C22, C22E	172	420	620... 760	17	35	min.	365	580... 730	19	40	41	325	540... 690	20	45											
C45, C45E	206	480	700... 840	14	30	min.	410	660... 810	16	35	27	375	620... 760	17	40											
C60, C60E	243	570	830... 980	11	20	min.	490	780... 930	13	30		450	740... 880	14	35											
40Mn4	217	635	880... 1080	12	40	min.	540	780... 930	14	45	41	440	690... 830	15	50	41										
34Cr4	217	685	880... 1080	12	40	min.	590	780... 930	14	45	48	460	690... 830	15	50	48										
25CrMo4	217	685	880... 1080	12	50	min.	590	780... 930	14	55	55	460	690... 830	15	60	55	410	640... 780	16	65	48					
42CrMo4	217	885	1080... 1270	10	40	min.	765	980... 1180	11	45	41	635	880... 1080	12	50	41	560	780... 930	13	55	41					
50CrMo4	235	885	1080... 1270	9	40	min.	765	980... 1180	10	45	34	685	880... 1080	12	50	34	635	830... 980	13	50	34					
30CrMnV4	248	1030	1230... 1420	9	35	min.	1030	1230... 1430	9	35	34	885	1080... 1270	10	40	41	785	980... 1180	11	45	48					
50CrV4	235	885	1080... 1270	9	40	min.	785	980... 1180	10	45	34	685	880... 1080	12	50	34	635	830... 980	13	50	34					
38CrNiMo4	217	885	1080... 1270	10	45	min.	785	980... 1180	11	50	41	685	880... 1030	12	55	48	590	780... 930	13	60	48					
30CrNiMo8	248	1030	1230... 1420	9	40	min.	1030	1230... 1430	9	40	34	885	1080... 1270	10	45	41	785	980... 1180	11	50	48					

4.2.5.9 Konstrukcijski čelici za površinsko kaljenje

Ako se želi postići i velika otpornost na trošenje i dinamička izdržljivost površinskih slojeva, neki od čelika za poboljšavanje mogu se uspješno površinski zakaliti (plameno ili indukcijski).



Slika 4.10 Postupci površinskog kaljenja čelika [13]



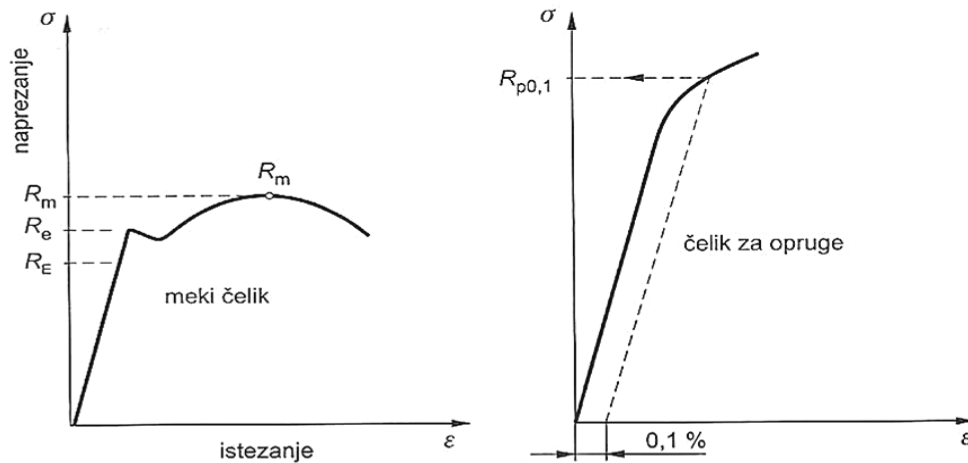
Slika 4.11 Utjecaj početnog stanja i vrste čelika na tijek tvrdoće po dubini indukcijski kaljenih slojeva

(——prethodno poboljšano, - - - - prethodno normalizirano) [6]

Površinskim kaljenjem postižu se svojstva površine koja su usporediva sa svojstvima cementiranih čelika dok su svojstva sredine presjeka puno bolja. Površinski se kale nelegirani i niskolegirani čelici koji sadrže od 0,35 % C do 0,60 % C, velike toplinske vodljivosti da se mogu dovoljno brzo zagrijati i hladiti u ulju ili u vodi. Maseni udio do 0,025 % P kod nelegiranih, ili do 0,035 % P kod niskolegiranih čelika osigurava veliku žilavost i postizanje jednolično zakaljenog sloja. Površinski se lokalno kale koljenaste osovine na mjestu za klizne ležaje, bregaste osovine (brijeg i oslonac za ležaj), zupčanici, lančanici, vretena, svornjaci lanaca, noževi kosilica za travu itd. Za površinsko kaljenje upotrebljavaju se sljedeći čelici: C35G, C45G, C53G, 46Cr2, 42CrMo4 [25].

4.2.5.10 Čelici za opruge

Od opruge se očekuje da pod djelovanjem radnog opterećenja ostvari traženu elastičnu deformaciju. Veća se opteretivost opruge ostvaruje visokim područjem elastičnosti, tj. što višom granicom razvlačenja odnosno granicom elastičnosti. Visoka granica razvlačenja se kod čelika za opruge ostvaruje povišenim masenim udjelom ugljika te legiranjem sa silicijem, manganom, kromom i vanadijem [25].



Slika 4.12 Karakteristična svojstva čelika za opruge u σ - ϵ dijagramu, u usporedbi s mekim čelikom [25]

Veći dio čelika za opruge toplo se oblikuje u željeni oblik poluproizvoda u čeličani, a nakon završnog formiranja opruge čelik se klasično ili izotermički poboljšava.



Slika 4.13 Primjer različitih vrsta opruga [28]

Druga skupina čelika isporučuje se u hladnom deformacijom očvrnutom stanju (hladnovaljane trake i hladnovučena žica). Još više vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće postižu se postupkom *patentiranja*. Patentiranje se sastoji od austenitiziranja

nelegiranog eutektoidnog čelika te izotermičkog gašenja u olovnoj kupki na temperaturi od 400 °C do 550 °C.

Osnovna vrsta čelika za opruge su čelici legirani silicijem: 45Si7, 50Si7, 55Si7. Kod ovih čelika postoji opasnost od razugljičenja prilikom kaljenja, a primjenjuju se za manje opterećene lisnate opruge, opružne podloške i sl.

Za viša opterećenja, veće presjeka i složenije oblike primjenjuju se čelici 60SiCr7, za normalno opterećene lisnate opruge vozila, spiralne, zavojne i tanjuraste opruge većih dimenzija i 55Cr3 za visokonapregnute opruge vozila.

Za najviša opterećenja i najveće dimenzije primjenjuju se čelici: 50CrV4 ili 51CrMoV4 [25].

Čelici za opruge podskupina su čelika za poboljšavanje.

4.2.5.11 Konstrukcijski čelici poboljšane rezljivosti

Ovi su čelici namijenjeni za izradu različitih strojnih dijelova na visokoproduktivnim automatskim strojevima pa se stoga nazivaju i „čelici za automate“. Njihovo najvažnije svojstvo bolja je obradivost odvajanjem čestica (rezljivost) u odnosu na druge čelike. Dobru sposobnost obrade ovim čelicima daje njihov modificirani kemijski sastav koji pospješuje stvaranje uključaka, a uključci omogućuju stvaranje lomljive, kratke strugotine.

Konstrukcijski čelici poboljšane rezljivosti primjenjuju se za izradu slabije mehaničkih opterećenih dijelova jer je žilavost i dinamička izdržljivost ovih čelika slabija nego kod ostalih konstrukcijskih čelika. U slučaju uporabe za viša opterećenja mogu se poboljšati prije ili poslije obrade. Čelici poboljšane rezljivosti podijeljeni su u dvije grupe:

- a) prikladni za cementiranje: 10S20, 17S20, 10S22
- b) prikladni za poboljšavanje: 35S20, 45S20.

Za ove čelike propisuje se kemijski sastav i mehanička svojstva (R_e , R_m , A_5) u različitim stanjima isporuke [25].

4.2.5.12 Konstrukcijski korozijski postojani čelici (nehrđajući čelici)

Korozijska postojanost svojstvo je otpornosti materijala na djelovanje okolnog medija. Korozijski je postojaniji onaj materijal kod kojeg, u jednakim vanjskim uvjetima, dolazi do manje intenzivnog razaranja na površini ili do neželjenih promjena mikrostrukture.

Korozijska postojanost procjenjuje se i mjeri putem: gubitka mase (debljina) i volumena, promjene mehaničkih i ostalih svojstava tijekom korozijskog djelovanja, pojava površinskih oštećenja ili strukturnih promjena u unutrašnjosti presjeka. Korozija je definirana kao spontano razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija. Korozija može biti *kemijska* (kemijske reakcije) i *elektrokemijska* (postojanje elektrolita). Proces korodiranja materijala (otapanja) povezan je sa sposobnošću pasiviziranja površine, tj. sa stvaranjem tanke guste zaštitne prevlake. Na korozijsku postojanost čelika najviše utječe maseni udio kroma i drugih legiranih elemenata (Ni, Mo, W, Ti, Al) koji moraju biti otopljeni u kristalu mješancu željeza.

Uvjet korozijske postojanosti čelika jest da:

- čelik sadrži najmanje 12 % Cr, i to u čvrstoj otopini
- postoji homogena monofazna mikrostruktura.

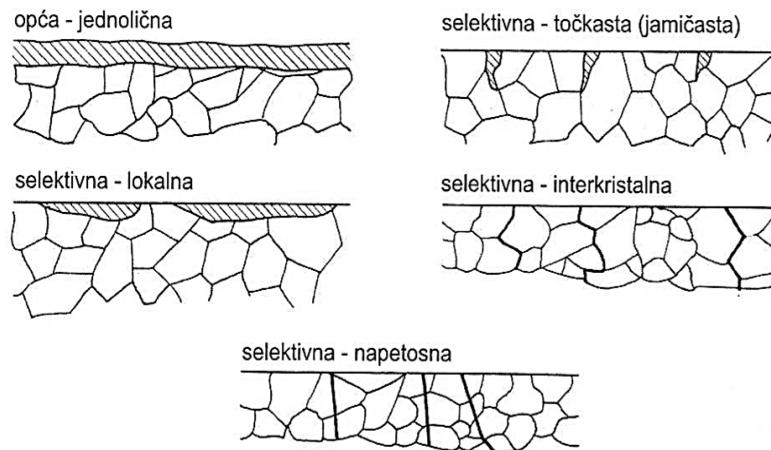
Korozijski postojani čelici teorijski morali bi imati potpuno feritnu (**F**), austenitnu (**A**) ili martenzitnu (**M**) mikrostrukturu bez karbida, oksida ili drugih intermetalnih veza. Monofazna feritna mikrostruktura postiže se legiranjem s alfagenim elementima (Cr, Si, Al, Mo, V, Nb, Ti). Stvaranje monofazne austenitne strukture omogućuju gamageni elementi (Ni, Mn, Co, Cu, N).

Osnovni pojavni oblici korozije su (slika 4.14):

- a) Opća (jednolična) korozija. Ovo je najčešći i najrašireniji oblik korozije, a nastupa jednolično po cijeloj površini dijela. Intenzivnost opće korozije mjeri se gubitkom dimenzija mm/god, ili gubitkom mase g/m^2h . U praksi se koriste podaci o stupnjevima postojanosti na opću koroziju koji su izvedeni iz laboratorijskih ispitivanja ispitnih proba različitih čelika.
- b) Posebni oblici korozije koja se pojavljuje kao selektivna, lokalna, a može biti:
 - točkasta (jamičasta) ili „pitting“ korozija, nastupa na brojnim nepredvidivim lokalitetima, a očituje se u stvaranju malih jamica koje s vremenom prerastaju u rupice. Uzrok je u lokalnim nehomogenostima u strukturi ili u kemijskom sastavu materijala.
 - kontaktna korozija nastupa zbog razlike elektropotencijala dva metala ako se nalaze u agresivnom mediju (elektrolitu) jer dolazi do stvaranja galvanskog članka.

- interkristalna korozija, predstavlja posebno opasan oblik korozije jer napreduje nevidljivo duž granica kristalita (zrna), čime izaziva razaranje metalne veza među kristalitima u mikrostrukturi čelika i konačno raspad cijelog dijela. Po granicama zrna izlučuju se nečistoće i različiti spojevi legiranih elemenata (npr. karbidi ili oksidi) različitog potencijala u odnosu na okolna zrna (čvrstu otopinu). Ovom tipu korozije podložni su i čelici koje inače smatramo potpuno korozijski postojanima (austenitni Cr-Ni čelici i feritni Cr-čelici). Martenzitni čelici nisu podložni ovom tipu korozije.
- napetosna korozija oblik je korozije koji nastupa kada je dio istodobno izložen djelovanju agresivnog medija i vlačnog naprezanja. Najčešće nastaje na hladno deformiranim lokalitetima jer ondje zaostaju napetosti, a nastaje i u okolini zavarenih mjesta gdje su povećana zaostala naprezanja.
- ostali tipovi selektivne korozije nastaju u različitim uvjetima i na raznim mjestima, a mogu biti: korozija u rasporu, erozija, kavitacija ili tribokorozija.

Sljedeće slike prikazuju različite osnovne pojavne oblike korozije.



Slika 4.14 Pojavni oblici korozije [25]

4.2.5.13 Konstrukcijski čelici za rad na povišenim i visokim temperaturama

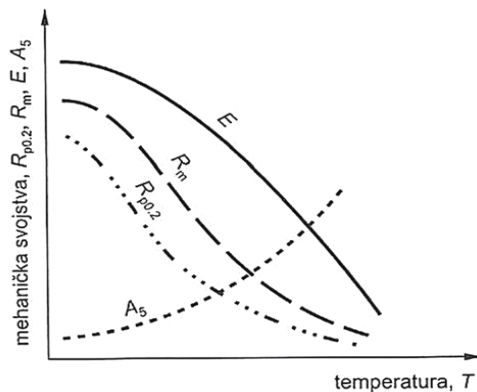
Radne temperature od 180 °C do 450 °C za čelik su povišene, a one iznad 450 °C su visoke jer pri njima počinje puzanje čelika. Temperature do 180 °C za čelik i za legure čelika smatraju se niskima jer nema promjena mehaničkih svojstava. Kod metalnih materijala, na temelju iskustva, zadovoljavajuća mehanička svojstva postižu se do temperatura od $2/3 T_t$ (T_t , talište po Kelvinovoj skali).

Povišene ili visoke temperature vladaju u termoenergetskim postrojenjima, u metalurškim pogonima, motorima s unutarnjim izgaranjem, raketama i sl.

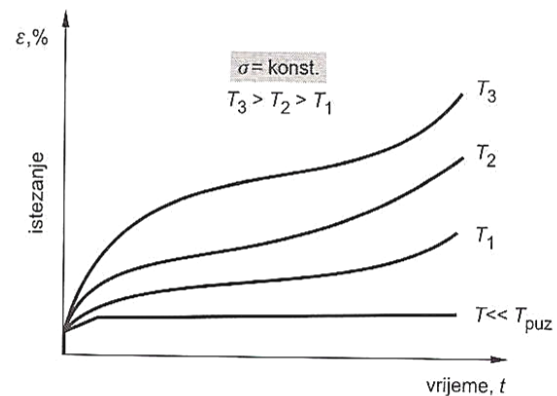
Pri izboru materijala za rad na povišenim ili visokim temperaturama najvažnija je mehanička otpornost, ali se uz točesto traži i kemijska postojanost na različite medije, djelovanje plinova i vatre itd.

Tipične pojave vezane uz mehanička svojstva pri povišenim i visokim temperaturama su:

- sniženje granice razvlačenja
- pojava puzanja
- sniženje dinamičke izdržljivosti.



Slika 4.15 Promjena mehaničkih svojstava s promjenom temperature [25]



Slika 4.16 Pojava puzanja pri visokim temperaturama [25]

S obzirom na područje primjene čelici za rad na povišenim temperaturama podijeljeni su u četiri skupine:

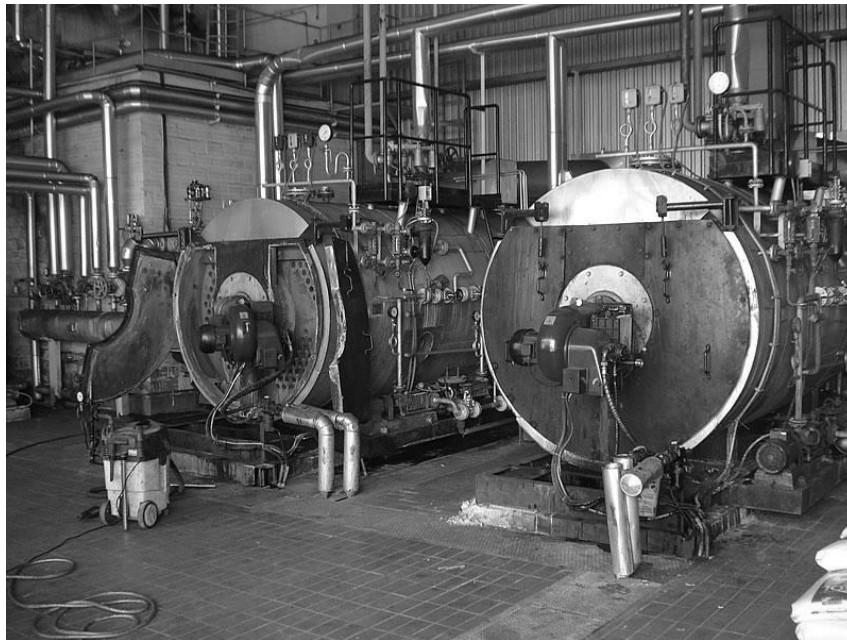
- a) ugljični (nelegirani) čelici
- b) niskolegirani čelici
- c) visokolegirani martenzitni čelici
- d) visokolegirani austenitni čelici.

ad a) Primjer za skupinu ugljičnih čelika za rad na povišenim temperaturama su čelici za kotlovske limove. Riječ je o čelicima zajamčenog kemijskog sastava i zajamčenih mehaničkih svojstava. Na osnovi uvjeta rada čelici za kotlovske limove moraju zadovoljiti sljedeća svojstva [25]:

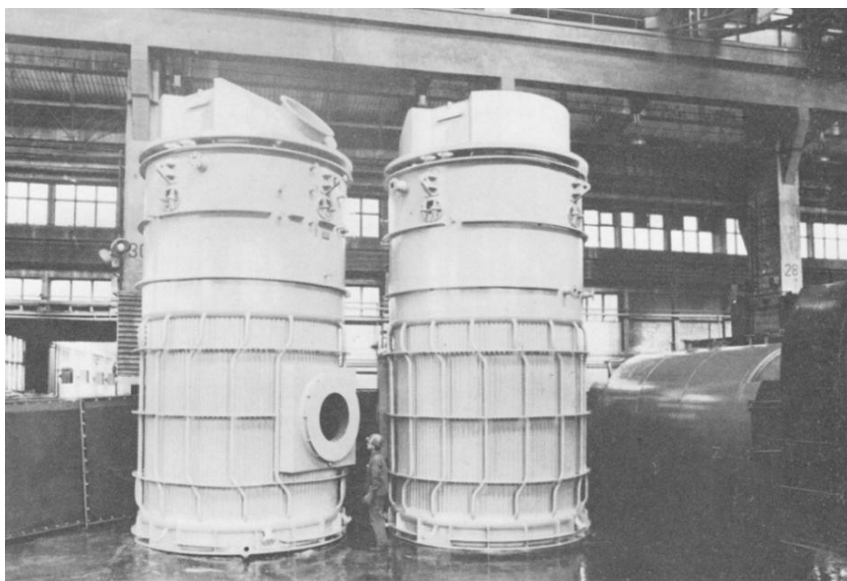
- dovoljna čvrstoća pri povišenim temperaturama radi djelovanja tlaka
- zadovoljavajuća duktilnost (žilavost)

- otpornost na starenje
- umjerena postojanost prema vodi, vodenoj pari i lužinama kao i otpornost na interkristalnu koroziju
- vrlo dobra zavarljivost.

Kotlovski čelici isporučuju se u obliku toplovaljanih limova ili ploča. Upotrebljavaju se za izradu oplata parnih kotlova pri temperaturi okoline i za cijevi i spremnike većih promjera [25].



Slika 4.17 Parni kotao, izgled i u fazi čišćenja [29]



Slika 4.18 Brodski pomoćni kotao [30]

Tablica 4.8 Nelegirani čelici za kotlovske limove [25]

Oznaka čelika EN	Kemijski sastav, %		R_m , N/mm ²	$R_{p0.2 \text{ min}}$, N/mm ² pri °C			R_{DVM} , N/mm ² pri °C		
	C maks	Mn min		20	200	400	400	450	475
P235GH	0,16	0,40	350...450	210	160	100	90	50	(30)
P265GH	0,20	0,50	410...500	240	180	120	100	60	(40)
P295NH	0,22	0,55	440...530	260	210	140	120	80	(50)

ad b) Niskolegirani čelici za rad na povišenim temperaturama legirani su s Mo ili Mo i Cr, a kod nekih vrsta dodaje se i vanadij. Radi dobre zavarljivosti također imaju nizak sadržaj ugljika (do 0,25 %). Temperaturno područje primjene je od 450 °C do 580 °C. Primjena čelika iz ove skupine raširena je u termoenergetskim postrojenjima. U ovu skupinu pripadaju sljedeći čelici:

- 15Mo3 – normaliziran. Primjenjuje se za oplata kotlova, kotlovske cijevi i cijevi pregrijača.
- 13CrMo4-5 – poboljššan na zraku. Primjenjuje se za kolektore pare, kotlovske cijevi, cijevi pregrijača.
- 10 CrMo9-10 – poboljššan na zraku. Primjena kao 13CrMo4-5, ali kod nešto viših temperatura.
- 22CrMo4-4 – meko žaren ili poboljššan. Primjenjuje se za izradu posebno velikih otkivaka.
- 24CrMoV5-5 – meko žaren ili poboljššan. Primjenjuje se za izradu vijaka, matica, svornjaka, pribubnica, turbinskih lopatica, velikih otkivaka.

