

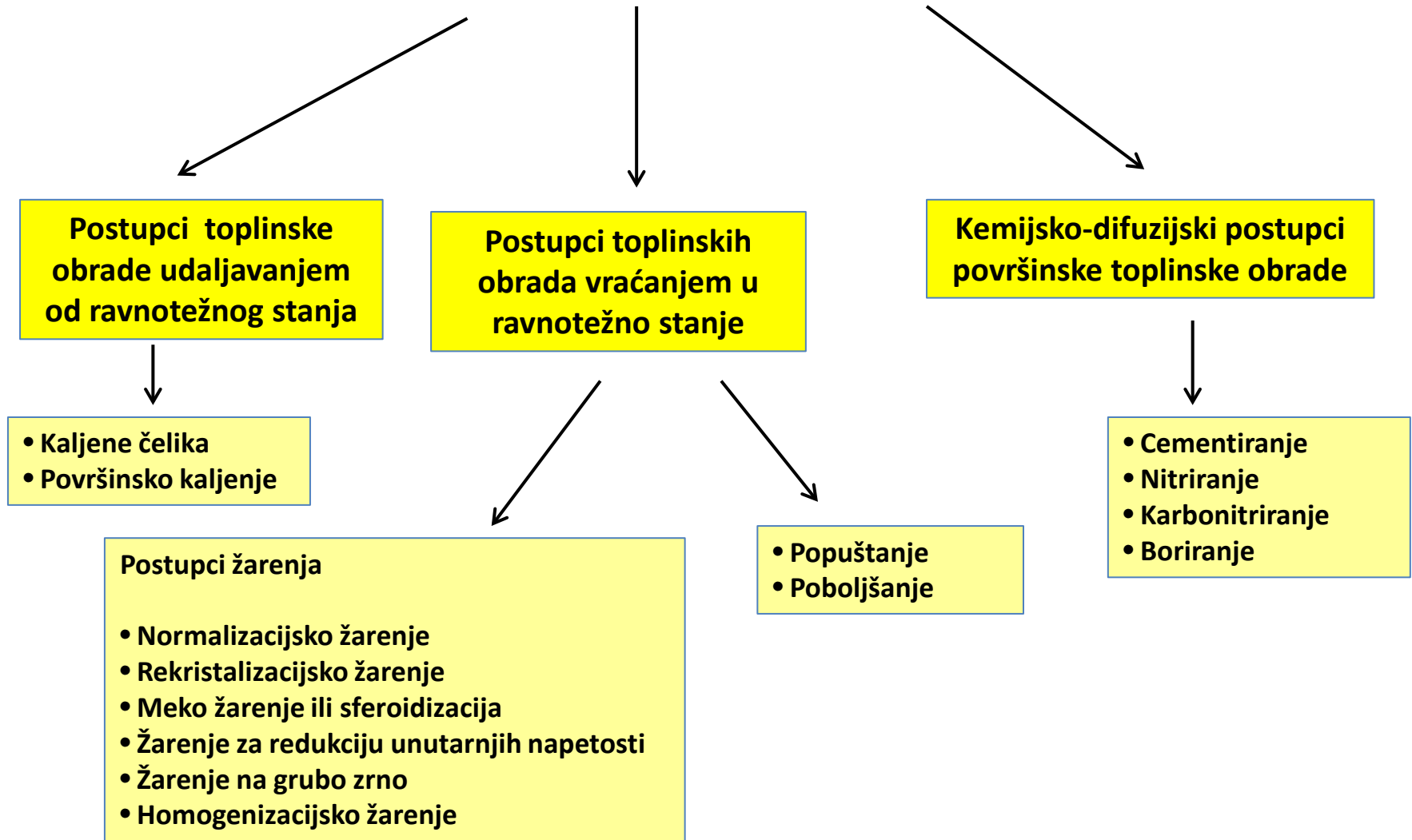
POSTUPCI TOPLINSKE OBRADY ČELIKA

- Zagrijavanjem i hlađenjem čeličnog obratka različitim brzinama, tj. procesima toplinske obrade, mogu se postojeće mikrostrukture čelika promijeniti.
- Postupcima toplinske obrade postižu se različite pretvorbe, a mikrostrukture koje tako nastaju imaju veliki utjecaj na njegova mehanička svojstva kao što su: čvrstoća, tvrdoća, žilavost i plastičnost.
- Koje će se mikrostrukture razviti i u kojoj mjeri ovisi o: primijenjenim postupcima toplinske obrade čelika, njegova kemijskog sastava, mikrostrukture, stupnja hladne deformacije, brzine zagrijavanja i hlađenja za vrijeme toplinske obrade.
- **Najvažniji postupci toplinske obrade čelika su: žarenje, kaljenje, popuštanje i poboljšavanje.**

Prema dubini do koje dopire utjecaj toplinske obrade postoje:

- **Toplinska obrada samo površine** - (brojni elementi strojeva imaju posebne zahtjeve koji se odnose samo na posebna svojstva njihovih površina (zupčanici, cilindri (tj. košuljice) motora, rukavci u ležajevima su elementi od kojih se traži veća tvrdoća za bolju otpornost površine na trošenje).
- **Toplinska obrada cijelog presjeka** - za one strojne elemente kod kojih se očekuju, od jezgrenog sloja čeličnog obratka, točno određena svojstva (npr. povećana tvrdoća).
- Oba postupka toplinske obrade rezultiraju promjenom mikrostrukture čeličnog obratka (samo površine ili cijelog presjeka obratka).

POSTUPCI TOPLINSKIH OBRADA ČELIKA

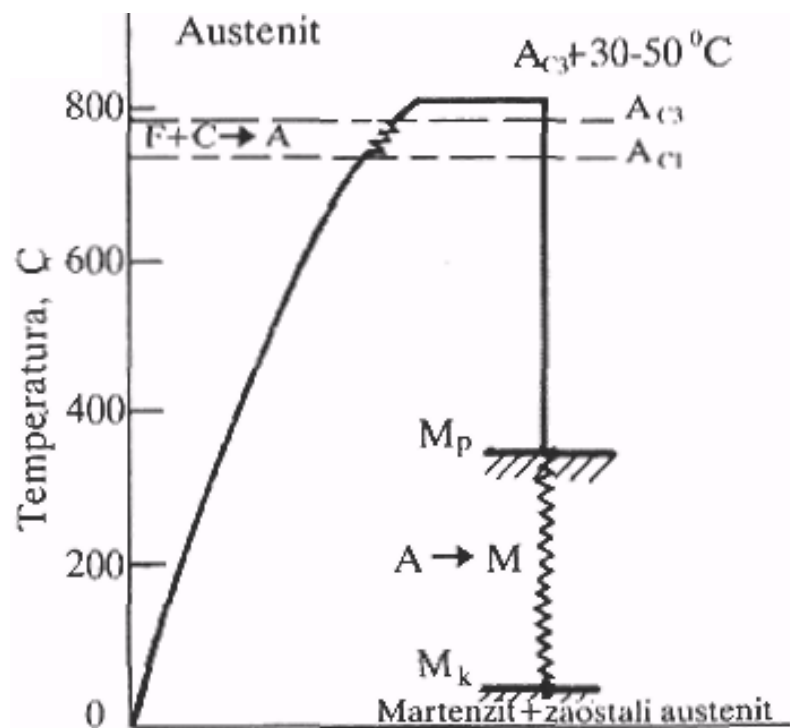


POSTUPCI TOPLINSKE OBRADJE UDALJAVANJEM OD RAVNOTEŽNOG STANJA

TOPLINSKA OBRADA CIJELOG PRESJEKA ČELIČNOG OBRATKA

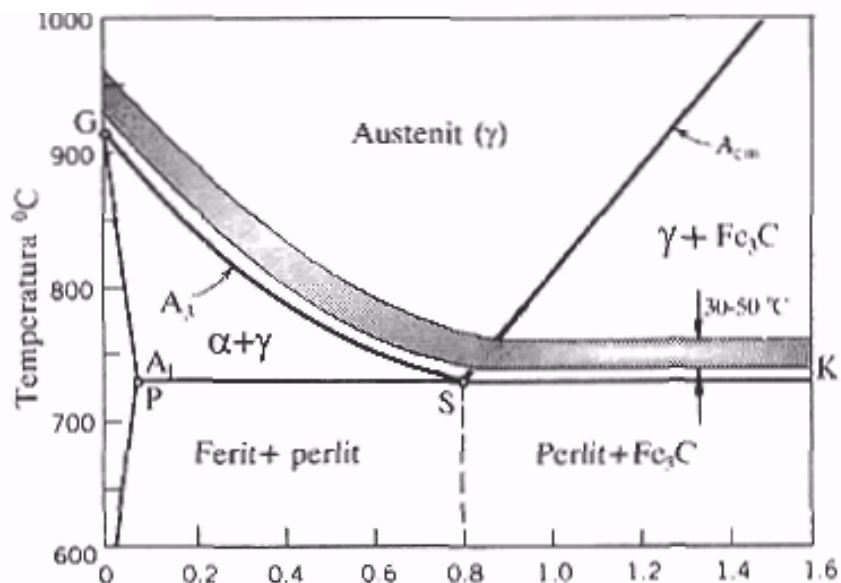
Kaljenje čelika

- Kaljenje čelika je proces kojim se čelik zagrijava do temperature nešto iznad kritične, a zatim hladi brzinom većom od kritične.
- Cilj je dobivanje martenzitne strukture čelika, a time visoke tvrdoće te otpornost na trošenje.
- Uspješno izvođenje kaljenja čelika i dobivanje pretežno martenzitne strukture po cijelom poprečnom presjeku obratka ovisi o : temperaturi zagrijavanja, vremenu zagrijavanja, okolini u kojoj se izvodi zagrijavanje, brzini hlađenja i prokaljivosti čelika.
- Temperatura zagrijavanja ovisi o: sadržaju ugljika u čeliku. Pedeutektoidni čelik se zagrijava na temperaturu 30–50°C iznad tačke A3.



Vrijeme

a)



Sadržaj ugljika, mas.%

b)

(a) Shematski prikaz procesa kaljenja podeutektoidnog čelika; (b) temperaturna područja zagrijavanja čelika.

- Iz početne feritno–perlitne mikrostrukture podeutektoidnog čelika nastaje austenit, koji se zatim hladi brzinom većom od kritične i iz njega nastaje martenzit.

Utjecaj temperature na pretvorbu austenita u martenzit:

- a) Ako je temperatura niža od A_3 , a viša od A_1 ne nastaje potpuna pretvorba ferita u austenit. Nakon hlađenja, u strukturi kaljenog čelika, pored martenzita, pojavljuje se i ferit koji smanjuje tvrdoću čelika posle kaljenja.
- b) Zagrijavanjem čelika znatno iznad temperature A_3 raste kristalno zрно austenita. Nakon hlađenja dobivena mikrostruktura čelika sastoji se iz vrlo krhkog krupno-igličastog martenzita i zaostalog austenita.
- c) Nadeutektoidni čelik zagrijava se do temperature $30\text{--}50^\circ\text{C}$ iznad točke A_3 gdje nastaju pretvorbe perlita i vrlo male količine sekundarnog cementita u austenit.
- d) Na temperaturi kaljenja mikrostruktura čelika se sastoji iz austenita i cementita. Hlađenjem čelika, brzinom većom od kritične, nastaje pretvorba austenita u martenzit.
- e) Mikrostruktura kaljenog nadeutektoidnog čelika sastoji se iz martenzita i po njemu raspršenih kristalnih zrnaca cementita koji čeliku daju visoku tvrdoću i otpornost na trošenje. Što su zrnca cementita sitnija i pravilnije raspoređena, postiže se veća tvrdoća. Ovo je razlog što se prije kaljenja nadeutektoidnih čelika, kovanjem i normalizacijom uklanja cementitna mreža.

Zagrijavanjem čelika do temperatura iznad točke A_{cm} nema utjecaja na povećanje tvrdoće. Nakon hlađenja čelika nastaje krupno-igličasta mikrostruktura sastavljena iz martenzita bez cementita s povećanom količinom zaostalog austenita, što utječe na smanjenje tvrdoće.

Za neke legirane čelike je temperatura zagrijavanja određena položajem točaka A_1 i A_3 , ali je znatno viša, a razlog je u maloj brzini i stupnju otapanja karbida legiranih elemenata u austenitu.

Primjer: kod visokolegiranih čelika, koji sadrže (11–14% Cr), za otapanje karbida tipa $M_{23}C_6$ potrebna temperatura zagrijavanja je 150–250°C iznad točke A_3 . Navedeno povišenje temperature zagrijavanja u mnogim slučajevima ne uzrokuje primjetno povećanje veličine kristalnog zrna austenita jer neotopljene čestice karbida sprječavaju rast tih zrna.

