

# Projektiranje postupka toplinske obrade strojnog dijela

---

**Kutić, Vito**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:315442>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-01**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Tehnički fakultet u Puli



**Vito Kutić**

**Projektiranje postupka toplinske obrade strojnog dijela**

Završni rad

Pula, Rujan, 2024.

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Tehnički fakultet u Puli



**Vito Kutić**

**Projektiranje postupka toplinske obrade strojnog dijela**

Završni rad

**JMB: 0303100258, redovan student**

**Studijski smjer: proizvodno strojarstvo**

**Predmet: Tehnologija I**

**Znanstveno područje: Tehničke znanosti**

**Znanstveno polje: Strojstvo**

**Znanstvena grana: Proizvodno strojarstvo**

**Mentor: Božo Smoljan**

Pula, Rujan, 2024.

## ZAHVALA

*Prvenstveno se želim zahvaliti mentoru dr. sc. Božu Smoljanu na podršci, odgovorima na moje upite u najkraćem mogućem roku, te strpljenju pri objašnjavanju svih nedoumica oko izrade završnog rada.*

*Također želim se zahvaliti dekanu doc. dr. sc. Marku Kršulji i svim profesorima na savjetima tijekom studiranja.*

*Zahvaljujem se i svojim roditeljima, uz to se zahvaljujem svojim prijateljima i kolegama.*

## Sadržaj

1. UVOD.....	8
2. TOPLINSKA OBRADA .....	9
3. Fazne pretvorbe čelika .....	11
3.1 Stvaranje i raspadanje austenita .....	11
3.2 Ferit .....	12
3.3 Perlit .....	13
3.4 Martenzit.....	14
3.5 Bainit .....	15
4. CEMENTIRANJE ČELIKA.....	18
4.1 Pougličavanje .....	20
4.1.1 Pougličavanje u granulatu.....	20
4.1.2 Pougličavanje u plinu .....	20
4.1.3. Pougličavanje u solnoj kupki.....	21
4.2 Kaljenje.....	22
4.2.1 Jednostruko kaljenje .....	24
4.1.2 Jednostruko kaljenje s međužarenjem.....	25
4.1.3 Dvostruko kaljenje .....	26
4.2 Nisko temperaturno popuštanje.....	27
5. Čelici za cementiranje .....	28
6. Ispitivanje kvalitete cementiranog čelika.....	30
6.1 Ispitivanje dubine cementiranog sloja.....	30
7. Postupak toplinske obrade strojnog dijela .....	32
7.1. Materijal strojnog dijela svornjaka .....	33
7.2. Definiranje procesa cementiranja za strojni dio svornjak.....	33
7.3. Tehnološka dokumentacija projekta cementiranja.....	37
8. Zaključak .....	41
Literatura .....	43
Popis slika .....	44
Popis tablica .....	45
Sažetak.....	46

# 1. UVOD

U današnjem industrijskom svijetu, toplinska obrada strojnih dijelova predstavlja ključni proces koji utječe na njihovu kvalitetu, čvrstoću i trajnost.

Ova tehnika, koja obuhvaća različite termičke procese poput kaljenja, žarenja i poboljšanja strukture, igra ključnu ulogu u optimizaciji performansi i produženju radnog vijeka strojeva i alata.

Kroz precizno kontrolirane promjene temperature i brzine hlađenja, postupak toplinske obrade omogućuje modificiranje mikrostrukture materijala, čime se postižu željene mehaničke osobine poput tvrdoće, čvrstoće i otpornosti na habanje.

U ovom radu će se detaljnije razmotriti postupci toplinske obrade, njihovi mehanizmi djelovanja te važnost i primjena u suvremenom inženjeringu i proizvodnji.

Hipoteza:

Toplinska obrada strojnih dijelova ima presudnu ulogu u optimizaciji mehaničkih svojstava materijala, čime značajno povećava čvrstoću, tvrdoću i otpornost na habanje, što dovodi do produženja radnog vijeka strojeva i alata u suvremenom industrijskom okruženju.

Problem istraživanja

Ključni problem istraživanja odnosi se na identifikaciju optimalnih postupaka toplinske obrade koji omogućuju poboljšanje mehaničkih svojstava strojnih dijelova. Pitanje koje se postavlja jest kako različite metode toplinske obrade, uključujući kaljenje, žarenje i poboljšanje strukture, utječu na mikrostrukturu materijala te na kakav način doprinose većoj izdržljivosti i učinkovitosti strojeva u industrijskoj primjeni.

Ciljevi rada:

1. Analizirati različite tehnike toplinske obrade poput kaljenja, žarenja i poboljšanja strukture materijala.
2. Istražiti utjecaj temperature i brzine hlađenja na mikrostrukturu i mehanička svojstva strojnih dijelova.
3. Utvrditi ključne faktore koji omogućuju optimizaciju čvrstoće, tvrdoće i otpornosti na habanje.

4. Prikazati primjenu toplinske obrade u suvremenom inženjeringu i proizvodnim procesima te evaluirati njezin utjecaj na radni vijek i performanse strojeva.

Metodologija rada:

Rad će se temeljiti na analitičkoj metodi istraživanja, uključujući:

- Pregled relevantne znanstvene i stručne literature o toplinskoj obradi strojnih dijelova.
- Detaljnu analizu različitih metoda toplinske obrade (kaljenje, žarenje, poboljšanje strukture) i njihovih utjecaja na mikrostrukturu materijala.
- Praktične primjere i studije slučaja iz industrijske prakse gdje će se analizirati rezultati primjene toplinske obrade na različitim vrstama strojnih dijelova.
- Usporedba i evaluacija različitih termičkih procesa s naglaskom na njihove mehaničke učinke i trajnost materijala

## 2. TOPLINSKA OBRADA

Toplinska obrada predstavlja ključni proces u industriji koji se primjenjuje radi poboljšanja mehaničkih svojstava materijala.

Ovaj postupak obuhvaća različite termičke procese poput kaljenja, žarenja, poboljšanja strukture i cementiranja, koji se primjenjuju na različite materijale kao što su čelik, aluminij, bakar i legure.

Jedan od osnovnih postupaka toplinske obrade je kaljenje, koje uključuje zagrijavanje materijala na visoke temperature, nakon čega slijedi brzo hlađenje radi postizanja željenih mehaničkih svojstava poput tvrdoće.

Žarenje, s druge strane, podrazumijeva kontrolirano zagrijavanje materijala na određenu temperaturu i zatim postupno hlađenje radi smanjenja unutarnjih naprezanja i poboljšanja obradivosti materijala.

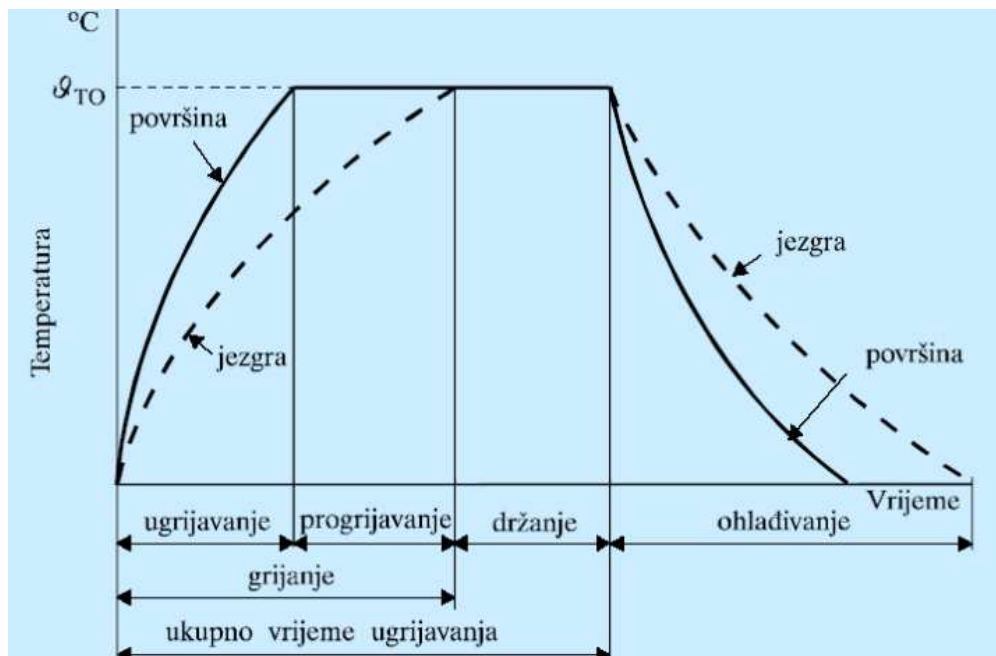
Poboljšanje strukture, poznato i kao poboljšanje vlačne čvrstoće, podrazumijeva zagrijavanje materijala na određenu temperaturu, zadržavanje na toj temperaturi određeno vrijeme, te naknadno hlađenje radi poboljšanja mikrostrukture i mehaničkih svojstava.

Cementiranje je postupak kojim se površinski sloj materijala obogaćuje ugljikom radi povećanja tvrdoće i otpornosti na habanje.

Suvremeni procesi toplinske obrade kontroliraju se sofisticiranim sustavima koji osiguravaju preciznost temperature, vremena izlaganja i brzine hlađenja, čime se postižu željena mehanička svojstva i kvaliteta materijala.

To dovodi do poboljšane izdržljivosti, dugotrajnosti i pouzdanosti strojeva i alata, što je ključno za različite industrijske primjene.

Glavni parametri toplinske obrade su vrijeme i temperatura, primjer dijagrama koji opisuje odnos vremena i temperature toplinske obrade.(Slika 2.1.)



Slika 2.1 – dijagram odnosa vremena i temperature



### 3. Fazne pretvorbe čelika

#### 3.1 Stvaranje i raspadanje austenita

**Zagrijavanjem podeutektoidnih čelika** ( $> 0.8\%C$ ), mikrostrukture ferit (F) + perlit (P), proces austenitizacije (rasta austenitnih zrna) počinje dosežanjem temperature u kritičnoj tački A1 (crta PS, na eutektoidnoj temperaturi  $723^{\circ}C$ ).

Perlit se pritom pretvara u austenit i nastaje mikrostruktura ferit + austenit.

Daljim zagrijavanjem ferit se postupno transformira u austenit. Dosežanjem temperature koja odgovara kritičnoj tački A3 (crta GS), mikrostruktura čelika postaje austenitna.

**Zagrijavanjem nadeutektoidnih čelika**(od 0.8 do 2.03%C) mikrostrukture perlit + cem

Austenit ( $\gamma$  - željezo) je alotropska modifikacija željezova karbida ili ugljika u željezu. Atomi željeza u austenitu čine strukturu plošno centrirane kubične kristalne rešetke (FCC).

**Brzina pretvorbe perlita** (feritno-cementitne mikrostrukture) u austenit, osim temperature zagrijavanja, ovisi i o veličini njihovih lamela.

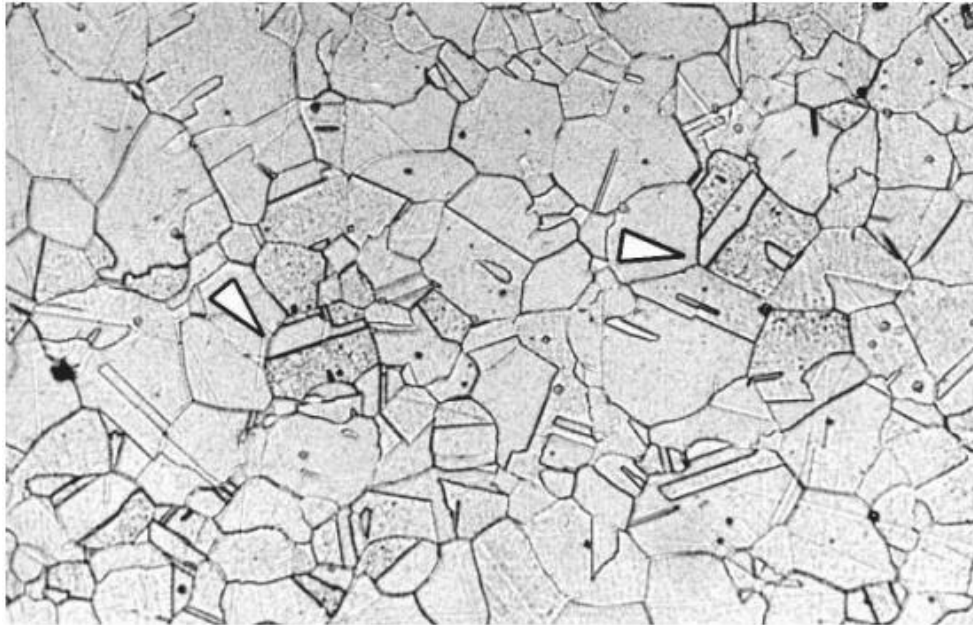
Sadržaj ugljika u čeliku također ima utjecaja na brzinu procesa austenitizacije.