Ovi čelici izrađuju se u obliku cijevi i limova [25].

ad c) Visokolegirani čelici za rad na povišenim temperaturama moraju sadržavati oko 1 % Mo i do 12% Cr. Uz pravilno kaljenje postiže se potpuno martenzitna struktura. Ovaj sastav omogućava veću mehaničku otpornost na povišenim temperaturama i veliku postojanost na opću koroziju. Ovi čelici otporni su na djelovanje vodika i na sulfidnu napetosnu koroziju. Primjenjuju se za: lopatice, rotore i kućišta parnih turbina, brodske propelere, cijevi pregrijača pare, dijelove otporne na djelovanje morske vode, komprimirani vodik i slabije organske kiseline, dijelove uređaja u industriji papira, umjetnih vlakana, celuloze, nafte, plina itd. [25].

Tablica 4.9 Visokolegirani čelici za povišene temperature [25]

Oznaka čelika prema EN	Sastav „ostalo“ maseni %	Popušteno ρ_p , °C	Mehanička svojstva pri 20 °C				Kratkotrajno vlačno ispitivanje				Dugotrajno vlačno ispitivanje		
			R_m , N/mm ²	$R_{p0.2}$ min, N/mm ²	A_5 min %	KV (ISO-V) J, min	$R_{p0.2}$, N/mm ² , pri °C				$R_{p0.2}$, N/mm ² , pri °C		
							200	400	500	600	500	550	600
X19CrMo12-1	-	700...750	700...800	500	18	40	432	353	264	108	245	140	60
X11CrMoV12-1	2,5Ni; 0,3V; 0,035N	560...620	930...1130	785	14	48	700	600	500	300	200	85	35
X20CrMoV12-1	0,3V	680...750	700...850	500	16	40	432	363	264	108	245	145	77
X22CrMoV12-1	0,3V	720...750 / 680...720	800...950/ 900...1050	600 700	14 11	27 20	530 603	423 485	344 392	206 250	295	168	80
X19CrMoVNb12-1	0,2V; 0,08N; 0,35Nb	550...700	900...1050	780	10	20	700	580	470	315	360	200	12
X20CrMoWV12-1	0,3V; 0,5W	700...750	800...950/ 950...1100	600 750	14 10	27 20	530 650	423 530	377 430	206 270	260	160	60

ad d) Ovi čelici dodatno se legiraju s Mo, W, V, Ti, i NB, što im omogućava izlučivanje karbida i precipitiranje toplinski postojanih intermetalnih faza koje povisuju mehaničku otpornost pri visokim temperaturama. Austenitni Cr-Ni čelici primjenjivi su pri temperaturama od 600 °C do 750 °C. Uz veliku otpornost na puzanje austenitni čelici imaju i vrlo dobru kemijsku postojanost, odnosno vatrootpornost. Ovo je grupa visokolegiranih čelika koji sadrže: Cr, Ni, Mo, V, Nb, B, Ti, itd.

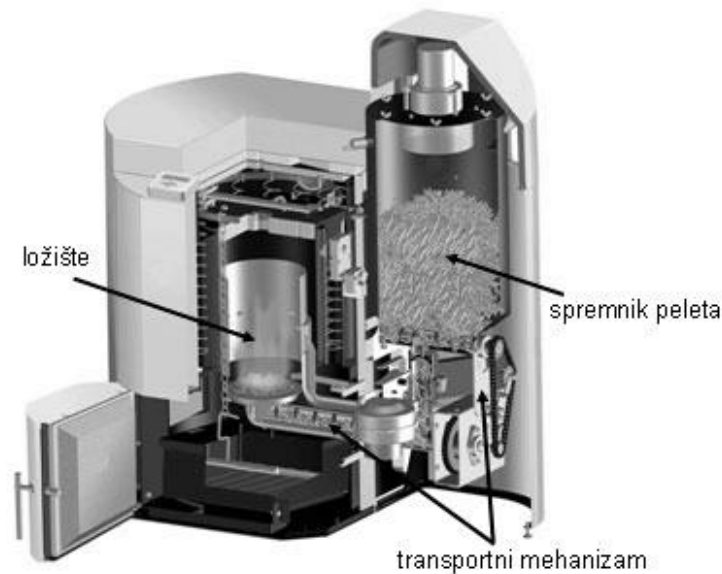
4.2.5.14 Vatrootporni čelici

Posebne grupe čelika za rad na najvišim temperaturama su tzv. **vatrootporni čelici i čelici za ventile motora**. Na vatrootpornost čelika najpovoljnije djeluje legiranje **kromom, silicijem i aluminijem**. Čelik legiranjem s Cr, Si, i Al postaje postojan na intenzivnu oksidaciju, tj. otporan na ljuškanje ili vatrootporan zbog stvaranja oksida tih elemenata u površinskom sloju. Za potpunu vatrootpornost gubitak mase ne smije biti viši od 1 g/m²h pri definiranoj temperaturi, odnosno najviše 2 g/m²h pri 50 °C višoj temperaturi, uz izloženost struji plinova koji sadrže kisik u trajanju od 120 sati. Od vatrootpornih čelika traži se osim otpornosti na oksidaciju i dovoljna mehanička otpornost (dovoljna granica razvlačenja) pri povišenim temperaturama i dovoljna otpornost puzanju.

Vatrootporni čelici primjenjuju se za:

- dijelove ložišta generatora pare koji su u dodiru s vatrom i vrućim plinovima
- dijelove metalurških peći
- rešetke i dijelove za šaržiranje dijelova u pećima za toplinsku obradu.

Čelici za izradu ispušnih ventila legirani su Cr-Si-Mo-W, odnosno Cr-Si-V elementima s martenzitnom mikrostrukturom. Ventili motora u radu izloženi su visokim temperaturama (i do 900 °C) i velikim promjenama temperature (toplinski šokovi) [25].



Slika 4.19 Ložište kotla na biomasu [31]

4.2.5.15 Konstrukcijski čelici za rad na niskim temperaturama

Osnovni zahtjev u primjeni čelika pri niskim temperaturama je dovoljna žilavost, odnosno traži se neosjetljivost na krhki lom. Kao „*hladno žilav*“ čelik može se definirati kao onaj koji pri temperaturi od -40 °C postiže vrijednost udarnog rada loma (ISO-V ispitno tijelo) od 27 J ili ima prijelaznu temperaturu žilavosti nižu od -40 °C. Za postizanje velike žilavosti pri niskim temperaturama čelici moraju imati posebno prilagođen kemijski sastav (npr. što niži sadržaj ugljika) i mikrostrukturu.

U primjeni razlikujemo tri osnovne skupine čelika za rad pri niskim temperaturama:

- a) **niskolegirani** (mikrolegirani) sitnozrnati čelici u normaliziranom stanju za primjenu do -50 °C
- b) **čelici legirani s Ni** (1,5 % do 9 %) za poboljšavanje se primjenjuju u temperaturnom području od -85 °C do -200 °C
- c) **Cr-Ni i Cr-Ni-N (Nb,Ti), Cr-Ni-Mo-N i Cr-Mn-Ni-N** austenitni čelici koji i blizu apsolutne nule imaju dovoljnu žilavost [25].

4.2.5.16 Visokočvrsti čelici

Za primjenu u posebnim uvjetima primjenjuju se čelici s vrijednostima granice razvlačenja ($R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$). Visoka čvrstoća postiže se kombinacijom različitih načina očvrstnuća. Čelici iz ove grupe imaju:

- visoku čistoću i nizak udio neželjenih primjesa i uključaka
- homogenu sitnozrnatu mikrostrukturu, dobiveni su posebnim metodama pretaljivanja i pročišćavanja te toplinskim i termomehaničkim obradama.

Cijena ovih čelika znatno je viša od standardnih konstrukcijskih čelika.

4.2.6 Alatni čelici

Alatni čelici služe za izradu alata kojima se obrađuju i oblikuju metalni ili nemetalni materijali. Zbog visokog opterećenja u radu i specifičnih funkcija alata, od alatnih se čelika zahtijevaju sljedeća svojstva:

I. osnovna svojstva: otpornost na trošenje i žilavost

II. posebna svojstva: postojanost tvrdoće pri povišenim radnim temperaturama, postojanost dimenzija, otpornost na korziju, otpornost na toplinske šokove i dr.

III. proizvodna svojstva: zakaljivost, prokaljivost, obradivost elektroerozijom, nabavljivost na tržištu i dr.

S obzirom na kemijski sastav alatni čelici mogu biti:

- nelegirani
- niskolegirani
- visokolegirani.

Prema radnoj temperaturi i uvjetima primjene čelici se dijele na sljedeće podskupine:

- alatni čelici za hladni rad (do $200 \text{ }^\circ\text{C}$)
- alatni čelici za topli rad ($t > 200 \text{ }^\circ\text{C}$)
- brzorezni čelici.

Primarni (temeljni) zahtjevi i svojstva za alatne čelike su:

- otpornost na trošenje
- žilavost
- otpornost na popuštanje (posebno za čelike koji su izvrgnuti povišenim temperaturama u radu).

Alatni se čelici u pravilu primjenjuju u toplinski obrađenom stanju, primarno zakaljeni i popušteni. Svojstva alata mogu se poboljšati površinskim toplinskim obradama s ciljem povećanja otpornosti na abrazijsko i adhezijsko trošenje i povećanja korozijske postojanosti.

Za poboljšanje svojstava primjenjuju se sljedeći postupci:

- površinsko kaljenje
- toplinsko-kemijski postupci
- tvrdo elektrokemijsko kromiranje
- postupci nanošenja karbida
- postupci nanošenja dijamantnih slojeva.

Primjeri alata koji se izrađuju od alatnih čelika:

- alati za obradu odvajanjem čestica
- alati za rezanje i hladno oblikovanje metala
- alati za toplo oblikovanje metala
- alati za oblikovanje nemetala
- mjerni i kontrolni alati [25].

4.2.6.1 Alatni čelici za hladni rad

U ovoj se skupini nalaze nelegirani i niskolegirani čelici koji se primjenjuju za radne temperature do 200 °C.

Nelegirani alatni čelici za hladni rad sadrže od 0,5 % C do 1,3 % C, imaju malu prokaljivost jer nisu legirani, ali imaju bolju žilavost u odnosu na druge alatne čelike. Ovi čelici lakše se obrađuju odvajanjem čestica od ostalih alatnih čelika. Proizvode se u velikom asortimanu dimenzija.

Tipični alatni čelici za hladni rad su: C45U, C80U, C105U, 100V2, C110U, C125U, C135U. Od ovih čelika izrađuju se alati jednostavnijeg oblika i manjih presjeka, npr. dljetka, čekići, svrdla za drvo, kliješta, ručne škare, sjekire, noževi za kožu, nareznice, razvrtala, probijači, sjekači, pile za drvo, turpije itd. [25].



Slika 4.20 Primjeri alata izrađenih od alatnih čelika za hladni rad [32]

Niskolegirani alatni čelici za hladni rad mogu biti:

- visokouglični W i V čelici
- niskouglični i srednjouglični W-Cr-(Si)-V čelici
- niskolegirani Cr čelici
- niskolegirani Mn-Cr-V i Mn-Cr-W čelici.

Primjena: kalibri, mikrometarski vijci, kutnici, navojni alat, razvrtači, spiralna svrdla, ukovnji za hladno kovanje novca, noževi za papir, glodala za drvo, kalupi za duboko vučenje, alat za valjanje navoja itd. [25].

Visokolegirani alatni čelici za hladni rad

Glavni legirni element kod ovih alatnih čelika je krom ($> 5 \%$), a osim kroma pojedini čelici sadrže V, Mo i (ili) W.

Čelici s manjim masenim udjelom ugljika i visokim udjelom kroma ($> 13 \%$), martenzitni nehrđajući čelici, imaju veliku otpornost na koroziju u zakaljenom i popuštenom stanju, ali uz smanjenu otpornost na trošenje. S obzirom na sastav, mikrostrukturu i svojstva, ove čelike možemo razvrstati u tri podgrupe:

- 1) Čelici s oko 5% Cr, npr. čelik X100CrMoV5-1.
- 2) Visokouglični ledeburitni čelici s 12% Cr, npr. čelici X210Cr12, X210CrV12, X65CrMoV12, X55CrVMo12-1.
- 3) Martenzitni nehrđajući čelici, npr. X20Cr13, X42Cr13, X45CrMoV15, X5CrMo14, X1CrMoV18 [25].



Slika 4.21 Primjeri primjene visokolegiranih čelika za hladni rad [33, 34, 35, 36, 37, 38]

- Primjena visokolegiranih alatnih čelika sljedeća je [25]:

ad 1) (čelici s oko 5 % kroma)

- štanice
- škare i alati za oblikovanje lima
- mjerni alat
- razvrtači
- narezna svrdla i nareznice
- valjci za izradu navoja
- alati za izradu polimera itd.

ad 2) (visokouglični ledeburitni čelici s oko 12 % kroma):

- štanice
- noževi za sječenje i škare
- matrice za vučenje žice
- valjci
- alati za prešanje duromera
- alati za hladno oblikovanje i utiskivanje
- alati za tlačno istiskivanje
- glodala za proreze
- kalibri za provrte i navoje, alat za reckanje itd.

ad 3) (martenzitni nehrđajući čelici):

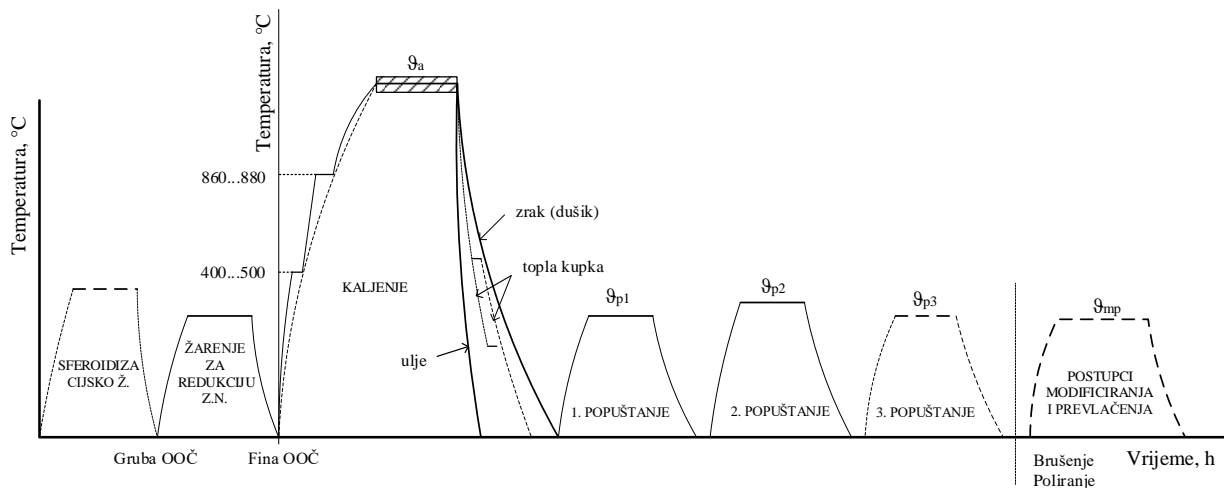
- kirurški instrumenti (skalpeli, škare i dr.)
- noževi za jelo
- žileti i britve
- krojačke škare

- zubarska kliješta, pincete
- žigovi i matrice za prešanje kemijski agresivnih duromera i za tabletiranje lijekova.

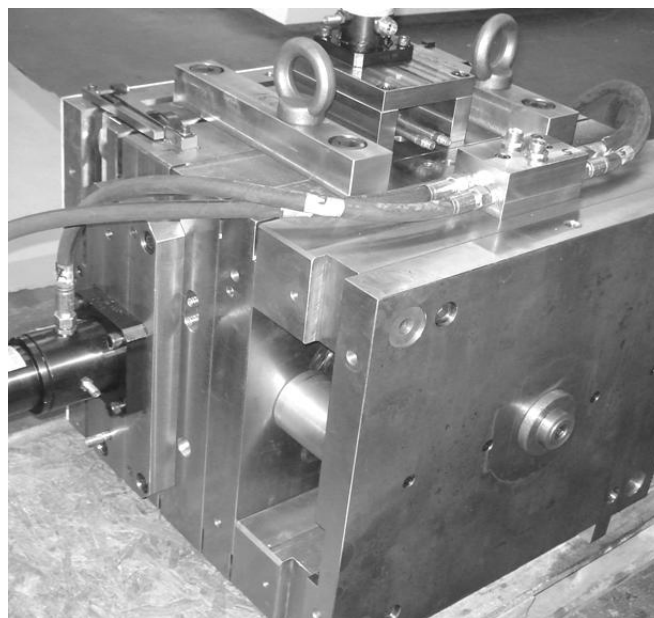
Alatni čelici za topli rad

Nužno svojstvo ovih čelika treba biti dobra otpornost na popuštanje jer su izvrgnuti radnim temperaturama višim od 200 °C.

Zbog povećanja žilavosti i prokaljivosti čelici se legiraju niklom, a za poboljšanje dinamičke izdržljivosti legiraju se silicijem. Alati za topli rad popuštaju se dva ili tri puta s ciljem transformacije zaostalog austenita.



Slika 4.22 Slijed postupaka toplinske obrade u tehnološkom postupku izrade alata [39]



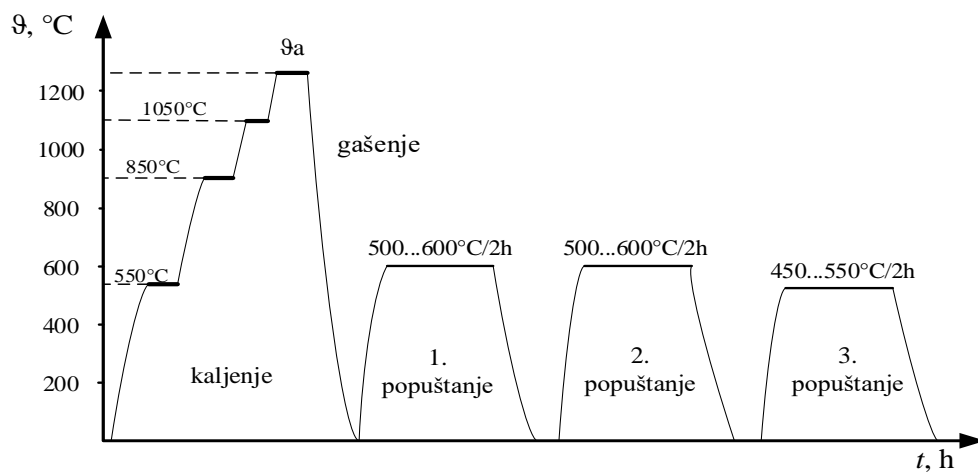
Slika 4.23 Primjer primjene alatnog čelika za topli rad – alati za injekcijsko brizganje [40]

Alatne čelike za topli rad možemo prema sastavu i području primjene razvrstati u tri skupine [25]:

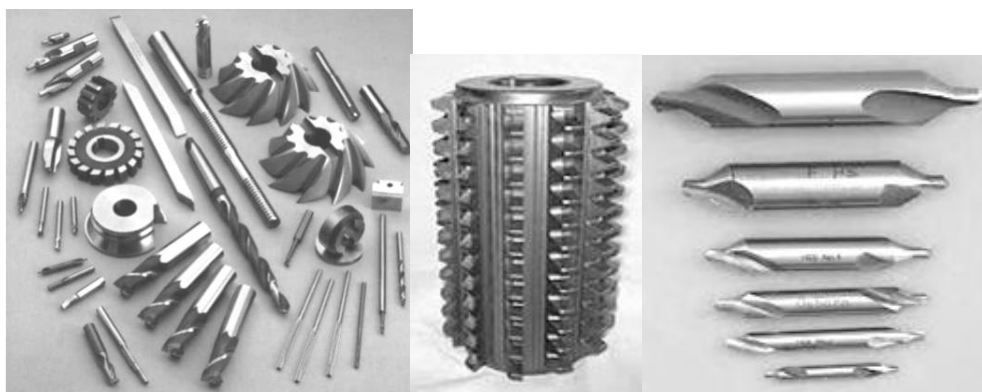
- 1) Niskolegirani čelici za ukovnje, čelici: 56NiCrMoV7, 55NiCrMoV6.
- 2) Visokolegirani čelici za kalupe za tlačni lijev, koji sadrže oko 5 % Cr i od 1 % do 3 % Mo. To su čelici X32CrMoV3-3, X38CRMov5-1, X40CrMoV5-1, X50CRMov5-1.
- 3) Visokolegirani W-Cr-V čelici za kalupe za tlačni lijev: X30WCrV4-1, X30WCrV9-3.

4.2.7 Brzorezni čelici

Ovi su čelici legirani jakim karbidotvorcima (Cr, W, V, Mo te s Co) koji s povišenim udjelom ugljika (0,7 % do 1,3 %) stvaraju slobodne karbide postojane i pri višim temperaturama. Brzorezni čelici odlikuju se izvrsnom otpornošću na trošenje i otpornošću na popuštanje. Primjenjuju se za rezne alate koji rade s velikim brzinama rezanja.



Slika 4.24 Dijagram postupka kaljenja i popuštanja brzoreznog čelika [41]



Slika 4.25 Primjeri primjene brzoreznih čelika [42, 43, 44]

Približni maseni udjeli legirnih elemenata kod ove vrste čelika navode se sljedećim redoslijedom: W-Mo-V-Co. Prema sastavu čelici se razvrstavaju u sljedeće grupe:

- 1) čelici s 18 % W: HS18-0-1, HS18-1-2-5, HS18-1-2-10.
- 2) čelici s 12 % W: HS12-1-4, HS12-1-2, HS12-1-2-5, HS12-1-4-5.
- 3) čelik s 10 % W: HS10-4-3-10.
- 4) čelici legirani s W i Mo: HS6-5-2, HS6-5-2-5.
- 5) čelici legirani s Mo: HS2-9-1.

