

# Postupak toplinske obrade strojnog dijela MC.23-ST.72

---

**Božičević, Loreno**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*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:190:077484>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-23**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA  
MC.23-ST.72**

Rijeka, studeni 2023.

Loreno Božičević

0335002547

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA  
MC.23-ST.72**

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

Rijeka, studeni 2023.

Loreno Božičević

0335002547

Rijeka, 11. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za materijale**  
Predmet: **Materijali**  
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Loreno Božičević (0335002547)**  
Studij: **Stručni prijediplomski studij strojarstva**

Zadatak: **Postupak toplinske obrade strojnog dijela MC.23-ST.72 / Heat treating process of workpiece MC.23-ST.72**

### Opis zadatka:

Potrebno je proanalizirati proces toplinske obrade strojnog dijela MC.23-ST.72. 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.

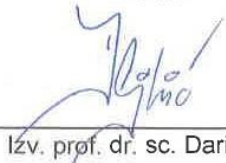
Nadalje, potrebno je definirati proces toplinske obrade te opisati postrojenje za toplinsku obradu strojnog dijela MC.23-ST.72. Potrebno je verificirati definirani proces toplinske obrade, proanalizirati rezultate toplinske obrade i donijeti odgovarajuće zaključke.

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



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**

Izjavljujem da sam ovaj završni rad napravio samostalno uz nadzor i savjete mentora izv. prof. dr. sc. Daria Iljkića. Završni rad sam napravio koristeći stečena znanja i dostupnu literaturu.

Zadatak je zadan 20. ožujka 2023.

Loreno Božičević

## **ZAHVALA**

Želio bih se zahvaliti svome mentoru izv. prof. dr. sc. Dariu Iljkiću na datoj podršci i pomoći za izradu završnog rada.

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD.....  | 1  |
| 2. FAZNE PRETVORBE U ČELIKU.....                                | 2  |
| 2.1. Nastanak austenita i pothlađivanje austenita .....         | 3  |
| 2.2. Nastanak perlita.....                                      | 5  |
| 2.3. Nastanak martenzita .....                                  | 6  |
| 2.4. Nastanak bainita.....                                      | 7  |
| 3. OSNOVE TOPLINSKE OBRADJE ČELIKA.....                         | 8  |
| 3.1. Osnovni postupci toplinske obrade .....                    | 9  |
| 3.1.1. Kaljenje čelika.....                                     | 9  |
| 3.1.2. Popuštanje čelika .....                                  | 11 |
| 3.1.3. Pobljšavanje čelika .....                                | 12 |
| 3.1.4. Źarenje čelika .....                                     | 12 |
| 3.2. Toplinsko-kemijska obrada.....                             | 13 |
| 3.2.1. Cementiranje .....                                       | 13 |
| 3.2.2. Nitiranje.....   | 13 |
| 3.2.3. Karbonitriranje .....                                    | 14 |
| 3.2.4. Boriranje .....  | 14 |
| 4. CEMENTIRANJE ČELIKA.....                                     | 15 |
| 4.1. Pougličavanje.....   | 16 |
| 4.1.1. Pougličavanje u krutom sredstvu.....                     | 16 |
| 4.1.2. Pougličavanje u tekućem sredstvu.....                    | 18 |
| 4.1.3. Pougličavanje u plinovitom sredstvu .....                | 20 |
| 4.2. Kaljenje.....  | 22 |
| 4.2.1. Direktno kaljenje .....                                  | 23 |
| 4.2.2. Jednostruko kaljenje .....                               | 23 |
| 4.2.3. Dvostruko kaljenje.....                                  | 24 |
| 4.3. Niskotemperaturno popuštanje .....                         | 25 |
| 5. ČELICI ZA CEMENTIRANJE.....                                  | 26 |
| 6. ISPITIVANJE TVRDOĆE.....                                     | 30 |
| 6.1. Ispitivanje tvrdoće po Rockwellu.....                      | 30 |
| 6.2. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu.....                       | 31 |
| 6.3. Ispitivanje tvrdoće po Vickersu.....                       | 33 |
| 6.4. Ispitivanje tvrdoće po Knoopu .....                        | 35 |
| 7. POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA MC.23-ST.72 ..... | 36 |

|  |    |
|--|----|
| 7.1. Materijal strojnog dijela MC.23-ST.72.....                      | 36 |
| 7.2. Parametri procesa cementiranja strojnog dijela MC.23-ST.72..... | 37 |
| 7.3. Tehnološka dokumentacija postupka cementiranja .....            | 40 |
| 7.4. Probno cementiranje strojnog dijela MC.23-ST.72 .....           | 44 |
| 8. ZAKLJUČAK .....   | 49 |
| LITERATURA .....   | 50 |
| POPIS SLIKA .....  | 51 |
| POPIS TABLICA .....  | 53 |
| SAŽETAK.....   | 54 |
| SUMMARY .....  | 55 |



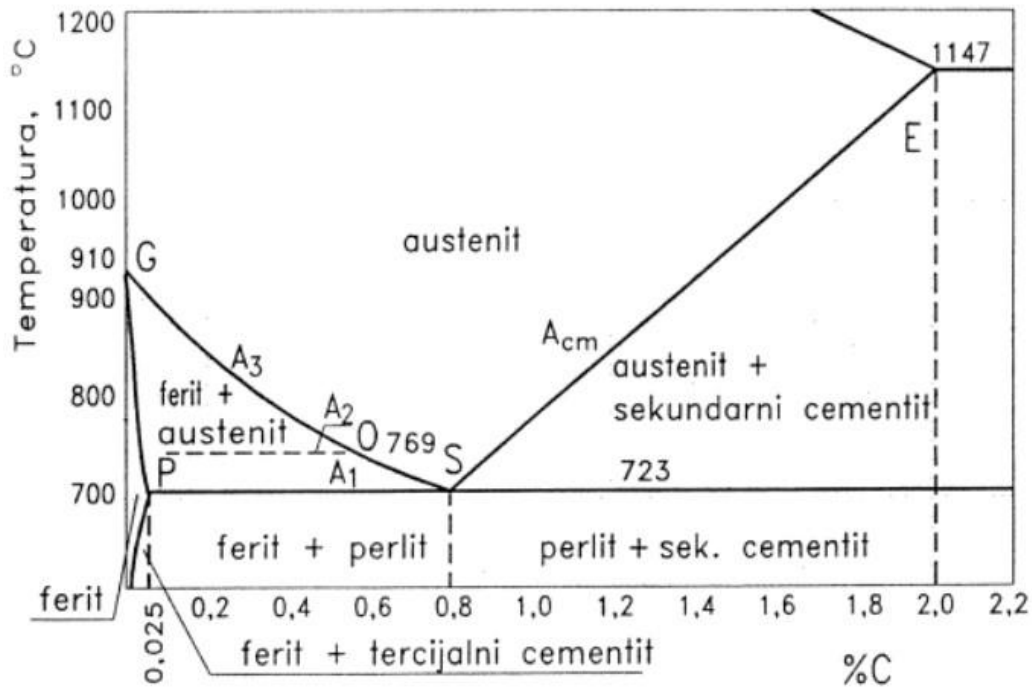
## **1. UVOD**

Tražena svojstva materijala u početnom stanju obično nisu zadovoljavajuća te je stoga potrebno materijal podvrgnuti dodatnim postupcima kako bi se postigla tražena mehanička, fizikalna i kemijska svojstva materijala.

U ovome završnome radu biti će toplinski obrađen strojni dio MC.23-ST.72 te će taj strojni dio biti cementiran. Rad se sastoji od teorijskog i praktičnog dijela. U teorijskom dijelu biti će objašnjena toplinska obrada i cementiranje, dok će u praktičnome dijelu biti pojašnjeno kako se u praksi cementira strojni dio.

## 2. FAZNE PRETVORBE U ČELIKU

Čelik kao materijal ima mikrostrukturu ovisnu o temperaturi i udiu ugljika u njemu. Ta mikrostrukturalna stanja su prikazana na dijagramu na slici 2.1.



Slika 2.1. Dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C

Mikrostrukturalna kompozicija čelika koja odgovara ravnotežnom dijagramu su perlit, ferit i sekundarni cementit te iznad kritične temperature A<sub>1</sub> – austenit [1].

Ferit je uključinska kristalna struktura željeza i ugljika s prostorno centriranom kubičnom rešetkom. Prostorno centrirana kubična rešetka ferita je prikazana na slici 2.2. Sadrži najviše 0,025 %C [1].

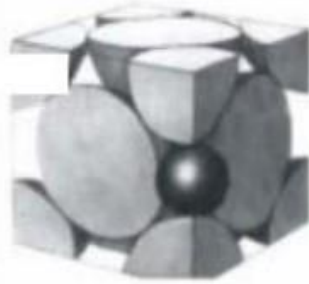


Slika 2.2.  $\gamma$  - rešetka ferita [2]

Perlit je sastavljen od eutektoidnih kristalnih zrna ferita i cementita [1].

Sekundarni cementit je kemijski spoj, željezni karbid  $Fe_3C$ , sa 6,67 %C [1].

Austenit je uključinska kristalna struktura željeza i ugljika s plošno centriranom kubičnom rešetkom. Plošno centrirana kubična rešetna austenita je prikazana na slici 2.3. Najveću udio ugljika iznosi 2,03 % [1].



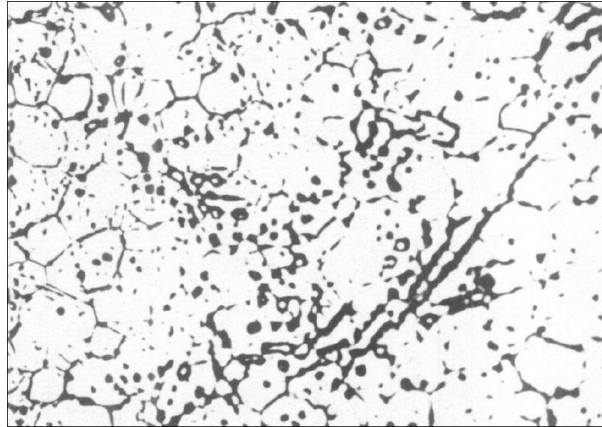
*Slika 2.3.  $\alpha$  - rešetka austenita [2]*

Austenitna faza se može proširiti dodvanjem bakra, mangana, nikla i kobalta i oni se nazivaju  $\gamma$ -geni elementi.

### **2.1. Nastanak austenita i pothlađivanje austenita**

Austenit će najlakše nastati na granici između faze cementita i ferita jer se tada najlakše stvaraju mjesta u kojima isti austenit ima najnižu slobodnu energiju za specifičnu temperaturu i kemijski sastav u području kritične veličine. Najviši udio ugljika u austenitu doseže se tamo gdje graniči s fazom ferita. [1]

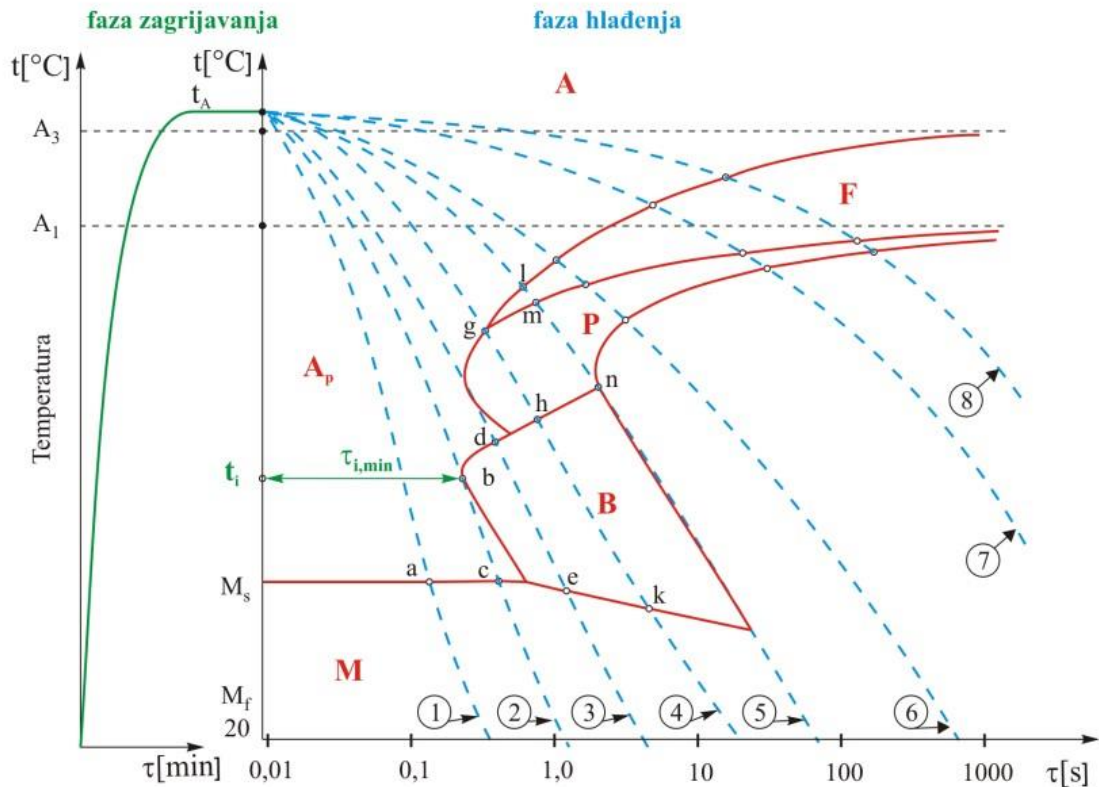
Na slici 2.4. je prikazana mikrostruktura austenita (bijelo) i cementita (crno).



*Slika 2.4. Mikrostruktura austenita i cementita [3]*

Austenit je intersticijska čvrsta otopina u kojoj se ugljik otapa u čvrstom željezu, jer su ugljikovi atomi znatno manji od atoma željeza. Ova otopina se formira u gama-željezu ( $\gamma$ -Fe), koje ima plošno centriranu kubičnu kristalnu rešetku. To je struktura čelika koja se javlja pri visokim temperaturama od otprilike iznad  $723^{\circ}\text{C}$ . Bitno svojstvo austenita je što se hlađenjem ispod kritične temperature on može transformirati u druge strukture, kao što su perlit, bainiti ili martenzit, ovisno i brzini hlađenja i kemijskom sastavu. [3]

Ohlađivanjem austenita na temperature niže od  $723^{\circ}\text{C}$  događa se pretvorba austenita. Za opis pretvorbe pothlađenoga austenita se koristi TTT (Time Temperature Transformation) dijagram, koji je prikazan na slici 2.5.