Što je veći sadržaj ugljika, to se proces brže odvija. Legirni elementi u čeliku: Cr, Mo, W, V i drugi karbidotvorci usporavaju proces austenitizacije, zbog težeg otapanja karbida legirnih elemenata u austenitu. Sadržaj otopljenih legirnih elemenata u austenitu nije ujednačen. Proces homogenizacije austenita, koji sadrži legirne elemente, nešto duže traje jer je difuzija atoma legirnih elemenata u kristalnoj rešetki  $\gamma$ -Fe znatno sporija u odnosu na ugljik.

Austenit je uglavnom prisutan u slitini željezova karbida između temperature od  $723^{\circ}C$  i  $1500^{\circ}C$  ovisno o udjelu ugljika u slitini.

Stabilan je na temperaturama u području od  $911^{\circ}C$  do  $1392^{\circ}C$ .

Veći udio ugljika znači nižu temperaturu na kojoj slitina dobiva strukturu austenita (atomi se pri nižoj temperaturi počinju preslagivati u FCC - oblik rešetke).

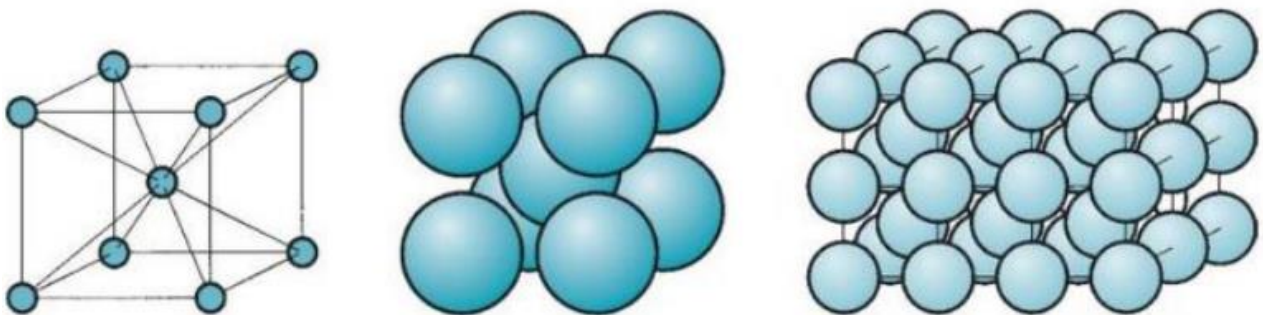


Slika 3.1. – mikrostruktura austenita

### 3.2 Ferit

**Ferit** je naziv za **alfa-željezo**, alotropsku modifikaciju željeza stabilnu do 911 °C, također strukturni sastojak tehničkoga željeza i čelika u obliku čvrste otopine malih količina ugljika u alfa-željezu.

Ferit je naziv za intersticijsku čvrstu otopinu (ugljik se otapa u čvrstom željezu jer su njegovi atomi puno manji) ugljika u alfa-željezu ( **$\alpha$ -Fe**) s volumno centriranom kubičnom kristalnom strukturom.

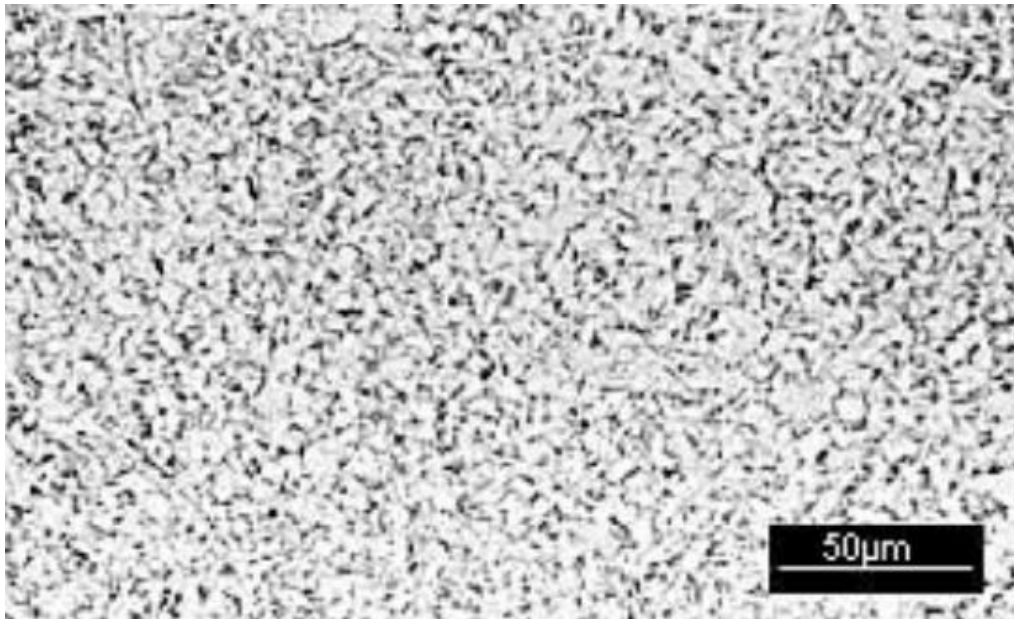


Slika 3.2. - Volumno centrirana kubična rešetka (BCC)

Maksimalna topivost ugljika u  $\alpha$ -Fe je 0,025 % kod 723 °C i samo 0,008 % na sobnoj temperaturi. To je najmekša faza u dijagramu stanja (fazni dijagram) željezo – ugljik.

Ferit je kristalna struktura koja daje čeliku magnetska svojstva; to je klasičan primjer feromagnetičnog materijala.

Ferit ima vlačnu čvrstoću 280 N/mm<sup>2</sup> i tvrdoću oko 80 HB (tvrdoća po Brinellu).  
Istezljivost ferita je do 35%.



Slika 3.3. - Mikrostruktura ferita

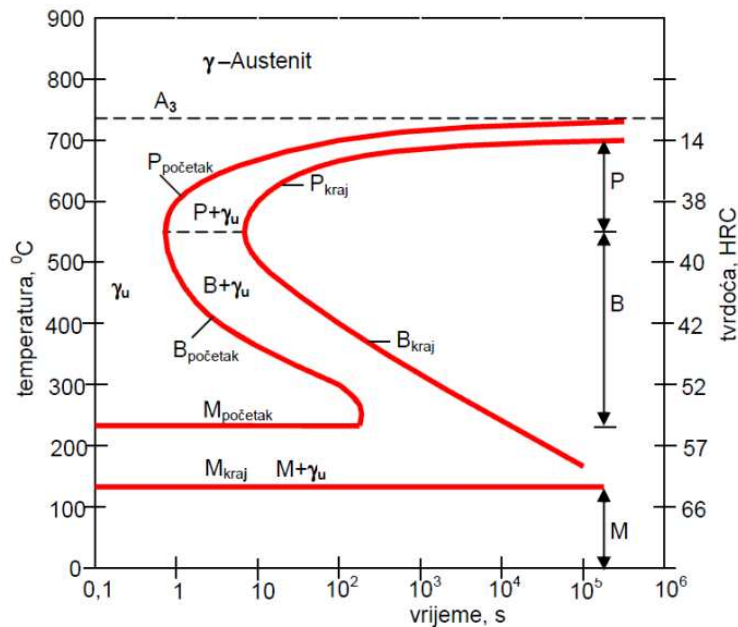
### 3.3 Perlit

Perlit je eutektoidna mješavina ferita (približno 88%) i cementita (približno 12 %) koja sadrži 0,8 % ugljika i nastaje kod 723 °C pri vrlo polaganom hlađenju.

Lamelarna struktura perlita sastoji se od bijele feritne osnove ili matrice (koja čini većinu eutektoidne mješavine) i tankih pločica cementita.

Perlit se sastoji od 88% ferita i 12% cementita (Fe<sub>3</sub>C).

Lamele ferita su oko sedam puta deblje od lamela (listića) cementita i mogu se vidjeti samo kod većeg povećanja optičkog mikroskopa.



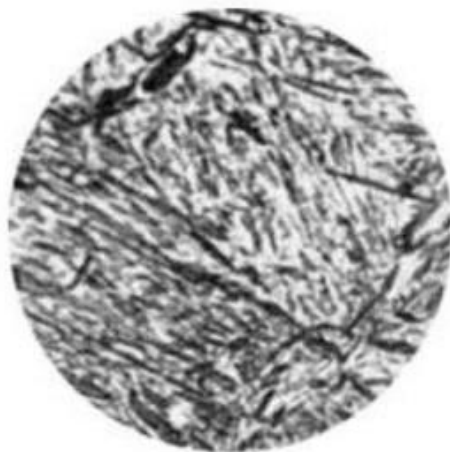
Slika 3.4. – krivulja pretvorbe perlita

### 3.4 Martenzit

Martenzitna pretvorba nastaje kada brzina hlađenja stabilnog austenita dostigne vrijednost kritične brzine.

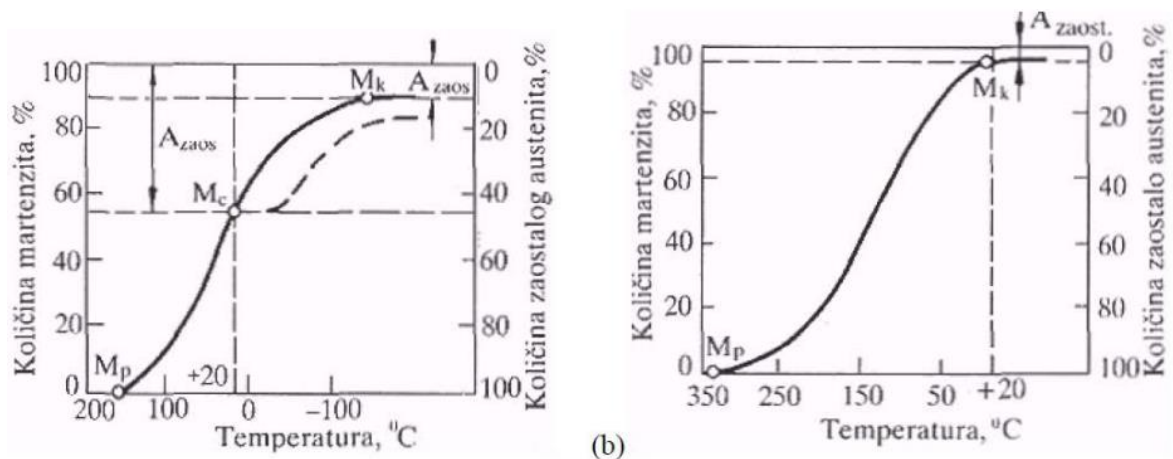
Austenit se bez prethodnog oslobađanja ugljika pretvara u prezasićeni  $\alpha$  – kristal mješanac, martenzit.

Martenzit je jednofazna struktura i predstavlja prezasićeni  $\alpha$  – kristal mješanac ugljika i drugih legiranih elemenata u  $\alpha$ -Fe. Nastaje kao rezultat bezdifuzijske pretvorbe austenita i ovisi samo o temperaturi, a ne i o vremenu trajanja procesa.



Slika 3.5. - Mikrostruktura martenzita

Martenzit je faza karakteristična za zakaljeni čelik. Čelik martenzitne strukture ima vrlo visoku tvrdoću (i čvrstoću), ali nisku duktilnost (lomno istezanje, kontrakciju) i nisku žilavost.



Krivulje martenzitne pretvorbe: a) visokouglični čelik – isprekidana crta predstavlja krivulju martenzitne pretvorbe nakon stabilizacije austenita; b) krivulja srednje ugljičnog čelika

Slika 3.6. – krivulja martenzitne pretvorbe

### 3.5 Bainit

**Bainit** nastaje kada se čelik hladi brzinom između gornje i donje kritične brzine hlađenja na nižim temperaturama.

To je struktura među stupnja ili među struktura nazvana bainit.