Opis osnovnih brzoreznih čelika:

- HS18-0-1, sadrži 0,75 % C; 4 % Cr; 18 % W i 1 % V. To je najpoznatiji i najstariji brzorezni čelik za univerzalnu primjenu. Nije osjetljiv na provođenje toplinske obrade. Primjenjuje se za sve vrste alata za obradu materijala nehomogene mikrostrukture, kao što su sivi lijev, čelični lijev, mjed... Prikladan je za izradu alata složenog oblika kao što su: tokarski noževi, glodala, strojna razvrtala, strojna provrtala, alati za hladno sječenje, elementi za valjanje navoja...
- HS6-5-2, sadrži 0,9 % C; 4 % Cr; 6,5 % W; 5 % Mo; 1,9 % V. Ovaj čelik ima dobru žilavost i dobro je obradiv odvajanjem čestica. Primjenjuje se za izradu alata za grubu obradu: glodala, ureznice, razvrtala, upuštala, alate za obradu drva, alate za probijanje...
- HS10-4-4-10, sadrži 1,25 % C; 4 % Cr; 10 % W; 3,7 % Mo; 3,2 % V; 10,5 % Co. Ovo je brzorezni čelik visoke kvalitete s brojnim dobrim svojstvima: visoka tvrdoća na radnim temperaturama, vrlo dobra žilavost, velika otpornost na trošenje, izvrsne rezne karakteristike. Primjenjuje se za izradu alata za grubu obradu, alate za obradu austenitnih i vatrootpornih čelika, čelika poboljšane rezljivosti i za alate za izradu ozubljenja [25].

4.3 Željezni lijevovi

Pojam „lijev“ proizlazi iz tehnološkog postupka izrade dijelova (lijevanja) i usko je povezan s pojmom „odljevak“. Taljevina (lijev) se ulijeva u kalupe i poprima konačan oblik, čime dobivamo odljevak. Lijevom se smatra svaka metalna legura koja nakon uljevanja u kalup i nakon skrućivanja (kristalizacije) nije bila podvrgnuta ni toplom ni hladnom oblikovanju deformiranjem (obradi bez odvajanja čestica materijala) [45]. Odljevci se

prvenstveno primjenjuju kada tehnički nije izvedivo ili kada nije ekonomično osnovno oblikovanje na drukčiji način (kovanjem, zavarivanjem, obradom odvajanjem čestica i sl.). To se osobito odnosi na dijelove vrlo složenih oblika i geometrije, a i velikih dimenzija. Odljevak se još eventualno doraduje obradom odvajanjem čestica (tokarenje, glodanje, brušenje, bušenje itd.).

Lijevana mikrostruktura jest grubozrnata i općenito pruža manju mehaničku otpornost od gnječene, npr. kod čelika. Kod primjene lijevanih materijala treba voditi računa o:

- primjeni legura s moguće približnim eutektičkim sastavom (najniže talište)
- skupljanju – promjeni mjera i volumena
- izboru pogodnog tehnološkog postupka lijevanja
- izbjegavanju koncentracije velikih masa (nagle promjene dimenzija odljevka).

U željezne lijevove pripadaju sljedeće Fe-C legure:

- čelični lijev – ČL
- bijeli tvrdi lijev – BTL
- sivi lijev – SL
- nodularni (žilavi) lijev – NL
- temper (kovkasti) lijev:
 - CTEL – crni feritni
 - PTEL – crni perlitni
 - BTEL – bijeli.

Ljevovi se mogu sistematizirati na osnovi:

- mehaničkih svojstava: lijevovi dobre istezljivosti i žilavosti (ČL, temper lijev, NL) i krhki lijevovi (SL i bijeli tvrdi lijev)
- tehnološkog postupka dobivanja: kupolka ili elektro peć
- kemijskog sastava – lijevovi s niskim masenim udjelom ugljika
- lijevovi s visokim masenim udjelom ugljika
- podjela s pomoću ekvivalenta ugljika – CE ($CE = C + 1/3 (Si+P)$, %)
- mikrostrukture – vrste kristalizacije: udjeli silicija (grafitizator) i mangana (cementator), kao i uvjeti hlađenja u kalupu određuju mikrostrukturno stanje i svojstva odljevaka.

Ekvivalent ugljika pokazuje gdje se lijev određenog kemijskog sastava nalazi u odnosu prema eutektičkom sastavu u Fe–C dijagramu. Kod lijevova s višim masenim udjelom ugljika

važnu ulogu ima silicij, a kod sivog lijeva i silicij i fosfor. Vrijednosti ekvivalenta ugljika za pojedine vrste lijevova iznose:

- temper lijev, CE od 2,4 % do 3,0 %
- tvrdi lijev, CE od 3,0 % do 3,8 %
- sivi lijev, CE od 3,5 % do 4,5 %
- nodularni lijev, CE od 4,5 % do 5,1 %.

Ljevovi koji sadrže više od 2 % C, a metastabilno su kristalizirani i imaju više od 65 % cementita (karbida), tvrdi su, krhki i teško obradivi. Kod stabilno ili mješovito kristaliziranih lijevova mikrostruktura je dvojna, a sastoji se od željezne osnove (matice) i grafitnih nakupina. Osnova kod nelegiranih željeznih lijevova može biti: feritna, feritno-perlitna, ili perlitna, uz eventualno prisutni slobodni cementit. Grafit se pojavljuje u trima osnovnim oblicima: lističav ili lamelaran (kod sivog lijeva, slika 4.26), kuglast (kod nodularnog lijeva, slika 4.27) i čvorast (kod temper lijeva, slika 4.28).



Slika 4.26 Lističav oblik grafita [25]



Slika 4.27 Kuglasti oblik grafita [25]



Slika 4.28 Čvorast oblik grafita [25]

Osim ova tri osnovna oblika grafita u praksi se postiže i posebni oblik lističavog grafita tzv. „vermikularan“ ili crvičasti grafit. Ovdje je riječ o volumenski izoliranim nakupinama grafita.

Na svojstva lijeva uz vrstu osnove utječu i udio, oblik, veličina i raspodjela grafitnih nakupina.

Stabilno ili mješovito kristalizirani odljevci s grafitom u mikrostrukturi imaju sljedeća **posebna svojstva**: veliku sposobnost prigušenja vibracija, dobra klizna svojstva, dobru tlačnu čvrstoću, dobru obradivost odvajanjem čestica; i **prednosti**: nisko talište, dobru livljivost, mogućnost lijevanja složenih oblika male mase i dobru korozivnu postojanost.

4.3.1 Čelični lijev

Čelični lijev zapravo je rastaljeni čelik koji se nakon lijevanja u kalupe podvrgava samo obradi odvajanjem čestica za razliku od lijevanih čeličnih blokova koji se dalje toplo ili hladno oblikuju (valjanjem ili kovanjem).

Čelični ljev primjenjuje se:

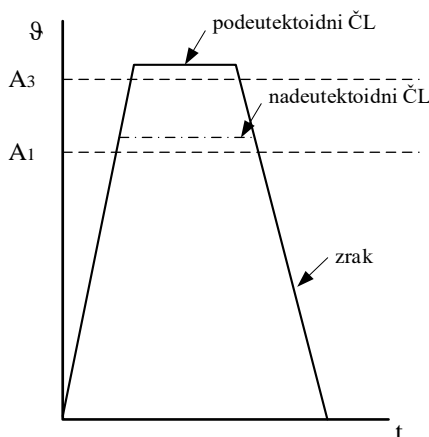
- ako nije dovoljna čvrstoća drugih ljevova
- za najveće dimenzije i mase
- za lijevanje dijelova od kojih se traži povećana otpornost na trošenje, a ne mogu se izraditi na drugi način.

Dijelovi iz čeličnog lijeva skuplji su od sivog, nodularnog ili temper lijeva zbog visokih zahtjeva za čistoćom i točnosti sastava taline, visokog tališta i potrebne naknadne toplinske obrade. Proces lijevanja čeličnog lijeva otežava i svojstvo slabog ispunjavanja kalupa, zbog čega je potrebno visoko pregrijavanje taljevine. Čelični ljev ima veliki faktor toplinskog stezanja (skupljanja), i to 2 % do 2,5 % (linearno) kod nelegiranih vrsta, a do 3 % kod legiranih vrsta čeličnih ljevova (volumenski 10 % do 12 %). Toplinsko stezanje uzrokuje velika zaostala naprezanja (napetosti) i povećava opasnost od stvaranja šušljina (lunkera) i pukotina. Nelegirani i niskolegirani čelici klasificiraju se na temelju vrijednosti vlačne čvrstoće i ostalih mehaničkih svojstava, a kemijski sastav nije zajamčen. Za legirane vrste čeličnog lijeva ne postoji klasifikacija u obliku normi, nego postoje samo preporuke proizvođača.

Kod čeličnih ljevova moguće je legiranjem postići neka posebna svojstva kao što su:

- povećanje žilavosti i vlačne čvrstoće
- povećanje otpornosti pri povišenim temperaturama
- povećanje otpornosti na opću koroziju
- povećanje otpornosti na udarno trošenje
- povećanje otpornosti na djelovanje agresivnih medija
- povećanje vatrootpornosti.

Čelični se ljev nakon lijevanja najčešće podvrgava toplinskoj obradi normalizacije pri čemu dolazi do usitnjenja lijevane mikrostrukture i izjednačenja veličine zrna.

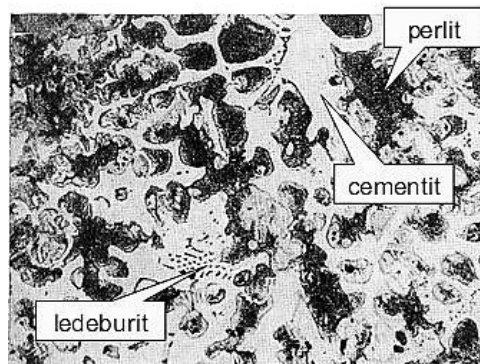


Slika 4.29 Opći dijagram postupka normaliziranja čeličnih odljevaka [45]

Nakon normalizacije odljevci se podvrgavaju žarenju za smanjenje zaostalih naprezanja. Kod posebnih vrsta lijevova provode se i ove vrste toplinske obrade: poboljšavanje (kaljenje i visoko popuštanje), gašenje (hlađenje nakon držanja na visokoj temperaturi), potpuno žarenje (za rad na visokim temperaturama) ili sferoidizacija (stvaranje kuglastog oblika karbida za poboljšanje obradivosti).

4.3.2 Bijeli tvrdi lijev

Bijeli tvrdi lijev dobiva se lijevanjem taljevine u metalnu kokilu ili u mokri pješčani kalup. Povišeni maseni udio mangana kao cementatora pospješuje stvaranje karbida, i to metastabilnom kristalizacijom. Odljevci su tvrdi i krhki, s niskom istezljivošću, ali zato otporni na pritiske i na trošenje. Teško se obrađuje odvajanjem čestica. Uobičajeni kemijski sastav taline za bijeli tvrdi lijev je: od 2,5 % do 3,5 % C, od 3 % do 4 % Mn, manje od 0,6 % Si, manje od 0,9 % P i manje od 0,25 % S. Legiranjem se mogu dobiti posebne vrste bijelog tvrdog lijeva. Jednu skupinu čini vrsta legirana s niklom, a drugu čini vrsta legirana s kromom i molibdenom. Bijeli tvrdi lijev primjenjuje se za odljevke jednostavnijeg oblika koji trebaju biti tvrdi i otporni na abrazijsko trošenje.



Slika 4.30 Mikrostruktura bijelog tvrdog lijeva [46]

4.3.3 Sivi lijev

Sivi se lijev dobiva pretaljivanjem sivog sirovog željeza, starog lomljenog čelika i starog lomljenog lijeva u kupolci. Veći dio ugljika izdvaja se u obliku listića (lamela) grafita, a manji dio je u cementitu, tako da je prijelom presjeka sive boje. Kod sivog lijeva silicij je element koji pospješuje grafitizaciju i kod konačne brzine hlađenja. Kemijski sastav sivog lijeva nije propisan normama, a uobičajeno iznosi:

- od 2,5 % do 4,5 % C
- od 0,3 % do 1,2 % Mn
- od 1 % do 4 % Si

- od 0,4 % do 1,5 % P
- manje od 0,1 % S.

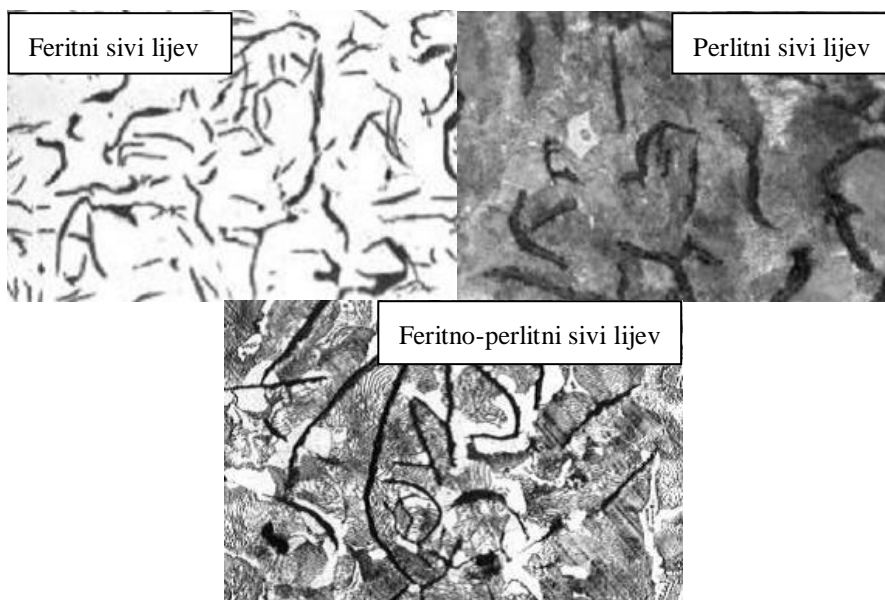
Sivi lijev ovog sastava ne smatra se legiranim lijevom, a Si, Mn, P i S smatraju se primjesama.

Djelovanje osnovnih elemenata sljedeće je:

- silicij je jaki grafitizator koji omogućava stvaranje grafita iako hlađenje nije beskonačno sporo. Za svojstva sivog lijeva važan je omjer udjela silicija i ugljika.
- mangan je jaki cementator. Koristan je jer stvara neškodljivi MnS, a ne štetan FeS.
- fosfor je grafitizator koji u višim udjelima poboljšava livljivost, tj. bolje popunjavanje kalupa kod tanjih debljina stijenki odljevaka. Općenito fosfor je štetan jer smanjuje žilavost.
- sumpor je cementator. Sumpor je štetna primjesa jer SO₂ stvara plinske mjehuriće, FeS stvara tvrde uključke, a dolazi nužno iz koksa i sirovine.

Sivi lijev kristalizira i stabilno i metastabilno. Mikrostruktura sivog lijeva dvojna je i sastoji se od:

- nakupine listića grafita, kao primarna mikrostruktura
- željezne osnove koja može biti feritna, perlitna ili feritno-perlitna, a u strukturi se može pojaviti i slobodni cementit.



Slika 4.31 Mikrostruktura sivog lijeva [46]

Za primjenu sivog lijeva važna su tehnološka, mehanička i ostala svojstva.

- Tehnološka svojstva:
 - moguće lijevanje odljevaka svih masivnosti
 - jednostavnija i jeftinija proizvodnja sivog lijeva nego drugih ljevova
 - livljivost je vrlo dobra (linearno skupljanje oko 1 %)
 - uzak interval skrućivanja i nisko talište s obzirom na približno eutektički sastav
 - dobra obradivost odvajanjem čestica
 - slaba zavarljivost.
- Mehanička svojstva:
 - relativno niska vlačna čvrstoća
 - visoka vlačna čvrstoća (3 do 4 puta veća od R_m)
 - vrlo niska istezljivost
 - slaba žilavost
 - promjenjiv modul elastičnosti ($E = 60.000$ do 155.000 N/mm²), a ovisi o čvrstoći.
- Ostala svojstva:
 - dobra ležišna svojstva, grafit podmazuje i kod prestanka podmazivanja
 - vrlo dobra sposobnost prigušenja vibracija
 - bubrenje (povećanje obujma) na povišenim temperaturama (> 400 °C)
 - otpornost na utjecaj i djelovanje atmosfere.

Tablica 4.10 Klasifikacija i mehanička svojstva normiranih vrsta sivog lijeva [25]

Oznaka lijeva prema EN	R_m , N/mm ² za šipku $\varnothing 30$ mm	R_{ms} , min N/mm ²	Raspon oslonca pri savijanju L , mm
EN-GJL 100S	100...150	-	400, $d = 20$ mm
EN-GJL 150S	150...200	310	400, $d = 20$ mm
EN-GJL 200S	200...250	380	400, $d = 20$ mm
EN-GJL 250S	250...290	450	400, $d = 20$ mm
EN-GJL 290S	290...340	470	400, $d = 20$ mm
EN-GJL 340S	340...390	530	600, $d = 30$ mm
EN-GJL 390S	>390	590	600, $d = 30$ mm

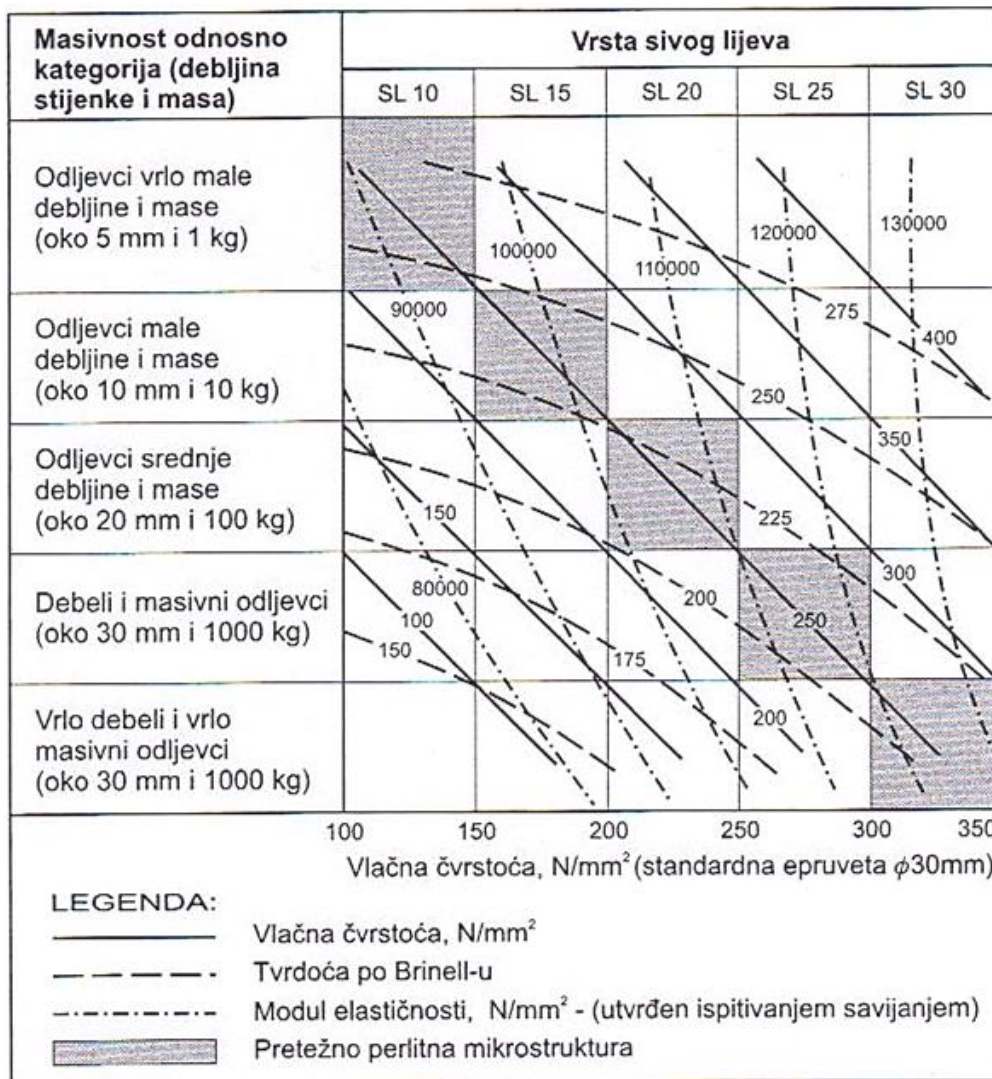
Sivi ljev materijal je koji se može dodatno obraditi postupcima toplinske obrade. Osnovni postupci toplinske obrade sivog lijeva su:

- žarenje za smanjenje zaostalih naprezanja, temperature od 350 °C do 650 °C

- meko žarenje (femitizacija), temperature od 650 °C do 825 °C
- normalizacija, temperature od 800 °C do 950 °C
- poboljšavanje, kaljenje od 800 °C do 900 °C, s gašenjem u ulju i popuštanje na temperaturama od 200 °C do 600 °C.

Uvjeti zakaljivosti sivog lijeva su: $C_{\text{ukupni}} + Si < 4,5 \%$ i $\% C_{\text{vezani}} > 0,5 \%$. Uvjeti zakaljivosti vrijede i za izotermičko i površinsko kaljenje (plameno i indukcijско).

