

# Postupak toplinske obrade strojnog dijela SC.23-PT.28

---

**Blašković, Rudolf**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:152586>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-30**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**POSTUPAK TOPLINSKE OBRADE STROJNOG DIJELA SC.23-  
PT.28**

Rijeka, rujan 2023.

Rudolf Blašković

0069090592 2

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**POSTUPAK TOPLINSKE OBRADE STROJNOG DIJELA SC.23-  
PT.28**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Dario Iljkić

Rijeka, rujan 2023.

Rudolf Blašković

0069090592 2

Rijeka, 11. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za materijale**  
Predmet: **Postupci toplinske obrade**  
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Rudolf Blašković (0069090592)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Zadatak: **Postupak toplinske obrade strojnog dijela SC.23-PT.28 / Heat treating process of workpiece SC.23-PT.28**

### Opis zadatka:

Potrebno je proanalizirati proces toplinske obrade strojnog dijela SC.23-PT.28. Potrebno je teorijski opisati postupak i sve promjene u mikrostrukтури koje nastaju pri odabranom postupku toplinske obrade. Potrebno je opisati metode određivanja parametara toplinske obrade te pretkazivanja rezultata toplinske obrade.

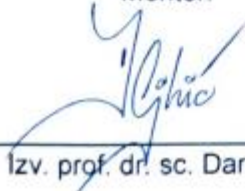
Nadalje, potrebno je definirati proces toplinske obrade te opisati postrojenje za toplinsku obradu strojnog dijela SC.23-PT.28. Potrebno je proanalizirati rezultate toplinske obrade i donijeti odgovarajuće zaključke.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Rudolf Blašković*

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Dario Iljkić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



Izv. prof. dr. sc. Samir Žic

## **IZJAVA**

Ovim putem izjavljujem da sam kompletno samostalno napisao završni rad “Postupak toplinske obrade strojnog dijela SC.23-PT.28”. Prilikom izrade završnog rada koristio sam stečeno znanje iz kolegija “Postupci toplinske obrade” te literaturu koja je navedena na kraju rada.

Rudolf Blašković

---

## **ZAHVALA**

Ovim putem bih se htio zahvaliti svojem mentoru izv. prof. dr. sc. Dariu Iljkiću na prenesenom znanju, pruženoj pomoći i danom povjerenju prilikom izrade završnog rada.

## Sadržaj

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1.UVOD.....                                                           | 1  |
| 2.ČELIK.....                                                          | 2  |
| 2.1 Općenito .....                                                    | 2  |
| 2.2 Fazne pretvorbe u čeliku .....                                    | 2  |
| 2.2.1 Nastanak austenita .....                                        | 6  |
| 2.2.2 Pretvorba pothlađenog austenita.....                            | 7  |
| 2.2.3. Transformacija austenita u perlit .....                        | 8  |
| 2.2.4. Transformacija austenita u martenzit .....                     | 9  |
| 2.2.5. Transformacija austenita u bainit .....                        | 11 |
| 3.CEMENTIRANJE .....                                                  | 13 |
| 3.1 Pougličavanje.....                                                | 14 |
| 3.1.1. Pougličavanje u krutome sredstvu .....                         | 17 |
| 3.1.2. Pougličavanje u kapljevitome sredstvu.....                     | 21 |
| 3.1.3. Njega i održavanje kupki za pougličavanje .....                | 24 |
| 3.1.4. Pougličavanje u plinovitome sredstvu .....                     | 25 |
| 3.1.5. Pougličavanje u vakuumu .....                                  | 26 |
| 3.1.6. Pougličavanje plazmom .....                                    | 27 |
| 3.2. Kaljenje.....                                                    | 28 |
| 3.2.1. Direktno kaljenje .....                                        | 29 |
| 3.2.2. Jednostruko kaljenje .....                                     | 30 |
| 3.2.3. Dvostruko kaljenje.....                                        | 31 |
| 3.3. Niskotemperaturno popuštanje .....                               | 32 |
| 4. ČELICI ZA CEMENTIRANJE .....                                       | 33 |
| 5. ISPITIVANJE KVALITETE CEMENTIRANOG ČELIKA .....                    | 36 |
| 6. PRIMJENA CEMENTIRANJA KOD IZRADE STROJNIH ELEMENATA .....          | 37 |
| 7. POSTUPAK TOPLINSKE OBRADE STROJNOG DIJELA SC.23-PT.28.....         | 38 |
| 7.1. Materijal strojnog dijela SC.23-PT.28.....                       | 38 |
| 7.2. Definiranje procesa cementiranja za strojni dio SC.23-PT.28..... | 39 |
| 7.3. Tehnološka dokumentacija .....                                   | 42 |
| 8. ZAKLJUČAK .....                                                    | 45 |
| LITERATURA .....                                                      | 46 |

POPIS SLIKA ..... 48

POPIS TABLICA ..... 50

SAŽETAK..... 51

SUMMARY ..... 52

## 1.UVOD

Materijal koji koristimo u praksi pri svojem osnovnom stanju nema tražena svojstva te moramo primijeniti određene postupke kako bi zadovoljili zadane zahtjeve.

Zadatak dodijeljenog završnog rada je postupak toplinske obrade strojnog dijela SC.23-PT.28. Toplinsku obradu možemo definirati kao postupak u kojem se željeni predmet s namjerom podvrgava temperaturno-vremenskim ciklusima kako bi se postigla željena mikrostruktura, a time i željena (mehanička, fizička, kemijska) svojstva. U većini slučajeva bi to bio čelik koji se koristi kako bi mu se poboljšala njegova mehanička svojstva. Primjenom ovakvih postupaka da skuplje materijale zamijenimo jeftinijima, to jest da dobijemo tražena svojstva skupih materijala pomoću jeftinih.

Pored same toplinske obrade, za svrhu postizanja traženih karakteristika koristimo i obogaćivanje površinskog sloja čelika kemijskim elementima(ugljik, dušik, bor...).

Obogaćivanje površinskog sloja ugljikom nazivamo cementiranje.

Postupak cementiranja je tema ovog završnog rad te se sastoji od kako od praktičnog tako i od teorijskog dijela. Teorijski dio sadrži osnove postupaka toplinske obrade te je opsežnije opisano cementiranje čelika, a u praktičnome dijelu je prikazano rješavanje zadatka koji sadrži određene probleme cementiranja strojnog dijela SC.23-PT.28.

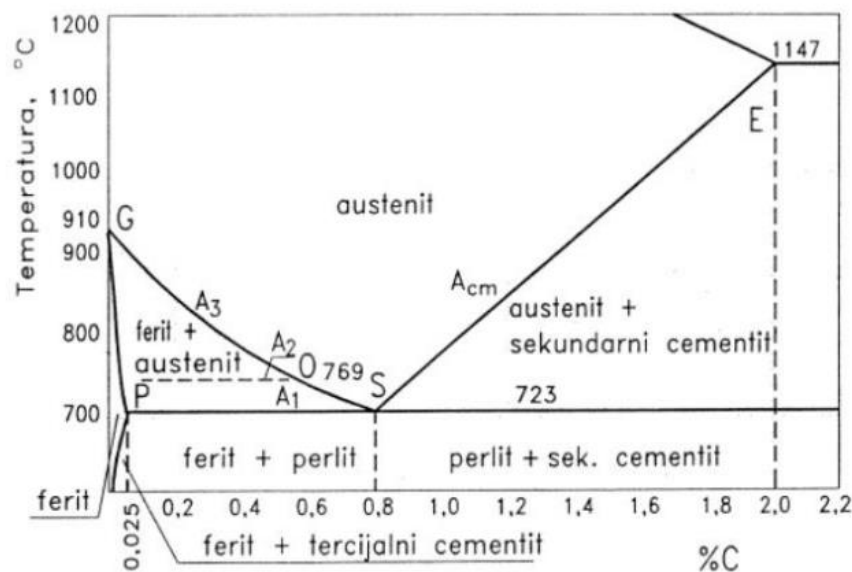
## 2. ČELIK

### 2.1 Općenito

Čelik je slitina željeza i ugljika (od 0,008% do 2,14%), jedan je od najzastupljenijih materijala u praksi i proizvodnji. Čelik se može podijeliti: prema postupku proizvodnje, prema kemijskom sastavu, mikrostrukтури, svojstvima namjeni i dr. Čelik ukratko možemo opisati kao meta stabilnu kristaliziranu leguru željeza i ugljika popraćenu nečistoćama i dodacima legirajućih elemenata.

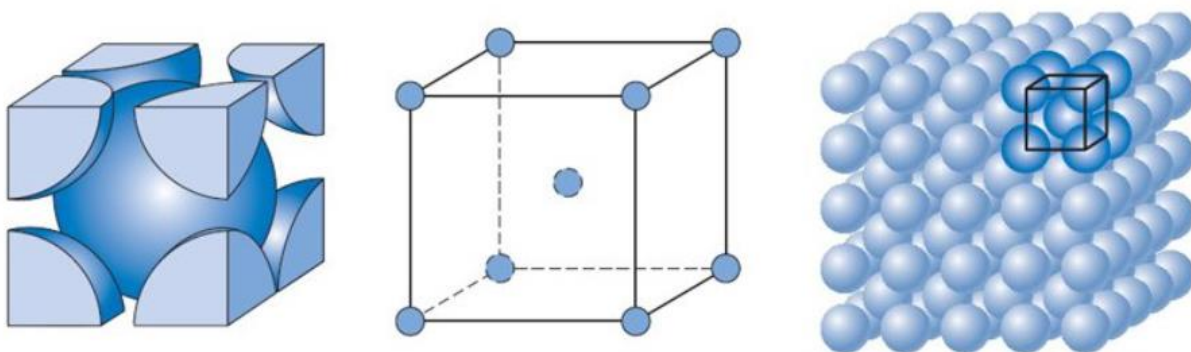
### 2.2 Fazne pretvorbe u čeliku

Analizu toplinske obrade čelika započinjemo iz dijagrama stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C (slika 1.). Na dijagramu stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C možemo uočiti karakteristična fazna područja kao i kritične temperature prekrystalizacija u ravnotežnim uvjetima koje odgovaraju dovoljno sporom ugrijavanju i ohlađivanju čelika

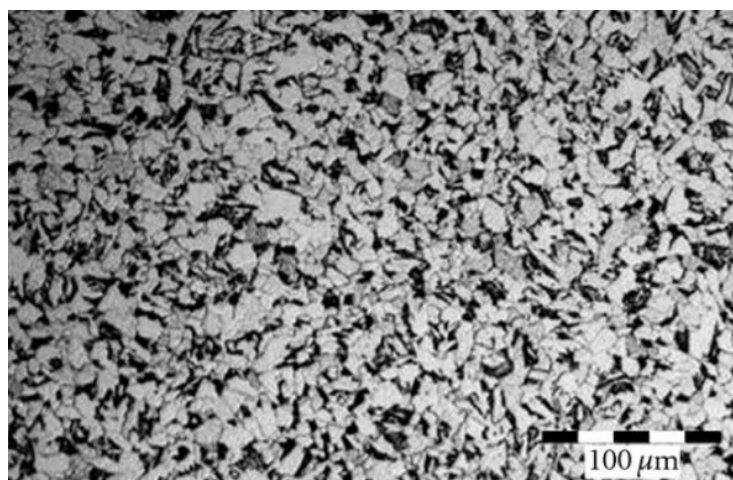


Slika 2.1. Fazni Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram

Iz dijagrama uočavamo da ovisno o postotku ugljika u čeliku razlikujemo nekoliko mikrostrukturnih sastojka. To su ferit, perlit, sekundarni cementit i austenit koji se nalazi iznad kritične temperature A<sub>1</sub>. Ferit ili α-faza je uključinski kristal mješanac željeza i ugljika koji ima prostorno centriranu kubičnu rešetku (slika 2.2), najviše sadrži 0,025%C. Ovakav oblik kristalne rešetke je postojan na temperaturama do 912°C. Pošto ferit sadrži jako male količine ugljika on ima veliku ulogu u tvorbi nisko ugljičnih čelika koji su osnovna pri procesu cementiranja čelika. Također ferit je najmekša faza u dijagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C, tvrdoće oko 60 HB. Na slici 2.3 možemo vidjeti mikrostrukturu ferita.

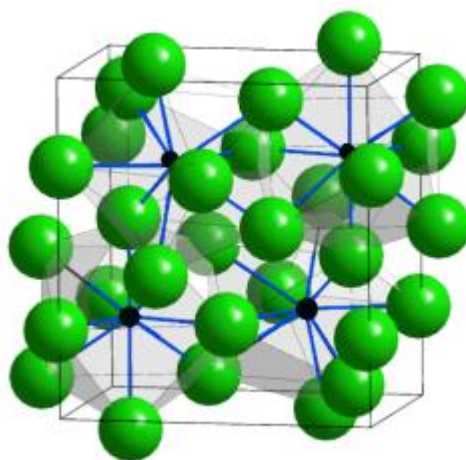


*Slika 2.2.  $\alpha$ -rešetka ferita*



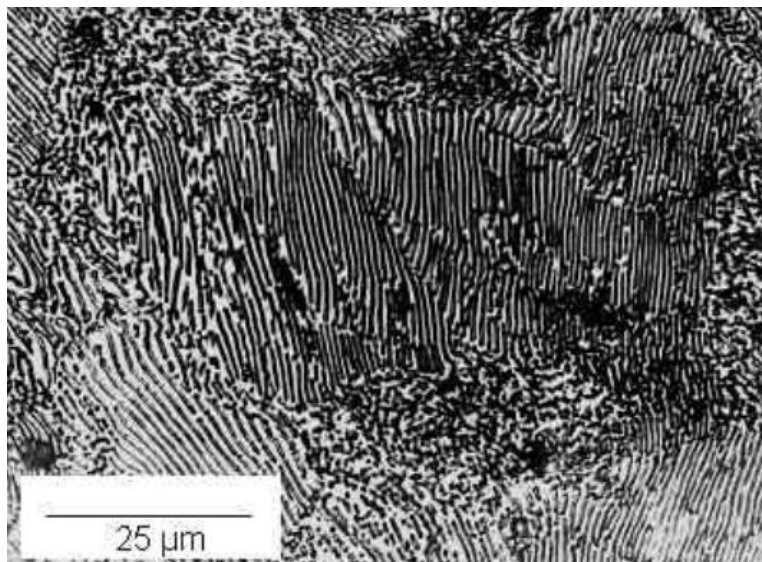
*Slika 2.3. Prikaz mikrostrukture ferita*

Sekundarni cementit možemo definirati kao kemijski spoj željeznog karbida  $\text{Fe}_3\text{C}$ , sa 6,67%C. Na slici 2.4 možemo vidjeti kristalnu rešetku cementita.



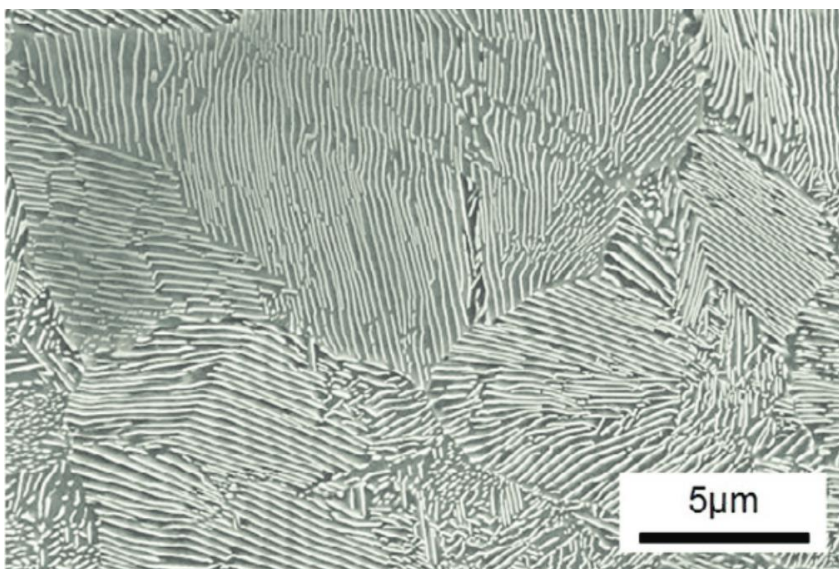
*Slika 2.4. Kristalna rešetka cementita*

Pravilnom rasporedom cementita možemo doprinijeti porastu tvrdoće čelika. Iz slike 2.5 uočavamo da cementit ima lamelastu mikrostrukturu.