Slika 3.7. – mikrostruktura bainita

Brzina difuzije atoma ugljika na ovoj temperaturi toliko je mala da se atomi ugljika ne mogu pomicati na veće udaljenosti i stvoriti listiće cementita.

Zbog toga se umjesto listića ferita i cementita stvaraju samo listići ferita na čijim granicama se izdvaja cementit u obliku sitnih, kuglastih čestica.

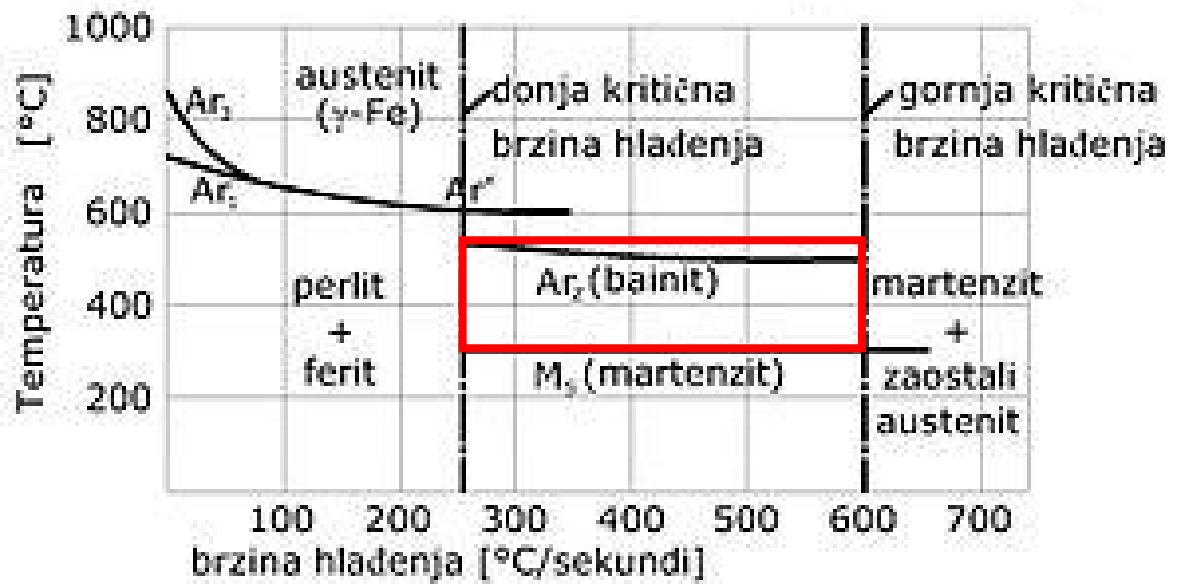
Mikrostruktura takvog čelika razlikuje se od one koju daje ravnotežni dijagram stanja, tim više što je veća brzina hlađenja, a ovisi još o sastavu legure i temperaturi zaustavljanja brzog hlađenja.

Utjecaj brzine hlađenja na temperature faznih prijelaza odnosno na raspad austenita kod jednog podeutektoidnog čelika s 0,45% C (maseni udjel) prikazan je na slici.

Kod malih brzina hlađenja ( $< 50$  °C/s) linije  $Ar_3$  i  $Ar_1$  su značajno udaljene.

Ispod linije  $Ar_3$  izlučuje se proeutektoidni ferit, a kod  $Ar_1$  preostali austenit pretvara se u perlit.

OVISNOST TEMPERATURA FAZNIH PRIJELAZA O BRZINI  
HLADENJA PODEUTEKTOIDNOG ČELIKA (0,45% UGLJIKA)



Slika 3.8. – Ovisnost temperatura faznih prijelaza o brzini hlađenja podeltoidnog čelika

## 4. CEMENTIRANJE ČELIKA

Cementacija je proces termo kemijska obrada kojom se čeliku u austenitnom stanju difuzijski povećava udio ugljika u površinskim slojevima.

Nakon faze „pougličanja“ slijedit će završno gašenje kako bi se otopljeni ugljik zadržao u prisilnoj otopini  $\alpha$ -željeza odnosno da se u tim slojevima stvori više ugljični igličasti martenzit.

Osnova formule izvedena iz Fickovih difuzijskih zakona slijedi prosječni put atoma ugljika:  $X_{sr} = \sqrt{2 * D * t}$

- $X_{sr}$  – srednja duljina difuzijskog puta ugljikovog atoma
- $D$  – brzina difuzije ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )
- $T$  – termodinamička temperatura (K)
- $Q$  – aktivirajuća energija (J/mol)
- $t$  – trajanje difuzije (s)
- $D_0$  – difuzijska konstanta ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )

Sa ovom formulom može se procijeniti da će ukupne postignjene dubine biti 2-3 mm.

Uobičajeni čelici za cementiranje sadrže 0,25% C, to i radi postignuća dovoljne žilavosti u jezgri.

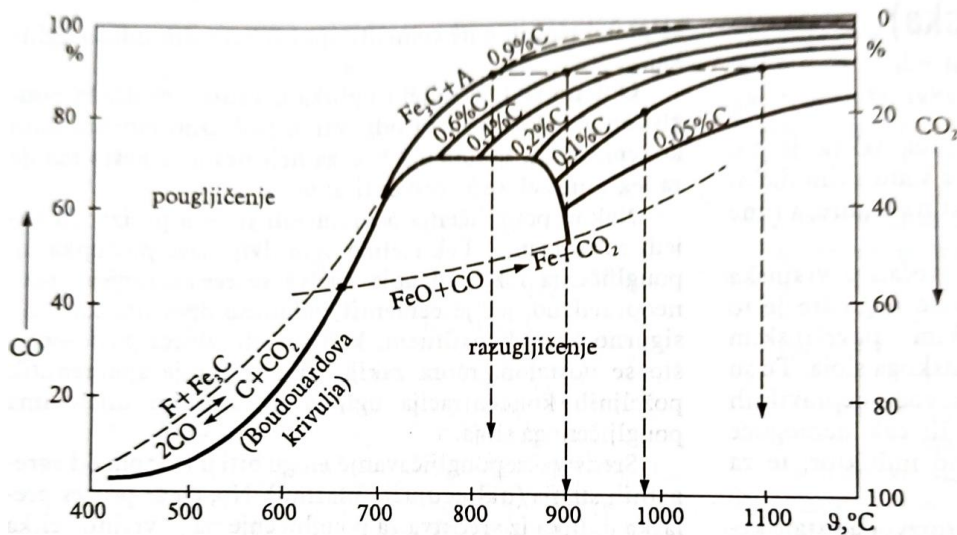
Proces cementiranja čelika može se podijeliti na tri postupka:

- Prvi postupak je pougličavanje koje se odvija na visokim temperaturama uz izlaganje čelika tvarima koje sadrže ugljik.
- Nakon što se površina obogati ugljikom, slijedi drugi postupak koji se naziva kaljenje ili gašenje.
- Drugi postupak je kaljenje koje se provodi u svrhu dovođenja površinskog sloja obogaćenog ugljikom u čvrstu martenzitnu strukturu.
- Treći postupak je nisko temperaturno popuštanje, u nisko temperaturnom popuštanju čelik se ponovno zagrijava, ali na puno niže temperature nego prilikom prvog koraka procesa - ovaj postupak se provodi kako bi se smanjila zaostala naprezanja u materijalu i povećanja duktilnosti.

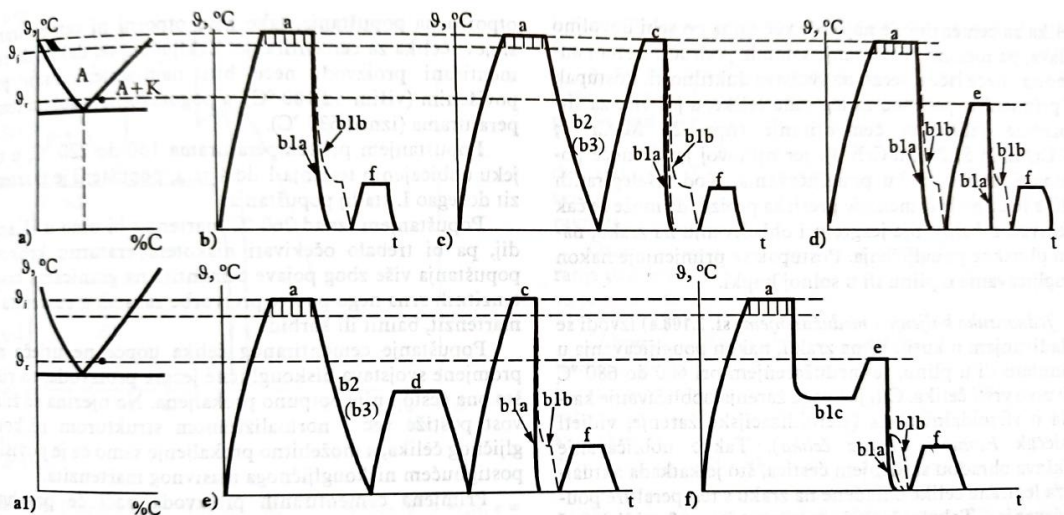
Cjelina ovih triju faza postupka (pougličanja, kaljenja i temperaturnog popuštanja) naziva se **cementiranje**.



Otvrdnjivanje površine vrši se na način da se površina čelika obogati ugljikom. Na visokim temperaturama događa se adsorpcija ugljikovih atoma u površinu čelika te zatim slijedi njihova difuzija kroz površinski sloj čelika. Ovakvim načinom dobiva se čelik kojem će površina biti tvrđa i otpornija na trošenje dok će jezgra zadržati žilavost kako bi materijal ostao postojan i tijekom udarnih opterećenja. Takvom procesu najčešće se podvrgavaju strojni dijelovi koji moraju biti otporni na trošenje i dinamička opterećenja poput osovine, vratila i zupčanika.



Slika 4.1. - Ravnotežni odnosi između udjela CO i CO<sub>2</sub> u sredstvu za pougličavanje, temperature i udjela ugljika u čeliku



Slika 4.2. - Dijagrami postupka kaljenja nakon pougličanja

## 4.1 Pougličavanje

### 4.1.1 Pougličavanje u granulatu

Pougličanje u granulatu najstariji je način pougličanja, a danas se izvodi pretežno u slučaju maloga broja proizvoda, koje treba pougličiti. Granulat je ili anorganskog sastava ili organskog (drveni i koštani ugljen ili ugljen od životinjskih koža), a njemu se dodaje aktivator: alkalični ili zemno alkalični karbonat, npr. barijev karbonat, BaCOs.

Omjer je ugljena i aktivatora 80:20 do 60:40.

Granule su u smjesi veličine zrna graška do veličine zrna kukuruza, a nikako prah, iako se katkad koristi izraz.

### 4.1.2 Pougličavanje u plinu

Pougličanje u plinu u biti se i ne razlikuje od pougličanja u granulatu budući da se vidjelo da se i pougličanje u granulatu ipak svodi na cijepanje ugljičnog monoksida, dakle, plina.

Plinovi nosači obično su gradski plin, zemni plin ili generatorski plin, a oni se aktiviraju dodavanjem manjih količina alkana (npr. propana) ili nekih kapljevine.

Gradski i zemni plin treba prije ulaska u proces posebno prirediti (pročistiti i prilagoditi im sastav prema potrebama pougličavanja).

Tako na primjer potrebno je sniziti udjele ugljičnog dioksida (razugličanje) i metana (CH<sub>4</sub> se pri temperaturi pougličavanja toliko se intenzivno raspada da mu ugljik nakon raspada, metanove molekule prelazi u oblik čađe, što sprečava proces pougličavanja).

Ugljični dioksid se uklanja iz plina strujanjem plina preko drvenog ugljena u retorti pri oko 1 000 °C, čime se dioksid reducira u monoksid.

