

# Postupak toplinske obrade strojnog dijela NJ.22-PT.41

---

Jukić, Nino

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:190:018528>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-17**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA NJ.22 –  
PT.41**

Rijeka, rujanj 2022.

Nino Jukić

0069083762

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA NJ.22 –  
PT.41**

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

Rijeka, rujan 2022.

Nino Jukić

0069083762

Rijeka, 16. ožujka 2022.

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

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Nino Jukić (0069083762)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Postupak toplinske obrade strojnog dijela NJ.22-PT.41 / Heat treating process of workpiece NJ.22-PT.41**

### Opis zadatka:

Potrebno je definirati proces toplinske obrade te opisati postrojenje za toplinsku obradu strojnog dijela NJ 22-PT 41. Potrebno je proanalizirati rezultate toplinske obrade i donijeti odgovarajuće zaključke. Nadalje, potrebno je proanalizirati proces toplinske obrade strojnog dijela NJ 22-PT 41. Potrebno je teorijski opisati postupak i sve promjene u mikrostrukturni koje nastaju pri odabranom postupku toplinske obrade. Potrebno je opisati metode određivanja parametara toplinske obrade te pretkazivanja rezultata toplinske obrade.

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



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Dario Iljkić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit.



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad „Postupak toplinske obrade strojnog dijela NJ.22 – PT.41“ prema dodijeljenom zadatku. Rad je izrađen korištenjem stečenog znanja na preddiplomskom studiju strojarstva, u sklopu kolegija „Postupci toplinske obrade“ pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Daria Iljkića. Uz stečeno znanje, korištena je i literatura čiji su izvori navedeni u radu.

Nino Jukić

---

## *Zahvala*

*Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Dariu Iljkiću na pruženoj pomoći, prenesenom znanju i ukazanom povjerenju pri izradi završnog rada.*

*Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima i prijateljima na pruženoj podršci tokom studiranja.*

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. ČELIK .....	2
2.1. Čelici općenito .....	2
2.2. Mikrostrukture čelika .....	2
2.3. Fazne pretvorbe u čeliku.....	7
2.3.1. Stvaranje i raspadanje austenita .....	9
2.3.2. Transformacija austenita u perlit .....	9
2.3.3. Transformacija austenita u martenzit.....	9
2.3.4. Transformacija austenita u bainit.....	10
3. CEMENTIRANJE ČELIKA .....	11
3.1. Pougličavanje .....	12
3.1.1. Pougličavanje u krutom sredstvu .....	14
3.1.2. Pougličavanje u kapljevitom sredstvu .....	16
3.1.3. Pougličavanje u plinovitom sredstvu.....	18
3.1.4. Pougličavanje u vakuumu .....	19
3.1.5. Pougličavanje plazmom.....	20
3.2. Kaljenje.....	22
3.2.1. Jednostruko kaljenje.....	23
3.2.2. Dvostruko kaljenje .....	25
3.2.3. Direktno kaljenje.....	26
3.3. Niskotemperaturno popuštanje .....	26
4. Čelici za cementiranje .....	28
5. Ispitivanje kvalitete cementiranog čelika .....	30
5.1. Ispitivanje dubine cementiranog sloja .....	30
6. Postupak toplinske obrade strojnog dijela NJ.22-PT.41.....	31
6.1. Materijal strojnog dijela NJ.22-PT.41 .....	31
6.2. Definiranje procesa cementiranja za strojni dio NJ.22-PT.41 .....	32
6.3. Tehnološka dokumentacija projekta cementiranja .....	35
7. Zaključak.....	38
LITERATURA.....	39
POPIS SLIKA .....	41
POPIS TABLICA.....	43
SAŽETAK.....	44





## 1. UVOD

Materijali koji nalaze primjenu u praksi biraju se na osnovu njihovih svojstava. U većini slučajeva materijal u izvornom stanju nema željena svojstva pa se moraju primjeniti određeni postupci kako bi postigli zadovoljavajuće kriterije.

Toplinska obrada je postupak u kojem se obradak namjerno podvrgava temperaturno-vremenskim ciklusima kako bi se postigla željena mikrostruktura, time i željena (mehanička, fizička i kemijska) svojstva.

U praksi se postupci toplinske obrade najviše primjenjuju na čelicima. Koriste se u svrhu poboljšanja njihovih mehaničkih svojstava. Ovakvi postupci nam omogućavaju da tražena svojstva skupljih i kvalitetnijih metala, dobijemo od jeftinijih materijala. Uz samu toplinsku obradu, u svrhu postizanja boljih svojstava, postoji i mogućnost obogaćivanja površinskog sloja čelika kemijskim elementima poput ugljika, dušika ili bora. Obogaćivanje površinskog sloja čelika ugljikom vrši se u svrhu poboljšavanja tvrdoće površinskog sloja te povećanja njegove otpornosti na trošenje uz zadržavanje žilavosti jezgre. Takav obradak posebno je pogodan za strojne dijelove jer se kod njih pojavljuju velika dinamička opterećenja.

Obogaćivanje površinskog sloja ugljikom naziva se cementiranje. Taj postupak je ujedno i tema ovog rada koji se sastoji od teorijskog i praktičnog dijela. U teorijskom dijelu su opisane osnove postupaka toplinske obrade te je detaljnije opisan postupak cementiranja čelika dok se u praktičnom dijelu prikazuje rješavanje zadatka u kojem je zadana problematika cementiranja strojnog dijela NJ.22 – PT.41.

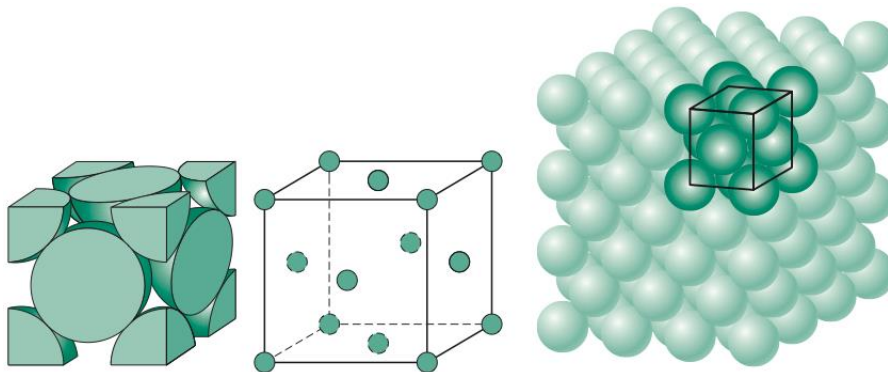
## 2. ČELIK

### 2.1. Čelici općenito

Čelik je najzastupljeniji tehnički materijal u proizvodnji i primjeni. Procjenjuje se da proizvodnja čelika iznosi oko 65% od ukupnih proizvedenih tehničkih materijala godišnje. Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza (Fe) i ugljika (C), uz prisutne razne pratioce i nečistoće te uz dodatak jednog ili više legirajućih elemenata. Svaki od ovih elemenata različito će utjecati na mehanička i fizička svojstva čelika. Čelici i čelični lijevovi sadrže do približno 2% ugljika, dok se legure sa više od 2% ugljika svrstavaju u željezne lijevove.

### 2.2. Mikrostrukture čelika

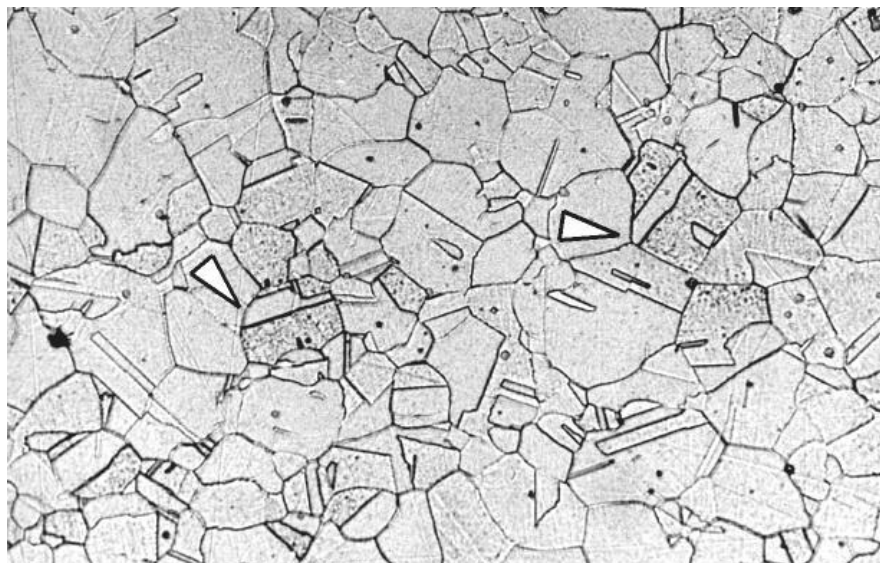
Austenit ( $\gamma$  - željezo) je alotropska modifikacija željezova karbida ili ugljika u željezu. Atomi željeza u austenitu čine strukturu plošno centrirane kubične kristalne rešetke (FCC) koja je prikazana na slici 2.1. Austenit je uglavnom prisutan u slitini željezova karbida između temperature od 723 °C i 1500 °C ovisno o udjelu ugljika u slitini. Stabilan je na temperaturama u području od 911 °C do 1392 °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 2.1. – Plošno centrirana kubična rešetka [1]

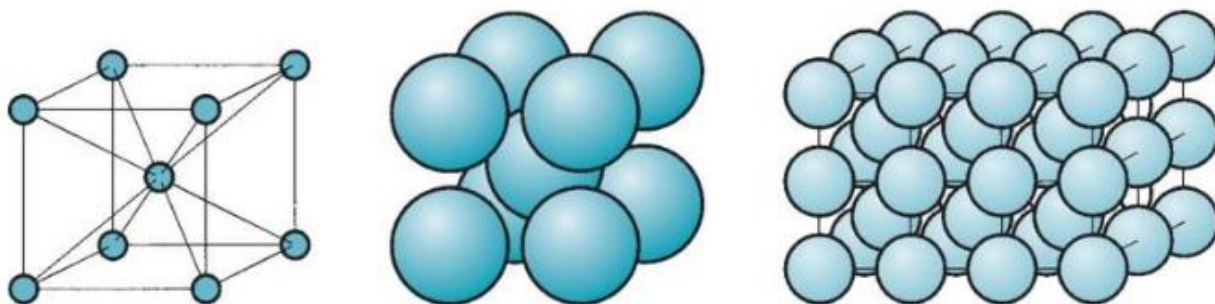
Ovakav izgled kristalne rešetke omogućava relativno visok sadržaj ugljika te tako maksimalna topivost ugljika iznosi 2,06% pri temperaturi od 1147 °C. Postoji mogućnost stabiliziranja austenita i na sobnoj temperaturi uz dodavanje elemenata poput nikla (Ni) i mangana (Mn). Uz dodatak navedenih elemenata i elementa kroma (Cr) i ponekad dušika (N), često se nalazi u raznim legurama koje se koriste kao nehrđajući čelici. Na sobnoj temperaturi se može pojaviti i u

obliku zaostalog austenita. U takvom obliku pojavljuje se nakon kaljenja, ali njegova pojava je nepoželjna te ga se u takvom obliku treba što je više moguće reducirati. Austenit ima zrnatu mikrostrukturu prikazanu na slici 2.2. [2]



*Slika 2.2. – Mikrostruktura austenita*

Ferit ( $\alpha$  - željezo) je alotropska modifikacija željeza koja posjeduje feromagnetska svojstva. Atomi u feritu čine oblik volumno centrirane kubične kristalne rešetke (BCC) koja je prikazana na slici 2.3. Ovakva struktura kristalne rešetke postojana je na temperaturama do 912 °C.