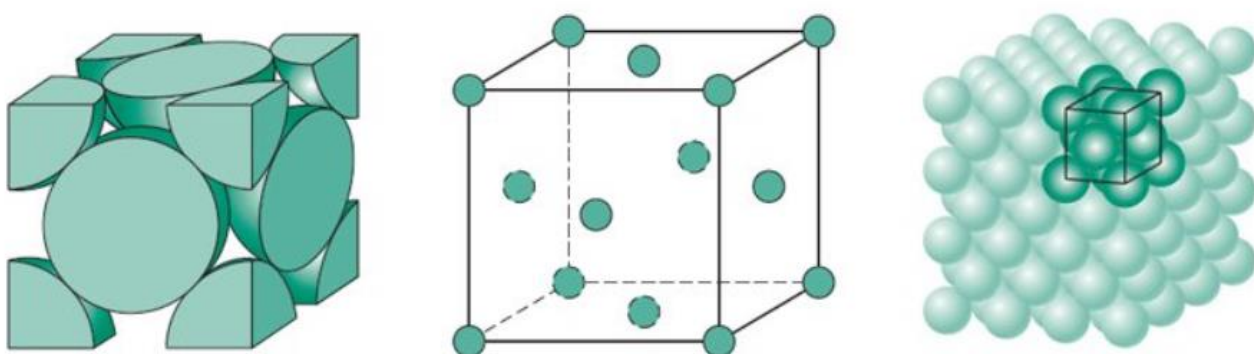
*Slika 2.5. Mikrostruktura cementita*

Perlit možemo opisati kao eutektoid koji se sastoji od eutektoidnih kristalnih zrna ferita i kristalnih zrna cementita. Slika 2.6 prikazuje mikrostrukturu perlita koja se sastoji od bijele feritne osnove ili matrice i tankih pločica cementita

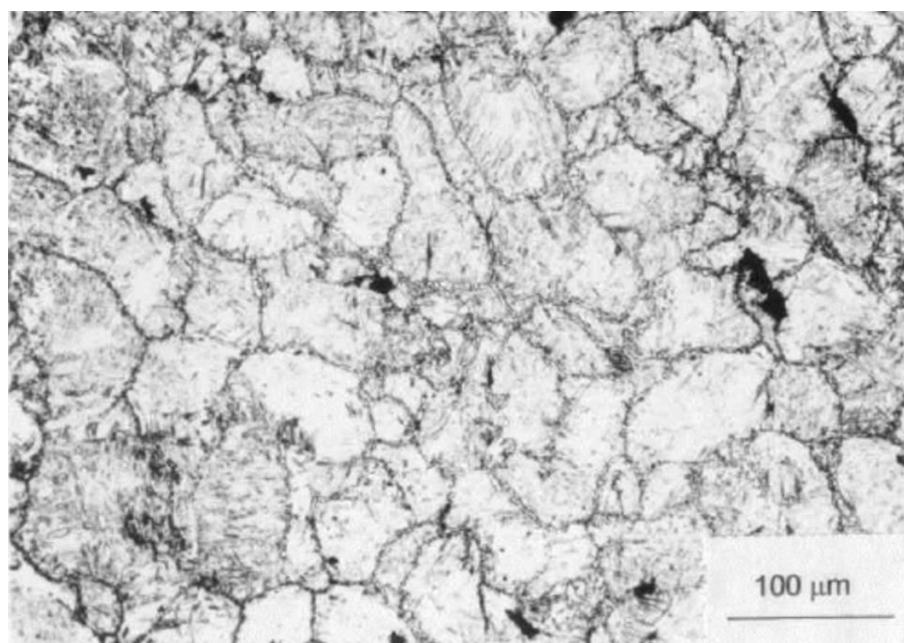


*Slika 2.6. Mikrostruktura perlita*

Te ne kraju austenit ili  $\gamma$ -faza definiramo kao intersticijsku otopinu ugljika u gama-željezu koji sadrži centriranu kubičnu kristalnu rešetku (slika 2.7) to jest sadrži najviše 2,03%C. Tvrdoća austenita je između 170 i 220 HB te je vrlo žilav. Područje austenita proširuje se dodavanjem nikla, mangana, kobalta i bakra te se jednim imenom nazivaju  $\gamma$ -geni elementi. Slika 2.8 prikazuje mikrostrukturu austenita.



*Slika 2.7  $\gamma$ -rešetka austenita*

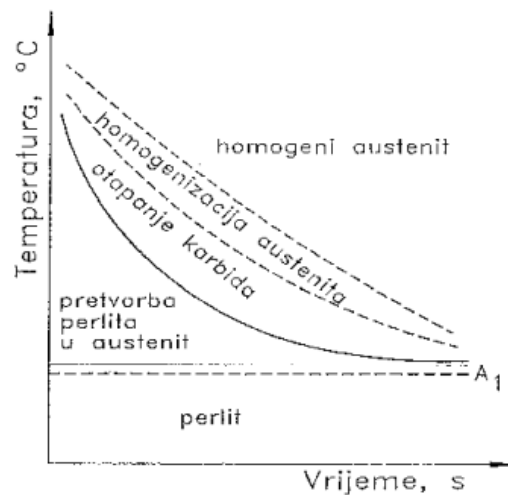


*Slika 2.8 Mikrostruktura austenita*

### 2.2.1 Nastanak austenita

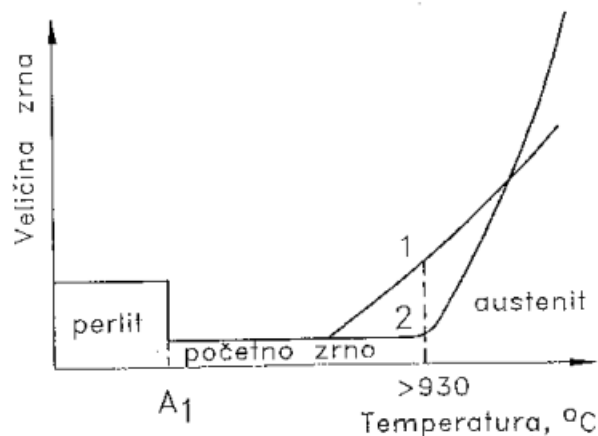
Prilikom tvorbe austenita dvije faze koje su različitih kemijskih sastava pomoću difuzijskog mehanizma prelaze u treću fazu to jest austenit. Austenit će najlakše nastati na granici feritne i cementitne faze na kojima se pojavljuju mjesta u kojima austenit ima minimalnu slobodnu energiju. Maksimalnu koncentraciju ugljika u austenitu nalazimo na granici austenita sa karbidnom fazom, a minimalnu koncentraciju ugljika u austenitu nalazimo na granici sa feritnom fazom.

Brzina austenitne pretvorbe je ovisna o brzini difuzije ugljika u novonastaloj fazi. Pri povećanju temperature iznad ravnotežne temperature povećavaju se i difuzija atoma i razlika slobodnih energija stabilne i trenutne strukture te na taj način povišenjem temperature iznad temperature ravnoteže se ubrzava proces pretvorbe perlita u austenit. Na slici 2.8 možemo vidjeti dijagram izotermičke pretvorbe austenita.



Slika 2.9. Dijagram izotermičke tvorbe austenita

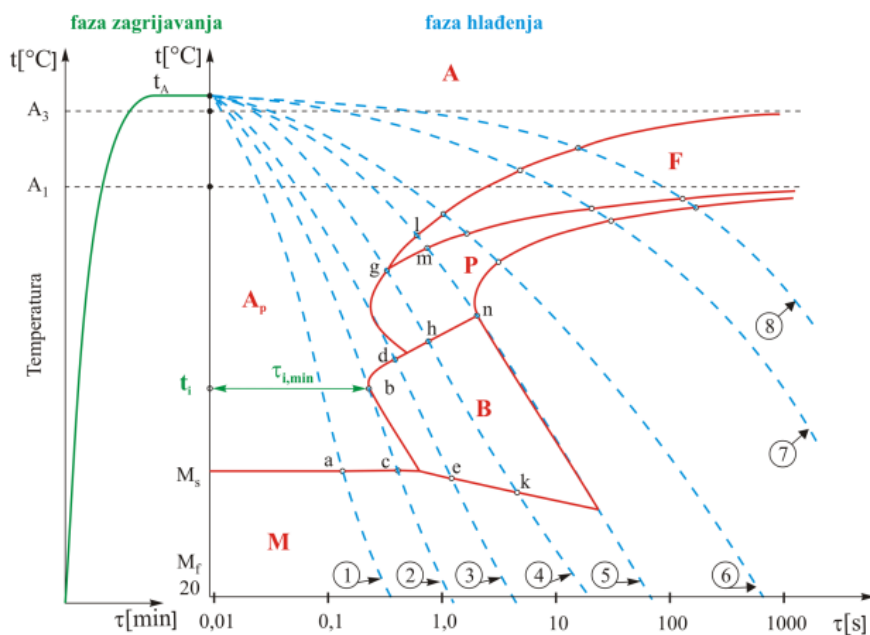
Prilikom držanja čelika na povišenoj temperature raste kristalno zрно austenita. Povećanje austenitnog zrna je spontani process pri kojem dolazi do smanjenja slobodne energije. Gledajući prema rastu austenitnog zrna postoje dvije vrste čelika, a to su krupnozrnati čelici i sitnozrnati čelici (slika 2.9.). Kod sitnozrnatih čelika rast austenitnog zrna će nastati prestankom djelovanja prepreka koje su do tada sprječavale rast zrna. Sitnozrnati austenit je uvjet za dobivanje fine sitnozrnate mikrostrukture čelika pri sobnoj temperature. Onaj čelik koji ima finiju sitnozrnatu mikrostrukturu također ima i povoljnija mehanička svojstva od čelika s grubom krupnozrnatom mikrostrukturom



Slika 2.10. Promjena veličine kristalnog zrna austenita ovisno o temperature

### 2.2.2 Pretvorba pothlađenog austenita

Pretvorba austenita događa se isključivo pri temperaturama nižim od 723°C. Za opisivanje kinetike pretvorbe pothlađenog austenita koristimo TTT dijagrame ili vrijeme-temperatura-transformacija dijagrami. Na slici 2.10 je prikazan dijagram kontinuiranog hlađenja podeutektoidnog čelika na kojem također nalazimo i krivulje gašenja. Da bi austenit mogli pretvoriti u neku drugu fazu, moramo ga dovesti u neravnotežno stanje. Upravo hlađenjem austenit postaje nestabilan i teži raspadanju na niskotemperaturne faze. Ovisno o brzini ohlađivanja, pothlađeni austenit se različitim mehanizmima raspada na niskotemperaturne faze.

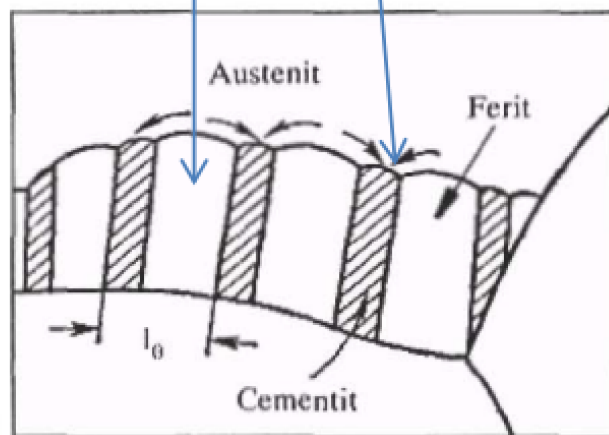


Slika 2.11. Koncept kontinuiranog ohlađivanja austenitiziranog podeutektoidnog ugljičnog čelika

### 2.2.3. Transformacija austenita u perlit

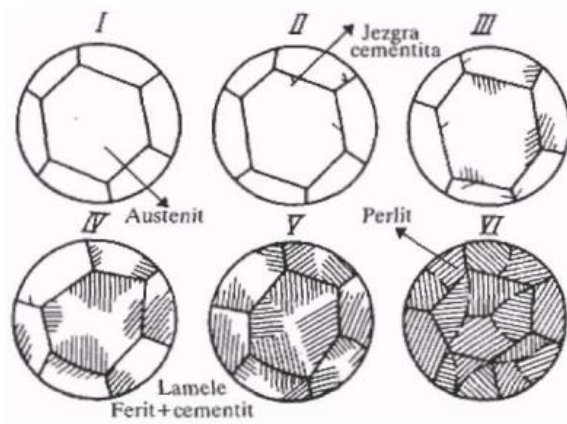
Transformacija austenita u perlit će se dogoditi na temperaturnom intervalu od kritične točke A1 te započinje difuzijskim mehanizmom. Prije pretvorbe atomi ugljika su istisnuti i rešetke  $\gamma$ -Fe (austenita). Ti istisnuti atomi će se spojiti sa željeznim u intermetalni kemijski spoj  $\text{Fe}_3\text{C}$ -cementit. Nastale jezgre cementita izdvajaju se na granicama austenitnih zrna i služe kao centri kristalizacije. Porast cementitnih jezgri nastaje zbog difuzije atoma ugljika iz austenita. Dijelovi austenitnih zrna koji su okruženi cementitnim lamelama se pretvaraju u ferit kada su dovoljno osiromašeni ugljikom, te se tako stvaranjem lamela cementite stvaraju i lamele ferita. U austenitom zrnju se formiraju kolonije lamela ferita i cementita koje se s vremenom postaju dulje. Na slici 2.11. možemo vidjeti nastanak lamela ferita i cementita.

#### Lamele ferita i cementita



Slika 2.12. Stvaranje lamela ferita i lamela cementita iz austenita

Slika 2.12. nam prikazuje pretvorbu austenita u perlit.

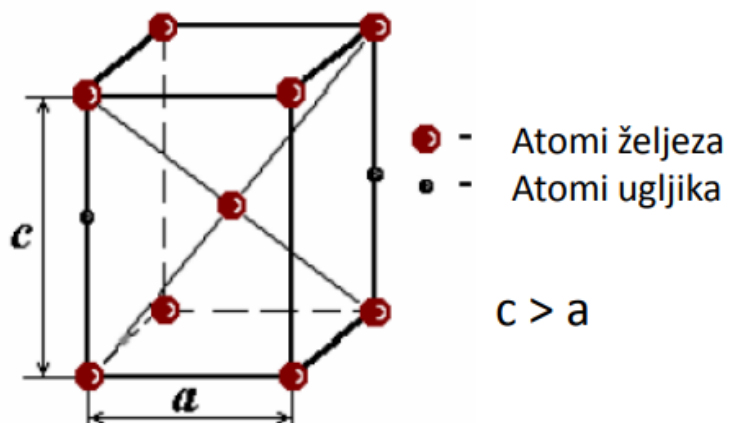


Slika 2.13. Pretvorba austenita u perlit

Ako je stupanj pothlađivanja veći te ako je zrno pothlađenog austenita manje tada je i veličina perlitnih kristalnih zrna manja. Profinjenija feritno-cementitna mikrostruktura nastaje pri nižim temperaturama pretvorbe iz austenita u perlit to jest manja je međulamelarna razlika. Mehanička svojstva čelika će ovisiti upravo o razmaku između lamela ferita i lamela cementita u perlitu, to jest ako su lamele tanje onda je tvrdoća veća, a žilavost i plastičnost perlita će biti manja. S obzirom na veličinu i gustoću slaganja lamela ferita i lamela cementita, struktura čelika koja ima eutektoidni sastav, razlikovati će se mikrostrukture perlita, trustita i sorbita. Navedene mikrostrukture uobičajeno nastaju prilikom pretvorbe pothlađenog austenita.

#### 2.2.4. Transformacija austenita u martenzit

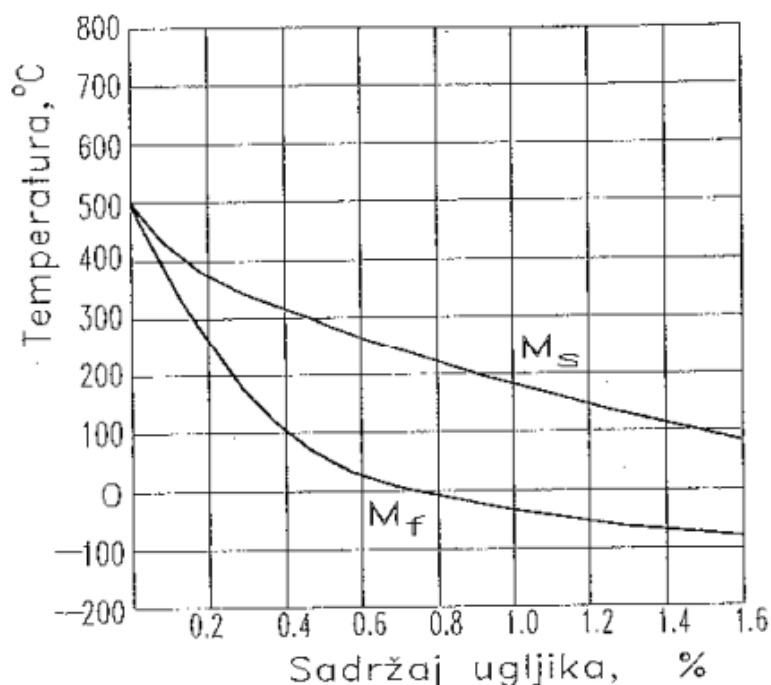
Ukoliko brzina hlađenja stabilnog austenita postigne kritičnu brzinu, tada dolazi do martenzitne pretvorbe. Martenzit možemo opisati kao jednofaznu strukturu koja predstavlja kristal mješanac ugljika i nekih drugih legirajućih elemenata. Martenzit nastaje zbog bezdifuzijske pretvorbe austenita te je ovisan samo o temperaturi, kompletno je neovisan o vremenskom trajanju procesa. Martenzit također možemo opisati kao krutu otopinu ugljika koji najviše sadrži 2,03%C. Martenzit ima tetragonalnu kristalnu rešetku koju možemo vidjeti na slici 2.13



*Slika 2.14. Tetragonalna martenzitna kristalna rešetka*

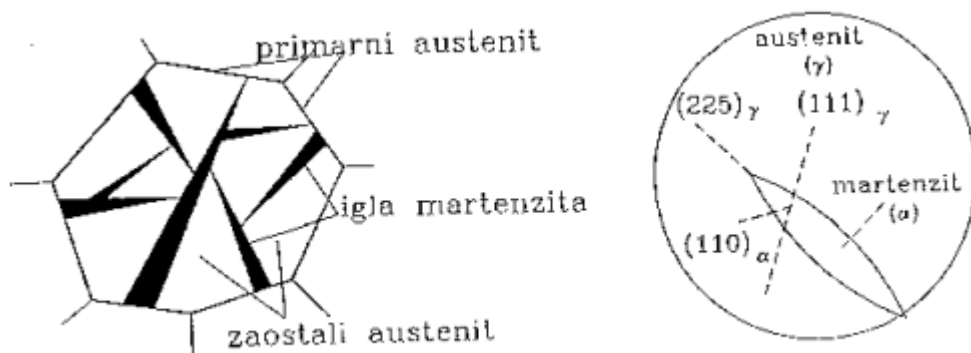
Na slici 2.13. možemo uočiti mjesta na kojima se može pojaviti ugljik te je u stvarnosti broj tih atoma ugljika znatno manji. Kako bi dobili martenzitnu strukturu prvo moramo napraviti austenitizaciju čelika te nakon toga gašenje čelika. Drugim riječima, austenitizacija s naknadnim gašenjem s ciljem dobivanja martenzitne strukture zove se kaljenje čelika. Sama transformacija austenita u martenzit započinje na početnoj  $M_s$  temperaturi, a završava na konačnoj  $M_f$  temperaturi.

Početna temperatura  $M_s$  i konačna temperatura  $M_f$  nisu ovisne o brzini ohlađivanja već o koncentraciji ugljika i o legirajućim elementima u prvotnom austenitu. Slika 2.14. prikazuje utjecaj koncentracije ugljika na temperaturu martenzitne pretvorbe.