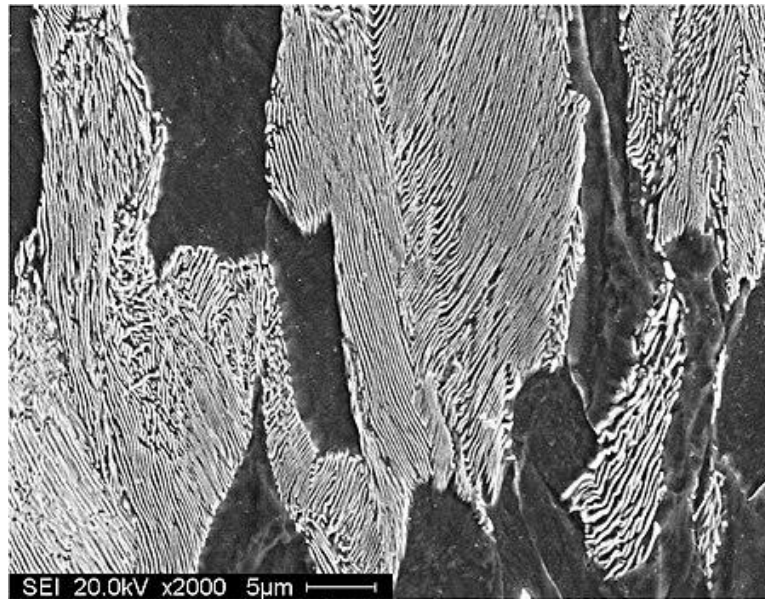


Slika 2.5. TTT dijagram kontinuiranog hlađenja čelika [2]

Dovođenjem austenita u neravnotežno stanje, austenit se može pretvoriti u neku drugu fazu. Nestabilnost se postiže hlađenjem austenita i onda se raspada na niskotemperaturne faze. Brzina ohlađivanja određuje faze na koje će se pothlađeni austenit raspasti.

## 2.2. Nastanak perlita

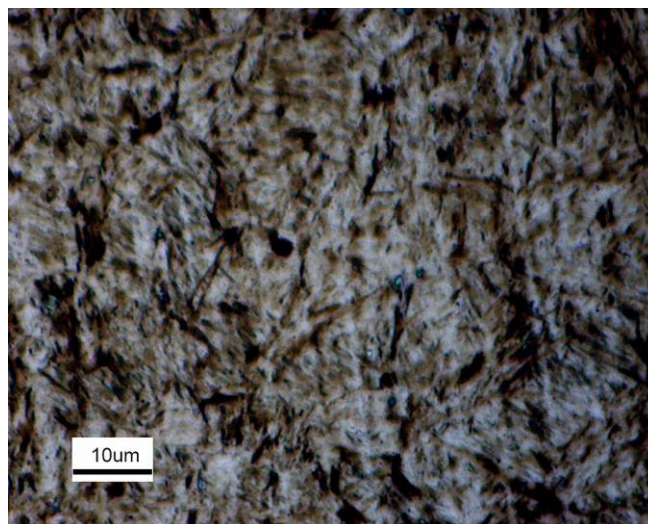
Perlit nastaje jako sporim hlađenjem austenita pri  $723^{\circ}\text{C}$ . Perlitna struktura je sastavljena od 88% feritne faze (mekše faze) i 12% cementitne faze (tvrđe faze). Za nastanak perlita mora biti mora postojati dovoljna difuzija atoma. Prikaz mikrostrukture perlita je prikazan na slici 2.6.



*Slika 2.6. Mikrostruktura perlita [4]*

### **2.3. Nastanak martenzita**

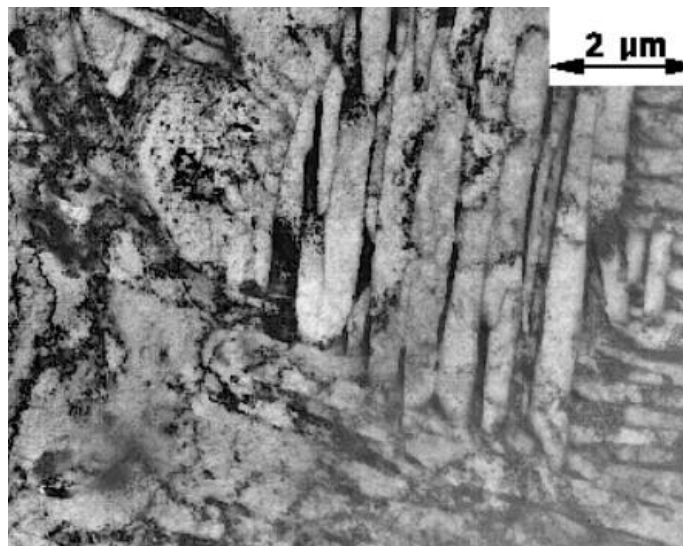
Martenzit je supersaturirana čvrsta otopina ugljika u volumno tetragonalnoj kristalnoj strukturi željeza. Martenzit će nastati kada se čelik iz područja austenitne faze hladi dovoljno velikom brzinom ispod dovoljno niske temperature. Martenzit je nestabilan, izuzetno tvrd, ali i krhak. Također ima najveći specifični obujam među svim mikrostrukturnim fazama čelika. [5] Na slici 2.7. je prikazan martenzit kod niskolegiranog čelika.



*Slika 2.7. Prikaz martenzita kod niskolegiranog čelika [5]*

## 2.4. Nastanak bainita

Bainit će se formirati kada se čelik zagrijava na visoku temperaturu, a to je obično između 800°C i 950°C kako bi se postigla austenitna mikrostruktura te se zatim hladi na temperaturu između 250°C i 550°C, ali brzina hlađenja mora biti kontrolirana kako nebi došlo do formiranja perlita i martenzita. Ova struktura, koja je sastavljena od feritne i cementitne faze, razlikuje se od perlita te se naziva bainit. Tijekom formiranja bainita difuzija atoma ugljika je ključna radistribuciju i stvaranje cementita, dok je difuzija atoma željeza minimalna. Upravo ta ravnoteža omogućava formiranje bainitne mikrostrukture sa karakterističnim mehaničkim svojstvima. [6] Na slici 2.6. je prikazan bainit kod smirenog čelika.



Slika 2.8. Prikaz bainita kod smirenog (dezoksidiranog) čelika [6]

### 3. OSNOVE TOPLINSKE OBRADJE ČELIKA

Toplinska obrada može se opisati kao proces primjene temperature na materijal s ciljem promjene njegove mikrostrukture i, posljedično, njegovih mehaničkih svojstava. Iako se najčešće toplinski obrađuju čelici, ovaj postupak primjenjuje se i na druge metale te keramiku. Glavni razlozi za toplinsku obradu uključuju očvršćivanje i poboljšanje mehaničkih karakteristika, posebno vlačne čvrstoće, povećanje duktilnosti, povećanje žilavosti i mogućnosti deformiranja, smanjenje unutarnjih naprezanja te pripremu za obradu rezanjem. [7]

Toplinska obrada provodi se:

- prije i tijekom plastičnog oblikovanja i deformacije
- nakon mehaničkog obrađivanja s ciljem smanjenja zaostalih naprezanja
- na kraju procesa, kako bi se postigla konačna čvrstoća i tvrdoća

Vrste toplinske obrade se mogu podijeliti na osnovne postupke toplinske obrade i toplinsko-kemijske postupke i toplinsko-mehaničku obradu.

Kod osnovnih postupaka toplinske obrade komadi se griju, zatim drže na određenoj temperaturi i zatim hlade. Primjeri osnovne toplinske obrade su:

- žarenje
- kaljenje
- popuštanje
- poboljšanje



Toplinsko-kemijska toplinska obrada se obavlja u kemijskoj aktivnoj sredini, kao što je primjer:

- cementiranje ili pougljeničenje
- nitriranje
- karbonitriranje
- boriranje

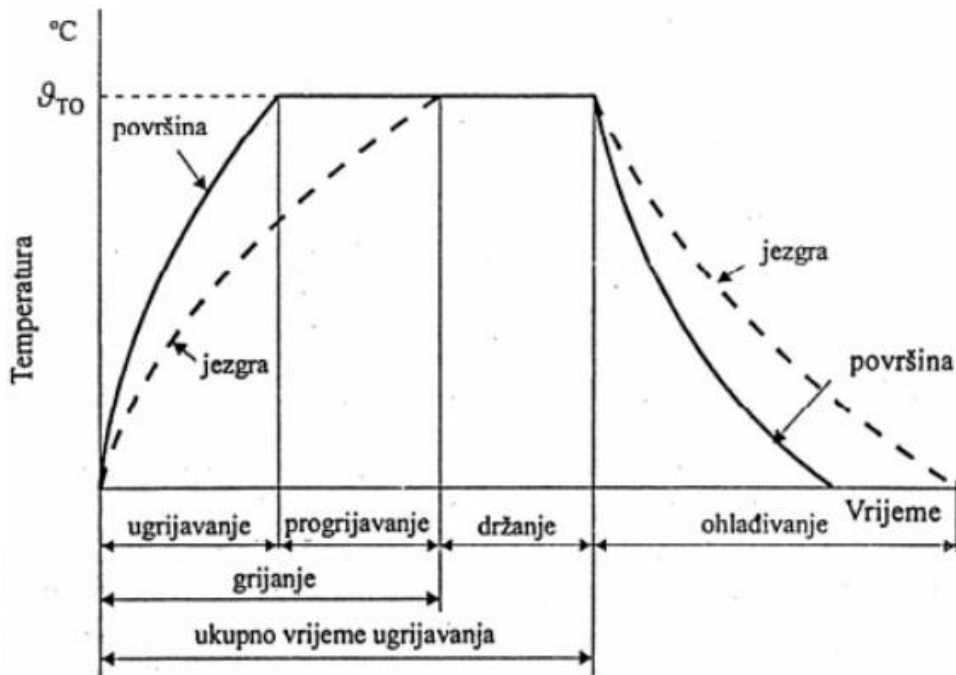
Toplinsko-mehanička obrada je toplinska obrada u kombinaciji sa mehaničkim deformiranjem.

### **3.1. Osnovni postupci toplinske obrade**

Postoji više vrsta toplinskih obrada, ali se najčešće dijele u dvije skupine prema dubini do koje je došao utjecaj toplinske obrade. Tako razlikujemo toplinsku obradu čitavoga presjeka i toplinsku obradu samo površine. [2]

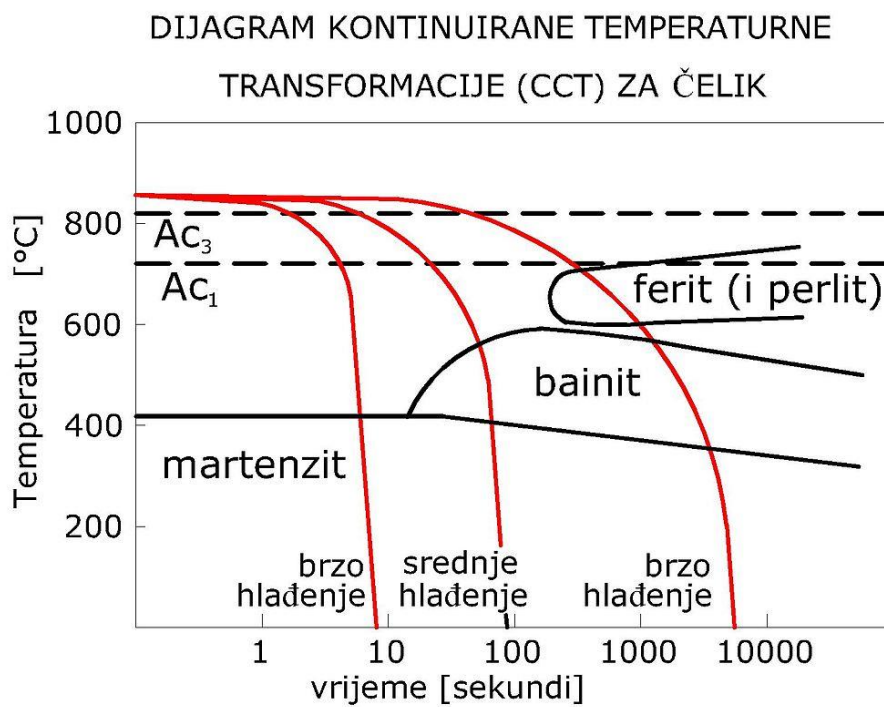
#### **3.1.1. Kaljenje čelika**

Kaljenje je toplinska obrada koja omogućuje otvrdnjavanje čelika. Proces kaljenja sastoji se od austenizacije, nakon koje slijedi brzo hlađenje, čime se postiže da se značajan dio, a idealno cijeli austenit, pretvori u martenzit.. Postupak kaljenja čelika je prikazan na slici 3.1.



Slika 3.1. Postupak kaljenja čelika [8]

Na slici 3.2. je prikazan dijagram kontinuiranog hlađenja koji prikazuje uvjete za stvaranje martenzita.



Slika 3.2. Dijagram kontinuiranog hlađenja prikazuje uvjete za stvaranje martenzita ili kaljenje [9]

Kaljenje se može sprovesti u vodi, slanoj vodi, ulju ili zraku.

### 3.1.2. Popuštanje čelika

Popuštanje je toplinska obrada koja se primjenjuje nakon kaljenja kako bi se povećala žilavost i duktilnost čelika. Proces popuštanja uključuje zagrijavanje čelika na određenu temperaturu, izotermno zadržavanje na toj temperaturi, te kontrolirano hlađenje. Ovaj postupak se može ponoviti. Budući da kaljenjem čelici postaju vrlo čvrsti, ali su i krhki, pa se popuštanjem povisuje žilavost kaljenog čelika dok se njegova čvrstoća smanjuje. [10]

Popuštanjem se postiže:

- snižavanje tvrdoće i krhkosti
- kontrola mikrostrukture
- poboljšavanje mehaničkih svojstava
- povisivanje duktilnosti
- smanjenje unutrašnjih naprezanja

Na slici 3.3. je prikazan kaljeni čelik nakon popuštanja.