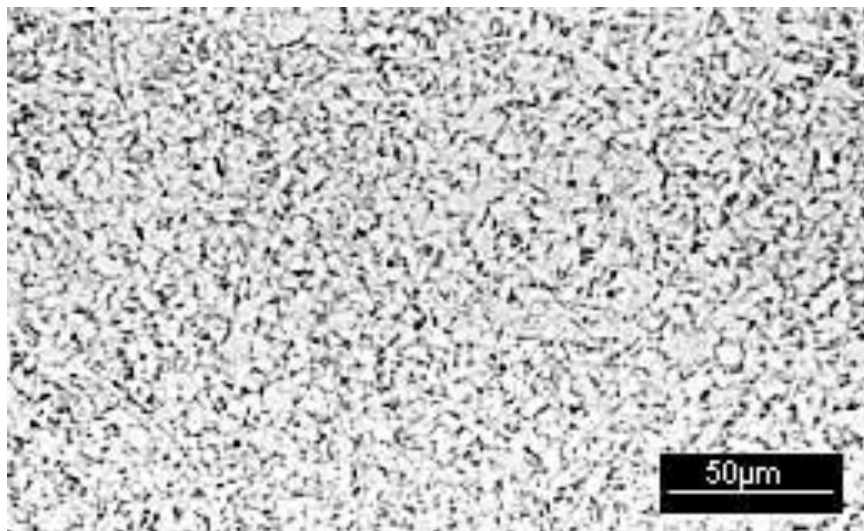


*Slika 2.3. – Volumno centrirana kubična rešetka (BCC)*

Zbog strukture slaganja kristalne rešetke u feritu, udio ugljika koji se može otopiti je znatno manji nego kod drugačijeg oblika kristalne rešetke (npr. FCC). Volumen ferita i njegova duktilnost su veće nego kod drugih alotropskih modifikacija željeza. [3]

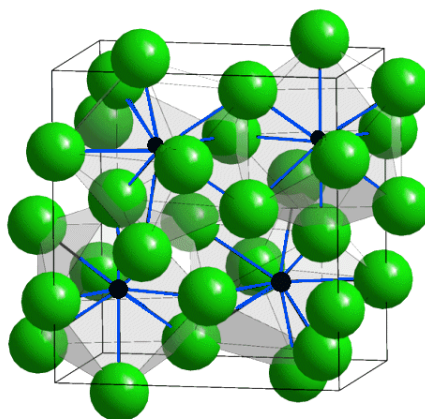
Maksimalna topivost ugljika u feritu iznosi samo 0,02% pri temperaturi od 727°C dok će pri sobnoj temperaturi topivost ugljika iznositi samo 0,008%. Udio ferita u krajnjem proizvodu

ovisiti će o procesu hlađenja. Kako ferit sadrži jako mali udio ugljika, ima veliku ulogu u tvorbi niskougljičnih čelika koji su osnovna stavka prilikom procesa cementiranja čelika. Mikrostruktura ferita prikazana je na slici 2.4.



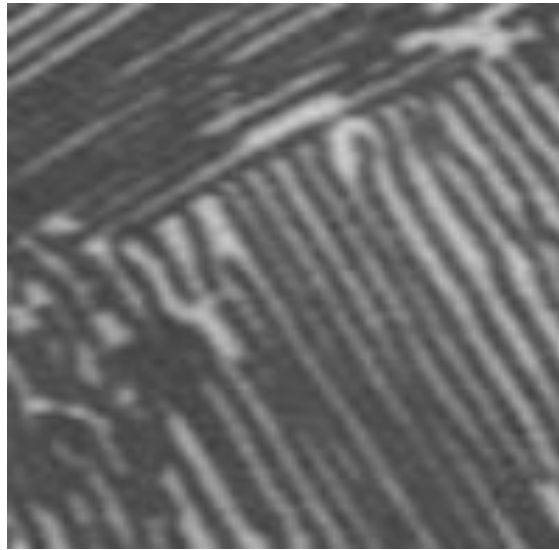
*Slika 2.4. – Mikrostruktura ferita [4]*

Cementit je metastabilan intersticijski spoj željeza i ugljika koji u svome sastavu sadrži 6,67% masenog udijela ugljika. Ima feromagnetična svojstva do temperature od 207°C, a nakon toga počinje se ponašati kao paramagnetičan materijal. Zbog visokog udjela ugljika ima izrazitu tvrdoću i vrlo je krhak. U samostalnom obliku karakterizira se kao keramika. Kristalnu strukturu cementita čine poliedri koji u centru imaju atom ugljika dok se na njega vežu atomi željeza. To je vidljivo na slici 2.5. gdje crni atomi predstavljaju atome ugljika dok su zelenom bojom prikazani atomi željeza.



*Slika 2.5. – Kristalna rešetka cementita [5]*

Čisti cementit je kao samostalan u praksi neupotrebljiv, ali je jako koristan kao element koji služi za ojačanje čelika. Cementit ima lamelastu mikrostrukturu prikazanu na slici 2.6.



*Slika 2.6. – Mikrostruktura cementita [2]*

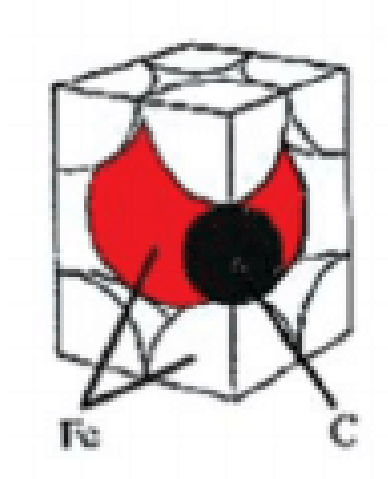
Perlit je eutektoidna mješavina koja se sastoji od približno 88% ferita i oko 12% cementita. Perlit se formira tokom sporog ohlađivanja čelika. Perlitna struktura pojavljuje se na temperaturama između 723°C i 1150°C. Pojava perlitne strukture na određenoj temperaturi definirana je u ovisnosti od sastava čelika. Perlitna struktura formira se zbog eutektoidne dekompozicije austenita u kojem se tokom hlađenja dešava difuzija ugljikovih atoma. Ovakvim ohlađivanjem nastaje lamelasta mikrostruktura složena od ferita i cementita kao što je prikazano na slici 2.7.



*Slika 2.7. – Mikrostruktura perlita [6]*

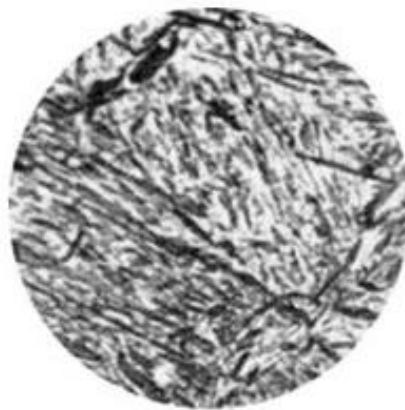
Martenzit je kruta otopina čelika sa visokim udjelom ugljika. Nastaje uslijed jako brzog ohlađivanja austenita na sobnu temperaturu (proces kaljenja čelika). Pojava martenzita uglavnom se dešava prilikom procesa kaljenja austenita. Zbog velike brzine ohlađivanja izostaje difuzija atoma u materijalu pa tako kristalna rešetka zadržava izgled volumno centrirane kubične rešetke

(BCC). U slučajevima kada se događa brzo ohlađivanje čelika s visokim udjelom ugljika, proces difuzije se počinje odvijati, ali ne i dovršiti pa tako martenzit može imati i tetraeagonalnu prostornu centriranu kristalnu rešetku (BCT) što je prikazano na slici 2.8.



*Slika 2.8. - Tetraeagonalna prostorno centrirana kristalna rešetka (BCT) [7]*

Najznačajnija svojstva martenzita su njegova visoka tvrdoća, ali i jako izražena krhkost. Martenzit ima igličastu mikrostrukturu prikazanu na slici 2.9.



*Slika 2.9. – Mikrostruktura martenzita [8]*

Bainit se formira prilikom procesa ohlađivanja čelika na temperaturu između temperature stvaranja perlita i temperature stvaranja martenzita. Bainitna mikrostruktura se kao i perlitna sastoji od ferita i cementita, ali je različita od perlitne. Bainit ima veću tvrdoću i čvrstoću od perlita. Kako je difuzija ugljikovih atoma na ovoj temperaturi vrlo malena, ne stvaraju se listići



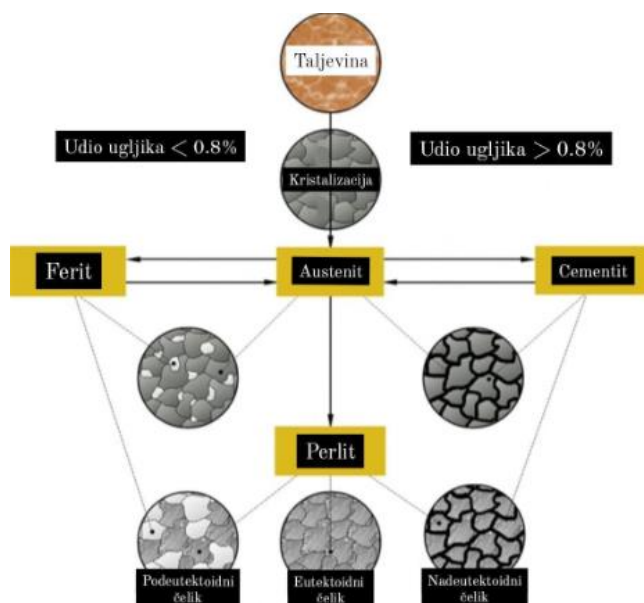
cementita već samo listići ferita na čijim se granicama pojavljuje cementit u obliku sitnih čestica. Bainit ima mikrostrukturu sličnu martenzitnoj prikazanu na slici 2.10.



*Slika 2.10. – Mikrostruktura bainita [9]*

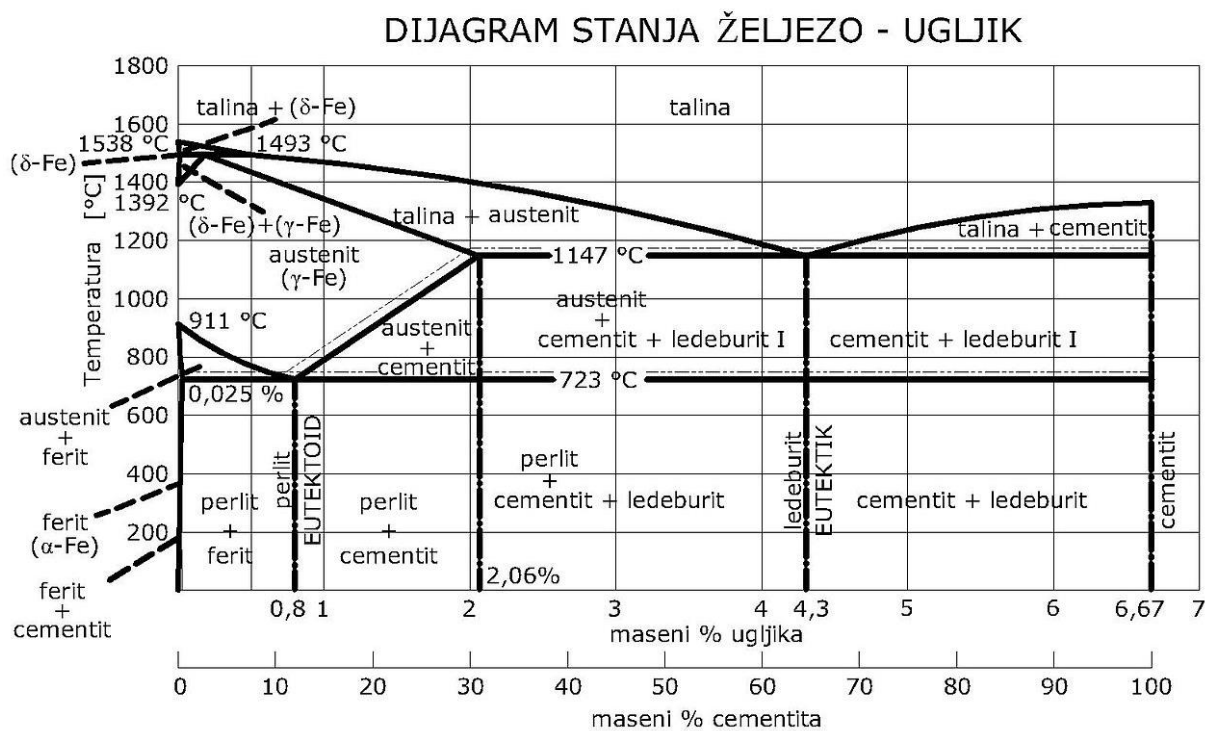
### **2.3. Fazne pretvorbe u čeliku**

Mehanička svojstva čelika ovisiti će o njegovoj mikrostrukturi. Na mikrostrukturu čelika će utjecati legirajući elementi, udio ugljika, nečistoće, postupci toplinske obrade, postupcima oblikovanja itd. Za uspješno vođenje postupaka toplinske obrade i poznavanje mikrostrukture čelika potrebno je poznavati fazne pretvorbe u čeliku. Uglavnom se promatra tvorba austenita, a zatim njegova transformacija u perlit, martenzit i bainit. Slika 2.11. predstavlja jednostavni prikaz faznih pretvorbi u čeliku.