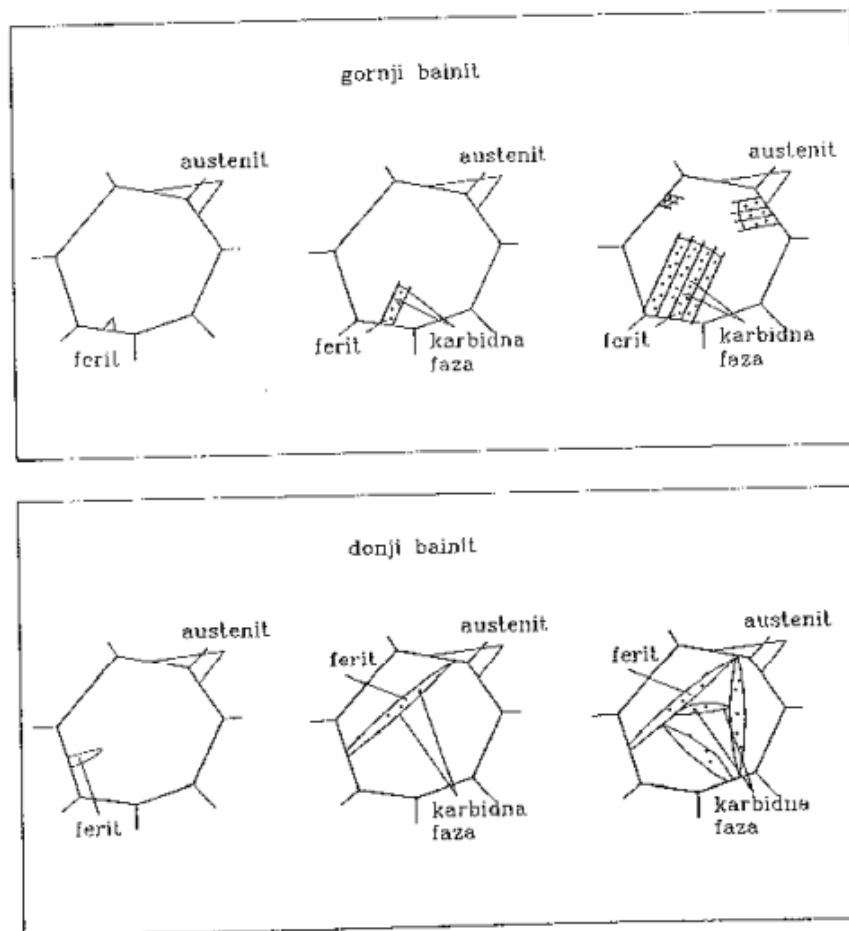
Slika 2.15. Učinak koncentracije ugljika na temperature martenzitne pretvorbe kod ugljičnih čelika

Martenzitna struktura podsjeća na trn ili iglu pa možemo reći da ima igličastu strukturu (slika 2.16). Između navedenih igla martenzita pronalazimo zaostali austenit. Veće količine zaostalog austenita su nepoželjne.



Slika 2.16. Martenzitna struktura



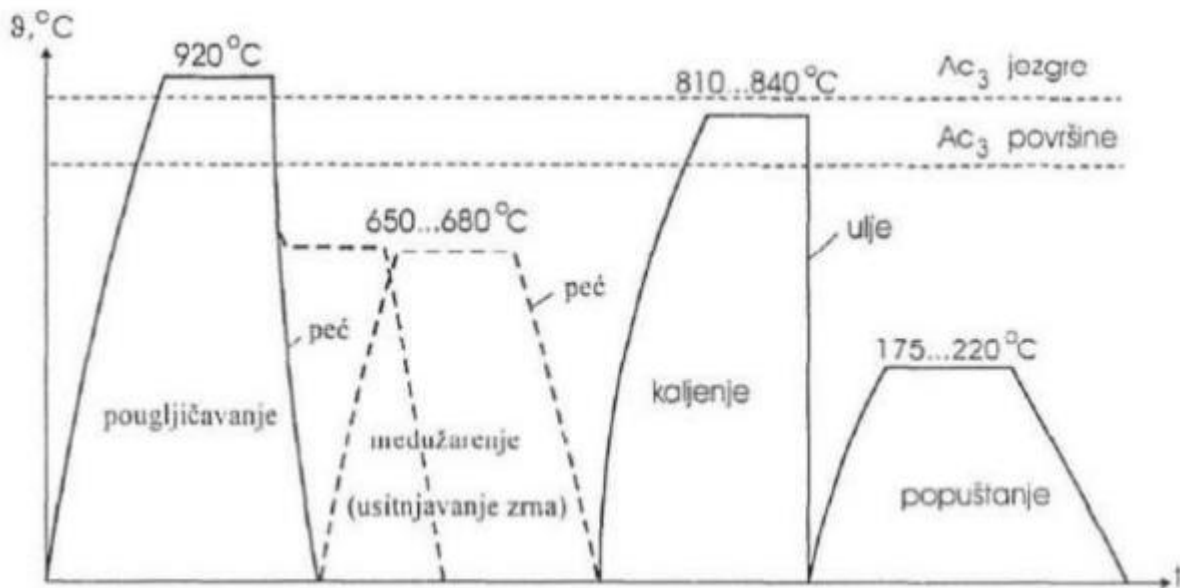


*Slika 2.18. Prikaz pretvorbe austenita u bainit*

Bainitna pretvorba nije ovisna o promjeni temperature pretvorbe, no pri povišenim temperaturama javljaju se difuzijski procesi, a manjim temperaturama se javljaju bezdifuzijski procesi. Razliku u mikrostrukturi gornjeg i donjeg bainita možemo vidjeti na slici 2.18. Gornji bainit će nastati na višim temperaturama u iznosu od 500-350°C te ona ima tako zvanu perjastu strukturu. Jedna od glavnih karakteristika gornjeg bainita je ta da on smanjuje plastičnost u čeliku, u usporedbi s mikrostrukturuom koju dobijemo perlitnom pretvorbom. Donji bainit će nastati na nižoj temperaturi u iznosu od 350°C do temperature  $M_s$ . Za donji bainit možemo reći da ima igličastu strukturu koja je slična martenzitoj. Jedna od glavnih karakteristika donjeg bainite je da pruža dobra mehanička svojstva u čelikovoj mikrostrukturi kao i dobru plastičnost i žilavost.

### 3.CEMENTIRANJE

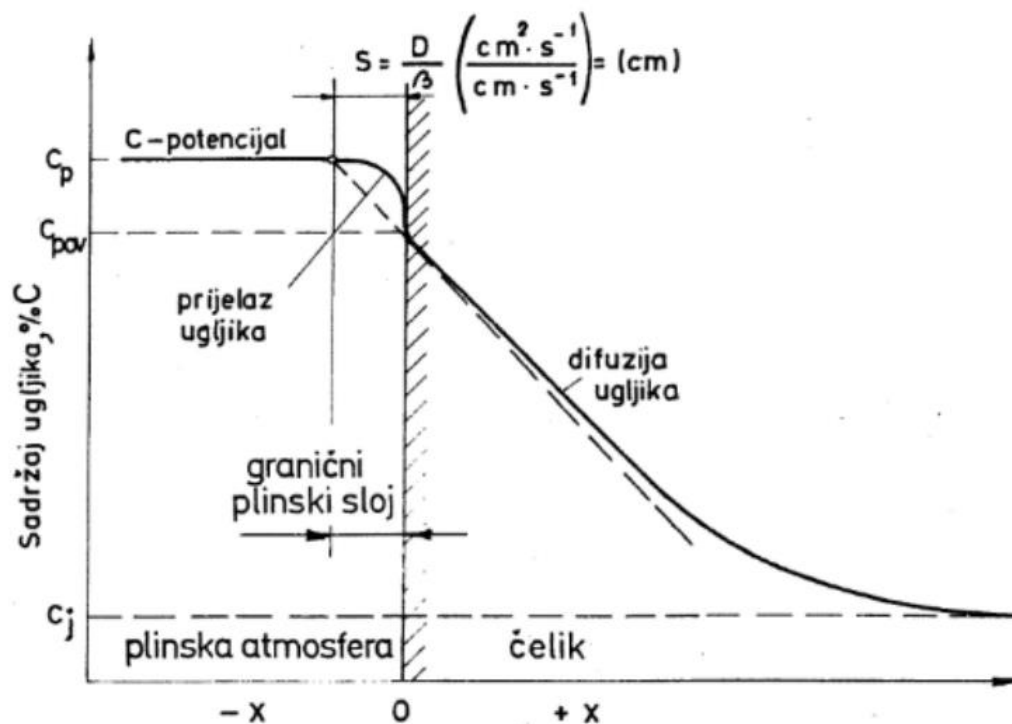
Općenito toplinsko-kemijske postupke dijelimo u dvije skupine, a to su: difuzijski postupci te postupci prevlačenja, cementiranje je jedan od difuzijski postupaka. Cementiranje je jedan od osnovnih postupaka toplinske obrade te se koristi u širokoj primjeni. Cementiranje čelika je termokemijski postupak kojim obogaćujemo površinu nekog proizvoda ili u našem slučaju čelika ugljikom. Osnovni cilj cementiranja je da se poveća površinska čvrstoća te da žilavost jezgre bude što veća. Cementiranje se sastoji od tri osnovna postupka, to su poguljičavanje, kaljenje i niskotemperaturno popuštanje. U nastavu ću detaljnije opisati i objasniti svaki od navedenih postupaka. Kod cementiranja je važno istaknuti da ukoliko se u cementiranom sloju nađe sekundarni cementit, tada taj postupak uzimamo kao pogrešan jer je prevelika krhkost postignutog sloja. Pri cementiranju čelika se najčešće koriste niskolegirani i niskougljični čelici za konstrukcije sa maksimalno 0,25% ugljika. Promatrajući ove čelike uočavamo da su oni svrstani u plemenite čelike i kvalitetne čelike. Na slici 3.1. možemo vidjeti postupak cementiranja čelika.



Slika 3.1. Koncept postupka cementiranja čelika

### 3.1 Pougličavanje

Kako je već prethodno navedno, pougličavanje je jedan od tri osnovnih postupaka cementiranja. Pougličavanjem povećavamo postotak ugljika na površinskim slojevima nekih proizvoda koji su prethodno imali niski sadržaj ugljika. Na temperaturi od 850°C do temperature 950°C dolazi do oslobađanja ugljika koji je spreman na difuziju u površinskim slojevima predmeta. Kako je ugljik jedan od elemenata koji povećava otpornost na trošenje i tvrdoću, na kraju kao rezultat možemo očekivati tvrdi sloj koji je otporan na trošenje. Dakle možemo reći da su nam kod pougličavanja nužne visoke temperature kako bi postigli visoki sadržaj ugljika na površinskom sloju te adekvatnu dubinu pougličavanja. Pougličavanje se sastoji od više faza koje možemo vidjeti na slici 3.2.



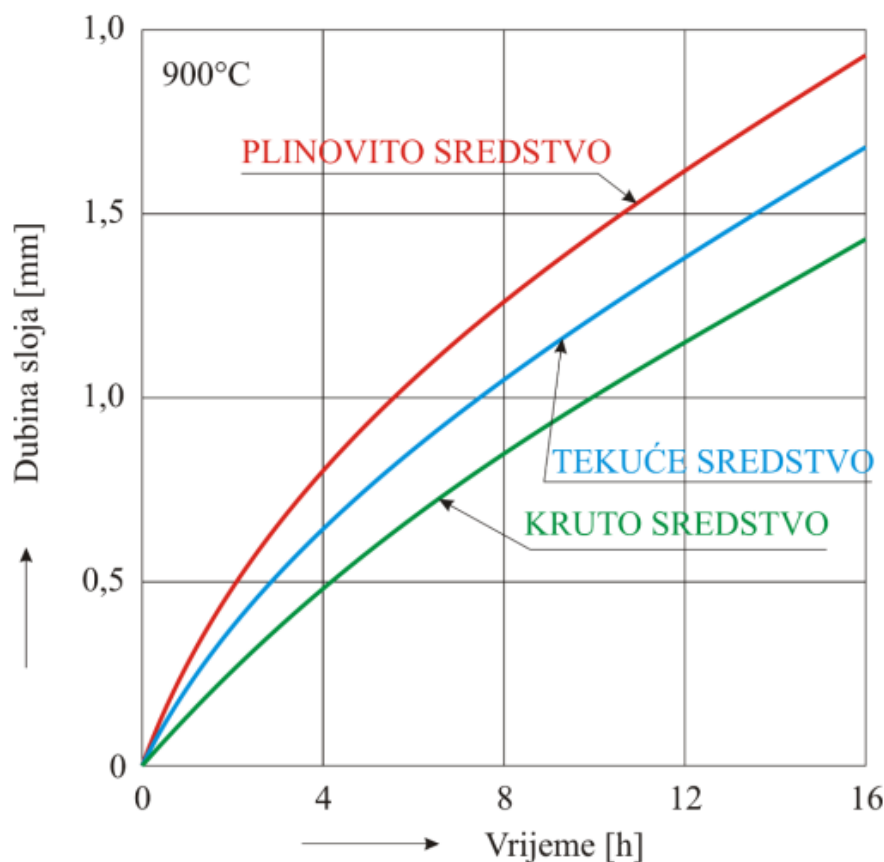
Slika 3.2. Prikaz postupka pougličavanja

Iz dijagrama uočavamo da ukoliko zagrijemo na traženu temperaturu te ako držimo upravo na toj temperaturi doći će do odgovarajuće reakcije u rubnome sloju te difuzija ugljika u površini proizvoda.

Brzina pougličavanja ovisi o temperaturi, o sredstvu u kojem se odvija pougličavanje te o kemijskom sastavu. Ukoliko gledamo na izvor ugljika, odgovarajuća sredstva za cementiranje mogu biti: cementiranje u krutim sredstvima, cementiranje u kapljevitim sredstvima, cementiranje u plinovitim sredstvima, cementiranje u vakuumu i cementiranje plazmom.

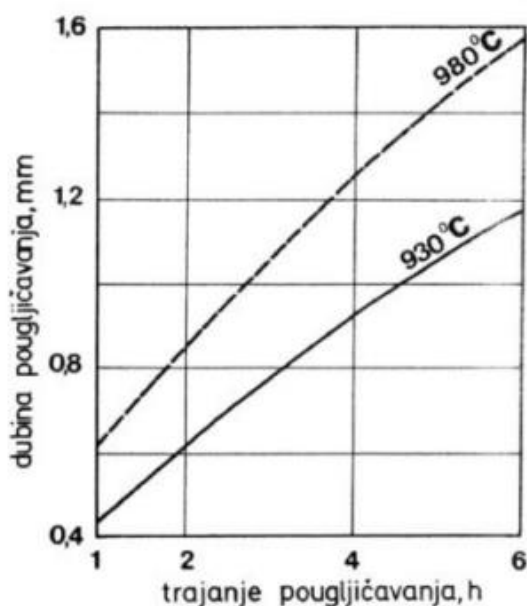
Kod cementiranja u krutim sredstvima za sredstvo cementiranja koristimo granulat koji se sastoji od drvenog ugljena, aktivatora i veziva. Kod cementiranja u kapljevitom sredstvu koristimo solne kupke natrijeva cijanida i kalijeva cijanida u kombinaciji s aktivatorima. Kod cementiranja u plinovitim sredstvima postupak cementiranja se odvija u plinskoj atmosferi koja se sastoji od razolikih spojeva ugljikovodika i ugljika te upravo iz tog razloga je ovaj način brži od cementiranja u granulatu te je potencijalno kvalitetnija regulacija C. Cementiranje u vakuumu obuhvaća obradu čelika u plinovitoj atmosferi koja sadrži spojeve ugljika i dušika, ugljikovodik i ugljik. Kod cementiranja plazmom upotrebljavamo ionizirane plinove, neprekidan C – potencijal možemo regulirati gustoćom struje, događa se bombardiranje površinskog sloja koncentriranim ugljikovim atomima.

Na slici 3.3 možemo vidjeti kako vrijeme i vrsta sredstva za cementiranje utječu na dubinu pougljičenja.



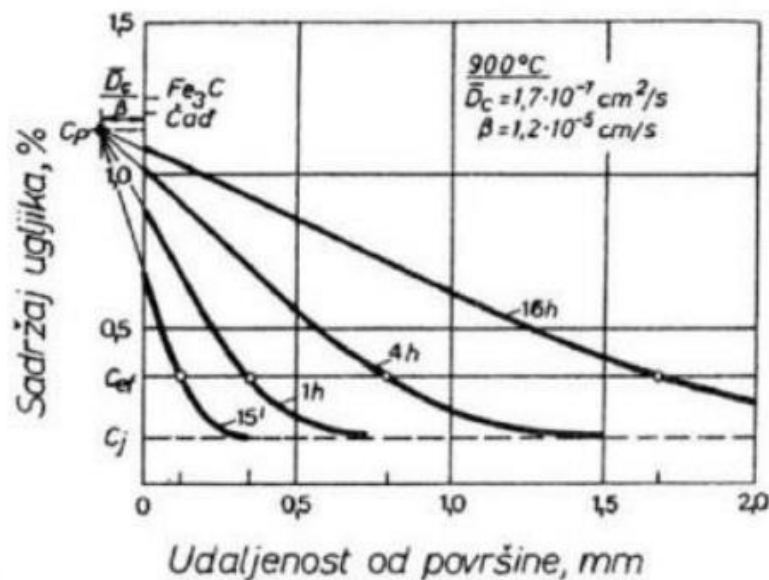
Slika 3.3. Grafički prikaz utjecaja vremena držanja izratka na dubini pougljičenog sloj za sredstva pougljičavanja

Također treba pripomenuti da kod nelegiranih čelika za vrijeme pougljičavanja u plinskoj atmosferi, primjenom adekvatnih dijagrama možemo utvrditi trajanje postupka pougljičavanja u odnosu na traženu dubinu cementiranog sloja. Kod pougljičavanja legiranih čelika treba istaknuti da se trajanje postupka određuje eksperimentalno zbog utjecaja legirajućih elemenata na difuziju ugljika kroz rubni sloj čelika. Trajanje postupka pougljičavanja je određeno: temperaturom, vrstom sredstva u kojemu se odvija pougljičavanje te o kemijskom sastavu čelika. Na slici 3.4 možemo vidjeti kako temperatura utječe na trajanje postupka cementiranja s obzirom na traženu dubinu pougljičenog sloja. Zaključujemo da ukoliko koristimo više temperature, time omogućujemo dobivanje veće dubine pougljičenog sloja te skraćujemo vrijeme trajanja pougljičavanja.



