

TERMIČKA OBRADA METALA

1. CILJ I GLAVNE VRSTE TERMIČKE OBRADE

Cilj termičke obrade je, da poboljša jedno (ili više) određeno svojstvo materijala takvim tehnološkim postupkom, u toku kojeg se elementi mašina zagrevaju na celishodno izabranu temperaturu, drže ih na toj temperaturi i posle određenog vremena upravljanom brzinom ohlade. U toku ovih procesa, svojstva materijala se tako menjaju, da bi ti elementi izdržali sva naprezanja koja nastaju u toku rada bez oštećenja. Izbor vrste termičke obrade vrši se tako, da se u toku odvijanja procesa ne dolazi do bitnih promena oblika i mera termički obrađenih predmeta. Postupci termičke obrade dele se u četiri grupe:

1. Postupci, čiji je zadatak omekšavanje materijala i smanjenje unutrašnjih napona.
2. Postupci, čiji je krajnji cilj očvršćavanje mašinskih delova u celosti ili samo na površini da bi mogli izdržati pritisak i da postanu otporni na habanje.
3. Postupci, čiji je zadatak povećanje žilavosti materijala.
4. Postupci, pomoću kojih se vrši i legiranje površine gotovih komada.

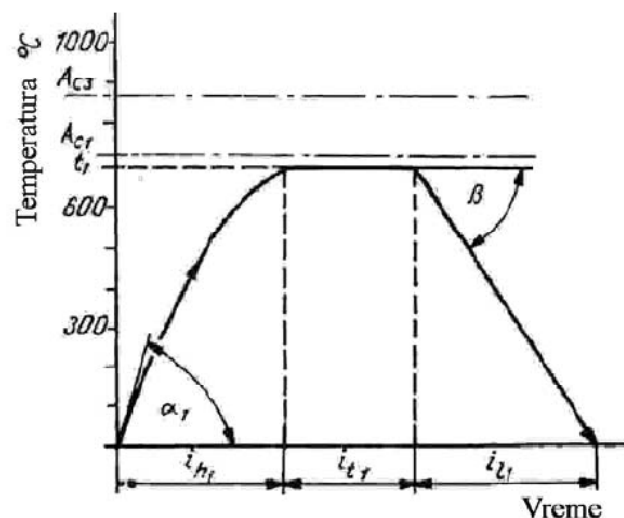
2. METODA TERMIČKE OBRADE: DIJAGRAMI TEMPERATURA-VREME

Bilo koji proces termičke obrade sastoji se od tri faze:

- zagrevanje do temperature, čija veličina zavisi od cilja termičke obrade,
- držanje na toj temperaturi za vreme koje je potrebno za odvijanje transformacija,
- hlađenje upravljanom brzinom.

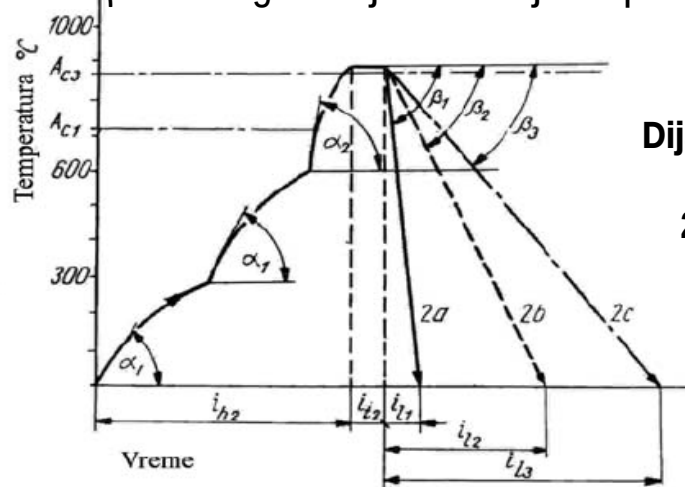
Tok odvijanja procesa termičke obrade je određen **dijagramima temperatura-vreme**. U toku određivanja tokova termičke obrade, ove dijagrame tako treba izraditi, da termička obrada izvršena na osnovu njih, obezbedi *najbolja svojstva* komada na *najekonomičniji* način i da sprečava dobijanje škarta.

Slika dole levo prikazuje takav proces termičke obrade, kod koje je temperatura manja od A_{c1} (prva kritična tačka prilikom zagrevanja). Zbog toga kod ovog procesa se neće odvijati preobražaj $\alpha \Rightarrow \gamma \Rightarrow \alpha$.



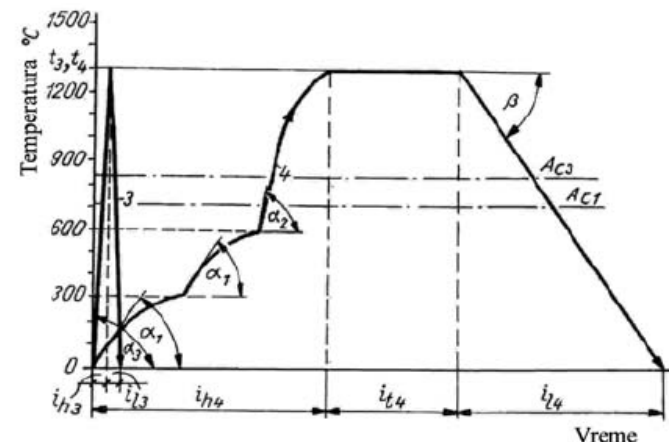
Dijagram temperatura-vreme ako je temperatura manja od A_{c1}

Slika dole prikazuje dijagram takvih procesa termičke obrade kod kojih je temperatura veća od A_{c3} . Zbog toga u toku obrade dolazi do preobražaja $\alpha \Rightarrow \gamma \Rightarrow \alpha$. Zagrevanje se odvija stepenasto.



**Dijagram temepratura-vreme ako je temperatura veća od A_{c3}
2a-kaljenje, 2b-normalizovanje
2c-potpuno otpuštanje**

Slika desno prikazuje dijagram takvih procesa termičke obrade, kod kojih je temperatura dostigla vrednost pregrevanja. Dijagram br. 3 predstavlja indukciono kaljenje kore, kod kojeg se zagrevanje odvija velikom brzinom i bez držanja na toj temperaturi odmah sledi brzo hlađenje. Dijagram br. 4 određuje takvu termičku obradu koja obezbeđuje najveću vrednost koeficijenta difuzije i ne uzima u obzir štetno povećanje zrna. Ovakav slučaj se javlja kod kombinacije termičke obrade i kaljenja.