Udio metana snižava se strujanjem plina preko niklovoga katalizatora u generatoru pri oko 1 000 °C

Pri pougličavanju plinom može se udešavati pougličujuće djelovanje u široku rasponu i tako utjecati na oblik krivulje rasporeda ugljika u površinskom sloju (sl. 2.105). Najčešće se i najefikasnije tok pougličanja regulira različitim udjelima

dodanog aktivatora. Kako je i regulacija temperature znatno preciznija nego pri pougljičavanju u granulatu, mora se zaključiti da će pougljičavanje u plinu biti općenito pouzdanije za kvalitetu proizvoda i za njezinu jednoličnost. Daljnja je prednost plinskog pougljičavanja čistoća površine proizvoda nakon završenoga procesa, Pa otpada čišćenje. Isto tako, ugrijavanje i progrijavanje traje kraće, pa je specifična potrošnja energije manja nego pri granulatom pougljičavanju. Negativnosti su pougljičavanja u plinu visoki investicijski troškovi uređaja, pa se zato ono i primjenjuje samo pri velikim serijama proizvoda. Postupak je i utoliko osjetljiv što bi moguće unošenje oksida u atmosferu peći znatno poremetilo ravnotežu u peći, pa zato proizvode prije unošenja u peć treba očistiti od oksida (četkanjem) i masnoća (pranjem u trikloretilenu). Peći su za plinsko pougljičavanje ili jamskog ili pro- točnog tipa, uZ napomenu da je potrošnja plina u jamskim pećima manja.

#### *4.1.3. Pougličavanje u solnoj kupki*

Pougljičavanje u solnoj kupki (tj. u sredstvu kapljevitoga agregatnog stanja) najčešće se može svrstati u postupke karbonitriranja iznad temperature  $A_3$  jezgre.

Rastaljene soli za pougljičavanje sadrže, neke udjele cijanida koji se raspadaju pri temperaturama pougljičavanja, pa u čeličnu površinu rasprostranjuju istodobno i ugljik i dušik.

Što je temperatura pougljičavanja viša, sve je veći udjel rasprostranjajućeg ugljika u odnosu na rasprostranjujući dušik.

Dvije su vrste cijanidnih soli:

1. Kupke koje se sastoje pretežno od natrijeva cijanida te s manjim udjelom kalijeva cijanida i nešto klorida. Te se kupke nazivaju aktiviranima, a aktiviraju se stroncijevim ili barijevim kloridom ( $SrC_{12}$ ,  $BaC_{12}$ ). Površinu kupke treba pokriti ljuskastim grafitom kako ne bi nastupila oksidacija u dodiru sa zrakom;
2. Neaktivirane kupke sadrže bescijanidni aktivator (smjesa različitih klorida), koji se dodaje cijanidnim solima u omjeru 1 : 1, a koji se aktivira tek u dodiru s kisikom iz zraka. Te se kupke zato ne pokrivaju grafitom, a rabe se gotovo samo za rad pri temperaturama nižim od  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ , odnosno za „pravo“ karbonitriranje, a manje za pougljičavanje.

Pougljičenje čelika u solnim kupkama odvija se na osnovi raspada cijanida pri

visokim temperaturama u prisutnosti željeza.

Odvijanje kemijskih reakcija vrlo je zamršeno.

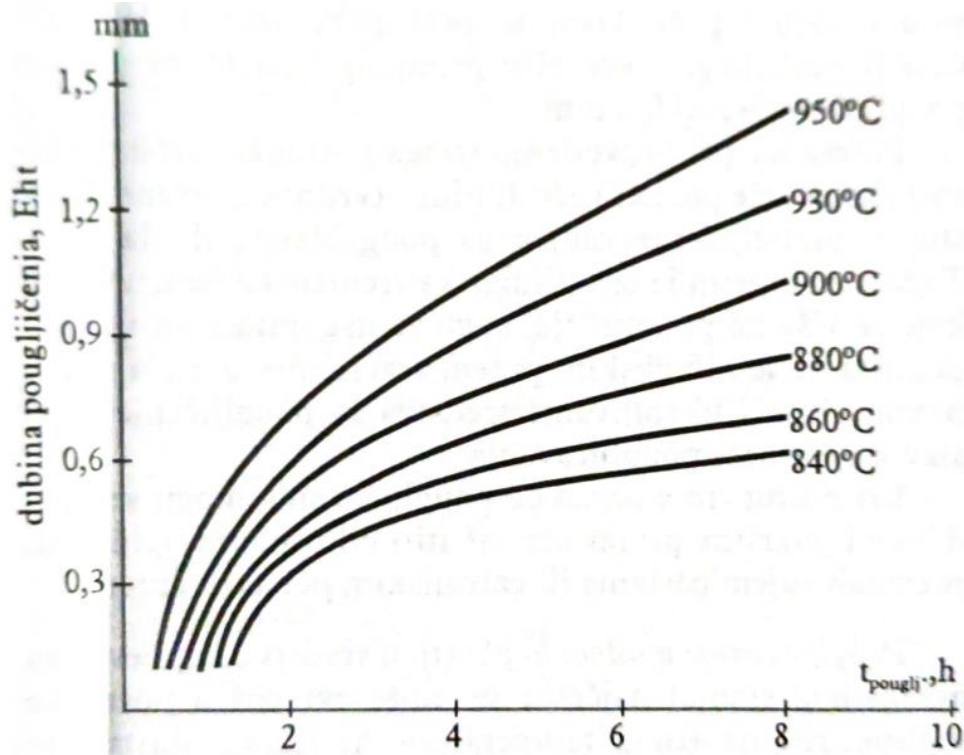
Uz izravnu dobavu ugljika iz cijanida u aktiviranim će kupkama stroncijev, odnosno barijev klorid prelaziti u stroncijev odnosno barijev cijanid te će i oni posredno sudjelovati pri dobavi ugljika i dušika čeliku.

Brzina je difuzije ugljika ovdje viša nego pri pougljičavanju u granulatu i u plinu zahvaljujući i višim temperaturama obradbe (930 do 950 pa i do 980 ° C), ali i prisutnosti dušika koji ubrzava difuziju ugljika u austenit.

Ovi su odnosi slikovito prikazani dijagramom na **slici 2.107.**, a snimljeni su pri pougljičavanju u aktiviranoj kupki nepromijenjenog sastava.

U solnim se kupkama, osim toga, proizvod vrlo brzo ugrijava i progrijava, što može biti i nepoželjno u slučaju proizvoda sklonih deformiranju.

Zato je gotovo uvijek potrebno pregrijavanje ili u nekoj inertnoj solnoj kupki ili u komornoj peći (obično s cirkulacijom zraka).



Slika 4.3. – Dubina pougljičenja u aktiviranoj solnoj kupki

## 4.2 Kaljenje

Postupak kaljenja je jedan od sastavnih dijelova procesa cementiranja čelika.

Kaljenje se izvršava odmah pri završetku postupka pougljičavanja.

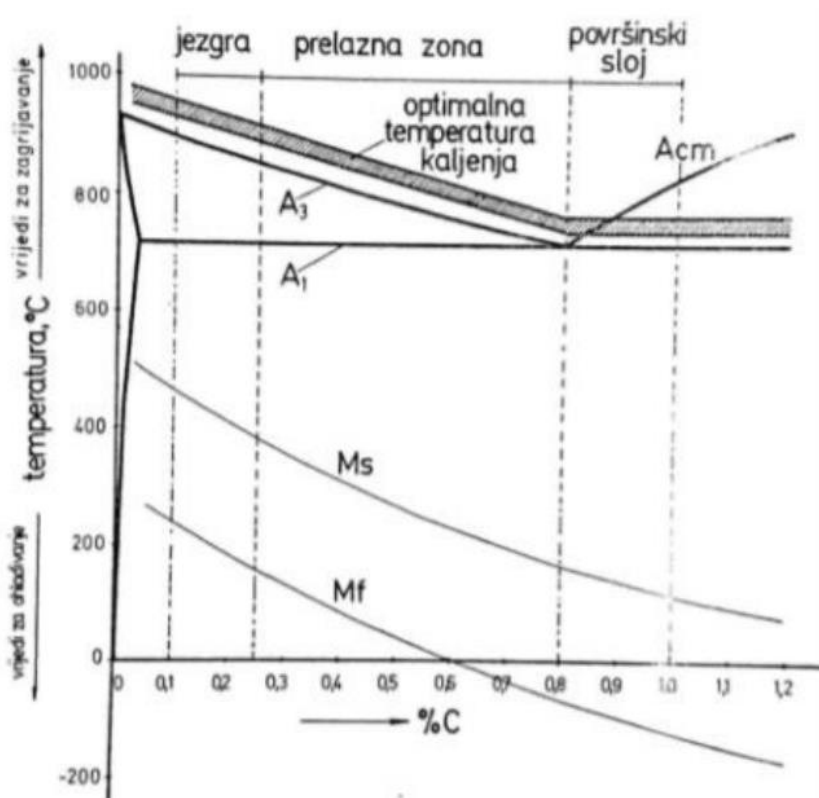
Cilj ovakvog postupka je postizanje visoke tvrdoće površinskog sloja i martenzitnu

strukturu.

Osnovni preduvjet za postizanje ovakvih rezultata je zagrijavanje čelika na temperaturu austenizacije, te održavanje čelika na željenoj temperaturi određeni period, nakon toga slijedi gašenje/hlađenje čelika.

S obzirom da se kod cementiranja postupak pougljičavanja izvršava prije postupka kaljenja, događa se problem određivanja temperature prilikom kaljenja.

Površinski sloj sadržavati će puno veći udio ugljika nego što će sadržavati jezgra. Što znači da će površinski sloj pripadati nadeutektoidnom području dok će jezgra pripadati u podeutektoidno područje.



Slika 4.4. - Mikrostrukture u slojevima čelika s obzirom na sadržaj ugljika

Dijagram prikazuje kako se sadržaj ugljika ravnomjerno slabi od površinskog sloja prema jezgri.

Sadržaj ugljika u čeliku predstavlja uvjet za odabir temperature kaljenja.

Temperatura kaljenja iznositi će od 30 °C do 70 °C iznad linije A<sub>3</sub> za podeutektoidni čelik te od 50 °C do 70 °C iznad A<sub>1</sub> za nadeutektoidni čelik.

Kada bi se čelik kalio temperaturom koja je savršena za kaljenje jezgre, površinski sloj ostao bi pregrijan.

U slučaju kada bi proces kaljenja bio proveden s temperaturom optimalnom za površinski sloj, to bi dovelo do nepotpune austenizacije čelika.

Temperatura kaljenja će se određivati s obzirom na to jesu li prioritet svojstva jezgre ili svojstva površinskog sloja.

Početak i kraj martenzitne transformacije određeni su sadržajem ugljika.

Prilikom kaljenja, transformacija će se odviti prvo u području jezgre na višoj temperaturi, a nakon daljnjeg spuštanja temperature, počinje transformacija u površinskim slojevima.

#### 4.2.1 Jednostruko kaljenje

Jednostruko kaljenje tehnički je izvedivo nakon pougličanja u granulatu (hlađenje +proizvoda u kutiji unutar peći ili izvan nje), te nakon pougličanja u plinu (hlađenje na zraku).

Nakon takvog ohlađivanja proizvod se vadi iz kutije (ako je pougličavan u granulatu), čisti i prvaj se varijanti ponovno ugrijava u komornoj peći u zaštitnoj atmosferi ili u inertnoj solnoj kupki do temperature austenitiziranja jezgre, te se gasi u odgovarajućemu sredstvu ovisno o vrsti čelika.

Ovakav će postupak osigurati dobra svojstva jezgre proizvoda, posebno ako se radi o legiranome prokaljivom čeliku.

No, površinski će slojevi biti visoko pregrijani sa svim posljedicama opisanim.

Ta će pregrijanost biti to više uzrokom visokog udjela zaostalog austenita, što je čelik više legiran.

Zato se preporučuje duboko hlađenje proizvoda neposredno nakon gašenja, a prije popuštanja.

Redovito zadovoljavaju temperature dubokog hlađenja od -40 do -70 °C, dakle uronjavanje u smjesu suhog leda i alkohola.

Takvo se duboko hlađenje posebno preporučuje za čelike koji sadrže gama- gene elemente (Ni, Mn), jer će u njihovim rubnim slojevima biti posebno visok udio zaostalog austenita.

Da bi se izbjegla pojava karbidne mreže provodi se postupak jednostrukog kaljenja.