Slika 2.11. – Pojednostavljeni prikaz faznih pretvorbi čelika [10]

Za detaljnije poznavanje faznih pretvorbi potrebno je poznavati Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram. Na Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagramu se mogu pronaći karakteristična područja faza te kritične temperature prekrystalizacije. Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram prikazan je na slici 2.12. Na svojoj ordinati ima prikazanu temperaturnu skalu dok je na apscisi označen maseni udio ugljika.



Slika 2.12. - Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram [11]



### 2.3.1. Stvaranje i raspadanje austenita

Promatranjem Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagrama sa slike 2.12. može se uočiti da se prilikom otapanja čistog željeza te njegovim sporim hlađenjem, u trenutku kada ono postiže temperaturu od 1538°C počinje skrućivati. Na toj temperaturi nastaje tzv. delta željezo ( $\delta$ -Fe). Delta željezo je nemagnetično te ima volumno centriranu kubičnu strukturu (BCC). Takvu strukturu zadržava sve dok mu se temperatura ne spusti na temperaturu od 1392°C. Na 1392°C kristalna rešetka se počinje transformirati iz volumno centrirane kubične rešetke (BCC) u plošno centriranu kubičnu rešetku (FCC). Željezo s plošno centriranom kubičnom rešetkom naziva se austenit ( $\gamma$ -Fe). Austenit će biti stabilan na području od 1392°C do 911°C. Nakon hlađenja ispod temperature od 911°C počinje raspad austenita te njegov prijelaz u ferit ( $\alpha$ -Fe).

### 2.3.2. Transformacija austenita u perlit

Proces nastanka perlita započet će eutektoidnom reakcijom sporog hlađenja austenita ispod temperature od 723°C. Pri takvoj transformaciji dolazi do potpune difuzije metalnih i nemetalnih atoma, odnosno potpune difuzije atoma željeza i atoma ugljika. Uvjeti koji su potrebni za transformaciju austenita u perlit su omogućena dovoljna difuzija atoma te dovoljno velika razlika između zrna austenita i perlita. Atomi ugljika se povezuju sa atomima željeza u kemijski intermetalni spoj (cementit). Cementit se stvara na granici zrna austenita te počinje rasti. Rast cementita je omogućen zbog difuzije atoma ugljika iz austenitnih zrna. U trenutku kada se austenitna zrna dovoljno osiromaše ugljikom, ona se počinju pretvarati u ferit. Tako dolazi do stvaranja lamela ferita i cementita koje čine perlitnu strukturu.

### 2.3.3. Transformacija austenita u martenzit

Za razliku od perlita, martenzitna struktura nastaje brzim hlađenjem austenita. Takva transformacija je bezdifuzijski proces. To znači da neće doći do promjene u kemijskom sastavu jer nema difuzije ugljika. Za točno određivanje početne i završne temperature martenzitne transformacije, potrebno je poznavati sadržaj ugljika u čeliku. Što je sadržaj ugljika u čeliku manji to će biti potrebna viša temperatura. Martenzitna struktura vezana je uz kaljene čelike koji se dobivaju procesom naglog hlađenja austenitiziranog čelika.

#### 2.3.4. Transformacija austenita u bainit

Bainitna mikrostruktura sastoji se od ferita i cementita. Ovakva transformacija je karakteristična zbog kombinacije difuzijske transformacije perlita i bezdifuzijske transformacije martenzita zbog čega ju se naziva i međufaznom transformacijom. Bainitna transformacija događa se prilikom hlađenja čelika brzinom između donje i gornje kritične brzine hlađenja na nižim temperaturama, odnosno između temperature stvaranja perlita. Brzina difuzije atoma ugljika na tim temperaturama vrlo je mala te se zbog toga atomi ne mogu pomicati na veće udaljenosti i stvoriti listiće cementita. Zbog toga umjesto nastajanja listića ferita i cementita, nastaju samo listići ferita na čijim se granicama počinje stvarati cementit u obliku sitnih kuglastih čestica.

### 3.CEMENTIRANJE ČELIKA

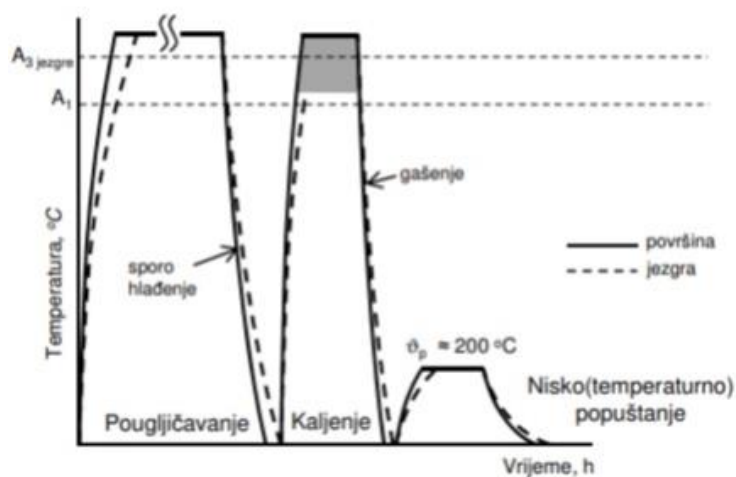
Cementiranje čelika je proces koji spada u postupke toplinske obrade čelika. Proces cementiranja svrstava se u kemijsko – difuzijske postupke toplinske obrade čelika. Cilj ovog procesa je povećati čvrstoću površine čelika i zadržati žilavost jezgre. Otvrđivanje površine vrši se na način da se površina čelika obogati ugljikom. Na visokim temperaturama događa se adsorpcija ugljikovih atoma u površinu čelika te zatim slijedi njihova difuzija kroz površinski sloj čelika. Na ovaj način 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 osovina, vratila i zupčanika, neki od dijelova prikazani su na slici 3.1. Čelici koji se upotrebljavaju za proces cementiranja su niskougljični i niskolegirani konstrukcijski čelici.



*Slika 3.1. - Zupčanici stroja izrađeni od cementiranog čelika [12]*

Proces cementiranja čelika može se podijeliti na tri postupka. Prvi postupak je pougljičavanje 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. Postupak kaljenja provodi se u svrhu dovođenja površinskog sloja obogaćenog ugljikom u čvrstu

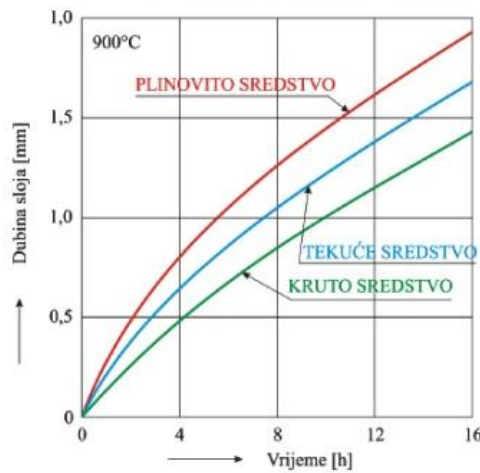
martenzitnu strukturu. Posljednji postupak je niskotemperaturno popuštanje. Kod niskotemperaturnog popuštanja se čelik ponovno zagrijava, ali na puno niže temperature nego prilikom prvog koraka procesa. Takav postupak se provodi kako bi se smanjila zaostala naprezanja u materijalu i povećanja duktilnosti. Proces cementiranja čelika se može prikazati i grafički kao na dijagramu sa slike 3.2.



Slika 3.2. – Grafički prikaz procesa cementiranja čelika [13]

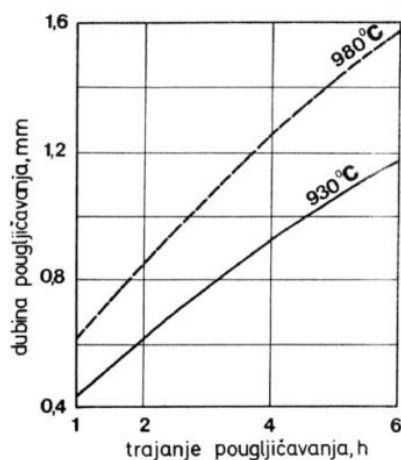
### 3.1. Pougljičavanje

Prethodno je već utvrđeno da je pougljičavanje prvi od tri koraka procesa cementiranja čelika. Prilikom postupka pougljičavanja, niskolegirani čelik ili čelik sa niskim sadržajem ugljika, zagrijava se na temperaturu od 850 °C do 1000 °C. Tokom zagrijavanja, čelik se izlaže tvarima koje sadrže ugljik. Postoji pet različitih načina s obzirom na izvor ugljika: cementiranje u krutim sredstvima, cementiranje u kapljevitim sredstvima, cementiranje u plinovitim sredstvima, cementiranje u vakuumu te cementiranje plazmom. Na slici 3.3. grafički je prikazan utjecaj sredstva u kojem se vrši postupak pougljičavanja na dubinu pougljičenog sloja.



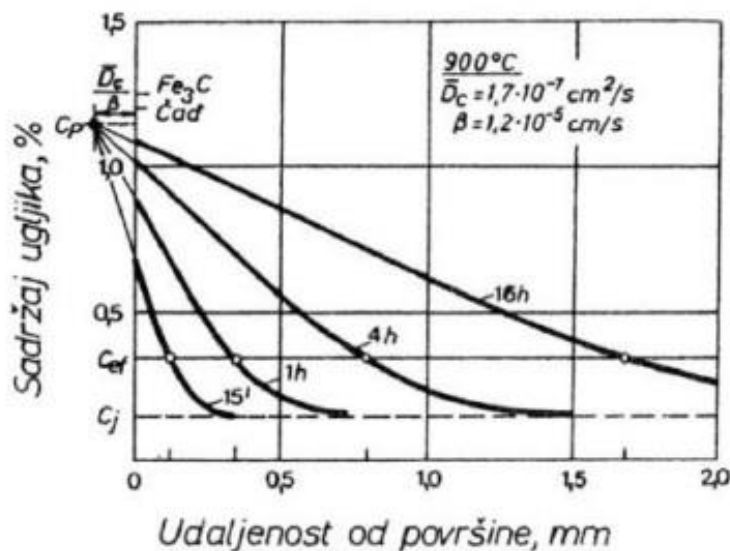
Slika 3.3. – Utjecaj izvora ugljika na dubinu pougljičenog sloja [14]

Važno je naglasiti da se kod nelegiranih čelika prilikom pougljičavanja u plinskim atmosferama, pomoću određenih dijagrama može utvrditi trajanje postupka pougljičavanja s obzirom na željenu dubinu cementiranog sloja dok se kod pougljičavanja legiranih čelika trajanje postupka određuje eksperimentalno zbog načina na koji legirajući elementi utječu na difuziju ugljika kroz površinski sloj čelika. Trajanje postupka pougljičavanja bit će određeno: kemijskim sastavom čelika, vrsti sredstva u kojem se odvija proces pougljičavanja te temperaturi. Manipulacijom ova tri faktora moguće je predvidjeti vrijeme koje će biti potrebno da bi se stvorio pougljičeni sloj određene dubine. Slika 3.4. predstavlja grafički prikaz utjecaja temperature na trajanje postupka cementiranja s obzirom na željenu dubinu pougljičenog sloja. Iz grafa se može zaključiti kako će se korištenjem više temperature omogućiti dobivanje veće dubine pougljičenog sloja te skratiti vrijeme trajanja pougljičavanja nego prilikom korištenja niže temperature.