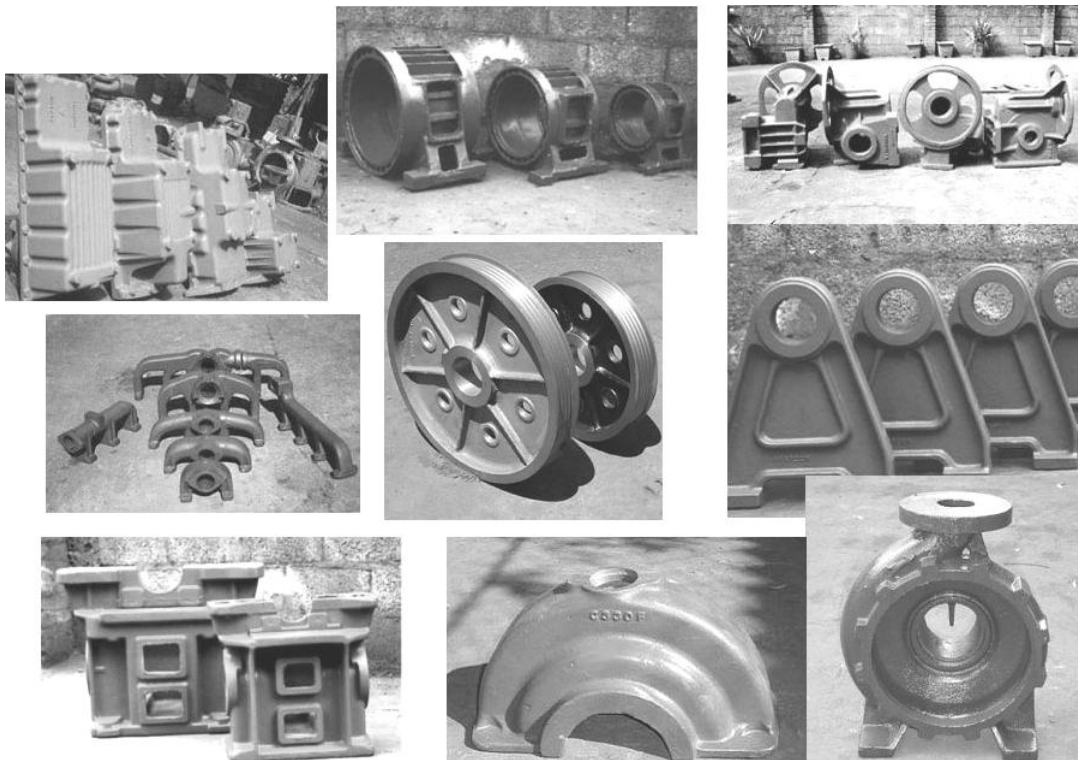
Čvrstoća odljevaka od sivog lijeva ovisi o debljini stijenke. Propisano je ispitivanje vlačne i savojne čvrstoće na ispitnim tijelima (epruvetama) koje su prilivene odljevku ili su posebno odlivene, promjera 30 mm. Sivi lijev kategorizira se na osnovi vrijednosti vlačne čvrstoće dobivene ispitivanjem na posebno odlivenoj epruveti promjera 30 mm. Dijagram koji povezuje mehanička svojstva odljevaka od različitih vrsta sivog lijeva s debljinom stijenke i masom je Collaudov dijagram. Ista vrsta sivog lijeva veće mase i veće masivnosti (debljine stijenke i mase) ima manju čvrstoću, tvrdoću i modul elastičnosti u odnosu na odljevke manje masivnosti. Optimalna vlačna čvrstoća odljevka iznosi 250 N/mm² te prema njoj treba odabrati vrstu sivog lijeva. Iz Collaudova dijagrama mogu se približno odrediti mehanička svojstva odljevaka poznate debljine stijenke, mase i vrste sivog lijeva.



Slika 4.32 Collaudov dijagram [25]

Sivi lijev primjenjuje se za izradu odljevaka različitih dijelova svih masivnosti kao što su:

- postolja alatnih strojeva
- kućišta motora i reduktora
- košuljice cilindara
- stapovi i prstenovi stapova
- klizni ležajevi
- radijatorski članci
- bubnjevi kočnica
- papuče vagnskih kočnica
- kalupi za staklo
- dijelovi poljoprivrednih strojeva.



Slika 4.33 Primjer odljevaka od sivog lijeva [46]

4.3.4 Nodularni lijev

Nodularni (žilavi) lijev dobiva se taljenjem specijalnog sivog sirovog željeza u elektropecima, a taljevina se obrađuje elementima globulatorima koji pomažu izlučivanje grafita u obliku kuglica (nodula). Taljevina se zatim ulijeva u pješčane kalupe. Postupak izrade odljevaka od nodularnog lijeva složeniji je i skuplji nego za druge vrste lijevova. Većina normi prihvatila je sljedeću definiciju: „Nodularni lijev ljevačka je pseudobinarna legura željeza i ugljika koji se pretežnim dijelom izlučio u obliku kuglastog grafita“. Kuglice grafita u lijevu mogu se dobiti tako da se sivi lijev s oko 1 % Si u rastaljenom stanju jako pregrije i naglo ohladi i s legiranjem (cijepljenjem) podeutektičkog sivog lijeva s oko 0,5 % Mg, a nadeutektičkog sivog lijeva s oko 0,5 % Ce (cera).

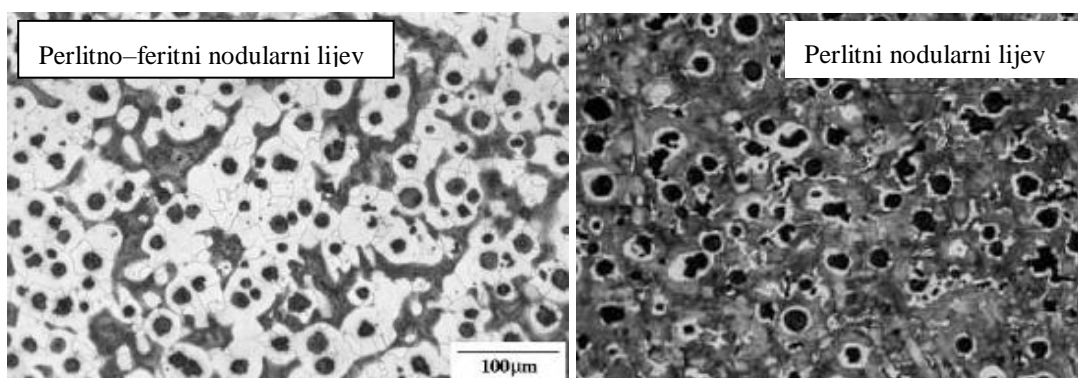
Kemijski sastav nodularnog lijeva je:

- 3,2 % do 3,8 % C
- 2,4 % do 2,8 % Si
- < 0,5 % Mn
- < 0,045 % P
- < 0,01 % S.

Nodularni ljev nadeutekličkog je sastava. Ostali elementi, a posebno antiglobulatori moraju biti u što manjoj količini jer sprečavaju izlučivanje grafita u obliku kuglica. Nepoželjni elementi su: Al, As, Bi, Cd, Pb, Sb, Sn, Te, Ti, Zn.

Mikrostruktura željezne osnove nodularnog lijeva može biti:

- potpuno feritna (ljevovi niže čvrstoće, ali više istezljivosti)
- feritno-perlitna
- perlitna (ljevovi više čvrstoće, ali niže istezljivosti)
- austenitna.



Slika 4.34 Mikrostruktura nodularnog lijeva [46]

Mehanička svojstva nodularnog lijeva bolja su od svojstava sivog lijeva, a slabija od svojstava čeličnog lijeva.

Tablica 4.11 Vrste nodularnog lijeva i propisana mehanička svojstva [25]

Oznaka lijeva prema EN	R_m min N/mm ²	$R_{p0.2}$ N/mm ²	A_5 min %	KU pri +20 °C, J	HB	Mikrostruktura osnove
EN-GJS-370-17SRT	370	230	17	13	< 180	ferit
EN-GJS-400-12S	400	250	12	-	< 200	ferit
EN-GJS-500-7S	500	320	7	-	170...240	ferit + perlit
EN-GJS-600-3S	600	370	3	-	190...270	perlit + ferit
EN-GJS-700-2S	700	420	2	-	230...300	perlit
EN-GJS-800-2S	800	480	2	-	250...350	perlit ili kaljeno

Dinamička izdržljivost i vlačna čvrstoća visoki su, posebno u poboljšanom stanju, i to zbog kuglastog oblika grafita. Modul elastičnosti visok je (oko 180.000 N/mm²). Sposobnost prigušenja vibracija je oko dvaput niža nego kod sivog lijeva, a viša nego kod čelika. Nodularni ljev dobro se obrađuje odvajanjem čestica, može se zavarivati (treba uzeti u obzir povećani udio ugljika). Otpornost na trošenje, koroziju i oksidaciju bolja je nego kod sivog

lijeva. Nodularni lijev ima dobra ležišna svojstva. Mehanička i tribološka svojstva povisuju se klasičnim i izotermičkim poboljšavanjem te površinskim kaljenjem za vrste kod kojih je ispunjen uvjet kaljivosti. Legiranjem nodularnog lijeva mogu se postići posebna svojstva kao što su otpornost na djelovanje agresivnih medija i vatrootpornost.

Nodularni se lijev zbog povoljnih mehaničkih svojstava primjenjuje kao zamjena za čelični lijev iza čelične otkivke srednje i veće masivnosti i za dijelove kao što su:

- koljenaste i bregaste osovine motora
- košuljice cilindara motora i kompresora
- zupčanici
- poklopci kliznih ležajeva
- rotori pumpa
- kućišta pumpa, reduktora .



Slika 4.35 Odljevci od nodularnog lijeva [47, 48, 49, 50, 51]

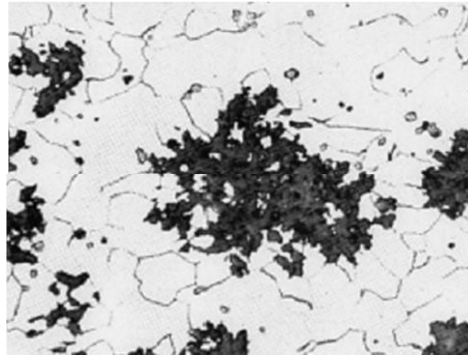
4.3.5 Temper-lijev (kovkasti lijev)

Temper-lijev dobiva se tako da se odljevci bijelog tvrdog lijeva žare „temper-postupkom“ (decementacijsko žarenje) tako da ugljik iz Fe_3C , ili kristalizira u obliku tzv. temper-ugljika, ili se većim dijelom ukloni iz lijeva procesom razugljičenja. Žarenje se provodi kako bi se dobila prikladna uporabna svojstva: niža tvrdoća, veća žilavost, veća kovkost, bolja obradivost.

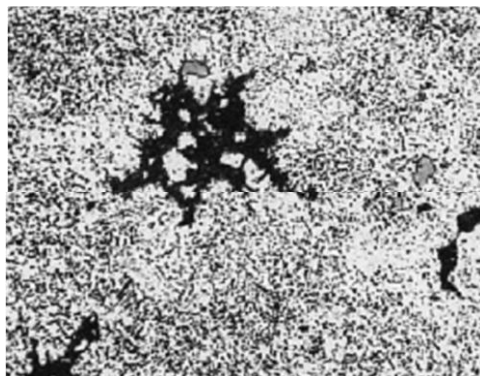
Ovisno o atmosferi u kojoj se provodi žarenje dobiva se:

- **crni** temper-lijev
- **bijeli** temper-lijev.

Crni temper-lijev na prijelomu je sive boje zbog grafita, a dobiva se žarenjem u neutralnoj atmosferi (tzv. američki lijev). Perlitni crni temper-lijev otporniji je na trošenje nego feritni, ali ima manju duktilnost. Primjenjuje se za odljevke male mase kompliciranih oblika kao što su: bubnjevi kočnica vozila, držači kočionih čeljusti, vilice i držači vilica u vozilima i strojevima, cijevne spojnice, dijelovi strojeva, dijelovi vaga, ventili za plin i vodu. Svojstva crnog temper-lijeva su: teško se zavaruje, dobro se lemi, može se površinski zakaliti, bolje je obradiv od bijelog temper-lijeva.

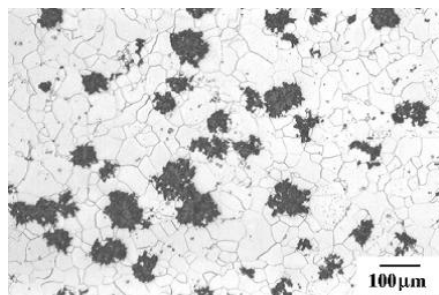


Slika 4.36 Struktura crnog temper-lijeva (kovkastog lijeva) s feritnom osnovom [46]



Slika 4.37 Struktura crnog temper-lijeva (kovkastog lijeva) s perlitnom osnovom [46]

Bijeli temper-lijev na prijelomu je svjetlucavo-srebrnaste boje koja je odraz ferita i perlita, a dobiva se dugotrajnim žarenjem u slabooksidirajućoj atmosferi. Primjenjuje se za izradu ručnog alata (okasti ključevi), cijevnih spojnica, lanaca i dr. Bijeli temper-lijev može se pocinčavati i cementirati, a zavaruje se bez posebne toplinske pripreme.



Slika 4.38 Struktura bijelog temper-lijeva (kovkastog lijeva) [46]

5. NEŽELJEZNI METALI (LAKI I OBOJENI METALI) I LEGURE

Metali se općenito dijele na legure na bazi željeza i na obojene metale. Legurama na bazi željeza pripadaju čelik i ljevovi na bazi željeza, a sve ostale metale općenito nazivamo obojeni metali.

Neželjezni metali najčešće se pojavljuju u karakterističnim bojama, kao čisti metali ili kao legure (slitine). Zbog više cijene od željeznih materijala primjenjuju se kada se od materijala traži:

- osobita plastičnost
- električna vodljivost
- toplinska vodljivost
- antikorozivnost
- nemagnetičnost
- niska gustoća
- mali faktor trenja.

U strojarstvu se uglavnom primjenjuju:

- bakar i njegove legure
- laki metali (aluminij, magnezij, titan i njihove legure)
- ležajne legure.

Skupina metala koju nazivamo obojeni metali dijeli se na:

- teške obojene metale (Pb, Zn, Ni, Co...)
- lake obojene metale (Al, Mg, Li, Be...)
- plemenite obojene metale (Au, Ag, Pt, Ir, Pa).

5.1 Teški obojeni metali

Gustoća teških obojenih metala veća je od 5000 kg/m^3 (3800 kg/m^3).

Najvažniji teški obojeni metali koji se primjenjuju u tehničkoj praksi su: bakar (Cu), Cink (Zn), olovo (Pb), kositar (Sn). U praksi je važna i primjena legura na osnovi nabrojanih teških metala.

5.1.1 Bakar i legure bakra

Bakar je materijal koji se koristi od davnine (brončano doba). Danas se čisti bakar upotrebljava pretežno u elektrotehnici, a kao konstrukcijski materijali u strojogradnji i brodogradnji koriste se uglavnom legura bakra.

Bakar se u prirodi nalazi u obliku spojeva (ruda) i rijetko samorodan.

Najpoznatije rude bakra su:

- halkopirit, CuFeS_2
- halkozin, Cu_2S
- kuprit, Cu_2O
- malahit, CuCo_3
- kovelin, CuS .

Bakar je metal crvene boje izraženog metalnog sjaja, gustoće 8930 kg/m^3 , tališta $1084 \text{ }^\circ\text{C}$, a vrelišta $2310 \text{ }^\circ\text{C}$. Lijevani bakar ima čvrstoću od 140 do 190 N/mm^2 , a valjani od 200 do 280 N/mm^2 . Bakar ima malu tvrdoću. U hladnom i vrućem stanju dobro se oblikuje, teško se lijeva. Nakon srebra bakar je najbolji vodič električne struje i topline te se primjenjuje u elektrotehnici. Na vlažnom zraku presvlači se tankom kožicom zelenoga bazičnoga karbonata – patinom koja ga štiti od daljnje korozije.

Osnovna svojstva bakra su:

- izvrsna električna vodljivost (bolja je od svih metala osim srebra na volumnoj osnovi i aluminijska na masenoj osnovi)
- velika toplinska vodljivost
- svojstva bakra (čvrstoća, otpornost na oksidaciju, otpornost na puzanje, otpornost na umor, otpornost na koroziju i livljivost) mogu se poboljšati legiranjem a da se pritom ne snizuju električna i toplinska vodljivost
- većina bakrenih legura ima izvrsnu duktilnost u žarenom stanju i posebno su pogodne za proizvodnju cijevi, duboko vučenje, kovanje itd.
- dobra otpornost na koroziju u atmosferskim uvjetima i u morskoj sredini (patina).

Tablica 5.1 Fizikalna i mehanička svojstva bakra [25]

gustoća	kg/m ³	8930
talište	°C	1083
modul elastičnosti	N/mm ²	125000
toplinska rastezljivost	10 ⁻⁶ /K	17
električna vodljivost	m/Ωmm ²	35...58
toplinska vodljivost	W/mK	240...386
vlačna čvrstoća*	N/mm ²	200...360
istezljivost*	%	2...45

*ovisno o stanju



Slika 5.1 Dijelovi od bakra [52]

Legure na bazi bakra (bakrove legure)

Klasifikacija legura na bazi bakra provodi se na temelju vrste i udjela glavnih legirnih elemenata, ali svaka vrsta može sadržavati i druge elemente koji imaju znatan utjecaj na specifična svojstva.

Glavne vrste legura označene su tradicionalnim imenima: *mjedi i bronce*.



Slika 5.2 Različiti dijelovi izrađeni od mjedi i bronce [53]

Mjedi su legure bakra s cinkom.

Bronce su legure bakra s kositrom, aluminijem, olovom, berilijem, manganom ili silicijem.

Mjedi

Mjedi su glavne legure bakra s cinkom, najrasprostranjenije su i s vrlo raznolikom primjenom.

Bakrenim legurama s cinkom mogu biti dodani i drugi elementi.

Legure bakra s cinkom (mjedi) možemo svrstati u sljedeće grupe:

- legure bakra samo s cinkom ($> 50\%$ Cu i $< 44\%$ Zn) – mjedi
- posebne mjedi (od 54% do 62% Cu, oko 7% drugih elemenata, ostatak Zn)
- legure bakra s niklom i cinkom (10% do 30% Ni) – novo srebro.

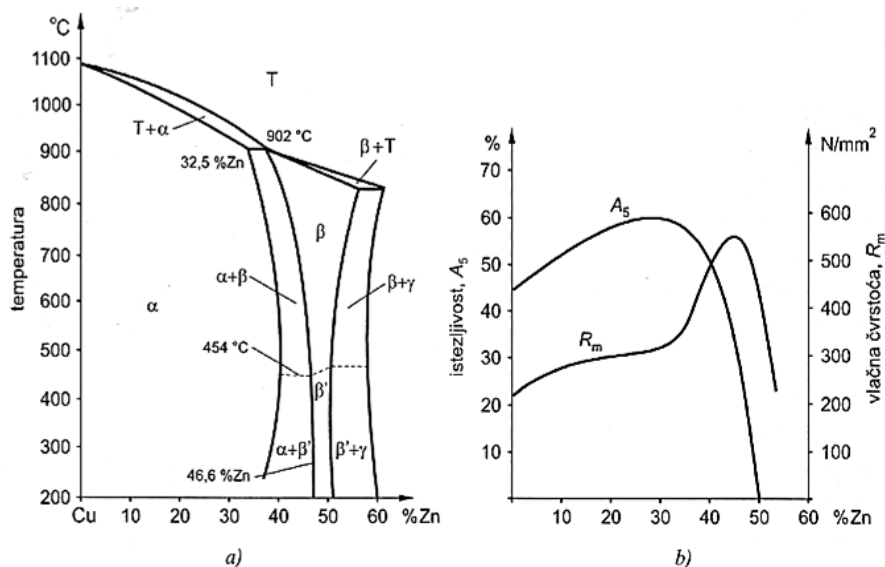
Postoje dvije osnovne vrste mjedi:

- α – mjedi koje su oblikovljive deformiranjem u hladnom stanju
- $(\alpha + \beta)$ mjedi koje su oblikovljive deformiranjem u toplom stanju.

Široka primjena mjedi slijedi na osnovi sljedećih svojstava:

- dobra električna i toplinska vodljivost
- dobra mehanička svojstva
- mogućnost prerade u hladnom i toplom stanju
- postojanost na koroziju.

Veza između mikrostrukture i mehaničkih svojstava može se pratiti usporedbom ravnotežnog dijagrama stanja Cu–Zn i dijagrama u kojem je prikazana ovisnost vlačne čvrstoće i istezljivosti o udjelu cinka (slika 5.3).



Slika 5.3 Dijagram stanja Cu–Zn (a) i prikaz utjecaja cinka na mehanička svojstva (b) [25]

Čvrsta otopina cinka (na peritektičkoj temperaturi od 902 °C bakar otapa do 32,5 % Zn) u bakru označena je kao α . Kod industrijskih brzina ohlađivanja ostaje na sobnoj temperaturi oko 37 % Zn otopljenog u kristalima mješancima bakra.

Kod porasta udjela cinka u leguri iznad 37 % pojavljuje se u strukturi intermetalna faza β' koja je zapravo sređena struktura, a odgovara sastavu Cu-Zn.

β' faza je na sobnoj temperaturi tvrda i žilava.

Zagrijavanjem β' faza na temperature iznad 454 °C prelazi u oblik β koji ima nesređenu strukturu oblikovljivu deformiranjem.

Porast udjela cinka iznad 50 % dovodi do pojave γ -faze koja je vrlo krhka i zbog toga je legura takva sastava nepovoljna za inženjersku primjenu.

Tehničke legure ne sadrže više od 44 % Zn.

Hladno gnječene (α)-mjedi primjenjuju se zbog vrlo dobre duktilnosti koja je maksimalna kod 30 % Zn. Legura mora biti visoke čistoće jer uključci i u vrlo malim količinama znatno smanjuju duktilnost. Hladno oblikovljive α -mjedi osjetljive su na napetosnu koroziju. Smanjenje zaostalih naprezanja može se ukloniti žarenjem pri temperaturama oko 250 °C nakon prerade.

Toplo gnječene ($\alpha+\beta$)-mjedi su legure s više od 37 % Zn i do 60 % Cu i potpuno su oblikovljive toplom preradom. ($\alpha+\beta$)-mjedi oblikuju se u toplom stanju u početnim fazama prerade, dok se hladno oblikovanje primjenjuje samo za dobivanje završnih dimenzija i dovoljnog stupnja očvrnuća za daljnju upotrebu.

Najbolje temperaturno područje za toplu preradu jest između 650 °C i 750 °C, kada je α -faza potpuno apsorbirana u β -fazi.

Za poboljšanje obradivosti obradom odvajanjem čestica ovim legurama dodaje se olovo koje je netopivo u mjedi, a raspoređeno je u mikrostrukturi u obliku kuglica koje uzrokuju lokalni lom za vrijeme rezanja.