Niže temperature zagrijavanja čelika legiranih karbidotvornim kemijskim elementima (Cr, W, Mo, Ti, Si) stvaraju niskolegirani i manje stabilni austenit pri hlađenju. Ubrzano razlaganje takvog austenita povećava kritičnu brzinu hlađenja, smanjuje prokaljivost, povisuje temperature martenzitne pretvorbe M_p i M_k i smanjuje tvrdoću martenzita.

Na višim temperaturama zagrijavanja čelika dolazi do potpunog otapanja karbida, rasta kristalnog zrna i homogenizacije austenita što daje stabilnost pothlađenog austenita posebno u području perlitne pretvorbe, smanjuje kritičnu brzinu hlađenja i povećava prokaljivost čelika.

Pretjerano povišenje temperature zagrijavanja u mikrostrukturi kaljenog legiranog čelika povećava količinu zaostalog austenita, a to rezultira smanjenjem tvrdoće, čvrstoće, toplinske provodljivosti i obradivosti čelika brušenjem.

Prekaljenost čelika

Temperature A3 odnosno A1 odgovaraju vrlo sporom zagrijavanju čelika. Međutim, kako je u praksi brzina zagrijavanja znatno veća, pretvorba u austenit na A3 temperaturi nije potpuna, tj. količina otopljenog ugljika u austenitu manja je od one koja bi trebala biti prema metastabilnom ravnotežnom dijagramu. Potpunije otapanje ugljika u austenitu postiže se samo povišenjem temperature austenitizacije.

Povišenjem temperature će se nakon kaljenja povećati količina zaostalog austenita. Zagrijavanjem na previsoke temperature ova pojava je izraženija, te za takav čelik kažemo da je prekaljen.

Preniska temperatura austenitizacije nakon kaljenja rezultira mekšim martenzitom siromašnijim na ugljiku i manjom količinom zaostalog austenita, dok previsoka temperatura daje tvrdi martenzit bogatiji ugljikom i veću količinu zaostalog austenita.

Ukupna tvrdoća smjese u oba je slučaja manja od one koja bi nastala pravilnom temperaturom austenitizacije.

Utjecaj vremena zagrijavanja

Vrijeme zagrijavanja mora biti dovoljno dugo za: postizanja potrebne temperature po cijelom poprečnom presjeku obratka; završetak svih faznih pretvorbi.

Vrijeme zagrijavanja ne smije biti ni predugo jer može izazvati porast austenitnog zrna i razugljičenje površinskog sloja čeličnog obratka.

Vrijeme zagrijavanja do zadane temperature ovisi o: temperaturi zagrijavanja, sadržaju ugljika i legirnih elemenata, veličine i oblika obratka, načina smještanja obratka u peći, vrste peći i drugih čimbenika.

Veće brzine zagrijavanja treba izbjegavati zbog pojave znatnih unutarnjih napetosti koje mogu uzrokovati deformacije i pojave pukotina.

Potrebno vrijeme zagrijavanja, uključujući i vrijeme zadržavanja na konstantnoj temperaturi za obratke okruglog poprečnog presjeka iz ugljičnih čelika može se izračunati po sljedećim preporukama:

u plamenim pećima – 1 minuta/ 1mm poprečnog presjeka,
u solnim kadama – 0,5 minuta/ 1 mm poprečnog presjeka. Ukupno vrijeme zagrijavanja obradaka izrađenih iz legiranih čelika treba povećati za 25–50%.

Utjecaj legirnih elemenata na toplinsku obradu legiranih čelika

Temperature austenitizacije legiranih čelika bitno su različite u odnosu na nelegirane.

Čelici legirani alfagenim (Cr, Mo, Si, Nb, V, W) legirnim elementima - temperature austenitizacije su više u odnosu na nelegirane

Čelici legirani gamagenim (Ni, Mn, C, N, Cu, Co) legirnim elementima snižavaju pravilnu temperaturu austenitizacije

Legirni elementi kod toplinske obrade čelika djeluju tako što:

- usporavaju modifikaciju kristalnih rešetki pri austenitizaciji (naročito usporavaju otapanje karbida legirnih elemenata u austenitu);
- sprječavaju ili reduciraju perlitnu pretvorbu;
- mijenjaju temperaturu modifikacije i vrstu nastalih faza (porastom sadržaja legirnih elemenata spušta se Ms temperatura - iznad nekog sadržaja i ispod sobne temperature pa je austenit u cijelosti nepretvoren);
- **karbidotvorni** legirni elementi (Cr, Mo, W, V) sprječavaju rast austenitnog kristalnog zrna.

Utjecaj vremena držanja na temperaturi austenitizacije

Za razliku od metastabilnog zagrijavanja čelika u praksi su brzine zagrijavanja veće, pa će i temperature A1 i A3 imati više vrijednosti.

Zbog toga se eutektoidni karbidi (cementit kod nelegiranih čelika) ne stignu u potpunosti otopiti ni na A1 temperaturi niti na temperaturama između A1 i A3. To znači da na A3 temperaturi čelik još uvijek sadrži neotopljene karbide, a time je nastali austenit siromašniji ugljikom (u odnosu na izvornu koncentraciju). Zadržavanje na temperaturi austenitizacije je nužno kako bi se dalo dovoljno vremena da austenit otopi ugljik iz karbida.

Samo dovoljno dugim zadržavanjem na pravilnoj temperaturi austenitizacije može se nakon kaljenja očekivati tvrdoća čelika (koja proizlazi iz sadržaja ugljika).

Povećanje austenitnog zrna:

- smanjuje kritičnu brzinu hlađenja (martenzitna struktura može se ostvariti manjim brzinama hlađenja – manja zaostala naprezanja);
- daje lošija svojstva žilavosti i veće deformacije zakaljenog obratka.

Legirane čelike prigodom austenitizacije treba duže grijati nego ugljične, vrlo često i na višim temperaturama kako bi se otopila dovoljna količina legiranih elemenata u austenitu što znatno smanjuje kritičnu brzinu hlađenja.

Ako su temperature zagrijavanja niže, bolje rezultate daju ugljični čelici, jer ako karbid u legiranom čeliku nije otopljen, austenit će biti siromašniji ugljikom (mekši martenzit), a njegovo kristalno zrno je sitnije (povećava se kritična brzina hlađenja).

- KALJIVOST – svojstvo čelika da se gašenjem s temperature austanitizacije:
 - *zakali* – postigne što *višu* tvrdoću na površini
 - *prokali* – postigne što *jednoličniju* tvrdoću na poprečnom presjeku

ZAKALJIVOST ČELIKA

- ovisi o udjelu ugljika u čeliku (f (% C))

Prokaljivost je sposobnost čelika da se hlađen s temperature austenitizacije modificira u martenzit M do manje ili veće dubine.

Prokaljivost - svojstvo čelika

Prokaljenost - stanje čelika

- Pri kaljenju čelika, u ovisnosti o kritičnoj brzini hlađenja i presjeka obratka, dobiva se različita mikrostruktura od površine prema jezgri.
- Unutarnji slojevi obratka sporije se hlade od vanjskih slojeva. Kad je brzina hlađenja manja od kritične, prokaljenost ide samo do određene dubine, a u jezgri razlaganjem austenita nastaje lamelarna struktura ferita i cementita (trustit, sorbit ili perlit).
- Hladi li se jezgra brzinom većom od kritične tada po cijelom presjeku nastaje martenzitna mikrostruktura.
U tom slučaju je prokaljivost potpuna znači da se sa promjenom brzine hlađenja i mikrostrukture, od površine ka jezgri, mijenja i tvrdoća. Što je manja kritična brzina hlađenja, veća je prokaljivost i obrnuto, što je veća kritična brzina hlađenja, manja je prokaljivost.
- Za dubinu zakaljenog sloja uzima se razmak od površine do sloja koji ima strukturu polumartenzita (50% martenzit + 50% trustit). Tvrdoća polumartenzitne strukture ovisi o sadržaju ugljika i s porastom ugljika tvrdoća raste.

Klasični postupci kaljenja

Izvode se kontinuiranim hlađenjem do sobne temperature.

Postoje dva postupka kontinuiranog (anizotermičkog) kaljenja:

- a) **Izravno kaljenje** - ostvaruje se hlađenjem u jednom rashladnom sredstvu
- b) **Slomljeno kaljenje** – ostvaruje se hlađenjem u dvama rashladnim sredstvima

a) Izravno kaljenje

- **Primjenjuje se kod jednostavnijih oblika i legiranih čelika (koristi se blaže rashladno sredstvo) jer nema velike opasnosti od zaostalih naprezanja!**
- Ako su se i površina i jezgra čeličnog obratka ohladile brzinom hlađenja $v_{hl} > v_{kr}$, u obje će se dobiti željeni martenzit, M na temperaturi okoline ako je koncentracija ugljika barem 0,6 mas.%), s pripadajućom tvrdoćom!

b) Slomljeno kaljenje

- Ostvaruje se najprije naglim hlađenjem (npr. u vodi) a daljnje hlađenje u blažem rashladnom sredstvu (npr. u ulju) zbog smanjenja toplinskih napetosti i zaostalih naprezanja nakon kaljenja.

Naglo hlađenje pri višim temperaturama nije opasno, jer je to područje visoke plastičnosti. Uranjanjem u blaže rashladno sredstvo smanjuju se temperaturne razlike između slojeva, a zaostala naprezanja na kraju obrade su minimalna.

Izotermički postupci kaljenja

Izvode se izotermičkim hlađenjem pri određenoj temperaturi izoterme. Hlađenje se obavlja skoro trenutačno s temperature austenitizacije do temperature izoterme, a zatim zadržavanjem neko vrijeme na toj temperaturi uz naknadno proizvoljno hlađenje do sobne temperature.

a) Stepeničasto - martenzitno

Nastaje hlađenjem s pravilne temperature austenitizacije u kupki (solnoj, metalnoj, uljnoj) do izjednačenja temperature površine i jezgre. Dalje se izradak hladi na zraku. Temperature površine i jezgre su se izjednačile!

Prijelazom M_s temperature nastaje martenzit, koji ima veći volumen od austenita, ali kako nastaje skoro istodobno na površini i u jezgri, toplinska naprezanja u obratku su minimalna, a i mikronaprezanja su istodobna u svim slojevima pa nema izvitoperenja niti površinskih prskotina!

Popuštanje čelika

- Popuštanje je postupak toplinske obrade koji se izvodi nakon kaljenja čelika zagrijavanjem na neku temperaturu ispod temperature A1.
- Ovim postupkom toplinske obrade vraćanja u ravnotežno stanje postiže se:
 - *eliminacija zaostalih naprezanja;*
 - *povećanje žilavosti (eliminacijom krhkog tetragonalnog martenzita koji uopće nema izražena svojstva rastezljivosti i žilavosti);*
 - *dimenzijska stabilnost obratka (pojava promjene dimenzije izražena je kod alatnih čelika – zagrijavanjem ovih čelika, nakon kaljenja, već na nižim temperaturama dolazi do pretvorbe zaostalog austenita u martenzit i karbide popuštanja što je praćeno promjenom volumena/dimenzija).*

- Čelični obratci složenog oblika, koji su samo zakaljeni, najčešće se u eksploataciji raspuknu. Kako bi se ova pojava izbjegla, nakon kaljenja se izvodi toplinska obrada popuštanja čelika čime se teži ravnoteži faza (npr. mikrostruktura s feritom i perlitom) i mehaničkoj ravnoteži (uklanjanje zaostalih naprezanja nastalih kaljenjem).

Rezultat popuštanja nakon kaljenja:

Smanjuje se: tvrdoća, čvrstoća i granica elastičnosti (u odnosu na zakaljeno stanje).