Slika 3.4. – Utjecaj temperature na dubinu pougljičenog sloja C15 (Č.1220) [15]

Kao što je vidljivo na grafu 3.4. osim temperature na dubinu pougljičenog sloja imat će i vrijeme izloženosti materijala temperaturi i izvoru ugljika. Može se zaključiti da što je duže materijal izložen temperaturi pougljičenja i izvoru ugljika rasti će i dubina pougljičenog sloja. Slika 3.5. predstavlja grafički prikaz utjecaja trajanja pougljičavanja na dubinu pougljičenog sloja.



Slika 3.5. – Utjecaj trajanja postupka na dubinu pougljičavanja [15]

Iz grafa 3.5. može se izvesti zaključak da porast dubine pougljičenog sloja nije linearno proporcionalan s vremenom trajanja pougljičavanja. To znači da će na početku procesa dubina pougljičenog sloja brzo rasti te tokom trajanja procesa kreće opadati u odnosu na trajanje procesa.

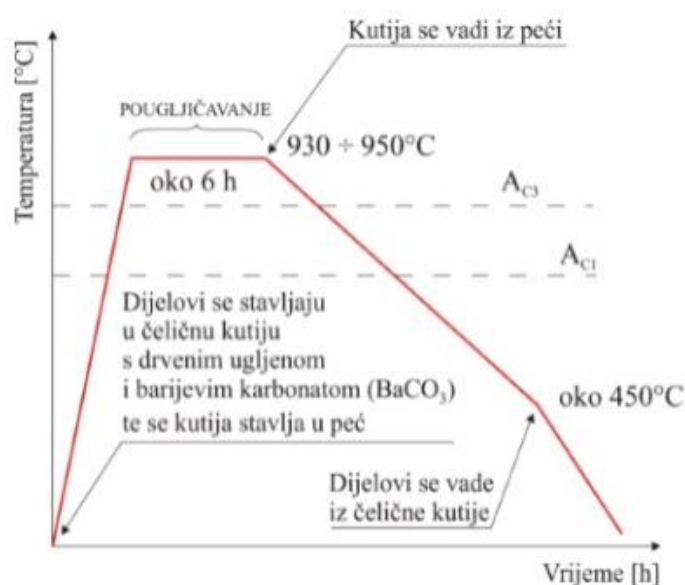
### 3.1.1. Pougljičavanje u krutom sredstvu

Pougljičavanje u krutom sredstvu je jedan od najstarijih postupaka koji nalazi primjenu i u današnjem vremenu. Iako se ovaj postupak danas rijetko primjenjuje i dalje je prisutan prilikom pougljičavanja manjeg broja dijelova. Sredstvo koje služi za pougljičavanje prilikom korištenja ove metode je mješavina drvenog ugljena kombiniranog sa aktivatorom i vezivnim sredstvom. Ovakva mješavina formira se u oblik granulata veličine između 3 do 5 mm. Slika 3.6. prikazuje granulat u kojem se vrši pougljičavanje.



Slika 3.6 – Granulat za pougljičavanje [16]

Proces pougljičavanja se izvodi tako da se kutije od niskougljičnog čelika napune sa granulatnom u razini od 13 do 50 mm. Nakon punjenja se izradci predviđeni za cementiranje polože na granulat. Da bi proces bio uspješan potrebno je izratke postaviti u određenu poziciju te osigurati dovoljno razmaka između njih. Nakon što su izradci postavljeni u željeni položaj, potrebno ih je potpuno prekriti sa ostatkom granulatne smjese. Kutije se potom zatvaraju šamotom ili glinom premazanim poklopcima kako bi se spriječio ulazak zraka. Peći u kojima se vrši pougljičavanje se zagriju na temperature 600 °C - 700 °C te se u njih stave kutije sa izradcima. Nakon određenog vremena kreće postepeno povećanje temperature sve dok se ne postigne temperatura pougljičavanja koja iznosi 850 °C - 950 °C. U završnom dijelu procesa potrebno je izvaditi kutije iz peći te odvojiti granulat od izradaka. Slika 3.7. prikazuje grafički prikaz odvijanja procesa pougljičavanja u krutom sredstvu.



Slika 3.7. – Pougljičavanje u krutom sredstvu [17]

Najčešće korišten aktivator prilikom vršenja ovog procesa je barijev karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). On se kod povišenih temperatura raspada na barijev oksid ( $\text{BaO}$ ) i ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ). Počinje reakcija ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) i ugljika ( $\text{C}$ ) koji se nalazi u granulatu. Završetkom reakcije nastaje ugljikov monoksid ( $\text{CO}$ ) kojim se stvara ravnoteža plinskih atmosfera. Stvaranjem ravnoteže plinskih atmosfera započeti će pougljičavanje površine čelika jer dolazi do prodora ugljika u austenitna zrna. Ugljik se potom difundira prema unutrašnjosti jezgre. Drveni ugljen bit će zaslužan za konstantno odvijanje ovog procesa i kontinuiranu obnovu plinske atmosfere jer se njegovim izgaranjem izazivaju reakcije ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) i obnova ugljičnog monoksida ( $\text{CO}$ ).

Kao i kod svakog procesa i u ovom možemo istaknuti prednosti i nedostatke. Glavna prednost ovog procesa je njegova jednostavna izvedba te minimalni troškovi opreme. Osim toga, ovaj proces je prigodan i za razne oblike te dimenzije obrađivanih dijelova te postoji mogućnost dobivanja jako dubokih cementiranih slojeva. Uz prednosti postoje i određeni nedostaci poput toga da ovaj proces nije prikladan za veliku proizvodnju jer je dosta dugotrajan. Također se nailazi i na problem mogućeg razugljičavanja u fazi ohlađivanja ili u nekim slučajevima i prevelikim zasićenjem austenita ugljikom. Proces je vrlo teško kontrolirati pa nije uvijek moguća točna procjena dubine pougljičenog sloja.

### 3.1.2. Pougljičavanje u kapljevitom sredstvu

Prilikom pougljičavanja čelika u kapljevitom sredstvu riječ je o pougljičavanju u solnim kupkama. Kupke koje se koriste za ovakvo izvođenje procesa su smjesa dviju soli. Najčešće korištene soli su natrijev ( $\text{NaCl}$ ) ili barijev klorid ( $\text{BaCl}_2$ ) koji u kombinaciji sa alkalnim cijanidima čine smjesu za solnu kupku. Solna smjesa se prvo rastali na temperaturi od oko  $500\text{ }^\circ\text{C}$  do  $600\text{ }^\circ\text{C}$ . Iz rastaljenih soli oslobađa se ugljik koji se potom difundira u površinu čelika. Predmeti koji su predviđeni za pougljičavanje moraju se prethodno zagrijati kako bi se smanjila toplinska naprežanja u materijalu. Potom se postavljaju u napravu te se dovode do temperature pougljičavanja koja iznosi od  $820\text{ }^\circ\text{C}$  do  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  ovisno o vrsti kupke. Nakon određenog vremenskog perioda provedenog na temperaturi pougljičavanja slijedi brzo kaljenje čelika. Slika 3.8. prikazuje vađenje dijelova ležajeva iz solne kupke.





*Slika 3.8. – Pougličavanje u solnoj kupki [18]*

Prema sastavu, solne kupke se dijele na aktivne i neaktivne. Aktivne kupke se uglavnom sastoje od natrijevog cijanida ( $\text{NaCN}$ ), alkalnih metala te aktivatora kao što su barijev ( $\text{BaCl}_2$ ) ili stroncijev klorid ( $\text{SrCl}_2$ ). Temperature pougličavanja u aktivnim kupkama kreću se od  $900\text{ }^\circ\text{C}$  do  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  te je moguće postići koncentraciju ugljika (C) u površinskom sloju od 0,5% do 1,2%. Kod ovakvog provođenja procesa moguće je konstantno kontrolirati sadržaj cijanida (CN) te koncentraciju ugljika (C). Nakon što se postigne zadovoljavajuća razina pougličanog sloja slijedi kaljenje. Budući da su cijandi otrovni spojevi, nakon procesa pougličavanja, predmeti se potapaju u otopinu željeznog sulfata te se potom ispiru toplom vodom.

Neaktivne solne kupke ne sadrže cijanidni aktivator, ali se sastoje od smjese alkalnih cijanidnih soli. One se aktiviraju u kontaktu s kisikom iz zraka. Temperatura pougličavanja kod korištenja neaktivnih kupki iznosi  $850\text{ }^\circ\text{C}$ , a dubina pougličanog sloja iznosi do 0,5 mm s koncentracijom ugljika (C) od 0,4% do 0,6%. Prilikom korištenja neaktivnih kupki ne može se vršiti kontrola koncentracije ugljika, već se samo kontrolira sadržaj cijanida.

Tokom cijelog procesa pougličavanja u kapljevitim sredstvima, kupke je potrebno održavati, pratiti udio cijanida i aktivatora te ih po potrebi nadopunjavati kako bi se održala koncentracija ugljika te omogućilo ujednačeno pougličavanje. Osim sadržaja cijanida i koncentracije ugljika potrebno je voditi računa i o temperaturi kako ne bi došlo do preintenzivne reakcije ili pretjerane potrošnje soli.

Istaknute pozitivne strane ovog procesa su njegova jednostavnost te mali troškovi potrebni za opremu. Ovakav proces omogućuje i jednolične dubine pougličavanja te ga je moguće koristiti

prilikom serijske ili masovne proizvodnje. Kao glavni nedostaci procesa ističe se korištenje otrovnih spojeva te njihov zbrinjavanje. Također je otežano i konstantno reguliranje i kontroliranje smjese kupke te kontroliranje koncentracije ugljika (C).

### 3.1.3. Pougličavanje u plinovitom sredstvu

Pougličavanje čelika u plinovitom sredstvu je najkorišteniji postupak u svrhu industrijske proizvodnje. Peći u kojima se odvijaju ovakvi postupci uglavnom se koriste za masovnu proizvodnju ili serijsku proizvodnju. One rade na principu kontrole koncentracije ugljika (C) u pročišćenoj plinskoj smjesi. Slika 3.8. prikazuje moderno postrojenje za plinsko pougličavanje.



*Slika 3.9. - Moderno postrojenje za pougličavanje u plinu [19]*

Ove plinske smjese su sačinjene od ugljičnog monoksida (CO), vodika (H<sub>2</sub>), vodene pare te metana (CH<sub>4</sub>) u malim količinama. Postoji tri vrste peći, a to su jamne, komorne i prolazne. Odabir vrste peći ovisi o obliku, dimenzijama, količini proizvoda te dubini željenog sloja. Prilikom pougličavanja u plinu potrebno je obratiti pažnju na apsorpcijsku mogućnost površine čelika te prema tome kontrolirati sadržaj slobodnog ugljika (C). U slučaju neuspješne apsorpcije svih nastalih ugljikovih atoma dolazi do stvaranja čađe.

Proces pougličavanja u plinskim smjesama se odvija u dvije faze. U prvoj fazi odvija se pougličavanje i tada je sadržaj ugljičnog monoksida (CO) u atmosferi veći od parcijalnog tlaka potrebnog za održavanje željenog sadržaja ugljika. Prva faza se odvija sve dok se ne postigne jako visoki sadržaj ugljika (C) ili dok se ne postigne nova ravnoteža u plinskoj atmosferi. Tokom

druge faze dolazi do razugljičenja površine čelika te koncentracija ugljika (C) u površini opada. Za kvalitetno vršenje ovog procesa, ključna su tri faktora, a to su: temperatura, vrijeme i sastav plinske atmosfere. Potrebno je osigurati idealan odnos temperature i vremena kako bi došlo do kvalitetne difuzije ugljika (C) u austenitu. Kao i kod ostalih postupaka pougljičavanja, za dobivanje dubljih slojeva pougljičenja potrebno je koristiti više temperature, dok se za manje slojeve koriste niže. Pri korištenju visokih temperatura potrebno je obratiti pažnju na deformabilnost predmeta. Temperature koje se koriste pri plinskom pougljičavanju iznose od 870 °C do 925 °C. Osim temperature i vremena pougljičavanja potrebno je kontrolirati i kvalitetu atmosfere. Postoje tri vrste plinskih atmosfera za provođenje procesa pougljičavanja, a to su: atmosfere na osnovi dušika i metanola, atmosfere na osnovi plina nosača – endoplina i atmosfere proizvedene direktno u peći.

