

# Postupak toplinske obrade strojnog dijela DTJ.22-PT.83

---

**Jurković, Damir Tin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*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:190:301026>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-11**



*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**

**DTJ.22-PT.83**

Rijeka, rujan 2022.

Damir Tin Jurković

0069087709

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

ZAVRŠNI RAD

**POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA**

**DTJ.22-PT.83**

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

Rijeka, rujan 2022.

Damir Tin Jurković

0069087709

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE**

Rijeka, 16. ožujka 2022.

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

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Damir Tin Jurković (0069087709)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Postupak toplinske obrade strojnog dijela DTJ.22-PT.83 / Heat treating process of workpiece DTJ.22-PT.83**

**Opis zadatka:**

Potrebno je definirati proces toplinske obrade te opisati postrojenje za toplinsku obradu strojnog dijela DTJ.22-PT.83. Potrebno je proanalizirati rezultate toplinske obrade i donijeti odgovarajuće zaključke. Nadalje, potrebno je proanalizirati proces toplinske obrade strojnog dijela DTJ.22-PT.83. 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.

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

*Damir Tin Jurković*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

*Dario Ilić*

---

Izv. prof. dr. sc. Dario Ilić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

*Kristian Lenić*

---

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## IZJAVA

Ja, Damir Tin Jurković, sukladno Pravilniku o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad „Postupak toplinske obrade strojnog dijela DTJ.22-PT.83“ prema savjetima i uz nadzor izv. prof. dr. sc. Daria Iljkića

Damir Tin Jurković

0069087709

---

## ZAHVALA

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Dariu Iljkiću na cjelokupnoj pomoći, vodstvu, savjetima i pristupačnosti tijekom čitave izrade završnog rada.

# Sadržaj

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | UVOD.....  | 1  |
| 2     | ČELIK.....   | 2  |
| 3     | TOPLINSKA OBRADA .....                                       | 4  |
| 4     | MIKROSTRUKTURA ČELIKA.....                                   | 6  |
| 5     | PRETVORBE AUSTENITA.....                                     | 10 |
| 5.1   | Perlitna pretvorba .....                                     | 11 |
| 5.2   | Martenzitna pretvorba.....                                   | 11 |
| 5.3   | Bainitna pretvorba .....                                     | 13 |
| 6     | POBOLJŠAVANJE ČELIKA .....                                   | 15 |
| 6.1.  | Čelici za poboljšavanje.....                                 | 15 |
| 6.2.  | Kaljenje čelika .....  | 21 |
| 6.3.  | Popuštanje čelika .....                                      | 23 |
| 6.4.  | Izotermičko poboljšavanje čelika .....                       | 24 |
| 6.5.  | Rezultati poboljšavanja čelika .....                         | 25 |
| 7     | ISPITIVANJE TVRDOĆE .....                                    | 27 |
| 8     | PARAMETRI AUSTENITIZACIJE .....                              | 31 |
| 8.1   | Temperatura austenitizacije.....                             | 31 |
| 8.2   | Režim ugrijavanja.....                                       | 33 |
| 8.3   | Trajanje grijanja.....                                       | 35 |
| 8.3.1 | Metoda Ordinanz.....   | 35 |
| 8.3.2 | Metoda Smoljnikov .....                                      | 37 |
| 8.3.3 | Metoda Newton .....  | 38 |
| 9     | POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA DTJ.22-PT.83..... | 40 |
| 9.1   | Karakteristike materijala strojnog dijela DTJ.22-PT.83.....  | 41 |
| 9.2   | Parametri toplinske obrade .....                             | 41 |
| 10    | ZAKLJUČAK.....   | 47 |

|                    |    |
|--------------------|----|
| LITERATURA.....    | 48 |
| POPIS SLIKA .....  | 50 |
| POPIS TABLICA..... | 52 |
| POPIS OZNAKA ..... | 53 |
| SAŽETAK.....       | 54 |



# 1 UVOD

Toplinska obrada značajan je način korištenja kontroliranih postupaka zagrijavanja i hlađenja za promjenu svojstava materijala. Korištenje toplinskih obrada započelo je tisućama godina unazad gdje je otkrivanjem osnovnih procesa započeo i tehnološki napredak. Prvobitni procesi bili su vezani uz taljenje, međutim, značajan iskorak dogodio se kada se iz rude uspješno proizvelo željezo što je omogućilo značajnije napretke prilikom raznih izrada. Iako je očito da su današnji procesi toplinske obrade složeniji, temelji su bili postavljeni davno prije, odnosno, i danas se procesi baziraju na osnovnom materijalu, njegovom zagrijavanju do određene temperature i najčešće daljnjem naglom hlađenju. Benefiti korištenja toplinskih obrada su promjena svojstava materijala, mogućnost smanjenja zaostalih naprezanja, povećanje čvrstoće, poboljšanje otpornosti na trošenja, kao i poboljšanje električnih i magnetskih svojstava.

Tema ovog završnog rada je „Postupak toplinske obrade strojnog dijela DTJ.22-PT.83“. U prvom dijelu završnog rada opisana su osnovna svojstva i nastajanje čelika, njegova mikrostruktura te pretvorbe do kojih dolazi prilikom toplinske obrade čelika. Detaljno je opisan postupak poboljšanja čelika, što je i glavna tema rada. Postupak se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja, gdje su osim samog postupka opisani i njegovi rezultati.

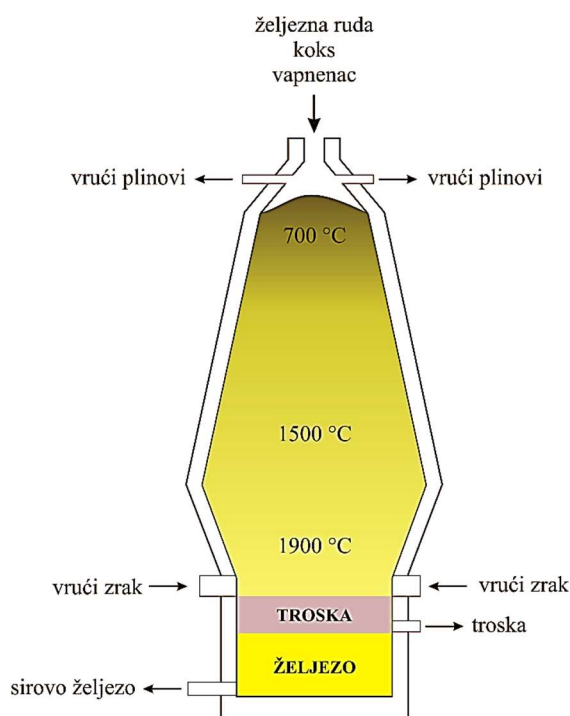
U drugom, eksperimentalnom dijelu završnog rada primijenjeno je stečeno teoretsko znanje kako bi se izračunali svi parametri nužni za toplinsku obradu strojnog dijela DTJ.22-PT.83. Izračunati parametri su u konačnici primijenjeni za formiranje dijagrama poboljšanja za strojni dio.

## 2 ČELIK

Čelik predstavlja metastabilnu leguru željeza i ugljika nastalu iz željeznih ruda. Među željeznim rudama iz kojih nastaje čelik, odnosno prvobitno bijelo sirovo željezo, ubrajamo:

- hematit –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$
- limonit –  $\text{FeO}(\text{OH})$
- magnetit –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$
- pirit –  $\text{FeS}_2$
- siderit –  $\text{FeCO}_3$ .