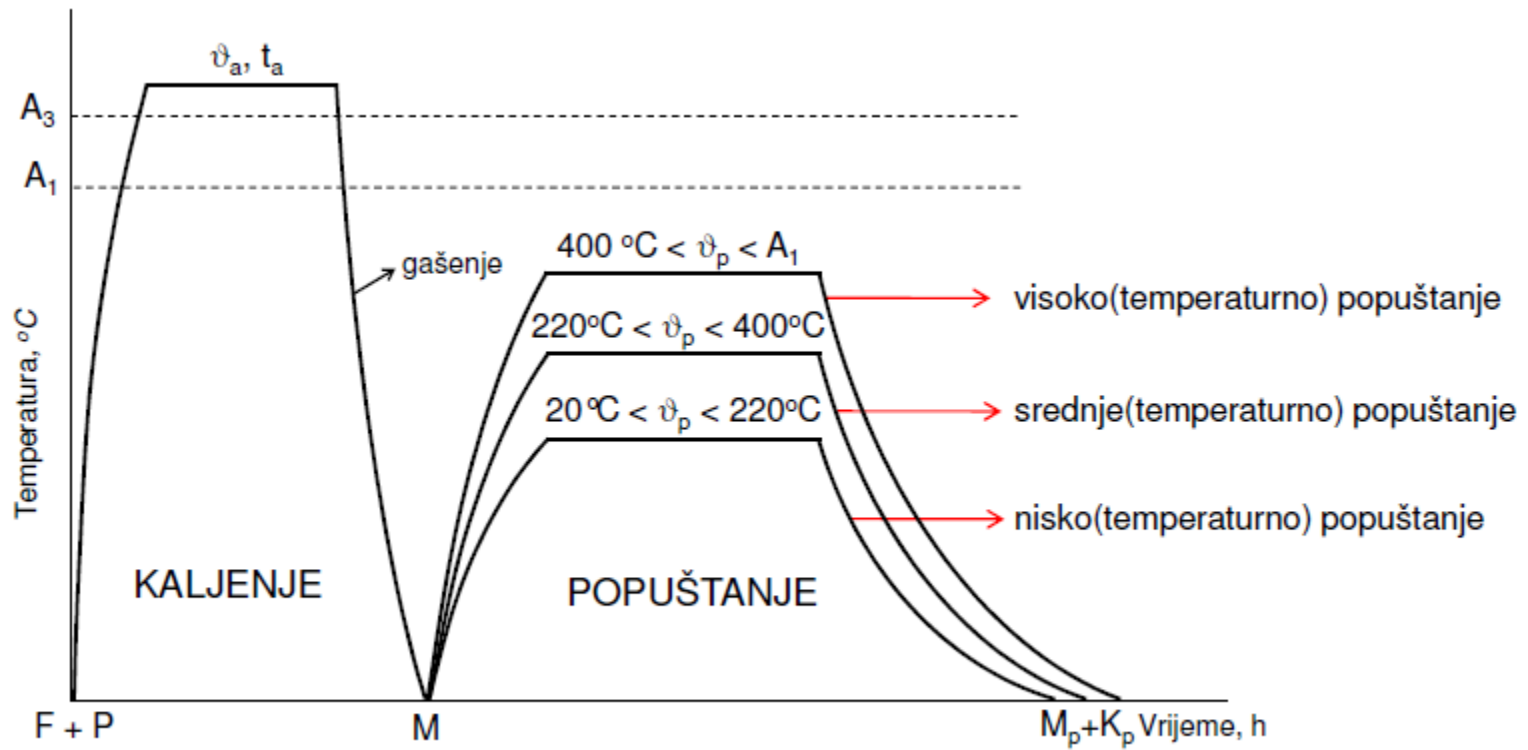
Povećava se: žilavost i rastezljivost (u odnosu na zakaljeno stanje)!

Sniženje tvrdoće je samo posljedica postupka popuštanja (nije ciljana pojava).

Ovisno o temperaturi postupci obrade popuštanja dijele se na:

- visoko temperaturno popuštanje: $< 220\text{ }^{\circ}\text{C}$
- srednje temperaturno popuštanje: između $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $400\text{ }^{\circ}\text{C}$
- nisko temperaturno popuštanje: više od $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ niže od temperature austenitizacije

Popuštanjem na višim temperaturama povećavaju se vrijednosti svih navedenih svojstava u odnosu na metastabilno stanje (prije kaljenja).



Shema postupka toplinske obrade popuštanja čelika

Popuštanje visokolegiranih čelika

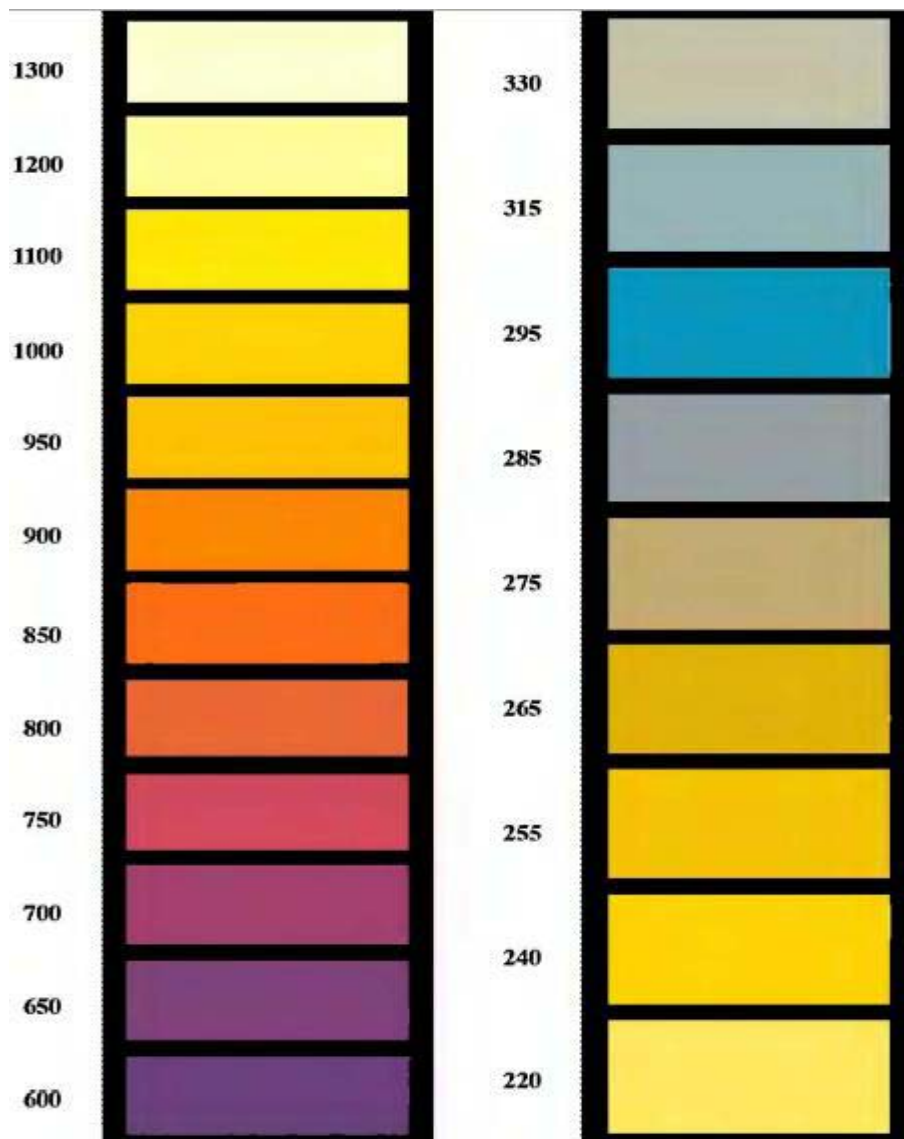
- Do pretvorbe visokolegiranog zaostalog austenita dolazi tek popuštanjem pri relativno visokim temperaturama, iznad 500°C.

Popuštanjem visokolegiranih čelika dolazi do:

- nastajanja sekundarnih karbida (karbida popuštanja) popuštanjem martenzita;
- snižavanja sadržaja ugljika u martenzitu na približno 0,25 %C;
- pretvorbe zaostalog austenita u martenzit.

Ovisno o sadržaju ugljika konačna struktura popuštenog visokolegiranog čelika je:

- Za $C < 0,6 \%$: popušteni martenzit i karbid popuštanja
- Za $0,6 \% < C < 0,8 \%$: popušteni martenzit, karbid popuštanja i zaostali austenit
- Za $0,8 \% < C < 2 \%$: popušteni martenzit, karbid popuštanja, zaostali austenit i sekundarni karbid



Boje užarenog čelika

Boje popuštanja čelika

Boje popuštanja čelika

Postupci poboljšavanja čelika

Poboljšavanje čelika je složen postupak toplinske obrade koji se sastoji iz:

- kaljenja čeličnog obratka u cilju dobivanja martenzitne strukture
- i naknadnog visokotemperaturnog popuštanja kaljenog obratka s ciljem dobivanja zrnate eutektoidne strukture, a time i povišene čvrstoće (granice tečenja) i visoke žilavosti.

Tom se postupku podvrgavaju samo podeutektoidni čelici koji sadrže od 0,3 % do 0,6 % ugljika. U praksi se taj postupak naziva još i oplemenjivanje.

Poboljšavanje je postupak koji se najčešće primjenjuje za dinamički opterećene elemente strojeva: osovine, opruge, zupčanike, vijke...

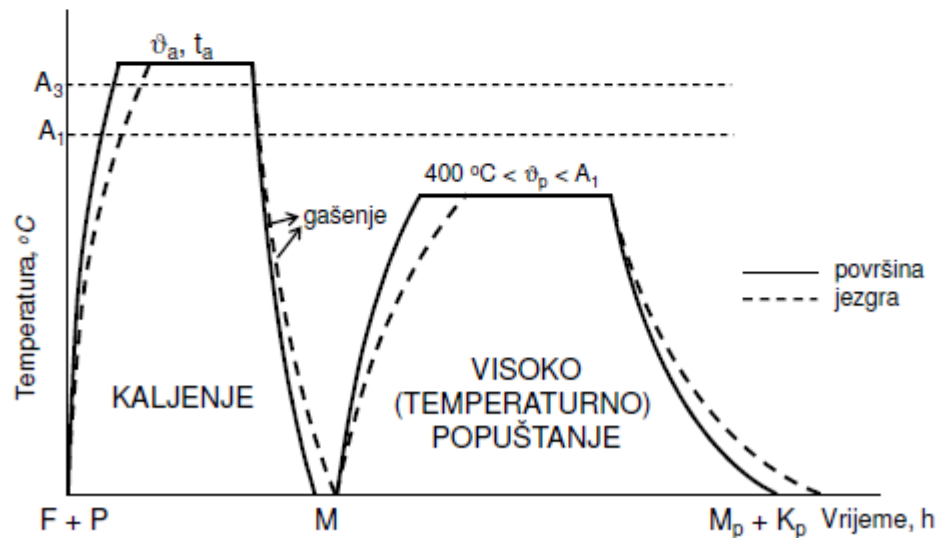
Poboljšavanje čelika

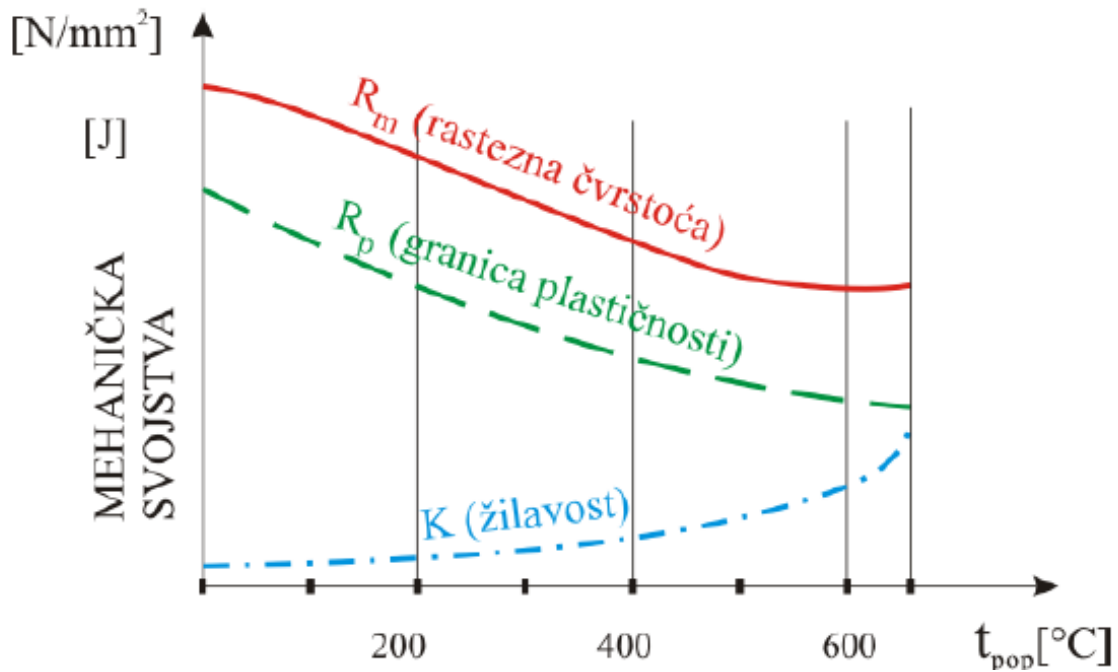
- postupak koji se sastoji od:

- kaljenja
- visoko(temperaturnog) popuštanja ($400\text{ }^{\circ}\text{C} < \vartheta_p < A_1$)

u cilju postizanja: visoke granice tečenja i visoke žilavosti.

- čelici sa 0,3 – 0,6 %C, niskolegirani čelici, nelegirani čelici
- prokaljenje!!!