Istaknuta značajka procesa pougljičavanja u plinovitom sredstvu je mogućnost potpune kontrole koncentracije ugljika (C). Kako bi kontrola mogla biti uspješno provedena, potrebno je ugljikovodicima odrediti koncentraciju nekih od sastojaka. To može biti kontrola ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) ili kisika (O<sub>2</sub>), a u nekim slučajevima čak i vodene pare (H<sub>2</sub>O). Postoje 4 metode za postizanje kontrole, a to su: određivanje točke rosišta, kontrola infracrvenim plinskim analizatorom te pomoću kisikove sonde. Ove metode se koriste u kombinaciji sa računalima te specijalnim programima koji omogućuju kontinuirano praćenje koncentracije ugljika tokom svih perioda procesa uz stalnu analizu kvalitete plinske atmosfere te temperature.

Glavna prednost pougljičavanja u plinu je omogućena potpuna kontrola procesa. Ovim postupkom se postiže najviša kvaliteta te jednolikost pougljičavanja, a osim toga omogućena je i visoka fleksibilnost prilikom izbora programa rada. Kao glavna mana procesa, ističu se potrebni visoki investicijski troškovi za opremu. Proces je isplativ tek kod visokoserijske ili masovne proizvodnje. Ostali nedostaci procesa jesu potreban povećan oprez s obzirom na opasnost od eksplozija ili požara te toksičnost plinskih para.

#### 3.1.4. Pougljičavanje u vakuumu

Proces pougljičavanja u vakuumu odvija se u plinskoj atmosferi pri temperaturama od 900 °C do 1040 °C. Sastav plinske atmosfere može sadržavati: vodik, ugljikovodik, smjese ugljikovodika ili smjese ugljikovodika i dušika. Nakon obrade čelik je potrebno kaliti u plinu ili ulju.

Prilikom pougljičavanja u vakuumu C-potencijal je određen zasićenjem ugljika na površini čelika te vremenom pougljičavanja pri određenim temperaturama. C-potencijal atmosfere s propanom je veći od onog s atmosferom metana jer se dobiva više ugljika tijekom procesa kreiranja propana.

Vakuumska peć izrađena je od grafita ili keramike. Može izdržati visoke tlakove koji se kreću do 0,4 bara. Takva izvedba peći sprječava preveliko taloženje ugljika.

Kao najbitnija prednost ovog procesa ističe se smanjeno vrijeme trajanja procesa te mogućnost dobivanja veće debljine pougljičenog sloja zbog difuzijskog ciklusa. Također se postiže i manja potrošnja plina za pougljičavanje. Glavni nedostaci ovog procesa su visoki troškovi opreme te zahtjevni uvjeti koje je potrebno uskladiti s obzirom da je proces jako delikatan u pogledu postizanja kompromisa između željene dubine sloja, brzine pougljičavanja i opasnosti od stvaranja čađe.

### 3.1.5. Pougljičavanje plazmom

Pougljičavanje plazmom se vrši na način da se C-potencijal regulira kontroliranjem gustoće struje. Proces se izvodi tako da se čelik zagrije do zasićenja ugljikom na temperature između 850 °C i 1040 °C. Kod ovakvog pougljičavanja C-potencijal je zapravo koncentracija ugljikovih iona koji bombardiraju površinu čelika.

Proces se u praksi provodi tako da se čelični predmeti postave na određeni razmak u visokotemperaturnu zonu peći. Unutrašnja konstrukcija peći obavlja funkciju anode dok se čelični predmeti u njoj ponašaju kao katode. Između njih dolazi do stvaranja plazme. Slika 3.9. prikazuje peć u kojoj se vrši pougljičavanje plazmom.



*Slika 3.10. - Peć za pougljičavanje plazmom [20]*

U procesu se koristi plinska smjesa koju tvore: metan ( $\text{CH}_4$ ), propan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), vodik (H), argon (Ar) te dušik (N). Za ionizaciju plina koristi se istosmjerni napon u rasponu od 350 V pa sve do 1 kV uz niske tlakove koji se kreću od 0,013 do 0,33 bara. Proces se vrši bez prisutstva kisika.

Princip rada ovog procesa proizlazi iz činjenice da se kod niskih tlakova i malih brzina strujanja plina, uz izloženost visokom naponu, odvija tinjajuće pražnjenje između anoda i katoda. Kao rezultat takvog pražnjenja, metan se razdvaja na ugljik i vodik te se događa ionizacija plina za pougljičavanje.

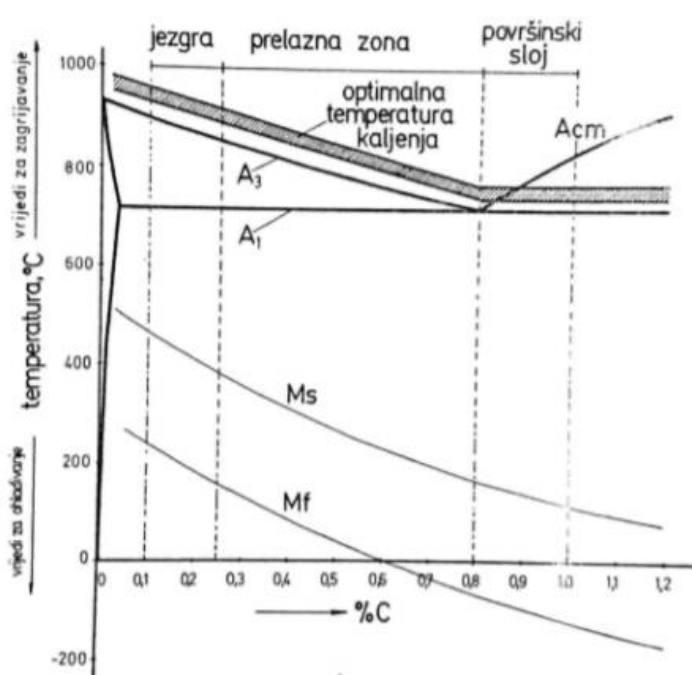
Proces pougljičavanja plazmom, nakon što se postigne temperatura pougljičavanja, može se podijeliti na dvije faze. U prvoj fazi se događa jako strujno tinjajuće pražnjenje plazme. Kod druge faze prestaje plazmeno pražnjenje i odvija se razugljičenje površinskog sloja čelika. Druga faza traje sve dok se ne postigne željena razina ugljika u površinskom sloju te dok se njegova dubina ne dovede na željenu razinu.

Kod postupka pougljičavanja plazmom istaknute prednosti su: kraće trajanje od ostalih postupaka pougljičavanja, pougljičeni sloj je jednoličan čak i kod nepravilnih površina, niska potrošnja plina i energije te gotovo nepostojeće zagađenje okoliša. Nedostatci koji se javljaju su

dosta visoka cijena opreme te ograničenost po pitanju dimenzija. Predmeti koji se pougljičavaju ne smiju velikih dimenzija zbog katodnog kontakta.

### 3.2. Kaljenje

Postupak kaljenja je sastavni dio procesa cementiranja čelika. Kaljenje se vrši odmah po završetku postupka pougljičavanja. Cilj ovog postupka je postići visoku tvrdoću površinskog sloja te martenzitnu strukturu. Preduvjet za postizanje takvih rezultata je zagrijavanje čelika na temperaturu austenizacije te održavanje na toj temperaturi određeni period, nakon čega slijedi gašenje čelika. S obzirom da se kod cementiranja postupak pougljičavanja provodi prije postupka kaljenja, javlja se problem određivanja temperature prilikom kaljenja. Površinski sloj imati će puno veći sadržaj ugljika nego što će imati jezgra. To znači da će površinski sloj pripadati nadeutektoidnom području dok će jezgra pripadati u podeutektoidno područje. S obzirom na ovakvo dvojno stanje unutar istog obrađivanog dijela, nije moguće odrediti samo jednu optimalnu temperaturu i za površinski sloj i za jezgru. Na slici 3.11. prikazane su različite mikrostrukture s obzirom na sadržaj ugljika kroz slojeve u pougljičenom čeliku.



Slika 3.11. - Mikrostrukture u slojevima čelika s obzirom na sadržaj ugljika (C) [21]

Dijagram prikazuje kako sadržaj ugljika ravnomjerno opada od površinskog sloja prema jezgri. Sadržaj ugljika u čeliku predstavlja uvjet za odabir temperature kaljenja. Temperatura kaljenja

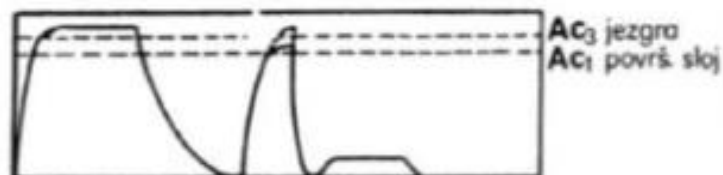
iznosit će od 30 °C do 70 °C iznad linije A<sub>3</sub> za podeutektoidni čelik te od 50 °C do 70 °C iznad A<sub>1</sub> za nadeutektoidni čelik. Kada bi se čelik kalio temperaturom koja je optimalna za kaljenje jezgre, površinski sloj ostao bi pregrijan. U slučaju kada bi proces kaljenja bio proveden 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. Na grafu 3.11. početak je prikazan linijom Ms dok je kraj prikazan linijom Mf. Prilikom kaljenja, transformacija će se odvijati prvo u području jezgre na višoj temperaturi, a nakon daljnjeg spuštanja temperature, počinje transformacija u površinskim slojevima. Treba voditi računa da se transformacija neće odvijati do kraja u slučaju ohlađivanja površinskog sloja na sobnu temperaturu. Pri nepotpunoj transformaciji u strukturi je prisutan zaostali austenit koji je nepoželjna pojava jer loše utječe na svojstva cementiranog čelika. Za postizanje potpune transformacije, potrebno je provesti duboko ohlađivanje čelika na temperature ispod linije Mf. Najčešće upotrebljavani postupci kaljenja u praksi su: jednostruko kaljenje, dvostruko kaljenje i direktno kaljenje.

### 3.2.1. Jednostruko kaljenje

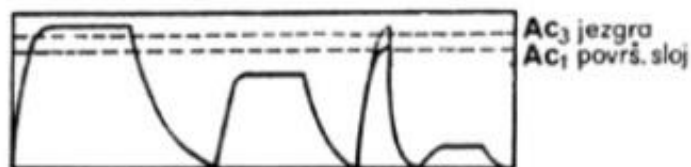
Jednostruko kaljenje je postupak koji se odvija na temperaturama optimalnim za kaljenje površinskog sloja ili kaljenje jezgre. Izradak je nakon postupka pougljičenja potrebno brzo ohladiti kako ne bi došlo do pojave karbidne mreže po granicama zrna. Karbidna mreža je pojava koja nastaje kada je sadržaj ugljika u površinskom sloju iznad eutektoidne koncentracije, a čelik se ne ohladi dovoljno brzo nakon provedenog postupka pougljičenja.

Kako bi se izbjegla pojava karbidne mreže provodi se neki od postupaka jednostrukog kaljenja. Svim postupcima ove vrste je zajedničko da se između pougljičavanja i kaljenja provodi postupak transformacije austenita te se naknadnom austenizacijom iznad A<sub>1</sub> postiže djelomična prekrystalizacija. Cilj ovakvih postupaka je rastvaranje karbida na granicama zrna što rezultira sitnijim zrnima. Na slici 3.12. grafički je prikazan postupak jednostrukog kaljenja.