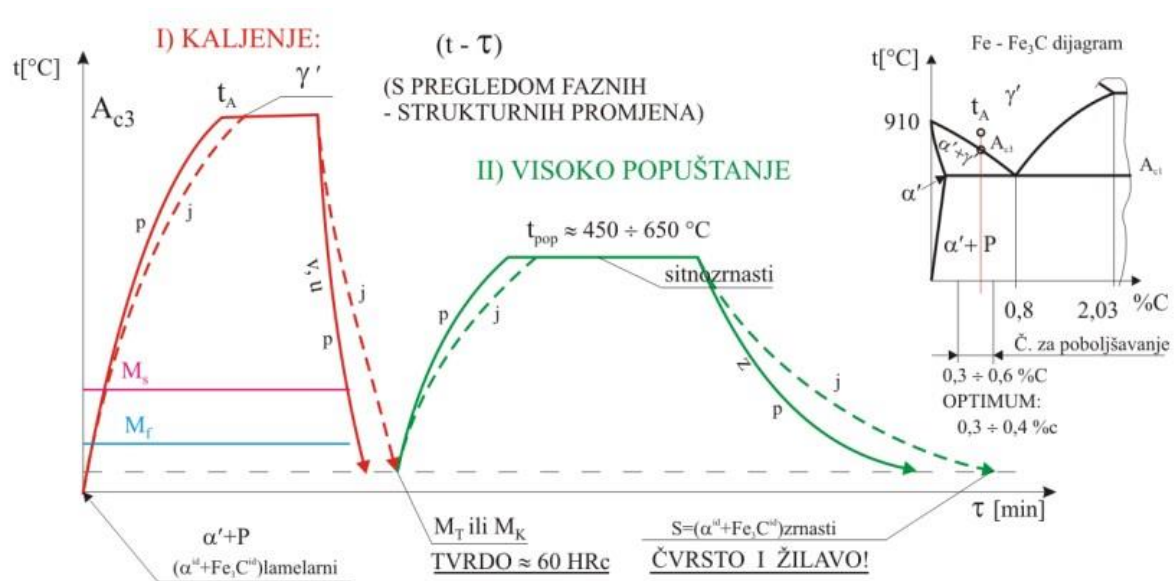


*Slika 3.3. Kaljeni čelik nakon popuštanja [10]*

### 3.1.3. Poboljšavanje čelika

Poboljšavanje je kompleksna toplinska obrada koja uključuje kaljenje i popuštanje na povišenim temperaturama. Cilj ovog postupka je postići optimalnu kombinaciju čvrstoće, tvrdoće i žilavosti čelika. Poboljšavanje se najefikasnije primjenjuje na čelici za poboljšanje, koji sadrže između 0,3% i 0,6% ugljika, te se dijele na ugljične i legirane čelike. [9]

Na slici 3.4. je prikazan dijagram klasičnog poboljšavanja.



Slika 3.4. Dijagram klasičnog poboljšavanja [2]

### 3.1.4. Žarenje čelika

Žarenje je proces zagrijavanja čelika do određene temperature i zadržavanja na toj temperaturi tijekom određenog vremena, nakon čega se hladi sporije nego kod kaljenja. Glavni cilj žarenja je smanjenje tvrdoće čelika, uklanjanje zaostalih napreznja te poboljšanje obradivosti. Ovaj postupak također vraća žilavost nakon hladne deformacije, omogućujući nastavak deformiranja bez loma materijala. Žarenjem se također uklanjaju unutarnja napreznja nastala tijekom mehaničke obrade, čime se sprječava deformacija tijekom kasnijih toplinskih obrada. [11]

Najčešći procesi žarenja su:

- meko žarenje
- normalizacija
- stabilizacija (otklanjanje unutrašnjih naprezanja)
- rekristalizacija

### **3.2. Toplinsko-kemijska obrada**

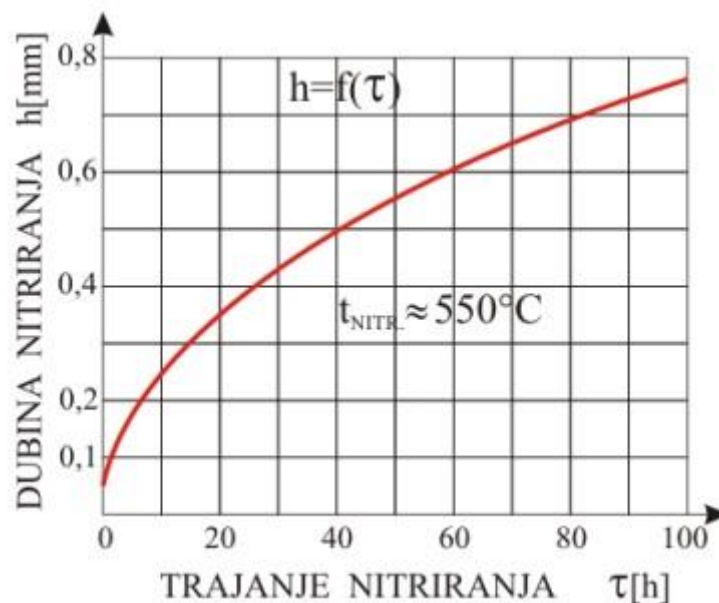
Kod toplinsko-kemijskih postupaka cilj je povećati tvrdoću površinskog sloja čelika i povećati otpornost na trošenje.

#### 3.2.1. Cementiranje

Cementiranje je postupak toplinske obrade, a koji se sastoji od pougličavanja, kaljenja te niskotemperaturnog popuštanja, a svrha je otvrdnuti površinski sloj čelika kako bi se ostvarila otpornost na trošenje i zadržati žilavost u jezgri zbog otpornosti na udarna opterećenja.

#### 3.2.2. Nitriranje

Nitriranje je postupak toplinske obrade u kojem se čelik prvo podvrgava toplinskoj obradi, nakon čega se površina obogaćuje dušikom. Obično se nitriranje provodi u prisutnosti amonijaka, pri temperaturama između 520°C i 560°C. Zbog relativno niskih temperatura, nitriranje zahtijeva dulje vrijeme (do 100 sati) kako bi se postigle željene dubine nitriranja, koje mogu doseći do otprilike 0,8 mm. [12] Na slici 3.5. je prikazan odnos dubine nitriranog sloja o vremenu trajanja procesa nitriranja.



Slika 3.5. Dijagram ovisnosti dubine nitriranog sloja ( $h$ ) o vremenu trajanju procesa nitriranja [2]

### 3.2.3. Karbonitriranje

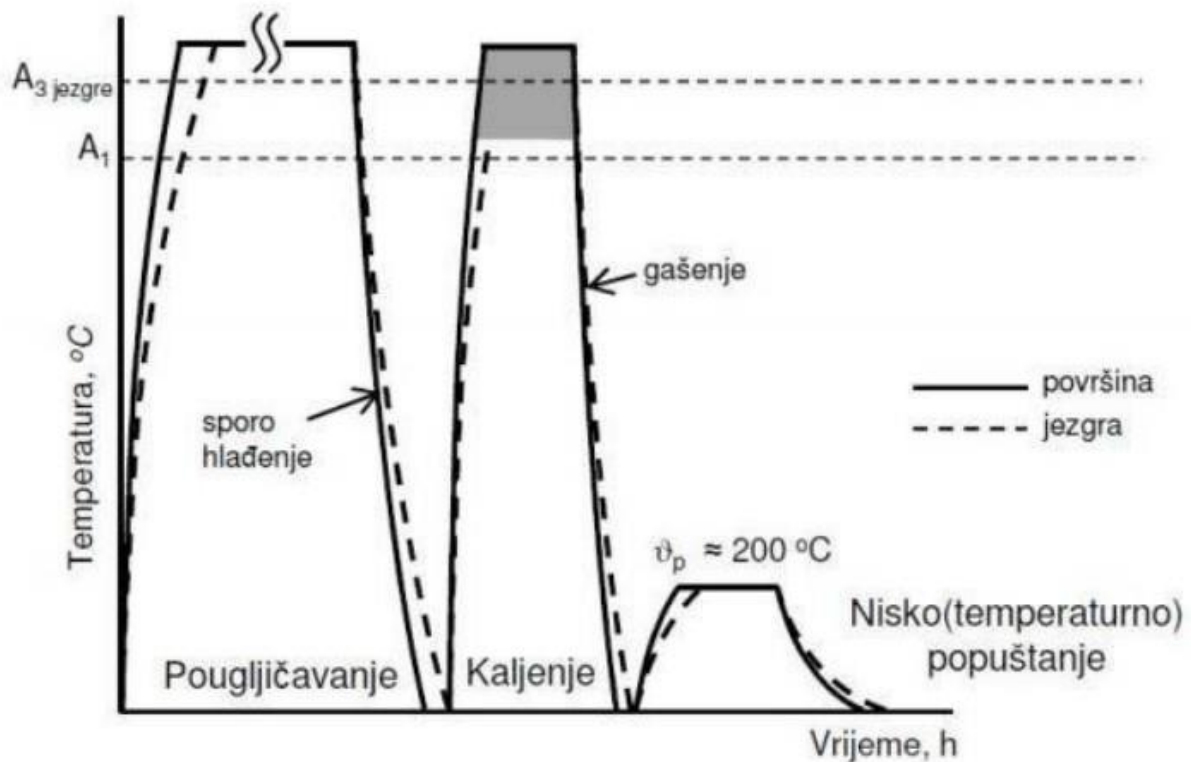
Karbonitriranje je proces obogaćivanja površinskog sloja čelika atomima ugljika i dušika putem toplinsko-kemijske difuzije. Ovaj postupak se obično izvodi koristeći plinovita sredstva poput metana i amonijaka, na temperaturama od  $550^{\circ}\text{C}$  do  $950^{\circ}\text{C}$ . Nakon karbonitriranja slijedi kaljenje i niskotemperaturno popuštanje. Debljina karbonitriranog sloja obično varira između 0,2 mm i 0,8 mm, ali ne prelazi 1 mm. Ovaj proces rezultira vrlo tvrdim površinama koje su otporne na habanje i koroziju, dok unutrašnjost predmeta zadržava svoju žilavost.

### 3.2.4. Boriranje

Boriranje je postupak u kojem se površinski sloj čelika obogaćuje borom putem toplinsko-kemijske obrade. Stvoreni sloj željeznih borida izuzetno je otporan na habanje, što značajno produžuje vijek trajanja boriranih čeličnih predmeta. Osim toga, boriranje poboljšava otpornost niskolegiranih željeznih materijala na djelovanje kiselina. Za boriranje se obično koriste praškasta sredstva, često borov karbid, pri temperaturama između  $800^{\circ}\text{C}$  i  $1050^{\circ}\text{C}$ , s trajanjem procesa obično od 1 do 8 sati. [14]

## 4. CEMENTIRANJE ČELIKA

Cementiranje je jedan od toplinsko-kemijskih postupaka u kojem se površina čelika obogaćuje ugljikom kako bi se povećala tvrdoća. Cementiranje se primjenjuje na dijelove koji zahtijevaju visoku tvrdoću površine kako bi se povisila otpornost na habanje i trošenje, a unutrašnjost treba zadržati žilavost kako bi se povećala otpornost prema udarnim opterećenjima. Takvi strojni dijelovi su zupčanici, vratila, osovine i slično. Čelici koji se koriste za cementiranje su ugljični i niskolegirani konstrukcijski čelici koji imaju udio ugljika od maksimalno 0,25%. Cementiranje je sastavljeno od tri osnovna postupka, a to su pougljičavanje, kaljenje i niskotemperaturno popuštanje. Postupak cementiranja je prikazan na slici 4.1.



Slika 4.1. Postupak cementiranja čelika

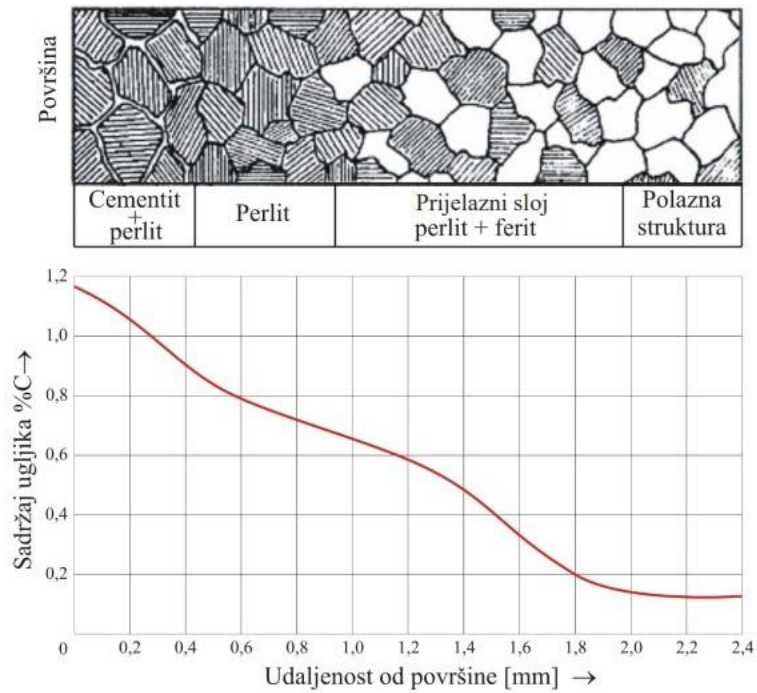
## 4.1. Pougličavanje

Pougličavanje je proces obogaćivanja površinskog sloja čelika ugljikom, nakon čega se taj sloj kaljenjem otvrdne. Cilj je postići koncentraciju ugljika u površinskom sloju od 0,8% do 0,9%. Brzina pougličavanja ovisi o temperaturi, kemijskom sastavu sredstva i vrsti pougličavanja (kruto, tekuće ili plinovito). Pougličavanje se najčešće provodi u sredstvima koja na temperaturi austenitizacije čelika (od 900°C do 930°C) prenose ugljik na čelik. Dubina površinskog sloja obogaćenog ugljikom obično iznosi između 0,5 mm i 1,5 mm. Udio ugljika najviši je na površini i postupno opada prema jezgri, što rezultira smanjenjem tvrdoće. Na dubini od 0,5 mm do 1,5 mm koncentracija ugljika obično se vraća na početnu razinu, što znači da u jezgri nije povećan sadržaj ugljika. Sredstva za pougličavanje osiguravaju odgovarajući potencijal ugljika ( $C_{pot}$ ) koji je viši od sadržaja ugljika u čeliku, čime se ugljik apsorbira u površinski sloj čelika i difundira prema unutrašnjosti. Dubina pougličavanja ovisi o trajanju procesa, pri čemu dulje trajanje rezultira većom dubinom obogaćenog sloja. Koncentracija ugljika u površinskom sloju tijekom pougličavanja regulira se temperaturom, trajanjem procesa, potencijalom ugljika sredstva ( $C_{pot}$ ) te kemijskim sastavom čelika.