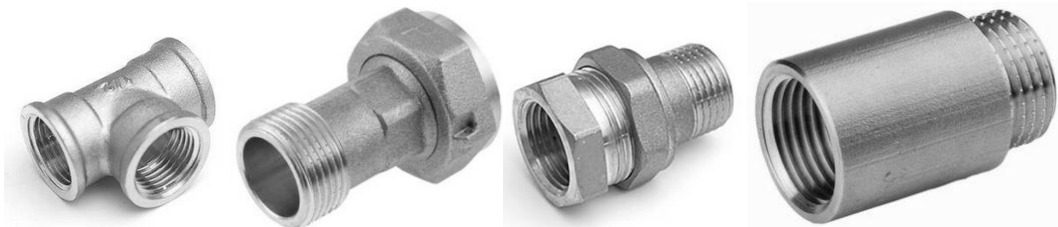
Ova vrsta legura može lokalno korodirati u vodenim otopinama.

Posebne mjedi sadrže od 54 % do 62 % Cu, do 7 % drugih elemenata, dok je ostatak cink. Posebne mjedi toplo su oblikovljive legure, a mogu se primijeniti i u lijevanom stanju.

Legirni elementi poboljšavaju korozijsku postojanost, povećavaju čvrstoću, smanjuju zaostala naprezanja i dr. Uobičajeni legirni elementi u mjedima su sljedeći:

- **Al** povećava čvrstoću, uz istu istezljivost, a na površini stvara oksidni sloj koji štiti mjed od oksidacije i na povišenim temperaturama
- **Ni** povećava čvrstoću, otpornost na koroziju i usitnjuje zrno
- **Fe** usitnjuje zrno i tako povećava čvrstoću
- **Mn** znatno povećava otpornost mjedi na koroziju u morskoj vodi, vodenoj pari, solima i kiselinama, do 4 % Mn nema utjecaja na žilavost
- **Si** smanjuje zaostala naprezanja i povećava žitkost kod zavarivanja stvaranjem topive troske
- **Sn** povećava otpornost na koroziju u morskoj vodi, ali ograničava se na 1 % zbog smanjenja istezljivosti.

Lijevane mjedi sadrže od 36 % do 43 % Zn i od 1 % do 3 % Pb. Posebne mjedi sadrže još i Ni, Al, Fe, Sn i Mn. Zbog uskog intervala skrućivanja ne dolazi do segregacija u zrnu. Lijevane mjedi nisu predviđene za hladno oblikovanje i primjenjuju se u lijevanom stanju.



Slika 5.4 Dijelovi izrađeni od mjedi [54]

Legure bakra s cinkom i niklom legure su s 10 % do 30 % nikla, od 55 % do 63 % bakra i s ostatkom cinka, srebrnaste su boje, a poznate su pod različitim nazivima: *novo srebro, alpaka, argentan, bijeli bakar*...Cink poboljšava livljivost i pojeftinjuje leguru, ali veći sadržaj cinka smanjuje otpornost na koroziju i čvrstoću. Po mehaničkim svojstvima ove legure slične su mjedi, vrlo su duktilne i mogu se hladno oblikovati. Legure bakra s cinkom i niklom koje sadrže i olovo boljih su mehaničkih svojstava od odgovarajućih im mjedi. Upotrebljavaju se u finoj mehanici, optici, graditeljstvu... Ove legure, kao i mjedi, osjetljive su na napetosnu koroziju.

Bronce

Bronca je bila jedna od prvih legura razvijenih od antičkih metalurga. Brončano doba u Europi trajalo je od 2200. do 700. godine prije Krista. Bronca se upotrebljavala za izradu oružja (vrhove koplja i strijela, mačeve i noževe) kao i za izradu umjetničkih predmeta. Izraz

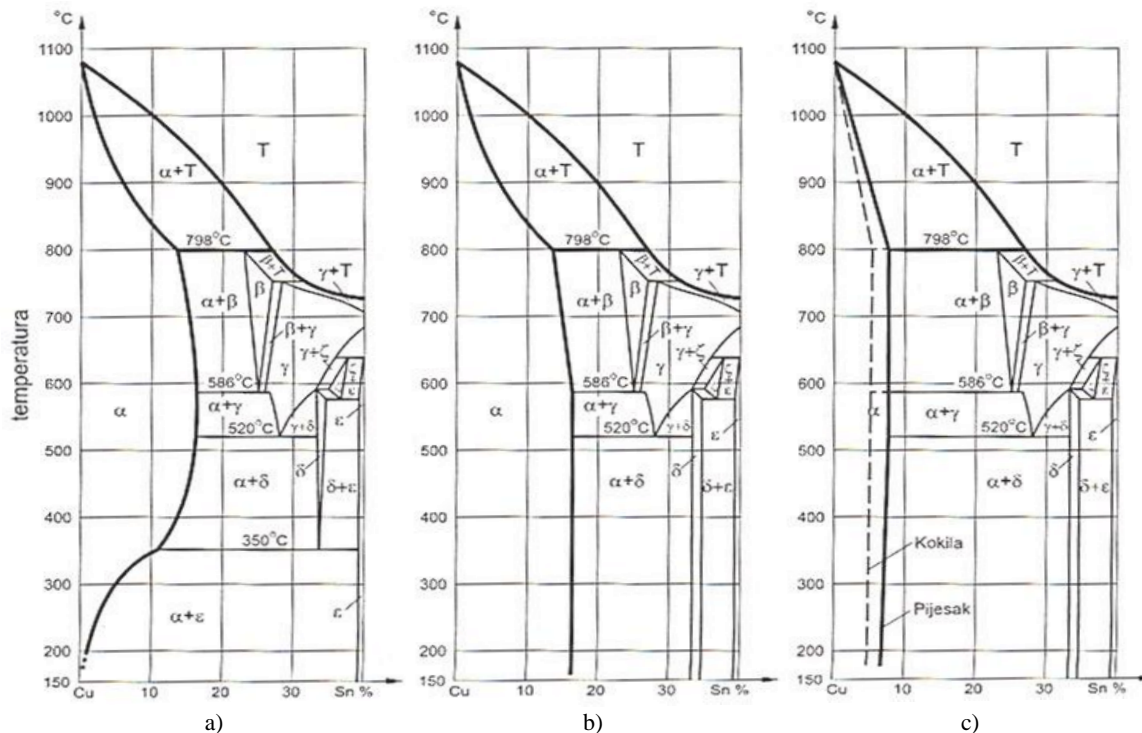
bronca koristi se za mnoge legure bakra koje sadržavaju malo ili nimalo kositra, ali imaju sličnu boju, npr. aluminijska bronca, manganska bronca i silicijska bronca. Legure bakra bez cinka (bronce) možemo svrstati u sljedeće grupe:

- legure bakra s kositrom ($< 15\%$ Sn) – ***kositrene bronce***
- legure bakra s aluminijem ($< 14\%$ Al) – ***aluminijeve bronce***
- legure bakra s kositrom i/ili olovom ($< 10\%$ Sn i/ili $< 25\%$ Pb) – ***olovno-kositrene i olovne bronce***
- legure bakra s berilijem ($< 2\%$ Be) – ***berilijeve bronce***
- legure bakra s manganom te silicijem i manganom – ***manganove i silicijeve bronce***
- legure bakra s niklom ($< 45\%$ Ni).



Slika 5.5 Proizvodi od bronce [55]

Kositrena bronca ima svojstva koja su posljedica njezine mikrostrukture. Veliki je razmak između likvidus i solidus-linije. Mikrostrukturne promjene ispod $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ teku vrlo sporo te lijevane bronce, hladene do sobne temperature u normalnim industrijskim uvjetima, postižu stanje koje ne odgovara ravnotežnom dijagramu, što praktično znači da mikrostruktura nastala hlađenjem do $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ostaje nepromijenjena i na sobnoj temperaturi (slika 5.6). Kod bronce, kao i kod mjedi, **α -faza** je čvrsta otopina (kristal mješanac), žilava i duktilna, tako da se bronca s α -mikrostrukturom može hladno oblikovati deformiranjem. Legure koje sadrže više od 8% Sn su tvrde i krhke, a posljedica su δ -faze (intermetalni spoj sastava $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$). δ -faza ne smije biti prisutna u legurama koje su namijenjene hladnom oblikovanju.



Slika 5.6 Dijagram stanja Cu–Sn: a) ravnotežno stanje, b) žareno stanje, c) lijevano stanje [25]

Gnječene kositrene bronce koriste se za hladno oblikovanje, a sadrže do 7 % Sn, dok se legure s do oko 15 % Sn lijevaju. Žarenjem na oko 700 °C odstranjuje se krhka δ -faza, postiže se ravnoteža u skladu s dijagramom stanja, tj. preostaje samo jednolična α -faza koja omogućava preradu hladnim deformiranjem.

Ljevane kositrene bronce prvenstveno se koriste za izradu kliznih ležaja jer im mikrostruktura potpuno ispunjava uvjete za tu namjenu. Tvrdе čestice δ -faze koja je otporna na trošenje uložene su u matricu koju čini α -faza otporna na udarce. Ljevane bronce sadrže i do 0,05 % P kao posljedicu ostatka fosfora nakon kemijske redukcije. Sadržaj kositra kod lijevanih bronci je do 15 %.

Fosforne bronce one su kojima je fosfor dodan u masenom udjelu od 0,1 % do 1 %. Fosfor poboljšava otpornost na koroziju i smanjuje faktor trenja. Gnječanjem oblikovljive fosforne bronce sadrže do 8 % Sn i do 0,3 % P. Proizvode se u obliku raznih šipki, žice... Ljevane fosforne bronce sadrže do 13 % Sn i do 1 % P. Koriste se za izradu dijelova gdje se zahtijeva nizak faktor trenja uz visoku čvrstoću i žilavost.

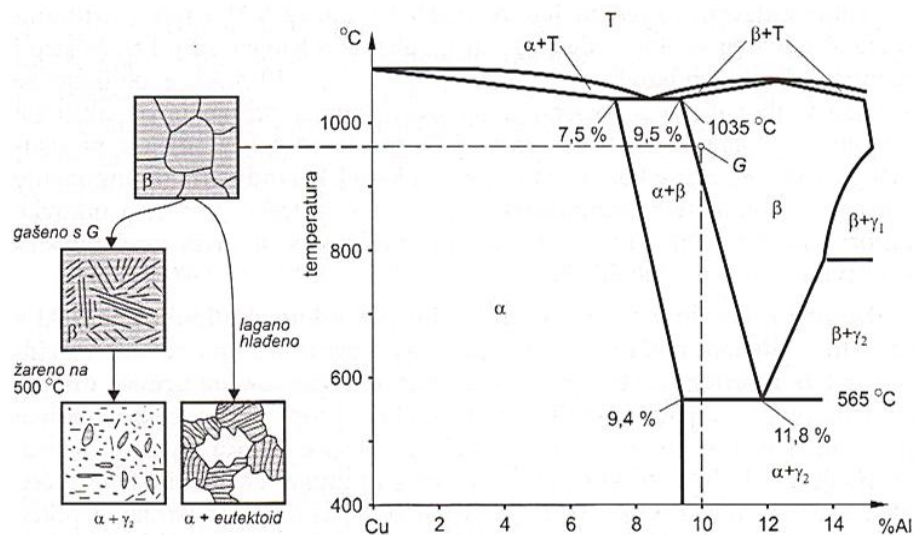
Crveni lijev legura je koja pripada grupi bronci u kojima je skupi kositar djelomično zamijenjen jeftinijim cinkom, pri čemu se mikrostruktura legure ne razlikuje od mikrostrukture čiste kositrene bronce. Kod lijevanih legura cink pospešuje žitkost taljevine čime poboljšava livljivost. Osim cinka ovim legurama dodaje se i od 4 % do 6 % olova.

Koristi se za izradu dijelova strojeva i aparata kada se traži otpornost na koroziju, za ležajeve i dijelove otporne na djelovanje morske vode. Crveni lijev s manjim sadržajem legirnih elemenata može se oblikovati i hladnom deformacijom (gnječenjem).



Slika 5.7 Dijelovi izrađeni od crvenog lijeva [56]

Aluminijeva bronca legura je koju možemo podijeliti u dvije glavne grupe, i to **hladno ili toplo oblikovljive** i **livljive** legure.



Slika 5.8 Dijagram stanja Cu–Al s prikazom mikrostrukturnih promjena legure s 10 % Al [25]

Iz dijagrama stanja vidljivo je da za do 9,4 % Al na sobnoj temperaturi postoji **α -faza**, čvrsta otopina dobre oblikovljivosti. Za više od 9,4 % Al javlja se **γ_2 -faza** koja je intermetalni spoj sastava Cu_9Al_4 , koja je tvrda i krhka, zbog čega je i legura u kojoj je ova faza prisutna tvrda i krhka. Promjena strukture (i svojstava) aluminijeve bronce moguća je toplinskom obradom.

Glavna industrijska primjena aluminijeve bronce proizlazi iz sljedećih značajki:

- sposobnost zadržavanja čvrstoće pri povišenim temperaturama, osobito kada su prisutni određeni legirni elementi

- velika otpornost na oksidaciju pri povišenim temperaturama
- dobra otpornost na koroziju pri uobičajenim temperaturama upotrebe
- dobra otpornost na trošenje
- dopadljiva (zlatna) boja, za primjenu u dekorativne svrhe.

Ozbiljna zapreka široj uporabi aluminijske bronce teškoće su koje se javljaju pri lijevanju zbog jake oksidacije aluminijske bronce na temperaturama lijevanja (iznad 1100 °C). Hladno gnječene Al bronce (α -legure) imaju od 4 % do 8 % Al. Ove su legure visoke čvrstoće s korozijskom postojanošću do oko 300 °C (npr. kondenzatorske cijevi i izmjenjivači topline). Toplo gnječene Al bronce sadrže od 8 % do 10 % Al, a lijevane legure sadrže od 9,5 % do 12 % Al. Legure sadrže i druge elemente (Ni, Fe, Mn). Upotreba ovih legura za izradu je dijelova u pomorskoj tehnici, propeleri (brodski vijci), osovine pumpi, dijelovi ventila, ležaji za teške uvjete rada i za izradu neiskrećeg alata (čekići, dlijeta, kliješta...).

Olovna bronca legura je bakra s olovom, a s olovom i kositrom je olovno-kositrena bronca. Bronca se (kao i mjedima) dodaje do 3 % Pb za poboljšanje rezljivosti. Olovo se dodaje u većim količinama za specijalne namjene (do 25 % za izradu kliznih ležaja). Olovne bronce podnose 20 % veća opterećenja od legura na bazi olova i kositra, a imaju i bolju toplinsku vodljivost uz vrlo dobru otpornost na zaribavanje.

Berilijeva bronca ima od 1,5 % do 2 % Be, a može sadržavati i manji dodatak kobalta ili nikla. Primjenjuje se u hladno gnječenom i toplinski očvrstnutom stanju. Toplinska obrada je vrlo složena i zahtijeva preciznu kontrolu. Berilijeva bronca ima dobru otpornost na trošenje, dobru električnu vodljivost, kemijsku postojanost i nemagnetičnost. Primjenjuje se za izradu opruga kod preciznih alata, alata za lijevanje polimernih materijala i posebno za izradu neiskrećeg alata u čemu je ova bronca bolja od aluminijske bronce.

Manganska bronca otporna je na koroziju u morskoj vodi i ima veliku mogućnost prigušenja vibracija. Namijenjena je za lijevanje, ali može se hladno i toplo oblikovati. Zbog žilavosti ima lošu rezljivost, a nedostatak je i visoka cijena.

Silicijeva bronca uz silicij sadrži mangan, nikel, željezo ili cink. Svojstva ove legure su izvanredna podobnost za hladnu i toplu preradu, dobra korozijska postojanost, osrednja čvrstoća i velika žilavost.

Legure bakra s niklom

Bakar i nikel međusobno su topivi u svim omjerima zbog približno jednake veličine atoma i male razlike u gustoći. Žarenjem legure postiže se stanje jednolične čvrste otopine koja omogućava leguri vrlo dobru oblikovljivost i veliku korozivsku postojanost, uz istodobno povećanje čvrstoće. Dodatkom 1,5 % Fe i 2 % Mn korozivska se postojanost može i povećati. Legure bakra s niklom koriste se za izradu dijelova kondenzatora na brodovima i postrojenjima za demineralizaciju morske vode.

Legura CuNi44 (konstantan) ima veliki električni otpor i malu toplinsku rastezljivost pa se koristi kao materijal za grijaće elemente. Ova legura koristi se i kao materijal za termoelemente (termopar, termočlanak). Ista legura ne može se, na istom uređaju, koristiti za izradu grijaćih elemenata i za izradu termoelemenata.

5.1.2 Nikal i legure nikla

Nikal

Nikal je tehnički zanimljiv zbog svojih fizikalnih, mehaničkih i tehnoloških svojstava, otpornosti na koroziju i utjecaja na svojstva drugih metala. Otpornost na koroziju je gospodarstveno najvažnije svojstvo čistog nikla. Nikal je pravi nosilac otpornosti na koroziju galvanski kromiranih čeličnih izradaka. Nikal je kao zaštitni sloj otporan na atmosferske utjecaje, postojan je u morskoj vodi, neoksidirajućim hladnim kiselinama, lužnatim otopinama i rastaljenim jakim lužinama.

Tablica 5.2 Fizikalna i mehanička svojstva nikla [25]

gustoća	kg/m ³	8900
talište	°C	1453
modul elastičnosti	N/mm ²	210000
toplinska rastezljivost	10 ⁻⁶ /K	13
vlačna čvrstoća*	N/mm ²	380...500
istezljivost*	%	2...60

*ovisno o stanju obrade

Niklove legure

Glavno obilježje legura na bazi nikla je **FCC** kristalna struktura, što u tehničkoj primjeni znači da kod njih ne dolazi do prijelaza iz žilavog u krhki prijelom sa sniženjem temperature. Zbog ovoga svojstva legure na bazi nikla mogu se nazvati žilavim materijalima. Značajka hladne prerade niklovihi legura jest velika brzina hladnog očvrstnuća, zbog čega se

moraju odžarivati tijekom prerade. Niklove legure ponajprije su razvijene zbog svoje otpornosti na koroziju i otpornosti pri visokim temperaturama.

Legure nikla podijeljene su prema legirnim elementima [25]:

- nikal-bakar (Monel)
- nikal-krom (Nimonic)
- nikal-molibden-krom (Hastelloy)
- nikal-krom-željezo (Inconel)
- nikal-željezo-krom (Incoloy)
- nikal-krom+aluminij-titan (superlegura)
- nikal-krom+kobalt-volfram-molibden (superlegura)
- nikal-krom+ugljik (superlegura).

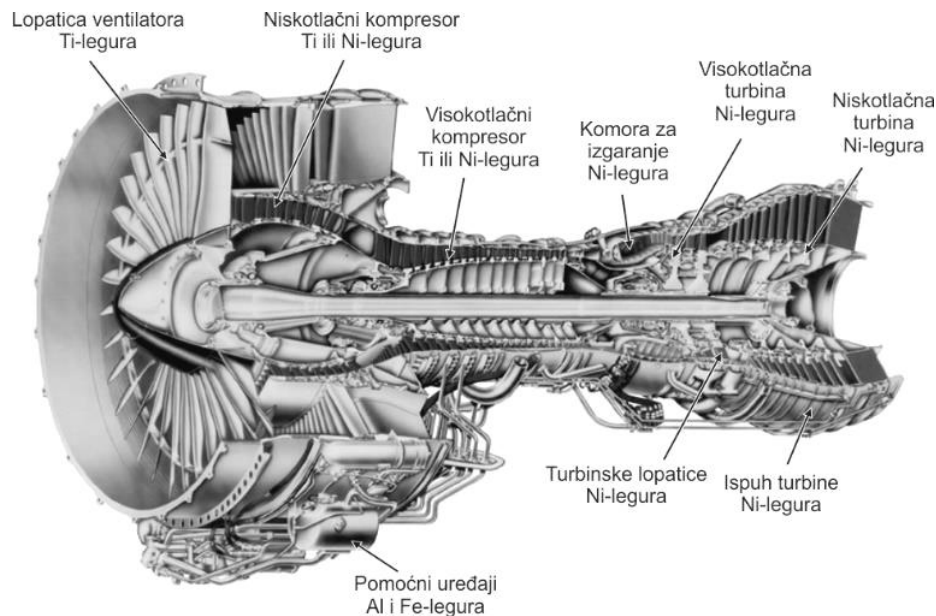
Niklove legure zadržavaju dobru vlačnu čvrstoću i otpornost na puzanje do temperatura $0,7 T_t$ (T_t – talište u K). Posebna svojstva niklovihi legura otkrivena su i upotrebljavana od dvadesetih godina 20. stoljeća. U novije vrijeme razvijene su „pametne“ Ni-Ti legure s izraženim efektom prisjetljivosti oblika (shape memory alloys). „Superlegure“ su višekomponentni sustavi na osnovi nikla i kobalta s visokim udjelima kroma i manjim udjelima molibdena i volframa te titana i aluminija. Ove su legure sposobne za trajan rad do 1100 °C, a za kratkotrajan rad do oko 1400 °C i služe za izradu dijelova:

- turbina
- uređaja u energanama
- postrojenja za proizvodnju nafte i sl.

Deformabilnost i obradivost odvajanjem čestica otežava se s porastom stupnja legiranosti pa se legure s najvišim stupnjem legiranosti pretežno lijevaju.



Slika 5.9 Primjena legure nikla za izradu kovanica [57]



Slika 5.10 Primjena legura nikla u mlaznom motoru [58]

5.1.3 Kobalt i njegove legure

Kobalt se javlja u dvije modifikacije. Skrućuje na 1495 °C kao plošno centrirana β -modifikacija (FCC rešetka) koja kod daljnjeg hlađenja prelazi pri 417 °C u stabilnu heksagonsku α -modifikaciju. Zbog svoje strukturne građe kobalt je dobro toplo oblikovljiv.

Čisti kobalt nevažan je kao konstrukcijski materijal, ali vrlo je važan kao legirni element za proizvodnju trajnih magnetnih materijala, sinteriranih tvrdih metala, materijala za navarivanje otpornih na trošenje, brzoreznih čelika, zubarskih legura i legura za implantate u kirurgiji. Od legura najvažniji su toplinski otporan lijev te kovane i sinterirane legure koje se ubrajaju u grupu superlegura.