Slika 3.12. – Jednostruko kaljenje [15]

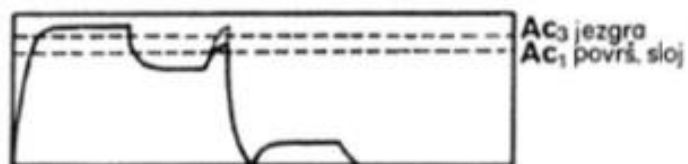
Kao varijacija postupka jednostrukog kaljenja, predstavljen je postupak jednostrukog kaljenja nakon međuzarenja. Međuzarenje se odvija na temperaturi od 650 °C. Postupak se provodio u cilju smanjenja naprezanja i deformacija u čeliku, ali je odbačen jer se međuzarenjem ne postižu ti efekti. Zaključak ovog postupka je da naknadno kaljenje ima glavni utjecaj na deformacije obrađivanih dijelova. Slika 3.13. grafički prikazuje postupak jednostrukog kaljenja nakon međuzarenja.



Slika 3.13. - Jednostruko kaljenje nakon međuzarenja [15]

Kao vrlo koristan postupak, pokazao se postupak jednostrukog kaljenja nakon izotermičke pretvorbe. On se primjenjuje nakon pougljičavanja čelika u solnim kupkama ili plinskim atmosferama. Postupak se vrši tako da se čelik nakon pougljičavanja ohladi na 600 °C te se na toj temperaturi održava određeno vrijeme. Tokom ovog vremena odvija se transformacija austenita u perlitnom stupnju. Potom slijedi zagrijavanje čelika na temperaturu kaljenja jezgre ili temperaturu kaljenja površinskog sloja. Glavne prednosti ovog postupka su smanjen utrošak energije i skraćeno trajanje ukupnog procesa toplinske obrade. Slika 3.14. grafički prikazuje postupak jednostrukog kaljenja nakon izotermičke pretvorbe.

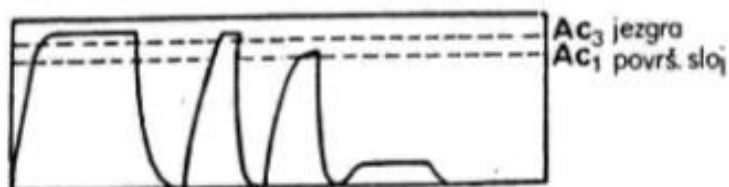




Slika 3.14. - Jednostruko kaljenje nakon izotermičke pretvorbe [15]

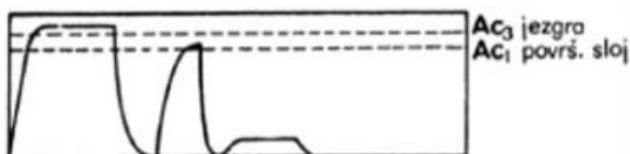
### 3.2.2. Dvostruko kaljenje

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. Na slici 3.15. nalazi se grafički prikaz postupka dvostrukog kaljenja.



Slika 3.15. – Dvostruko kaljenje [15]

Kao zaseban 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. Na slici 3.16. grafički je prikazan takav postupak dvostrukog kaljenja.

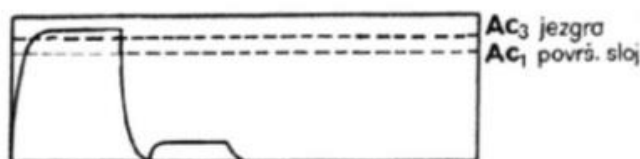


Slika 3.16. – Dvostruko kaljenje s prvim kaljenjem na temperaturi pougljičavanja [15]

### 3.2.3. Direktno kaljenje

Direktno kaljenje se vrši na temperaturi pougljičavanja te je kao takvo najjeftiniji od svih postupaka kaljenja. Ovaj postupak posjeduje određene nedostatke kao što je mogućnost pogrubljenja austenitnog zrna uslijed predugog držanja na temperaturi pougljičenja. Pogrubljenje austenitnog zrna ima štetno djelovanje na žilavost kaljenog čelika. Direktno kaljenje se koristi kod standardnih kvaliteta čelika u situacijama kada nisu postavljeni previsoki zahtjevi vezani uz strukturalna i mehanička svojstva obrađivanog čelika.

U praksi se koristi postupak direktnog kaljenja sa sniženom temperaturom. U takvom postupku se čelik nakon pougljičavanja hladi na nižu temperaturu. Najčešće se kaljenje provodi s optimalnom temperaturom za kaljenje jezgre. Na taj način se rješava problem kaljenja kod previsoke temperature pougljičavanja. Slika 3.16. grafički prikazuje postupak direktnog kaljenja.

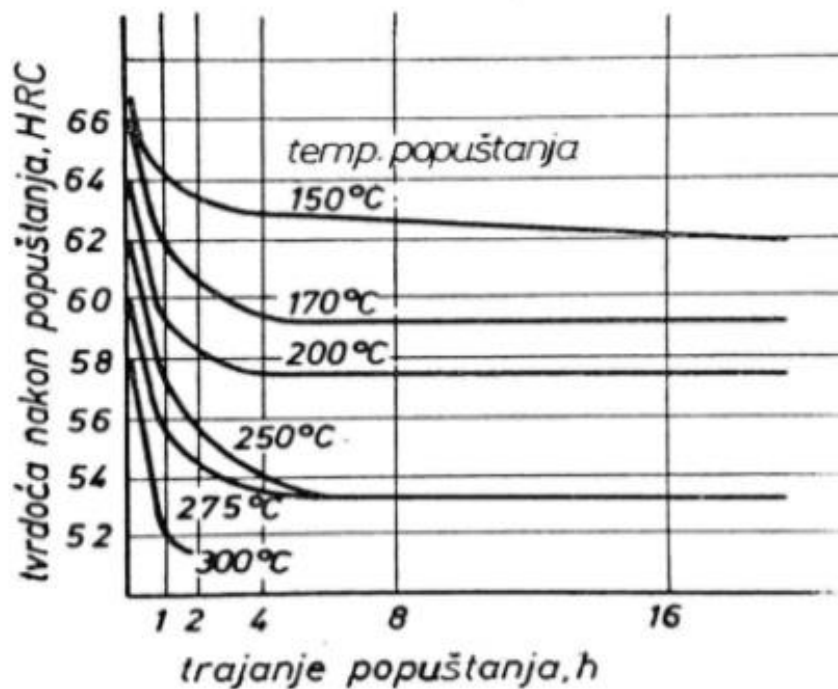


Slika 3. 17. – Direktno kaljenje [15]

Za bilo koji od navedenih postupaka kaljenja, može se primjenjivati gašenje u ulju, vodi ili toploj kupki. Odabir tekućine za kaljenje ovisiti će o vrsti te dimenzijama obrađivanih čeličnih dijelova.

### 3.3. Niskotemperaturno popuštanje

Postupak niskotemperaturnog popuštanja provodi se kako bi se izbjegla opasnost od nastajanja deformacija ili defekata u mikrostrukturi zbog visoke napetosti cementiranog čelika. Ovaj postupak također umanjuje tvrdoću čelika. Niskotemperaturno 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, a to je vidljivo na slici 3.17.



Slika 3.18. - Utjecaj temperature i vremena na tvrdoću čelika [13]

Postupak niskotemperaturnog 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. 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 naprežanja u čeliku. Čelik postaje lakše obradiv za obradu skidanjem čestica te se omekšava kako bi se olakšala i obrada deformacijom.

## 4. 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 visokougljičnog martenzita. Jezgra poprima feritno-perlitnu strukturu ako obradak nije prokaljen ili strukturu niskougljičnog martenzita u slučaju kad je izvršeno prokaljivanje. Na taj način površinski sloj će poprimiti višu tvrdoću te jako dobru otpornost na trošenje dok će jezgra ostati žilava. Na tablici 4.1. nalaze se neki od čelika korištenih za cementiranje.

Tablica 4.1. – Čelici za cementiranje [22]

Oznaka čelika	Sastav „ostalo“ %	Tvrdoća u isporučenom stanju, HB	Slijepo kaljeno 30mm			Kaljenje	
			Rp 0,2, N/mm <sup>2</sup> min	Rm, N/mm <sup>2</sup>	A5, % min	Jezgra, °C	Rub, °C
C10 C15	-	90-126 103-140	295 355	490-640 590-790	16 14	880-920; voda	-
Ck10 Ck15	-	90-126 103-140	295 355	490-640 590-790	16 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 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

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

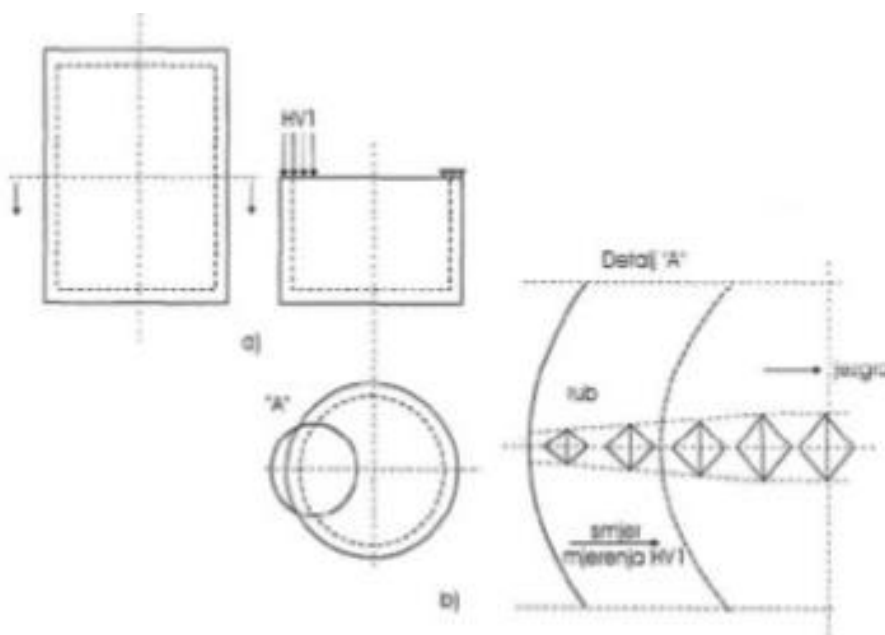
- Nelegirani čelici – u njih spadaju čelici kao što su C10 (Č.1120) i C15 (Č.1220)  
Njihovo zakaljivanje vrši se isključivo u vodi, imaju slabu sposobnost prokaljivanja te relativno slaba svojstva jezgre. Zbog navedenih razloga, koriste se za izradu dijelova manjih dimenzija te dijelova koji nisu podvrgnuti jakim udarnim opterećenjima. Najviše su korišteni za izradu malih osovina, zupčanika, poluga, svornjaka i čahura.
- Krom (Cr) – čelici – npr. Č.4121 (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 Č.4320 (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. Č.4721 (20CrMo5) ili Č.7420 (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 Č.5420 (14NiCr6) i Č.5421 (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.

## 5. Ispitivanje kvalitete cementiranog čelika

Ispitivanje kvalitete cementiranih čelika uglavnom se izvodi kroz tri značajke. Prva značajka je ispitivanje dubine 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.

### 5.1. Ispitivanje dubine cementiranog sloja

Za postupak određivanja dubine cementiranog sloja koristi se Vickersova metoda. Ovakav test tvrdoće provodi se na poprečno presječenom uzorku koji je prethodno podveden postupcima pougljičavanja i kaljenja. Na slici 5.1. nalazi se shematski prikaz presjeka profila te mjerenja čvrstoće Vickersovom metodom.