### 4.1.1. Pougličavanje u krutom sredstvu

Pougličavanje u krutom sredstvu je najstariji proces pougličavanja. Za pougličavanje se koristi granulat drvenog ugljena uz prisustvo aktivatora. Jedan od aktivatora je zrak, ali se on rijetko koristi te se u praksi češće kao aktivator koristi barijev karbonat ( $BaCO_3$ ). Pougličavanje se odvija na temperaturi od 900°C i postiže se udio ugljika od 0,6% do 0,9%. Struktura i sadržaj ugljika u pougličanom stanju je prikazana na slici 4.2.

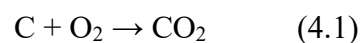




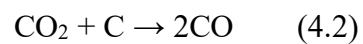
Slika 4.2. Struktura i sadržaj ugljika pougljičenog sloja [2]

Pougljičavanje u krutom sredstvu se odvija prema sljedećim reakcijama.

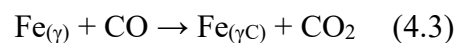
Ugljik C iz krutog sredstva reagira s kisikom O iz okoline:



Nastali ugljični dioksid  $CO_2$  reagira dalje s ugljikom C iz krutog sredstva:

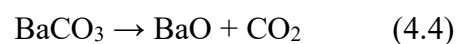


Ugljični monoksid CO reagira sa austenitom  $\gamma$  na površini čeličnog izratka:



Ugljični dioksid  $CO_2$  nastavlja reagirati prema (4.2).

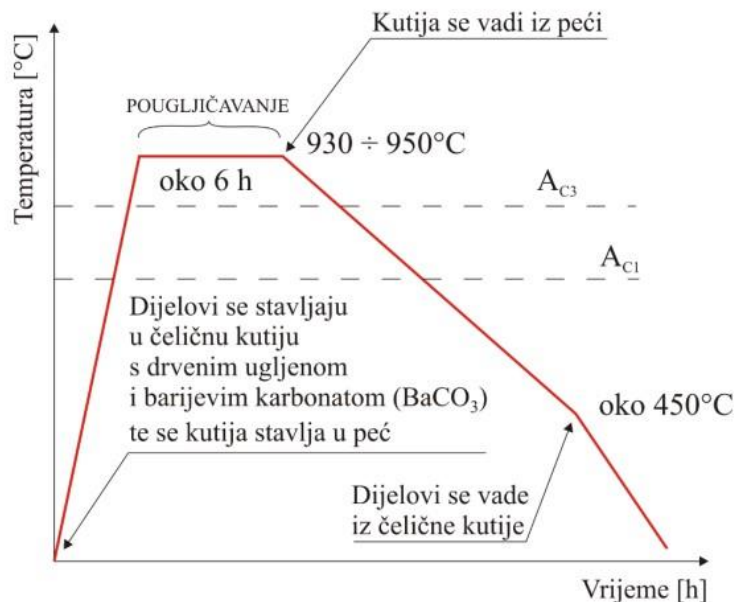
Kruto sredstvo obično je drveni ugljen s dodatkom barijeva karbonata ( $BaCO_3$ ) koji pospešuje reakciju na sljedeći način:



Nastali ugljični dioksid  $\text{CO}_2$  nastavlja reagirati prema (4.2).

Dubina pougljičavanja će ovisiti o trajanju pougljičavanja: nakon 1 sata ugljik C dopire do otprilike 0,3 mm, a nakon 8 sati do 2 mm, ali u strojarskoj praksi dubina veća od 1 mm obično nije potrebna.

Na slici 4.3. je prikazan postupak pougljičavanja u krutom sredstvu.



Slika 4.3. Postupak pougljičavanja u krutom sredstvu [2]

#### 4.1.2. Pougljičavanje u tekućem sredstvu

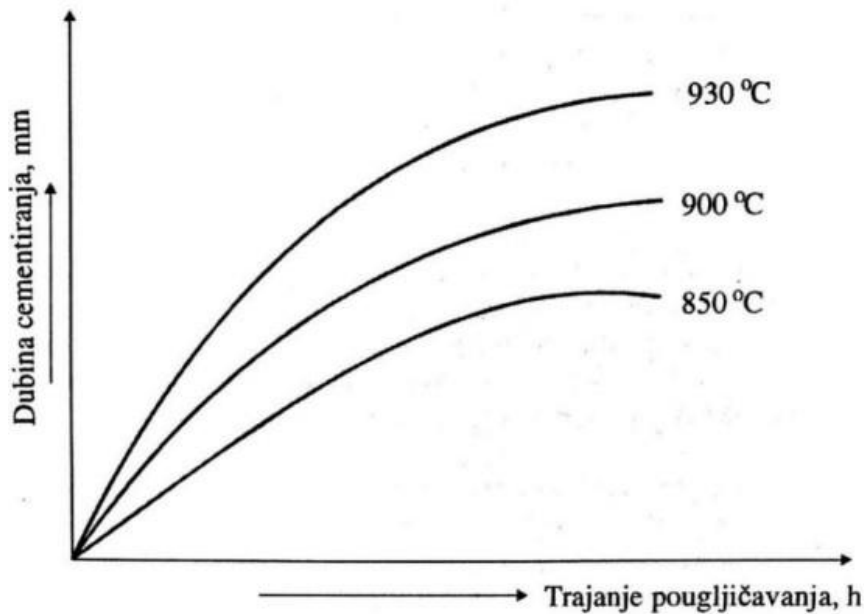
Pri pougljičavanju u tekućem sredstvu, koriste se solne kupke koje se sastoje od rastaljenih soli natrijeva ili barijeva klorida te alkalnih cijanida poput natrijevog cijanida ( $\text{NaCN}$ ), kalijevog cijanida ( $\text{KCN}$ ) i kalcijevog cijanida ( $\text{Ca}(\text{CN})_2$ ). Te kupke rastaljuju se na temperaturama od  $500^\circ\text{C}$  do  $600^\circ\text{C}$ , dok njihove radne temperature variraju od  $820^\circ\text{C}$  do  $950^\circ\text{C}$ . Prije pougljičavanja, dijelovi se moraju prethodno zagrijati.

Solne kupke se mogu podijeliti na dvije vrste ovisno o dodatim kemikalijama:

1. Aktivna kupka: Osim cijanida, aktivne solne kupke sadrže i aktivatore poput barijevog ili stroncijevog klorida. Aktivatori služe za otpuštanje ugljika koji se koristi za pougljičavanje, smanjenje viskoznosti kupke i snižavanje temperature taljenja. Rastaljene soli omogućavaju preciznu kontrolu temperature i kemijskog sastava, što je ključno za postizanje željenih svojstava metala. Također rastaljene soli omogućavaju vrlo efikasan prijenos topline, što omogućava ravnomjerno zagrijavanje metalnih dijelova. Nakon kaljenja, obrasci se drže u spremnicima s otopinom željeznog sulfata 5 do 10 minuta te se ispiru toplom vodom 5 minuta.
2. Neaktivna kupka: Neaktivne solne kupke koriste se za karbonitriranje na temperaturama od 850°C, postižući dubinu pougljičenog sloja do 0,5 mm. Proces je otvoren i u kontaktu sa zrakom, a kontrolira se samo sadržaj cijanida. Ako je sadržaj cijanida nizak, potrebno je nadopuniti kupku svježom smjesom soli.

Dijelovi koji su skloni deformaciji tijekom kaljenja trebaju se pougljičavati na nižim temperaturama. No, treba imati na umu da će proces na nižim temperaturama trajati duže nego na višim temperaturama. Primjerice, pougljičavanje na 890°C trajat će dvostruko duže nego na 930°C, dok će pougljičavanje na 850°C trajati četiri puta duže u odnosu na 930°C, pri istoj dubini pougljičenog sloja.

Na slici 4.4. je prikazano postizanje dubine pougljičenja u odnosu na trajanje postupka i temperature.



Slika 4.4. Postizanje dubine pougljičenja u tekućem sredstvu u odnosu na trajanje postupka

[8]

#### 4.1.3. Pougljičavanje u plinovitom sredstvu

Pri pougljičavanju u plinovitom sredstvu, plinovi se stvaraju kontroliranjem procesa smjese plina u generatorima. Uobičajeno se koriste ugljikov monoksid, vodik i vodena para kao osnovni sastojci smjese plina. Ovaj način pougljičavanja omogućuje vrlo preciznu regulaciju ugljikovog potencijala te se često primjenjuje u velikoserijskoj proizvodnji. Peći koje se koriste u ovom postupku mogu biti prolazne, jamske ili komorne, ovisno o obliku i veličini proizvoda kao i dubini željenoga sloja.

Jedan od primjera gorivih plinova koji se koriste je proces s metanolom. Ukapljeni se metanol uvodi u komoru u kojoj se nalaze čelični dijelovi za pougljičavanje. Metanol isparava na temperaturi pougljičavanja, što oslobađa potrebne plinovite tvari za provođenje procesa. Ako površinski sloj ne uspije apsorbirati sve stvorene atome ugljika, može doći do formiranja čađe.

Pougljičavanje u plinovitom sredstvu obično se odvija u dvije faze:

1. Faza pougljičavanja: Atmosfera sadrži ugljikov monoksid s tlakom većim od parcijalnog tlaka potrebnog za održavanje željenog sadržaja ugljika. Proces

pougljičavanja traje dok se ne postigne nova ravnoteža ili dok se ne postigne visoki sadržaj ugljika u površinskom sloju.

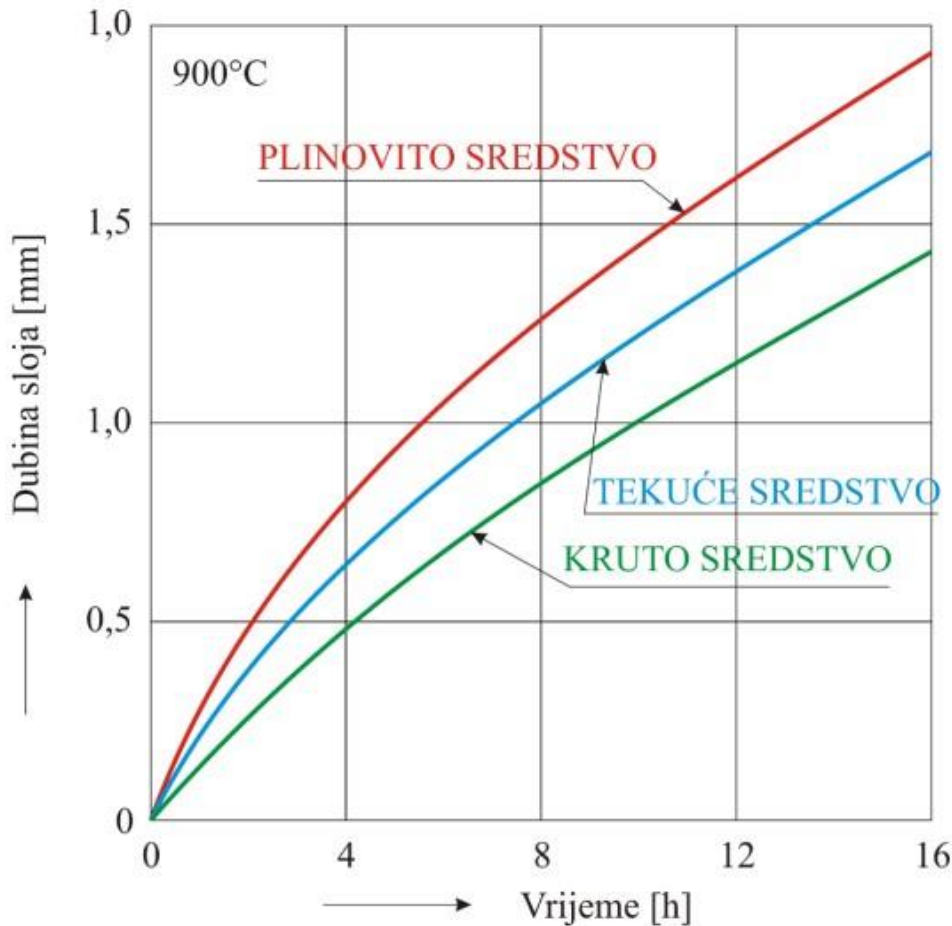
2. Faza gubitka ugljika: Nakon postizanja željene dubine pougljičenja, površinski sloj može izgubiti dio ugljika, smanjujući sadržaj na površini dijela.

Za uspješan proces pougljičavanja ključno je kontrolirati temperaturu, vrijeme i sastav atmosfere. Za brzo i precizno pougljičavanje bez neželjenih efekata preporučuje se održavanje temperature na 925°C. Prije početka procesa, dijelove treba zagrijati na temperaturu pougljičavanja u neutralnoj atmosferi kako bi se osigurala jednakost temperature kroz cijeli presjek obratka prije uvoda plina za obogaćivanje.

Kvalitetu atmosfere za pougljičavanje može se kontrolirati primjenom atmosfere koja sadrži ugljikov monoksid i dušik. Ovisno o potrebama, atmosfere za pougljičavanje mogu se podijeliti na atmosfere na:

1. Bazi metanola i dušika
2. Bazi plina nosača (endoplina)
3. Atmosfere dobivene izravno iz peći

Na slici 4.5. je prikazana usporedba dubine pougljičenog sloja s obzirom na sredstvo pougljičavanja.