**Dijagram temperatura-vreme ako je temperatura veća od temperature pregrevanja
3-indukciono kaljenje, 4-difuziono žarenje**

Kod određivanja procesa termičke obrade prvo se izabere temperatura zagrevanja, čija veličina zavisi od vrste termičke obrade. Posle se određuje brzina zarenja koja zavisi od materijala i dimenzija komada. Vreme držanja na temperaturi treba da bude toliko dugačko da obezbedi odvijanje procesa do kraja. Brzina hlađenja zavisi od tražene vrste preobražaja $\gamma \Rightarrow \alpha$.

Ekonomičnost termičke obrade može da se obezbedi biranjem najkraćih potrebnih vremena za odvijanje pojedinih faza procesa, koja će još obezbediti ostvarivanje cilja termičke obrade i neće dovesti do pojave škarta.

3. UTICAJ SREDINE NA PREDMET U TOKU ZAGREVANJA

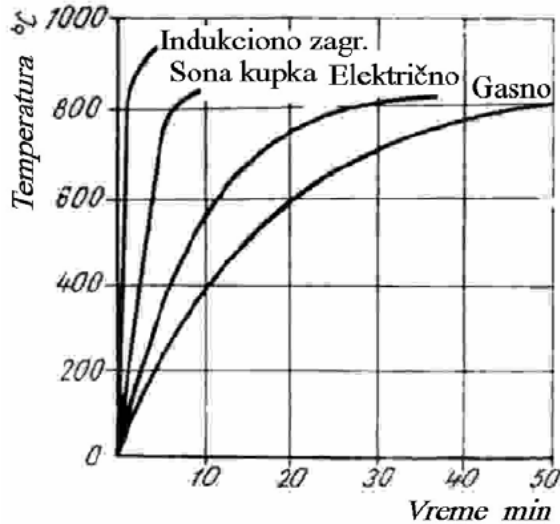
U toku zagrevanja predmet je okružen sredinom u obliku gasa ili tečnosti. U toku zagrevanja i držanja predmeta na povišenoj temperaturi nastaje međusobni hemijski uticaj između predmeta i njegove sredine, čija posledica redovno je promena hemijskog sastava površinskog sloja predmeta. Uticaj sredine može biti oksidacioni, redukcion i sa oduzimanjem ugljenika, legirajući ili neutralni. U slučaju termičke obrade sa legiranjem uvek nastaje obogaćenje površinskog sloja predmeta nekim elementom (C, N, Al, Cr, Si, S), što predmet uzima od sredine. Proces bogaćenja može da se podeli na dve etape:

- adsorpcija atoma elementa na metalnoj površini, i
- difuzija adsorbovanih atoma prema unutrašnjosti predmeta.

Procesi termičke obrade se odvijaju u pećima. Gasna sredina u pećima utiče na zagrejani čelični predmet oduzimanjem ugljenika iz površinskog sloja tog predmeta, a osim toga izaziva i koroziju. Zbog toga je neophodno čelične predmete zaštititi od tog uticaja za celo vreme procesa. Ova zaštita se ogleda u sprečavanju dodira između sredine i predmeta, što može biti ostvaren upakovanjem predmeta, odnosno postavljanjem predmeta u zaštitnu kupku od soli ili metala, nadalje premazivanjem predmeta nekom zaštitnom prevlakom, ali najbolji način je primena zaštitne gasne sredine, čiji se sastav može regulisati.

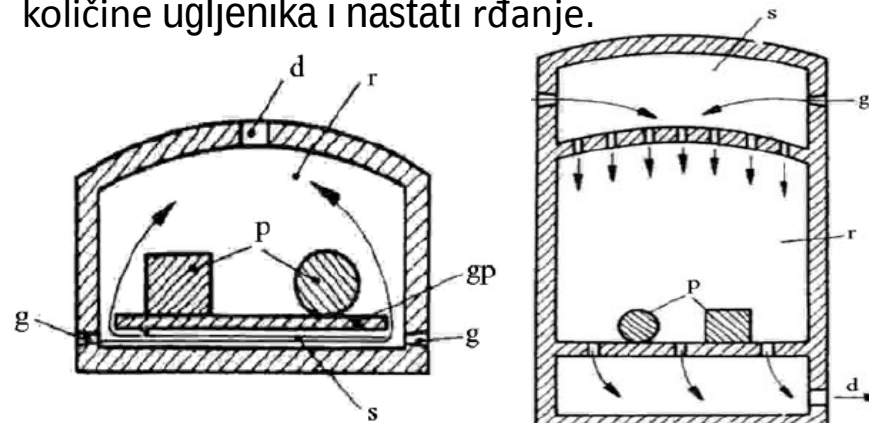
4. UREĐAJI ZA ZAGREVANJE

Gubici se najviše mogu smanjiti smanjenjem vremena termičke obrade. Zbog toga treba težiti najbržem zagrevanju što odgovara dimenzijama predmeta. Brzina zagrevanja, što se može postići u velikoj meri zavisi od izvora toplote, što se vidi na slici dole levo.



Temperatura dobijena primenom raznih izvora po vremenu

Produktivnost termičke obrade zavisi od konstrukcije uređaja. Najmanju produktivnost imaju **komorne peći**. Slike dole prikazuju takve peći sa komorom koje se zagrevaju gasom a radni predmeti su u direktnom kontaktu sa dimnim gasovima, pa se zbog toga njihove površine mogu oštetiti, jer može nastati smanjenje količine ugljenika i nastati rđanje.