Svim postupcima ovakve vrste zajedničko je da se između pougličavanja i kaljenja

provodi postupak transformacije austenita te se naknadnom austenizacijom iznad A1 postiže djelomična prekrystalizacija.

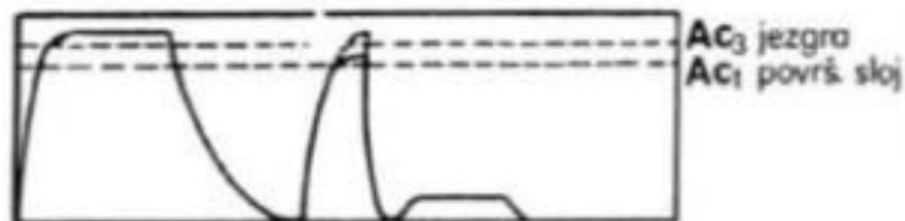
Cilj ovakvih postupaka je rastvaranje karbida na granicama zrna što rezultira sitnijim zrnima.

Prema drugoj varijanti jednostrukog kaljenja, gašeni se predmet ponovno ugrijava samo do temperature austenitiziranja rubnoga sloja i gasi ovisno o sastavu čelika. Ovakav postupak ostavlja jezgru proizvoda gotovo nepromijenjenom u odnosu na gašeno stanje (jezgra je bila ugrijava tek u područje austenit + ferit), a rubni se slojevi pravilno zakaljuju.

No jezgra čelika za cementiranje najčešće već sama po sebi dovoljno žilava, pa njezino ohlađivanje samo iz područja ferita i austenita i neće jače utjecati na svojstva duktilnosti.

Postupak je primjenljiv posebno za legirane čelike, a još više za sitno zrnate čelike za cementiranje (npr. 20 MoCr 4; 18 CrMnTi 5; 20 MoCrB 4), jer njihovoj jezgri neće pogrubjeti zrno u tijeku pougljičavanja.

Kod više legiranih čelika te uz male dimenzije presjeka proizvoda može se čak očekivati zakaljivanje jezgre pri ohlađivanju na zraku, nakon plinskog pougljičenja. Postupak se primjenjuje nakon pougljičavanja u plinu ili u solnoj kupki.



Slika 4.5. – jednostruko kaljenje

#### 4.1.2 Jednostruko kaljenje s međuzarenjem

Jednostruko kaljenje s međuzarenjem izvodi se ohlađivanjem u kutiji ili na zraku, nakon pougljičavanja u granulatu ili u plinu, te među žarenjem pri 600 do 680 °C ovisno o vrsti čelika.

Cilj je ovakvog žarenja je uobličavanje karbida u sferoidalni oblik (sferoidizacijsko žarenje, vidjeti odsječak Postupci žarenja čelika).

Takvo uobličavanje olakšava obradbu skidanjem čestica, što je katkada aktualno za legirane čelike ohlađene na zraku s temperature pougljičavanja.

Takvo žarenje, osim toga, sferoidizira možebitno nastalu karbidnu mrežu nelegiranih i vrlo nisko legiranih čelika, dakle i smanjuje sklonost olupljivanju pougljičenoga sloja nakon gašenja s temperature austenitiziranja rubnih slojeva.

#### 4.1.3 Dvostruko kaljenje

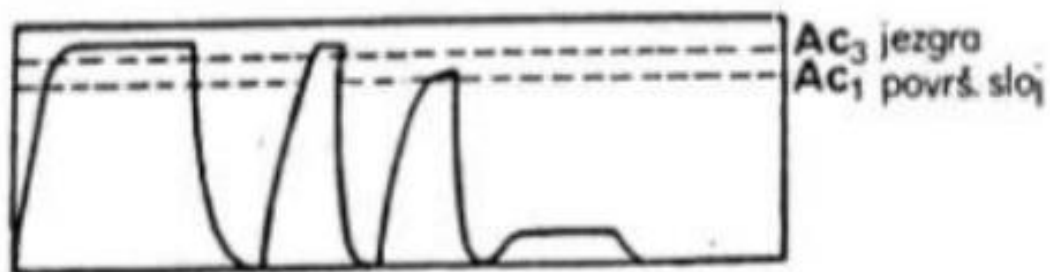
Dvostruko kaljenje je kroz povijest bilo zamišljeno kao postupak koji omogućava najvišu površinsku tvrdoću te najveću žilavost jezgre.

Korištenjem ovog postupka u praksi se zaključilo da postizanje takvih rezultata nije moguće.

To se događa iz razloga što se najveća žilavost koja se ostvaruje prvim kaljenjem, na temperaturi koja je optimalna za kaljenje jezgre, bitno smanji drugim kaljenjem s niže temperature.

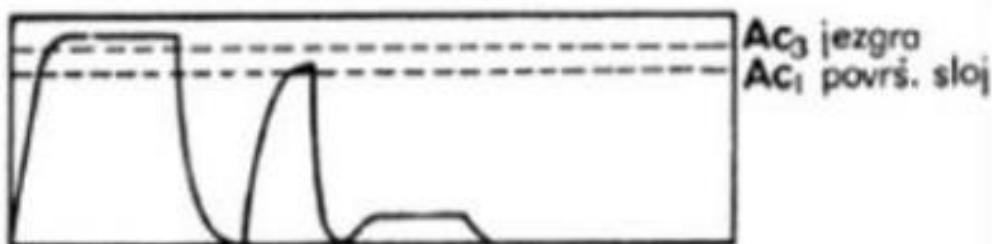
Drugo kaljenje se provodi na temperaturi koja je preniska za kaljenje jezgre.

Rezultat ovakvog kaljenja je djelomična prekrystalizacija jezgre koja u sebi sadrži heterogenu strukturu austenita i ferita.



Slika 4.6. – dvostruko kaljenje

Poseban slučaj, izdvaja se postupak dvostrukog kaljenja u kojem se prvo kaljenje provodi direktno na temperaturi pougljičavanja, dok se drugo kaljenje izvodi s temperature kaljenja površinskog sloja.



Slika 4.7. - Dvostruko kaljenje s prvim kaljenjem na temperaturi pougljičavanja



## 4.2 Nisko temperaturno popuštanje

Postupak nisko temperaturnog popuštanja radi se kako bi se izbjegla opasnost od nastajanja deformacija ili nekakvih defekata u mikrostrukturi zbog visoke napetosti cementiranog čelika.

Nisko temperaturno popuštanje najčešće se provodi u komornim pećima sa cirkulacijom zraka ili u kupkama.

Efekt koji ovaj postupak ima na čelik ovisi o temperaturi i trajanju.

Postupak nisko temperaturnog popuštanja se odvija na temperaturama između 150 °C i 200 °C.

Temperature iznad 200 °C se ne primjenjuju jer mogu dovesti do velikog smanjenja tvrdoće i dinamičke izdržljivosti.

Zaključuje se, dakle, da cementirani proizvodi neće biti namijenjeni radu pri povišenim (višim od 180 °C), a pogotovo ne visokim temperaturama (iznad 630 °C). Kao što ni visoko ugljični ne legirani i nisko legirani čelici nisu otporni na popuštanje, tako nisu otporni ni cementirani slojevi čelika za cementiranje.

Površinska tvrdoća čelika, tokom ovog postupka, iznosi između 58 i 62 HRC.

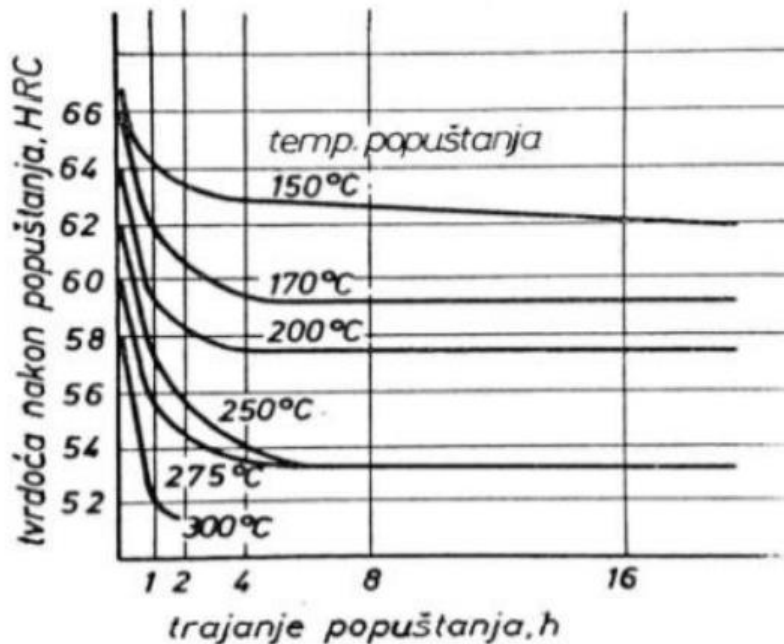
Osim smanjenja tvrdoće, također se smanjuje i krhkost čelika.

Događaju se promjene u mikrostrukturi te se odvija otpuštanje zaostalih naprezanja u čeliku.

Popuštanjem Pri temperaturama 160 do 220 °C u tijeku uobičajenih trajanja 1 do 4 sata, popušteni je martenzit dosegao stadij popuštanja.

Popuštanjem iznad 260 °C martenzit bi ušao u II. stadij, pa bi trebalo očekivati nisko temperaturnu krhkost popuštanja više zbog pojave cementita na granicama martenzitnih zrna nego pojave pretvorbe zaostalog austenita u martenzit, bainit ili karbid.

Čelik postaje lakše obradiv za obradu skidanjem čestica te se omekšava kako bi se olakšala i obrada deformacijom.



Slika 4.8. - Utjecaj temperature i vremena na tvrdoću čelika

Primjena cementiranih proizvoda naći će posebno opravdanje za proizvode koji će u radu biti istodobno napregnuti i udarno i na trošenje, i po tome se razlikuju od poboljšanih čelika, koji su, doduše, čvrsti i žilavi, ali nisu otporni na trošenje, ako nisu bili još i nitrirani ili slično termo kemijski obrađeni.

Tako će se npr. cementirati: vodeće čahure, koljenasti zglobovi, svornjaci, čepovi osovina, koje rotiraju u kliznim ležajima, zupčanici (obično manji u paru), regulacijski dijelovi mehaničkih uređaja, kardanski zglobovi, koljenaste osovine, lančanici, automobilske poluosovine, stapni svornjaci, vretena, manje bregaste osovine itd.

## 5. Čelici za cementiranje

Čelici koji se podvrgavaju postupcima cementiranja su niskougljični čelici čiji sadržaj ugljika, prije postupka cementiranja, iznosi između 0,1% i 0,2%.

Spadaju pod konstrukcijske čelike, a mogu biti niskolegirani ili nelegirani.

Udio ugljika ovih čelika se nakon provedenog postupka pougljičenja povisi na razinu od 0,8% do 0,9% u površinskom sloju.

Na taj način površinski sloj postaje zakaljiv te gašenjem s optimalne temperature može poprimiti strukturu visoko ugljičnog martenzita.

Jezgra poprima feritno-perlitnu strukturu ako obradak nije prokaljen ili strukturu nisko ugljičnog martenzita u slučaju kad je izvršeno prokaljivanje.

Na takav način površinski sloj će poprimiti višu tvrdoću te jako dobru otpornost na trošenje dok će jezgra ostati žilava.

Poželjno svojstvo kod legirajućih čelika je prokaljenost jer se čelici za cementaciju nisko popuštaju na temperaturi  $\leq 220$  °C pa jezgra dobiva strukturu nisko ugljičnog martenzita.

Visoko temperaturno popuštanje se nikada ne koristi u kombinaciji s postupkom pougljičenja, jer bi popuštanjem na višim temperaturama pougljičeni rubovi postali mekani te nedovoljno otporni na trošenje.

Svrha legirajućih elemenata je pojačanje utjecaja prokaljivanja na pougljičeni čelik. Legirajući elementi utječu na dubinu pougljičenog sloja, koncentraciju ugljika u površinskom sloju te na samu brzinu postupka pougljičavanja.

Legirajući elementi u čelicima koji se pougljičavaju, mogu se podijeliti na dvije skupine, a to su karbidotvorci i nekarbidotvorci.

Karbidotvorci su elementi poput kroma (Cr), molibdena (Mo) te vanadija (V). Karbidotvorci snižavaju koeficijent difuzije ugljika u austenitu te na taj način povećavaju udio ugljika u površinskom sloju.