*Slika 3.4. Upliv temperature na dubinu pougljičenog sloja 20MnCr5*

Također osim temperature, na dubinu pougljičenog sloja utječe i vrijeme izloženosti materijala izvoru ugljika i temperaturi. Ukoliko je materijal duže vrijeme izložen izvoru ugljika i temperaturi pougljičenja, raste dubina pougljičenog sloja (slika 3.5).



Slika 3.5. Upliv trajanja postupka na dubinu pougljičavanja

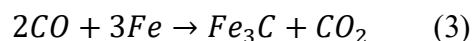
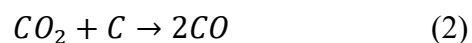
### 3.1.1. Pougljičavanje u krutom sredstvu

Pougljičavanje u krutom sredstvu to jest cementiranje u krutom sredstvu jedan je od najstarijih postupaka koji je široko primijenjen i danas. Pougljičenje čelika u krutom karburizatoru možemo izvesti isključivo u prisutnosti nekog aktivatora, to jest nije moguće da pougljičimo predmet u nekoj drvenoj kutiji sa drvenim ugljenom ukoliko je ta kutija hermetički zatvorena. Za proces pougljičenja je potreban zrak kao aktivator koji bi omogućio ostvarivanje kemijskih reakcija u karburizatoru. U praksi ne uzimamo zrak za aktivator nego neka druga efikasnija sredstva kao što je barijev karbonat. Pougljičavanje u krutom sredstvu najčešće koristimo kada trebamo pougljičiti manji broj proizvoda ili manji broj strojnih dijelova. To su proizvodi koje nismo nužno naknadno kaliti s temperature pougljičenja. Smjesu koju koristimo prilikom provođenja ovog postupka je mješavina aktivatora, vezivnog sredstva i drvenog ugljena. Vezivno sredstvo kod pougljičavanja u krutom sredstvu je u obliku zrnatih granula čija je veličina između 3 i 5 milimetara. Na slici 3.6 možemo vidjeti mješavinu drvenog ugljena odnosno granulat.



*Slika 3.6. Granulat za pougljičavanje*

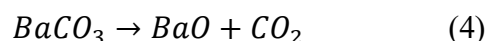
Pougljičavanje u krutom sredstvu sadrži sljedeće reakcije:



Prva reakcije se odvija pri relativno niskim temperaturama dok se ostale reakcije koje predstavljaju ravnotežne reakcije odvijaju isključivo na visokim temperaturama. Na tim se temperaturama mora uspostaviti ravnoteža između CO i CO<sub>2</sub>.

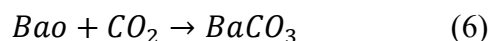
Za aktivatore možemo iskoristiti: natrijev karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), stroncijev karbonat (SrCO<sub>3</sub>), kalijev karbonat (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), barijev karbonat (BaCO<sub>3</sub>), magnezijev karbonat (MgCO<sub>3</sub>) i tako dalje.

Proces aktiviranja će se odvijati na sljedeći način:



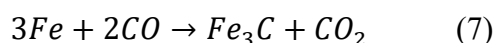
Raspad karbonata se odvija postupno, a ne odjednom, stoga u kutiji za cementiranje dulje vrijeme traje plinska faza konstantnog sustava, što je uvjet za uspješno pougljičavanje.

Prilikom ohlađivanja aktivator reagira prema:



to jest, ponovno će se stvoriti barijev karbonat, te je zbog toga relativno mali potrošak.

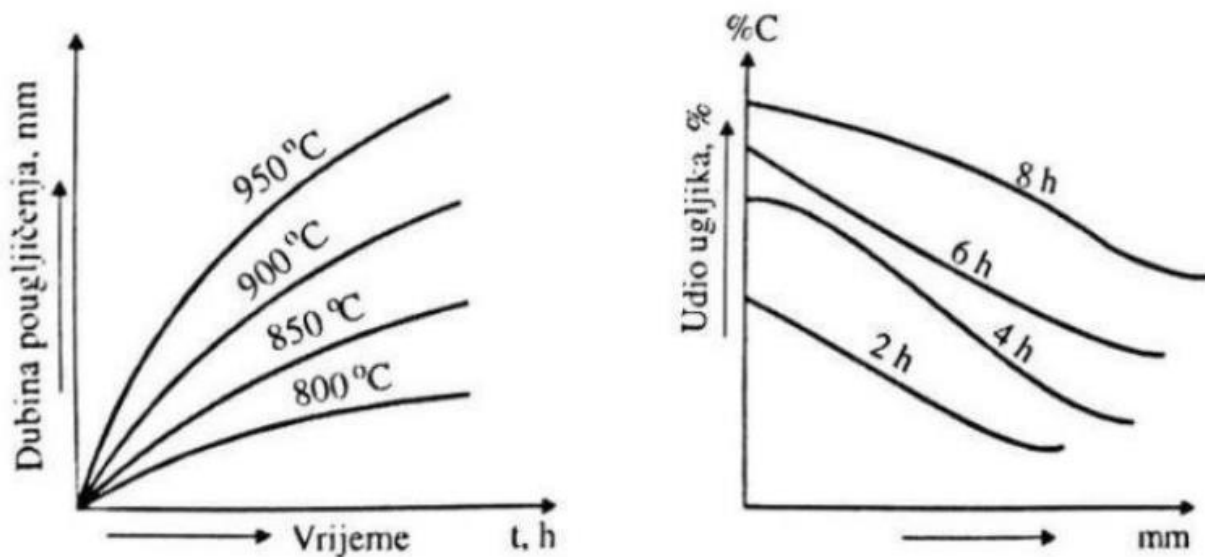
Nakon toga dolazi do reakcije sa željezom prema sljedećoj jednačini:



Vidimo da nam je potreban ugljik u obliku ugljičnog monoksida, a ne u obliku atoma.

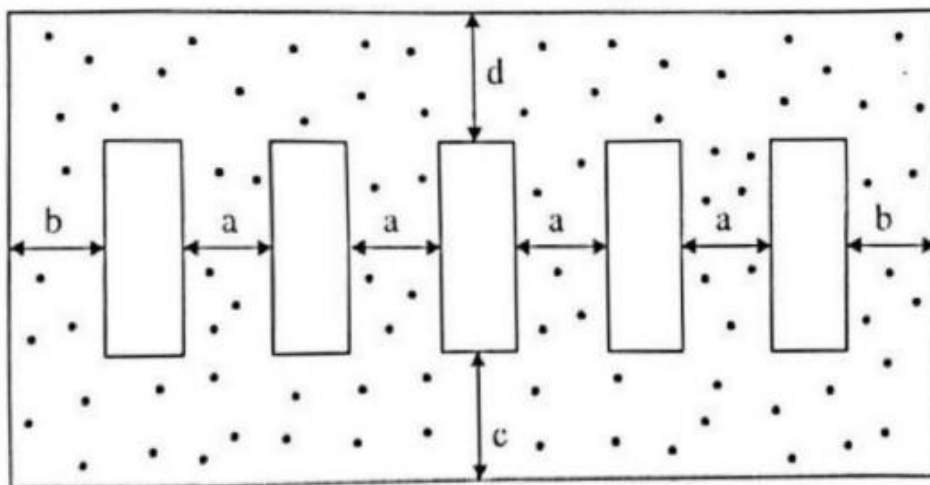
Pougličavanje će se dogoditi kada površina obrađivanog obratka, proizvoda ili djela i plinska atmosfera međusobno reagiraju. Rezultat ove reakcije bit će ugljik koji se difundira u austenit. Difuzijom ugljika u austenit utječemo na čvrstoću površine proizvoda, te se nakon toga ugljik kreće dalje prema jezgri. Drveni ugljen utječe na obnavljanje ugljikovog monoksida, stoga ugljični dioksid ponovno reagira. Čitavi proces se događa u plinskoj fazi.

Iznosi temperature pougličanja su između  $800^{\circ}\text{C}$  i  $950^{\circ}\text{C}$ , no najekonomičnija temperatura za peć, kutiju za pougličavanje i proces je između  $850^{\circ}\text{C}$  i  $900^{\circ}\text{C}$ . Na slici 3.7. možemo vidjeti utjecaj temperature i vremena držanja čelika na dubinu pougličanja.



Slika 3.7. Utjecaj vremena i temperature na dubinu pougličanja

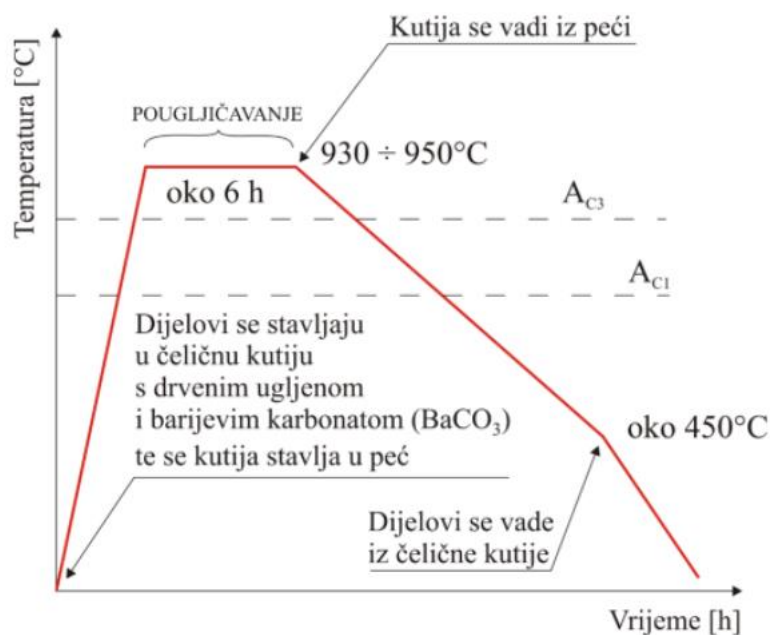
Kutiju koju koristimo za pougličavanje, izrađena je od niskougljičnog ili vatrootpornog čelika. Kutije od niskougljičnih čelika imaju vijek trajanja koji se kreće u intervalu od 150 do 200 sati. Kutije od vatrootpornog čelika imaju vijek trajanja od čak 6000 sati. Proces pougličavanja započinje tako da kutiju napunimo smjesom granulata do visine između 13 i 50 milimetara. Zatim na taj sloj stavljamo dijelove koje želimo pougličiti. Moramo paziti na razmak i položaj postavljenih dijelova. Na slici 3.8 možemo vidjeti položaj dijelova u kutiji za pougličavanje.



Slika 3.8. Obradci u kutiji za pougljičavanje

Na kraju, dijelove prekrivamo ostacima smjese. Kutiju moramo zatvoriti poklopcem, šamotom ili premaznom glinom kako bi spriječili ulazak zraka u nju. Peć zagrijemo na temperaturu od 600°C do 700°C te postavljamo kutiju pored nje, zatim se temperatura poveća na temperaturu koja je nužna za pougljičavanje.

Dubina pougljičenog rubnog sloja ovisit će koliko dugo kutija bude u peći. Otprilike nakon jednog sata, ugljik će prodirati do 0,3 milimetara, a nakon osam sati može doći i do dva milimetara. Slika 3.9 prikazuje postupak pougljičavanja u krutom sredstvu



Slika 3.9 Grafički prikaz pougljičavanja u krutom sredstvu

Neke od prednosti pougljičavanja u krutom sredstvu su mogućnosti korištenja istoga aktivatora nekoliko puta, velike dubine pougljičenja, kvaliteta procesa je dobra, troškovi opreme su minimalni, možemo obrađivati dijelove koji su raznih oblika i dimenzija, velike dubine pougljičenja. Neki od nedostataka su ti da je proces dugotrajan i spor što nije pogodno za serijsku proizvodnju, dubinu pougljičenja je teško odrediti, otežano kontroliranje postupka, postoje problemi sa prevelikim dubinama pougljičenja (prezasićenje austenita) i kod faze ohlađivanja može doći do razugljičavanja.

### 3.1.2. Pougljičavanje u kapljevitoj sredstvu

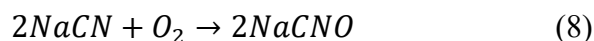
Iduća metoda pougljičenja je pougljičavanje u solnim kupkama. Za pougljičenje koristimo solne smjese dviju soli, one se tale na temperaturnom intervalu od 500°C do 600°C te njihova radna temperatura iznosi između 820°C i 930°C, najčešće je to između 900°C i 930°C. Nakon što smo izvršili pougljičavanje predmeti se objese na žicu te se uranjaju u kupku ili ih stavimo u odgovarajuću napravu. Soli koje koristimo za pougljičavanje se sastoje od alkalnih cijanida kao što su: kalcijeva  $\text{Ca}(\text{CN})_2$ , kalijeva KCN i natrijeva NaCl, eventualno se još mogu naći neke kemikalije ubrzavaju kemijske reakcije u kupki. Prema navedenom dodatku kemikalija, solne kupke dijelimo na:

1. neaktivirane
2. aktivirane

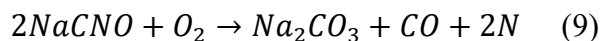
Kako sve kupke koje koristimo za pougljičavanje sadrže cijanide, te odaju dušik i ugljik, uz procese pougljičavanja dolazi i do nitriranja to jest do difuzije dušika u čelik. Stoga svi procesi u cijandnim kupkama mogu biti definirani kao procesi karbonitriranja. Neaktivirane solne kupke također se nazivaju i kupke za karbonitriranje dok se aktivirane kupke nazivaju kupke za pougljičenje.

Procesi u neaktiviranim kupkama se odvijaju na sljedeći način:

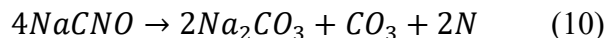
1. Oksidacija cijanida u cijant:



2. Oksidacija cijanata u karbonat:

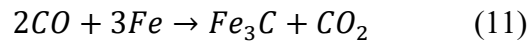


3. Raspad cijanata uslijed djelovanja topline:



Možemo uočiti kako se ovdje baš kao i kod cementiranja u krutom sredstvu stvara CO, koji je potreban za cementiranje.

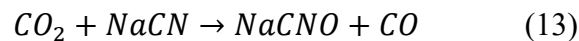
4. Pougličenje čelika:



5. Podušičenje čelika:



6. Povoljna reakcija između nastalog CO<sub>2</sub> i cijanida:

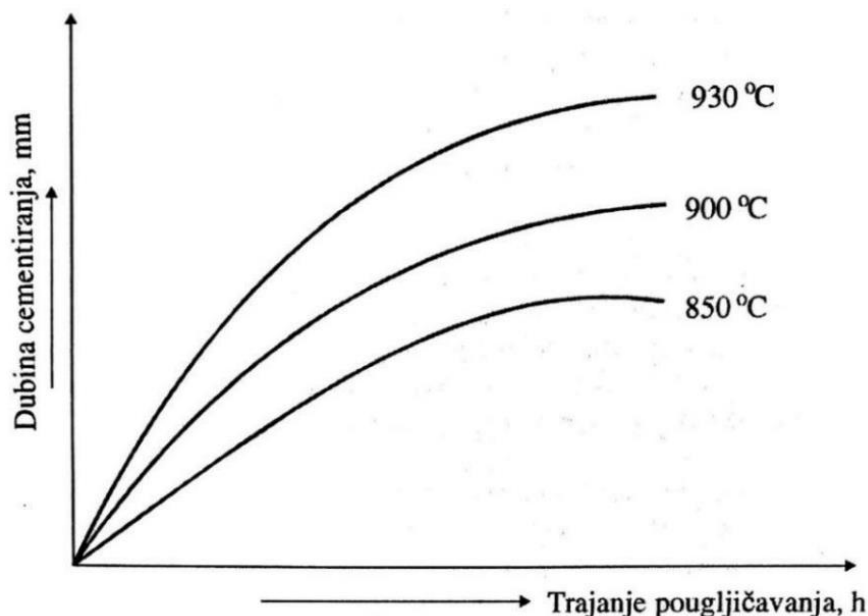


Zaključujemo da će se neaktivirana kupka jednoliko pougličavati po dubini zato što sadrži aktivator u sebi, zrak nije poželjan i nepotreban nam je. Zbog toga se aktivirane kupke prekrivaju slojem ljuskastog grafita s ciljem sprječavanja suviše oksidacije površine, izlaza plinova koji su stvoreni u unutrašnjosti kupke i intenzivnog hlađenja koje je neekonomično.

Aktivatorska smjesa u sebi sadrži male količine stvarnoga aktivatora, kuhinjske soli i natrijeva karbonata. Kako se ovdje govori o dvokomponentnim i trokomponentnim solima, očito je da dodavanjem većeg ili manjeg udjela jedne od navedenih komponenta, možemo regulirati učinak pougličanja. Kod aktiviranih kupki dolazi do istodobnog nitriranja.

Ukoliko iskoristimo odgovarajuće kombinacije aktivatorske smjese i cijanida, imamo mogućnost da se s ovim solima postigne manji ili veći učin.

Na primjer, sol sa 8-12% cijanida će dati oštro pougličenje te nikakvo nitriranje. Ovdje pretpostavljamo da se pougličenje izvodi preko aktivnog C. Kupke sa srednjim učinkom imaju manji udio aktivatora i 20-30% cijanida te pretpostavljamo da u ovim kupkama dolazi do pougličanja. Zbog većeg udjela cijanida ove kupke intenzivnije nitriraju. Aktivirane kupke brže pougličuju od čvrstih karburizatora i neaktiviranih kupki zato što rade na višim temperaturama. Ovdje moramo istaknuti da nakon pougličanja u solnim kupkama predmet ne smijemo hladiti na zraku nego ga moramo direktno kaliti, zato što ostaci soli jako brzo izgaraju na zraku te zato nagrízaju predmet koji je još užaren. Ukoliko je potrebno još mehanički obrađivati predmet, moramo ga meko žariti, a ako nije potrebna dodata mehanička obrada, možemo kaliti rub ili jezgru. Svaka solna kupka ima svoju ekonomsku granicu, kada bi držali iznad te granice u svrhu povišenja dubine pougličanja, to povećanje dubine bi bilo vrlo maleno i ne bi imalo smisla. To najbolje možemo prikazati na slici 3.10. Ne možemo dati točne podatke o učinku cementiranja za solne kupke jer to ovisi o čeliku koji se pougličava, o sastavu kupke i o temperaturi.