Dijagram promjene mehaničkih svojstava ovisno o temperaturi popuštanja t_{pop}

Postupci žarenja

- **Postupci toplinske obrade kojima se metal vraća u ravnotežno stanje (podeutektoidnom čeliku vraćaju se ravnotežne faze ferit i perlit) te se tako uspostavlja mehanička ravnoteža, tj. ukidaju se zaostala naprezanja.**

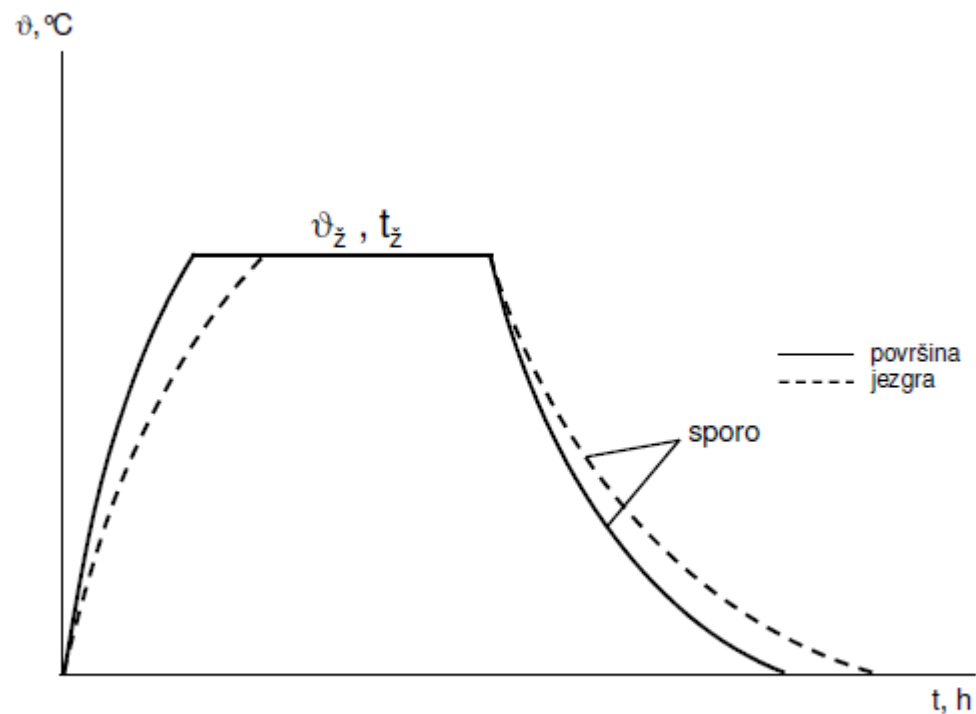
Postupak žarenja sastoji se od:

- **sporog zagrijavanja čeličnog obratka do određene temperature;**
- **zadržavanja na toj temperaturi (trajanje ovisi o veličini presjeka obratka) ili osciliranja oko temperature žarenja;**
- **sporog hlađenja do temperature okoline**

Brzina hlađenja nakon žarenja mora biti podešena prema svojstvima čelika.

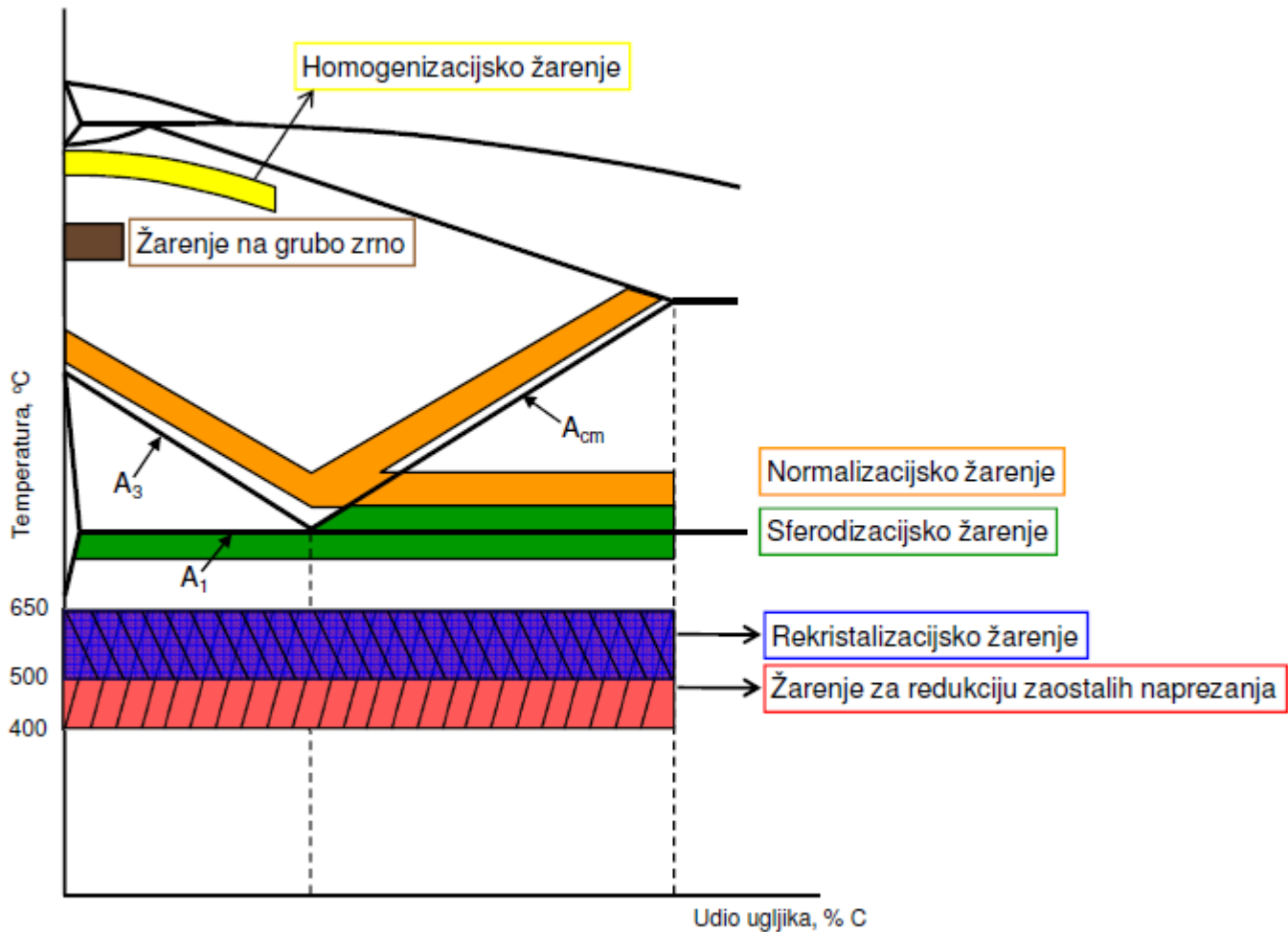
Kod legiranih čelika hlađenje mora biti izrazito sporo kako se obradak ne bi zakalio.

Postupak žarenja bira se u ovisnosti o početnom stanju (fazama i mikrostrukтури). Pri odabiru postupka treba voditi računa o tome da se povišenjem temperature žarenja povećava utrošak energije, radnog vremena, opreme, a povećava se i opasnost od oksidacije i razugljičenja površine obratka.

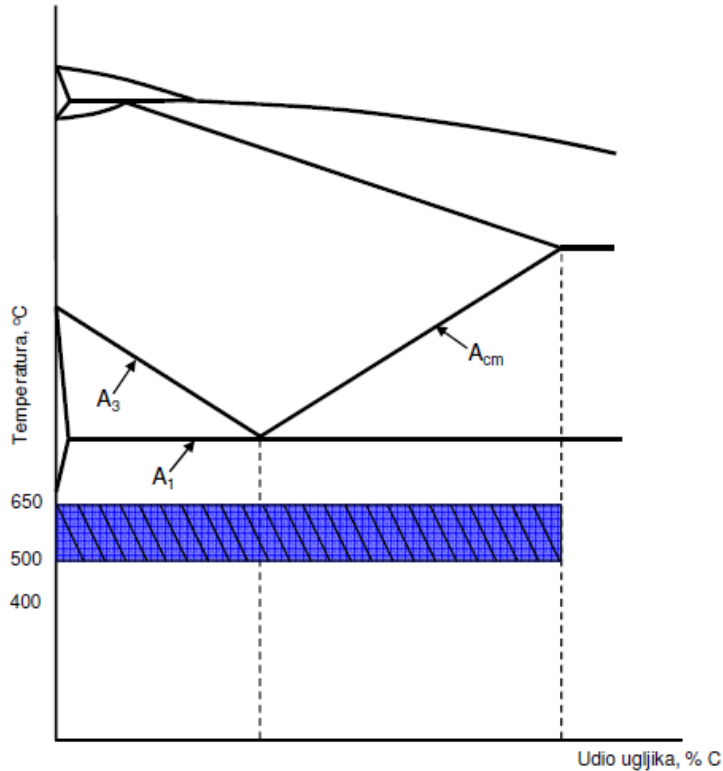


Dijagram postupka žarenja

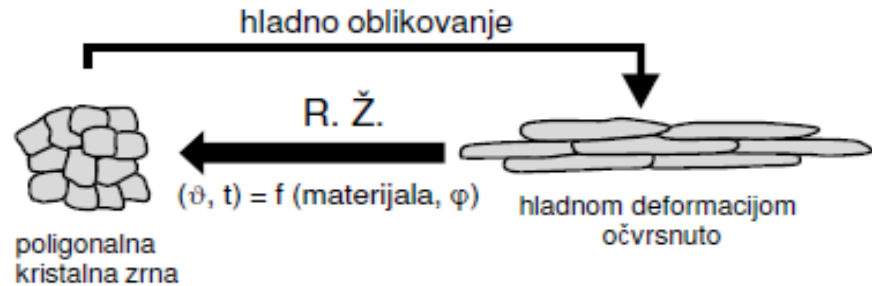
Postupci žarenja



Rekristalizacijsko žarenje



- nakon hladnog oblikovanja (valjanja,...) tijekom kojeg se promijenila tekstura materijala i nastupilo očvršćenje

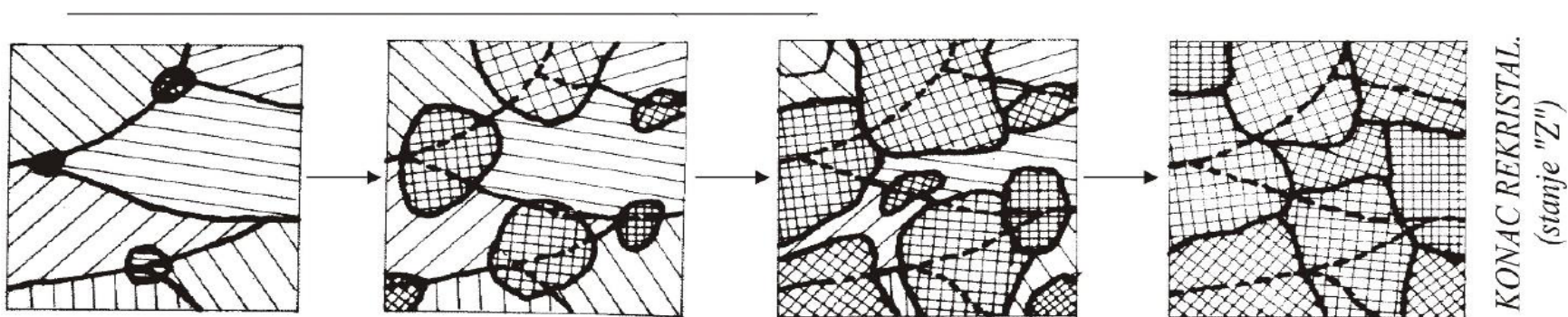


- vraća duktilnost, deformabilnost

- čelik (500 – 650 °C)

Što je stupanj ugnječenja čelika veći, veća je unutarnja energija u hladno gnječenom metalu pa je potrebna manja energija za rekristalizaciju.

Zagrijavanjem na nešto više temperature u krutom metalu nastaju klice rekristalizacije, oko kojih kristali dalje rastu. Klice rekristalizacije nastaju na mjestima najveće unutarnje energije (mjestima najveće deformacije).