Proizvodnja čelika započinje u visokim pećima te se temelji na procesima redukcije željezne rude. Redukcija se odvija uz pomoć ugljika iz koksa koji u procesu služi kao sredstvo za redukciju i kao nosilac toplinske energije procesa. S druge strane, vapnenac koji se dodaje služi za čišćenje nečistoća. Proizvod visokih peći je bijelo ili sivo sirovo željezo. Upravo je bijelo sirovo željezo osnovna sirovina za proizvodnju čelika. Sirovo željezo je legura koja najčešće sadrži oko 3,5 %C koju je potrebno smanjiti na 2 ili manje posto ugljika. Za takav proces smanjenja udjela ugljika, ali i fosfora, sumpora, silicija i mangana, koriste se Thomasovi i Bessemerovi konverteri. Nakon što se bijelo sirovo željezo pretali i pročisti, ono se lijeva u kokile za dobivanje ingota čiji sastav odgovara sastavu čelika.. Tako će se u konačnici dobiti pročišćeni čelik koji je upotrebljiv za tehničku primjenu. [1]



Slika 2.1. Visoka peć [2]

Čelik je široko rasprostranjen u raznim industrijama te ga zbog izvrsnih svojstava smatramo za najvažnijim konstrukcijskim i alatnim materijalom u strojarstvu. Neka od najvažnijih svojstava jesu njegova čvrstoća, žilavost, rezljivost, spojivost, oblikovljivost deformiranjem, mogućnost promjene sastava legiranjem, toplinskom obradom ili pak obradom deformiranjem. Osim toga i njihova je cijena relativno niska zbog čega sudjeluju s više od 50 % u ukupnoj proizvodnji svih tehničkih materijala. [2]

Najvažnije podjele čelika vrše se obzirom na: [1]

- udio ugljika
- mikrostrukturu
- namjenu

Prema udjelu ugljika, čelici mogu biti:

- podeutektoidni
- eutektoidni
- nadeutektoidni

Prema tipu mikrostrukture čelici mogu biti [3]

- feritni
- feritno-perlitni
- perlitni
- martenzitni
- bainitni
- austenitni
- ledeburitni itd.

Prema namjeni, čelici mogu biti:

- konstrukcijski
- posebni
- alatni

### 3 TOPLINSKA OBRADA

Toplinska obrada predstavlja postupak unutar kojeg se predmet, u čvrstome stanju, podvrgava djelovanju niza temperaturno-vremenskih ciklusa kako bi se postigla željena mikrostruktura, a time i željena fizička, kemijska i mehanička svojstva.

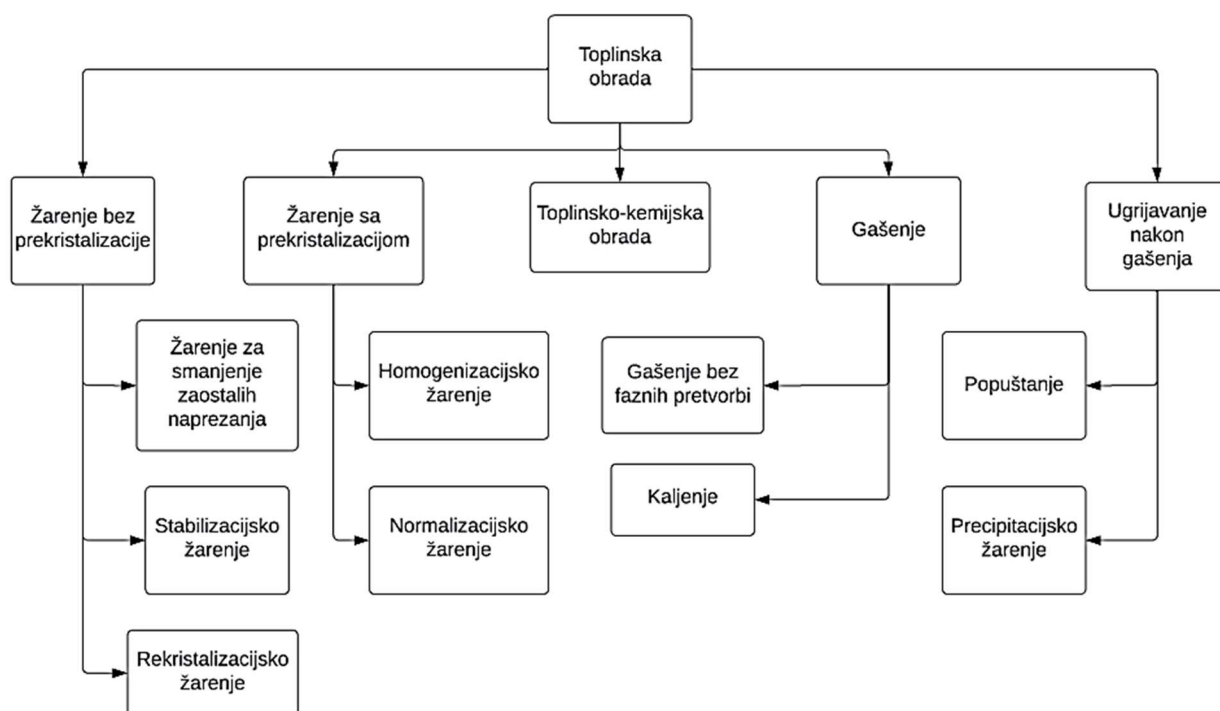
Iz definicije slijedi da su temeljni parametri toplinske obrade:

- temperatura,  $T$  [K],  $\vartheta$  [°C]
- trajanje (vrijeme),  $t$  [s, min, h]

Iz dva navedena parametra izvodi se i treći, a to je brzina ugrijavanja ili brzina ohlađivanja:

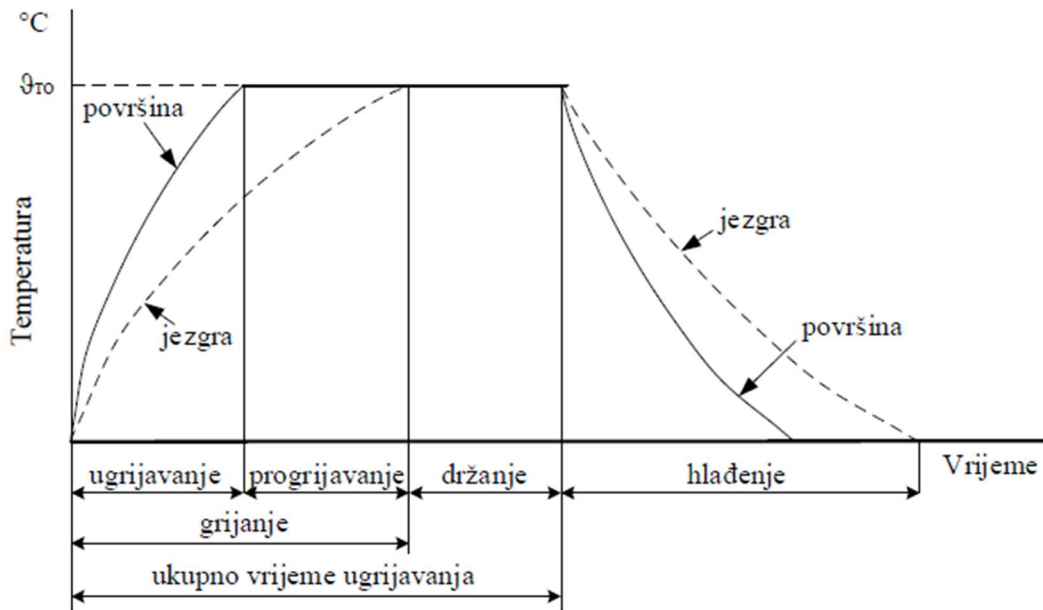
$$\frac{dT}{dt} = v, \quad \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{h}} \right] \quad (3.1.)$$

Temeljna svrha svake toplinske obrade je promjena mikrostrukture što znači da tehnologije lijevanja, kovanja, valjanja i zavarivanja nisu toplinske obrade budući da im je temeljni cilj promjena oblika. Obzirom na temeljni uvjet, toplinske obrade prikazane su na slici 3.1.



Slika 3.1. Vrste toplinskih obrada

Osim osnovne podjele na vrste toplinskih obrada, pomoću osnovnih parametara toplinske obrade formiran je tzv. dijagram postupka ( $\vartheta$ - $t$  dijagram), prikazan na slici 3.2. Dijagramom se prikazuje svaki postupak toplinske obrade. [1]



Slika 3.2.  $\vartheta$ -t dijagram [1]

gdje je:

$\vartheta_{TO}$  – neka temperatura na kojoj se vrši toplinska obrada, [ $^{\circ}\text{C}$ , K]

ugrijavanje – trajanje zagrijavanja do trenutka kada površinski slojevi postignu  $\vartheta_{TO}$

progrijavanje – odsječak vremena od trenutka kada se površinski slojevi ugriju do trenutka kada i slojevi jezgre postignu  $\vartheta_{TO}$

grijanje – ukupno trajanje ugrijavanja i progrijavanja

držanje – trajanje boravka predmeta na  $\vartheta_{TO}$  od trenutka kada je on progrijan do trenutka kada započne ohlađivanje predmeta

hlađenje – trajanje snižavanja temperature predmeta sve dok slojevi jezgre ne dostignu zadanu temperaturu, tj. izjednače je s temperaturom površinskih slojeva i okoliša.