Nekarbidotvorci su elementi poput nikla (Ni) i mangana (Mn) i oni omogućavaju postizanje veće dubine cementacije.

Kada je potrebno odrediti vrstu čelika koji će se podvrgnuti procesu cementiranja s obzirom na dimenzije proizvoda, može se utvrditi da će se za proizvode promjera do 10 mm biti prikladan nelegirani čelik, za promjere do 80 mm koristi se Mn – Cr čelik, a za proizvode svih većih dimenzija Cr – Mo i Cr – Ni čelik.

Osnovne karakteristike čelika koje se koriste za cementiranje su sljedeće:

- Nelegirani čelici – u tu vrstu spadaju čelici kao što su C10 i C15.

Zakaljivanje na njima vrši se isključivo u vodi, imaju slabu sposobnost prokaljivanja te relativno slaba svojstva jezgre.

Radi navedenih razloga, koriste se za izradu dijelova manjih dimenzija te dijelova koji nisu podvrgnuti jakim udarnim opterećenjima.

Koriste se za izradu malih osovina, zupčanika, poluga, svornjaka i čahura.

- Krom (Cr) – čelici – npr. 15Cr2, posjeduju dobra svojstva zakaljivosti i prokaljivosti. Mogu se kaliti u ulju ili u vodi.

Skloni su stvaranju pogrubljenog zrna te stvaranju karbida u pougljičenom sloju.

Najčešću primjenu nalaze u automobilskoj industriji gdje se koriste za izradu bregastih osovina, poluosovina i sličnih dijelova.

- Mangan (Mn) – krom (Cr) čelici – poput 16MnCr15

Zbog dobre prokaljivosti koriste se za izradu proizvoda poput osovina, vretena alatnih strojeva, klipnjača motora i bregastih osovina

- Molibden (Mo) – krom (Cr) čelici – npr. 20CrMo5 ili 20MoCr4

Posjeduju jako dobra svojstva prokaljivosti zbog kombinacije kroma i molibdena.

Molibden pouspješuje stvaranje karbida otpornih na trošenje te nejednolik raspored po presjeku.

Ova vrsta čelika koristi se za izradu koljenastih i bregastih osovina, zupčanika u mjenjačkim kutijama i sličnim proizvodima.

- Nikal (Ni) – Krom (Cr) čelici – čelici poput 14NiCr6 i 18NiCr8.

Posjeduju svojstvo vrlo dobre prokaljivosti, ali zbog opasnosti od pojave zaostalog austenita u rubnim slojevima, potrebno ih je gasiti s nižih temperatura ili ih podvrgnuti dubokom hlađenju odmah po završenom gašenju.

Primjenu nalaze kod proizvoda najvećih dimenzija poput zupčanika lokomotiva, ali se koriste i za izradu koljenastih osovina, osovina u zrakoplovima i sl.

## **6. Ispitivanje kvalitete cementiranog čelika**

Ispitivanje kvalitete cementiranih čelika izvršava se kroz tri značajke.

Prva korak ispitivanje je dubina cementiranog sloja.

Osim mjerenja dubine, vrši se i mjerenje tvrdoće površinskog sloja.

Osim ovih mehaničkih svojstava, kao zadnja stavka, ispituje se i mikrostruktura cementiranih dijelova.

### **6.1 Ispitivanje dubine cementiranog sloja**

Za određivanje dubine cementiranog sloja koristi se postupak Vickersove metode.

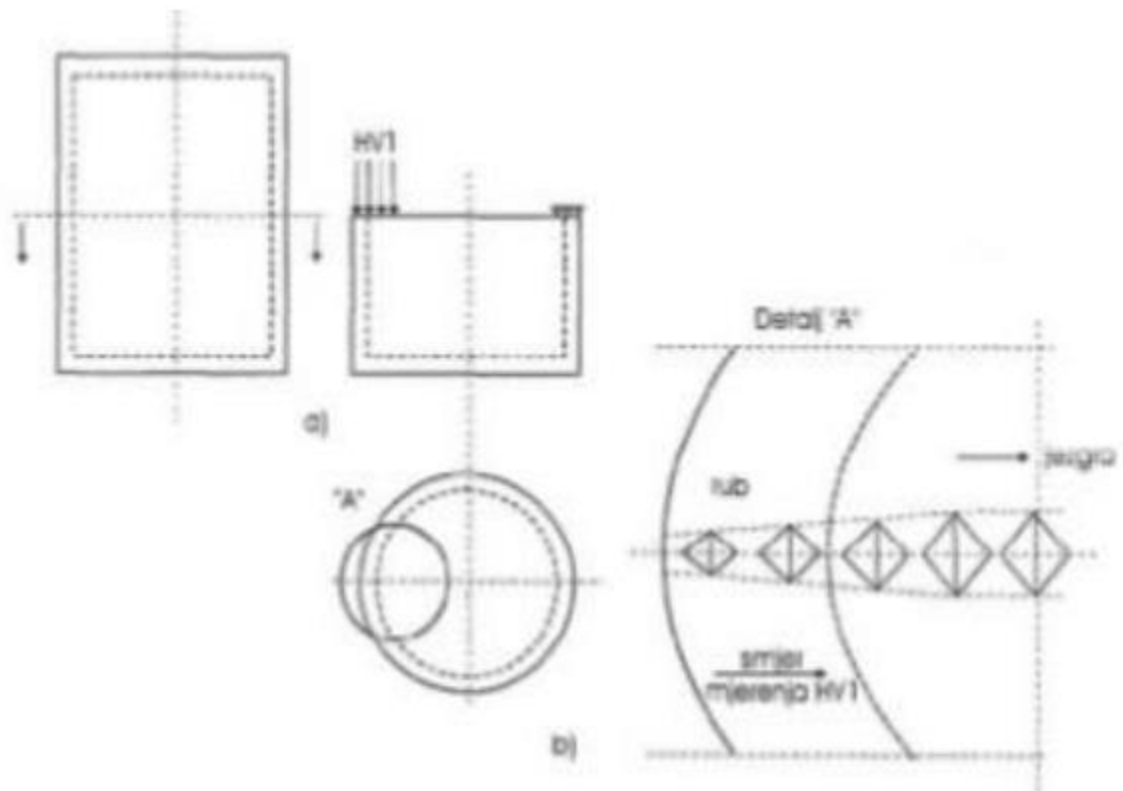
Ovakva vrsta testa tvrdoće provodi se na poprečno presječenom uzorku koji je prethodno podveden postupcima pougličavanja i kaljenja.

Nakon rezultata mjerenja slijedi utvrđivanje efektivne dubine cementiranog sloja.

Efektivna dubina cementiranog sloja je dubina na kojoj je postignuto 80% maksimalne tvrdoće cementiranog sloja.

Ovakvim načinom se može utvrditi neka određena tvrdoća i dogovoriti da će ta

tvrdća označavati „tehničku dubinu cementacije“. (slika 6.1.)



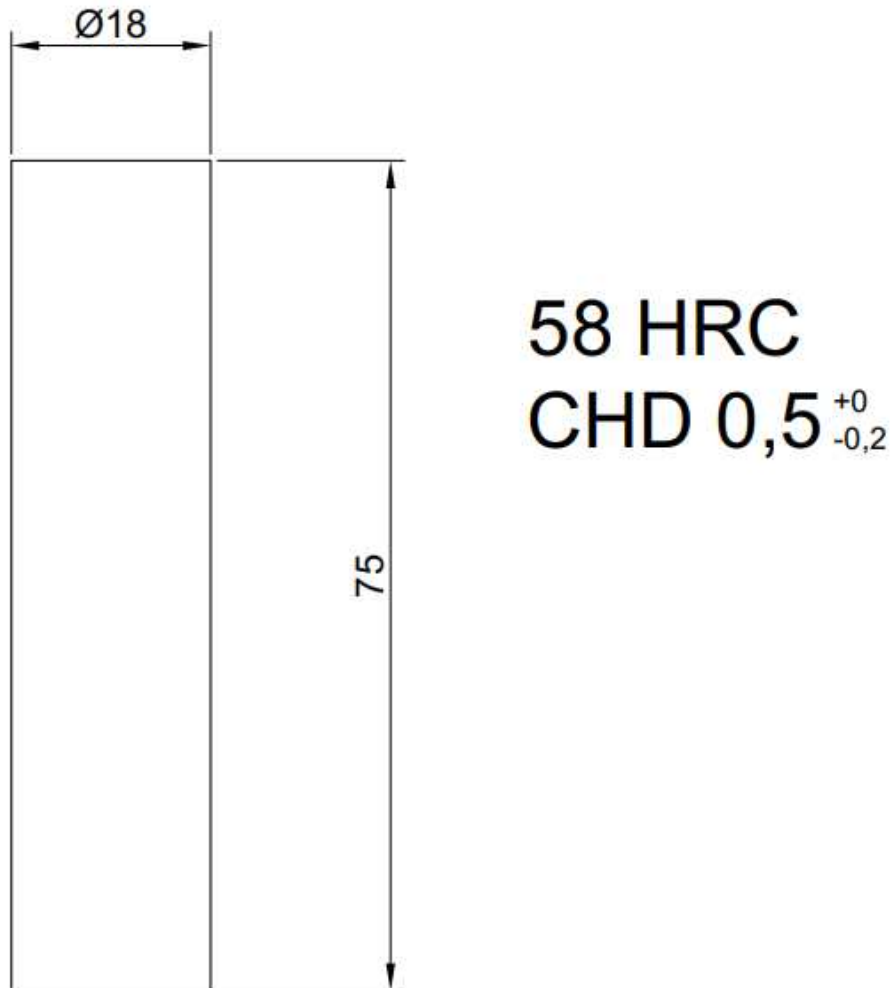
Slika 6.1. - Shematski prikaz utvrđivanja dubine cementiranog sloja i mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom

## 7. Postupak toplinske obrade strojnog dijela

Za definiranje postupka cementiranja za strojni dio svornjak prema postavljenim zahtjevima je praktični dio ovog završnog rada.

Tvrdoća površinskog sloja, koja iznosi 58 HRC, te dubina pougljičenog sloja, koja iznosi 0,6 mm, su postavljeni zahtjevi.

Nacrt strojnog dijela svornjaka prikazuje Slika 7.1.



Slika 7.1. - Nacrt strojnog dijela svornjaka i zahtjevi za obradu

Kemijski sastav: Ugljik C(0,12 – 0,18%), Mangan Mn(0,30 – 0,60%), Sumpor S(max 0,035%), Fosfor P(max 0,035%), Silicij Si(0,30%) i Željezo Fe(ostatak)

Mehanička svojstva: vlačna čvrstoća(420-540 MPa), granica tečenja(okvirno 270 MPa za poputno žareni čelik), istezanje pri prekidu(18-25% zavisnost od stanja obrade), tvrdoća(120-180 tvrdoće po Brinellu)

## 7.1. Materijal strojnog dijela svornjaka

Strojni dio svornjak izrađen je od čelika C15, koji pripada skupini nelegiranih čelika za poboljšavanje.

Ovaj materijal koristi se za izradu strojnih dijelova manjih dimenzija i posebno je prikladan za dijelove koji nisu izloženi jakim udarnim opterećenjima.

C15 sadrži oko 0,15% ugljika, što mu ne omogućava visoku tvrdoću sve dok se ne podvrgne postupku cementiranja

## 7.2. Definiranje procesa cementiranja za strojni dio svornjak

Za cementiranje strojnog svornjaka u skladu s postavljenim zahtjevima, potrebno je definirati parametre postupaka pougljičavanja, kaljenja i nisko temperaturnog popuštanja.

Budući da je strojni dio svornjak relativno malih dimenzija, optimalan način za pougljičavanje je odabran kao pougljičavanje u krutom sredstvu, konkretno u granulatu drvenog ugljena.

Nakon što je odabrano sredstvo za pougljičavanje, potrebno je utvrditi odgovarajuću temperaturu i vrijeme držanja obratka u peći.

Prema formuli za difuzijski put u ovisnosti o vremenu moguće je izračunati okvirnu dubinu cementiranog.