*Slika 3.10. Grafički prikaz postizivih dubina pougljičenja*

Visoka temperatura pougljičenja u soli više utječe na dubinu pougljičenja nego na preugljičenje ruba. Preugljičenje ruba će se dogoditi na niskim temperaturama, zato što je tada CO dovoljno visok, a brzina difuzije C u čeliku je mala. Tada dolazi do gomilanja C u rubu ali samo kod vremenski dugih pougljičenja.

Za predmete koji su skloni deformaciji koristimo niže temperature. Moramo paziti da se predmeti prilikom pougljičenja ne deformiraju zbog vlastite težine. U normalnom slučaju temperatura pougljičenja iznosi 50 do 100 K iznad donje temperature kovanja.

Prije nego što uronimo predmet u sol za pougljičavanje trebamo ga predgrijati na temperaturu od 300-400°C, ukoliko je predmet osjetljiv moramo ga predgrijati na temperaturu od 600-700°C. Predgrijavanjem smanjujemo toplinska naprezanja pri ugrijavanju, također štitimo i radnika od prskanja soli za pougljičenje. Za potrebe sigurnosti radnika moramo iz pogona ukloniti sve naprave koje su konstruirane i izrađene od cijevi, zato što bi voda koja je nakupljena u cijevima u trenutku naglog uranjanja, u solnoj kupki, ekspandirati i ozlijediti radnika.

Pougljičenje u kapljevitom sredstvu ima svoje prednosti i nedostatke. Neke od prednosti su da se proces koristi pri masovnoj i serijskoj proizvodnji, jednostavan postupak pougljičavanja, postizive dubine pougljičenja te je ulaganje u opremu malo. Nedostaci su ti da nije moguće reguliranje i kontroliranje smjese kupke, ne možemo kontrolirati C, neutraliziranje vode i soli, korištenje cijanida.

### 3.1.3. Njega i održavanje kupki za pougljičavanje

Kod njege i održavanja kupki moramo znati da se u soli odvija kemijska reakcija iako se predmet za pougljičavanje ne nalazi u njoj. Isplativije nam je uključivati peć povremeno i tada je maksimalno iskoristiti nego da je držimo u kontinuiranom pogonu. No trebamo misliti i na utrošak energije, moramo zadovoljiti kontinuirani pogon uz manju temperaturu u vremenu kada nema proizvoda za pougljičavanje. Ukoliko s kupkom prijeđe 950°C moglo bi doći do potroška soli zbog intenzivnih reakcija. Nova sol se mora čuvati na suhom mjestu, inače bi mogla početi prskati, a bakar, keramika, azbest, olovo i porculan onečišćuju kupku. Iz tog razloga sol moramo staviti u čelični lonac.

Raspad cijanida pospješujemo ogorinom, ukoliko nema cijanida ili ga ima premalo, nastala ogorina će fosfirati u kupki. Kupku moramo dnevno odmuljivati. Ne smijemo uzimati cijevi za naprave za odmuljivanje jer može se dogoditi da u cijev dođe voda, što bi rezultiralo prskanje kupke. Lonac moramo jednom tjedno isprazniti i izvaditi te očistiti od ogorine. Soli za cementiranje moramo tretirati kao jake otrove.

Nužan uvjet ispravnosti rada kupke je ispravan udio aktivatora i cijanida. Kontrolu cijanida vršimo pomoću kemijske analize solne probe. Udio aktivatora određujemo indirektno jer je teško provoditi kontrolu aktivatora.

C-potencijal aktivirane kupke za pougljičavanje određujemo pougljičavanjem tankog lima udjela 0,1%C. Određivanjem udjela C pougljičenoj limenoj foliji, dobivamo podatak koliko kupka može dati ugljika čeliku. Foliju stavljamo u kupku i držimo ju u njoj prema sljedećoj tablici:

*Tablica 3.1. Trajanje držanja čelične folije s 0,1%C u solnoj kupki*

| temperatura, °C | trajanje, min |
|-----------------|---------------|
| 800             | 60            |
| 850             | 30            |
| 900             | 15            |
| 930             | 10            |

Nakon toga, foliju izvadimo iz kupke te ju moramo ugasiti u vodi. Ukoliko nakon gašenja, folija krene pucati pri najmanjem savijanju, to nam je indikator da je udio C iznad 0,5%. Da bi znali točan udio moramo napraviti kemijsku analizu folije.

C-potencijal možemo odrediti i pomoću pougljičavanje tanke trakaste strugotine koju analiziramo isto kao i foliju. Glavna prednost ovog načina je što možemo upotrebiti strugotinu predmeta koji se cementiraju.

Možemo upotrijebiti i žičanu mrežu čija se debljina kreću između 0,09 i 0,20 milimetara ali trebamo paziti na ostatke soli kako ugljik iz tih ostataka ne bi ušao u rezultate analize. Treba napomenuti da pomoću navedenih metoda možemo odrediti C-potencijal kada je pougljičavanje izvedeno u homogenom austenitnom području upotrijebljenog čelika.

#### 3.1.4. Pougljičavanje u plinovitome sredstvu

Pomoću ovog postupka možemo regulirati sastav plinske atmosfere te nam je omogućena konstantna automatska kontrola, zbog toga ovaj postupak smatramo uspješnim i prikladnim. Pougljičavanje u plinovitome sredstvu obuhvaća i pougljičavanje u krutom sredstvu i pougljičavanje u kapljevitom sredstvu ali ne možemo kontrolirati plin koji nastaje na površini izratka.

Prilikom pougljičavanja u plinovitome sredstvu, pomoću kontroliranja procesa smjese plina u generatoru stvaramo plinove. Navedena smjesa najčešće sadrži vodenu paru, vodik i ugljikov monoksid. Reguliranje C-potencijala je vrlo jednostavno kod pougljičavanja u plinovitome sredstvu te ga iz tog razloga koristimo kod serijske proizvodnje. Pri ovom postupku koristimo peći koje su komorne, jamske ili prolazne. Peć odabiremo na temelju dubine željenog sloja, oblika proizvoda i veličini proizvoda. Ukoliko imamo masovnu proizvodnju upotrijebit ćemo prolazne peći, na primjer automobilska industrija. Jamaste peći najčešće koristimo ako želimo pougljičiti manje dijelove koje stavljamo u držače.

Kako bi stvorili uvjete za pougljičavanje moramo koristiti različite gorive plinove. Za primjer možemo uzeti metanol. U komoru u kojoj se nalaze čelični obratci, unosimo kapljeviti metanol. Na temperaturi pougljičenja metanol će ispariti, te se tada oslobađaju potrebne plinske komponente koje su nam nužne za proces pougljičenja. Ovdje moramo paziti na moguće stvaranje čađe, do nje će doći ukoliko površina ne apsorbira sve ugljikove atome.

Pougljičavanje u plinovitome sredstvu sadrži dvije faze. U prvoj fazi, u atmosferi nalazimo ugljikov monoksid koji je veći od potrebnog tlaka za održavanje željeznog sadržaja ugljika, to jest parcijalni tlak. Ovu fazu također nazivamo pougljičavajući korak. Iz tog razloga pougljičavanje se odvija sve dok ne dobijemo visoki sadržaj ugljika ili dok ne nastupi nova ravnoteža. Druga faza obuhvaća gubljenje ugljika te zbog toga do smanjenja sadržaja ugljika na površinskome sloju ugljika, to jest dolazi do razugljičenja.

Kako bi pougljičavanje u plinovitome sredstvu bili ispravno, moramo imati kontrolu nad sastavom atmosfere pougljičenja, vremenom i temperaturom. Moramo paziti da temperatura iznosi 925°C inače bi moglo doći do nepovoljnih posljedica. Kako bi dobili što bolje rezultate, u neutralnoj atmosferi zagrijavamo obratke na određeni iznos temperature. Cilj nam je da u presjeku obratka dobijemo jednake temperature. Kada smo to izvršili, dovodimo plin za obogaćivanje.

Da bi dobili kvalitetnu atmosferu koju u ostalome možemo kontrolirati moramo koristiti atmosferu koja u sebi sadrži dušik i ugljični monoksid. Kod pougljičavanja u plinovitome sredstvu imamo iduće vrste atmosfera: atmosfere dobivene iz peći, atmosfere na osnovi plina nosača i atmosfere na osnovi metanola i dušika.

Moramo postići potpunu kontrolu C-potencijala ukoliko ne želimo loše utjecati na dubinu pougljičenog sloja. U tome slučaju moramo znati koncentraciju sastava ugljikovodika. To ćemo postići pomoću kisikove sonde. Postupak je takav da prvo izmjerimo parcijalni pritisak kisika, a nakon toga upotrijebimo metodu mjerenja infracrvenim plinskim analizatorom, koji radi tako da emitira zračenje podijeljeno u dvije zrake. Jedna od zraka prolazi kroz standardni plin, dok druga kroz uzorak plinske atmosfere iz uzete peći. Na kraju, pomoću detektora mjerimo razliku apsorbiranih zraka na izlazu.

Neke od prednosti su to što imamo više načina za provesti proces, možemo kontrolirati plin uz površinu izratka, moguća je masovna proizvodnja i velikoserijska proizvodnja. Nedostaci su ti što su nam povećani troškovi opreme, moguć je nastanak eksplozije i požara i plinske pare znaju biti otrovne.

Postoji više načina za provedbu plinskog pougljičavanja. Jedan od njih je da pougljičavamo pomoću čvrstog sredstva. Tada se plin za pougljičenje proizvodi u pretkomori od peći koja je izrađena od aktivatora i drvenog ugljena. Drugi način je da se isparavanje odvija u peći za pougljičenje, a da smjesa od etilnog alkohola i acetona isparava u Ni-katalizatoru.

#### 3.1.5. Pougljičavanje u vakuumu

Pougljičavanje u vakuumu se odvija u atmosferi i na temperaturnom intervalu od 900°C do 1040°C. Atmosfera je sastavljena od smjese ugljikovodika, ugljikovodika i vodika. Na kraju moramo zakaliti čelik u plinu ili u ulju.

Kod pougljičavanja u vakuumu C-potencijal ćemo odrediti na način da površinu izratka zaštitimo ugljikom i vremenom pougljičenja pri određenim temperaturama. Atmosfera koja sadrži propan ima veći C potencijal od atmosfere koja sadrži metan, to je zato što se stvaranjem propana stvara i više ugljika.

Peć koju koristimo kod pougljičavanja u vakuumu je napravljena od keramike ili grafita. Koristimo grafit ili keramiku zbog viših tlakova čiji iznos je manji od 0,4 bara. Time ćemo spriječiti taloženje ugljika unutar peći.

Neke od prednosti pougljičavanja u vakuumu su to što je manji utrošak plina za pougljičavanje, postizemo bolja mehanička svojstva, možemo naknadno obraditi i predgrijati izradak pod vakuumom, predmete koje smo obradili imaju čišću površinu te imamo veću debljinu pougljičenog sloja i kraće vrijeme obrade.

Nedostaci su ti da moramo napraviti ravnotežu između procesnih uvjeta kako bi ispunili tražene zahtjeve te imamo velike troškove opreme.

### 3.1.6. Pougljičavanje plazmom

Pougljičavanje plazmom se sastoji od bombardiranja površinskog sloja predmeta ugljikovim ionima. Prvo moramo u visokotemperaturnu peć staviti čelične predmete koji su međusobno razmaknuti šest milimetara. Te čelične predmete upotrebljavamo kao katode.

Kod pougljičavanja plazmom C-potencijal ne reguliramo kisikovom sondom već gustoćom struje. Čelik moramo zagrijati na temperaturu između 850 i 1040°C da bi dobili zasićeni ugljik na površini.

Konstrukcija unutar peći nam služi kao anoda, te se unutar anode i katode stvara plazma. U ovome procesu kao plin koristimo smjese argona, vodika, dušika i ugljikovodika. Da bi postigli ionizaciju plina moramo upotrebljavati istosmjerni napon čiji se iznos kreće između 350 i 1000 volti pri tlaku od 0,013 i 0,33 bara. Oaj postupak je puno brži od ostalih postupaka. Tinjajuće pražnjenje unutar katode i anode se događa kod malih brzina strujanja plina i tlaka. Zbog ovoga dolazi do razdvajanja plina na ugljik i vodik.

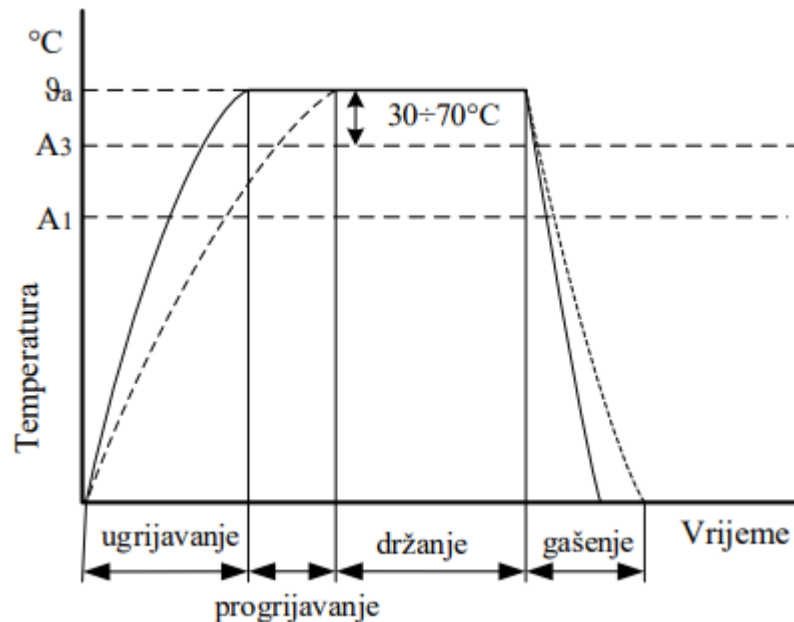
Kada obradak postigne temperaturu pougljičenja, možemo reći da se ovaj proces sastoji od dvije faze, a to su: trajanje pougljičenja kod kojeg se stvara strujno pražnjenje plazme i faza kod koje nema plazme to jest, snizuje se sadržaj ugljika na površini i realizira se tražena dubina pougljičenja.

Neke od prednosti pougljičavanja plazmom su to da imamo postupak koji je ekološki siguran, manja potrošnja plina što rezultira nižom cijenom, vrijeme postupka je kraće i imamo bolju topivost ugljika unutar austenita.

Neki od nedostataka pougljičavanja plazmom su što nam proces nije prihvatljiv kod obrade predmeta koji su veći te imamo visoke troškove opreme.

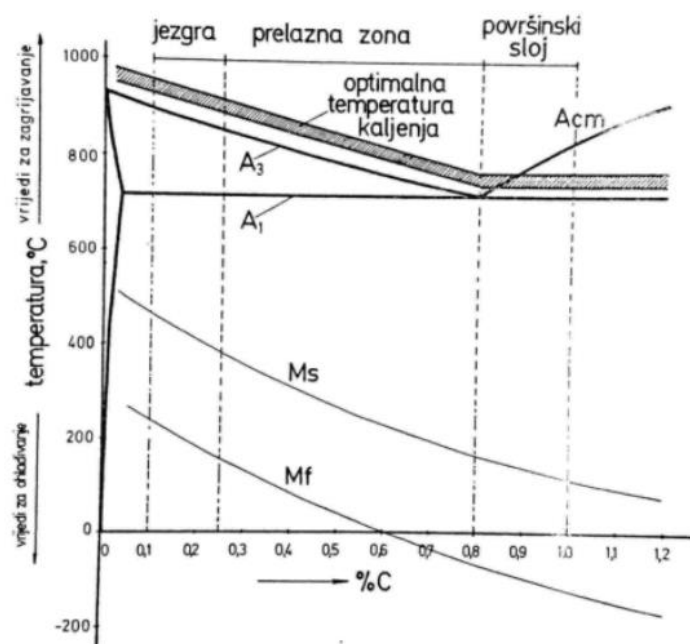
### 3.2. Kaljenje

Kako smo već prije definirali, cementiranje se sastoji od pougljičavanja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Kaljenje čelika se provodi kako bismo postigli što jednoličnije prokaljenje ili drugim riječima što jednoličniju tvrdoću po poprečnome presjeku, također svrha kaljenja je postizanje maksimalno moguće tvrdoće u ovisnosti o udjelu C-ugljika u čeliku. Mogli bismo reći da je kaljenje postupak koji se sastoji od tri faze, prva je da zagrijemo čelik na temperaturu austenitizacije, zatim ga držimo na temperaturi austenitizacije kako bismo otopili ugljik i legirajuće elemente u austenitu i na kraju gašenje čime se postiže martenzitna mikrostruktura. Slika 3.11 prikazuje kaljenje podeutektoidnog čelika.



Slika 3.11. Grafički prikaz kaljenja podeutektoidnog čelika

Kaljenje kao proces sam po sebi nije jednostavan. Na slici 3.12. vidimo raznovrsne mikrostrukture čelike koje su ovisne o sadržaju ugljika. Možemo uočiti da je jezra locirana u podeutektoidnome dijelu, u nautektoidnome dijelu se nalazi površinski sloj. Za podeutektodine čelike najbolja temperatura kaljenja se kreće u intervalu od 30°C do 70°C iznad  $A_3$  temperature, za nautektoidne čelike najbolja temperatura kaljenja se kreće u intervalu od 50°C do 70°C iznad  $A_1$  temperature. Upravo zbog toga ne možemo odabrati temperaturu koja bi nam bila najbolja za površinski sloj i jezgu. Zaključujemo da zato moramo odrediti što nam je bitnije od toga dvoje. Također na dijagramu je jasno prikazana početna i krajnja temperatura pri transformacije martenzita. Pretvorba austenita u martenzit se prvo događa u jezgra, a nakon toga u površinskome sloju. Može doći do pojave zaostalog austenita ako površinski sloj bude ohlađen do sobne temperature, to jest neće se dogoditi transformacija austenita u martenzit. Dubokim ohlađivanjem ostvarujemo potpunu transformaciju.