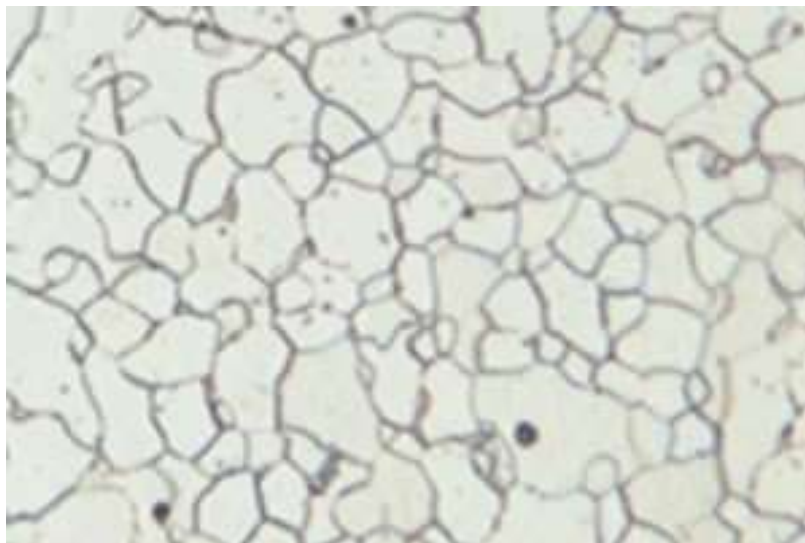
## 4 MIKROSTRUKTURA ČELIKA

Mikrostruktura, kao pojam, označava veličinu, oblik, orijentaciju i raspodjelu kristalnih zrna unutar različitih faza. Važnost bilo koje mikrostrukture očituje se u tome što mikrostruktura može snažno utjecati na fizikalna svojstva nekog materijala kao što su čvrstoća, žilavost, duktilnost, tvrdoća, otpornost na koroziju, ponašanje pri visokim odnosno niskim temperaturama ili otpornost na trošenje. Iz navedenog slijedi zaključak da svojstva materijala proizlaze iz njegove mikrostrukture te da je mikrostruktura temelj na kojem se odabire pogodni materijal za određenu potrebu unutar industrijske prakse. [4]

Kod čelika razlikujemo više mikrostrukture, među kojima su najvažnije:

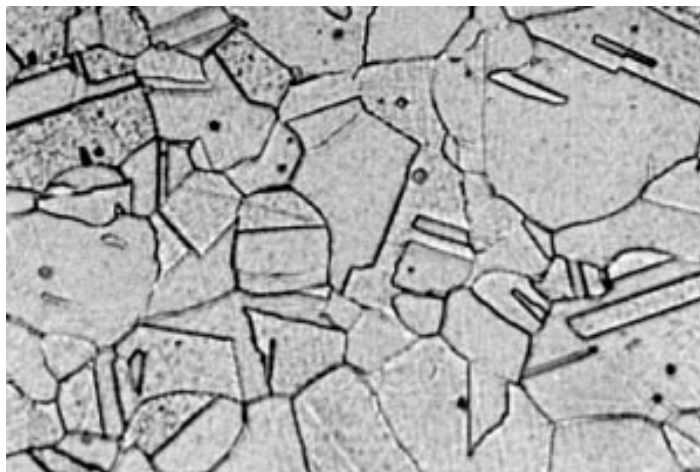
- feritna
- austenitna
- cementitna
- perlitna
- bainitna
- ledeburitna

Feritna mikrostruktura (slika 4.1.) predstavlja čvrstu otopinu koja je nastala otapanjem ugljikovih atoma unutar intersticijskih  $\alpha$ -Fe rešetaka. Strukturno je sličan čistom željezu, ima dobru plastičnost i žilavost, ali su mu čvrstoća i tvrdoća niže, točnije iznose 30-100 HB. Na temperaturi  $A_{C1}$  maksimalna topljivost ugljika je 0,0218%, ali s padom temperature topljivost se smanjuje na 0,0084%. [4]



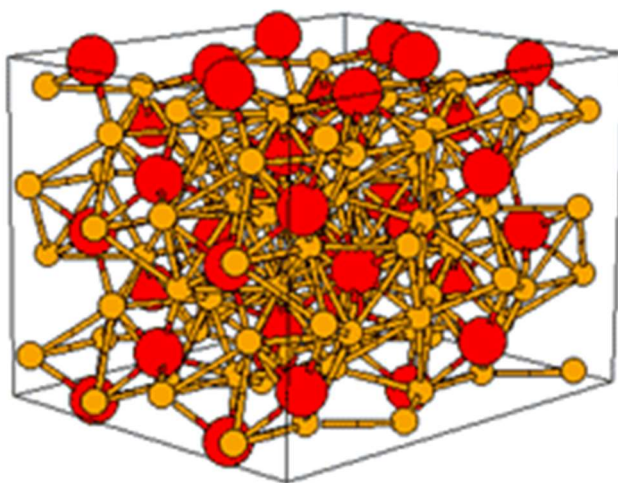
Slika 4.1. Feritna mikrostruktura [5]

Austenit (slika 4.2.) označava intersticijsku čvrstu otopinu nastalu otapanjem atoma ugljika u međuprostoru  $\gamma$ -Fe rešetaka. Maksimalna topivost ugljika u austenitu ostvaruje se na 1148 °C gdje može otopiti 2,11 %, s padom temperature svojstvo austenita da otopi atome ugljika se smanjuje, da bi u konačnici na temperaturi od 727 °C austenit mogao otopiti 0,77 %. Njegova tvrdoća i čvrstoća veća su od ferita, ima dobru žilavost i plastičnost te nije magnetičan. Njegova specifična mehanička svojstva povezana su sa sadržajem ugljika i veličinom zrna te njegova tvrdoća iznosi od 170 do 220 HB. [4]



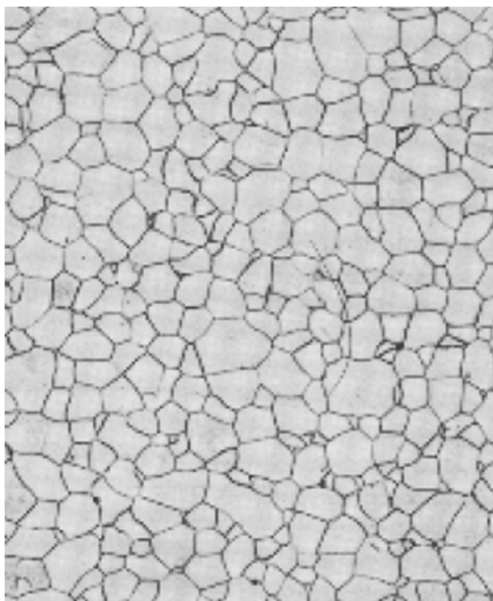
*Slika 4.2. Austenitna mikrostruktura [5]*

Cementit je metalni spoj sintetiziran određenim udjelom ugljika i željeza. Njegova molekulska formula je  $\text{Fe}_3\text{C}$ , dok sadržaj ugljika unutar cementita iznosi 6,69 %. Plastičnost i žilavost cementita gotovo ni ne postoje. S druge strane, lomljivost je vrlo visoka, dok mu tvrdoća iznosi 800 HB, što ujedno označava i najtvrdju fazu čelika. Kristalna rešetka cementita prikazana je na slici 4.3. [4]



*Slika 4.3. Kristalna rešetka cementita [17]*

Mehaničku smjesu ferita i cementita nazivamo perlit (slika 4.4.). Perlit nastaje pri 723 °C sporim hlađenjem. Njegova mehanička svojstva između su feritnih i cementitnih, dakle, visoke tvrdoće i umjerene plastičnosti. Perlit nastaje kao produkt eutektoidne transformacije u čeliku. [4]



*Slika 4.4. Perlitna mikrostruktura [6]*

Bainit (slika 4.5.) je produkt pretvorbe austenita, ispod područja pretvorbe perlita, a iznad temperature  $M_s$ , što dovodi do toga da je bainit mehanička mješavina ferita i cementita, strukture između perlita i martenzita. S obzirom na temperaturu nastajanja, bainit možemo podijeliti na gornji bainit i na donji bainit. Gornji bainit ima malu čvrstoću, ali dobru žilavost, dok s druge strane, donji bainit ima visoku čvrstoću i također dobru žilavost. [4]