Formula za izračunavanje dubine glasi:

$$\delta = K \cdot \sqrt{tp} \text{ [mm]}$$

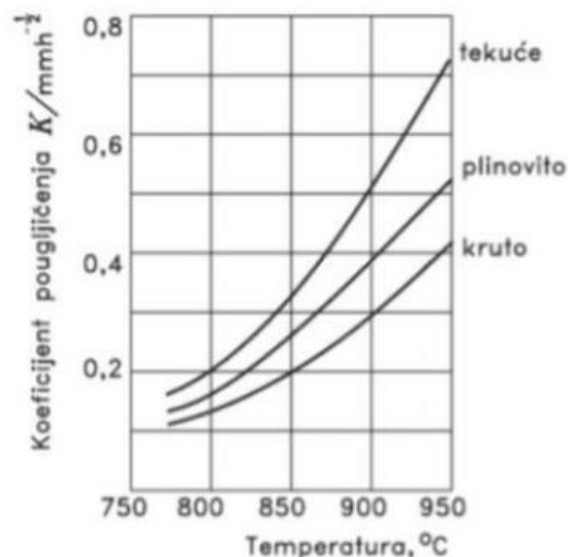
gdje je:

$\delta$  - okvirna dubina cementiranog sloja [mm]

K - koeficijent pougljičenja [mmh<sup>-1/2</sup>]

tp - vrijeme pougljičenja [h]

Koeficijent pougljičenja K je ovisan o vrsti sredstva korištenog za pougljičavanje te o temperaturi pougljičavanja, a određuje se prema grafu koji je prikazan na slici 7.2

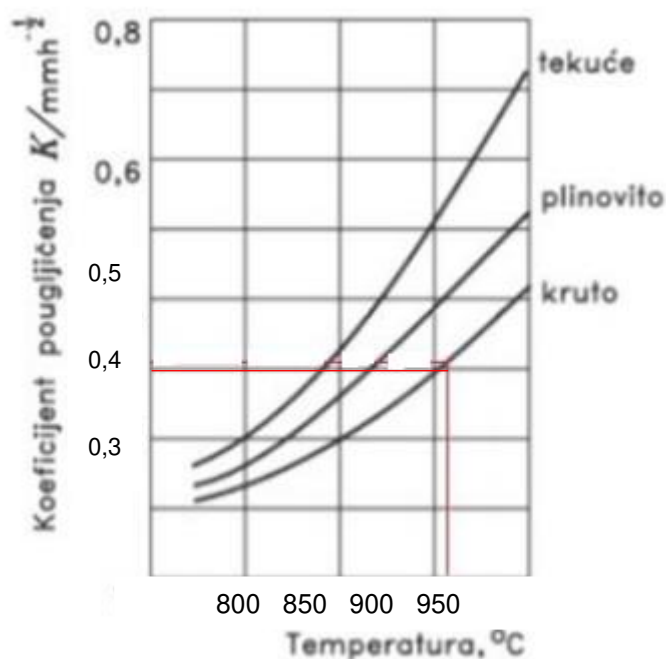


Slika 7.2. - Ovisnost koeficijenta pougljičenja o sredstvu pougljičenja i temperaturi

Za ovaj proces odabrana je temperatura pougljičavanja na 950 °C u trajanju od 1 sat. Strojni dio svornjak održava se na temperaturi austenitizacije (950 °C) jezgre te se drži na toj temperaturi 30 minuta.

Kada se navedeni parametri ucrtaju na grafu prikazanom na slici 7.3, dobije se koeficijent K koji iznosi 0,4 mmh-1/2.

Ovo je prikazano na slici 7.3.



Slika 7.3. - Koeficijent pougljičavanja za proces cementiranja svornjak



Nakon ovog koraka potrebno je sve vrijednosti unijeti u formulu za izračunavanje okvirne dubine cementiranog sloja koja je ranije navedena:

$$\delta = K \cdot \sqrt{tp} \text{ [mm]}$$

$$\delta = 0,4 \cdot \sqrt{1}$$

$$\delta = 0,4 \text{ mm}$$

Rezultat koji je naveden zadovoljava traženi početni zahtjev.

Nakon pougličavanja odabran je postupak jednostrukog kaljenja pri 920 °C (uz prokaljivanje jezgre) do sobne temperature.

Nakon austenitizacije, kaljenje se izvodi gašenjem u vodi.

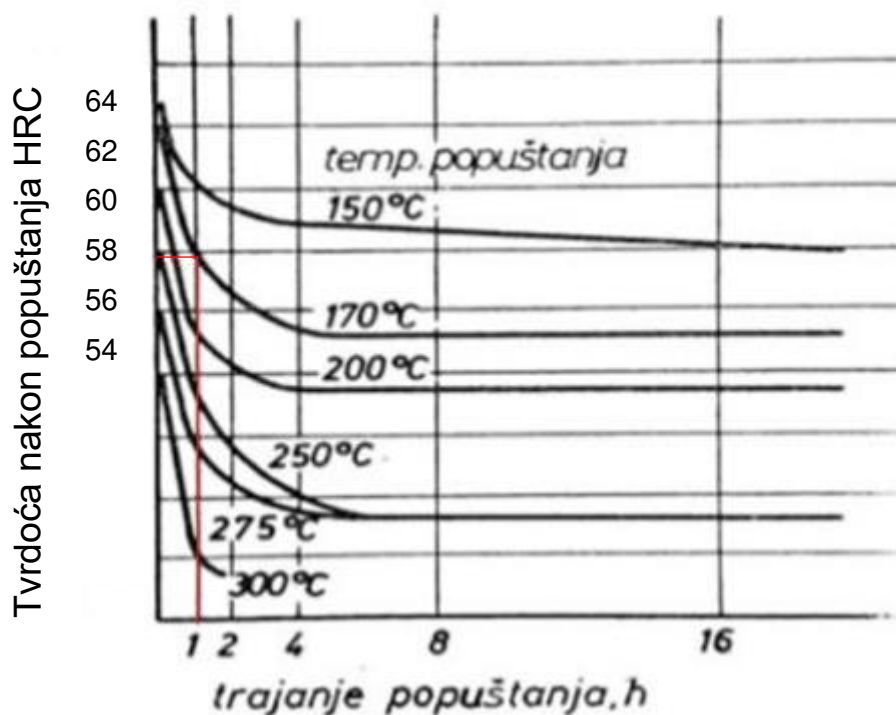
Posljednji korak u postupku je nisko temperaturno popuštanje.

Već je navedeno da se ovaj postupak provodi na temperaturama između 150 °C i 200 °C.

Odabrana temperatura popuštanja je 170 °C, uz trajanje postupka od 1 sat.

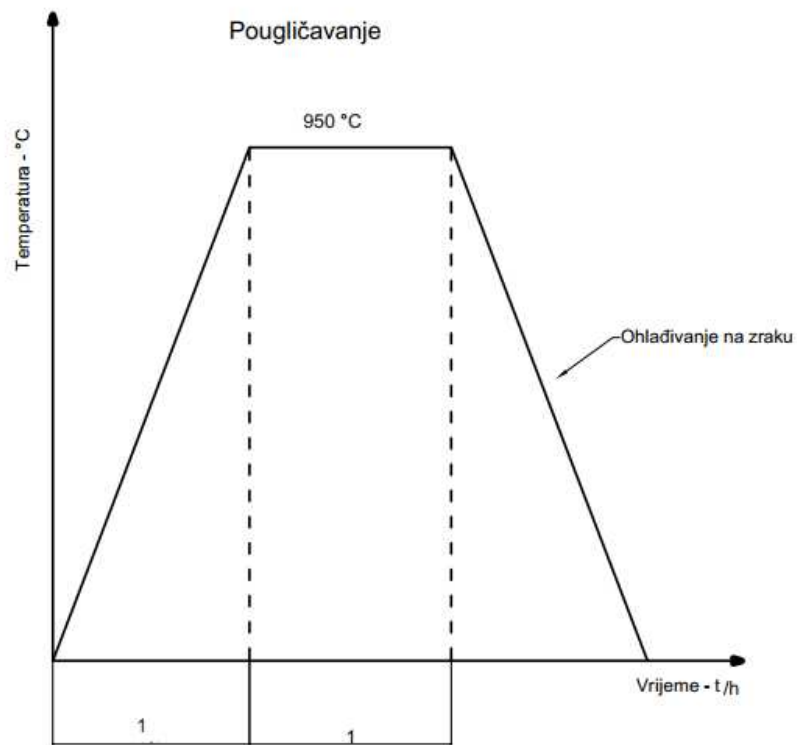
Kada se ovi parametri ucrtaju u graf prikazan na slici 3.18, rezultanta tvrdoća iznosi približno HRC ≈ 57,7, što ispunjava početni zahtjev.

Parametri ucrtani u grafu prikazani su na slici 7.4.

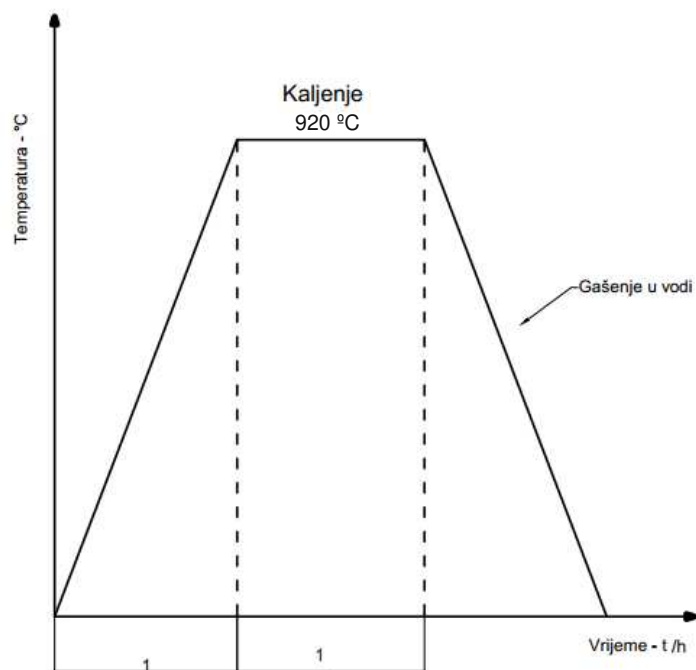


Slika 7.4. – Nisko temperaturno popuštanje za strojni dio svornjak

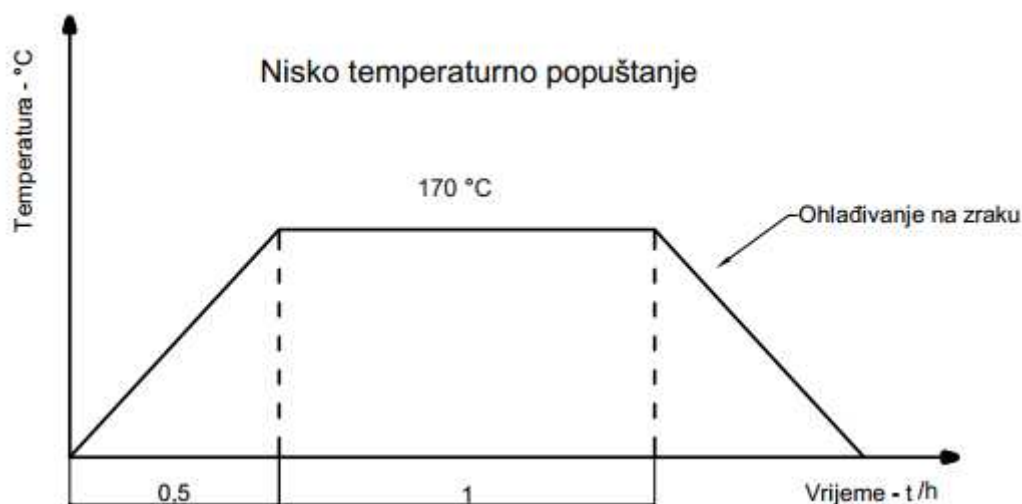
Slika 7.5./7.6./7.7. prikazuju kompletan proces cementiranja svornjaka



Slika 7.5. - Proces pouglčavanja strojnog dijela svornjak



Slika 7.6. - Proces kaljenja strojnog dijela svornjak



Slika 7.7. - Proces niskotemperaturnog popuštanja svornjaka

### 7.3. Tehnološka dokumentacija projekta cementiranja

Za proces cementiranja strojnog dijela svornjak potrebno je izraditi odgovarajuću tehnološku dokumentaciju.