Kobaltove legure primjenjuju se za izradu nerotirajućih dijelova kod plinskih turbina i za dijelove mlaznih motora. Dobro su livljive i zavarljive, a uz to su otporne na koroziju i na umor. Taljenje i lijevanje mora se provesti u vakuumu. Superlegure na bazi kobalta preporučuje se upotrebljavati na temperaturama do 1000 °C.



Slika 5.11 Primjer primjene kobaltovih legura [59, 60]

5.2 Laki obojeni metali

5.2.1 Aluminij i njegove legure

Aluminij se u prirodi nalazi u obliku oksida i smjese oksida iz kojih se metal izdvaja elektrolitičkim postupkom, dobiveni sirovi metal se rafinira, čime se omogućava oksidacija većine prisutnih nečistoća.

Nakon usvajanja proizvodnje aluminija sljedeći korak u razvoju bilo je otkriće postupka za povećanje čvrstoće aluminijevih legura precipitacijskim očvršćivanjem.

Tablica 5.3 Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [25]

gustoća	kg/m ³	2700
talište	°C	660
modul elastičnosti	N/mm ²	69000
toplinska rastezljivost	10 ⁻⁶ /K	23,8
električna vodljivost	m/Ωmm ²	36...37,8
granica razvlačenja	N/mm ²	20...120
vlačna čvrstoća*	N/mm ²	40...180
istezljivost*	%	50...4

*ovisno o stanju

Aluminij se kao inženjerski materijal primjenjuje zbog sljedećih svojstava [25]:

1. Povoljan omjer čvrstoće i gustoće (R_m/ρ je tzv. specifična čvrstoća), posebno kada se koristi u obliku neke od svojih legura. Legiranjem i precipitacijskim očvršćivanjem mogu se proizvesti legure koje imaju specifičnu čvrstoću kao i mnogi čelici.
2. Omjer električne vodljivosti i gustoće najpovoljniji je među svim metalima. Zbog toga aluminij istiskuje bakar iz uporabe za prijenos električne energije.
3. Aluminij ima veliki afinitet prema kisiku, a korozivna postojanost ipak mu je relativno velika i na njoj se osniva široka primjena aluminija u graditeljstvu.

Tehnički aluminij

Nelegirani se aluminij koristi uglavnom zbog niske gustoće, korozivne postojanosti i lijepog izgleda. Antikorozivnost aluminija temelji se na postojanju gustog nepropusnog sloja koji se stvara na površini metala na zraku i vodenim otopinama. Oštećeni oksidacijski sloj odmah se nadomješta novim. Aluminij je otporan i na koncentriranu dušičnu kiselinu. Neotporan je na tvari koje razaraju zaštitni oksidni sloj. To su u prvom redu lužine, građevni

mort i građevno vapno. Trgovačke kvalitete sadrže oko 99 % metala. Specijalnim postupcima pročišćavanja može se dobiti aluminij čistoće 99,99 % i više.

Kvaliteta prirodnog oksidnog sloja može se poboljšati postupcima kemijskog fosfatiranja i kromatiranja, ali važniji i značajniji postupak je elektrokemijska oksidacija – *anodizacija*. Anodizacija je postupak podebljanja prirodnog oksidnog filma, a poznata je pod različitim zaštićenim imenima od kojih je jedno eloksiranje. Raznim dodacima elektrolitima, sloj se može i obojiti. Sloj je ravnomjeran, gust i staklasto proziran. Budući da je aluminijev oksid vrlo tvrd, njegovim podebljavanjem povećava se i otpornost na trošenje.

Aluminij ima, uz dobru korozijsku postojanost, i **visoku električnu i toplinsku vodljivost**. Računajući masu za masu, aluminij je bolji vodič od bakra i istiskuje ga iz upotrebe u elektrotehnici ondje gdje ne smeta veći volumen i gdje se ne zahtijeva dobra lemljivost.

Aluminij je metal izvanredno toplo i hladno oblikovljiv deformiranjem (plošno centrirana struktura **FCC**). Isprešavanjem se mogu proizvoditi profili vrlo složenih oblika, a valjanjem se mogu proizvesti folije od samo nekoliko mikrometara (μm) debljine.

Primarni aluminij upotrebljava se samo u gnječenom stanju. Primjenjuje se za aparate, posude i rezervoare u kemijskoj i prehrambenoj industriji, kuhinjsko posuđe, metalne proizvode u širokoj potrošnji, u graditeljstvu, za pakiranje, za izradu električnih vodiča itd.

Budući da je aluminij u čistom stanju relativno mekan s niskom čvrstoćom, to se za inženjersku primjenu u pravilu upotrebljava u legiranom stanju.

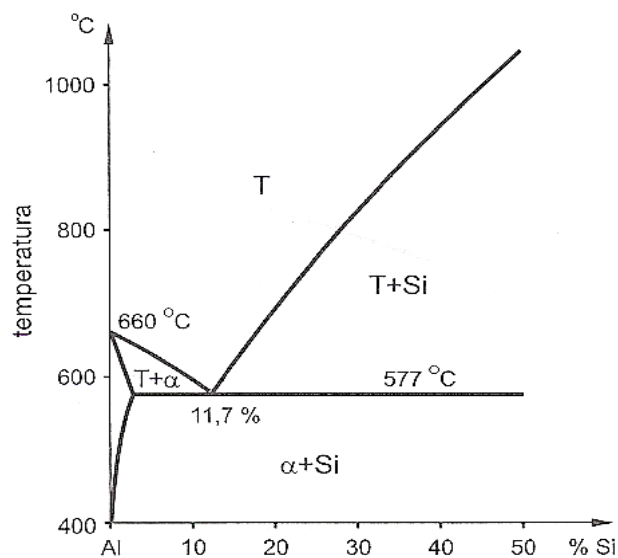
Aluminijeve legure

Legiranje ima za cilj poboljšanje mehaničkih svojstava (vlačne čvrstoće i tvrdoće, krutosti), a katkada i žilavosti ili rezljivosti. Aluminijeve legure upotrebljavaju se i u lijevanom i u gnječenom stanju. Mnogim legurama svojstva se daju poboljšati precipitacijskim očvrstućem. Najvažniji legirni elementi su: bakar, magnezij, silicij, cink i mangan. Kao dodaci ili primjese (nečistoće) prisutni su u manjoj količini željezo, krom i titan.

Dodaci za posebne svrhe su nikal, kobalt, litij, srebro, vanadij, cirkonij, kositar, olovo, kadmij i bizmut. Elementi berilij, bor, natrij i stroncij dodaju se u vrlo malim količinama. Svi su legirni elementi pri dovoljno visokim temperaturama potpuno topivi u rastaljenom aluminiju. Topljivost elemenata ograničena je u kristalima mješancima. Neotopljeni elementi stvaraju vlastite faze ili intermetalne spojeve.

Utjecaj legirnih elemenata na mikrostrukturu prikazuje se dijagramima stanja. Iz dijagrama stanja vidljiv je tijek skrućivanja, nastajanje faza i topljivost u čvrstom stanju u ovisnosti o temperaturi i sastavu. Pri proizvodnji i preradi tehničkih legura ne ostvaruje se termodinamička ravnoteža i zato su moguće razlike između stvarnog stanja u odnosu na ravnotežno stanje prikazano u ravnotežnom dijagramu stanja. Dijagrami stanja aluminijevih legura s najvažnijim legirnim elementima imaju polje eutektičkog tipa, ograničeno polje kristala mješanaca i polje prijelaznih faza.

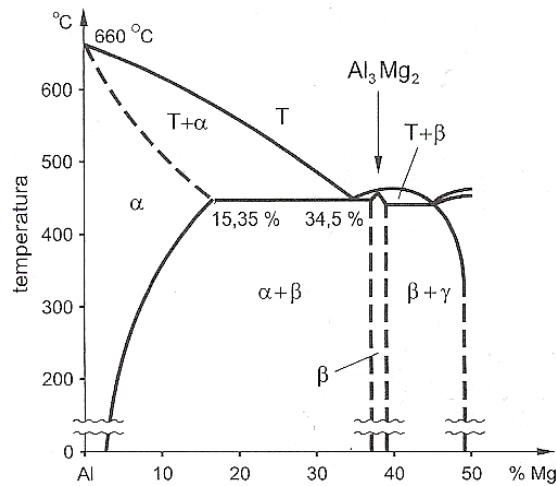
Dijagram stanja aluminij – silicij eutektičkog je tipa s eutektikom pri 11,7 % Si na temperaturi 577 °C. Pri 577 °C se u kristalima mješancima aluminija otapa 1,65 % Si. Eutektik se sastoji od oko 90 % kristala mješanaca aluminija, a ostatak je čisti silicij.



Slika 5.12 Dijagram stanja Al – Si [8]

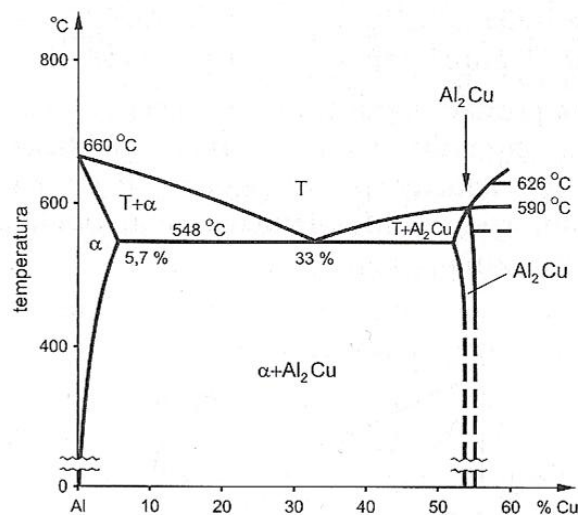
Svojstva legura pretežno ovise o žilavim mješancima aluminija, a manje o krhkom siliciju. Legura aluminija sa silicijem povoljna je za lijevanje jer omogućava dobro popunjavanje kalupa i daje sitnozrnatu mikrostrukturu.

Dijagram stanja aluminij – magnezij pokazuje da aluminij i magnezij tvore intermetalni spoj Al_3Mg_2 (β) kod 37,5 % Mg. To je nepoželjna faza jer je tvrda (i slabo oblikovljiva), a kod djelovanja korozivnog medija prva prelazi u otopinu zbog visokog udjela magnezija. Legure za lijevanje sadrže manje od 15 % Mg (maksimalna topivost magnezija u aluminiju iznosi 15,3 % na eutektičkoj temperaturi 451 °C. Poboljšanje svojstava može se postići toplinskom obradom (gašenje + ponovno žarenje).



Slika 5.13 Dijagram stanja Al – Mg [8]

Dijagram stanja aluminij – bakar pokazuje nastajanje intermetalnog spoja Al_2Cu kod 54 % Cu. Intermetalni spojevi tvrdi su i krhki i kao takvi nepoželjni u tehničkim legurama.



Slika 5.14 Dijagram stanja Al - Cu [8]

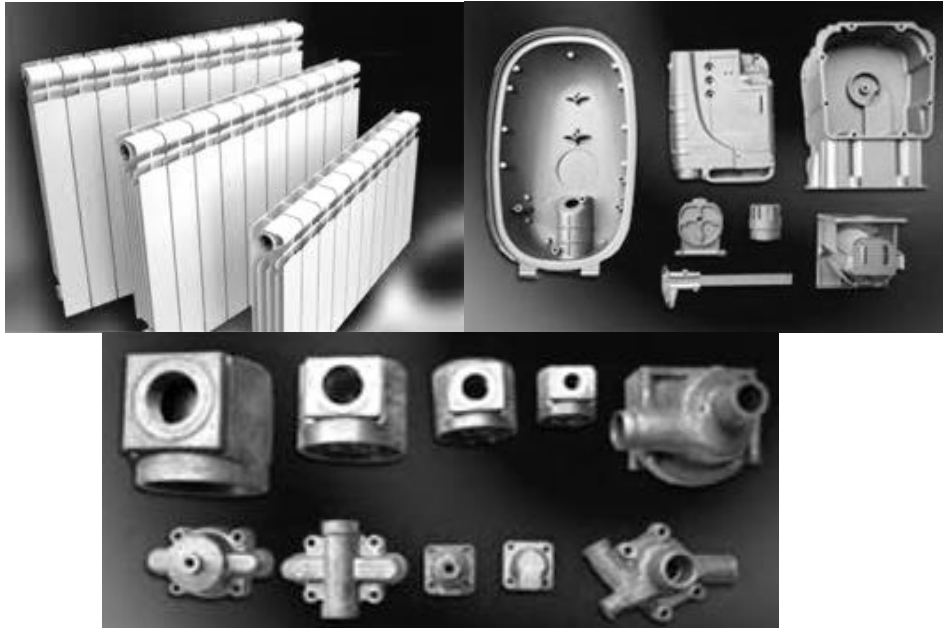
Tehničke legure sadrže oko 4,5 % Cu, što je manje od maksimalne topivosti bakra u aluminiju koja pri eutektičkoj temperaturi 548 °C iznosi 5,7 %.

Padom temperature topivost se i dalje smanjuje i iznosi 0,45 % pri 300 °C, a višak bakra precipitira se u obliku intermetalnog spoja Al_2Cu , što je temeljni preduvjet za toplinsko očvršnuće aluminijevih legura.

Lijevane aluminijeve legure

Prema sastavu mogu se svrstati u tri grupe: **Al-Si**, **Al-Mg** i **Al-Cu** čijom se kombinacijom mogu dobiti legure s poboljšanim nekim od osnovnih svojstava. Aluminijeve legure mogu se jednako dobro lijevati na sva tri načina: u pijesak, u kokilu ili tlačno. Legure

koje nisu namijenjene toplinskom očvršćivanju koriste se za opće namjene. U grupi lijevanih legura najrasprostranjenije su **Al-Si** legure. Sadrže od 10 % do 13 % Si i rijetko malu količinu bakra. Pogodne su za primjenu u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji.



Slika 5.15 Primjeri proizvoda od aluminijskih legura [61]

Al-Mg legure imaju dobru korozivsku postojanost, a može se postići visoki sjaj.

Al-Si-Mg legure odlikuju se dobrom livljivošću i precipitacijski su očvrstive legure.

Al-Cu legure podnose radne temperature do 300 °C, toplinski su očvrstive s osrednje visokom čvrstoćom, dobrom rezljivosti i s najslabijom korozivskom postojanošću od svih aluminijskih legura.

Al-Si-Cu legure imaju dobru žilavost, otporne su na udarce i dobro se obrađuju odvajanjem čestica.

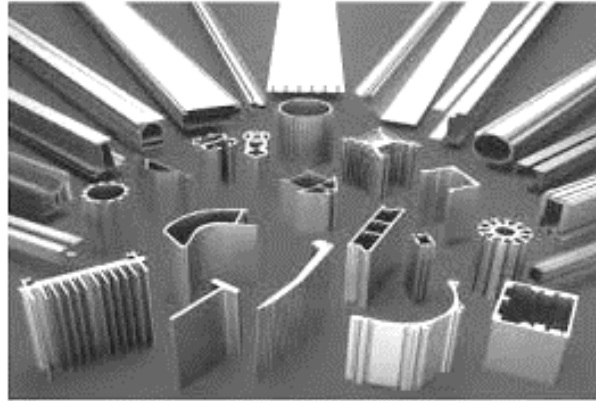
Gnječene aluminijeve legure

Dijele se prema kemijskom sastavu i prema mogućnostima precipitacijskog očvršćivanja. Legure mogu biti očvrstnute **hladnim deformiranjem** (legure s dodatkom mangana i (ili) magnezija) i **precipitacijskim očvršćivanjem**. Osnovu precipitacijski očvrstljivih legura čine legirni elementi: bakar, magnezij, cink i silicij. Precipitacijsko očvršćivanje osnovni je postupak za povećanje čvrstoće i tvrdoće prethodno gnječanih legura.

Od trokomponentnih sustava aluminijevih legura važnisi sustavi aluminij-magnezij-silicij, aluminij-bakar-magnezij, aluminij-cink-magnezij.

Kod trokomponentnog sustava *aluminij-magnezij-silicij* nastaje prijelazna faza Mg_2Si koja se može promatrati kao samostalna legirna komponenta. Ispod eutektičke temperature pada topljivost Mg_2Si u α -kristalu mješancu što dovodi do znatnog očvršnuća uz odgovarajuću toplinsku obradu.

Kao trokomponentne legure koriste se i sustavi **aluminij-bakar-magnezij** i **aluminij-cink-magnezij** koji imaju mogućnost precipitacijskog očvršnuća za postizanje najviših čvrstoća.

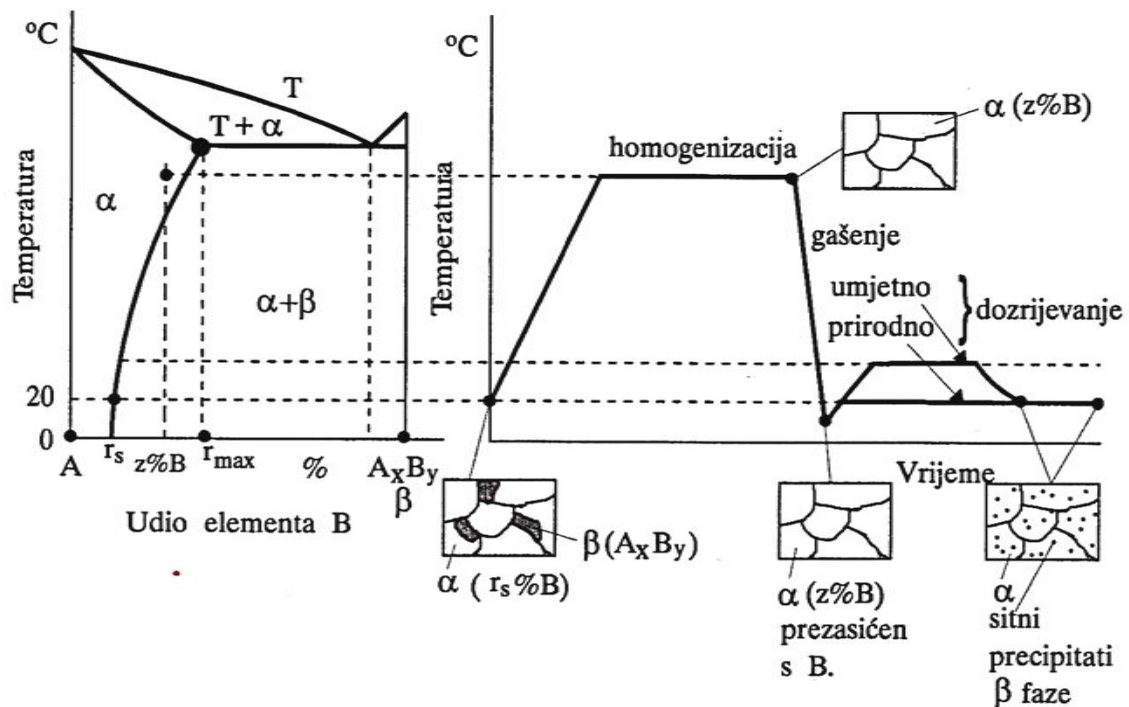


Slika 5.16 Primjeri ekstrudiranih profila od aluminijevih legura [62]

Precipitacijsko očvršnuće aluminijevih legura

Precipitacija – taloženje, stvaranje taloga. Precipitacijsko očvršnuće zajednička je pojava kod velikog broja legura u kojima dolazi do promjene topljivosti nekih konstituenata u osnovnom metalu promjenom temperature, ali najviše se koristi u odgovarajućim aluminijevim legurama. Čvrstoća legura nakon gašenja poraste nakon određenog vremena do svoje maksimalne vrijednosti. Postupak očvršnuća nakon gašenja držanjem legure na temperaturi okoline, nazvan prirodno „dozrijevanje“, može se ubrzati i tako postići veće čvrstoće ako se gašena legura zagrijava do temperature od oko 180 °C (slika 5.17). Takva obrada prvobitno je nazvana očvršćenje umjetnim dozrijevanjem, a danas se koristi pojam „*precipitacijsko očvršćivanje*“ ili „*precipitacijsko otvrdnjavanje*“.

Precipitacijsko očvršćivanje može se primijeniti na legure pogodnog sastava u kojima se mijenja topivost legirnih elemenata s temperaturom. Osim kod legura na bazi aluminija, precipitacijsko očvršćivanje koristi se i kod legura na osnovi magnezija, titana, nekih legura bakra i određenih vrsta čelika. Zagrijavanje legure ubrzava precipitacijsko očvršnuće, a pothlađivanje usporava proces, što omogućava vremensko planiranje nastanka očvršnuća (npr. kod zakovica). Precipitacijski očvršnute aluminijske legure koriste se za izradu cijevi, šipki, limova, traka u zrakoplovstvu.



Slika 5.17 Prikaz općeg postupka precipitacijskog očvršćavanja [11]



Slika 5.18 Primjer primjene precipitacijski očvršnutog aluminija u zrakoplovstvu [63]

Sekundarni aluminij

Zbog velikog utroška energije pri proizvodnji aluminija, a i iz ekoloških razloga, nastoji se u što je moguće većoj mjeri iskoristiti otpadni materijal, odnosno materijal koji je već bio u upotrebi, otpaci od primarne proizvodnje i strugotina od obrade. Pretaljivanjem ovoga materijala dobiva se tzv. *sekundarni aluminij* koji se pretežno koristi za izradu odljevaka. Sekundarni aluminij nepovoljan je kada se od materijala očekuju dobra električna vodljivost i antikorozivnost zbog onečišćenja sekundarnog aluminija.

5.2.2 Titan i njegove legure

Titan se ubraja u vrlo raširene elemente. U zemljinoj kori ima ga oko 0,7 %. Titan je prvi put proizveden 1825. god. U prirodi se nalazi kao rutil (TiO_2) i ilmenit (FeTiO_3). Industrijska proizvodnja počela je nakon II. svjetskog rata kad se spoznalo da je titan zbog svoje male gustoće, visokog tališta i dobrih mehaničkih svojstava metal dobar za svemirska istraživanja.