*Slika 4.5. Bainitna mikrostruktura [7]*

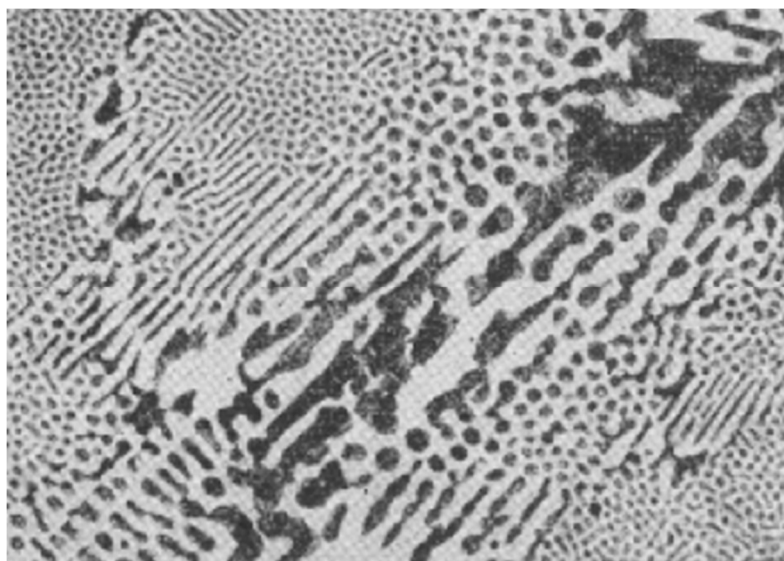


Prezasićena čvrsta otopina ugljika u  $\alpha$ -Fe naziva se martenzit (slika 4.6.). Svojstva su mu takva da ima visoku čvrstoću i tvrdoću, ali mu je plastičnost iznimno mala, stoga ne može podnijeti udarna opterećenja. Nastaje kao produkt brzog hlađenja pothlađenog austenita  $A_p$  između temperatura  $M_s$  i  $M_f$ . U takvim uvjetima i područjima dolazi do toga da atomi ugljika ne mogu difundirati u vremenu iz čega proizlazi da će martenzit imati tetragonalnu rešetku (BCT), koja je nastala preklapanjem austenitne FCC rešetke i zadržavanjem atoma ugljika u čvrstoj otopini. [4]



*Slika 4.6. Martenzitna mikrostruktura [5]*

Ledeburit (slika 4.7.) predstavlja eutektičnu mješavinu austenita i cementita. Ledeburit sadrži 4,3 %C pri temperaturi od 1147 °C. Za nastajanje ledeburita potreban je maseni udio ugljika u željezu od 2,06 %C do 6,67 %C.



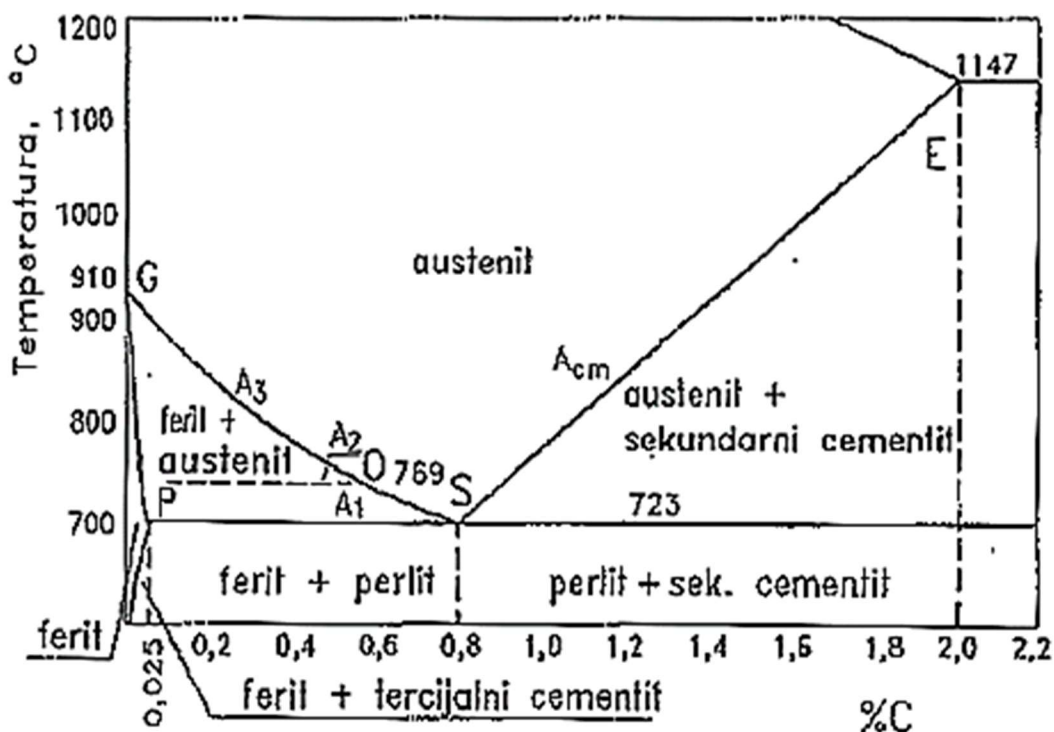
*Slika 4.7. Ledeburit [6]*

## 5 PRETVORBE AUSTENITA

Kako bi mogli definirati pretvorbe austenita, potrebno je prvo definirati njegovo nastajanje. Austenit nastaje iz dvije faze različitih kemijskih sastava, ferita i cementita koji difuzijskim mehanizmom prelaze u treću fazu, austenit. Do ovakve pretvorbe dolazi u trenutku kada se zbog povišenja temperature ostvare kinetički i termodinamički uvjeti koji odgovaraju transformaciji i omogućuju pretvorbu. Osim toga, pretvorba je moguća iz razloga što je slobodna energije austenita niža od slobodne energije feritno-karbidne smjese te postoji dovoljni vremenski period da se difuzijskim mehanizmom formira austenit. [8]

Ohlađivanjem čelika ispod temperature  $A_1$ , austenit postaje sve nestabilniji te takav teži raspadu na niskotemperaturne faze. U ovisnosti o brzini ohlađivanja, pothlađeni austenit  $A_p$ , tj. austenit koji je postojan između  $A_3$  i  $M_s$  temperatura, različitim se mehanizmima raspada na niskotemperaturne faze. [8]

Prilikom analize faznih pretvorbi unutar čelika koristi se dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C odnosno njegov isječak koji prikazuje udio ugljika do 2,03 %C te temperature do 1200 °C , prikazan na slici 5.1. [8]



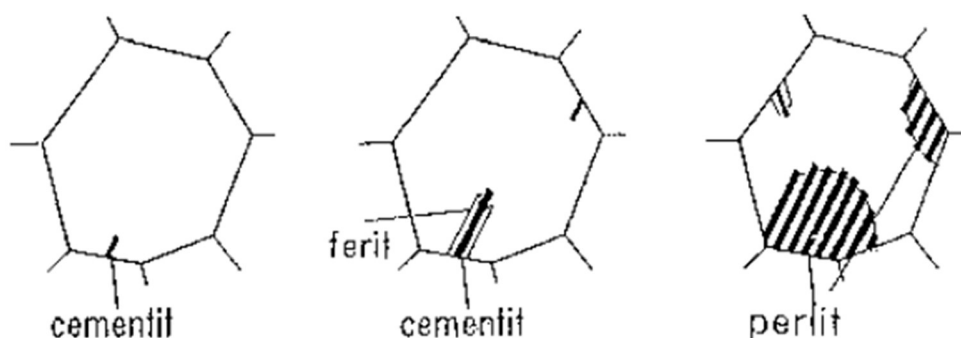
Slika 5.1. Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram [8]

## 5.1 Perlitna pretvorba

U slučaju sporijeg ohlađivanja austenit se raspada na perlit. Vrijedi da se prilikom tvorbe perlita, austenit raspada na dvije nove faze, ferit i željezni karbid. Nastajanje i pretvorba perlita okarakterizirana je potpunom difuzijom nemetalnih i metalnih atoma. [8]

Postoje dva temeljna uvjeta koja trebaju biti zadovoljena za perlitnu pretvorbu. Prvi uvjet je da postoji dovoljna energetska nestabilnost tj. dovoljna razlika između slobodnih energija početnog austenita i konačnog perlita, dok drugi uvjet označuje potrebu za dovoljnom difuzijom atoma kako bi transformacija bila moguća. Također vrijedi da će perlitna pretvorba biti moguća samo ispod temperature  $A_1$ . [8]

Prilikom pretvorbe dolazi i do promjene sustava rešetaka, točnije, austenitna FCC rešetka prelazi u prostorno centriranu kubnu rešetku BCC, uz nastajanje već prethodno navedenog željeznog karbida. [1]