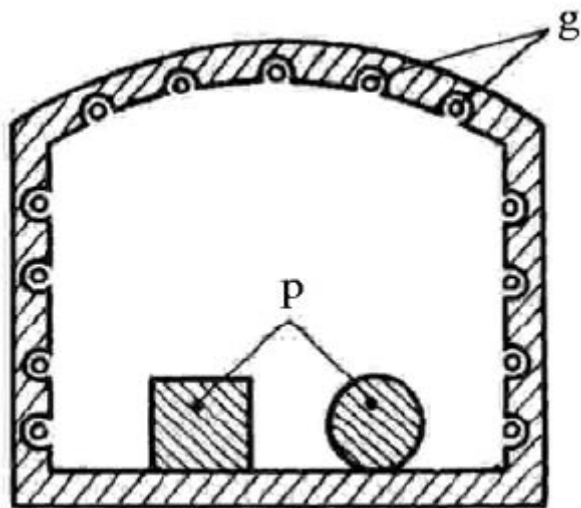


Komorna peć sa donjim loženjem pomoću grejne ploče

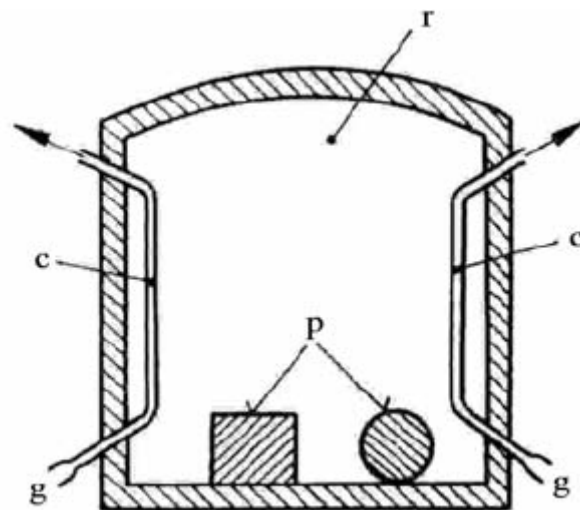
s – prostor za sagorevanje, g – gorionici,
gp – grejna ploča, p – radni predmeti,
r – radni prostor, d – dimni kanal

Komorna peć sa gornjim grejanjem
g – gorionici, s – prostor za sagorevanje, r – radni prostor, p – radni predmeti, d – dimni kanal

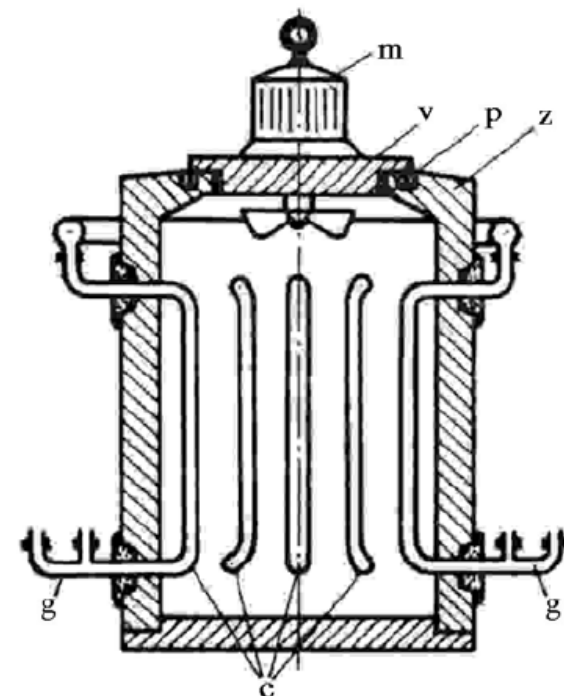
Slike na sledećem slajdu prikazuju takve komorne peći u kojima predmeti i dimni gasovi nisu u dodiru, pa se može stvoriti zaštitna gasna atmosfera. Zagrejani predmeti su zaštićeni od štetnih hemijskih uticaja dimnih gasova i u tzv. **mufl pećima**, pošto se nalaze u zatvorenom vatrostalnom muflu. Komorne peći obično imaju jedna vrata na bočnoj strani peći, vodoravno se pune i prazne. Opsluživanje im je sporo i imaju velike toplotne gubitke prilikom otvaranja vrata. **Vertikalne jamske peći** lakše se opslužuju dizalicom.



Komorna peć sa električnim grejanjem
g – grejači, p – radni predmeti



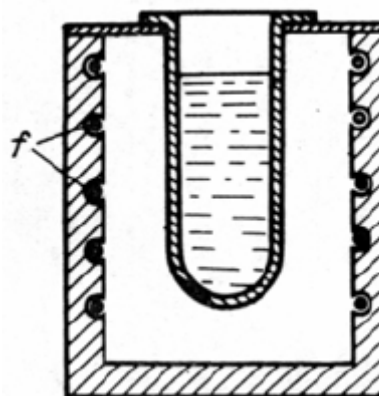
Komorna peć sa grejnim cevima
r – radni prostor, c – grejne cevi,
p – radni predmeti, g – gorionici



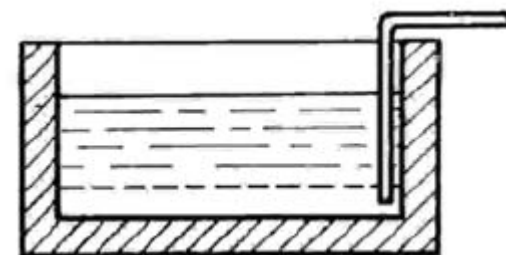
Jamska peć sa grejnim cevima
v – vrata, p – pesak za zatvaranje,
m – motor ventilatora, z – ozidanje,
g – gorionici, c – grejne cevi

Brzo zagrevanje manjih predmeta može se izvesti u **pećima sa sonom kupkom**. Poznata su dva tipa ovih peći.

Jedan je **peć sa teglom** koja se zagreva sa spoljne strane gasom, uljem ili električnim putem (slika desno). Sona kupka se nalazi u tegli izrađene od ugljeničnog čelika. Drugi tip ovih peći je **elektrodna sona kupka** koja se neposredno zagreva električnom strujom niskog napona (5...20 V), posredstvom elektroda, uronjenih u sonu kupku. Kupka se nalazi u kadi ozidane šamotom, što obezbeđuje dugi radni vek peći. Šemu peći prikazuje slika skroz desno.

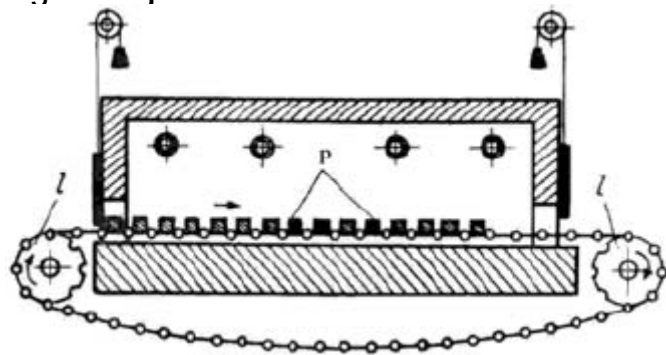


Peć sa teglom, grejanje je električno
f – grejači



Elektrodna sona kupka

Produktivnost peći se može povećati samo mehanizacijom. Takve su npr. tunelske – prohodne peći. Jedan tip te vrste peći prikazan je na slici dole koja se zove **tunelska peć sa konvejerom** (beskrajnom trakom). U ovoj peći pomoću određene termoregulacije mogu se ostvariti različite temperature po dužini peći, što omogućava zagrevanje rastućom brzinom.