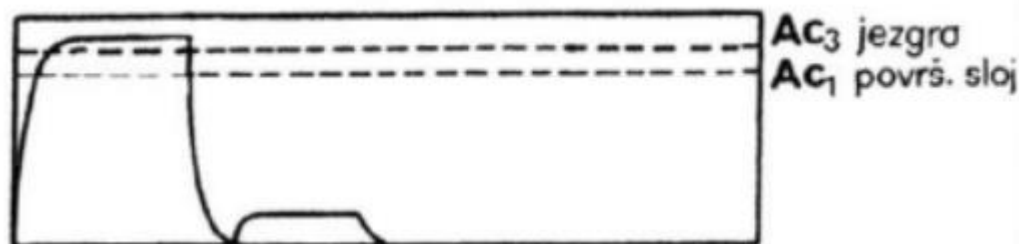


Slika 3.12. Mikrostrukture u slojevima pougljičenog čelika

Kaljenje se može provesti na više načina, točnije tri načina, a to su direktno, jednostruko i dvostruko kaljenje.

### 3.2.1. Direktno kaljenje

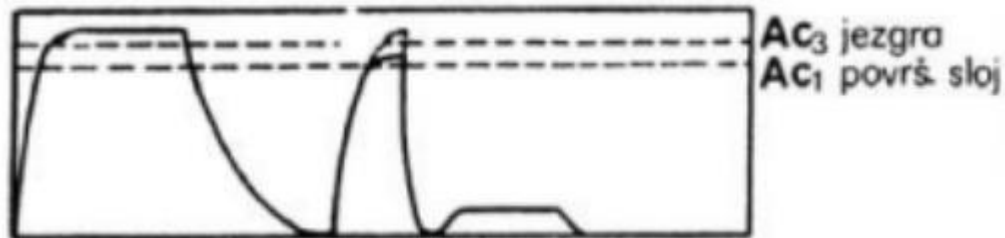
Direktno kaljenje je od sva tri načina najjeftiniji i najjednostavniji. Kako bi proveli direktno kaljenje potrebno nam je rashladno sredstvo u kojem hladimo obradak. Direktno kaljenje upotrebljavamo kod legiranih čelika i kod izradaka koji su manji i koji imaju jednostavan oblik. Ukoliko imamo restriktivnije zahtjeve, tada koristimo sitnozrnate čelike iz razloga što nema zaostalog austenita i nema pogrubljanja zrna. Direktno kaljenje se događa pri temperaturi pougljičenja. Jedan od oblika direktnog kaljenja je kaljenje snižene temperature. Pri ovome procesu se nakon pougljičenja čelik ohladi na nižu temperaturu. To je temperatura kaljenja jezgre. Kod ove metode je temperaturna razlika manja i manje su deformacije. Na slici 3.13. možemo vidjeti postupak direktnog kaljenja.



Slika 3.13. Postupak direktnog kaljenja

### 3.2.2. Jednostruko kaljenje

Jednostruko kaljenje se događa na temperaturi kaljenja za kaljenje jezgre ili kaljenje površinskog sloja. Karbidna mreža se može stvoriti na granicama zrna ako se izradak nakon poguljičenja polako hladi, to se događa ako je u površinskom sloju sadržaj ugljika iznad eutektoidne koncentracije. Zato bi trebali brže hladiti. Jednostruko kaljenje se može provesti na više načina. Svim tim načinima je zajedničko to što dolazi do djelomična prekrystalizacije kod naknadne austenitizacije. Zbog toga se dobiva usitnjeno zrno. Na slici 3.14. vidimo proces jednostrukog kaljenja.



*Slika 3.14. Postupak jednostrukog kaljenja*

Poslije međuzarenja, jednostruko kaljenje se odvija na temperaturi od 650°C. Koristimo ga u svrhu smanjenja naprezanja i deformacija, ali ga ne koristimo jer to ne možemo napraviti međuzarenjem. To je zbog toga što naknadno kaljenje ne utječe na deformaciju izradaka.

Jednostruko kaljenje nakon izotermičke pretvorbe je jedan od postupaka koji se najčešće koristi. Temperatura se nakon poguljičenja hladi na 600°C te se nakon toga neko vrijeme drži na toj temperaturi. Time dobivamo pretvorbu austenita u perlitnome stupnju. Zatim, obradak opet zagrijavamo na temperaturu kaljenja jezgre ili temperaturu kaljenja površinskog sloja. Ovakav proces koristimo radi kraćeg vremena toplinske obrade i manje potrošnje energije. Na slici 3.15. vidimo jednostruko kaljenje nakon izotermičke pretvorbe.

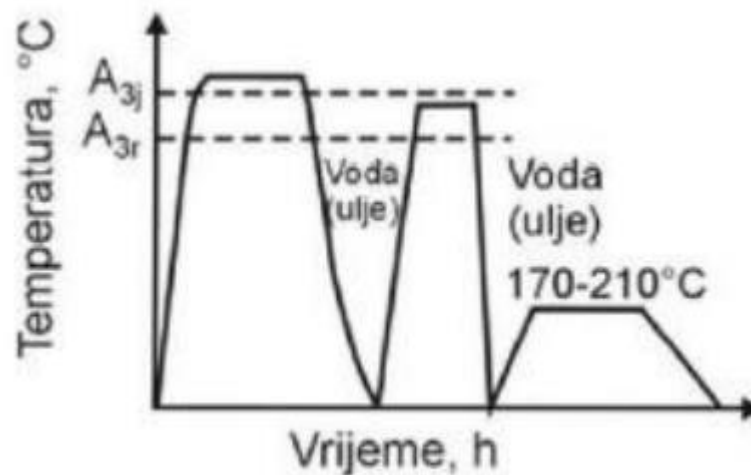


*Slika 3.15. Postupka jednostrukog kaljenja nakon izotermičke pretvorbe*

### 3.2.3. Dvostruko kaljenje

U prijašnjim vremenima dvostruko kaljenje je bio logičan izbor ukoliko smo željeli najbolju žilavost u jezgri i najveću površinsku tvrdoću, ali ove zahtjeve nije bilo moguće postići. To je zbog toga što se drugim kaljenjem koje se odvija na niskoj temperaturi, smanji najbolja žilavost dobivena prvim kaljenjem. Pri niskoj temperaturi dolazi do djelomično prekristalizirane jezgre iz razloga što postoji ferit čija je uloga smanjenje žilavosti u mikrostrukтури austenita.

Dvostruko kaljenje moguće je provesti tako da prvo kaljenje napravimo na temperaturi pouglijčenja, a sekundarno kaljenje da izvedemo na temperaturi kaljenja površinskoga sloja. Na slici 3.16. možemo vidjeti proceduru dvostrukog kaljenja.



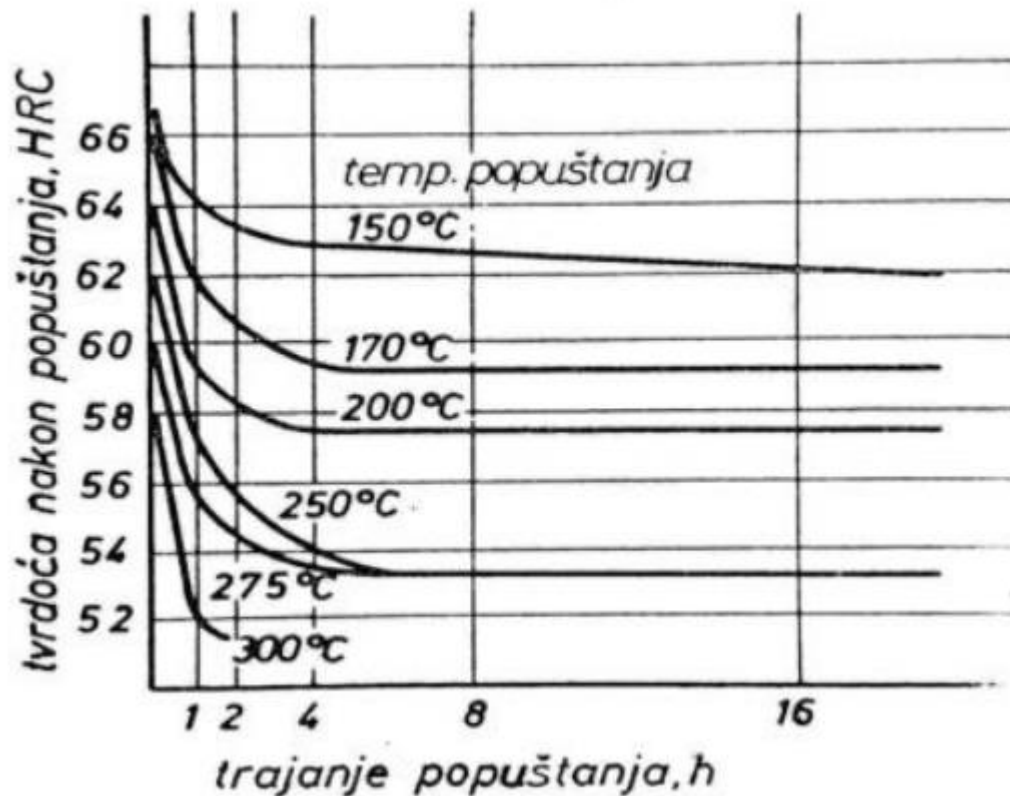
Slika 3.16. Postupak dvostrukog kaljenja

Kod direktnog, jednostrukog i dvostrukog kaljenja, za gašenje koristimo ili tople kupke ili ulje ili vodu, a to će ovisiti o dimenzijama proizvoda i o korištenome čeliku.

### 3.3. Niskotemperaturno popuštanje

Popuštanje možemo definirati kao proces zagrijavanja kaljenog čelika na određenu temperaturu ispod A1 temperature kako bismo: povisili žilavost martenzita kojeg smo dobili kaljenjem, snizili zaostala naprezanja martenzita te postigli dimenzijsku postojanost. Popuštanjem snizujemo tvrdoću koju smo dobili kaljenjem, ali to nam nije cilj već posljedica popuštanja. Niskotemperaturno popuštanje izvodimo u komornim pećima koje imaju cirkulaciju zraka ili u određenim kupkama.

Nisko temperaturno popuštanje se događa pri temperaturama između 150°C i 200°C. Postupkom niskotemperaturnog popuštanja povisujemo tvrdoću na iznos od 58-62 HRC. Kada bi koristili više temperature dolazilo bi do pojave krtosti, dinamičke izdržljivosti i manje tvrdoće. Niskotemperaturno popuštanje sa sobom nosi manju tvrdoću, promjenu mikrostrukture i pojavu krhkosti. Niskotemperaturno popuštanje ovisno je o vremenu popuštanja i temperaturi. Na slici 3.17. vidimo ovisnost tvrdoće o temperaturi i vremenu trajanja postupka.



Slika 3.17. Ovisnost tvrdoće o temperaturi i vremenu trajanja postupka

## 4. ČELICI ZA CEMENTIRANJE

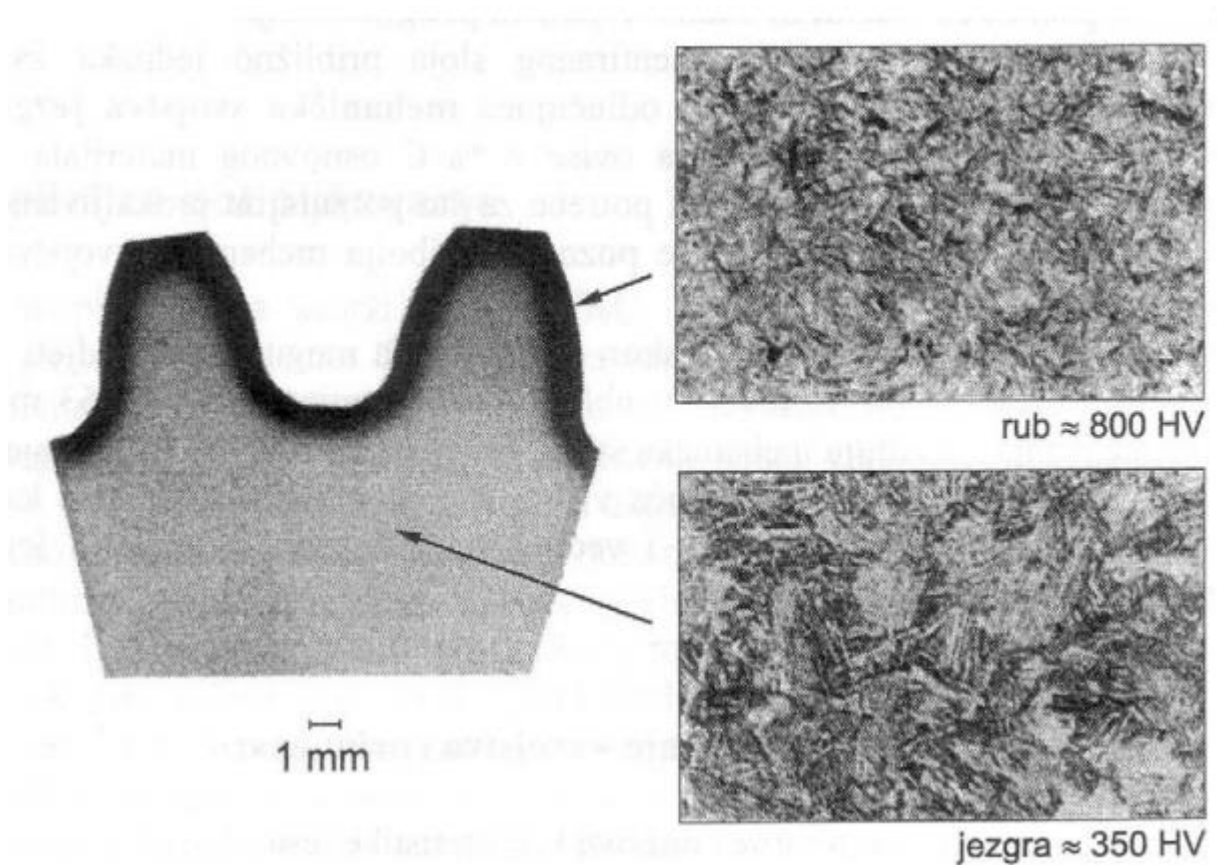
Čelici za cementiranje su konstrukcijski čelici. Nakon odvajanja čestica njihov rubni sloj se pougljičava. Zatim slijedi kaljenje kojim postizemo veću žilavost jezgre i određenu otpornost na trošenje slojeva. Prije postupka pougljičavanja konstrukcijski čelici sadrže 0,1 do 0,2% ugljika te su niskolegirani ili nelegirani. Provedbom postupka pougljičenja, rubni sloj u sebi sadrži od 0,8 do 0,9% ugljika. Tablica 4.1. prikazuje čelike koje koristimo za cementaciju.

*Tablica 4.1. Čelici koje koristimo za cementaciju*

| Oznaka čelika | Sastav „ostalo“ % | Tvrdća u isporučenom stanju, HB | Slijepo kaljeno 30mm |                    |           | Kaljenje            |               |
|---------------|-------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------|-----------|---------------------|---------------|
|               |                   |                                 | Rp 0,2, N/mm2 min    | Rm, N/mm2          | A5, % min | Jezgra, °C          | Rub, °C       |
| C10<br>C15    | -<br>-            | 90-126<br>103-140               | 295<br>355           | 490-640<br>590-790 | 16<br>14  | 880-920; voda       | -             |
| Ck10<br>Ck15  | -<br>-            | 90-126<br>103-140               | 295<br>355           | 490-640<br>590-790 | 16<br>14  | 880-920; voda       | -             |
| 15Cr3         | -                 | 118-160                         | 440                  | 690-890            | 11        | 870-900; voda, ulje | -             |
| 16MnCr5       | 1Cr               | 140-187                         | 590                  | 780-1080           | 10        | 850-880; ulje       | 810-840; ulje |
| 20MnCr5       | 1,2Cr             | 152-201                         | 685                  | 980-1280           | 7         | 850-880; ulje       | 810-840; ulje |
| 20CrMo5       | 0,25Mo<br>1,1Mn   | 152-201                         | 785                  | 1080-1380          | 7         | 850-880; ulje       | 810-840; ulje |
| 20MoCr4       | 0,4Cr             | 140-187                         | 590                  | 780-1080           | 10        | 890-920; ulje       | -             |
| 15CrNi6       | 1,5Ni             | 152-201                         | 635                  | 880-1180           | 9         | 840-870; ulje       | 800-830; ulje |
| 18CrNi8       | 2Ni               | 170-217                         | 785                  | 1180-1430; ulje    | 7         | 840-870; ulje       | 800-830; ulje |

Niskougljični čelici koji imaju 0,1 do 0,2% ugljika nisu podložni da im se tvrdoća povisi kaljenjem, stoga im se mora povećati udio ugljika na rubnim slojevima zbog povećanja otpornosti na površinsko trošenje i zakaljivanja. Udio ugljika ćemo povećati pougljičavanjem. Nakon što smo rubnim slojevima povećali udio ugljika, oni postaju zakaljivi.

Završetkom postupka cementacije jezgra će ostati feritno-perlitna ako nismo prokalili proizvod. Također završetkom cementacije naš proizvod će biti vrlo otporan na trošnje te će imati veliku žilavost. Slika 4.1. prikazuje cementirani zupčanik koji je napravljen od čelika 16MnCr5



*Slika 4.1. Mikrostruktura zupčanika napravljenog od čelika 16MnCr5 nakon cementacije*

Ukoliko koristimo legirane čelike važna nam je prokaljivost zbog toga što čelike za cementaciju nisko popuštamo te se niskougličnim martenzitom dobiva žilavost jezgre. Konstrukcijski čelici se gotovo nikad ne visoko popuštaju, ako bi se to dogodila tada bi ih smatrali niskougličnim čelicima čija je svrha poboljšanje. Ukoliko bi kombinirali pougličenje i visoko popuštanje, pougličeni rub bi nam jako omekšao pri temperaturama koje su veće od 220°C.