Slika 5.2. Shematski prikaz perlitne pretvorbe [8]

U definiranom području pretvorbe, pretvorba započinje pojavom klica cementita koje rastu prema unutarnjim slojevima austenitnog zrna. U okolini cementita sve se više smanjuje udio ugljika te dolazi do pretvorbe u ferit, kao što je prikazano na slici 5.2. Zaključno će se takvim načinom formirati lamele cementita i ferita unutar austenitiziranog zrna. [8]

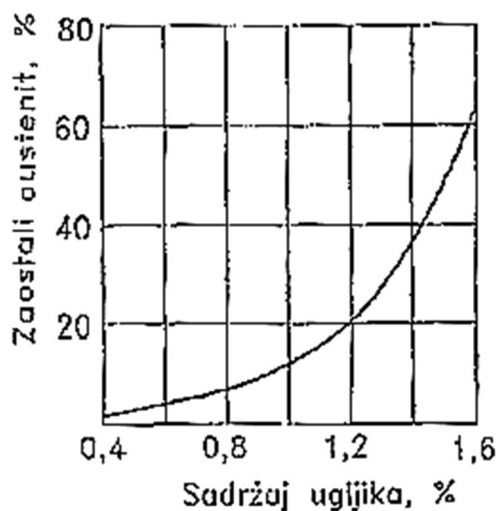
## 5.2 Martenzitna pretvorba

Do martenzitne pretvorbe dolazi pri dovoljno brzom hlađenju čistog željeza tj. pri  $v_{ohl} \approx 600 \text{ }^\circ\text{C/s}$ . Osim uvjeta brzine ohlađivanja, bitna je i činjenica da martenzit može nastati jedino u procesu gašenja austenitiziranog čelika. [8]

Martenzitna pretvorba započinje na temperaturi  $M_s$ , a završava na temperaturi  $M_f$  za koje vrijedi da ne ovise o brzini ohlađivanja, ali ovise o koncentraciji ugljika te koncentraciji legirajućih elemenata u primarnom austenitu. Isto tako vrijedi da utjecaj legirajućih elemenata postoji isključivo kada se legirajući element uspije otopiti u austenitu. Povećana koncentracija mangana, kroma, nikala, vanadija i molibdena snižuju temperaturu martenzitne pretvorbe i povećavaju količinu zaostalog austenita, dok s druge strane, povećanje koncentracije kobalta i aluminija povisuje temperaturu martenzitne pretvorbe i smanjuje količinu zaostalog austenita. [8]

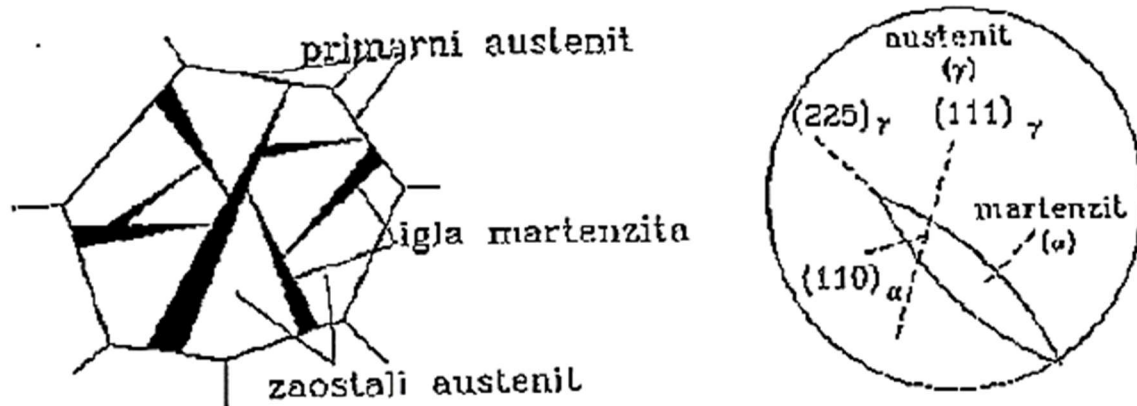
Na temperaturi od oko 911 °C  $\gamma$ -željezo transformira se u  $\alpha$ -željezo. Osim toga, kao i kod perlitne pretvorbe, dolazi do pretvorbe sustava rešetaka, odnosno, plošno centrirana kubična kristalna rešetka  $\gamma$ -željeza transformira se u prostorno centriranu kubičnu kristalnu rešetku  $\alpha$ -željeza. Pretvorba je bezdifuzijska i sastoji se od procesa smicanja, točnije, atomi se u rešetki  $\gamma$ -željeza pomiču uzduž karakterističnih pravaca na način da atomi na kraju zauzmu konačne položaje koji odgovaraju rešetki  $\alpha$ -željeza. Takva promjena rešetaka pri martenzitnoj pretvorbi gotovo je trenutna iz razloga što je brzina rasta kristala martenzita izrazito velika u usporedbi s brzinama ostalih pretvorbi. [8]

Nakon brzog ohlađivanja austenitiziranog čelika, jedan se dio austenita na niskim temperaturama martenzitnom, bezdifuzijskom pretvorbom transformira u martenzit, dok se drugi dio austenita ustaljuje u mikrostrukturi. Na taj način, pri sobnoj temperaturi, formira tzv. zaostali austenit  $A_z$  te se mikrostruktura sastoji kako od martenzita, tako i od zaostalog austenita. Zaostali austenit nije poželjan u martenzitnoj mikrostrukturi, a pogotovo nije poželjan ako postoji kao izdvojena faza. Njegova će količina rasti s koncentracijom ugljika u primarnom austenitu, što je vidljivo iz dijagrama prikazanog na slici 5.3. [8]



Slika 5.3. Ovisnost količine zaostalog austenita u martenzitnoj strukturi o koncentraciji ugljika u primarnom austenitu [8]

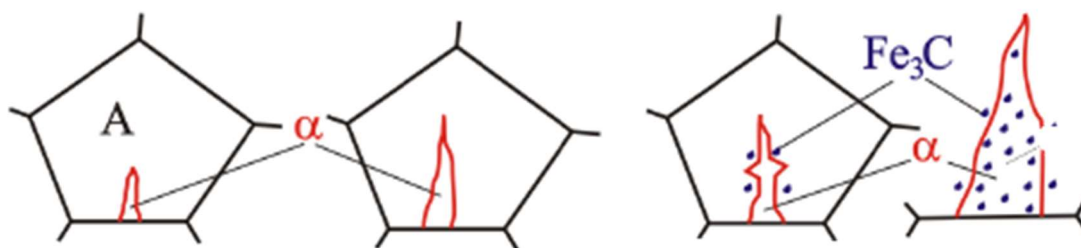
Formirano kristalno martenzitno zrno ima oblik ploče (igle) koje se nalaze u pravilnom položaju iz razloga što između matičnih kristalnih zrna austenita i martenzita postoji orijentacijska ovisnost. Ravnina austenita identična je ravnini martenzita, a pločica martenzita raste po ravnini 225 ili 259, prikazanim na slici 5.4. Između samih iglica martenzita nalazi se zaostali austenit.



Slika 5.4. Martenzitna struktura [8]

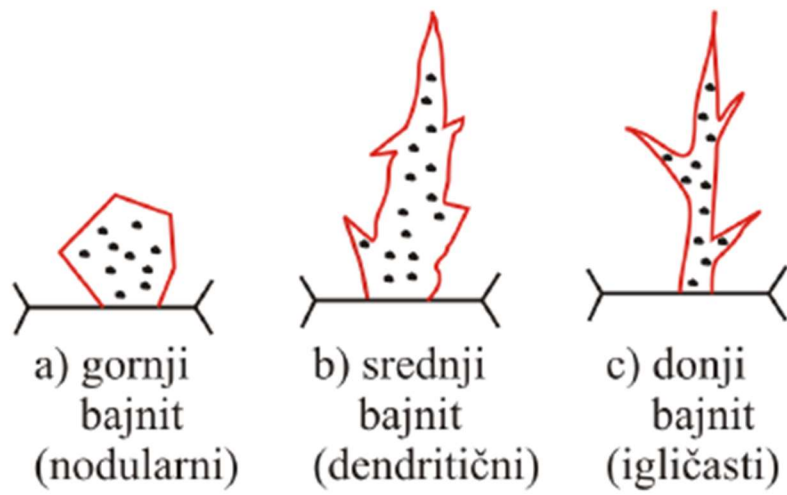
### 5.3 Bainitna pretvorba

Bainitna pretvorba predstavlja pretvorbu koja se dijelom odvija difuzijskim, a dijelom bezdifuzijskim mehanizmom. Pretvorba započinje lokalnom modifikacijom rešetke austenita u ferit duž ravnine najgušće zaposjednutosti gdje se formirane klice razvijaju u svim smjerovima. Rastom brzine ohlađivanja, cementit nastaje isključivo od atoma iz neposredne blizine zbog čega su sitni kristali cementita vrlo fino raspršeni po feritnoj matrici, što je prikazano na slici 5.5. [8]