Tunelska peć sa konvejerom
l – lančanici, p – radni predmeti

5. POSTUPCI ŽARENJA

Smanjenje zaostalih napona

Posle livenja, hladne i tople deformacije, kao i u toku nekih procesa termičke obrade uvek su prisutni zaostali unutrašnji naponi, koji teže da promene oblik predmeta. U slučaju neujednačenog hlađenja ovi naponi se još više povećavaju, pošto ranije ohlađeni delovi sprečavaju skupljanje onih delova čije se hlađenje odužilo. Ova pojava može stvarati još i nove napone. Unutrašnji naponi mogu prouzrokovati deformaciju, naprsline i ponekad i lom predmeta u toku dalje prerade,

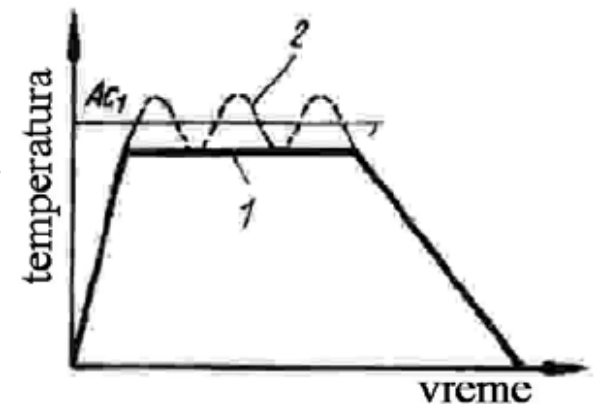
ali i bez nje. Veličine ovako nastalih unutrašnjih napona potrebno je smanjiti, što se postiže odgovarajućom termičkom obradom. Proces termičke obrade koji služi za smanjenje unutrašnjih napona nastalih u toku obrade zove se **žarenje za uklanjanje zaostalih unutrašnjih napona**. U cilju smanjenja napona radni predmet se sporo zagreje, drži se na temperaturi 1...2 sata i ostavljajući ga u peći, jednolikom brzinom se sporo hladi do sobne temperature. Kod ovog žarenja predmet se stavlja u kutiju za žarenje, gde je okružen peskom ili užarenim samlevenim koksom. Kutija mora biti hermetično zatvorena da ne bi vazduh dospeo do predmeta. Kutija se otvara samo posle potpunog ohlađenja. Smanjenje napona se odvija ispod tačke A_{c1} , na temperaturi 180...650°C. Sa povećanjem temperature žarenja zaostali naponi se smanjuju. Gornju granicu temperature tako treba izabrati, da struktura dobijena prethodnom termičkom obradom ostane i posle žarenja. Dobro izvršeno žarenje za uklanjanje zaostalih napona neće promeniti ostala svojstva čelika.

Ovakvo žarenje se primenjuje u sledećim slučajevima:

1. posle obrade deformacijom na toplo (kovanje, presovanje itd.),
2. posle obrade deformacijom na hladno (savijanje, vučenje itd.), ako nije predviđen neki drugi proces termičke obrade, i ako radni predmet ne sme da menja svoje dimenzije,
3. posle termičke obrade sa brzim hlađenjem (kaljenje) kod materijala koji je sklon vitoperenju i pucanju, ako nije predviđen neki drugi proces termičke obrade,
4. posle grube obrade rezanjem i pre fine obrade kod složenih predmeta koji su skloni vitoperenju (kolenasta vratila, trnovi za provlačenje, prsteni kotrljajnih ležajeva itd.),
5. posle fine obrade rezanjem, pre završnog brušenja,
6. između prethodnog i finog brušenja,
7. posle ravnanja predmeta.

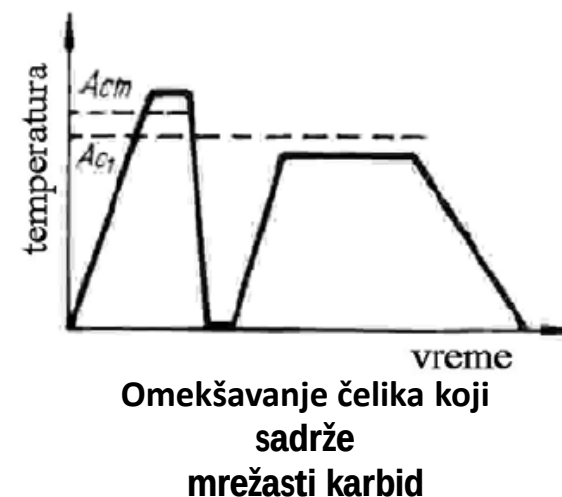
Omekšavanje

Cilj ovakvog žarenja je smanjenje tvrdoće čelika radi lakše obrade rezanjem. U slučaju omekšavanja radni predmet se sporo zagreva do temperature blizu preobražaja A_{c1} , ali nikako iznad nje, drže ga na toj temperaturi 2...6 časova, i na kraju puste da se sporo hladi u zatvorenoj peći. U toku procesa lamele cementita se pretvaraju u kuglice i na taj način struktura postane zrnasti perlit koji obezbeđuje najbolju obradivost rezanjem. Kod omekšavanja je karakteristično to, da krupnoća zrna ostaje i menja se samo struktura unutar zrna, npr. martensit se preobrazi u perlit. Da bi proces bio uspešniji, naročito kod nadeutektoidnih čelika grubozrnaste strukture, temperatura se više puta podigne iznad tačke A_{c1} za 10...20°C, pa se posle predmet sporo hladi (slika desno). Ovakvom promenom temperature može se postići preobražaj cementita u kuglice, što olakšava obradu rezanjem.



Proces žarenja za omekšavanje
1 – obično žarenje, 2 – žarenje sa promenom temperature

Kod nadeutektoidnih čelika karbidi često puta obuhvataju zrna perlita u obliku mreža. Ova mreža se lako pokida kod nelegiranih čelika, ali kod legiranih nadeutektoidnih čelika ostaje i posle uobičajenog žarenja, zbog čega će materijal biti krt i lomljiv. Kod ovakvih čelika žarenje se izvodi na sledeći način: Materijal se zagreje nešto iznad temperature A_{cm} , drži se na temperaturi 10...40 minuta, dok se ne rastvori cela količina karbida. Posle se radni predmet hladi u ulju, ponovo se zagreje i 1...2 časa se drži na temperaturi blizu tačke A_{c1} ali da to nikad ne dostigne, pa se nakon toga sporo ohladi. Ovakvim postupkom se sprečava ponovno formiranje karbidne mreže (slika desno).