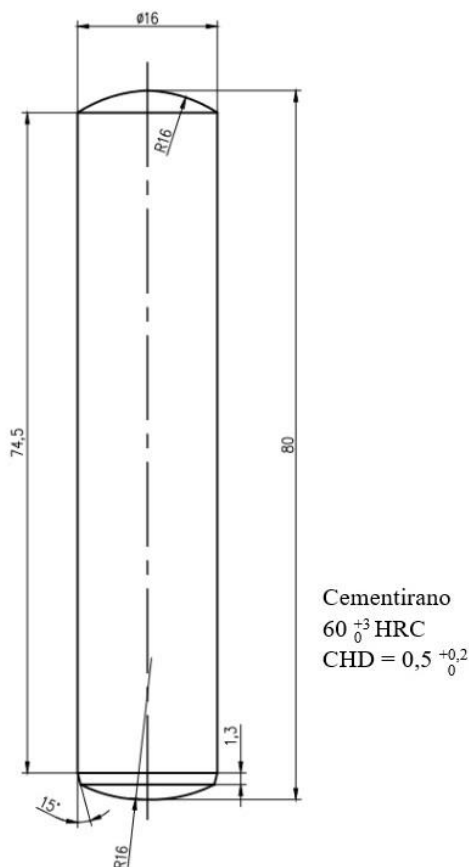


*Slika 5.1. - Shematski prikaz utvrđivanja dubine cementiranog sloja i mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom [23]*

Nakon rezultata mjerenja slijedi utvrđivanje efektivne dubine cementiranog sloja. Efektivna dubina cementiranog sloja je dubina na kojoj je postignuto 80% maksimalne tvrdoće cementiranog sloja. Na ovakav način se može utvrditi neka određena tvrdoća i dogovoriti da će ta tvrdoća označavati „tehničku dubinu cementacije“.

## 6. Postupak toplinske obrade strojnog dijela NJ.22–PT.41

Praktični dio ovog završnog rada je definiranje postupka cementiranja za strojni dio NJ.22-PT.41 prema postavljenim zahtjevima. Postavljeni zahtjevi su tvrdoća površinskog sloja koja iznosi 60 HRC te dubina pougljičenog sloja koja iznosi 0,5 mm. Slika 6.1. prikazuje nacrt strojnog dijela NJ.22-PT.41.



Slika 6.1. – Nacrt strojnog dijela NJ.22-PT.41 i zahtjevi za obradu

### 6.1. Materijal strojnog dijela NJ.22-PT.41

Strojni dio NJ.22-PT.41 izrađen je od čelika C15 (Č.1220). C15 spada u skupinu nelegiranih čelika za poboljšavanje. Ovakav materijal se primjenjuje za izradu strojnih dijelova manjih dimenzija. Namijenu pronalazi kod dijelova koji nisu podvrgnuti jakim udarnim opterećenjima. Sadrži oko 0,15% ugljika te kao takav nema visoku tvrdoću dok se ne podvrgne procesu cementiranja.

## 6.2. Definiranje procesa cementiranja za strojni dio NJ.22-PT.41

Za cementiranje strojnog dijela NJ.22-PT.41 prema zadanim zahtjevima, potrebno je definirati parametre postupaka pougljičavanja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja.

U radu je već ranije navedeno da je strojni dio NJ.22-PT.41 relativno malih dimenzija pa je kao optimalan način za vršenje procesa pougljičavanja odabrano pougljičavanje u krutom sredstvu, točnije, granulatu drvenog ugljena. Nakon odabira sredstva u kojem se vrši pougljičavanje, potrebno je odrediti temperaturu te 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 (6.1):

$$\delta = K \cdot \sqrt{t_p} \text{ [mm]} \quad (6.1)$$

gdje je:

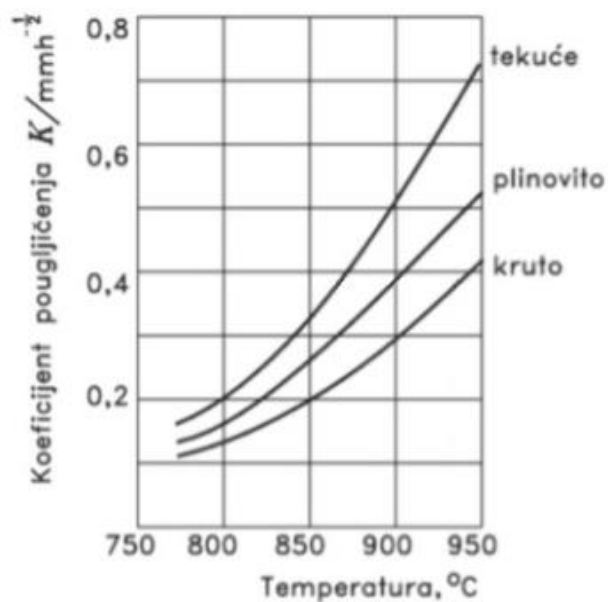
$\delta$  okvirna dubina cementiranog sloja [mm]

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

$t_p$  vrijeme pougljičenja [h]

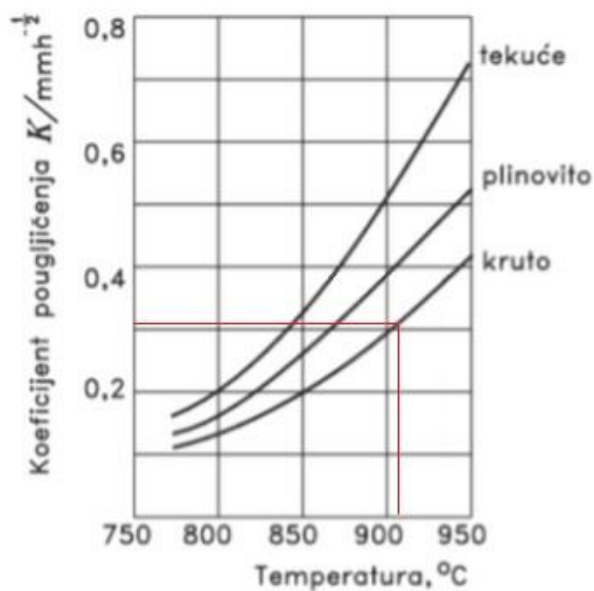
Koeficijent pougljičenja  $K$  je ovisan o vrsti sredstva korištenog za pougljičavanje te o temperaturi pougljičavanja, a određuje se prema grafu koji je prikazan na slici 6.2.





Slika 6.2. – Ovisnost koeficijenta pougljičenja o sredstvu pougljičenja i temperaturi [25]

Za ovaj proces je odabrana temperatura pougljičavanja od 910 °C u trajanju od 4 sata. Kada se na grafu sa slike 6.2. ucrtaju određeni parametri dobije se koeficijent K koji iznosi 0,31 mmh<sup>-1/2</sup>. To je prikazano na slici 6.3.



Slika 6.3. - Koeficijent pougljičavanja za proces cementiranja NJ.22-PT.41

Nakon ovog koraka potrebno je sve vrijednosti unijeti u formulu za izračunavanje okvirne dubine cementiranog sloja koja je ranije navedena (6.1):

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

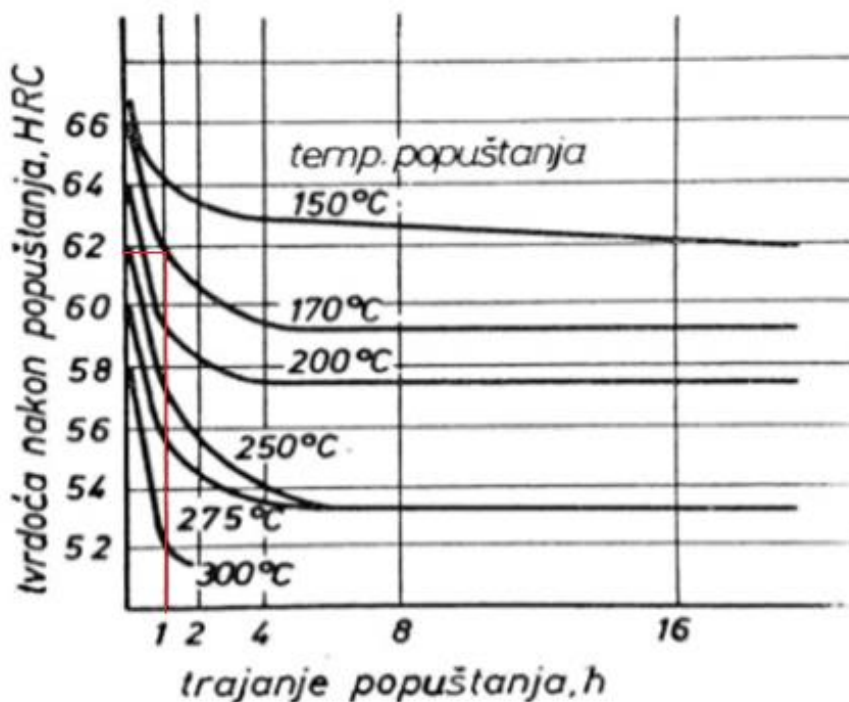
$$\delta = 0,31 \cdot \sqrt{4}$$

$$\delta = 0,62 \text{ mm}$$

Rezultat koji je naveden zadovoljava traženi početni zahtjev.

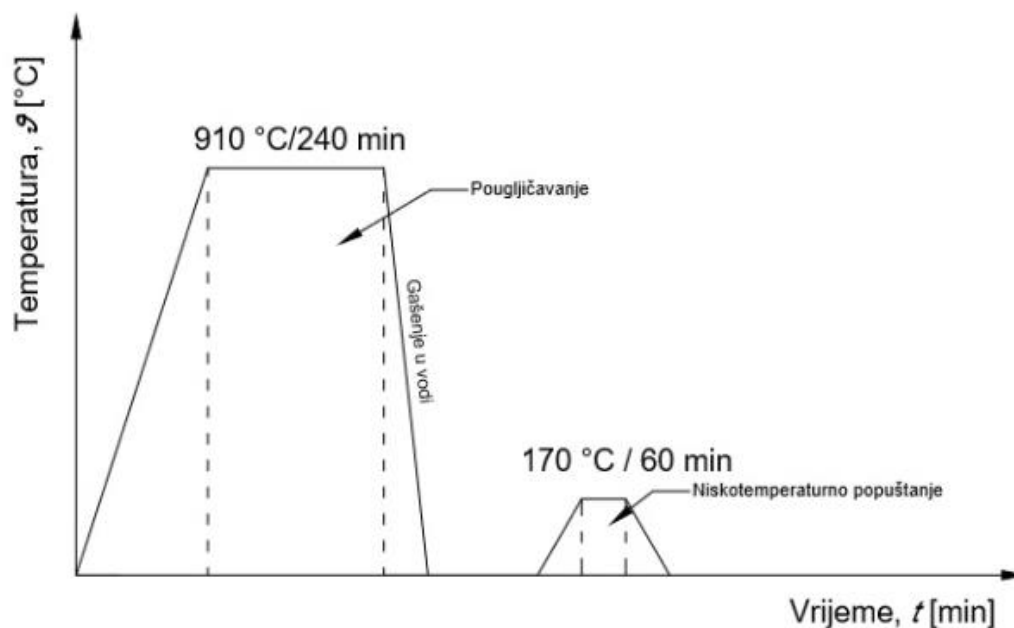
S obzirom da je strojni dio NJ.22-PT.41 izrađen od nelegiranog čelika C15, potrebno ga je kaliti u vodi. Kao optimalan izbor u ovom slučaju odabran je postupak direktnog kaljenja do sobne temperature.

Posljednji postupak je niskotemperaturno popuštanje. Već je ranije navedeno da se ovaj postupak provodi na temperaturama između 150 °C i 200 °C. Odabrana je temperatura od 170 °C te trajanje postupka od 1 sat. Kada se ovi parametri ucrtaju u graf sa slike 3.18. dobije se rezultat tvrdoće koji iznosi HRC  $\approx$  61,9 što zadovoljava početni zahtjev. Ucrtani parametri u grafu prikazani su na slici 6.4.



Slika 6.4. – Niskotemperaturno popuštanje za strojni dio NJ.22-PT.41

Slika 6.5. prikazuje proces cementiranja strojnog dijela NJ.22-PT.41 na grafu.