Slika 5.5. Razvijanje faze bajnita [8]

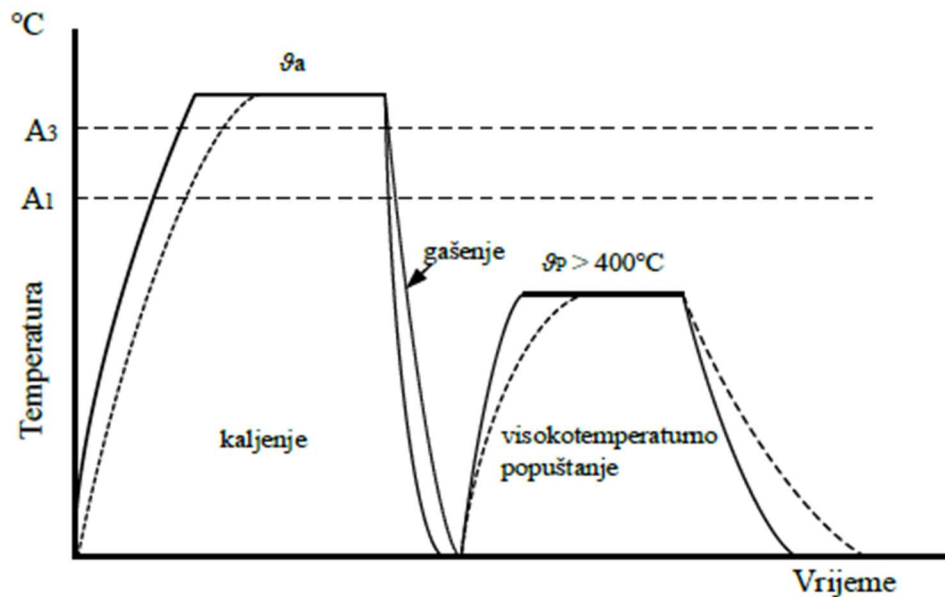
Unutar bainitne pretvorbe pri različitim brzinama ohlađivanja mogu nastati i različiti oblici bainitnih kristala prikazani na slici 5.6. Kuglasti (zrnasti) oblik nastaje pri manjim brzinama ohlađivanja, dendritični oblik nastaje povećanjem brzine ohlađivanja, a kada je brzina ohlađivanja još veća nastaje igličasti oblik. [8]



*Slika 5.6. Oblici bainitnih zrna [8]*

## 6 POBOLJŠAVANJE ČELIKA

Poboljšavanje čelika je postupak toplinske obrade koji se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja, kao što je prikazano dijagramom na slici 6.1. Postupku se podvrgavaju niskolegirani čelici za poboljšavanje s udjelom ugljika od 0,25 do 0,6 %C s osnovnim ciljem postizanja visoke granice tečenja i visoke žilavosti. Poboljšavanje će se najčešće primijeniti za dinamički opterećene elemente strojeva kao što su opruge, zupčanici, vijci, osovine itd. [9]



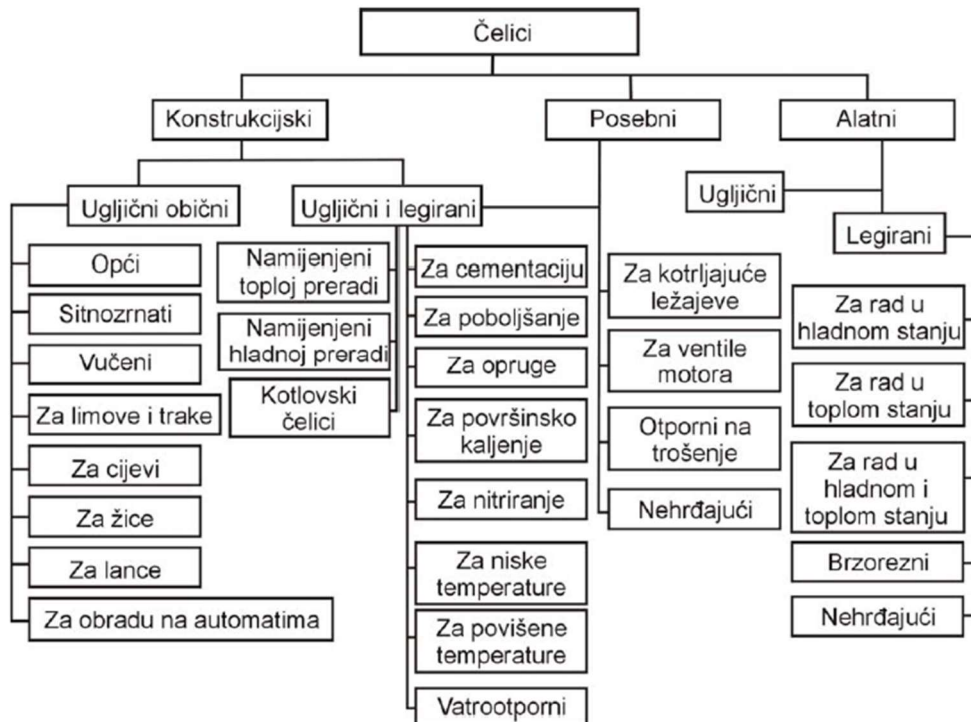
Slika 6.1. Dijagram postupka poboljšavanja čelika [9]

Poboljšavanje čelika dijeli se na:

- klasično poboljšavanje
- izotermičko poboljšavanje

### 6.1. Čelici za poboljšavanje

Prethodno su navedene tri osnovne podjele čelika, prema udjelu ugljika, mikrostrukturi i namjeni. Detaljnija podjela prema namjeni prikazana je na slici 6.2.



Slika 6.2. Podjela čelika prema namjeni [3]

Čelici za poboljšanje spadaju u skupinu nelegiranih ili niskolegiranih konstrukcijskih čelika koji procesom poboljšavanja odnosno kaljenjem i visokotemperaturnim popuštanjem postižu odgovarajuću granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću i žilavost. Čelici za poboljšanje sadrže 0,25 do 0,60 % ugljika koji izravno utječe i na njihovu zakaljivost. [3]

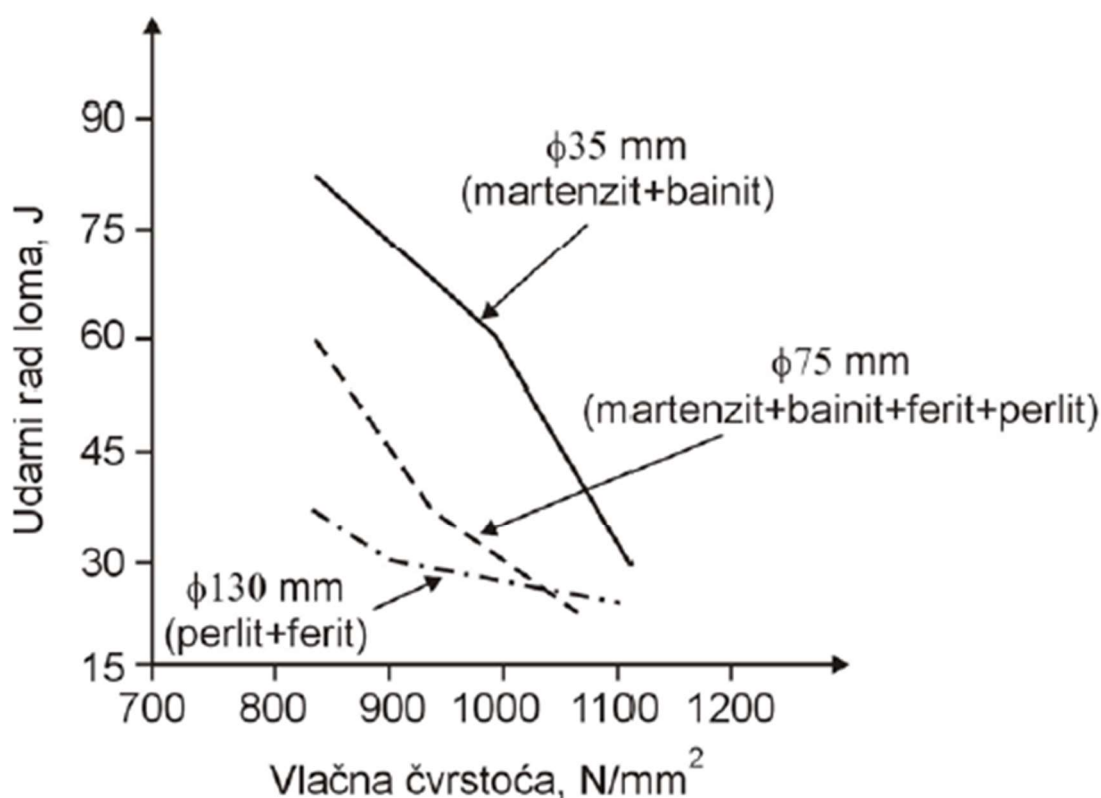
Najčešće se koriste za mehanički i/ili dinamički visokopterećene dijelove strojeva ili nekih uređaja jer su upravo njihova svojstva prikladna za takve uvjete. Nakon prvobitne isporuke, čelici za poboljšanje dalje će se obraditi odvajanjem čestica u mekožarenom stanju, stoga im je uz mikrostrukturu, glavni pokazatelj obradljivosti i najviša dopuštena tvrdoća. [3]