Žarenje je dugotrajan proces. Kod jače legiranih čelika vreme držanja na temperaturi je duže a hlađenje je sporije. Hlađenje na 400...500°C obično se odvija u zatvorenoj peći, a posle se nastavlja na vazduhu. Omekšavanje se najviše primenjuje posle toplog oblikovanja, radi povećanja obradivosti rezanjem i smanjenja zaostalih napona.

Rekristalizaciono žarenje

U toku obrade čelika hladnom deformacijom (valjanje, vučenje itd.) kod zrna ferita i perlita nastaju velike trajne deformacije. Zbog toga materijal postaje tvrdi i krtiji i zbog toga mu se smanjuje obradivost. Pošto je deformacija pojedinih zrna različita, u materijalu nastaju unutrašnji naponi. Ako deformacija predmeta dostigne određenu veličinu, on se dalje ne može deformisati bez odgovarajuće termičke obrade. Proces termičke obrade što treba izvršiti u ovom slučaju, zove se **rekristalizaciono žarenje**. Posredstvom rekristalizacije, deformisana - orijentisana (izdužena) metalna zrna ponovo dobijaju svoj prvobitni poligonalni oblik, a unutrašnji naponi nastali u toku hladnog deformisanja nestaju. Granica temperature rekristalizacije je 400...750°C. Ova relativno niska temperatura je dovoljna zbog toga, što unutrašnji naponi teže da deformisanim zrnima vrata prvobitni oblik. Što je prethodna deformacija bila većeg stepena, temperatura rekristalizacije je sve niža i nova struktura materijala će biti sve finija. Vreme trajanja rekristalizacionog žarenja je 2...5 sati. Vreme je manje, ako je temperatura žarenja veća (npr. žarenje na 600°C koje traje 2 sata, može se zameniti žarenjem na 700°C u trajanju od 15 minuta).

Normalizaciono žarenje (normalizacija)

Normalizacija (zove se još i prekrizalizaciono žarenje) je jedan od najvažnijih i najviše primenjivanih postupaka žarenja. Cilj normalizacije je da se ukloni krupnozrnasta struktura dobijena u postupcima obrade u toplom stanju, kao što su livenja, kovanja ili presovanja. Postupak obezbeđuje materijalu bolja mehanička svojstva. Normalizacija se sastoji od zagrevanja radnog predmeta na temperaturu A_{c3} , držanja na toj temperaturi i sporog hlađenja na mirnom vazduhu. U toku hlađenja karbidi se izdvajaju i nastaju strukture u zavisnosti od sastava materijala: kod podeutektoidnih čelika ferit i perlit, dok kod nadeutektoidnih čelika perlit i cementit. Poželjno je da se perlit pojavljuje u lamelastom obliku. Predmet se drži toliko dugo na temperaturi, dok se cela masa ne zagreje na potrebnu temperaturu. Hlađenje se vrši na mirnom vazduhu, brzinom mnogo manjom od kritične. Normalizacija se obavlja i kod niskougljeničnih čelika (~0,4%), kao i kod austenitnih čelika u cilju poboljšanja obradivosti rezanjem. U ovom slučaju tvrdoća postaje veća i zahvaljujući tome strugotina se bolje odvaja.

Difuziono žarenje (homogenizacija)

Ako čelici sadrže legirajuće elemente, oni se u toku kristalizacije redovno pojavljuju neujednačeno u metalnim zrnima. Njihova veća koncentracija u strukturi ima negativan uticaj na svojstva čvrstoće materijala, dok u toku termičke obrade mogu izazvati naprsline. Cilj **difuzionog žarenja** je izjednačavanje hemijske neujednačenosti metalnih zrna čvrstog rastvora i da se na taj način formira homogena struktura. Ovo žarenje se odvija na temperaturi koja je za **100...150 °C niža od tačke topljenja**. Vreme trajanja zavisi od sastava čelika i dimenzija radnog predmeta i može da iznosi od nekoliko sati do nekoliko dana. Za to vreme sastav materijala putem difuzije se izjednačava, ali zrna postaju krupna, pa se predmet kasnije mora podvrgnuti *normalizaciji* ili *deformisanju* u *toplom stanju*, radi dobijanja sitnozrnaste strukture. Difuziono žarenje uglavnom se primenjuje kod čeličnih livova, kao i kod cementiranih čelika, ako je sadržaj ugljenika u površinskom sloju prevelik.

Starenje

U toku starenja mehanička svojstva čelika se menjaju, što se odvija u toku dužeg vremena bez uticaja čoveka. U tom procesu tvrdoća materijala raste, žilavost opada i materijal postaje krt. Zapremina čelika u toku starenja se povećava.

Kod prirodnog starenja radni predmeti odležu 1...2 godine, radi otklanjanja štetnih uticaja promene zapremine. U toku odležavanja unutrašnji naponi se uglavnom izjednačavaju i mere postaju stabilne. Zbog dugog trajanja ovaj proces nije ekonomičan.

Veštačko starenje ima za cilj ubrzanje celog procesa starenja. Suština veštačkog starenja je, što se radni predmeti zagreju na 200...600°C, na njoj ih drže 4...12 časova i na kraju puste ih da se vrlo sporo ohlade. Gornju granicu zagrevanja tako treba izabrati da se postojeća struktura ne menja. Što je temperatura žarenja viša, starenje se odvija brže. Drugi način veštačkog starenja se izvodi dubokim zamrzavanjem, što se uglavnom koristi kod alata i graničnih merila, radi dobijanja veće tvrdoće i stabilizacije njihovih mera.