Klice su na granicama hladno gnječenog zrna (tj. na mjestima najveće unutarnje energije)

rast i razvijanje kristala preko čitavog presjeka

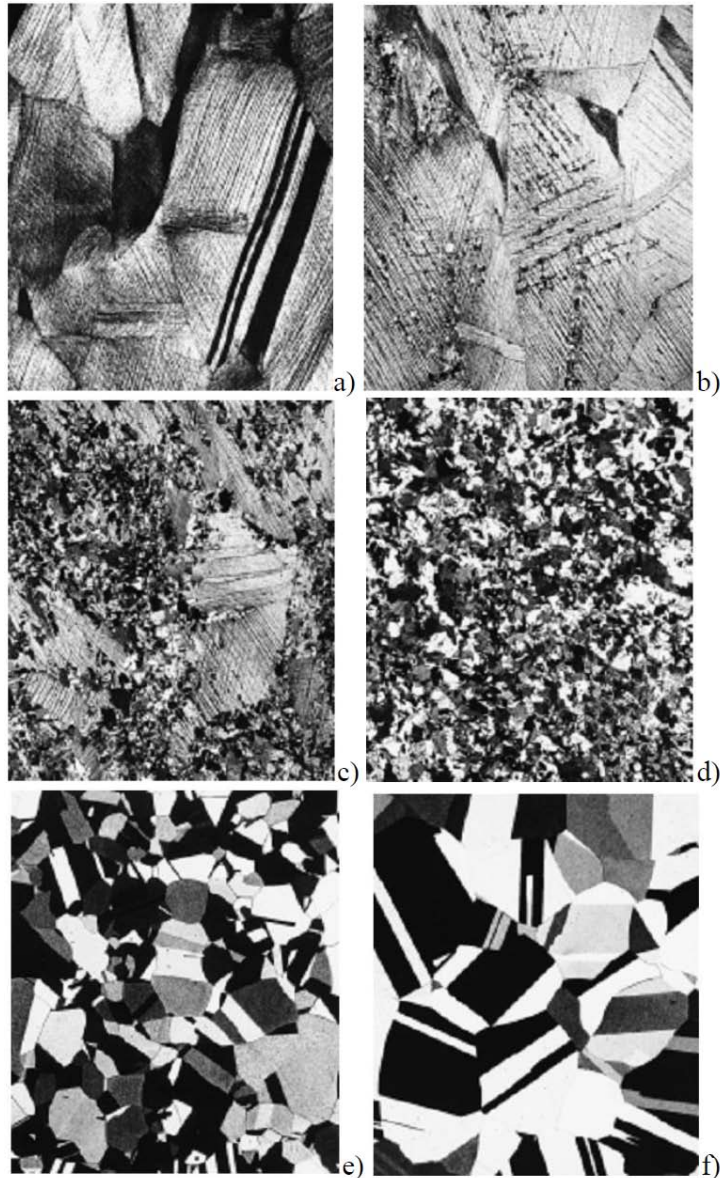
PODRUČJA (FAZE) u procesu rekristalizacije

Shema tijeka procesa rekristalizacije

- a) Hladno deformirana struktura
- b) Pojava klica rekristalizacije (početni stupanj) nakon zagrijavanja 3 sata na 580 °C
- c) Djelomično rekristalizirana struktura nakon zagrijavanja 4 sata na 580 °C
- d) Potpuno rekristalizirana struktura nakon zagrijavanja 8 sati na 580 °C

Sekundarna rekristalizacija:

- e) Sekundarna rekristalizacija - porast zrna nakon zagrijavanja 15 minuta na 650 °C
- f) Sekundarna rekristalizacija - porast zrna nakon zagrijavanja 10 minuta na 700 °C



Utjecaj vremena zadržavanja na temperaturi rekristalizacije na mehanička svojstva i mikrostrukturu.

U području oporavka nema bitnih promjena mehaničkih svojstava. U području rekristalizacije dolazi do naglog pada svojstava otpornosti materijala (tvrdoće i čvrstoće), ali i do porasta svojstava deformabilnosti (rastezljivosti).

Područje sekundarne rekristalizacije, do koje dolazi produženim zadržavanjem na temperaturi rekristalizacije, obilježeno je padom svojstava otpornosti i deformabilnosti, što je posljedica rasta zrna (koagulacijom se više manjih zrna međusobno spajaju u veća)-

Početno stanje sekundarne rekristalizacije odgovara stanju na kraju procesa rekristalizacije. To područje naziva i područje pregrijanosti.

U području pregrijanosti uočava se nagli porast veličine zrna što se direktno odražava na pad tvrdoće, čvrstoće, rastezljivosti i žilavosti metala.

Toplinska obrada rekristalizacije može se obaviti zadržavanjem čeličnih obradaka kraće vrijeme na višim temperaturama ili duže vrijeme na nižim temperaturama.

Normalizacijsko žarenje

Normalizacijsko žarenje poduzima se samo kod čelika i čeličnog lijeva (ne vrijedi za druge legure) i to u cilju postizanja normalnih faza:

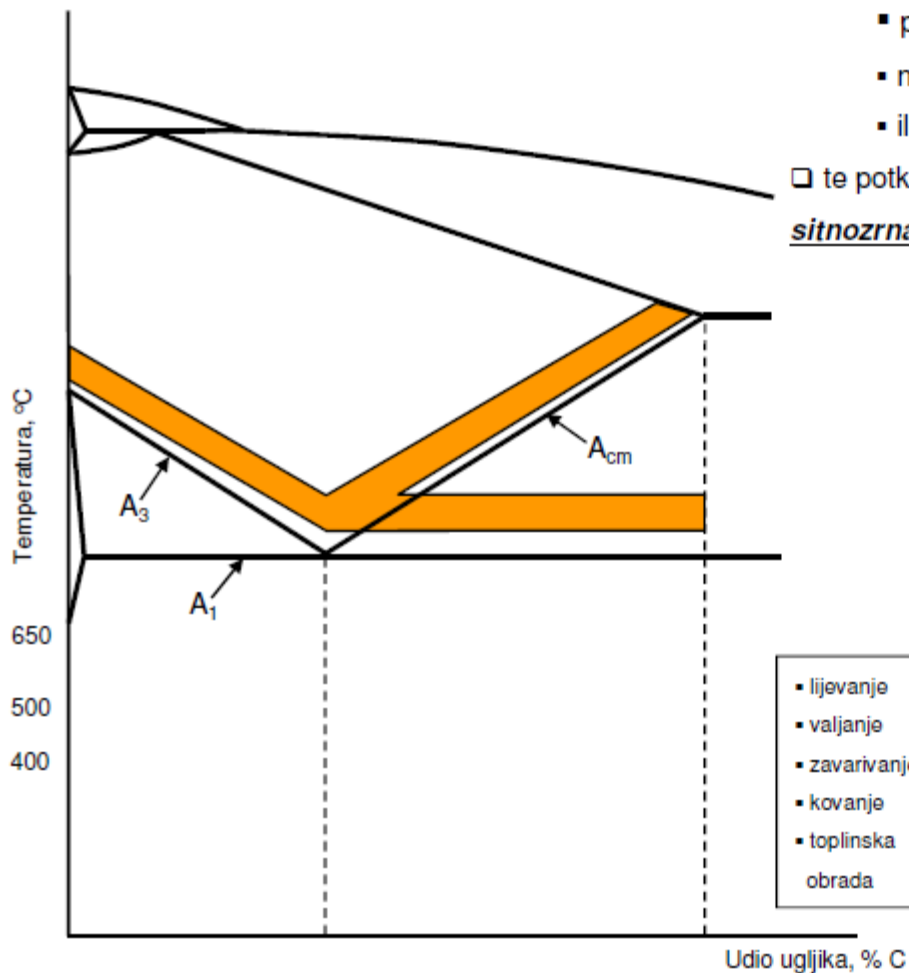
1. po vrsti:

Prethodnim toplinskim tretmanom (bilo slučajnim ili namjernim) čelik može sadržavati martenzit M, austenit A, bainit B, koji se postupkom normalizacije transformiraju u ferit , perlit P i cementit Fe_3C !

2. po veličini:

Ako se mikrostruktura već sastoji iz normalnih faza (ferita, perlita i cementita), ali suviše krupnih zrna zbog prethodnog dugog zadržavanja na visokim temperaturama (npr. kod obrade lijevanja, zavarivanja, kovanja, valjanja i sl.), a zatim i sporog hlađenja do sobne temperature, poduzima se naknadna normalizacija radi postizanja normalne veličine kristalnih zrna.

Normalizacijsko žarenje

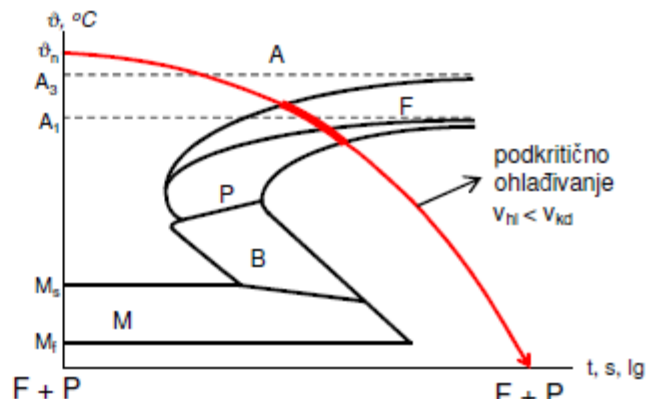


□ postupak ugrijavanja:

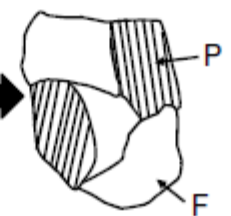
- podoeutekoidnih čelika $\vartheta_n = A_3 + (30 \dots 70) \text{ } ^\circ\text{C}$
- nadeutekoidnih čelika $\vartheta_n = A_1 + (50 \dots 70) \text{ } ^\circ\text{C}$
- ili za otapanje karbidne mreže $\vartheta_n = A_{cm} + (10 \dots 20) \text{ } ^\circ\text{C}$

□ te potkritičnog ohlađivanja ($v_{nl} < v_{kd}$ - na zraku) u svrhu postignuća

sitnozrnate i jednolične mikrostrukture



- lijevanje
- valjanje
- zavarivanje
- kovanje
- toplinska obrada



grubo kristalno zrno
(↓ žilavost)



sitnozrnata
jednolična
mikrostruktura
(↑ žilavost)

Sferoidizacijsko (meko) žarenje

Provodi se radi omogućavanja lakše obrade čelika (prvenstveno rezanjem i deformiranjem).

Ovim postupkom se, kod čelika s normalnim fazama po vrsti, obliku i veličini, izvodi **pretvorba lamelnog cementita (eutektoidni ili sekundarni cementit) u kuglasti!**

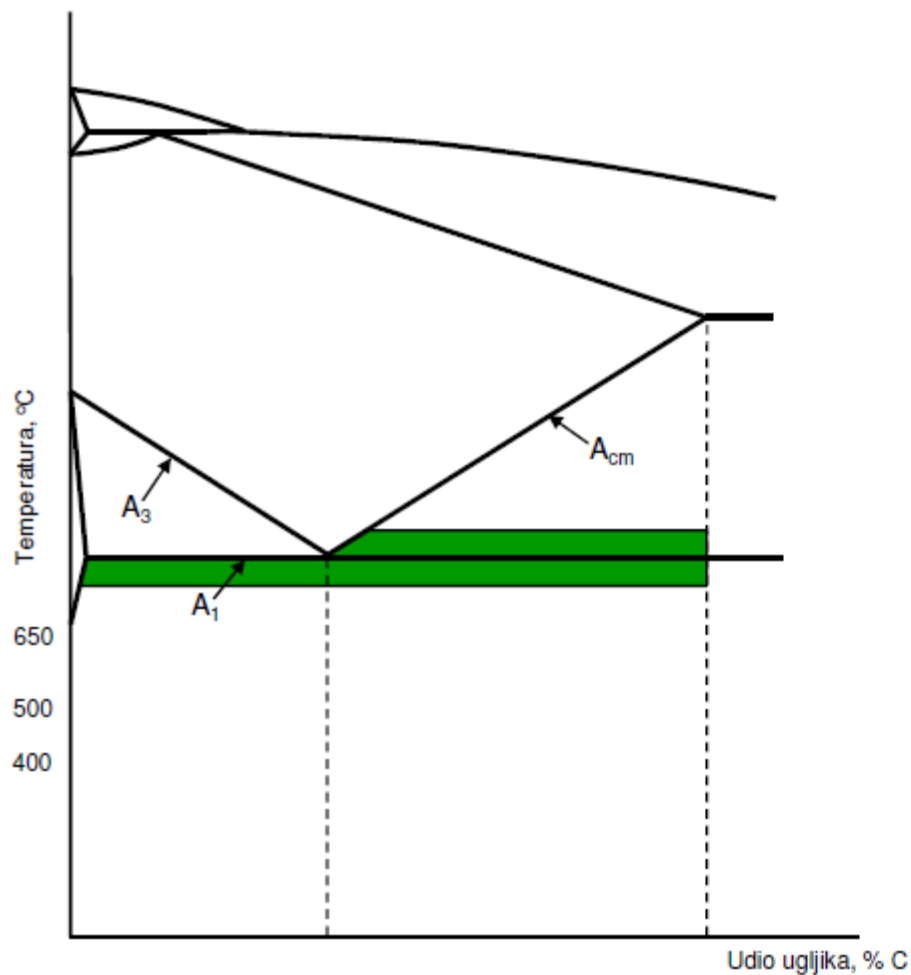
Postupak sferoidizacijskog žarenja provodi se u tri faze:

- sporo zagrijavanje čelika do temperature žarenja (podeutektoidnog do ispod A1, a nadeutektoidnog osciliranjem oko A1);
- duže zadržavanje 6 - 24h na temperaturi žarenja (na tim temperaturama lamele cementita teže ka pretvorbi u kuglasti oblik (oblik s minimalnim sadržajem energije za tu temperaturu);
- naknadno vrlo sporo hlađenje u peći s ciljem minimiziranja zaostalih naprezanja.