Slika 6.5. – Proces cementiranja strojnog dijela NJ.22 – PT.41

### 6.3. Tehnološka dokumentacija projekta cementiranja

Za proces cementiranja strojnog dijela NJ.22-PT.41 potrebno je izraditi odgovarajuću tehnološku dokumentaciju. Tehnološka dokumentacija za procese toplinske obrade se dokumentira u obliku operacijskih listova. Za proces cementiranja strojnog dijela NJ.22-PT.41 bilo je potrebno izraditi dva operacijska lista. Prvi list se odnosi na postupak pougličavanja i kaljenja obratka, dok je drugi namijenjen za postupak niskotemperaturnog popuštanja. U operacijskim listovima postupci su podijeljeni na zahvate te je definirano njihovo trajanje i ostali podaci važni za izvršavanje zahvata kao što su temperatura, sredstvo, oprema ili tehnika koja je potrebna za uspješno vršenje zahvata. Tablica 6.1. prikazuje operacijski list za postupke kaljenja i pougličavanja, dok tablica 6.2. prikazuje operacijski list za postupak niskotemperaturnog popuštanja.

Tablica 6.1. – Operacijski list za postupak pougljičavanja i kaljenja strojnog dijela NJ.22-PT.41

Tehnički fakultet Rijeka			Izradio: Nino Jukić		List: 1
Operacijski list: 1			Naziv dijela: NJ.22-PT.41		Ukupan broj listova: 2
Naziv operacije: Pougljičavanje i kaljenje			Materijal: C15 (Č.1220)	Operacija broj: 1	
Zahvat :	Opis zahvata:	Količina :	Korišteno sredstvo ili oprema:	T [°C]	Trajanje [min]
1	Punjenje kutije granulatom i obratkom	1	Kutija za pougljičavanje	-	4
2	Postavljanje kutije u peć	1	Ručno	-	1
3	Pougljičenje	1	Peć	910	240
4	Vađenje kutije iz peći	1	Ručno	-	1
5	Gašenje	1	Voda	20	1
Kontrolirao:			Datum:		Σ = 247
Odobrio:					

Tablica 6.2. – Operacijski list za postupak niskotemperaturnog popuštanja strojnog dijela NJ.22-PT.41

Tehnički fakultet Rijeka			Izradio: Nino Jukić		List: 2
Operacijski list: 2			Naziv dijela: NJ.22-PT.41		Ukupan broj listova: 2
Naziv operacije: Niskotemperaturno popuštanje			Materijal: C15 (Č.1220)	Operacija broj: 2	
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
Odobrio:					

## 7. Zaključak

Čelik je materijal koji nalazi opširnu primjenu u svim područjima. Ovisno o potrebama i uvjetima u kojima se koristi može se prilagoditi poboljšanjem svojih svojstava. Moguće je povećati otpornost na trošenje te tvrdoću površinskog sloja čelika korištenjem postupaka toplinske obrade.

Mikrostrukturom čelika moguće je manipulirati pomoću raznih postupaka toplinske obrade. To su termokemijski postupci koji mijenjaju mikrostrukturu čelika te se na principu toga mijenjaju i poboljšavaju željena svojstva. Poznavanje faznih pretvorba i Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagrama ključan je segment za postizanje željenih svojstava koja će biti zadana određenim zahtjevima.

Cementiranje je proces koji spada u postupke toplinske obrade čelika. Cementiranjem se postiže veća tvrdoća površinskog sloja, zadržava se žilavost jezgre i povećava otpornost na trošenje kod čelika. Sastoji se od pougljičavanja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Pougljičavanjem se postiže veći sadržaj ugljika u površinskom sloju, dok se kaljenjem dobiva martenzitna struktura te se na kraju niskotemperaturnim popuštanjem uklanjaju zaostala naprezanja u čeliku. Ovi postupci se mogu provesti uz pomoć raznih medija, načina i tehnika. Odabir tih stavki ovisit će o vrsti čelika s kojim se radi te o dostupnosti opreme, načinu rada i ostalim faktorima.

S obzirom na primjenu gdje će se obrađivani dio koristiti, moguće je odrediti pogodnu vrstu čelika. Uz određene vrste čelika vežu se i načini na koji se može provesti njegova toplinska obrada i sam proces cementiranja.

Za cementiranje strojnog dijela NJ.22-PT.41 odabran je nelegirani čelik za poboljšanje C15 (Č.1220). Strojni dio NJ.22-PT.41 predviđen je za cementiranje u granulatu ugljena te je kao mediji za kaljenje bilo potrebno odabrati vodu. Definiran je i postupak niskotemperaturnog popuštanja te je nakon njegovog provođenja obradak potrebno ostaviti da se do kraja ohladi na zraku. Provedbom ovih postupaka zadovoljeni su početni zadani uvjeti koji nalažu da dubina cementiranog sloja treba iznositi od 0,5 do 0,7 mm te tvrdoća koja iznosi od 60 do 63 HRC. Za cijeli proces napravljena 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://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr/pluginfile.php/106117/mod\\_folder/content/0/Predavanja/10%20Toplinska%20obrada%20%20C4%8Delika.pdf?forcedownload=1](https://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr/pluginfile.php/106117/mod_folder/content/0/Predavanja/10%20Toplinska%20obrada%20%20C4%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.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap\\_5/illustr/i5\\_3\\_3.html](https://www.tf.uni-kiel.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] Madhu: „Difference Between Pearlite and Bainite“, s interneta, <https://www.differencebetween.com/difference-between-pearlite-and-bainite/>, 13. srpnja, 2018.
- [10] Nepoznati autor: „Summary of the phase transformations of steel“, s interneta, <https://www.tec-science.com/material-science/iron-carbon-phase-diagram/summary-of-phase-transformations/>, 2. veljače, 2018.
- [11] Google, s interneta, 13. siječnja, 2012.
- [12] A. Flesher, T. Logan, D. H. Herring: „Advanced Carburizing Technology: An Industrial Perspective“, s interneta <https://www.industrialheating.com/articles/94164-advanced-carburizing-technology-an-industrial-perspective>
- [13] Stupnišek M., Cajner F.: Osnove toplinske obradbe metala, FSB, Zagreb, 2001.
- [14] Gabrić, I.; Šitić, S.: „Materijali II“, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [15] Liščić B.: „Termokemijski postupci“, Metalbiro Zagreb, 1981.
- [16] Google, s interneta, 4. veljače, 2022.
- [17] Krumes D.: „Površinske toplinske obrade i inženjerstvo površina“, Strojarski fakultet u Slavenskom Brodu, Slavonski Brod, 2004.

[18] Google, s interneta, 22. veljače, 2023.

[19] Google, s interneta 9. ožujka, 2023.

[20] Nepoznati autor: „Plasma Carburizing“, <https://www.pvateplaamerica.com/product/industrial-furnace-systems/plasma-carburizing/>, 12. ožujak, 2023.

[21] Goran Haviđić: „Utjecaj pozicioniranja dijelova pri pougljičenju u krutom sredstvu na rezultate dubine pougljičenja“, Karlovac, 2018.

[22] Stjepan Kožuh: „Specijalizirani čelici“, Sisak, 2010.

[23] Bozić T., Veleučilište u Karlovcu

[24] Nepoznati autor: „European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database“, s interneta, [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=148](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=148), 23. ožujka, 2023.

[25] Smoljan B.: „Toplinska obrada čelika sivog i nodularnog lijeva“, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1999.



## POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1. – Plošno centrirana kubična rešetka</i> .....	2
<i>Slika 2.2. – Mikrostruktura austenita</i> .....	3
<i>Slika 2.3. – Volumno centrirana kubična rešetka (BCC)</i> .....	3
<i>Slika 2.4. – Mikrostruktura ferita</i> .....	4
<i>Slika 2.5. – Kristalna rešetka cementita</i> .....	4
<i>Slika 2.6. – Mikrostruktura cementita</i> .....	5
<i>Slika 2.7. – Mikrostruktura perlita</i> .....	5
<i>Slika 2.8. - Tetraegonalna prostorno centrirana kristalna rešetka (BCT)</i> .....	6
<i>Slika 2.9. – Mikrostruktura martenzita</i> .....	6
<i>Slika 2.10. – Mikrostruktura bainita</i> .....	7
<i>Slika 2.11. – Pojednostavljeni prikaz faznih pretvorbi čelika</i> .....	8
<i>Slika 2.12. - Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram</i> .....	8
<i>Slika 3.1. - Zupčanici stroja izrađeni od cementiranog čelika</i> .....	11
<i>Slika 3.2. – Grafički prikaz procesa cementiranja čelika</i> .....	12
<i>Slika 3.3. – Utjecaj izvora ugljika na dubinu pougljičenog sloja</i> .....	13
<i>Slika 3.4. – Utjecaj temperature na dubinu pougljičenog sloja C15 (Č.1220)</i> .....	13
<i>Slika 3.5. – Utjecaj trajanja postupka na dubinu pougljičavanja</i> .....	14
<i>Slika 3.6 – Granulat za pougljičavanje</i> .....	15
<i>Slika 3.7. – Pougljičavanje u krutom sredstvu</i> .....	15
<i>Slika 3.8. – Pougljičavanje u solnoj kupki</i> .....	17
<i>Slika 3.9. - Moderno postrojenje za pougljičavanje u plinu</i> .....	18
<i>Slika 3.10. - Peć za pougljičavanje plazmom</i> .....	21
<i>Slika 3.11. - Mikrostrukture u slojevima čelika s obzirom na sadržaj ugljika (C)</i> .....	22
<i>Slika 3.12. – Jednostruko kaljenje</i> .....	24
<i>Slika 3.13. - Jednostruko kaljenje nakon međuzarenja</i> .....	24
<i>Slika 3.14. - Jednostruko kaljenje nakon izotermičke pretvorbe</i> .....	25
<i>Slika 3.15. – Dvostruko kaljenje</i> .....	25
<i>Slika 3.16. – Dvostruko kaljenje s prvim kaljenjem na temperaturi pougljičavanja</i> .....	25
<i>Slika 3.17. – Direktno kaljenje</i> .....	26
<i>Slika 3.18. - Utjecaj temperature i vremena na tvrdoću čelika</i> .....	27

<i>Slika 5.1. - Shematski prikaz utvrđivanja dubine cementiranog sloja i mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 6.1. – Nacrt strojnog dijela NJ.22-PT.41 i zahtjevi za obradu .....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 6.2. – Ovisnost koeficijenta pougljičenja o sredstvu pougljičenja i temperaturi .....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 6.3. - Koeficijent pougljičavanja za proces cementiranja NJ.22-PT.41 .....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 6.4. – Niskotemperaturno popuštanje za strojni dio NJ.22-PT.41 .....</i>	<i>34</i>
<i>Slika 6.5. – Proces cementiranja strojnog dijela NJ.22 – PT.41 .....</i>	<i>35</i>

## POPIS TABLICA

<i>Tablica 4.1. – Čelici za cementiranje</i> .....	28
<i>Tablica 6.1. – Operacijski list za postupak pougljičavanja i kaljenja strojnog dijela NJ.22-PT.41</i> .....	36
<i>Tablica 6.2. – Operacijski list za postupak niskotemperaturnog popuštanja strojnog dijela NJ.22-PT.41</i> .....	37

## SAŽETAK

Ovaj završni rad prikazuje postupak toplinske obrade cementiranja strojnog dijela NJ.22–PT.41. Kroz teorijski dio opisane su fazne pretvorbe čelika potrebne za razumijevanje promjena prilikom postupka cementiranja te su objašnjeni načini kojima se postupak može provesti. U praktičnom dijelu objašnjen je postupak cementiranja strojnog dijela NJ.22–PT.41. koji je proveden prema postavljenim zahtjevima.

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

## **SUMMARY**

This undergrad thesis presents the process of heat treatment by carburizing machine part NJ.22–PT.41. Theoretical part of the thesis revolves around explanations of the phase transformations in steel which are needed to gain an understanding in changes that occurs during the process of steel carburizing. Theoretical part also revolves around all the different techniques that can be used to carry out the process of steel carburization. Practical part of the thesis discloses explanations about the carburization process of the mechanical part NJ.22-PT.41 that is conducted by the set requirements.

Key words: steel, heat treatment of steel, phase transformation, steel microstructures, carburization, quenching, case hardening, hardness testing