Slika 4.5. Ovisnost vremena držanja obratka (na temperaturi pougljičavanja) na dubinu pougljičenoga sloja za različita sredstva pougljičavanja [2]

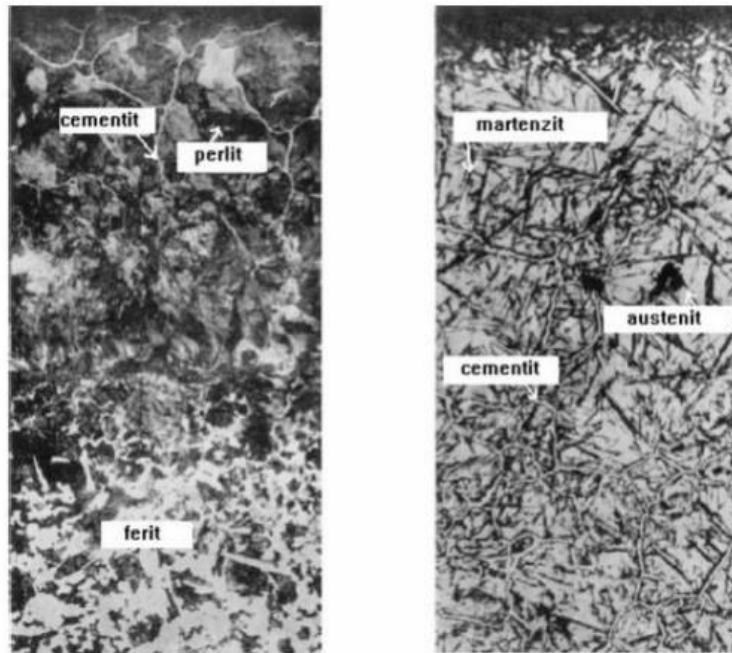
## 4.2. Kaljenje

Nakon procesa pougljičavanja, slijedi kaljenje. Obratci se nakon hlađenja na sobnu temperaturu podvrgavaju kaljenju. Kaljenje uključuje zagrijavanje obratka na temperaturu austenitizacije, zadržavanje na toj temperaturi određeno vrijeme, te naglo hlađenje kako bi se postigla željena tvrdoća. Glavni cilj kaljenja je postizanje tvrde, pretežno martenzitne strukture.

Kod kaljenja nakon pougljičavanja, važno je uzeti u obzir da optimalna temperatura austenitizacije ne može istovremeno zadovoljiti potrebe visokougličnog rubnog sloja i niskouglične jezgre, jer su koncentracije ugljika u tim dijelovima znatno različite. Stoga je odabir temperature austenitizacije često kompromis. Ako su mehanička svojstva površinskog sloja važnija, preferira se niža temperatura austenitizacije. S druge strane, ako su svojstva jezgre

prioritet, odabire se viša temperatura austenitizacije koja je optimalna za kaljenje niskougljične jezgre pougljičenog čelika.

Na slici 4.6. je prikazana struktura cementiranog sloja prije i nakon kaljenja.



*Slika 4.6. Struktura cementiranog sloja prije (lijevo) i nakon (desno) kaljenja*

#### 4.2.1. Direktno kaljenje

Direktno kaljenje je najjednostavniji i najjeftiniji postupak kaljenja. Glavni nedostatak mu je smanjena žilavost obratka. Za izvođenje je potrebno jedno rashladno sredstvo za hlađenje obratka. Postupak se može primjeniti i kod jednostavnijih i manjih obradaka. Uglavnom se primjenjuje kod strojnih dijelova kod kojih je potrebna velika otpornost površinskog sloja na trošenje.

#### 4.2.2. Jednostruko kaljenje

Jednostruko kaljenje je složeniji postupak od direktnog kaljenja, ali su i rezultati kaljenja bolji. Potrebno je obradak nakon pougljičenja polako hladiti do sobne temperature te zatim kaliti.

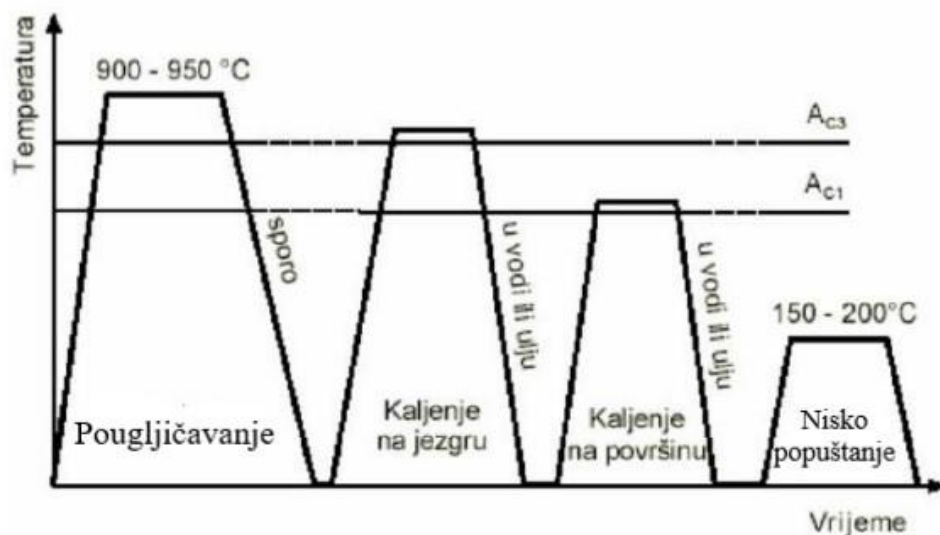
Osnova ovoga postupka je da se nakon procesa pougljičavanja i prije kaljenja provodi postupak u kojem dolazi do pretvorbe austenita te se postiže djelomična prekrystalizacija, odnosno dolazi do usitnjenja zrna.

#### 4.2.3. Dvostruko kaljenje

Za postizanje boljih rezultata cemenitranog sloja koristi se dvostruko kaljenje. Nakon pougljičenja postiže se temperatura koja odgovara temperaturi kaljenja jezgre, a to je od 850°C do 900°C, a cilj je profinjavanje jezgrine strukture. Kod drugoga kaljenja se postižu nešto niže temperature, od 750°C do 800°C, koje su temperature kaljenja površinskog sloja i dolazi do nepotpunog zakaljenja jezgre. Legirani čelici kod ovoga postupka nemaju visoka mehanička svojstva, jer je struktura jezgre nakon drugog kaljenja grubozrnata.

Jednostruko i dvostruko kaljenje u pravilu je skuplje i kompleksnija, pa se u praksi pokušava koristiti što više direktno kaljenje, a njegovi se nedostaci umanjuju korištenjem sitnozrnatih čelika.

Na slici 4.7. prikazan je postupak dvostrukog kaljenja.



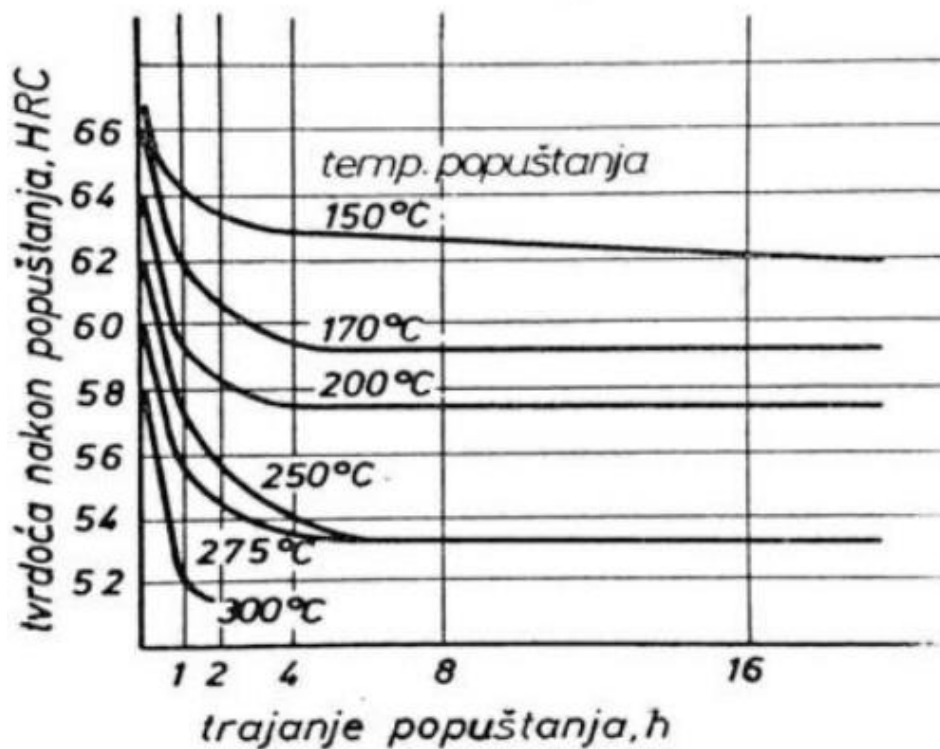
Slika 4.7. Postupak dvostrukog kaljenja [8]



### 4.3. Niskotemperaturno popuštanje

Niskotemperaturno popuštanje je toplinska obrada koja dolazi nakon postupka kaljenja. Sastoji se od zagrijavanja na određenu temperaturu kako bi se povisila žilavost dobivenoga martenzita koji je dobiven kaljenjem te smanjila zaostala naprezanja. Negativna strana ovoga postupka je što se smanjuje tvrdoća dobivena kaljenjem. Niskotemperaturno popuštanje se izvodi u pećima sa kontroliranom atmosferom.

Niskotemperaturno popuštanje se izvodi u rasponu temperatura od 150°C do 200°C. Niskotemperaturno popuštanje smanjuje tvrdoću, mijenja mikrostrukturu i pojavljuje se krhkost. Rezultati niskotemperaturnog popuštanja ovise o temperaturi i vremenu popuštanja. Na slici 4.8. je prikazana ovisnost dobivene tvrdoće o temperaturi i trajanju popuštanja.



Slika 4.8. Ovisnost dobivene tvrdoće o temperaturi i trajanju popuštanja [15]

## 5. ČELICI ZA CEMENTIRANJE

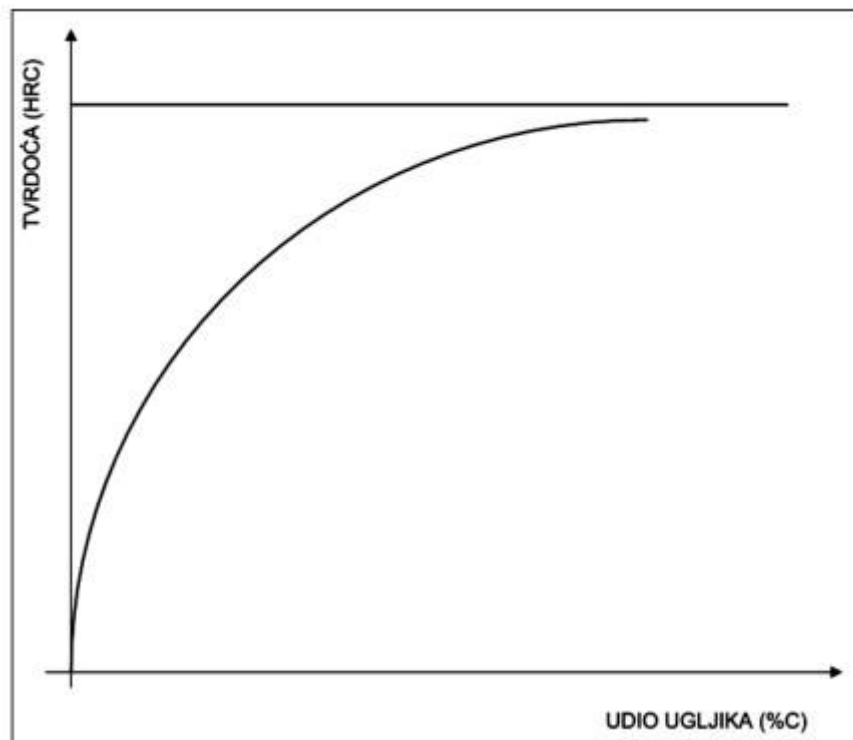
Čelici za cementiranje spadaju u konstrukcijske čelike. Njihovi im se rubni sloj pougljičava nakon obrade odvajanja čestica. Nakon toga slijedi kaljenje kojime se povećava žilavost jezgre te se povećava otpornost na trošenje površinskih slojeva. Zadnje dolazi niskotemperaturno popuštanje.

Konstrukcijski čelici prije postupka pougljičavanja sadrže od 0,1% do 0,2% ugljika te su nelegirani ili niskolegirani. Nakon provedbe pougljičavanja, površinski sloj sadrži od 0,8% do 0,9% ugljika. Tablica 5.1. prikazuje čelike za cementiranje.

Tablica 5.1. Čelici za cementiranje [16]

| Oznaka čelika    |             |                | Sastav "ostalo" % | Tvrdća u isporučenom "BG"-stanju, HB | Slijepo kaljeno $\phi$ 30 mm |             |              | Kaljenje             |                |
|------------------|-------------|----------------|-------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------|--------------|----------------------|----------------|
| Stare norme      |             | HRN EN 10027-1 |                   |                                      | $R_{p0,2}$ MPa min.          | $R_m$ MPa   | $A_5$ % min. | I. jezgre °C         | II. ruba °C    |
| DIN 17006 (VDEh) | HR C.B0.002 |                |                   |                                      |                              |             |              |                      |                |
| C 10             | Č1120       | -              | -                 | 90...126                             | 295                          | 490...640   | 16           | 880...920 voda       | -              |
| C 15             | Č1220       | -              | -                 | 103...140                            | 355                          | 590...790   | 14           | 880...920 voda       | -              |
| Ck 10            | Č1121       | C10E           | -                 | 90...126                             | 295                          | 490...640   | 16           | 880...920 voda       | -              |
| Ck 15            | Č1221       | C15E           | -                 | 103...140                            | 355                          | 590...790   | 14           | 880...920 voda       | -              |
| 17Cr3            | Č4120       | 17Cr3          | -                 | 118...160                            | 440                          | 690...890   | 11           | 870...900 voda, ulje | -              |
| 16MnCr5          | Č4320       | 16MnCr5        | 1Cr               | 140...187                            | 590                          | 780...1080  | 10           | 850...880 ulje       | 810...840 ulje |
| 20MnCr5          | Č4321       | 20MnCr5        | 1,2Cr             | 152...201                            | 685                          | 980...1280  | 7            | 890...920 ulje       | 810...840 ulje |
| 20CrMo5          | Č4721       | -              | 0,25Mo<br>1,1Mn   | 152...201                            | 785                          | 1080...1380 | 7            | 850...880 ulje       | 810...840 ulje |
| 20MoCr4          | Č7420       | 20MnCr4        | 0,4Cr             | 140...187                            | 590                          | 780...1080  | 10           | 890...920 ulje       | -              |
| 15CrNi6          | Č5420       | -              | 1,5Ni             | 152...201                            | 635                          | 880...1180  | 9            | 840...870 ulje       | 800...830 ulje |
| 18CrNi8          | Č5421       | -              | 2Ni               | 170...217                            | 785                          | 1180...1430 | 7            | 840...870 ulje       | 800...830 ulje |

Niskouglični čelici sa udjelom ugljika od 0,1% do 0,2% nisu podložni za povisivanje tvrdoće kaljenjem, zato im se mora povećati udio ugljika na površinskim slojevima kako bi im se povećala otpornost na trošenje. Povećanjem udjela ugljika se povećava i tvrdoća. Taj efekt prikazuje Burnsov dijagram prikazan na slici 5.1.