Fizikalna osnova procesa sferoidizacije objašnjava se djelovanjem površinskih napetosti u smislu nastajanja kuglastih oblika (oblik kugle ima najmanju površinu – najmanju površinsku energiju za dani volumen kristalnog zrna). Djelovanjem površinske napetosti lamele postaju sve kraće i deblje tako da na kraju postupka prelaze u približno kuglasti oblik. Konačna struktura su kuglice cementita u feritnoj matrici.

Tim se postupkom dobiva najmekše stanje čelika i najlakša obradivost rezanjem ili deformiranjem.

Meko žarenje ili sferoidizacija

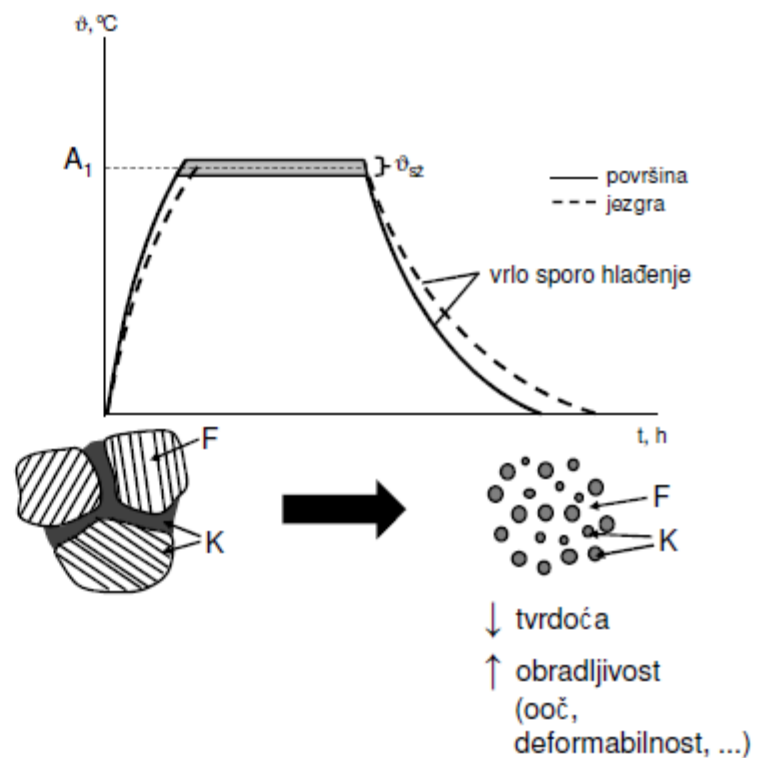


□ postupak koji se sastoji od:

- ugrijavanja oko A_1
- duljeg držanja na ϑ_{sz}
- vrlo sporog ohlađivanja

□ svrha:

- prevođenje lamelarnih (eutektoidnih) i mrežastih (sekundarnih) karbida u kuglasti oblik



Ovaj postupak se primjenjuje za čelike s više od 0,5 % ugljika, a naročito za legirane čelike s mnogo karbida.

Čelici s $C < 0,5$ % sami su po sebi dovoljno mekani, pa se kod njih ovaj postupak ne primjenjuje!

Mekim žarenjem niskougljičnih čelika dobila bi se premekana struktura koja bi se za vrijeme obrade rezanjem lijepila na oštricu alata i time otežavala obradu.

Omekšavajuće žarenje poduzima se kada je čelik s ravnotežnim fazama po vrsti, obliku i veličini još uvijek previše tvrd za obradu (npr. legirani čelici s većim sadržajem ugljika – za ležajeve, alate...).

Ovaj se postupak u praksi često naziva i ***meko žarenje***.

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja koristi se:

- za redukciju naprezanja zaostalih nakon prethodne obrade zbog nejednolikih unutarnjih deformacija nastalih pri prijelazu iz elastične u plastičnu deformaciju ili kao rezultat stalnih plastičnih deformacija.**
- kod obradaka debelih stijenki, koji su bili obrađivani na visokim temperaturama, a neravnomjerno ohlađivanje izaziva naprezanja. Naprezanja su to veća što su razlike u debljini stijenke obratka veće i što je temperatura obratka viša npr. kod zavarivanja.**

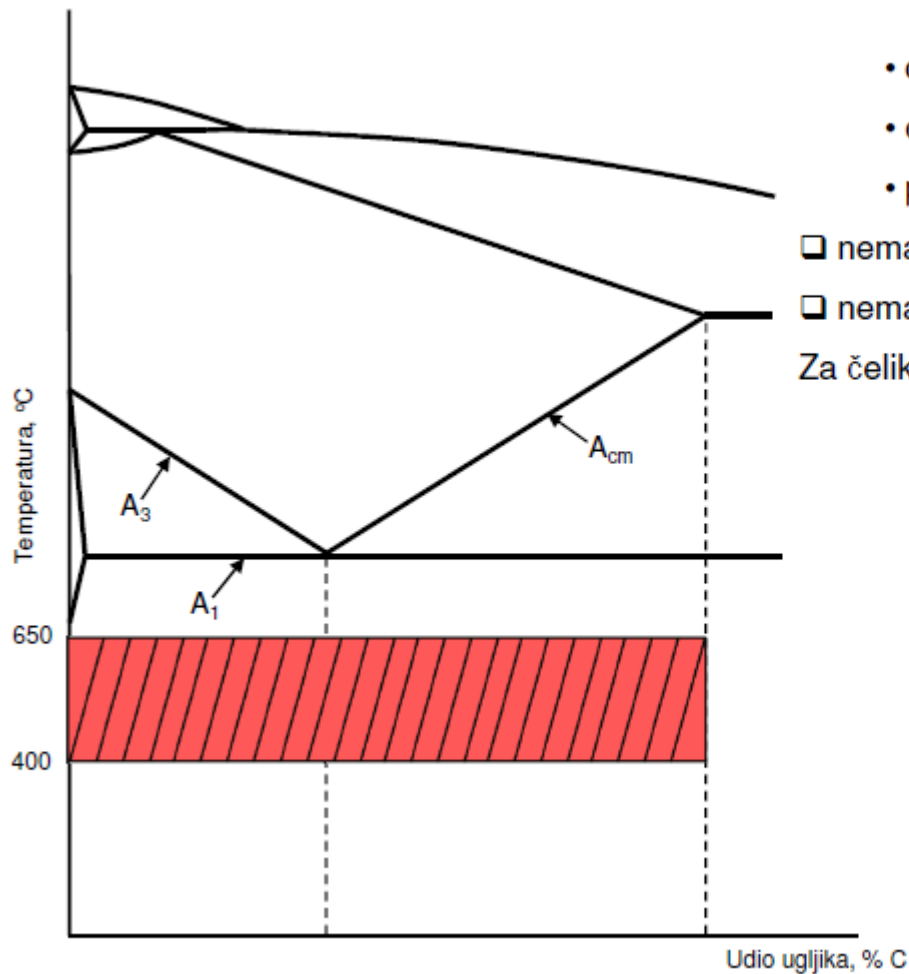
Ako se ne želi poništiti efekt očvršćivanja nastalim prethodnim hladnim gnječenjem čeličnog obrtka, žarenje se izvodi ispod temperature rekristalizacije.

Ako je čelik prethodno zakaljen, može se izvesti djelomično popuštanje zaostalih naprezanja na temperaturi 100 - 300°C što neće bitno umanjiti njegovu tvrdoću.

Kontrolni i mjerni alati popuštaju se na temperaturi 150°C kako bi se postigla stabilnost dimenzija.

Zaostala naprezanja su štetna jer u korozivnom mediju brže korodiraju, propadaju čelični dijelovi u kojima su veća zaostala naprezanja.

Žarenje za redukciju zaostalih napreznja



□ cilj je smanjenje zaostalih napreznja nastalih pri:

- deformiranju
- obradi odvajanjem čestica (OOČ)
- prebrzom ohlađivanju nakon žarenja, zavarivanja...

□ nema bitnih promjena mehaničkih svojstava

□ nema mikrostrukturnih promjena

Za čelike: 400..650 °C/2 i više h / hlađenje vrlo sporo.

Homogenizacijsko ili difuzijsko žarenje

Homogenizacijsko žarenje se primjenjuje za izjednačavanje kemijske neujednačenosti kristalnih zrna kristala mješanaca u čeliku, tj. za smanjenje mikrosegregacije kod čeličnih odljevaka i šipki, i to uglavnom kod legiranih čelika.

Izvodi se zagrijavanjem do visokih temperatura 1100–1200°C jer samo u tom slučaju postoji potpunije protjecanje difuzijskih procesa neophodnih za izjednačavanje kemijskog sastava u pojedinim dijelovima čelika.

Vrijeme trajanja procesa (zagrijvanje, držanje na temperaturama i sporo hlađenje) traje od 80–100 sati.

Nakon homogenizacijskog žarenja, zbog visokih temperatura i dugotrajnog zagrijavanja, dobiva se krupnozrna struktura.

U cilju usitnjavanja metalnih zrna i popravljivanja svojstava kod čeličnih šipki se postiže naknadnom obradom deformiranjem, a odljevci se podvrgavaju potpunom žarenju ili normalizaciji.

Sporo odvijanje difuzijskih procesa, u uvjetima normalnog hlađenja (kristalizacije), dovodi do različitog kemijskog sastava kristala. Neujednačenost sastava unutar kristala naziva se mikrosegregacija, mikrorazlučivanje.

Žarenje na grubo zrno (visokotemperaturno žarenje)

- Svrha ove toplinske obrade je pogoršanje mehaničkih svojstava, najprije žilavosti i rastezljivosti čelika.
- **Razlog žarenja na grubo zrno** je taj što niskouglični čelici, zbog svoje visoke žilavosti i rastezljivosti, stvaraju određene probleme pri obradi odvajanjem čestica. Veliki dio topline, razvijen plastičnom deformacijom kod procesa rezanja, odvodi odvojena čestica. Nastaje trakasta čestica (kod žilavih i rastezljivih materijala, koja zbog tijesnog dodira s prednjom plohom oštrice predaje alatu velik dio topline. Dodatna toplina nastaje i zbog trenja koje se javlja između čestice i alata. Pretjerano zagrijavanje izaziva brže trošenje alata i češće zastoje u proizvodnji.
- Za izbjegavanje te pojave, izvodi se visokotemperaturno žarenje s ciljem stvaranja kratke čestice kod inače žilavih čelika (sa C < 0,5 %). Grijanjem visoko u austenitno područje nastaje koagulacija (objedinjavanje) zrna austenita, pa se nakon hlađenja na sobnoj temperaturi struktura sastoji od većih kristala (grubih zrna) ferita i perlita, što rezultira slabijom žilavosti i rastezljivosti. Stoga se odvojena čestica pri nastajanju i savijanju u procesu rezanja lomi odvođeći toplinu razvijenu procesom rezanja. To je važno ako se čelik kani obrađivati na automatskim alatnim strojevima (tzv. automatima).

Ako je potrebno, izgubljena svojstva nakon žarenja na grubo zrno mogu se vratiti usitnjavanjem zrna primjenom toplinske obrade normalizacije, odnosno normalizacijskim žarenjem.

Površinsko kaljenje

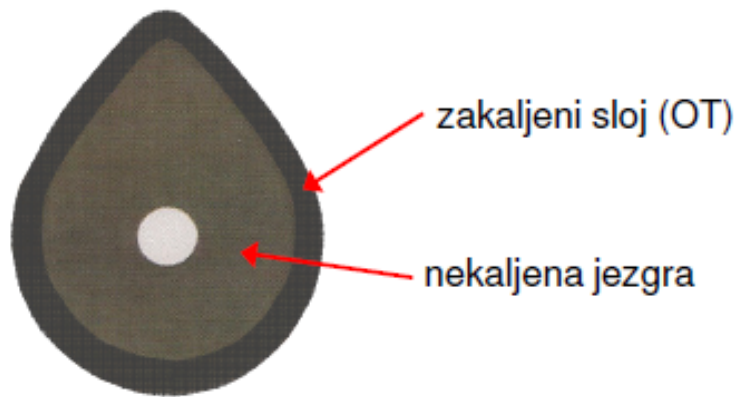
- Zagrijava se samo površinski sloj do temperature iznad točke A3 za podeutektoidne, i iznad točke A1 za nadeutektoidne čelike, a zatim hladi brzinom većom od kritične brzine, s ciljem dobivanja martenzitne mikrostrukture u površinskom sloju.
- Kali se samo površinski sloj a jezgra obratka zadržava svoju početnu mikrostrukturu.
- Cilj površinskog kaljenja je povećanje: površinske tvrdoće, otpornosti na trošenje, otpornosti na koroziju i dinamičke čvrstoće.

U industrijskoj praksi najviše se koristi postupak površinskog kaljenja indukcijskim zagrijavanjem, a zatim se odmah hladi da bi se spriječilo dublje prodiranje topline, a time i veće prokaljivanje.