Čelike koje koristimo za cementiranje dijelimo na tri grupe:

- legirani plemeniti čelici
- kvalitetni čelici
- nelegirani plemeniti čelici

Kvalitetni čelici i plemeniti čelici su različiti po pitanju udjela fosfora i sumpora, po kvaliteti površina koje smo obradili, po monotonosti svojstava i po broju nemetalnih uključaka (plemeniti čelici ih imaju manje).

Plemeniti čelici se dijele na:

- čelici koji su legirani Ni-om i Cr-om
- čelici koji su legirani Mo-om i Cr-om
- čelici koji su legirani Cr-om i Mn-om
- čelici koji su jednostruko legirani Cr-om

Svrha legirajućih elemenata je da utječu na sadržaj ugljika na površini, dubinu pougljičenog sloja, brzinu pougljičavanja i prokaljivanje. Karbidotvorci nam služe da povećamo sadržaj ugljika na površinskome sloju. U karbidotvorce ubrajamo mangan, molibden, vanadij i krom.

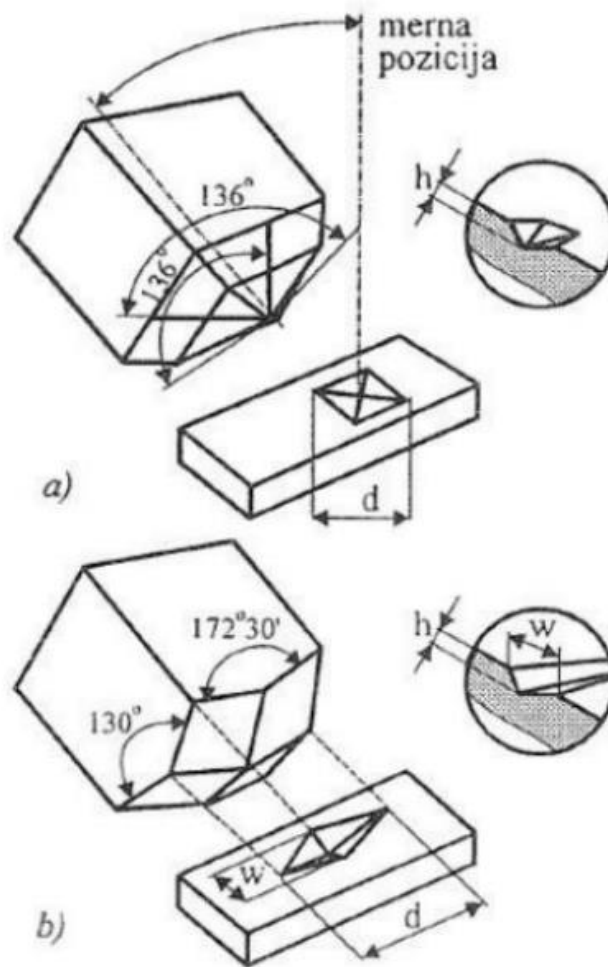
Pri odabiru čelika koji cementiramo, utvrđujemo da za obradak koji ima promjer do deset milimetara, koristiti nelegirani čeli, za obradke koji imaju promjer do osamdeset milimetara koristimo molibden-krom čelik. Za sve druge obradke koji imaju veće dimenzije koristimo krom-molibden i krom-nikal čelik.

Neke od karakteristika čelika koje koristimo za cementiranje:

- nelegirani čelici – oni su kaljivi isključivo u vodi, koristimo ih kod proizvoda manjih dimenzija i kod manjih udarnih opterećenja, ovdje ubrajamo čelike C15 ili Č.1220 i C10 ili Č.1120
- krom-čelici – otporni su na trošenje, kaljivi su u vodi, dijelove koji imaju manje dimenzije se mogu zakaliti i prokaliti u ulju, koristimo ih u automobilske industriji, ovdje ubrajamo čelik 15Cr2 ili Č.4121
- mangan-krom čelici – koristimo ih kod dijelova koji imaju srednje dimenzije, osjetiljivi su na pregrijavanje, ovdje ubrajamo čelik 15MnCr15 ili Č.4320
- molibden-krom čelici – možemo ih direktno gasiti, ovdje ubrajamo čelike 20MoCr4 ili Č7420 i 20CrMo5 ili Č.4721
- nikal-krom čelici – koristimo ih kod dijelova koji imaju velike dimenzije te u teškim uvjetima rada, također koristimo ih za izradu pužnih vijaka, koljenastih osovina i osovina zrakoplova, ovdje ubrajamo čelike 18NiCr8 ili Č.5421 i 14NiCr6 ili Č.5420

## 5. ISPITIVANJE KVALITETE CEMENTIRANOG ČELIKA

Tvrdoću možemo definirati kao otpornost nekog materijala prema prodiranju drugog tijela koje je puno tvrđe. Postupak mjerenja tvrdoće je široko primijenjen postupak ukoliko se ispituju mehanička svojstva. Pošto su površinski slojevi izuzetno tvrdi, za ispitivanje tvrdoće čelika koristit ćemo Knoop-ovu i Vickers-ovu metodu. Vickers-ovu metodu koristimo ukoliko želimo izmjeriti tvrdoću najtvrdih materijala. Kod ove metode tvrdoća ne ovisi o primijenjenoj sili. Naime, kod ove metode kao penetrator koristimo istostranu četverostranu dijamantnu piramidu koja ima kut između stranica od  $136^\circ$ . Piramida ostavlja udubljenje u obliku kvadrata te mjerimo dijagonale dobivenog kvadrata i uzimamo srednju vrijednost dijagonale “d”. Ukoliko koristimo Knoop-ovu metodu, tada nam je penetrator dijamantna piramida koja ima kut između dužih stranica od  $172^\circ$  i kut od  $130^\circ$  između kraćih stranica, baza je u obliku romba. Kod ove metode utiskujemo penetrator na poliranu površinu ispitanog materijala s poznatim opterećenjem za određeno vrijeme zadržavanja. Rezultate mjerimo mikroskopom. Na slici 5.1. možemo vidjeti oblike utiskivača kod a) Vickers-ove i b) Knoop-ove metode.



Slika 5.1. Oblici utiskivača kod Vickers-ove i Knoop-ove metode

## 6. PRIMJENA CEMENTIRANJA KOD IZRADE STROJNIH ELEMENATA

Cementiranje najviše upotrebljavamo kod izrade dijelova koji su izloženi površinskome trošenju, udarnim opterećenjima i naprezanjima zbog toga što prenose snagu i okretni moment. Neki od tih dijelova su osovina (Slika 5.2.), koljenasto vratilo (Slika 5.3.) i Zupčanici (Slika 5.4.).



*Slika 5.2. Primjer osovine*



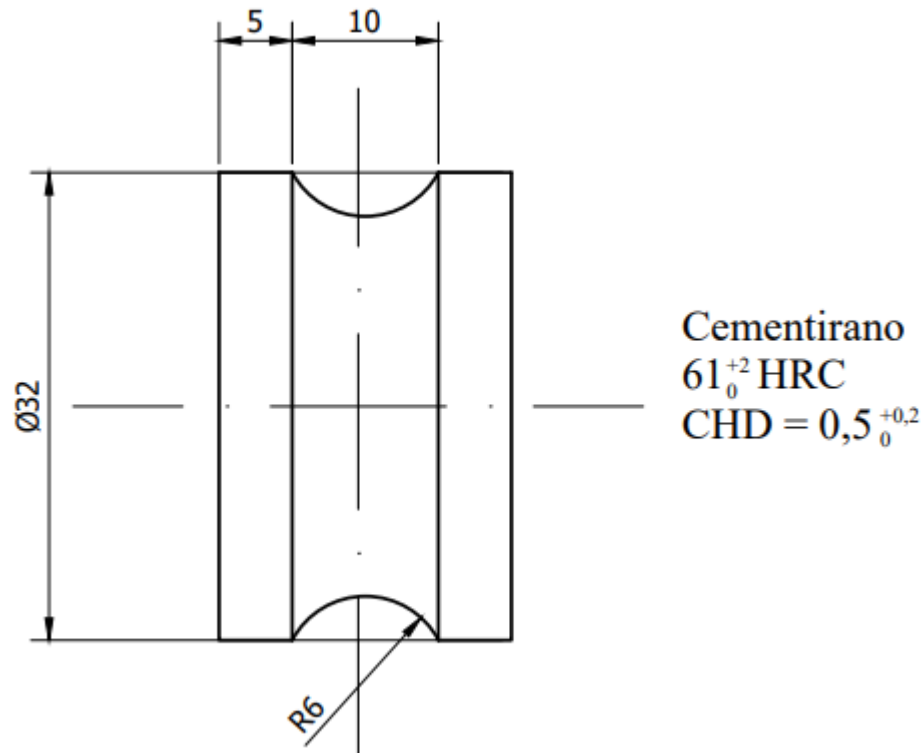
*Slika 5.3. Koljenasto vratilo*



*Slika 5.4. Zupčanici*

## 7. POSTUPAK TOPLINSKE OBRADE STROJNOG DIJELA SC.23-PT.28

U ovome dijelu završnog rada definirati ćemo postupak cementiranja za zadani strojni dio. Unaprijed nam je zadana tvrdoća površinskog sloja, njen iznos je 61 HRC i dubina pougljičenog sloja čiji je iznos 0,5 mm. Na slici 7.1. možemo vidjeti bokocrt i nacrt zadane koloture.



Slika 7.1. Nacrt strojnog dijela SC.23-PT.28

### 7.1. Materijal strojnog dijela SC.23-PT.28

SC.23-PT.28 je izrađen od 20MnCr5 (Č.4321) čelika. 20MnCr5 je nisko legirani čelik, koristimo ih kod predmete koji zahtijevaju vlačnu čvrstoću između 1000 i 1300 N/mm<sup>2</sup> te dobru otpornost na habanje. Koristimo ih i osovinama, bregastim osovinama i zupčanicima.

## 7.2. Definiranje procesa cementiranja za strojni dio SC.23-PT.28

Za zadani dio potrebno je definirati postupke cementiranja, odnosno pougljičavanje, kaljenje i niskotemperaturno popuštanje. Kako možemo vidjeti iz prethodne slike, predmet nije velikih dimenzija te ga iz tog razloga pougljičavamo u krutom sredstvu. Zatim moramo odrediti temperaturu i vrijeme na kojem ćemo držati predmet u peći. Iz formule 7.1. možemo izračunati približnu dubinu pougljičenja koja glasi:

$$\delta = K * \sqrt{t_p} \quad [\text{mm}] \quad (7.1)$$

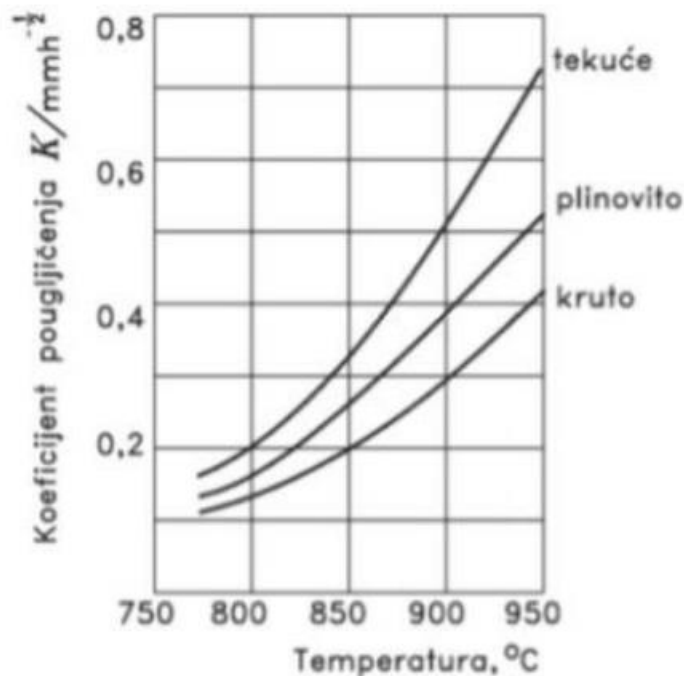
definiramo:

$\delta$  – približna dubina cementiranoga sloja [mm]

$t_p$  – vrijeme pougljičavanja [h]

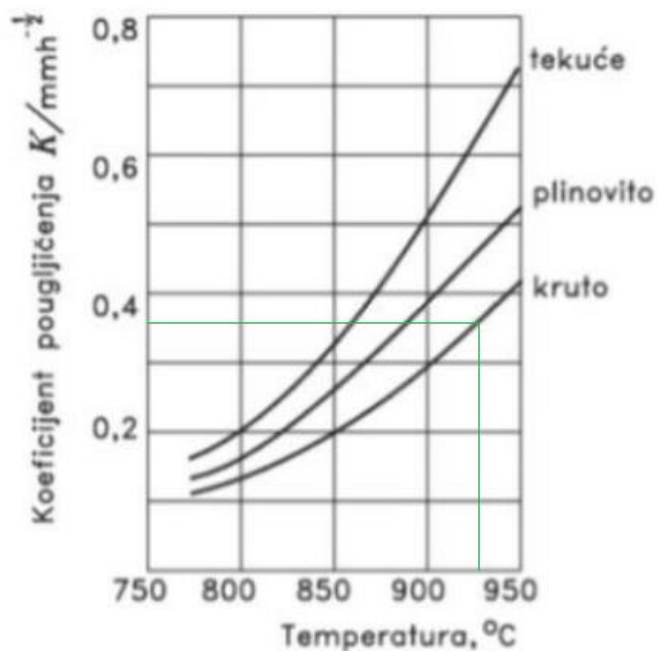
$K$  – koeficijent pougljičavanja [ $\text{mmh}^{-1/2}$ ]

$K$  nam ovisi o temperaturi pougljičavanja i o vrsti sredstva koje koristimo za pougljičavanje. To određujemo iz slike 7.2.



Slika 7.2. Ovisnost  $K$  o temperaturi i sredstvu pougljičenja

Za čelik 20MnCr5 preporučena temperatura pougljičenja iznosi između 880° i 980°. Odabrali ćemo temperaturu od 930°C. Vrijeme držanja iznosi 3 sata i 30 minuta. Ucertavanjem dobivenih podataka dobivamo K čiji je iznos 0,36 mmh<sup>-1/2</sup>. To vidimo na slici 7.3.



Slika 7.3. Određivanje koeficijenta pougljičenja

Zatim uvrštavamo sve podatke u formulu koju smo prethodno definirali (7.1.).

$$\delta = K * \sqrt{t_p} \quad [\text{mm}]$$

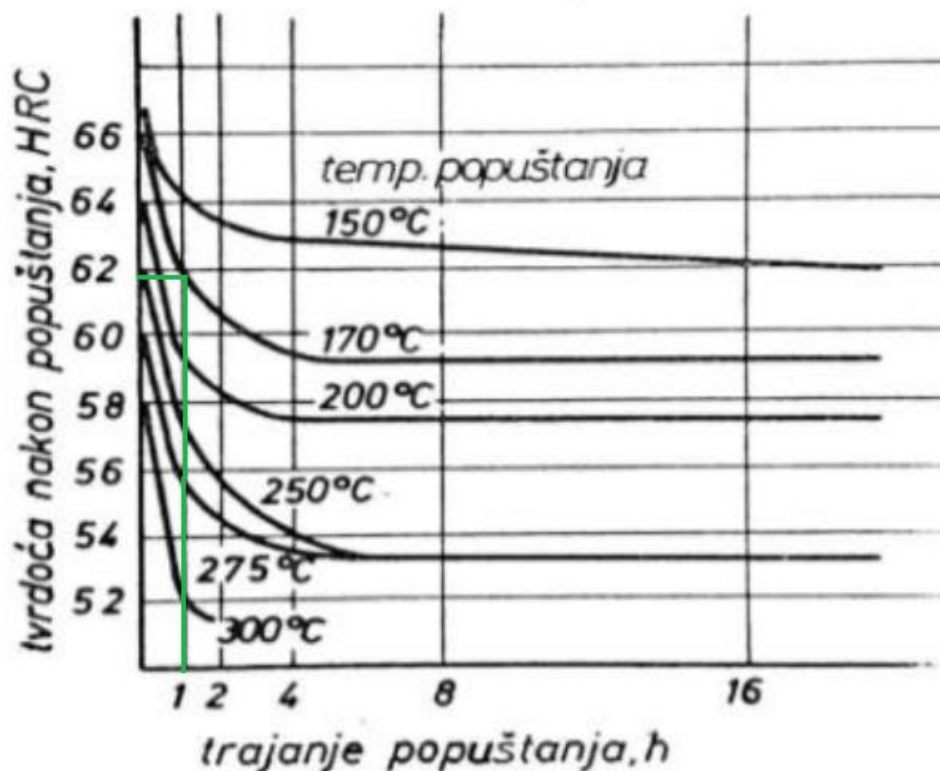
$$\delta = 0,36 * \sqrt{3,3}$$

$$\delta = 0,65 \text{ mm}$$

Dobiveni rezultat zadovoljava početni uvjet.