Tehnološka dokumentacija za procese toplinske obrade dokumentira se u obliku operacijskih listova.

Za proces cementiranja strojnog dijela svornjak bilo je potrebno izraditi tri operacijska lista.

Prvi list odnosi se na postupak pougličavanja i kaljenja obratka, dok je drugi namijenjen za postupak nisko temperaturnog popuštanja.

U operacijskim listovima postupci su podijeljeni na zahvate, pri čemu su definirani njihovo trajanje i ostali podaci važni za izvršavanje zahvata, kao što su temperatura, sredstvo, oprema ili tehnika potrebna za uspješno vršenje zahvata.

Tablica 7.1. prikazuje operacijski list za postupke kaljenja i pougličavanja, dok tablica 7.2. prikazuje operacijski list za postupak nisko temperaturnog popuštanja.

Tablica 7.1. - Operacijski list za postupak pougličavanja i kaljenja strojnog dijela svornjak

Tehnički fakultet Pula			Izradio: Vito Kutić		List: 1
Operacijski list : 1			Naziv djela: Svornjak		Ukupan broj listova: 3
Naziv operacije: Pougličavanje			Materijal: C15	Operacija broja: 1	
Zahvat	Opis zahvata	Količina:	Korišteno sredstvo ili oprema	T [°C)	Trajanje [min]
1	Punjenje kutije granulatom i obratkom	1	Kutija za pougličavanje	-	4
2	Postavljanje kutije u peć	1	Ručno	-	1
3	Pougličanje	1	Peć	950	60
4	Vađenje kutije iz peći	1	Ručno	-	1
5	Ovlađivanje	1	Zrak	20	60
Kontrolirao:			Datum:		Σ = 126
Odobrio:					

Tablica 7.2. - Operacijski list za postupak kaljenja strojnog dijela svornjak

Tehnički fakultet Pula			Izradio: Vito Kutić		List: 2
Operacijski list :			Naziv djela:		Ukupan broj listova: 3
2			Svornjak		
Naziv operacije:			Materijal:	Operacija broja:	
Kaljenje			C15	2	
Zahvat	Opis zahvata	Količina:	Korišteno sredstvo ili oprema	T [°C)	Trajanje [min]
1	Postavljanje u peć	1	Ručno	-	1
2	Austenitizacija	1	Peć	920	60
3	Gašenje	1	Ručno/voda	20	1
Kontrolirao:			Datum:		Σ = 62

Tablica 7.3. - Operacijski list za postupak nisko temperaturnog popuštanja strojnog dijela svornjak

Tehnički fakultet Pula			Izradio: Vito Kutić		List: 3
Operacijski list :			Naziv djela:		Ukupan broj listova: 3
3			Svornjak		
Naziv operacije:			Materijal:	Operacija broja:	
Niskotemperaturno popuštanje			C15	3	
Zahvat	Opis zahvata	Količina:	Korišteno sredstvo ili oprema	T [°C)	Trajanje [min]
1	Postavljanje u peć	1	Ručno	-	1
2	Progrijavanje i popuštanje	1	Peć	170	60
3	Vađenje iz peći	1	Ručno	-	1
4	Hlađenje	1	Zrak	20	60
Kontrolirao:			Datum:		Σ = 122

## 8. Zaključak

Toplinska obrada je ključni proces u industrijskoj proizvodnji koji se koristi za poboljšanje mehaničkih svojstava materijala kao što su čelik, aluminij, bakar i legure. Ova obrada obuhvaća različite termičke postupke, uključujući kaljenje, žarenje, poboljšanje strukture i cementiranje, svaki od kojih ima specifične ciljeve i učinke na materijal.

Čelik je materijal s širokom primjenom u različitim područjima. Ovisno o potrebama i uvjetima uporabe, čelik se može prilagoditi poboljšanjem svojih svojstava. Postupci toplinske obrade omogućuju povećanje otpornosti na trošenje i tvrdoće površinskog sloja čelika.

Manipulacija mikrostrukturom čelika moguća je različitim postupcima toplinske obrade. Termokemijski postupci mijenjaju mikrostrukturu čelika, što rezultira poboljšanjem željenih svojstava. Ključni segment za postizanje tih svojstava je poznavanje faznih pretvorbi i Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagrama.

Cementiranje je jedan od postupaka toplinske obrade čelika koji povećava tvrdoću površinskog sloja, zadržava žilavost jezgre i poboljšava otpornost na trošenje. Proces cementiranja uključuje pougličavanje, kaljenje i niskotemperaturno popuštanje.

Pougličavanje i kaljenje čelika su ključni procesi u proizvodnji čelika s visokom tvrdoćom i dobrom otpornosti na trošenje.

Različite metode pougličavanja (granulat, plin, solna kupka) i kaljenja (jednostruko, dvostruko) omogućavaju prilagodbu svojstava čelika prema specifičnim potrebama i primjenama.

Odabir odgovarajućeg čelika i postupaka ovisi o dimenzijama proizvoda, potrebnim svojstvima i uvjetima rada.

Postupci cementiranja mogu se provesti različitim medijima, tehnikama i metodama. Odabir tih stavki ovisi o vrsti čelika, dostupnosti opreme i drugim faktorima.

Materijal svornjaka je nelegirani čelik za cementiranje C15.

Svornjak je cementiran postupkom pougličavanja sa jednostrukim kaljenjem.

Svornjak je pougličan u granulatu, dok je za kaljenje odabrana voda.

Definiran je postupak niskotemperaturnog popuštanja.

Nakon držanja na temperaturi popuštanja obradak je izvađen iz peći i ostavljen da se do kraja ohladi na zraku.

Provedbom ovih postupaka ispunjeni su zadani uvjeti, postignuta je dubina cementiranog sloja u granicama od 0,3 do 0,5 mm i tvrdoća u granicama od 56 do 58 HRC.

Za cijeli proces izrađena je tehnička dokumentacija u obliku operacijskih listova.



## Literatura

- [1] Nepoznati autor: „Guide to Heat Treating“, s interneta, <https://wisconsinmetaltech.com/guide-to-heat-treating/>, 8.srpnja 2019.
- [2] Harshad Bhadeshia: „Interpretation of the microstructure of steels“, s interneta, [https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2008/Steel\\_Microstructure/SM.html](https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2008/Steel_Microstructure/SM.html), ožujak, 2017.
- [3] Nepoznati autor: „Toplinska obrada čelika“, s interneta, [https://ag20192020.eucenje.unipu.hr/pluginfile.php/106117/mod\\_folder/content/0/Pre-davanja/10%20Toplinska%20obrada%20%C4%8Delika.pdf?forcedownload=1](https://ag20192020.eucenje.unipu.hr/pluginfile.php/106117/mod_folder/content/0/Pre-davanja/10%20Toplinska%20obrada%20%C4%8Delika.pdf?forcedownload=1)
- [4] George V. Voort: „Microstructure of Ferrous Alloys“, s interneta, [https://www.buehler.com/assets/solutions/technotes/Vol\\_3\\_Issue\\_7.pdf](https://www.buehler.com/assets/solutions/technotes/Vol_3_Issue_7.pdf)
- [5] H. Foll: „Iron Carbide Fe<sub>3</sub>C; also known as Cementite“, s interneta, [https://www.tf.unikel.de/matwis/amat/iss/kap\\_5/illustr/i5\\_3\\_3.html](https://www.tf.unikel.de/matwis/amat/iss/kap_5/illustr/i5_3_3.html)
- [6] G.J. Shiflet: „Encyclopedia of Materials: Science and Technology“, s interneta, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pearlite>
- [7] Jean-Pierre Brog i drugi: Polymorphism, what it is and how to identify it: A systematic review, s interneta, [https://www.researchgate.net/figure/FCC-BCC-and-BCT-lattice-system-of-different-forms-of-iron-with-carbon-insertion\\_fig12\\_253241484](https://www.researchgate.net/figure/FCC-BCC-and-BCT-lattice-system-of-different-forms-of-iron-with-carbon-insertion_fig12_253241484)
- [8] Nepoznati autor: „Heat treating“, s interneta, <https://www.radyne.com/what-is-heat-treatment-heat-treating>
- [9] Smoljan B.: „Toplinska obrada čelika sivog i nodularnog lijeva“, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1999
- [10] Ivo Alfirević, Dražen Bjelovučić, Ivan Budin, Branimir Matijašević i drugi: Inženjerski priručnik 4, 1. svezak Materijali
- [11] Stupnišek M., Cajner F.: Osnove toplinske obradbe metala, FSB, Zagreb, 2001.
- [12] Gabrić, I.; Šitić, S.: „Materijali II“, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [13] Liščić B.: „Termokemijski postupci“, Metalburo Zagreb, 1981.
- [14] Krumes D.: „Površinske toplinske obrade i inženjerstvo površina“, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 2004.
- [21] Goran Havičić: „Utjecaj pozicioniranja dijelova pri pougljičenju u krutom sredstvu na rezultate dubine pougljičenja“, Karlovac, 2018.
- [22] Stjepan Kožuh: „Specijalizirani čelici“, Sisak, 2010

## Popis slika

Slika 2.1. – Dijagram odnosa vremena i temperature.....	10
Slika 3.1. – Mikrostruktura austenita.....	12
Slika 3.2. – Volumno centrirana kubična rešetka (BCC).....	12
Slika 3.3. – Mikrostruktura ferita.....	13
Slika 3.4. – Krivulja pretvorbe perlita.....	14
Slika 3.5. – Mikrostruktura martenzita.....	15
Slika 3.6. – Krivulja martenzitne pretvorbe.....	15
Slika 3.7. – Mikrostruktura bainita.....	16
Slika 3.8. – Ovisnost temperatura faznih prijelaza o brzini hlađenja podektuidnog čelika.....	17
Slika 4.1. – Ravnotežni odnosi između udjela CO i CO <sub>2</sub> u sredstvu za pougličavanje, temperature i udjela ugljika u čeliku.....	19
Slika 4.2. – Dijagrami postupka kaljenja nakon pougličanja.....	20
Slika 4.3. – Dubina pougličebha u aktiviranoj solnoj kupki.....	23
Slika 4.4. – Mikrostrukture u slojevima čelika s obzirom na sadržaj ugljika.....	24
Slika 4.5. – Jednostruko kaljenje.....	26
Slika 4.6. – Dvostruko kaljenje.....	27
Slika 4.7. – Dvostruko kaljenje s prvim kaljenjem na temperaturi pougličavanja.....	27
Slika 4.8. – Utjecaj temperature i vremena na tvrdoću čelika.....	28
Slika 6.1. – Shematski prikaz utvrđivanja dubine cementiranog sloja i mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom.....	32
Slika 7.1. – Nacrt strojnog dijela svornjak i zahtjevi za obradu.....	33
Slika 7.2. – Ovisnost koeficijenta pougličanja o sredstvu pougličanja i temperaturi...35	
Slika 7.3. – Koeficijent pougličavanja za proces cementiranja svornjaka.....	35
Slika 7.4. – Nisko temperaturno popuštanje za strojni dio svornjaka.....	36
Slika 7.5. – Proces pougličavanja strojnog dijela svornjak.....	37
Slika 7.6. - Proces kaljenja strojnog dijela svornjak.....	38
Slika 7.7. - Proces nisko temperaturnog popuštanja strojnog dijela svornjak.....	38

## Popis tablica

Tablica 7.1. - Operacijski list za postupak pougljičavanja i kaljenja strojnog dijela svornjak.....	39
Tablica 7.2. - Operacijski list za postupak kaljenja strojnog dijela svornjak.....	40
Tablica 7.3. - Operacijski list za postupak nisko temperaturnog popuštanja strojnog dijela svornjak.....	41

## **Sažetak**

Ovaj završni rad prikazuje postupak cementiranja strojnog dijela svornjak.

U teorijskom dijelu opisane su fazne pretvorbe čelika koje su ključne za razumijevanje promjena koje nastaju tijekom postupka cementiranja, te su objašnjeni načini na koje se ovaj postupak može provesti.

Praktični dio rada fokusira se na specifični postupak cementiranja strojnog dijela svornjak, koji je izveden u skladu s postavljenim zahtjevima.

Ključne riječi: čelik, toplinska obrada čelika, fazne pretvorbe, mikrostruktura čelika, pougljičavanje, kaljenje, cementiranje, ispitivanje tvrdoće