*Slika 5.1. Burnsov dijagram [17]*

Čelici koji se koriste za cementiranje mogu se podijeliti u tri vrste:

- legirani plemeniti čelici
- kvalitetni čelici
- nelegirani plemeniti čelici

Plemeniti i kvalitetni čelici se razlikuju po udjelu fosfora i sumpora, po kvaliteti obrađene površine, kao i po broju nemetalnih uključaka. Tako plemeniti čelici imaju manje nemetalnih uključaka.

Plemeniti legirani čelici se mogu podijeliti na sljedeće skupine, a to su čelici legirani:

- kromom i niklom
- kromom i molibdenom
- kromom i manganom
- jednostruko legirani kromom

Legirajući elementi imaju ključnu ulogu u modificiranju svojstava čelika tijekom procesa pougljičavanja i kaljenja. Njihova svrha je regulirati udio ugljika na rubu, odrediti dubinu pougljičenog sloja, kontrolirati brzinu pougljičavanja te utjecati na proces prokaljivanja. Među legirajuće elemente koji se koriste kao karbidotvorci ubrajaju se mangan, molibden, vanadij i krom.

Promjer obratka koji se podvrgava cementiranju određuje vrstu čelika koja će se primijeniti. Na primjer, za čelike promjera do 10 milimetara koriste se nelegirani čelici. Za obratke promjera do 80 milimetara preferiraju se krom-molibden čelici, dok se za veće obratke koriste krom-molibden i krom-nikal čelici.

Nelegirani čelici su zakaljivi jedino u vodi i imaju relativno loša mehanička svojstva, pa su prikladni za dijelove s malim dimenzijama i niskim udarnim opterećenjima. Čelici legirani samo kromom mogu se kaljiti i u vodi, ali su bolji izbor za prokaljivanje u ulju zbog visoke otpornosti na trošenje. Oni su osjetljivi na stvaranje karbida u pougljičenom sloju te se preporučuje pougljičavanje u blažim sredstvima.

Mangan-krom čelici, zbog prisustva mangana, manje su skloni stvaranju karbida na rubu. To povećava njihovu prokaljivost i čini ih prikladnima za izradu srednje velikih dijelova poput zupčanika, vratila i osovina alatnih strojeva. Međutim, ova vrsta čelika je osjetljiva na pregrijavanje, stoga se nakon pougljičavanja preporučuje sporo hlađenje i popuštanje.

Molibden-krom čelici imaju posebnu prednost u direktnom gašenju, ali su osjetljivi na stvaranje karbida, što zahtijeva pougljičavanje u blažim sredstvima i kraće vrijeme.

Krom-nikal čelici imaju izvrsnu prokaljivost i koriste se za izradu velikih dijelova te dijelova koji rade u teškim uvjetima. No, njihova sklonost zadržavanju austenita u površinskim slojevima zahtijeva gašenje s nižih temperatura i mogućnost dubokog hlađenja nakon gašenja.

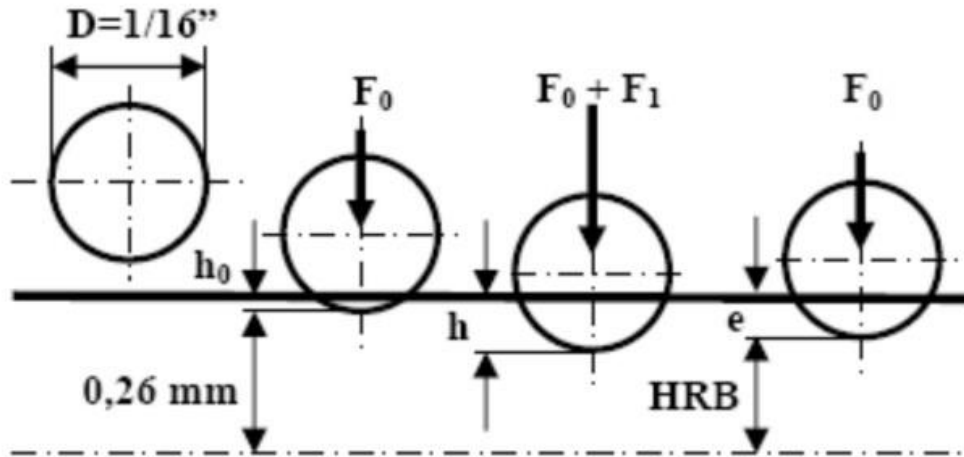
## 6. ISPITIVANJE TVRDOĆE

Cementiranje je proces koji ima za svrhu stvrdnjavanje površinskog sloja materijala. Stoga je ključno imati metode za mjerenje tvrdoće cementiranog sloja. Tvrdoća se definira kao otpornost materijala na prodiranje drugog, znatno tvrdjeg tijela. Također se može opisati kao otpornost materijala na plastičnu deformaciju. Tvrdoća je karakteristika isključivo čvrstih materijala, zato što kapljevine i plinovi nemaju tvrdoću. Razumijevanje tvrdoće materijala ključno je u strojnoj obradi, jer alati moraju imati višu tvrdoću od materijala koji se obrađuje. Dijamant se smatra najtvrdim materijalom.

### 6.1. Ispitivanje tvrdoće po Rockwellu

Rockwellovom metodom mjeri se tvrdoća isključivo metalnih materijala. Penetrator kod Rockwellove metode može biti stožac, pa se onda ta metoda zove HRC metoda (eng. cone – stožac) ili kuglica od kaljenoga čelika i onda se ta metoda zove HRB metoda (eng. ball – lopta). HRB metoda (korištenje čelične kuglice) se koristi kod mekših materijala, dok se HRC metoda (korištenje dijamantnog stošca) koristi kod tvrdih materijala.. Ovom metodom se mjeri dubina penetracije koja se preračunava u tvrdoću po Rockwellu (HR). Dijamantni stožac ima kut od  $120^\circ$  i radijus zaobljenja 0,2 mm. Promjeri čeličnih kuglica iznose od 1/2 inča do 1/16 inča.

Na slici 6.1. je prikazan princip mjerenja HRB tvrdoće.



Slika 6.1. Princip mjerenja HRB tvrdoće [18]

Nedostaci ove metode su relativno slaba selektivnost i niska preciznost od  $\pm 2$  HRC.

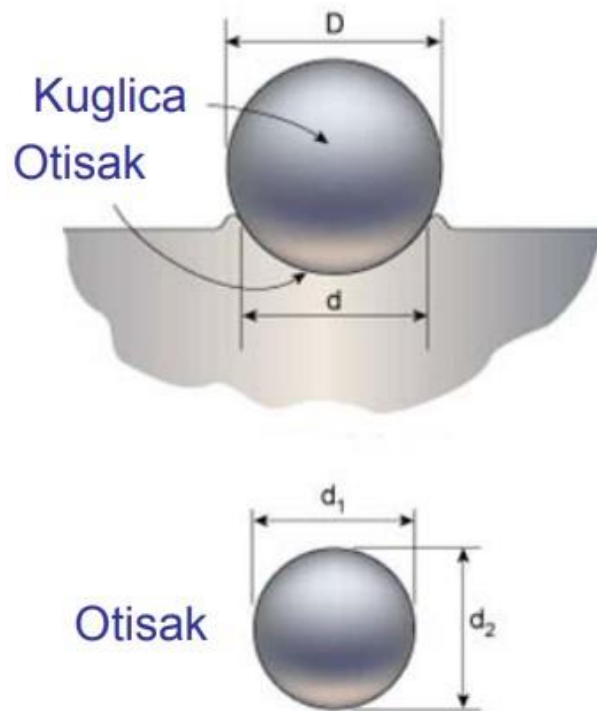
## 6.2. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu

Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom je jednostavan postupak. Metodu je osmislio švedski inženjer J. A. Brinell. Kuglica od kaljenjog čelika, čiji su standardni promjeri  $D$  2,5, 5 i 10 mm, utiskuje se u čistu i ravnu površinu materijala određenom silom  $F$ , nakon čega se kuglica miče, a u materijalu ostaje otisak.

Ova metoda je pogodna za ispitivanje širokoga spektra materijala, kao što su metali i legure, ali zbog velikoga otiska, rezultat predstavlja prosječnu tvrdoću veće površine materijala.

Prednost ove metode je što je jednostavna i omogućava testiranje velikih i grubih površina, dok joj je nedostatak što nije pogodna za veoma tvrde materijale, zato što može doći do deformacije kuglice, kao i za vrlo tanke ili male uzorke zbog velikog otiska.

Na slici 6.2. je prikazan princip mjerenja HB tvrdoće.



Slika 6.2. Princip mjerenja HB tvrdoće [18]

Primjer označavanja tvrdoće po Brinellu:

$$HB\ 5/2500/10 = 300$$

Što znači da tvrdoća po Brinellu iznosi 300, mjerenje je provedeno kuglicom promjera 5 mm, opterećeno masom od 2500 kg u trajanju od 10 sekundi.

Na slici 6.3. su prikazani uzorci nakon ispitivanja tvrdoće metodom po Brinellu.





*Slika 6.3. Uzorci nakon ispitivanja tvrdoće metodom po Brinellu [18]*

Nedostaci ove metode su ti da se ne mogu testirati materijali visoke tvrdoće i otisak je relativno velik, pa funkcionalno ili estetski nagrđuje površinu.

Ispitivanje tvrdoće po Brinellu je jedna od najstarijih i najšire korištenih metoda za određivanje tvrdoće materijala, a i dalje se često koristi zbog svoje pouzdanosti i jednostavnosti.

### **6.3. Ispitivanje tvrdoće po Vickersu**

Vickersova metoda je uvela poboljšanja u odnosu na Brinellovu metodu, čime je omogućila mjerenje tvrdoće i najtvrdih materijala bez ovisnosti o primijenjenoj sili. Prvi nedostatak je riješen korištenjem dijamanta kao materijala za utiskivač. Drugi nedostatak je prevladan promjenom geometrije utiskivača. U Vickersovoj metodi, utiskivač je oblikovan kao istostrana četverostrana piramida s kutom između stranica od  $136^\circ$ .

Odabrani kut utiskivanja omogućuje mjerenje tvrdoće neovisno o primijenjenoj sili, što znači da se može koristiti ista sila za mjerenje tvrdoće kako mekih tako i tvrdih materijala. Također, isti materijal može biti testiran s različitim opterećenjima, omogućujući preciznije mjerenje tvrdoće pri različitim uvjetima.

Kod izračun tvrdoće po Vickersu se pomoću mjernog mikroskopa mjere dijagonale ( $d_1$  i  $d_2$ ) baze piramide. Formula za izračun tvrdoće po Vickersu iznosi:

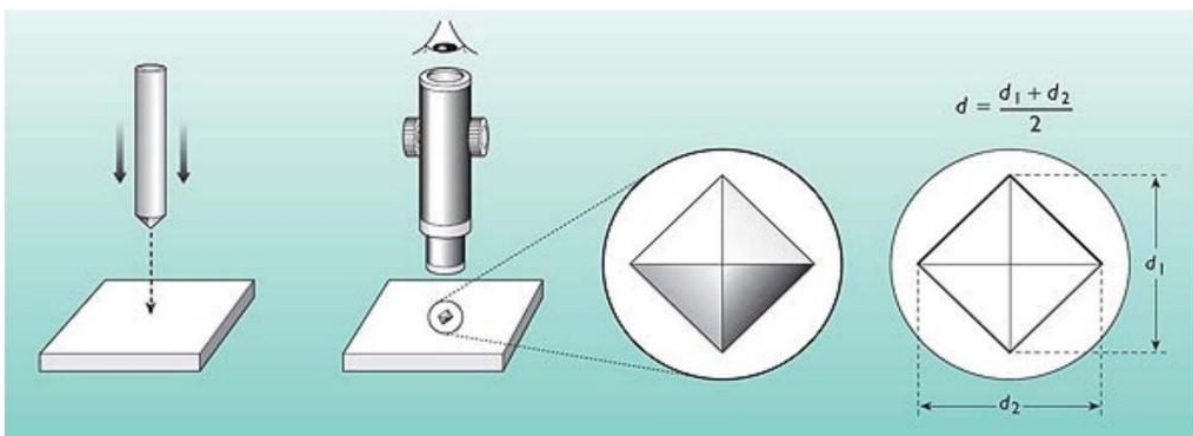
$$HV = 0,102 \cdot \frac{2F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (6.1)$$

gdje je:

$F$  – sila djelovanja na utiskivač

$d$  – aritmetička sredina dijagonala  $d_1$  i  $d_2$

Na slici 6.4. je prikazan princip mjerenja HV tvrdoće.



Slika 6.4. Princip mjerenja HV tvrdoće [18]

Prednost Vickersove metode je ta što je vrlo precizna i omogućuje ispitivanje malih uzoraka i tankih slojeva te se koristi za širok raspon materijala. Također je otisak mali što ne oštećuje površinu.