Izvori topline moraju biti jaki, da se jezgra ne stigne zagrijati. Klasičan način zagrijavanja ne koristi se zbog presporog prijelaza topline pri čemu se progrijava čitav komad.

Izvori topline (velika gustoća energije):

- plinski plamenici
- inducirana električna energija
- laserski snop
- elektronski snop



Kaljenje plamenom

Površina predmeta naglo se zagrijava plamenicima koji daju potrebnu toplinu izgaranjem smjese acetilena i kisika. Iza plamenika postavljene su mlaznice koje zagrijanu površinu naglo ohlade.

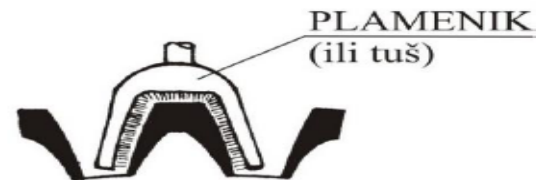
Dubina zakaljenog sloja može se regulirati duljim zagrijavanjem ili dužim zadržavanjem do naglog hlađenja. Ovaj se postupak ne može koristiti za predmete malog poprečnog presjeka.

Kaljenje zubi zupčanika plamenom



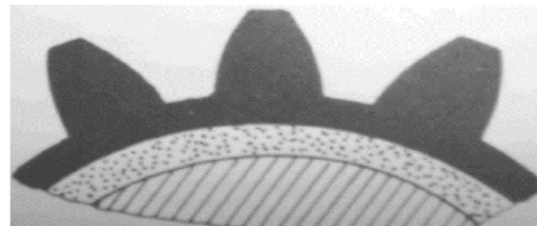
a) SIMETRIČNO
jedan bok zuba

*Simetrično površinsko
kaljenje zubi zupčanika plamenom*



b) ASIMETRIČNO
oba boka zuba istodobno

*Asimetrično površinsko
kaljenje zubi zupčanika plamenom*



*Potpuno prokaljeni zubi
zupčanika*

SREDSTVA ZA HLAĐENJE

Brzina hlađenja čelika s temperature kaljenja ima veliki utjecaj za postizanje željenih mikrostruktura čelika kao i na krajnji rezultat kaljenja.

Pravilan izbor sredstva za hlađenje mora osigurati željenu mikrostrukturu po cijelom poprečnom presjeku čeličnog obratka, bez pojava većih unutarnjih naprezanja, prsnuća i deformacija.

Prema standardu ISO 6743-14, sredstva za hlađenje koja se primjenjuju u procesu kaljenja dijele se na:

- H - ulja
- A - voda i otopine polimera, emulzije
- S - rastaljene soli
- G - plinovi
- F - fluidizirane kupke
- K - druga sredstva za gašenje

Ulja, voda, polimeri i emulzije kod hlađenja stvaraju parni omotač, dok rastaljene soli, plinovi, fluidizirane kupke, tehnički plinovi, mirni i komprimirani zrak ne stvaraju parni omotač. Parni omotač djeluje kao izolator i sprječava kontakt sredstva za gašenje i metalne površine obratka koji se nakon kaljenja gasi.

Prilikom uranjanja vrućeg obratka u sredstvo za hlađenje, koje stvara parni omotač, ohlađivanje se odvija u tri faze:

- faza parnog omotača,
- faza vrenja
- faza konvekcije

U fazi parnog omotača, koji nastaje po uranjanju vrućeg obratka u sredstvo za hlađenje, oko obratka se stvara parni omotač koji djeluje kao izolacija i sprječava hlađenje.

Trajanje ove faze ovisi o sredstvu gašenja.

Snižavanjem temperature parni omotač postaje nestabilan i dopušta kontakt između obratka i sredstva gašenja.

U fazi vrenja – vrenje sredstva za hlađenje brzo odvodi toplinu s obratka. Prilikom vrenja mjehurići izlaze iz tekućine i na njihovo mjesto dolazi hladna tekućina, a posljedica je brzo odvođenje topline. U ovoj fazi je maksimalna brzina hlađenja, ali se snižavanjem temperature smanjuje i vrenje.

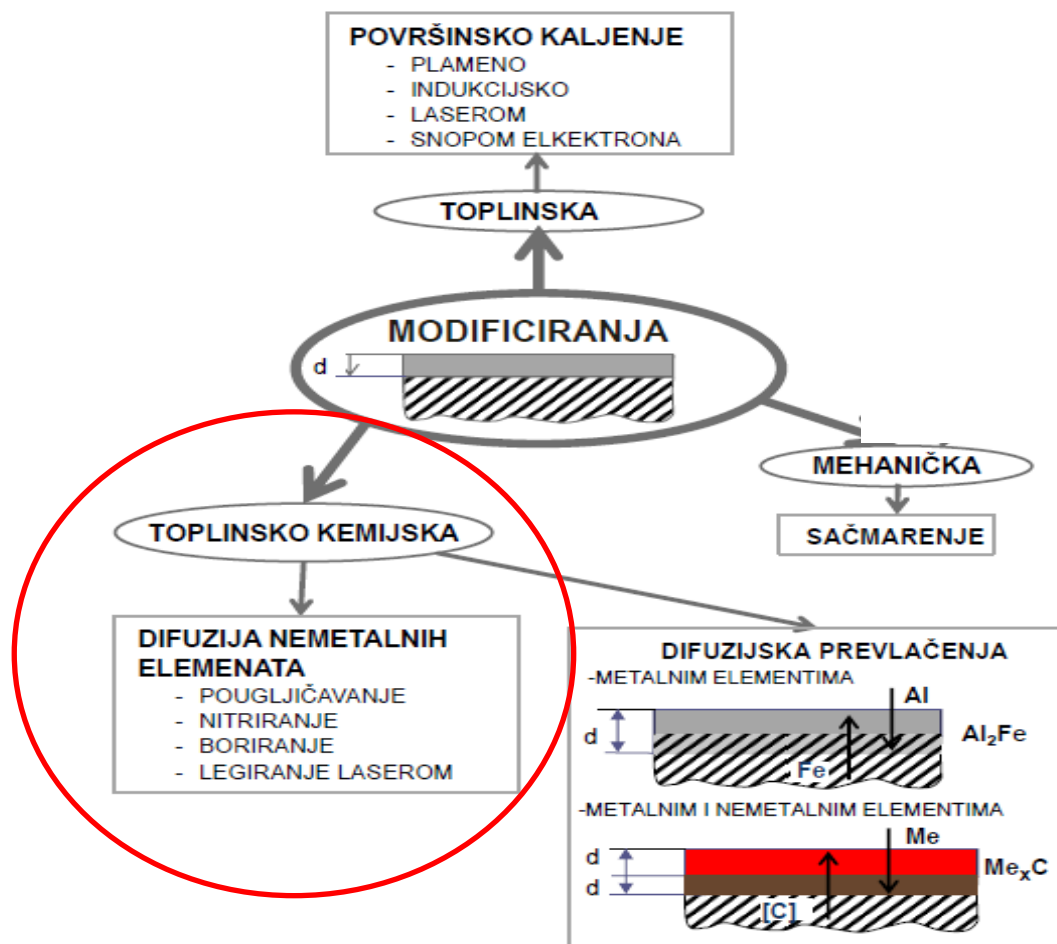
U fazi konvekcije, pri temperaturi obratka nižom od temperature vrenja sredstva gašenja, toplina se odvodi samo izmjenom strujanja topline - konvekcijom sa sredstvom za hlađenje. Ovaj se postupak može ubrzati cirkulacijom sredstva gašenja ili gibanjem obratka kroz sredstvo.

Za hlađenje ugljičnih i niskolegiranih čelika uobičajeno sredstvo je voda i slana voda.

Za hlađenje legiranih čelika upotrebljavaju se mineralna ulja koja imaju znatno manju brzinu hlađenja u odnosu na vodu.

Prednost ulja kao sredstva za hlađenje je u tome što: imaju višu temperaturu isparavanja (250–300°C); manju brzinu hlađenja u temperaturnom intervalu martenzitne pretvorbe, pa je smanjena mogućnost stvaranja prsnuća; ne mijenjaju sposobnost hlađenja s promjenom temperature ulja u širokom intervalu od 20–150°C.

TOPLINSKO KEMIJSKI POSTUPCI MODIFICIRANJA POVRŠINE ČELIČNOG OBRATKA



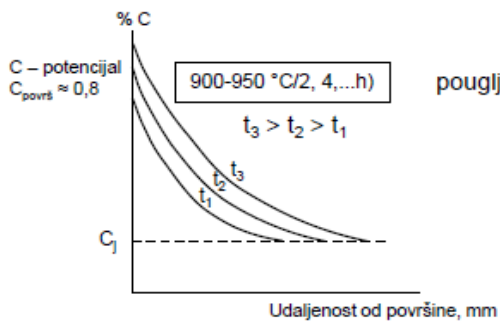
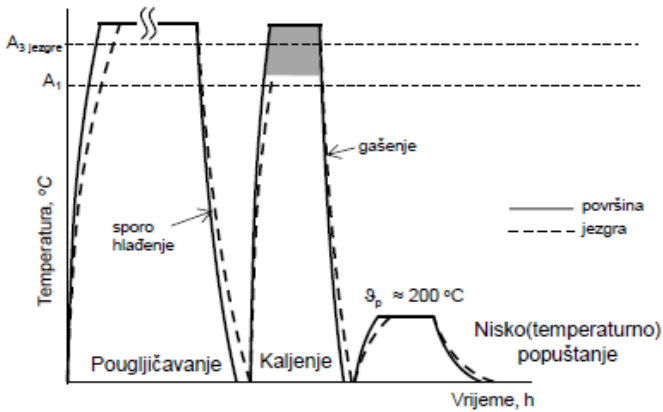
Cementiranje čelika

Austenitno područje

- cemetiranje**]
- termokemijske obrade **pougličavanja** (obogaćivanje površ. slojeva s C)
 - kaljenja
 - nisko(temperaturnog) popuštanja

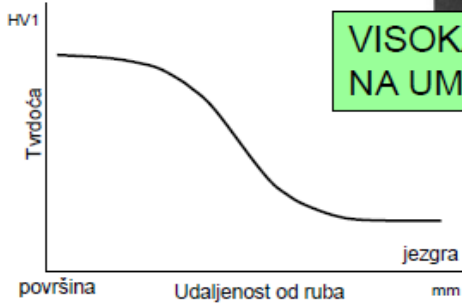
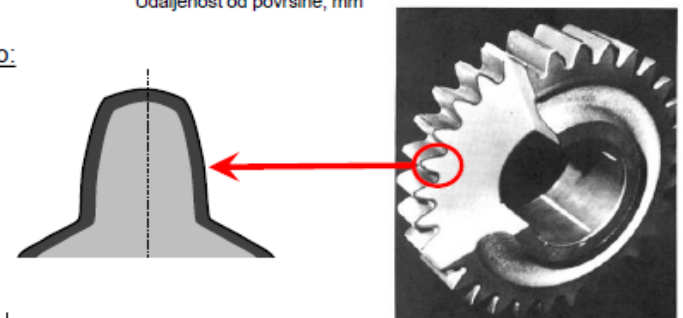
- cilj cementiranja:
- tvrdi površinski slojevi otporni na trošenje
 - žilava jezgra otporna na udarna opterećenja

□ niskouglični čelici (do 0,25 %C)



- pougličavanje - sredstva:
- kruta
 - tekuća
 - plinovita
 - plazmatična

cementirano:

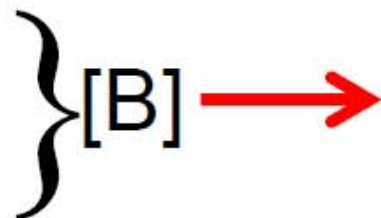


VISOKA OTPORNOST NA UMOR POVRŠINE!!