Tablica 5.4 Fizikalna i mehanička svojstva titana [25]

gustoća	kg/m ³	4500
talište	°C	1670
modul elastičnosti	N/mm ²	110000
toplinska rastezljivost	10 ⁻⁶ /K	9
vlačna čvrstoća*	N/mm ²	250...700
istezljivost*	%	>10

*ovisno o stanju obrade i udjelu nečistoća

Postupak dobivanja titana i njegovih legura odvija se u nekoliko faza. Titan i njegove legure zbog povoljnog omjera čvrstoće i gustoće u temperaturnom području od -200 °C do +550 °C u prednosti su pred drugim inženjerskim materijalima. Titan i njegove legure imaju znatnu otpornost na umor i puzanje, imaju malu toplinsku rastezljivost i veliku postojanost u različitim agresivnim sredinama. Upotrebu titana ograničavaju i dalje vrlo visoki troškovi proizvodnje.

Tehnički titan legura je titana s elementima koji tvore uključinske kristale mješance (kisik, vodik, dušik, ugljik) i željezom. Sitni dijelovi moraju se toplinski obrađivati u vakuumu ili zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Vrste tehničkog titana niže čvrstoće koriste se prvenstveno kada se traži otpornost na koroziju i oblikovljivost. Sve vrste dobro su zavarive pod zaštitnim plinom ili u vakuumu. Titan je teško obradiv odvajanjem čestica jer je žilav, a postoji i opasnost od zapaljenja strugotine.

Titan i njegove legure dokazano su tehnički superioran konstrukcijski materijal. Glavna je njihova prednost što su vrlo čvrste, imaju malu gustoću, otporne su na koroziju i kompatibilne s novim kompozitnim materijalima. Nedostatak je visoka cijena (10 do 20 puta viša u odnosu na aluminij). Zbog svega navedenog najviše se koriste u zrakoplovnoj industriji (99 %) i proizvodnji različitih projektila [64].

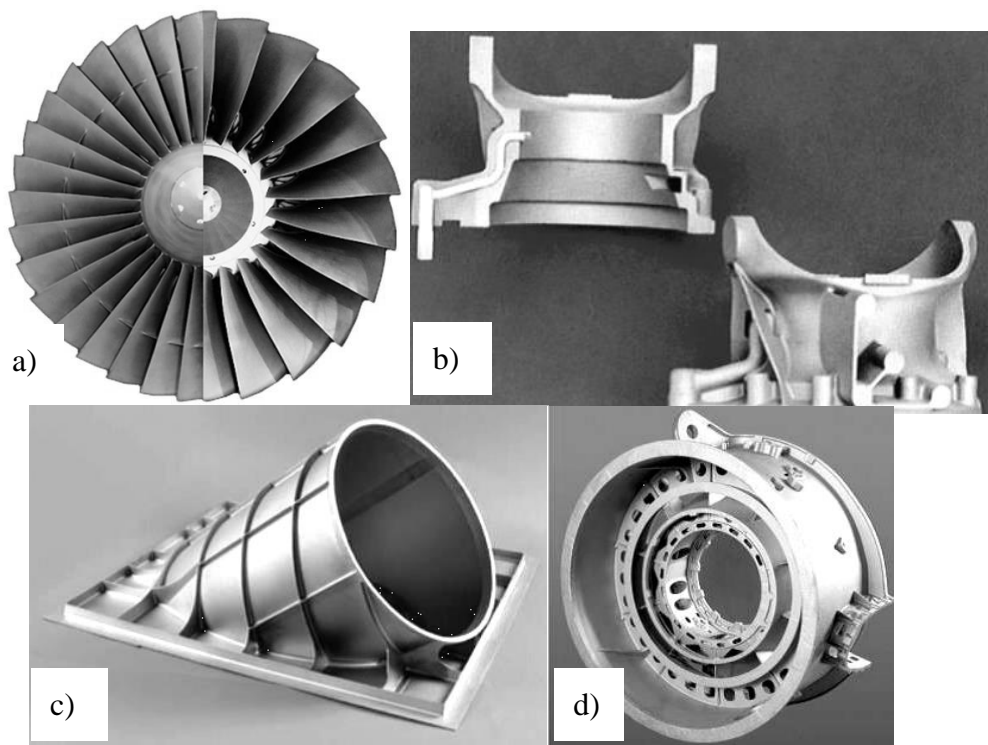
Titanove legure se prema djelovanju legirnih elemenata na α/β prekristalizaciju dijele prema mikrostrukturi na **α -legure**, **β -legure** i **$(\alpha+\beta)$ -legure**. Legirni elementi za titanove

legure su aluminij, kositar, vanadij, krom željezo... Titanove legure koriste se u kovanom i lijevanom stanju.

Ti-legure u zrakoplovnim konstrukcijama često supstituiraju čelik i Ni-legure jer njihova primjena rezultira smanjenjem mase u slučaju visokooterećenih dijelova izloženih niskim i povišenim temperaturama. Široka upotreba titana započela je primjenom u prvim svemirskim letjelicama, nakon čega se nastavila u vojne svrhe, a danas se uspješno upotrebljavai u izradi civilnih zrakoplova. Od ovih legura izrađuju se lopatice kompresora i ventilatora, mlaznice, glavine, kućišta, ali i drugi dinamički visokooterećeni elementi, proizvedeni tehnologijom preciznog lijevanja posebice kada je riječ o tankostijenim, velikim i geometrijski složenim dijelovima. Zahvaljujući visokoj čvrstoći i maloj gustoći te dobroj otpornosti na pojavu loma danas se Ti-legure upotrebljavaju za izradu komponenata kao što su ventili, opruge ventila, spojnice i okviri u automobilskoj industriji. Titan je poznat po otpornosti na koroziju u morskoj vodi. Zbog toga se njegove legure sve više primjenjuju u brodogradnji, prvenstveno za vojne brodove i podmornice. Titan i njegove legure visoke čvrstoće, relativno niskog modula elastičnosti te odlične biokompatibilnosti široko su primjenjive za izradu zubnih implantata, vijaka, operacijskog pribora i cijelog niza drugih medicinskih pomagala. Otpornost na atmosfersku koroziju, visoka čvrstoća i mala masa čine Ti i njegove legure vrlo privlačnim materijalom za arhitektonske primjene. Upotrebljava se za izradu unutarnjih i vanjskih obloga, krovova, oplata, zaštitnih obloga za stupove, spomenike i skulpture. Ti-legura TiAl3V2,5 upotrebljava se za izradu palica za golf, okvira za rekete, bicikala, palica za kriket i hokej, pribora za ribolov i to zahvaljujući dobrom odnosu čvrstoće i mase, dobroj korozijskoj postojanosti i niskom modulu elastičnosti [64].



Slika 5.19 Primjena titana za izradu zubnih implantata [64]



Slika 5.20 Primjeri primjene Ti-legura: a) lopatice ventilatora, b) precizno lijevani dijelovi, c) precizno lijevana ispušna cijev pomoćnog sustava napajanja, d) precizno lijevano kućište ventilatora plinske turbine [65]

5.2.3 Magnezij i njegove legure

Magnezij i njegove legure imaju najmanju gustoću među svim tehnički zanimljivim legurama. Čisti magnezij ima nisku čvrstoću te se zbog toga kao konstrukcijski materijali primjenjuju samo njegove legure. Magnezij se koristi kao legirni dodatak za proizvodnju drugih legura (aluminijevih). Razvoj magnezijevih legura danas je usmjeren na primjenu u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji. Talište magnezija je na 649 °C, a vrelište na 1097 °C i lako je zapaljiv.

Tablica 5.5 Fizikalna i mehanička svojstva magnezija [25]

gustoća	kg/m ³	1740
talište	°C	649
modul elastičnosti	N/mm ²	45100
toplinska rastezljivost	10 ⁻⁶ /K	25
vlačna čvrstoća*	N/mm ²	80...180
istezljivost*	%	1...12

*ovisno o stanju obrade

Prednosti magnezijevih legura su [25]:

- mala masa, povoljan omjer čvrstoća/gustoća u odnosu na aluminij

- velika sposobnost prigušenja vibracija
- izvanredna rezljivost s obzirom na količinu obrađenog metala i trošenje alata
- vrlo dobra livljivost nekih legura koje su posebno namijenjene za tlačni lijev uz veliku proizvodnost
- inertnost prema čeličnim kalupima zbog čega je manje trošenje i smanjeno naljepljivanje u odnosu na aluminij
- primjenjuju se u lijevanom (pješčani, kokilni, centrifugalni, tlačni i precizni lijev), kovanom, ekstrudiranom i valjanom stanju.

Nedostaci magnezijevih legura su [25]:

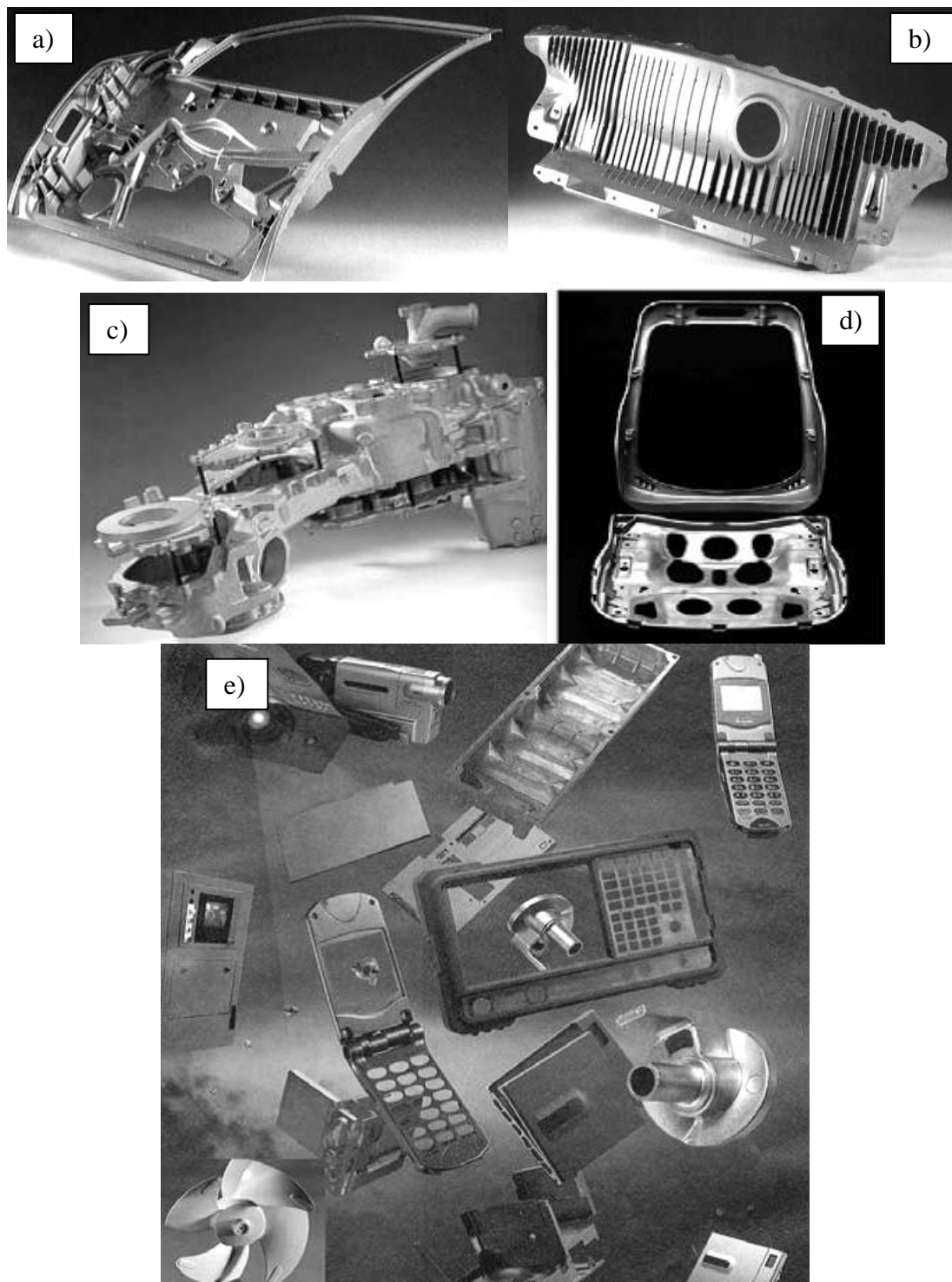
- slaba otpornost na koroziju (otpornost na koroziju manja od aluminijevih i titanovih legura)
- strogo ograničena mogućnost hladne obrade deformiranjem zbog HCP strukture magnezija
- nizak modul elastičnosti (45.000 N/mm^2)
- gornja temperaturna granica upotrebe je $300 \dots 350 \text{ }^\circ\text{C}$.

Magnezijeve legure mogu se oblikovati deformiranjem pri povišenim temperaturama, obično iznad $300 \text{ }^\circ\text{C}$, ali istežljivost je niža u usporedbi s aluminijem. Ekstruzija je najčešći postupak obrade magnezijevih legura.

Tablica 5.6 Mehanička svojstva dviju vrsta magnezijevih legura [25]

Vrsta legure	Oblik	$R_{p0,2}$ N/mm^2	R_m N/mm^2	A_5 %
G-MgAl9Zn1	pješčani lijev kokilni lijev tlačni lijev	90*	170*	3
MgAl6Zn	limovi šipke otkovci	160	260	8

*rastvorno žareno



Slika 5.21 Primjena magnezijevih legura: a) automobilska vrata, b) poklopac spremnika za gorivo, c) tlačni odljevak za borbeni zrakoplov, d) sjedalo u F1 i u ostalim vozilima, e) tankostijeni dijelovi oblikovani istiskivanjem u poluskrućenom stanju [66]

6. SINTERIRANI MATERIJALI

6.1 Postupak sinteriranja

Sinteriranje je postupak spajanja čestica praha u čvrstom stanju. Kod sustava s više komponenata mogu nastupiti tekuće faze, ali barem jedna komponenta mora ostati barem djelomično nerastaljena. Sinteriranjem se proizvode materijali od sastojaka koji se drugim tehnološkim postupcima ne daju spajati ili se spajaju vrlo teško. Mješavina sastojaka u obliku prašine najprije se stlači, hladno ili vruće, visokim tlakom od 100 do 1000 MPa u konačni oblik, a zatim se pri visokim temperaturama sinterira (difuzijski stopi). Mehanička su svojstva proizvoda dobivenih ovim postupkom uglavnom jednaka, a u nekim slučajevima i bolja od proizvoda istog kemijskog sastava koji su izrađeni obradom odvajanjem čestica, valjanjem ili kovanjem. Prednosti su sinteriranih proizvoda što se po volji može birati zrnatost, vrsta i udio tvrdih čestica kao nosilaca otpornosti na trošenje te sastav i strukturno stanje osnovne mase kao nositelja žilavosti i vezivnog materijala za uležištenje tvrdih čestica. Kod sinteriranih materijala ne može se govoriti o leguri, nego o smjesi. Prednost u proizvodnji dijelova očituje se u štednji obrade odvajanjem čestica sinteriranog proizvodana gotovo završni oblik, što ima najveći utjecaj u proizvodnji velikog broja proizvoda jednakih dimenzija. Sinterirani su metali prikladni i za dodatnu obradu termokemijskim postupcima i prevlačenjem. Glavni nedostatak svih sinteriranih metala njihova je visoka krhkost. Kompletan postupak proizvodnje dijelova naziva se i „metalurgija praha“.

Temperature sinteriranja su za:

- legure bakra od 600 °C do 800 °C
- legure željeza od 1000 °C do 1300 °C
- karbide volframa, molibdena, tantala od 1400 °C do 1600 °C
- za molibden, volfram, tantal i dr. od 2000 °C do 2900 °C.

Veličinom zrna sastojaka, tlakom i temperaturom sintetiziranja postiže se željena poroznost koja je za:

- filtre do 60 %
- klizne ležajeve do 30 %
- strojne dijelove od 15 % do 20 %
- vrlo čvrste strojne dijelove do 5 %.

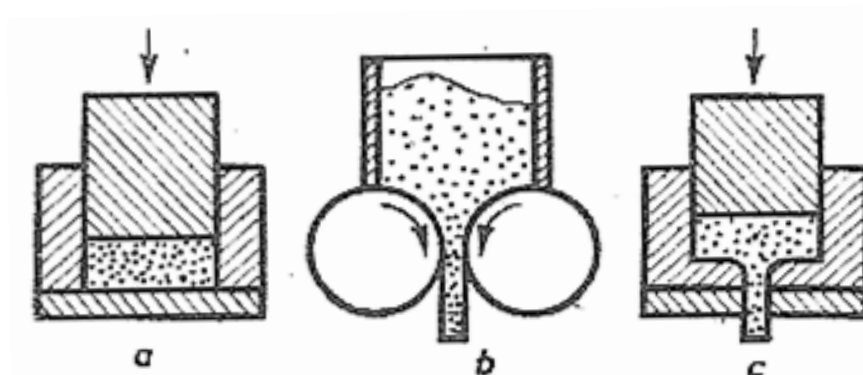
Glavna sirovina je prah različitog sastava, čistoće, oblika i veličine čestica. Prema kemijskom sastavu to je prah od metala, legura, metalnih spojeva ili od nemetala. Prah može biti različitog oblika: u obliku kuglica, pahuljica, ljuskica ili iglica. Prema veličini razlikujemo:

- vrlo grubi prah, veličine čestica do 1 mm
- grubi prah, veličine čestica oko 0,1 mm,
- sitan prah, veličine čestica oko 0,01 mm
- vrlo sitan prah, veličine čestica 0,0001 do 0,001 mm.



Slika 6.1 Oblici i grada čestica praha za sinteriranje [67]

Zgušćivanje praha može biti prešanjem valjanjem i istiskivanjem.



Slika 6.2 Zgušćivanje praha: a) prešanjem, b) valjanjem, c) istiskivanjem [68]

Kod praha treba razlikovati stvarnu gustoću praha (masu neto volumena čestica praha) i volumnu gustoću (masu bruto volumena nasutih čestica praha). Faktor pakiranja pokazatelj je omjera volumnu i stvarne gustoće praha.

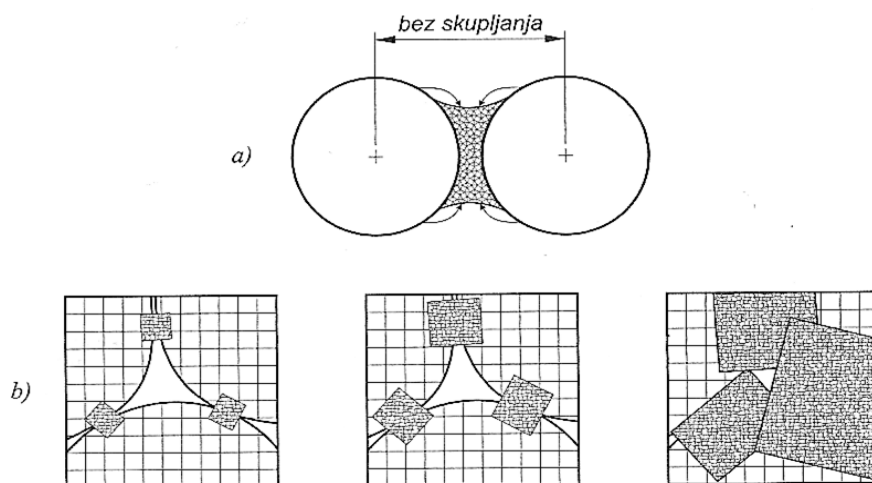
$$\text{faktor pakiranja} = \text{volumna gustoća} / \text{stvarna gustoća} < 1$$

Poroznost je omjer volumena pora (praznih prostora) prema ukupnom volumenu.

$$\text{poroznost} + \text{faktor pakiranja} = 1$$

Elementarni prahovi sadrže samo jedan element. Smjese se koriste za dobivanje specijalnih materijala (npr. alatni čelici), a predlegirani prahovi koriste se kod legura čiji je sastav teško dobiti miješanjem čestica većeg broja elementarnih prahova.

Sinteriranje (hrv. srašćivanje) je spajanje čestica koje može uslijediti na temperaturi ispod temperature tališta (oko $2/3 T_l$). Postupak sinteriranja praha sastoji se od spajanja zrnaca stvaranjem „vrata“ na mjestu kontakta i od smanjenja poroznosti.



Slika 6.3 Sinteriranje praha: a) spajanje dvaju zrnaca, b) smanjenje poroznosti [25]

Za sinteriranje se obično upotrebljavaju električne prolazne peći. Otpresci složeni u ladice na jednoj strani umeću se u peć, prolaze kroz nju i vade se na drugoj strani kao sinterirani. Pri izlazu iz peći nalazi se komora za hlađenje. Koriste se vakuumske peći ili peći sa zaštitnom atmosferom radi sprečavanja oksidacije.

6.2 Sinterirani dijelovi i alati

Postupkom sinteriranja proizvode se različiti konstrukcijski dijelovi i alati:

- dijelovi od metala s visokim talištem
- strojni dijelovi
- klizni materijali
- tarni materijali
- porozni materijali
- materijali za električne kontakte

- alati od tvrdog metala
- alati od alatne keramike.

Dijelovi od metala s visokim talištem

Metali s visokim talištem bili su prvi proizvodi metalurgije praha jer visoka temperatura taljenja nije omogućavala proizvodnju dijelova taljenjem. Postupci metalurgije praha zbog relativno niskih temperatura obrade pogodovali su ovom načinu proizvodnje i zato što su ovi metali skloni spajanju s plinovima i pri višim temperaturama nisu postojani na zraku. Volfram se najviše upotrebljava za izradu niti za električne žarulje i za elektrode za zavarivanje (TIG) te za proizvodnju radiocijevi i grijaćih tijela za električne peći. Molibden se najviše primjenjuje za izradu lima i žice za elektronske cijevi i za elemente za grijaća tijela u električnim pećima. Legiran s titanom, niobijem ili vanadijem ima nekoliko puta veću čvrstoću pri povišenim temperaturama (do 1000 °C) nego čisti molibden. Tantal i niobij veoma su otporni na djelovanje kiselina i drugih kemikalija. Tantal služi za izradu posuda, grijača i hladnjaka u kemijskoj industriji. Legure tantala koriste se i za izradu mlaznica raketnih motora.