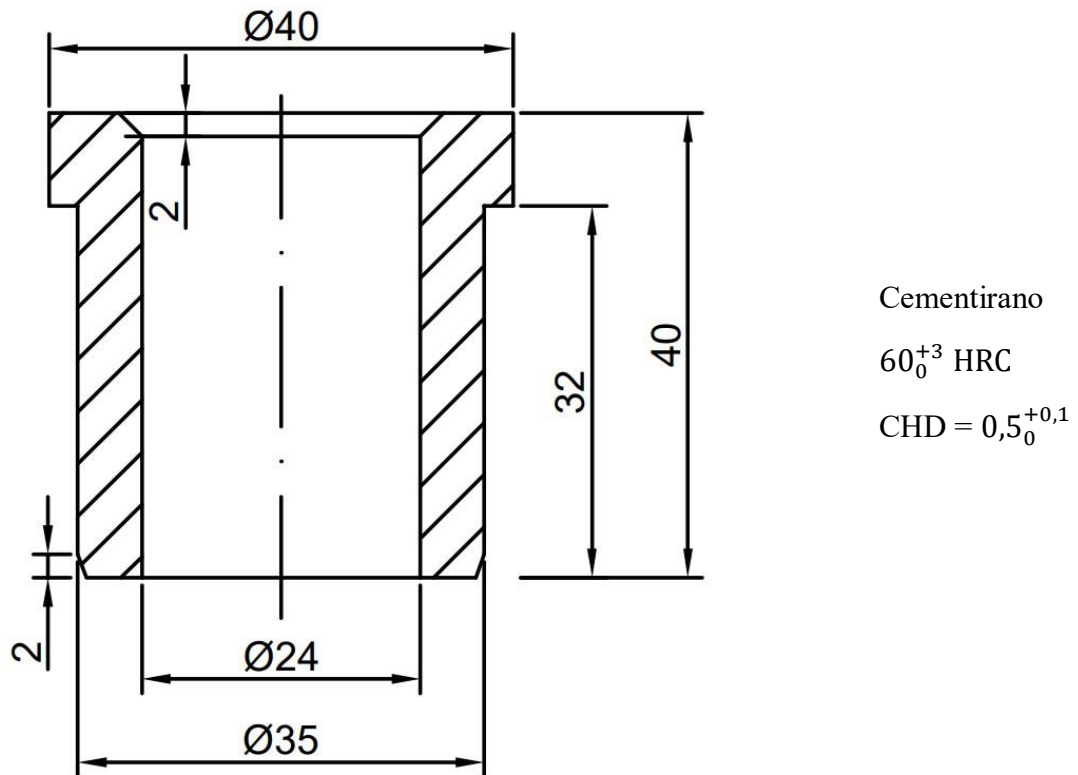
#### **6.4. Ispitivanje tvrdoće po Knoopu**

Knoopova metoda je slična Vickersovoj metodi za ispitivanje metala. Kod Knoopove metode se koristi dijamantni utiskivač romboidnog oblika. Omjer dijagonala utiskivača je otprilike 7:1, gdje se dulja dijagonala koristi za izračunavanje tvrdoće.

Uglavnom se ovom metodom mjere tvrdi i tanki slojevi materijala, gdje se može napraviti vrlo mali otisak pri mjerenju.

## 7. POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA MC.23-ST.72

U ovome poglavlju završnoga rada definirat će se postupak cementiranja zadanog strojnoga dijela. Tražena tvrdoća pougljičenog sloja iznosi  $60^{+3}$  HRC, a tražena dubina pougljičenoga sloja je  $0,5^{+0,1}$  mm. Na slici 7.1. je prikazan strojni dio koji je potrebno toplinski obraditi.



Slika 7.1. Nacrt strojnog dijela MC.23-ST.72

### 7.1. Materijal strojnog dijela MC.23-ST.72

Materijal strojnog dijela MC.23-ST.72 je 20MnCr5 (Č4321). 20MnCr5 je nisko legirani čelik koji ima vlačnu čvrstoću od 980 do 1280 N/mm<sup>2</sup> u slijepo kaljenom stanju šipke promjera 30 mm i otporan je na habanje.

U tablici 7.1. je prikazan propisani kemijski sastav čelika 20MnCr5.

*Tablica 7.1. Propisani kemijski sastav čelika 20MnCr5*

| Čelik   | C %         | Si %  | Mn %      | P %     | S %     | Cr %      |
|---------|-------------|-------|-----------|---------|---------|-----------|
| 20MnCr5 | 0,17 – 0,22 | ≤ 0,4 | 1,1 – 1,4 | ≤ 0,025 | ≤ 0,035 | 1,0 – 1,3 |

## 7.2. Parametri procesa cementiranja strojnog dijela MC.23-ST.72

Za zadani strojni dio potrebno je definirati parametre cementiranja, odnosno pougljičavanja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Strojni dio će biti pougljičavan u krutom sredstvu. Sljedeće je potrebno definirati vrijeme i temperaturu u kojoj će biti držan u peći. S formulom 7.1. možemo izračunati približnu dubinu pougljičenja:

$$\delta = K \cdot \sqrt{t_p} \quad (7.1)$$

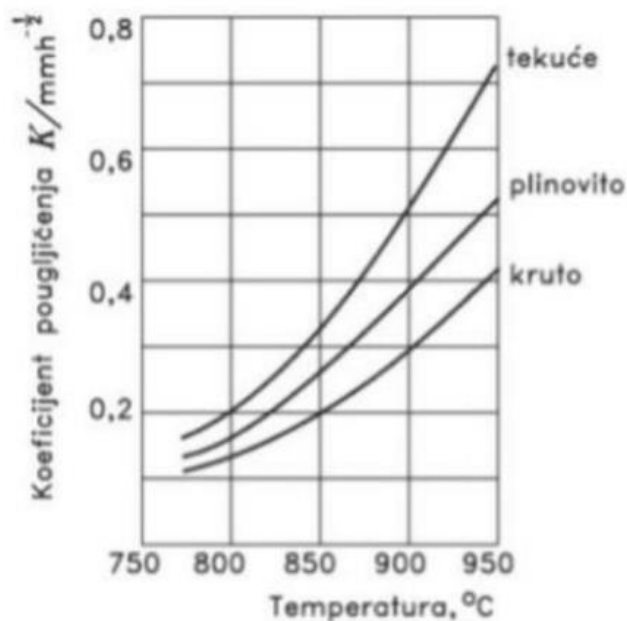
gdje je:

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

$t_p$  – vrijeme trajanja pougljičavanja [h]

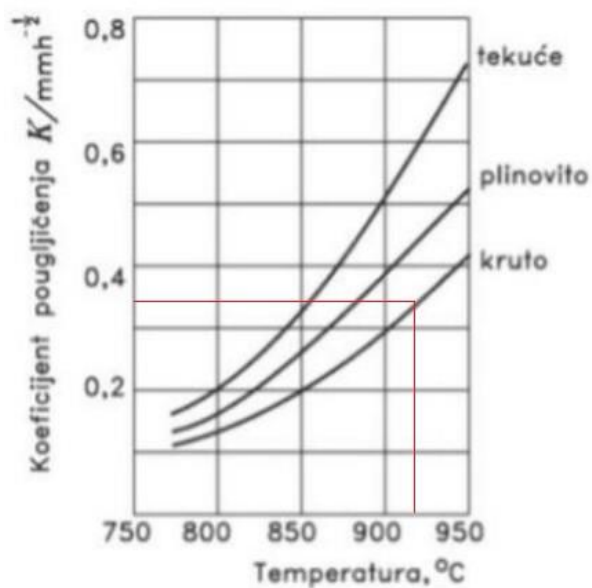
$K$  – koeficijent pougljičavanja [ $\text{mmh}^{-1/2}$ ]

Koeficijent pougljičavanja  $K$  ovisi o temperaturi pougljičavanja i vrsti sredstva u kojemu se pougljičava. Koeficijent  $K$  možemo odrediti iz slike 7.2.



Slika 7.2. Ovisnot koeficijenta pougljičenja o temperaturi i sredstvu pougljičavanja [1]

Za čelik 20MnCr5 preporučena temperatura pougljičenja iznosi od 880°C do 980°C. Odabrat će se temperatura od 930°C. Za vrijeme držanja u peći odabrano je 3 sata. Ovi parametri omogućavaju efikasnu difuziju ugljika na površinski sloj strojnoga dijela, kao i ravnomjernu distribuciju ugljika na površinskome sloju. Kada se odabrani podaci ucrtaju, dobije se koeficijent pougljičavanja  $K$  od 0,34 mmh<sup>-1/2</sup>. Ucertani podaci su prikazani na slici 7.3.



Slika 7.3. Određivanje koeficijenta pougljičavanja

Dobiveni podaci se zatim uvrštavaju u formulu 7.1.

$$\delta = K \cdot \sqrt{t_p}$$

$$\delta = 0,34 \cdot \sqrt{3}$$

$$\delta = 0,59 \text{ mm}$$

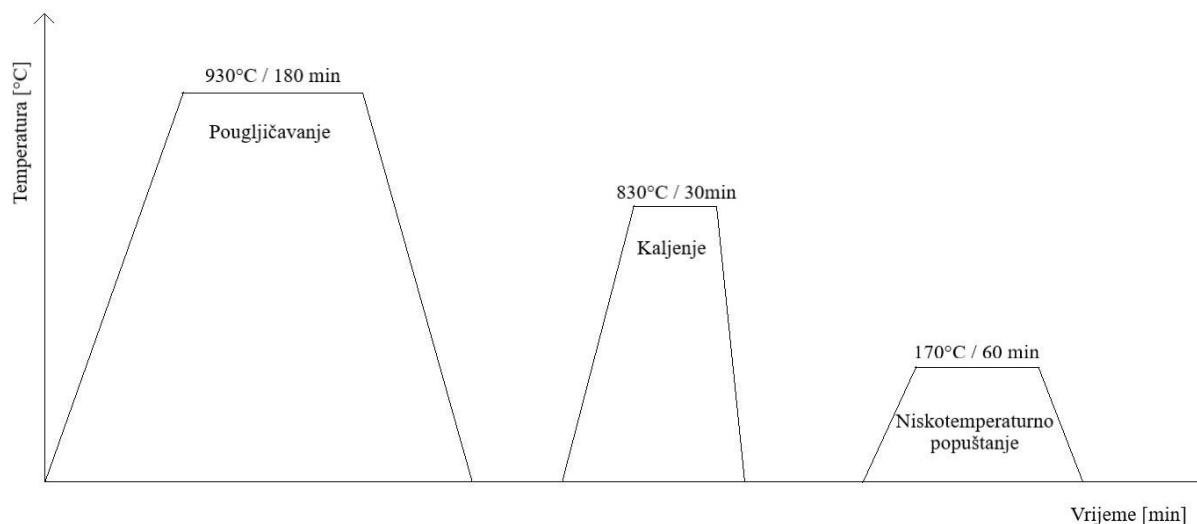
Dobiveni rezultat zadovoljava početni uvjet.

Nakon pougličavanja obradak se vadi iz peći i hladi se na zraku.

Slijedi kaljenje. Odabrana temperatura kaljenja je 830°C, a odabrano vrijeme držanja u peći je 30 minuta. Kao sredstvo za gašenje tijekom kaljenja odabrano je ulje. Temperatura od 830°C je dovoljno visoka dovede do formiranja austenita, a držanje na 30 minuta omogućava potpunu austenitizaciju čelika, što je bitno jer će se znatan dio toga austenita pretvoriti u martenzit kada se bude gasio u ulju.

Za kraj ostaje niskotemperaturno popuštanje. Niskotemperaturno popuštanje se odvija na temperaturama od 150°C do 200°C. Odabrana je temperatura od 170°C. Odabire se da niskotemperaturno popuštanje traje 60 minuta, odnosno 1 sat. Odabrana temperatura od 170°C je dobar izbor zato što nije previsoka da smanji previše tvrdoću, ali dovoljno visoka da smanji zaostala naprezanja.

Na slici 7.4. je prikazan dijagram cementiranja strojnog dijela MC.23-ST.72



*Slika 7.4. Dijagram cementiranja strojnog dijela MC.23-ST.72*

### **7.3. Tehnološka dokumentacija postupka cementiranja**

Potrebno je izraditi tehnološku dokumentaciju za postupak cementiranja. Tehnološka dokumentacija će biti u obliku operacijskih listova. Biti će tri operacijska lista. Na prvome operacijskome listu će biti opisano pougljičavanje, na drugome kaljenje, a na trećem će biti opisano niskotemperaturno popuštanje. Na operacijskim listovima će biti prikazana sredstva i oprema koja su korištena kao i postupci, temperatura i trajanje zahvata. Na tablici 7.2. se vidi operacijski list za pougljičavanje, na tablici 7.3. se vidi operacijski list za kaljenje, a na tablici 7.4. se vidi operacijski list za niskotemperaturno popuštanje.



Tablica 7.2. Operacijski list za pougljičenje strojnog dijela MC.23-ST.72

| Tehnički fakultet Rijeka           |                                       | Izradio: Loreno Božičević |                                |           | List: 1                |
|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------|------------------------|
| Operacijski list: 1                |                                       | Naziv dijela: MC.23-ST.72 |                                |           | Ukupan broj listova: 3 |
| Naziv operacije:<br>Pougljičavanje |                                       | Materijal:<br>20MnCr5     | Operacija broj: 1              |           |                        |
| Postupak:                          | Opis postupka:                        | Količina:                 | Korišteno sredstvo ili oprema: | T<br>[°C] | Trajanje<br>[min]      |
| 1                                  | Punjenje kutije granulatom i obratkom | 1                         | Kutija za pougljičenje         | -         | 3                      |
| 2                                  | Postavljanje kutije u peć             | 1                         | Ručno                          | -         | 1                      |
| 3                                  | Pougljičavanje                        | 1                         | Peć                            | 930       | 180                    |
| 4                                  | Vađenje kutije iz peći                | 1                         | Ručno                          | -         | 1                      |
| 5                                  | Hlađenje                              | 1                         | Zrak                           | 25        | 45                     |
| Kontrolirao:                       |                                       | Datum:                    |                                |           | Σ = 230                |
| Odobrio:                           |                                       |                           |                                |           |                        |

Tablica 7.3. Operacijski list za kaljenje strojnog dijela MC.23-ST.72

| Tehnički fakultet Rijeka  |                    | Izradio: Loreno Božičević |                                | List: 2                |                |
|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------|
| Operacijski list: 2       |                    | Naziv dijela: MC.23-ST.72 |                                | Ukupan broj listova: 3 |                |
| Naziv operacije: Kaljenje |                    | Materijal:<br>20MnCr5     | Operacija broj: 2              |                        |                |
| Postupak:                 | Opis postupka:     | Količina:                 | Korišteno sredstvo ili oprema: | T [°C]                 | Trajanje [min] |
| 1                         | Postavljanje u peć | 1                         | Ručno                          | -                      | 1              |
| 2                         | Kaljenje           | 1                         | Peć                            | 830                    | 30             |
| 3                         | Vađenje iz peći    | 1                         | Ručno                          | -                      | 1              |
| 4                         | Gašenje            | 1                         | Ulje                           | 25                     | 1              |
| Kontrolirao:              |                    | Datum:                    |                                |                        | Σ = 33         |
| Odobrio:                  |                    |                           |                                |                        |                |

Tablica 7.4. Operacijski list za niskotemperaturno popuštanje strojnog dijela MC.23-ST.72

| Tehnički fakultet Rijeka                         |                            | Izradio: Loreno Božičević |                                | List: 3                |                |
|--|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------|
| Operacijski list: 3                              |                            | Naziv dijela: MC.23-ST.72 |                                | Ukupan broj listova: 3 |                |
| Naziv operacije:<br>Niskotemperaturno popuštanje |                            | Materijal:<br>20MnCr5     | Operacija broj: 3              |                        |                |
| Postupak:  | Opis postupka:             | Količina:                 | Korišteno sredstvo ili oprema: | T [°C]                 | Trajanje [min] |
| 1  | Postavljanje obratka 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                     | 15             |
| Kontrolirao:                                     |                            | Datum:                    |                                |                        | Σ = 77         |
| Odobrio:   |                            |                           |                                |                        |                |

#### 7.4. Probno cementiranje strojnog dijela MC.23-ST.72

Probno cementiranje se izvodi kako bi se prije serijske proizvodnje moglo provjeriti jesu li parametri toplinske obrade dobro odabrani.