- zupčanici
- bregaste osovine

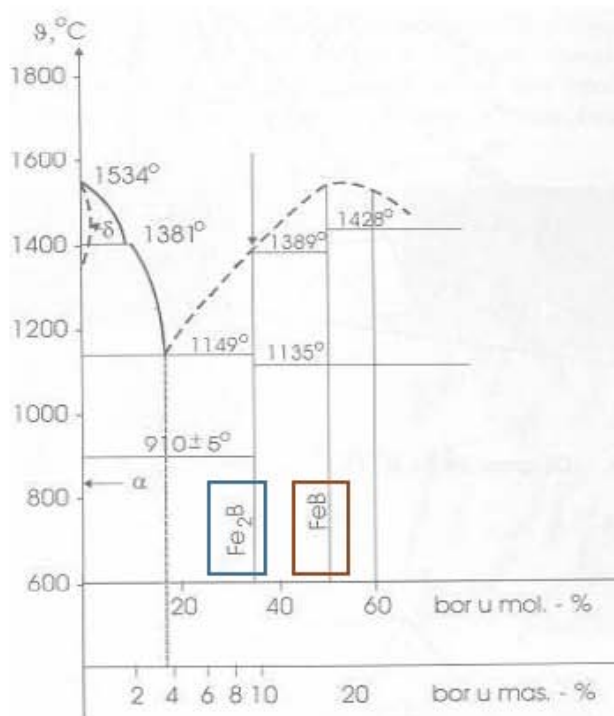
Boriranje čelika

- plin
- tekuće sredstvo
- prašak (granulat)
- pasta

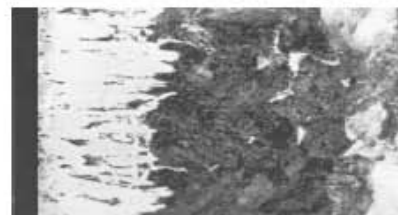


*FeB (1900 – 2100 HV), 16.2 %B,
rombska rešetka, vlačna zaostala naprezanja*

*Fe₂B (1800 – 2000 HV), 8.83 %B,
FCC, tlačna zaostala naprezanja*



AISI 1015



AISI 1045



AISI W 110

940 °C/ 4 h, 300:1, nagriženo u Nital-u

PRIMJERI BORIRANIH DIJELOVA



Nož za rezanje duhana



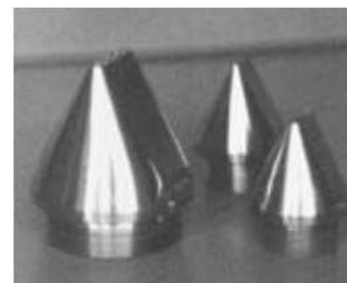
Pužni vijci pumpe



Rotor centrifugalne pumpe



Impeler kompresora



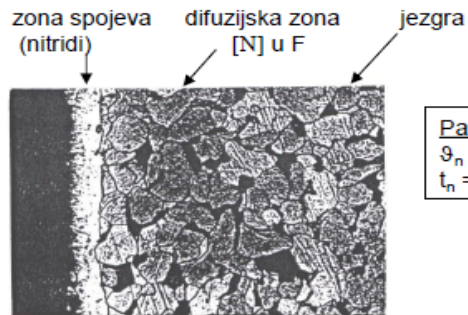
Alat za provlačenje
žice

Nitriranje čelika

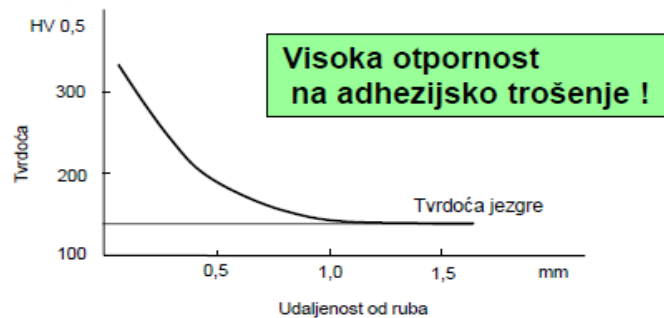
Feritno područje

nitiranje - obogaćivanje površinskih slojeva dušikom → nitridi (FeN)

- solne kupke
- plinske atmosfere
- ionizirane plinske atmosfere s reguliranim potencijalom dušika (N)



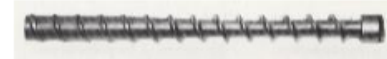
Parametri nitiranja
 ϑ_n ispod A_1 (400...600 °C)
 t_n = do nekoliko h



- klipnjača



- pogon tahometra



- pužni vijak



- zupčanci uljne pumpe



- ukovanj

UREĐAJI ZA IZVOĐENJE TOPLINSKE OBRADU

Postupak zavarivanja složenih konstrukcija, konstrukcija izrađenih iz limova veće debljine, konstrukcija izrađenih iz čelika povišenih čvrstoća ili niskolegiranih čelika zahtijeva **toplinsku obradu prije zavarivanja ili nakon zavarivanja a najčešće prije i poslije.**

Zaostala naprezanja nastala zavarivanjem, odžarivanjem praktički gotovo nestaju.

Postupci toplinske obrade u pravilu se izvode u dvije faze: zagrijavanje i hlađenje.

Sistematizacija uređaja za zagrijavanje: prema izvoru energije, namjeni, temperaturnom području rada.

Grijanje plamenom

Ovdje se ubrajaju kovačka vatra i zagrijavanje plamenom (izgaranjem smjese acetilen-kisik). Koristi se za manje zahtjevne obrade u pomanjkanju suvremenih uređaja i to za progrijavanje samo jednog dijela obratka (npr. oštrica dlijeta). Plamen ima štetan utjecaj jer kemijski reagira s površinom izratka.

Grijanje u komornim pećima

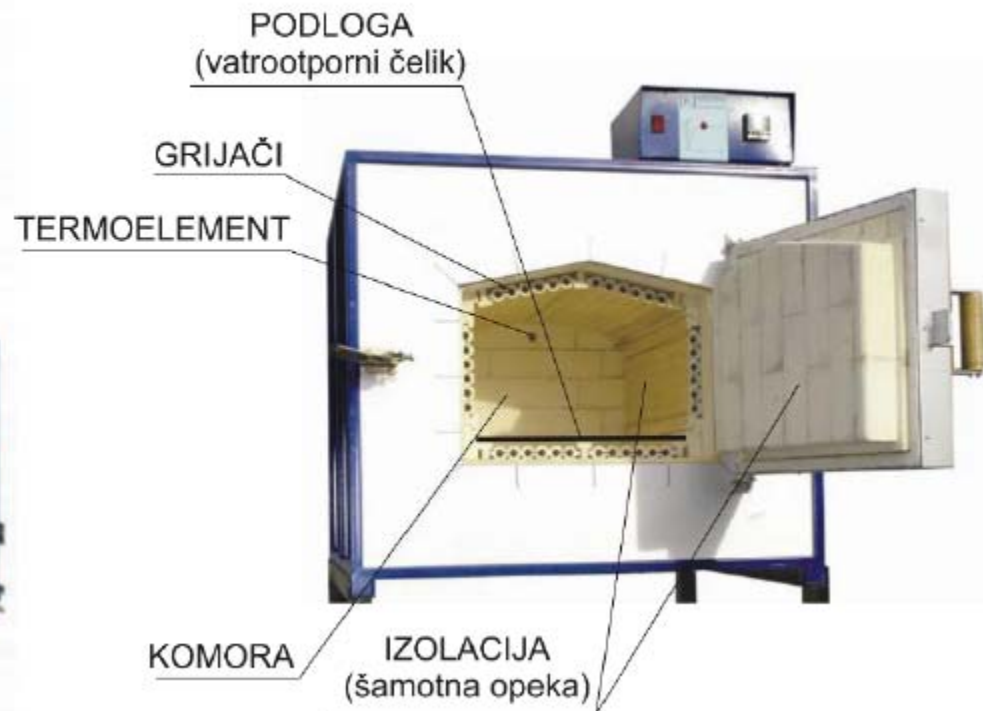
Grijanje se odvija u zatvorenim, toplinski izoliranim komorama izgaranjem goriva ili s pomoću električne energije. Nedostatak komornih peći je pojava reakcije površine predmeta s atmosferom u peći (dolazi do oksidacije i razugljičenja površine). Predmeti se mogu zaštititi umatanjem u posebne obloge ili ulaganjem u metalne kutije ispunjene neutralnim sredstvom (čelične komponente ulažu se u kutije ispunjene usitnjenim izgorjelim koksom, strugotinom sivog lijeva, grafitnim prahom .

Bolje rješenje je upotreba jamske peći koje se griju sa strane. Predmeti pri grijanju mogu biti hermetički zatvoreni i zaštićeni inertnim plinom (argon). Komorne peći mogu biti sa zaštitnom atmosferom (inertni plin) čime se izbjegava oksidacija površine predmeta.

U oba opisana slučaja prijenos topline vrši se kondukcijom između stijenke peći i površine predmeta oslonjene na stijenku, konvekcijom (prirodnom ili prisilnom cirkulacijom) te zračenjem sa stijenki peći na površinu predmeta.



Jamska peć



Komorna peć

Grijanje u vakuumskim pećima

Ove peći imaju hermetički zatvorenu komoru s postavljenim grijačima u unutarnjem dijelu komore.

Prije upotrebe vakuumskom se pumpom evakuira zrak iz peći.

Hlađenje nakon austenitizacije izvodi se ili puštanjem hladnog inertnog plina ili spuštanjem predmeta u uljnu kupku ispod peći. Površina obrađenih predmeta vrlo malo oksidira tako da zadržava metalni sjaj.

Toplina se prenosi uglavnom zračenjem, jer je u atmosferi vrlo mala količina molekula koje prenose toplinu konvekcijom. Predmeti koji se nalaze u "sjeni" grijača griju se sporije zračenjem s okolnih predmeta, što je glavni nedostatak ovog tipa peći. Veliki dio topline reflektira se o sjajnu površinu predmeta i vraća prema grijačima.



Vakuumska peć

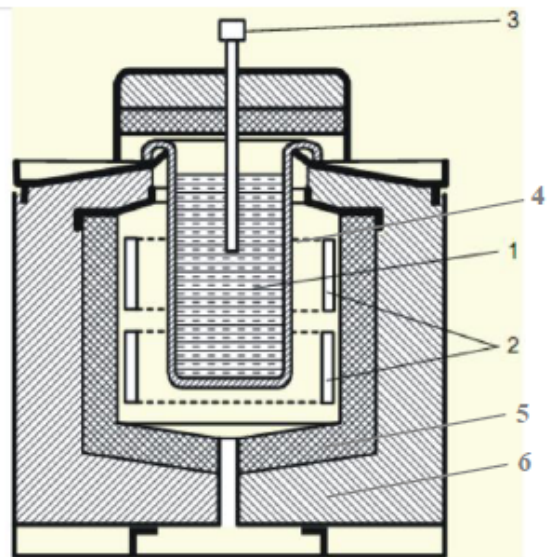
Grijanje u kupkama

Kupke mogu biti s ugrijanom vodom (do 100°C), uljem (do 300°C), rastaljenim metalom (do 700°C) i rastaljenim solima (do 1350°C). Za temperature do 900°C koriste se kupke s metalnim posudama dok se za više temperature zbog opasnosti taljenja ili intenzivna propadanja lonca upotrebljavaju šamotne jame. Soli za niže temperature (do 550°C) mješavine su alkalnih nitrata, a za više temperature alkalni i zemno alkalni kloridi.

Toplina se u kupkama intenzivno provodi kondukcijom (vrijeme zagrijavanja znatno je kraće nego u komornim pećima). Ovisno o vrsti kupke, npr. za zagrijavanje komada na temperaturu 800°C, vrijeme izjednačavanja temperature u čitavom presjeku za svaki milimetar promjera je:

- u električnoj komornoj peći 45 s
- u solnoj kupki 14 s
- u olovnoj kupki 7 s.

Prednost ove metode je zaštita površine predmeta i velika brzina zagrijavanja. Nedostatci su: skuplja obrada (otpadne vode treba neutralizirati), potreba čišćenja površine obrađenih predmeta jer na sebi zadrže manju količinu soli i relativno veliki gubici energije zračenjem površine kupke na okolni prostor.



- 1 – solna kupka
- 2 – grijači
- 3 – uronjivi termoelement
- 4 – čelični lonac (do 900°C)
- 5 – šamotna opeka otporna na visoke temperature
- 6 – lagana šamotna izolacija

Peć sa solnom kupkom

Indukcijsko zagrijavanje

Ova metoda se najčešće primjenjuje za površinsko zagrijavanje čeličnih komponenata.

Izradak se postavlja u svitak koji proizvodi izmjenično magnetsko polje koje inducira struju iste frekvencije u obratku. Zbog otpora prolaskom struje dolazi do zagrijavanja predmeta. Ako se želi izvoditi samo površinska toplinska obrada, potrebno je koristiti se strujom visoke frekvencije. Povećanjem frekvencije lokalizira se područje zagrijavanja na sve tanji površinski sloj izratka.



Indukcijsko zagrijavanje



Uređaj za indukcijsko grijanje niske frekvencije

Odžarivanje Claus peći za izgaranje reakcijskog plina, Bimont d.d. Rijeka
Plast $\varnothing 2400$ mm, prirubnica plašta $\varnothing 1400$ mm
Masa 7600 kg



Predgrijavanje dijela sekcija broda – jaružara, Brodogradilište Uljanik d.d. Pula



Predgrijavanje i odžarivanje cijevi izmjenjivača topline, Đuro Đaković TEP d.o.o. Slavonski Brod



Literatura

1.	Callister,William D., 1940- Materials science and engineering : an introduction / William D. Callister, Jr.—7th ed.
2.	Matijević, Božidar , Osnove toplinske obrade II,
3.	www.metalvar.hr
4.	Gabrić, Igor, Šitić Slaven, MATERIJALI II, Split 2015.