Strojni dijelovi

Dijelovi od željeza i čelika manjih dimenzija, složenih oblika (poluge, zupčanici, spojke...) najmasovniji su dijelovi proizvedeni postupkom metalurgije praha. Tolerancije izrade su $\pm 0,2$ mm, a kod kalibriranih dijelova odstupanja se mjere i u tisućinkama milimetra.

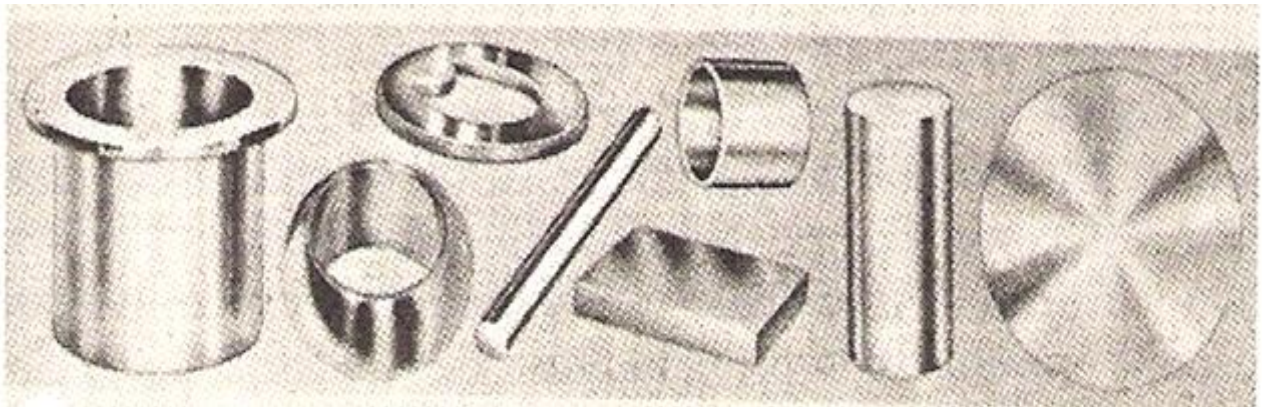


Slika 6.4 Strojni dijelovi proizvedeni sinteriranjem [69]

Dijelovi od aluminijske i magnezijске i njihovih legura, sve se više proizvode postupcima sinteriranja, pogotovo postupcima vrućeg prešanja čime se postiže povećanje čvrstoće. Sinterirani materijali imaju višu čvrstoću na povišenim temperaturama nego lijevani. Dijelovi od mjedi proizvode se sinteriranjem kada se traži žilavost i otpornost prema koroziji.

Klizni materijali

Sinterirani klizni materijali su porozni, a pore se ispunjavaju odgovarajućim mazivom, npr. uljem, parafinom, grafitom ili sl. Osnova materijala može biti čelik, bakar ili kositar. Poroznost dostiže i do 35 %. Postupci metalurgije praha pogoduju proizvodnji kliznih ležaja, što potvrđuje primjer klipnih prstena kod kojih je vijek trajanja motora produžen dvostruko, gdje je postignuta poroznost omogućila taloženje ulja za podmazivanje.



Slika 6.5 Samopodmazujući ležaji proizvedeni postupkom sinteriranja [69]

Tarni materijali

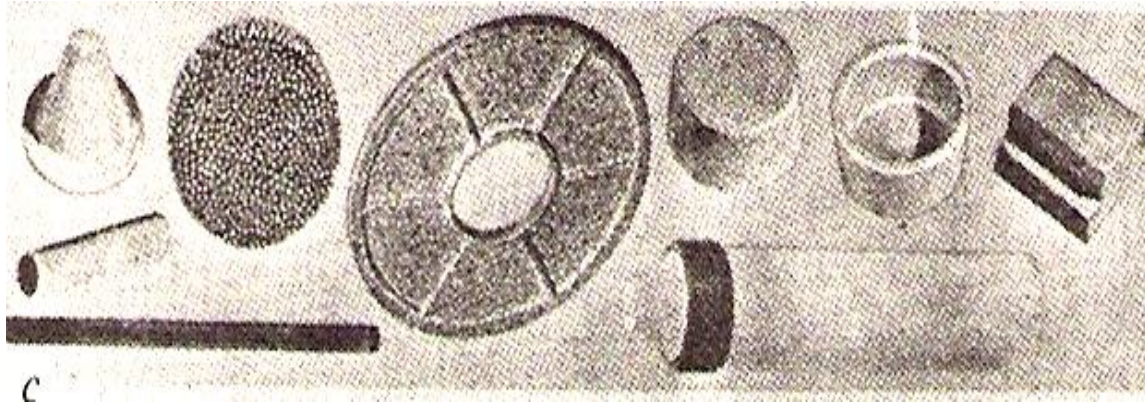
Sinterirani tarni materijali imaju bolja svojstva od drugih materijala. Disk-kočnice izrađuju se sinteriranjem od materijala na bazi metalokeramike.



Slika 6.6 Disk-kočnice automobila [70]

Porozni materijali

Porozni sinterirani materijali koriste se za izradu metalnih filtra, za zaustavljanje čestica većih od 0,005 mm i za uklanjanje vode iz benzina. Porozni materijali koriste se i za osiguranje manometara od tlačnih udara u cjevovodima te za izradu poroznih tijela za grijanje i hlađenje.



Slika 6.7 Porozni dijelovi proizvedeni postupcima sinteriranja [69]

Materijali za električne kontakte

Metalurgija praha omogućila je da se za dijelove za kontakte spoje svojstva dobre električne vodljivosti s otpornošću na zavarivanje. Prema sastavu i načinu upotrebe ovi materijali dijele se na četiri skupine:

- legure srebra (Ag-Ni, Ag-CdO, Ag-Cr₂O₃)
- legure metal-grafit (Cu-grafit, Ag-grafit)
- legure volframa (W-Cu, W-Ag)
- kovani volfram, prešani volfram i legure sa sadržajem volframa većim od 90 %.

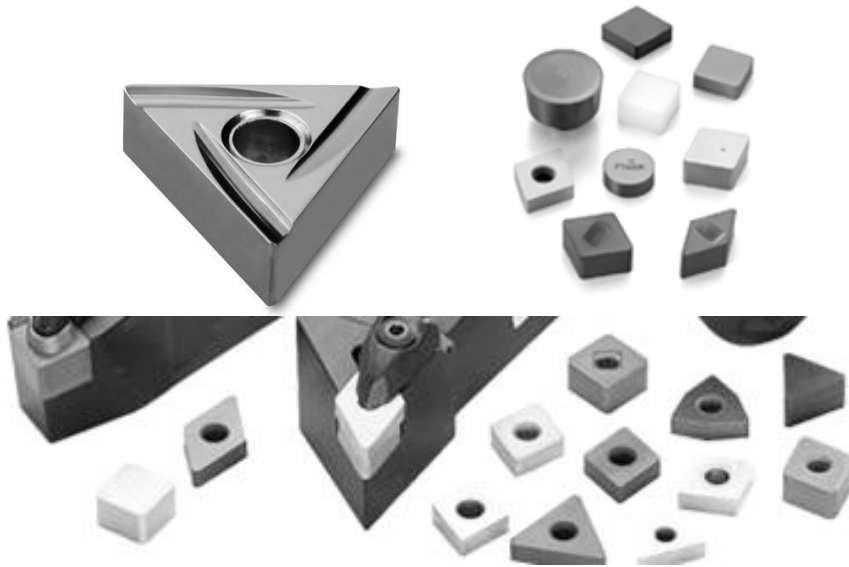
Alati od tvrdog metala

Ovu grupu materijala čine tzv. tvrdi metali, a mogu se podijeliti u tri osnovne skupine:

- tvrdi metali za obradu
- tvrdi metali za oblikovanje bez obrade odvajanjem čestica
- tvrdi metali za primjenu u rudarstvu.

Alati od alatne keramike

Alati od alatne keramike izrađuju se od praha Al₂O₃ s vezivom od SiO₂ ili od B₄C. Alatna keramika koristi se za obradu tvrdih čelika i legura i za izradu prevlaka na tvrdim metalima.



Slika 6.8 Rezne pločice od alatne keramike [71]

6.3 Tvrđi metali

U grupu neoksidne keramike mogu se uvrstiti i keramički materijali pod svojim povijesnim imenom „tvrđi metali“. Izvanredna tvrdoća tih anorganskih materijala uglavnom je posljedica jakih međuatomnih veza u kristalnoj rešetki, zbog čega imaju visoko talište i velik modul elastičnosti te malen faktor toplinskog rastezanja [9]. Kod tvrdih metala izražena su metalna svojstva (npr. toplinska i električna vodljivost). Tvrde metale uvela je u proizvodnju njemačka tvrtka Krupp 1926. godine pod imenom Widia (prema njemačkom *wie Diamant*). Prvi tvrđi metali bili su na osnovi volframova karbida i kobalta (WC-Co), dok su se prvi višekarbidni tvrđi metali (WC-TiC-Co, Wc-TiC-TaC-Co) pojavili 1931./32. godine. Jednokatridni tvrđi metali koriste se za obradu metala koji daju kratku strugotinu (sivi lijev, obojeni metali), a višekarbidni za obradu metala s dugom strugotinom (npr. čelik).

Tvrđi metali imaju sljedeća dobra svojstva [25]:

- visoko talište
- visoku tvrdoću i otpornost na trošenje
- visok modul elastičnosti
- visoku tlačnu čvrstoću
- visoku čvrstoću na povišenim temperaturama, dobru postojanost na temperaturne promjene (otpornost na toplinske šokove)
- dobru prionjivost na metalnim taljevinama
- otpornost na koroziju, visoku toplinsku i električnu vodljivost.

Najvažnije područje primjene tvrdih metala upotreba je za rezne alate pri obradi metala, kamena, plastike i drva odvajanjem čestica. Tvrdi metali za obradu metala podijeljeni su u sljedeće grupe:

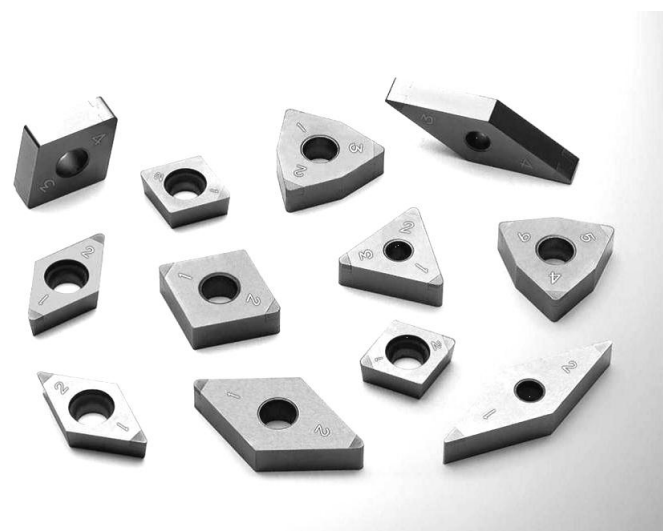
- P grupa, prikladni za obradu odvajanjem čestica materijala s dugom strugotinom
- M grupa, prikladni za obradu svih materijala
- K grupa, prikladni za obradu materijala s kratkom strugotinom
- G grupa, prikladni su za izradu alata za provlačenje i kovanje.

Oznaka HRN-ISO*	Oznaka SinterMAK	PODRUČJE PRIMJENE
P 10	SV 10	FINA STROJNA OBRADA čeličnih metala
P 20	SV 20	SREDNJE FINA STROJNA OBRADA čeličnih metala
P 30	SV 30	SREDNJE GRUBA STROJNA OBRADA čeličnih metala
P 40	SV 40	GRUBA STROJNA OBRADA čeličnih metala
M 10	UV 10	FINA STROJNA OBRADA čeličnih metala i željezih materijala i specijalnih slitina
M 20	UV 20	SREDNJE GRUBA STROJNA OBRADA čeličnih metala i željezih materijala i specijalnih slitina
K 01	HV 05	NAJFINIJA STROJNA OBRADA lijevanog željeza, lakih i obojenih metala, nekovina i kaljenog željeza
K 10	HV 10	FINA STROJNA OBRADA lijevanog željeza, lakih i obojenih metala, nekovina i kaljenog željeza
K 20	HV 20	SREDNJE I GRUBA STROJNA OBRADA lijevanog željeza lakih i obojenih metala, nekovina i kaljenog željeza
K 30	HV 30	GRUBA STROJNA OBRADA lijevanog željeza nemetala

Slika 6.9 Tvrdi metali za obradu odvajanjem čestica [72]

	G 10	GV 12	PROVLAČENJE žice, šipki i cijevi do promjera 20 mm Povećana statička napreznja uz zahtjeve znatne postojanosti od istrošenja
	G 20	GV 18	PROVLAČENJE šipki i cijevi do promjera 35 mm, PREŠANJE abrazivnih prahova
	G 30	GV 28	REZANJE I PROVLAČENJE šipki i cijevi promjera većih od 35 mm, velika statička i znatna dinamička napreznja
	G 40	GV 38	REZANJE, KOVANJE, PROFILNO PROVLAČENJE. Povećana dinamička napreznja.
	G 50	GV 48	KOVANJE. Velika dinamička napreznja.
	G 60	GV 58	KOVANJE. Vrlo velika dinamička napreznja.

Slika 6.10 Tvrđi metali za obradu deformacijom [72]



Slika 6.11 Razni oblici reznih pločica za obradu odvajanjem čestica [72]

U tablici 6.1 prikazano je nekoliko primjera tvrdih metala sa srednjim udjelom karbida i važnijim svojstvima

Tablica 6.1 Sastav i važnija svojstva tvrdih metala [25]

Srednji sastav, %				Gustoća, kg/m ³	Tvrdoća HV	Savojna čvrstoća MPa	Tlačna čvrstoća MPa
WC	TiC	TaC	Co				
94	-	-	6	14900	1600	2000	5500
85	-	-	15	14000	1200	2400	4100
92	-	2	6	14800	1650	1900	5700
70	12	8	10	12400	1430	1750	5000
75	4	8	13	12700	1350	1900	4700

Povećanje još veće otpornosti na trošenje, sa zadržavanjem dobre žilavosti, postiže se nanošenjem tankih slojeva karbida ili nitrida (TiC, TiN, TiCN) ili Al_2O_3 .

Ostali materijali

Postupcima metalurgije praša (sinteriranjem) proizvode se i materijali za vakuumsku tehniku i materijali za magnete te dijelovi od rezne keramike, brusni alati, vatrostalni materijali i materijali za nuklearnu tehniku.

7. LITERATURA

- [1] Kovačićek F., Španiček Đ., Materijali osnove znanosti o materijalima, FSB, Zagreb, 2000.
- [2] Landek D., Materijali i proizvodni postupci, Tehničko veleučilište u Zagrebu, 2012.
- [3] Ivušić V., Franz M., Španiček Đ., Ćurković L.; Materijali I, FSB, Zagreb, 2011.
- [4] Hrgović D., Tehnologija materijala, Metali, Školska knjiga, Zagreb, 1984.
- [5] <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/e78bfca5-654d-4dcc-b431-7b505feb6fa4/kemija-1/m03/j08/index.html>, 8.2.2019.
- [6] Grupa autora, Inženjerski priručnik IP4, Proizvodno strojarstvo, Prvi svezak, Materijali, Školska knjiga, Zagreb, 1998.
- [7] Gabrić I., Šitić S., Materijali I, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2012
- [8] Ivušić V., Dijagrami stanja metala i legura, FSB, Zagreb, 2003.
- [9] Tehnička enciklopedija, svezak 8, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1982.
- [10] Yuri Lakhtin, Engineering Physical Metalurgy and Heat Treatment, Mir Publishers Moscow, 1983 – str. 15.
- [11] Stupnišek M., Cajner F., Osnove toplinske obrade metala, FSB, Zagreb, 2001.
- [12] Krumes D., Toplinska obradba, SFSB, Slavonski Brod, 2000.
- [13] Matijević B., TII I PT -Toplinska obrada, predavanja, FSB, Zagreb, 2015.
- [14] Landek D., Postupci modificiranja površina (podloge za vježbu), FSB, Zagreb, 2012.
- [15] <http://corda-rodjarna.si/lasersko-kaljenje/>
- [16] <https://www.njuskalo.hr/dijelovi-traktore/torpedo-zupcanici-osovine-vratila-oglas-21417738>
- [17] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/?action=category&site_id=141&category_id=1785.
- [18] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/?action=view&site_id=141&id=4370.
- [19] http://repozitorij.fsb.hr/5084/1/Horgas_2016_zavrsni_preddiplomski.pdf.
- [20] Golubić S., Primjena triboloških prevlaka na dijelovima vijčanih pumpi, magistarski rad, FSB, Zagreb, 2004.
- [21] http://repozitorij.fsb.hr/869/1/09_02_2010_Zavrsni_rad%2C_Bojan_Krsnik.pdf,

- [22] Matijević B., Iskustva u primjeni PA CVD tehnologije u praksi, FSB, Zagreb, 2014.
- [23] Lugmair, R. Kullmer, R. Nöbauer, Th. Müller C. Mitterer M. Stoiber, E. Badisch, PACVD Ti(C,N) coated die (AISI H13 hot work steel) for aluminum pressure die casting of an oil pump housing. *6TH INTERNATIONAL TOOLING CONFERENCE str 1041 do 1052 C. Rübige GmbH & Co. KG,*
- [24] Golubić S., Utjecaj nanošenja PVD prevlaka na svojstva konstrukcijskih čelika za poboljšavanje, doktorska disertacija, SFSB, Slavonski Brod, 2018.
- [25] Filetin T., Kovačićek F., Indof J., Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2007.
- [26] Filetin T., Franz M., Španiček Đ., Ivušić V., Svojstva i karakteristike materijala, Katalog opisa, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012]
- [27] <https://www.fabemametali.hr/grupa/1/limovi>
- [28] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/unin:1986/preview>
- [29] http://www.dimso.hr/kem_ciscenja.html
- [30] Tehnička enciklopedija, svezak 10, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1986.
- [31] <http://www.mcsolar.hr/kotlovi-pelet.php>
- [32] <http://alat.manal.hr/product.php>
- [33] <https://metal-kovis.hr/shop/cijena/>
- [34] <https://www.werkzeug-navigator.de/>
- [35] <https://www.kvantum-tim.hr/>
- [36] <http://www.siva-prom.hr/>
- [37] <https://www.dental-medical.hr/>
- [38] <http://www.medicpro.hr/>
- [39] Cajner F., Landek D., Specificities of the heat treatment of tool steels, Proceeding INT. Conf Heat Treat. Surf. Eng. – Eur. Oppr. Croat Econ., pp.57-66, 2012.
http://repositorij.fsb.hr/8667/1/Polovi%C4%87_2018_diplomski.pdf
- [40] <http://www.teh-cut.hr/molds-for-injection-molding/>
- [41] http://repositorij.fsb.hr/1072/1/13_07_2010_Zavrsni_Zdelarec.pdf
- [42] Matijević B., Grilec K., Rede V., Haramina T., Materijali II, FSB Zagreb, 2016
- [43] https://hr.wikipedia.org/wiki/Brzorezni_%C4%8Delik#/media/File
- [44] https://hr.wikipedia.org/wiki/Brzorezni_%C4%8Delik#/media/File

- [45] Novosel M., Krumes D., Željezni materijali, SFSB, Slavonski Brod, 1997.
- [46] Gabrić I., Šitić S., Materijali I, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2012
- [47] <http://www.rsmetali.hr/EasyEdit/UserFiles/katalog-fazonskih-komada.pdf>
- [48] <https://repositorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz:171/preview>
- [49] <http://hr.jp-balancemc.com/news/how-to-do-dynamic-balance-test-of-pump-impeller-11953986.html>
- [50] <http://es.zyilicasting.com/cast-iron-parts/ductile-iron-casting/ductile-cast-iron-material-properties->
- [51] <http://www.preisgroup.com/odljevci-za-ostalu-industrijsku-primjenu.html>
- [52] <http://pnp.com.hr/asortiman/bakrene-cijevi-i-fiting/>
- [53] <http://hr.yirenmachine.com/material/copper-brass-bronze-machining.html>
- [54] <https://www.ikoma.hr/hr/instalacijski-materijal-za-vodu-i-grijanje/mesing-fiting/mesing-ms-produljenje-1-2-x-2-cm-6606/>
- [55] http://www.impk.biz/proizvodi_od_bronce.html
- [56] http://www.impk.biz/katalog_obojenih_metala.pdf
- [57] <https://docplayer.gr/53959517-Nikal-ni-i-njegove-legure.html>
- [58] <https://docplayer.net/41786699-Posebni-metalni-materijali.html>
- [59] http://repositorij.fsb.hr/8110/1/Jačan_2017_diplomski.pdf
- [60] <http://ilirik.si/magnetna-tehnologija/>
- [61] <https://www.tvrtke.com/popovaca/radijatori-bojleri-kotlovi-za-centralno-grijanje/lipovica/odljevci-u-kokilnom-lijevu/6914-50734> 29.10.2018.
- [62] http://repositorij.fsb.hr/4824/1/Završni%20rad_Pulic_kona%C4%8Dno.pdf
- [63] https://hr.wikipedia.org/wiki/Precipitacijsko_o%C4%8Dvr%C5%A1%C4%87ivanje
- [64] <http://poliklinika-krhen.hr/cijena-zubnih-implantata/>
- [65] Čorić D., Posebni metalni materijali – III Dio, FSB, Zagreb, 2017.
- [66] Grupa autora, Materijali II, neželjezne legure FSB, Zagreb, 2012.
- [67] Slokar Lj., Metalurgija praha i sinter materijali, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2015.]
- [68] Grupa autora, Praktičar 2 - Strojtarstvo, Školska knjiga, Zagreb, 1972.

- [69] Tehnička enciklopedija, svezak 12, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1992.
- [70] <http://hr.baotaiautoparts-ar.com/brake-pad/www-car-disc-brake-pad-com.html>
- [71] <http://www.directindustry.fr/prod/sandvik-coromant-usa/product-35541-837663.html>
- [72] Matijević B., Metalurgija praha (PM), Svojstva sinteriranih materijala i dijelova predavanja, FSB, Zagreb, 2017.