Potpuno žarenje (austenitno omekšavanje)

Kod visoko legiranih Cr i Ni čelika, kao i kod čelika sa sadržajem Mn ne dolazi do preobražaja austenita u toku hlađenja sa viših temperatura od A_{c3} , već oni sadrže svoju austenitnu strukturu i na sobnoj temperaturi. Preobražaj austenita kod njih se odvija znatno ispod sobne temperature, jer ono počinje na -60°C i završava se na -140°C. Ovi čelici se zovu **austenitni čelici**. Kod njih se na temperaturi iznad A_{c3} karbidi se rastvaraju i kod brzog hlađenja se ne izdvajaju, a to znači da struktura ostaje austenitna. Ovi čelici su nerđajući, otporni su na dejstvo kiselina i imaju vrlo veliku žilavost. Austenitni Cr-Ni čelici pod uticajem spoljnih sila (udarac, pritiskivanje) preobrazuju se u martenzit, dok kod Mn-čelika nastaje izdvajanje karbida. Rezultat ovih procesa je velika tvrdoća. Kod potpunog žarenja Cr-Ni čelici se zagrevaju na 1080...1150°C, a Mn-čelici na 1000°C, sa kojih temperatura se hlade u vodi. Posle ovakve termičke obrade rezanje austenitnih čelika, iako su postali mekani, je vrlo otežano, jer se strugotina ne odvaja, već se materijal deformiše, a pored toga materijal se otvrdjuje pod pritiskom alata. Zbog toga se ovakvi čelici sa temperature od 800...850°C hlade na vazduhu, da bi nastao preobražaj austenitne strukture. Posle obrade rezanjem, austenitna struktura ovih čelika može da se povрати potpunim žarenjem.

6. KALJENJE

Suština i cilj kaljenja

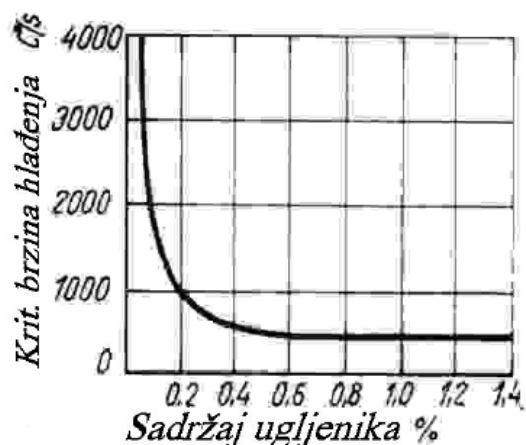
Alati i delovi mašina mogu da zadovolje uslove namene, ako su im svojstva čvrstoće dovoljno velika. Čvrstoća i tvrdoća čelika može se znatno povećati prikladnom termičkom obradom, koja se zove *kaljenje*. Cilj kaljenja je da se struktura čelika preobrazi u **martenzitu**, koja je najtvrđa od svih struktura. Kaljenje se sastoji od zagrevanja predmeta na temperaturu iznad tačke A_{c3} i brzog hlađenja. Da bi se stvorila martenzitna struktura, brzina hlađenja mora biti veća od kritične brzine hlađenja. Brzina hlađenja, kod koje se temperatura preobražaja naglo opada i počinje stvaranje martenzita, zove se **kritična temperatura hlađenja**.

Kaljenje je jedan od najvažnijih i najčešće primenjivanih postupaka termičke obrade, ali ujedno i najosetljiviji proces, čije uspešno izvođenje zavisi od velikog broja faktora. To su: dimenzije i oblik radnog predmeta, sastav materijala, brzina zagrevanja, veličina maksimalne temperature, brzina i sredstvo hlađenja, početna struktura materijala, naknadni postupci itd. Kaljenje izaziva promenu sledećih svojstava materijala: postojanost oštrice kod alata, radni vek elemenata mašina, svojstva čvrstoće: zatezna čvrstoća, tvrdoća, jedinično izduženje, žilavost, granica zamaranja, otpor protiv habanja, otpor protiv korozije, električna provodljivost, sposobnost namagnetisanja, toplotno širenje, provodljivost toplote itd. Ako je brzina hlađenja austenita veća od kritične, uvek nastaje martenzitna struktura, izuzev kod austenitnih čelika. Zbog toga tvrdoća raste u zavisnosti od sastava 2...3 puta, dok se žilavost, izduženje i suženje smanjuju. Sa tvrdoćom zajedno raste i zatezna čvrstoća, kao granica tečenja i elastičnosti.

Faktori koji utiču na kaljivost čelika

Kaljivost je osobina čelika da u slučaju hlađenja brzinom većom od kritične, stabilni austenit se transformiše u martenzit i zahvaljujući tome tvrdoća se znatno povećava. Veličina tvrdoće kaljenog čelika zavisi od količine i tvrdoće martenzita nastalog brzim hlađenjem. Na veličinu tvrdoće kaljenog čelika ne utiče samo tvrdoća martenzita, već i njegova količina. Količina martenzita koji se stvara kaljenjem, zavisi od brzine hlađenja, od temperature kaljenja i od vremena držanja čelika na temperaturi. U slučaju da se materijal ne zagreje na potrebnu temperaturu ili se drži suviše kratko na toj temperaturi, ne može se dobiti homogeni austenit, i nakon kaljenja čelik će sadržati i ferit, što takođe smanjuje tvrdoću.

Količina martenzita zavisi i od sadržaja ugljenika (slika dole levo), što se ogleda u tome, da nelegirani čelici koji sadrže veću količinu ugljenika (0,6...1,7% C) kaljenjem postaju vrlo tvrdi i kod sporijeg hlađenja, npr. u ulju, dok srednjeugljenični čelici (0,3...0,6% C) samo sa vrlo energičnim hlađenjem, npr. u vodi dostižu zadovoljavajuću tvrdoću.

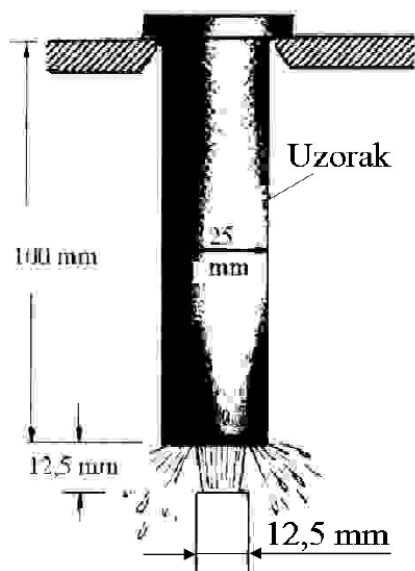


Promena kritične brzine hlađenja u zavisnosti od sadržaja ugljenika

Kritičnu brzinu hlađenja smanjuju i legirajući elementi, kao što su: Mn, Cr, Ni itd. i zbog toga čelici koji sadrže te elemente dobiju čistu martenzitnu strukturu i u slučaju sporog hlađenja. U zavisnosti od toga koje sredstvo je potrebno za hlađenje nekog čelika, razlikuju se **čelici za vodeno kaljenje, za uljno kaljenje ili za vazdušno kaljenje**. Ako struktura čelika postane martenzitna i prilikom hlađenja na mirnom vazduhu, takav čelik se zove **samokaljiv**. Prednost primene sredstava za hlađenje koja obezbeđuju sporije hlađenje (ulje, uduvan vazduh) je to, što sporije hlađenje izaziva manje unutrašnje napone i zbog toga kod tih materijala manja je opasnost od pojave vitoperenja i naprslina usled kaljenja. Često puta ovo je razlog primeni ovako kaljenih čelika.