Cijeli postupak cementiranja strojnog dijela MC.23-ST.72 se proveo na Tehničkom fakultetu Rijeka.

Za početak cementiranja strojni dio se stavlja u posudu sa krutim sredstvom za pougljičavanje, što je u ovome slučaju granulat drvenoga ugljena, koji služi kao izvor ugljika. Zatim se čeka da peć dosegne 930°C. Peć je marke OVER snage 12 kW. Peć u kojem se izvršilo pougljičavanje je prikazana na slici 7.5.



*Slika 7.5. Peć korištena u postupku cementiranja*

Nakon što je peć dosegla 930°C posuda sa strojnim dijelom se stavlja unutra. Obradak u peći stoji 3 sata, odnosno 180 minuta. Nakon 3 sata, obradak se vadi iz peći i hladi na zraku do sobne temperature. Na slici 7.6. je prikazana posuda sa obratkom nakon pougljičavanja u peći.

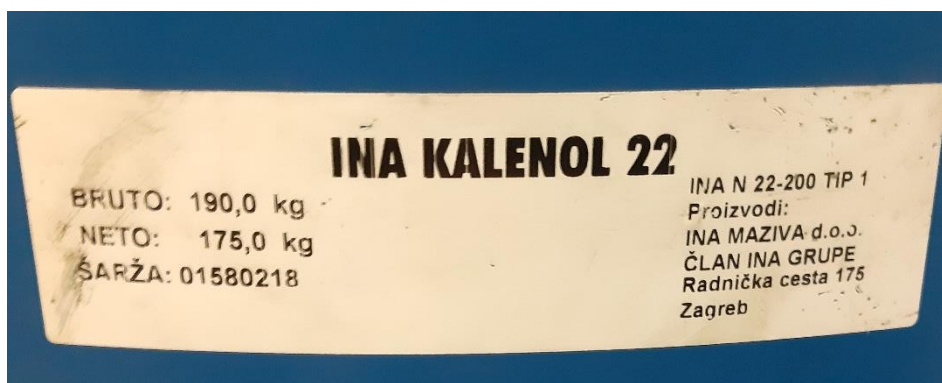


*Slika 7.6. Posuda sa obratkom nakon pougljičavanja*

Nakon što se obradak ohladio do sobne temperature slijedi kaljenje. Kaljenje se provodi u istoj peći gdje se provodilo i pougljičvanje. Ovaj put se peć zagrijava na 830°C i obradak se drži u peći 30 minuta. Nakon 30 minute obradak se vadi iz peći i gasi u ulju. Uljna kada gdje se provelo gašenje je prikazano na slici 7.7. a korišteno ulje na slici 7.8.



*Slika 7.7. Uljna kada za gašenje*



*Slika 7.8. Korišteno ulje za gašenje*

Nakon kaljenja slijedi niskotemperaturno popuštanje. Niskotemperaturno popuštanje se izvelo u peći marke Estherm. Korištena peć je prikazana na slici 7.9.



*Slika 7.9. Peć za niskotemperaturno popuštanje*



Niskotemperaturno popuštanje se izvodilo na 170°C i trajalo je 60 minuta. Nakon 60 minuta se obradak izvadio i hladio na zraku. Na slici 7.10. je prikazan strojni dio MC.23-ST.72 nakon toplinske obrade.



*Slika 7.10. Strojni dio MC.23-ST.72 nakon strojne obrade*

Cilj ovoga završnoga rada je bilo postići tvrdoću strojnog dijela od  $60^{+3}$  HRC. Tvrdoća je mjerena nakon kaljenja i nakon niskotemperaturnog popuštanja. Tvrdoća je mjerena po Rockwelloj C metodi. Nakon kaljenja tvrdoća strojnog dijela MC.23-ST.72 je iznosila 66 HRC, a nakon niskotemperaturnog popuštanja je iznosila 62 HRC, što zadovoljava zadani uvjet.



## 8. ZAKLJUČAK

Čelik je jedan od najvažnijih materijala u strojarstvu. To je legura željeza i ugljika, te ovisno o udjelu ugljika u željezu javljaju se različite mikrostrukture čelika. Među najvažnijim mikrostrukturama čelika su austenit, perlit i martenzit, a za cementiranje je najvažnija pretvorba austenita u martenzit.

Toplinska obrada je postupak kojim se mijenjaju svojstva čelika kako bi se zadovoljili traženi uvjeti. Toplinska obrada se može provesti po cijelome presjeku, a mogu se obraditi i samo površinski slojevi. Kod toplinske obrade površinskih slojeva je cilj povisiti tvrdoću i među tim postupcima spadaju cementiranje, nitriranje, karbonitriranje i boriranje.

Cementiranje čelika je postupak toplinske obrade kojom je cilj povisiti tvrdoću površinskog sloja difuzijom ugljika. Cementiranje se sastoji od pougljičavanja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Pougljičavanje se može izvesti u krutom, tekućem i plinovitom sredstvu. Kaljenje može biti direktno, jednostruko i dvostruko, a sastoji se od zagrijavanja i naglog hlađenja. Niskotemperaturnim popuštanjem se smanjuju zaostala naprezanja, ali se smanjuje i tvrdoća.

Čelici za cementiranje su konstrukcijski čelici i mogu se podijeliti na legirane plemenite čelike, kvalitetne čelike i nelegirane plemenite čelike. Koriste se za izradu zupčanika, osovina i drugih dijelova koji su pod visokim udarnim opterećenjima.

Ispitivanjem tvrdoće se provjerava kolika je tvrdoća materijala. Postoji više metoda za ispitivanje tvrdoće, kao što su: Rockwellova, Brinellova, Vickersova i Knoopova. Vickersova metoda je jedina koja se može primjeniti u znanstveno istraživačkom radu na području materijala, ali se u ovome završnome radu tvrdoća mjerila po HRC.

Cilj ovoga završnoga rada je bio postaviti parametre toplinske obrade za cementiranje strojnog dijela MC.23-ST.72. Tražena tvrdoća je bila  $60^{+3}$  HRC. Nakon pougljičavanja i kaljenja tvrdoća strojnog dijela je bila 66 HRC, a nakon niskotemperaturnog popuštanja je bila 62 HRC, što znači da je postupak toplinske obrade uspješno proveden.

## LITERATURA

- [1] Smoljan, B.: "Toplinska obrada čelika, sivog i nodularnog lijeva", Zagreb, 1999.
- [2] Gabrić, I.; Šitić, S.: "Materijali II", Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [3] "Austenit", s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Austenit>, 10.12.2023.
- [4] "Perlit", s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Perlit>, 16.12.2023.
- [5] "Martenzit", s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Martenzit>, 18.12.2023.
- [6] "Bainit", s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Bainit>, 18.12.2023.
- [7] "Toplinska obrada", s Interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska\\_obrada](https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska_obrada), 20.12.2023.
- [8] Krumes, D.: "Toplinska obrada", Strojarski fakultet u Slavonskom brodu, Slavonski Brod, 2000.
- [9] "Kaljenje", s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kaljenje>, 24.12.2023.
- [10] "Popuštanje", s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Popu%C5%A1tanje>, 26.12.2023.
- [11] "Žarenje", s Interneta, [https://termickaobrada.com/?page\\_id=33](https://termickaobrada.com/?page_id=33), 30.12.2023.
- [12] "Nitriranje (metalurgija)", s Interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Nitriranje\\_\(metalurgija\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Nitriranje_(metalurgija)), 2.1.2024.
- [13] "Karbonitriranje", s Interneta, <https://www.pptmo.rs/karbonitriranje.php>, 3.1.2024.
- [14] "Boriranje", s Interneta, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=8801#clanak>, 3.1.2024.
- [15] Stupnišek, M. i dr.: "Termokemijski postupci", Metalbiro, Zagreb, 1978.
- [16] Novosel, M.; Krumes, D.; Kladarić, I.: "Željezni materijali- Konstrukcijski čelici", Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2013.
- [17] Kostadin, T.: "Čelici i željezni ljevovi", Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2017.
- [18] Pavletić, D.: "Mjerenja i kontrola kvalitete", Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2021.

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 2.1. Dijagram stanja Fe-Fe <sub>3</sub> C .....  | 2  |
| Slika 2.2. $\gamma$ - rešetka ferita .....   | 2  |
| Slika 2.3. $\alpha$ - rešetka austenita.....   | 3  |
| Slika 2.4. Mikrostruktura austenita i cementita .....  | 4  |
| Slika 2.5. TTT dijagram kontinuiranog hlađenja čelika .....  | 5  |
| Slika 2.6. Mikrostruktura perlita .....  | 6  |
| Slika 2.7. Prikaz martenzita kod niskolegiranog čelika.....  | 6  |
| Slika 2.8. Prikaz bainita kod smirenog (dezoksidiranog) čelika .....   | 7  |
| Slika 3.1. Postupak kaljenja čelika .....  | 10 |
| Slika 3.2. Dijagram kontinuiranog hlađenja prikazuje uvjete za stvaranje martenzita ili kaljenje.....  | 10 |
| Slika 3.3. Kaljeni čelik nakon popuštanja.....   | 11 |
| Slika 3.4. Dijagram klasičnog poboljšavanja.....   | 12 |
| Slika 3.5. Dijagram ovisnosti dubine nitriranog sloja (h) o vremenu trajanju procesa nitiranja .....   | 14 |
| Slika 4.1. Postupak cementiranja čelika .....  | 15 |
| Slika 4.2. Struktura i sadržaj ugljika pougljičenog sloja .....  | 17 |
| Slika 4.3. Postupak pougljičavanja u krutom sredstvu .....   | 18 |
| Slika 4.4. Postizanje dubine pougljičenja u tekućem sredstvu u odnosu na trajanje postupka .....   | 20 |
| Slika 4.5. Ovisnost vremena držanja obratka (na temperaturi pougljičavanja) na dubinu pougljičenoga sloja za različita sredstva pougljičavanja ..... | 22 |
| Slika 4.6. Struktura cementiranog sloja prije (lijevo) i nakon (desno) kaljenja.....   | 23 |
| Slika 4.7. Postupak dvostrukog kaljenja.....   | 24 |
| Slika 4.8. Ovisnost dobivene tvrdoće o temperaturi i trajanju popuštanja .....   | 25 |
| Slika 5.1. Burnsov dijagram.....   | 27 |
| Slika 6.1. Princip mjerenja HRB tvrdoće .....  | 31 |
| Slika 6.2. Princip mjerenja HB tvrdoće .....   | 32 |
| Slika 6.3. Uzorci nakon ispitivanja tvrdoće metodom po Brinellu .....  | 33 |
| Slika 6.4. Princip mjerenja HV tvrdoće.....  | 34 |
| Slika 7.1. Nacrt strojnog dijela MC.23-ST.72.....  | 36 |
| Slika 7.2. Ovisnot koeficijenta pougljičenja o temeperaturi i sredstvu pougljičavanja .....  | 38 |
| Slika 7.3. Određivanje koeficijenta pougljičavanja.....  | 38 |
| Slika 7.4. Dijagram cementiranja strojnog dijela MC.23-ST.72.....  | 40 |
| Slika 7.5. Peć korištena u postupku cementiranja .....   | 44 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 7.6. Posuda sa obratkom nakon pougljičavanja .....      | 45 |
| Slika 7.7. Uljna kada za gašenje.....                         | 46 |
| Slika 7.8. Korišteno ulje za gašenje .....                    | 47 |
| Slika 7.9. Peć za niskotemperaturno popuštanje .....          | 47 |
| Slika 7.10. Strojni dio MC.23-ST.72 nakon strojne obrade..... | 48 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 5.1. Čelici za cementiranje.....  | 26 |
| Tablica 7.1. Propisani kemijski sastav čelika 20MnCr5.....                                  | 37 |
| Tablica 7.2. Operacijski list za pougljičenje strojnog dijela MC.23-ST.72.....              | 41 |
| Tablica 7.3. Operacijski list za kaljenje strojnog dijela MC.23-ST.72.....                  | 42 |
| Tablica 7.4. Operacijski list za niskotemperaturno popuštanje strojnog dijela MC.23-ST.72.. | 43 |

## SAŽETAK

U ovome završnome radu opisan je proces cementiranja strojnoga dijela MC.23-ST.72. Završni radi se sastoji od teoretskog dijela, gdje su opisane fazne pretvorbe u čeliku, neki od procesa toplinske obrade i proces samog cementiranja. U praktičnome dijelu postavljeni su parametri procesa cementiranja i opisan je postupak cementiranja.

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

## **SUMMARY**

In this undergraduate thesis is described process of heat treatment of cementation of machine part MC.23-ST.72. Undergraduate thesis has theoretical part, in which basic phase transformations in steel are described, also some heat treatment were described as process of cementation. In practical part, parameters of process of cementation are given and process of cementation is described.

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