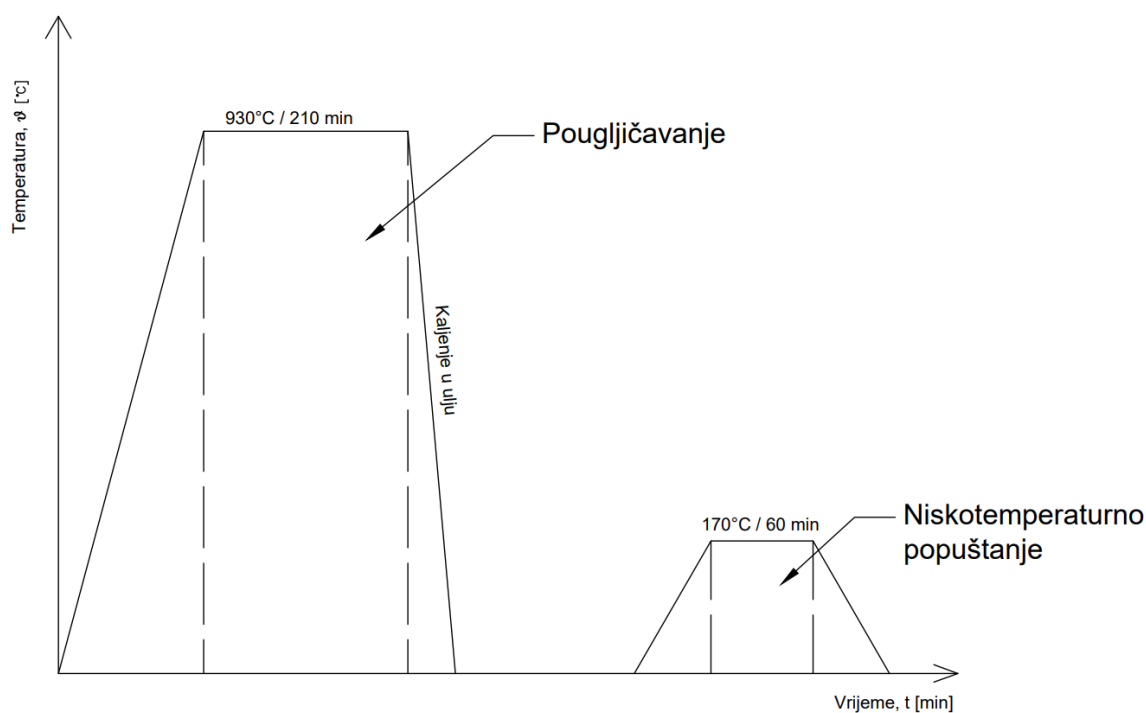
Nakon pougljičavanja, obradak vadimo iz peći zajedno sa posudom i kalimo obradak direktno u ulju.

Na kraju nam ostaje niskotemperaturno popuštanje. Kako smo prije naveli niskotemperaturno popuštanje se odvija na temperaturama između 150°C i 200°C. Odabiremo temperaturu od 170°C zbog jednostavnosti očitavanja sa grafa. Postupak niskotemperaturnog popuštanja se odvija jedan puni sat odnosno 60 minuta. Parametre ucrtavamo u graf na slici 3.17. te dobivamo da je tvrdoća približno HRC = 61,95. Time zadovoljavamo početni uvjet. Na slici 7.4. možemo vidjeti ucrtane podatke.



Slika 7.4. Postupak niskotemperaturnog popuštanja za SC.23-PT.28

Na slici 7.5. možemo vidjeti postupak cementiranja SC.23-PT.28



Slika 7.5. Grafički prikaz cementiranja SC.23-PT.28

### 7.3. Tehnološka dokumentacija

Tehnološku dokumentaciju prikazat ćemo u obliku operacijskih listova, potrebno je izraditi dva operacijska lista. Na prvome listu se nalaze podaci koje se odnose na pougljičavanje i kaljenje predmeta, a na drugome listu su podaci koji se odnose na niskotemperaturno popuštanje. Na operacijskim listovima možemo vidjeti podatke kao što su oprema i sredstva koje koristimo za postupak, temperatura i trajanje zahvata. Na tablici 7.1. vidimo operacijski list za pougljičavanje i kaljenje, a na tablici 7.2. vidimo operacijski list za niskotemperaturno popuštanje.

Tablica 7.1. Operacijski list za pougljičenje i kaljenje SC.23-PT.28

|                                               |                                       |               |                                   |                      |                           |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------|---------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------|
| Tehnički fakultet Rijeka                      |                                       |               | Izradio: Rudolf Blašković         |                      | List:<br>1                |
| Operacijski list:<br>1                        |                                       |               | Naziv dijela:<br>SC.23-PT.28      |                      | Ukupan broj listova:<br>2 |
| Naziv operacije:<br>Pougljičavanje i kaljenje |                                       |               | Materijal:<br>20MnCr5<br>(Č.4321) | Operacija broj:<br>1 |                           |
| Zahvat<br>:                                   | Opis zahvata:                         | Količina<br>: | Korišteno sredstvo ili oprema:    | T [°C]               | Trajanje [min]            |
| 1                                             | Punjenje kutije granulatom i obratkom | 1             | Kutija za pougljičenje            | -                    | 3                         |
| 2                                             | Postavljanje kutije u peć             | 1             | Ručno                             | -                    | 1                         |
| 3                                             | Pougljičenje                          | 1             | Peć                               | 930                  | 210                       |
| 4                                             | Vađenje kutije iz peći                | 1             | Ručno                             | -                    | 1                         |
| 5                                             | Gašenje                               | 1             | Ulje                              | 25                   | 1                         |
| Kontrolirao:                                  |                                       |               | Datum:                            |                      | Σ=216                     |
| Odobrio:                                      |                                       |               |                                   |                      |                           |

Tablica 7.2. Operacijski list za niskotemperaturno popuštanje SC.23-PT.28

|                                               |                            |               |                                   |                      |                           |
|-----------------------------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------|
| Tehnički fakultet Rijeka                      |                            |               | Izradio: Rudolf Blašković         |                      | List:<br>2                |
| Operacijski list:<br>2                        |                            |               | Naziv dijela:<br>SC.23-PT.28      |                      | Ukupan broj listova:<br>2 |
| Naziv operacije:<br>Pougljičavanje i kaljenje |                            |               | Materijal:<br>20MnCr5<br>(Č.4321) | Operacija broj:<br>2 |                           |
| Zahvat<br>:                                   | Opis zahvata:              | Količina<br>: | 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                              | 25                   | 60                        |
| Kontrolirao:                                  |                            |               | Datum:                            |                      | Σ=122                     |
| Odobrio:                                      |                            |               |                                   |                      |                           |

## 8. ZAKLJUČAK

Čelik je slitina željeza i ugljika (od 0,008% do 2,14%), jedan je od najzastupljenijih materijala u praksi i proizvodnji. Čelik se može podijeliti: prema postupku proizvodnje, prema kemijskom sastavu, mikrostrukтури, svojstvima namjeni i dr. Čelik ukratko možemo opisati kao metastabilnu kristaliziranu leguru željeza i ugljika popraćenu nečistoćama i dodacima legirajućih elemenata.

Cementiranje je jedan od osnovnih postupaka toplinske obrade te se koristi u širokoj primjeni. Cementiranje čelika je termokemijski postupak kojim obogaćujemo površinu nekog proizvoda ili u našem slušaju čelika ugljikom. Osnovni cilje cementiranja je da se poveća površinska čvrstoća te da žilavost jezgre bude što veća. Cementiranje se sastoji od tri osnovna postupka, to su poguljičavanje, kaljenje i niskotemperaturno popuštanje.

Poguljičavanjem povećavamo postotak ugljika na površinskim slojevima nekih proizvoda koji su prethodno imali niski sadržaj ugljika. Ukoliko gledamo na izvor ugljika, odgovarajuća sredstva za cementiranje mogu biti: cementiranje u krutim sredstvima, cementiranje u kapljevitim sredstvima, cementiranje u plinovitim sredstvima, cementiranje u vakuumu i cementiranje plazmom.

Kaljenje čelika se provodi kako bismo postigli što jednoličnije prokaljenje ili drugim riječima što jednoličniju tvrdoću po poprečnome presjeku, također svrha kaljenja je postizanje maksimalno moguće tvrdoće u ovisnosti o udjelu C-ugljika u čeliku.

Nisko temperaturno popuštanje se događa pri temperaturama između 150°C i 200°C. Postupkom niskotemperaturnog popuštanja povišujemo tvrdoću na iznos od 58-62 HRC. Kada bi koristili više temperature dolazilo bi do pojave krtosti, dinamičke izdržljivosti i manje tvrdoće. Niskotemperaturno popuštanje sa sobom nosi manju tvrdoću, promjenu mikrostrukture i pojavu krhkosti.

Budući da je površina cementiranog čelika tvrda, za potrebe mjerenja tvdroće koristimo Vickers-ovu i Knoop-ovu mezodu iz razloga što one jedine koriste piramidalni utiskivač izrađen od dijamanta.

Cementiranje najviše upotrebljavamo kod izrade dijelova koji su izloženi površinskome trošenju, udarnim opterećenjima i naprezanjima zbog toga što prenose snagu i okretni moment.

Za cementiranje SC.23-PT.28 odabrali smo niskolegirani čelik 20MnCr5 (Č.4321). Cementirali smo u granulatu ugljena te smo za kaljenje uzeli ulje. Na samo kraju obradak smo niskotemperaturno popustili na zraku čime smo smanjili zaostala naprezanja. Za ovaj postupak cementiranja napravljeni su operacijski listovi koji u sebi sadrže podatke vezane za poguljičavanje, kaljenje i niskotemperaturno popuštanje.

## LITERATURA

- [1] Stupnišek M., Cajner F.: Osnove toplinske obrade metala, FSB, Zagreb, 2001.
- [2] Krumes D.: „Površinske toplinske obrade i inženjerstvo površina“, Strojarski fakultet u Slavonskome Brodu, Slavonski Brod, 2004.
- [3] Gabrić I; Šitić S.: „Materijali II“, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [4] Smoljan B.: „Toplinska obrada čelika sivog i nodularnog lijeva“, Sveučilište u Rijeci
- [5] Božić T., Veleučilište u Karlovcu
- [6] Stjepan Kožuh: „Specijalizirani čelici“, Sisak, 2010.
- [7] Goran Haviđić: „Utjecaj pozicioniranja dijelova pri pougljičenju u krutom sredstvu na rezultate dubine pougljičenja“, Karlovac, 2018.
- [8] Lišić B.: „Termokemijski postupci“, Metalbiro Zagreb, 1981.
- [9] Novosel M.; Krumes D.; Kladarić I.: „Željezni materijali – Konstrukcijski čelici“, Strojarski fakultet u Slavonskome Brodu, Slavonski Brod, 2013.
- [10] Golubić S.: „Tehnički materijali – 1.dio: metalni materijali“, Veleučilište u Bjelovaru
- [11] Krumes D.: „Toplinska obradba“, Strojarski fakultet u Slavonskome Brodu, Slavonski Brod, 2000.
- [12] Stupnišek, M. i dr.: „Termokemijski postupci“, Metalbiro, Zagreb, 1978.
- [13] Nepoznati autor: „European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database“, s interneta [20MnCr5 / 1.7147 - SteelNumber - Chemical composition, equivalent, properties](#), 3. rujna 2023.
- [14] Wikipedija: [Cementiranje čelika – Wikipedija \(wikipedia.org\)](#), 3. rujna 2023.
- [15] Nepoznati autor: [Granulat gumowy Active Fine Powder | Maczka gumowa z recyklingu \(orzelsa.com\)](#), 3. rujna 2023.
- [16] Nepoznati autor: [Guide to Heat Treating | #1 Guide for the manufacturing industry \(wisconsinmetaltch.com\)](#), 3. rujna 2023.
- [17] Nepoznati autor: [The Effect of Microstructure on Stress-Strain Behaviour and Susceptibility to Cracking of Pipeline Steels \(hindawi.com\)](#), 3. rujna 2023.
- [18] Nepoznati autor: [Iron Carbide \(uni-kiel.de\)](#), 3. rujna 2023.
- [19] Nepoznati autor: [Cementite \(threeplanes.net\)](#), 3. rujna 2023.

[20] [Microstructure of the pearlite steel \(SEM picture\) | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#), 3. rujna 2023.

## POPIS SLIKA

|                                                                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Slika 2.1.- Fazni Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram.....</i>                                                                       | <i>2</i>  |
| <i>Slika 2.2.- α-rešetka ferita.....</i>                                                                                        | <i>3</i>  |
| <i>Slika 2.3.- Prikaz mikrostrukture ferita.....</i>                                                                            | <i>3</i>  |
| <i>Slika 2.4.- Kristalna rešetka cementita.....</i>                                                                             | <i>3</i>  |
| <i>Slika 2.5.- Mikrostruktura cementita.....</i>                                                                                | <i>4</i>  |
| <i>Slika 2.6. Mikrostruktura perlita.....</i>                                                                                   | <i>4</i>  |
| <i>Slika 2.7.- γ-rešetka austenita.....</i>                                                                                     | <i>5</i>  |
| <i>Slika 2.8.- Mikrostruktura austenita.....</i>                                                                                | <i>5</i>  |
| <i>Slika 2.9. Dijagram izotermičke tvorbe austenita.....</i>                                                                    | <i>6</i>  |
| <i>Slika 2.10.- Promjena veličine kristalnog zrna austenita ovisno o temperature.....</i>                                       | <i>7</i>  |
| <i>Slika 2.11.- Koncept kontinuiranog ohlađivanja austenitiziranog podeutektoidnog ugljičnog čelika..</i>                       | <i>7</i>  |
| <i>Slika 2.12.- Stvaranje lamela ferita i lamela cementita iz austenita.....</i>                                                | <i>8</i>  |
| <i>Slika 2.13.- Pretvorba austenita u perlit.....</i>                                                                           | <i>8</i>  |
| <i>Slika 2.14.- Tetragonalna martenzitna kristalna rešetka.....</i>                                                             | <i>9</i>  |
| <i>Slika 2.15.- Učinak koncentracije ugljika na temperature martenzitne pretvorbe kod ugljičnih čelika.....</i>                 | <i>10</i> |
| <i>Slika 2.16.- Martenzitna struktura.....</i>                                                                                  | <i>10</i> |
| <i>Slika 2.17.- Prikaz područja bainitne pretvorbe.....</i>                                                                     | <i>11</i> |
| <i>Slika 2.18.- Prikaz pretvorbe austenita u bainit.....</i>                                                                    | <i>12</i> |
| <i>Slika 3.1.- Koncept postupka cementiranja čelika.....</i>                                                                    | <i>13</i> |
| <i>Slika 3.2.- Prikaz postupka pougljičavanja.....</i>                                                                          | <i>14</i> |
| <i>Slika 3.3.- Grafički prikaz utjecaja vremena držanja izratka na dubini pougljičenog sloj za sredstva pougljičavanja.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Slika 3.4.- Upliv temperature na dubinu pougljičenog sloja 20MnCr5.....</i>                                                  | <i>16</i> |
| <i>Slika 3.5.- Upliv trajanja postupka na dubinu pougljičavanja.....</i>                                                        | <i>17</i> |
| <i>Slika 3.6.- Granulat za pougljičavanje.....</i>                                                                              | <i>18</i> |
| <i>Slika 3.7.- Utjecaj vremena i temperature na dubinu pougljičenja.....</i>                                                    | <i>19</i> |
| <i>Slika 3.8.- Obradci u kutiji za pougljičavanje.....</i>                                                                      | <i>20</i> |

|                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Slika 3.9.- Grafički prikaz pougljičavanja u krutome sredstvu.....</i>                         | <i>20</i> |
| <i>Slika 3.10.- Grafički prikaz postizivih dubina pougljičenja.....</i>                           | <i>23</i> |
| <i>Slika 3.11.- Grafički prikaz kaljenja podeutektoidnog čelika.....</i>                          | <i>28</i> |
| <i>Slika 3.12.- Mikrostrukture u slojevima pougljičenog čelika.....</i>                           | <i>29</i> |
| <i>Slika 3.13.- Postupak direktnog kaljenja.....</i>                                              | <i>29</i> |
| <i>Slika 3.14.- Postupak jednostrukog kaljenja.....</i>                                           | <i>30</i> |
| <i>Slika 3.15.- Postupka jednostrukog kaljenja nakon izotermičke pretvorbe.....</i>               | <i>30</i> |
| <i>Slika 3.16.- Postupak dvostrukog kaljenja.....</i>                                             | <i>31</i> |
| <i>Slika 3.17.- Ovisnost tvrdoće o temperaturi i vremenu trajanja postupka.....</i>               | <i>32</i> |
| <i>Slika 4.1.- Mikrostruktura zupčanika napravljenog od čelika 16MnCr5 nakon cementacije.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Slika 5.1.- Oblici utiskivača kod Vickers-ove i Knoop-ove metode.....</i>                      | <i>36</i> |
| <i>Slika 5.2.- Primjer osovine.....</i>                                                           | <i>37</i> |
| <i>Slika 5.3.- Koljenasto vratilo.....</i>                                                        | <i>37</i> |
| <i>Slika 5.4.- Zupčanici.....</i>                                                                 | <i>37</i> |
| <i>Slika 7.1.- Nacrt strojnog dijela SC.23-PT.28.....</i>                                         | <i>38</i> |
| <i>Slika 7.2.- Ovisnost K o temperaturi i sredstvu pougljičenja.....</i>                          | <i>40</i> |
| <i>Slika 7.3.- Određivanje koeficijenta pougljičenja.....</i>                                     | <i>40</i> |
| <i>Slika 7.4.- Postupak niskotemperaturnog popuštanja za SC.23-PT.28.....</i>                     | <i>41</i> |
| <i>Slika 7.5.- Grafički prikaz cementiranja SC.23-PT.28.....</i>                                  | <i>42</i> |

## **POPIS TABLICA**

|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tablica 3.1.- Trajanje držanja čelične folije s 0,1%C u solnoj kupki.....</i>       | <i>24</i> |
| <i>Tablica 4.1.- Čelici koje koristimo za cementaciju.....</i>                         | <i>33</i> |
| <i>Tablica 7.1.- Operacijski list za pougljičenje i kaljenje SC.23-PT.28.....</i>      | <i>43</i> |
| <i>Tablica 7.2.- Operacijski list za niskotemperaturno popuštanje SC.23-PT.28.....</i> | <i>44</i> |

## SAŽETAK

U ovom završnom radu prikazana je toplinska obrada cementiranja strojnog dijela SC.23-PT.28. U teorijskom dijelu su opisane osnovne fazne pretvorbe čelika koje je potrebno znati kako bismo bolje razumjeli sami postupak cementiranja, također opisani su i objašnjeni koraci cementiranja. U praktičnome dijelu je opisan proces cementiranja SC.23-PT.28 prema zadanim podacima.

Ključne riječi: cementiranje, čelik, pougljičavanje, kaljenje, popuštanje, toplinska obrada, fazne pretvorbe

## SUMMARY

This undergrad thesis shows the heat treatment of the cementation of machine part SC.23-PT.28. In the theoretical part, the basic phase transformations of steel are described, which you need to know in order to better understand the cementation process itself, and the steps of cementation are also described and explained. In the practical part, the process of cementing SC.23-PT.28 according to the given data is extensive.

Key words: cementation, steel, carburizing, hardening, tempering, heat treatment, phase transformations