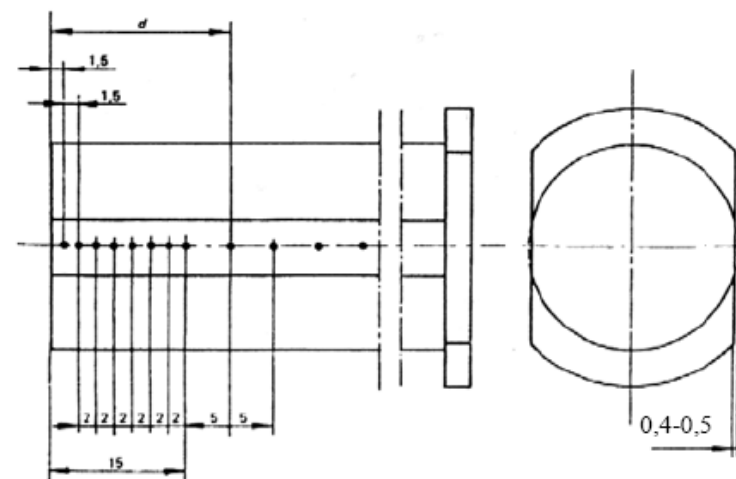
Prokaljivost čelika

Prokaljivost je vrlo važna osobina svih čelika, jer ukazuje na mogućnost postizanja tvrdoće jezgra kaljenjem, kod određene veličine poprečnog preseka, odnosno smanjenje tvrdoće kaljenog čelika od površine prema jezgru. Prokaljivost zavisi od sadržaja ugljenika, od veličine metalnog zrna austenita i od legirajućih elemenata prisutnih u čeliku. Veličina prokaljivosti određuje se metodom po Džominiju (Jominy). U ovom postupku ispitivanja prokaljivosti, cilindrični uzorak standardne veličine ravnomerno se zagreva do temperature kaljenja u roku od 30 minuta, drži se na toj temperaturi takođe 30 minuta i posle se čeona površina uzorka hladi do sobne temperature mlazom vode temperature 24°C, tj. uzorak se okali. Posle se bruse dve naspramne površine paralelno sa osom uzorka do dubine 0,4...0,5 mm u cilju merenja tvrdoće. Tvrdoća se određuje metodom HRC duž ose obe brušene površine na određenim međusobnim rastojanjima. Udaljavanjem od hlađene čeone površine, brzina hlađenja se postepeno smanjuje i zbog toga i tvrdoća će biti sve manja. Postignuta tvrdoća na pojedinim mestima i veličina opadanja tvrdoće je karakteristično za prokaljivost čelika. Kod ovog ispitivanja voda ističe iz cevi prečnika 12,5 mm a pritisak se podešava pomoću rezervoara sa regulacijom visine vodenog stuba tako, da mlaz vode dostigne visinu od 65 ± 5 mm pre postavljanja uzorka.



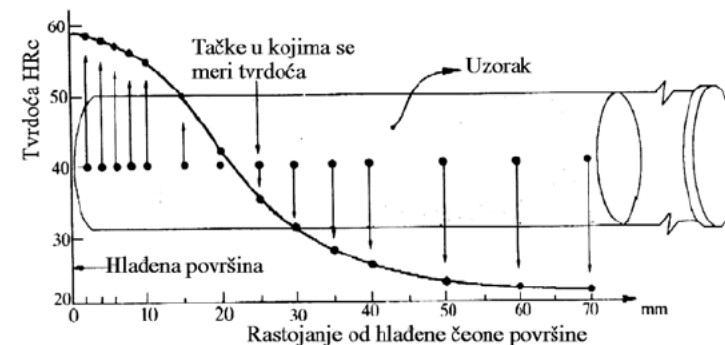
**Šematski prikaz
Džominijeve probe**

Tvrdoća se meri u određenim tačkama brušenih površina. Odstojanje prvih osam tačaka od kaljene čelone površine su: 1,5-3-5-7-9-11-13-15 mm, dok su ostale tačke udaljene za 5 mm jedna od druge (slika desno). Promena tvrdoće može se prikazati grafički u funkciji odstojanja od čelone površine i tada se dobija jedna neprekidna kriva, koja se zove **kriva prokaljivosti** ili **Džominijeva kriva**. Da bi se mogla nacrtati ova kriva, na apscisu se nanosi rastojanje od čelone površine d , a na ordinatu odgovarajuća tvrdoća HRC (slika desno dole).



Položaj tačaka za merenje tvrdoće

Sa krive prokaljivosti može se odrediti najveća tvrdoća, što se postiže kaljenjem tog čelika, može se proceniti dubina kaljenja i postoji mogućnost upoređivanja prokaljivosti različitih čelika.