Pravilnim odabirom čelika za poboljšanje, kao i pravilnom provedbom postupka poboljšavanja, moguće se ostvariti visoku granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću, žilavost i dinamičku izdržljivost. Točne temperature pod kojima će se ovi čelici podvrgnuti postupku poboljšavanja odredit će se sukladno tome kakva svojstva se žele dobiti pri završetku postupka, međutim, svakako treba uzeti u obzir da se pri visokotemperaturnom popuštanju kaljenog čelika mikrostrukturno mijenjaju martenzit i donji bainit, dok svi ostali mikrostrukturni konstituenti ostaju nepromijenjeni. Iz toga slijedi da će se idealna jednoličnost svojstava preko čitavog presjeka postići samo potpunim prokaljivanjem. Potpuno prokaljivanje znači da se treba izvršiti gašenje cijelog presjeka



natkritičnim intenzitetom kako bi ostvarili mikrostrukturu koja će u potpunosti biti martenzitna tj. kako mi ostvarili maksimalnu udarnu radnju loma te jednoličnost svih mehaničkih svojstava. [3]

Postoji više vrsta čelika za poboljšanje, međutim, pravilo kojeg se treba držati pri odabiru čelika za poboljšanje govori o tome da čelik koji služi za poboljšanje treba odabrati tako da njegova prokaljivost bude što viša, što dalje znači da je i njegov stupanj legiranosti što viši. S druge strane, ako prilikom odabira promatramo mikrostrukturne konstituente čelika za poboljšanje onda je povoljno odabrati martenzit i donji bainit. U slučaju da je odabran gornji bainit, perlit ili ferit, takav čelik za poboljšanje imao bi puno manju vrijednost udarne radnje loma iz razloga što gornji bainit i perlit imaju nejednolični raspored koji direktno utječe na navedeno svojstvo. [3]



Slika 6.3. Utjecaj mikrostrukture nakon gašenja i promjera čelika 50CrV4 (Č4830) na vlačnu čvrstoću i udarnu radnju loma popuštene jezgre čeličnog proizvoda [3]

Neke od vrsta čelika za poboljšanje prikazani su u tablici 6.1.

Tablica 6.1. Čelici za poboljšanje [3]

| Oznaka čelika |                | Sastav "ostalo" % | Stanje meko žareno HB <sub>max</sub> | Promjer proizvoda 16-40 mm*        |  |                    |             | Promjer proizvoda 160-250 mm*      |  |                    |             | Toplinska obradba, °C/hlađenje |                      |
|---------------|----------------|-------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--|--------------------|-------------|------------------------------------|--|--------------------|-------------|--------------------------------|----------------------|
| DIN 17006     | HRN            |                   |                                      | R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup> | R <sub>p0,2</sub> , N/mm <sup>2</sup> , min. | A <sub>5</sub> , % | KV, J, min. | R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup> | R <sub>p0,2</sub> , N/mm <sup>2</sup> , min. | A <sub>5</sub> , % | KV, J, min. | Kaljenje                       | Popuštanje           |
| C35<br>Ck35   | Č1330<br>Č1331 | -                 | 172                                  | 580-730                            | 365  | 19                 | 41          |                                    |  |                    |             | 840-870<br>voda                | 550-660<br>zrak, peč |
| C45<br>Ck45   | Č1530<br>Č1531 | -                 | 206                                  | 660-810                            | 410  | 16                 | 27          |                                    |  |                    |             | 820-850<br>voda                | 550-660<br>zrak, peč |
| C60<br>Ck60   | Č1630<br>Č1631 | -                 | 243                                  | 780-930                            | 490  | 13                 | -           |                                    |  |                    |             | 800-830<br>voda                | 550-660<br>zrak, peč |
| 28 Mn 6       | Č3135          |                   | 223                                  | 690-840                            | 490  | 15                 | 48          |                                    |  |                    |             | 830-860<br>voda, ulje          | 550-660<br>ulje      |
| 34 Cr 4       | Č4130          |                   | 217                                  | 780-930                            | 590  | 14                 | 48          |                                    |  |                    |             | 840-870<br>voda, ulje          | 540-680<br>ulje      |
| 25 CrMo 4     | Č4730          | 0,2 Mo            | 217                                  | 780-930                            | 590  | 14                 | 55          |                                    |  |                    |             | 850-880<br>ulje                | 540-680<br>zrak, peč |
| 34 CrMo 4     | Č4731          | 0,2 Mo            | 217                                  | 880-1080                           | 665  | 12                 | 50          | 690-840                            | 460  | 15                 | 48          | 840-870<br>ulje                | 540-680<br>zrak, peč |
| 42 CrMo 4     | Č4732          | 0,2 Mo            | 217                                  | 980-1180                           | 765  | 11                 | 41          | 740-890                            | 510  | 14                 | 41          | 830-860<br>ulje                | 540-680<br>zrak, peč |
| 30 CrMoV 9    | C4734          | 0,2 Mo<br>0,15 V  | 248                                  | 1230-1430                          | 1030   | 9                  | 34          | 880-1080                           | 685  | 12                 | 48          | 850-880<br>ulje                | 540-680<br>zrak, peč |
| 50 CrV 4      | Č4830          | 0,15 V            | 235                                  | 980-1180                           | 785  | 10                 | 34          | 780-930                            | 590  | 13                 | 34          | 830-860<br>ulje                | 540-680<br>zrak      |
| 36 CrNiMo 4   | C5430          | 1 Ni<br>0,2 Mo    | 217                                  | 980-1180                           | 785  | 11                 | 41          | 740-890                            | 540  | 14                 | 48          | 830-860<br>ulje                | 540-680<br>zrak      |
| 30 CrNiMo 8   | C5432          | 2 Ni<br>0,4 Mo    | 248                                  | 1230-1430                          | 1030   | 9                  | 34          | 880-1080                           | 685  | 12                 | 48          | 830-860<br>ulje                | 540-680<br>zrak      |

\* Nakon popuštanja pri 600 °C

Manganski čelik za poboljšanje biti će prvenstveno bolje prokaljiv od nelegiranog čelika, ali u obzir treba uzeti činjenicu da će mangan, kao legirajući gamageni element, pospješiti stvaranje grubog zrna, a samim time i pojavu krhkosti popuštanja iz čega slijedi da manganskim čelicima pada svojstvo žilavosti prilikom popuštanja unutar temperaturnog područja od 450 do 600 °C. Iako pojavu krhkosti popuštanja možemo smatrati nedostatkom, ona se može spriječiti brzim i intenzivnim hlađenjem. Obzirom na sve navedeno, manganski čelik za poboljšanje koristit će se za proizvode promjera do 100 mm. Uz dodavanje mangana, može se dodati i 1,2 % silicija čime se dobiva viša granica razvlačenja, a niža sklonost ka pregrijavanju. [3]



Slika 6.4. Čelik za poboljšanje 28Mn6 [10]