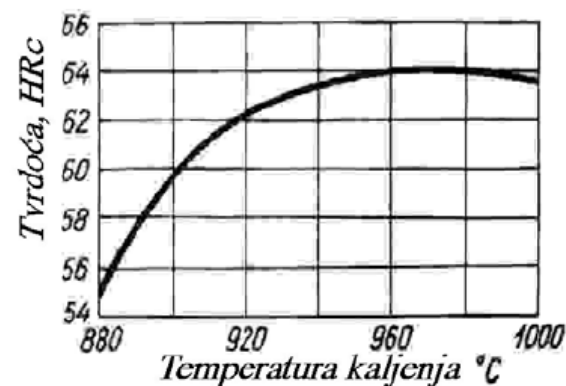
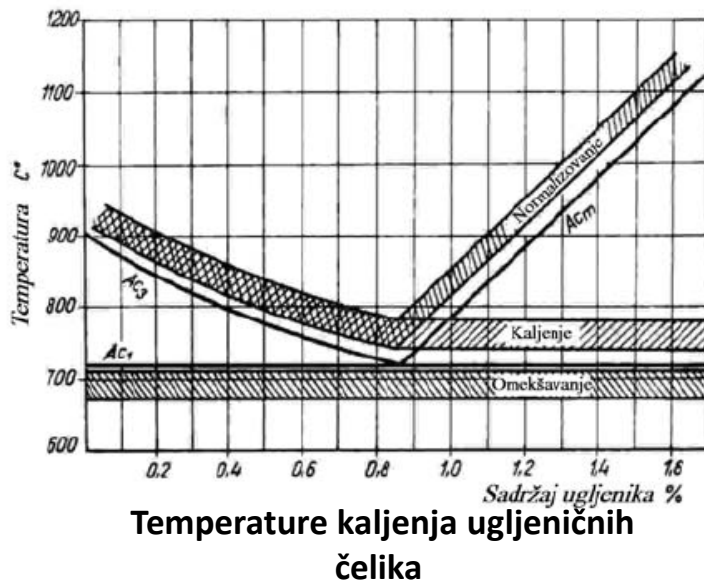
Kriva prokaljivosti

Ispravna temperatura kaljenja

Kod određivanja temperature kaljenja potrebno je uzeti u obzir hemijski sastav čelika, dimenzije, oblik i namenu predmeta, kao i primenjeno sredstvo za hlađenje. Temperatura kaljenja ugljeničnih čelika se određuje na osnovu dijagrama stanja:

- Kod podeutektoidnih čelika ona treba da bude iznad tačke A_{c3} za 20...50°C, znači kaljenje se vrši iz polja γ -Fe.
- Kod nadeutektoidnih čelika ona treba da bude iznad tačke A_{c1} za 20...50°C (slika dole levo).

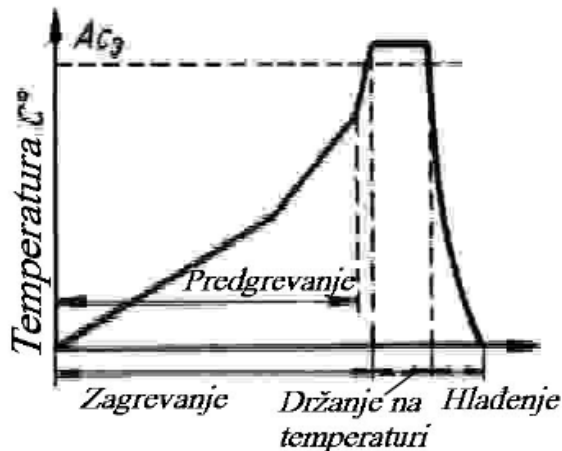
Legirajući elementi utiču na promenu mesta tačaka preobražaja. Veličina te promene teorijski se ne može izračunati tačno, pa se ona određuje eksperimentalno od strane proizvođača.



Promena tvrdoće alatnog čelika
u funkciji temperature kaljenja

Na veličinu temperature kaljenja utiče i oblik i dimenzija predmeta. Manji predmeti složenih oblika (npr. alat za isecanje, alati za izradu navoja) uvek se kale sa nižih temperatura od one koja se može koristiti kod većih, jednostavnih ili punih predmeta (npr. glatka osočina). Ovakvi postupci potiču iz toga, što sa povećanjem temperature kaljenja pojačano rastu unutrašnji naponi usled kaljenja, koji mogu izazvati vitopernje i pojavu naprslina. Nadalje, u slučaju čelika koji se mogu podjednako hladiti u vodi i u ulju, kod primene ulja hlađenje treba početi sa više temperature za ~15...20°C u odnosu na hlađenje u vodi. Temperatura kaljenja u velikoj meri utiče na veličinu postignute tvrdoće, kako to slika dole levo prikazuje kod jednog alatnog čelika. Ako je temperatura kaljenja manja od potrebne, okaljeni čelik će sadržati nerastvoreni ferit, odnosno slobodni cementit, a nepotrebno povećanje te temperature pak dovešće do stvaranja zaostalog austenita.

Brzina zagrevanja radnih predmeta namenjenih kaljenju, u početku treba da bude manja, što se kasnije povećava, da bi se predmeti zagrejali jednoliko po celoj masi. Proces zagrevanja u dve etape predgrevanja prikazuje sledeća slika.



**Martenzitno kaljene
sa dve etape predgrevanja**

Pun proces martenzitnog kaljenja sastoji se od tri etape o kojima je potrebno znati sledeće:

Zagrevanje u toku kojeg radni predmet treba da poprими propisanu temperaturu u čitavom poprečnom preseku.

Držanje na temperaturi računa se od trenutka kada je radni predmet poprimio propisanu temperaturu. Ovo se utvrđuje na osnovu ujednačene boje predmeta.

Hlađenje treba da se odvija većom brzinom od kritične. Kritičnu brzinu kaljenja samo malo treba prekoračiti, jer je to sasvim dovoljno za formiranje martenzitne strukture, ali ne stvara opasne unutrašnje napone. Npr. čelici, kod kojih je potrebno hlađenje u ulju, ne smeju se hladiti u vodi.

Tehnologiju Martenzitnog kaljenja, molim Vas, pročitajte radi Vaše informisanosti.

Duboko zamrzavanje

U toku kaljenja neće se cela količina austenita transformisati u martenzit. Deo koji se nije preobrazio zove se **zaostali austenit**. Ovo je nepovoljno zbog toga, što je austenit mekan element strukture i smanjuje tvrdoću kaljenog čelika. Zaostali austenit praktično u celosti se pretvara u martenzit, ako se čelik ohladi na $\sim -75^{\circ}\text{C}$. Ovaj postupak se zove **duboko zamrzavanje**, koje se izvodi tako da se u litru alkohola rastvara 800g suvog leda (čvrst ugljendioksid) i u dovoljnu količinu ovakvog rastvora, temperature cca. -80°C , stavlja radni predmet, gde se ostavlja dok u potpunosti ne poprими tu temperaturu. Posle vađenja predmeta iz rastvora, on se ostavlja na mirnom vazduhu da se polako zagreje na sobnu temperaturu. Postupku dubokog zamrzavanja izlažu se rezni alati, alati za isecanje, predmeti izloženi površinskom kaljenju, radi postizanja maksimalne tvrdoće i granična merila kod kojih je važno da se mere ne menjaju.

SLEDEĆE TEME:

- **Poboljšavanje**
- **Izotemska termička obrada**

HVALA NA PAŽNJI!