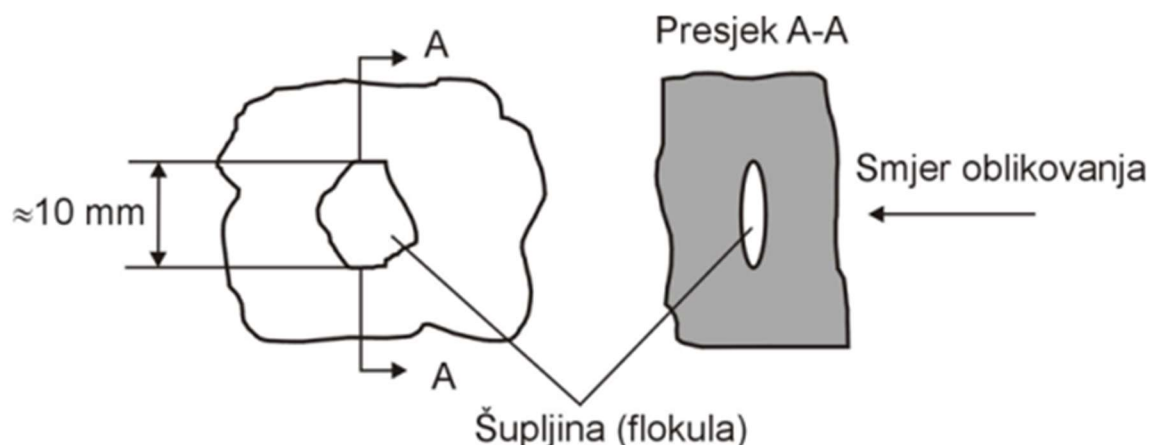
Čelici za poboljšanje mogu biti legirani i kromom. Koriste se za proizvode promjera do 100 mm. Pozitivni efekti korištenja kroma kao legirajućeg elementa su povišenje granice razvlačenja, kao i vlačne čvrstoće. Osim toga, dodavanjem kroma poboljšana je otpornost čelika na djelovanje korozije, kao i otpornost na oksidaciju. Za mangan kao legirajući element je navedeno pospješuje stvaranje grubog zrna, s druge strane, za krom vrijedi da djeluje na usitnjene zrna. Ukoliko se radi o čeličnom proizvodu promjera 60 mm u njegovoj jezgri doći će do transformacije austenita u martenzit i ferit što negativno utječe na žilavost. [3, 11]

Kombinacija legirajućih elemenata krom-molibden ili krom-nikal-molibden pozitivno utječu na prokaljivost čelika za poboljšanje. Služe za rad pri temperaturama do 550 °C. Djelovanje molibdena uspješno osigurava martenzitnu i bainitnu mikrostrukturu kod čeličnih proizvoda. Molibden će posebno dobro utjecati na povećanje otpornosti protiv krhkosti popuštanja, nedostatka koji obilježava manganske čelike. [3]

Osim što se čelici za poboljšavanje razlikuju obzirom na legirajući element, oni se razlikuju i obzirom na namjenu, gdje su dvije osnovne skupine:

- čelici za površinsko kaljenje
- čelici za velike otkovke

Čelici za velike otkovke koriste se za otkovke promjera većeg od 100 mm. Osnovna problematika korištenja čelika ovako velikih promjera je da prilikom hlađenja dolazi do pojave značajnih razlika u temperaturi površine i jezgre što kao posljedicu ima pojavu zaostalih naprezanja, a samim time i mogućih nastajanja pukotina. Navedeni problem može se riješiti visokom čvrstoćom čelika, izostankom segregacija i mikropukotina te jednoličnim svojstvima i mikrostrukturom čelika po čitavom presjeku. Drugi problem čelika za velike otkovke je pojava otopljenog vodika što može uzrokovati stvaranje šupljina u obliku pahuljica tzv. flokula prikazanih na slici 6.5. Do ove pojave također dolazi upravo pri hlađenju gdje je otopljenom vodikom onemogućeno isplinjavanje te se tako nakuplja na defektima. Upravo na tim mjestima dolazi do porasta tlaka, a posljedično do stvaranja konačnih šupljina i pukotina. Problem nastajanja flokula izbjegava se tako da se ostvari visoka čistoća čelika i otplinjeni u vakuumu. [3]



Slika 6.5. Shematski prikaz flokule nastale zbog djelovanja vodika [3]

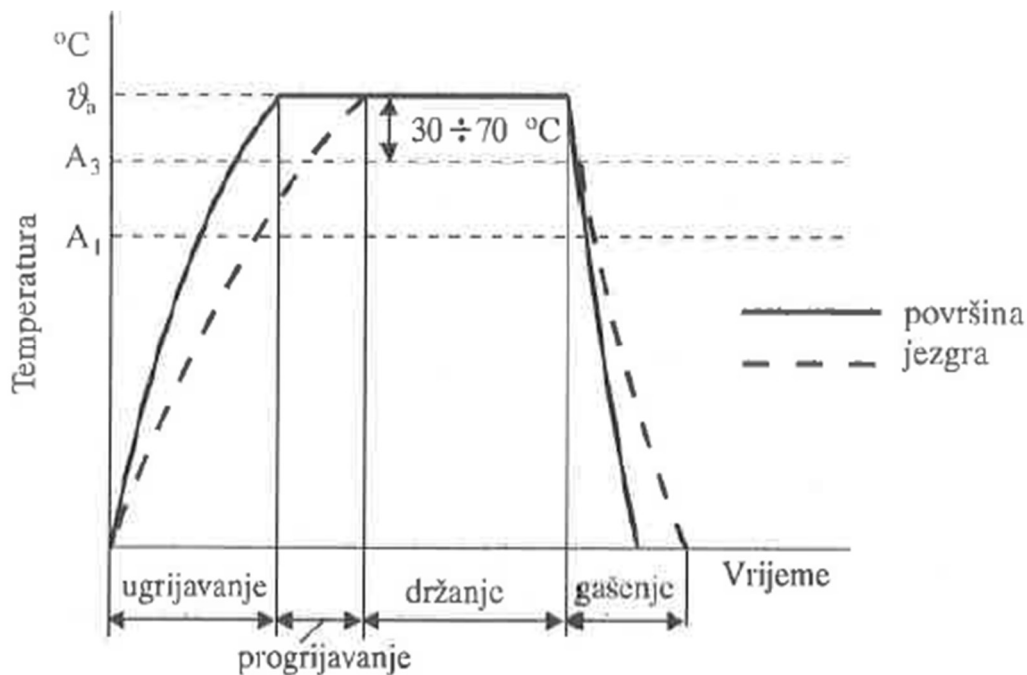
S druge strane, čelici za površinsko kaljenje prvenstveno služe kako bi se postupkom plamenog ili indukcijuskog površinskog kaljenja postigla visoka otpornost na trošenje, kao i dinamička izdržljivost površinskih slojeva čelika za poboljšanje. Svojstva površine takvih čelika slična su cementiranim čelicima, međutim, svojstva sredine presjeka znatno su bolja. U čelike koje služe za ovakav postupak ubrajamo nelegirane ili niskolegirane čelike s oko 0,35 do 0,60 % ugljika, koji zbog njihove toplinske vodljivosti mogu ostvariti brzo zagrijavanja odnosno ohlađivanja, a da unutar toga ne dođe do prevelikih naprezanja i površinskih napuknuća. U tablici 6.2. prikazani su neki od čelika za površinsko kaljenje, njihove oznake, prosječni sastava ugljika, kroma, molibdena u postocima te tvrdoća kaljenih površinskih slojeva:

Tablica 6.2. Čelici za površinsko kaljenje [3]

| Oznaka čelika |       | Prosječni sastav, % |      |      |                   | Tvrdoća kaljenog površinskog sloja, HRC <sub>min.</sub> |
|---------------|-------|---------------------|------|------|-------------------|---|
| DIN           | HRN   | C                   | Cr   | Mo   | P <sub>max.</sub> |   |
| Ck 35         | Č1431 | 0,36                | -    | -    | 0,025             | 51  |
| Ck 45         | Č1531 | 0,46                | -    | -    | 0,025             | 55  |
| Ck 55         | Č1633 | 0,54                | -    | -    | 0,025             | 57  |
| 46 Cr 2       | Č4133 | 0,45                | 0,50 | -    | 0,035             | 55  |
| 41CrMo4       | Č4732 | 0,41                | 1,05 | 0,24 | 0,035             | 54  |

## 6.2. Kaljenje čelika

Kaljenje čelika postupak je toplinske obrade koji se sastoji od 4 faze koje su vidljive na dijagramu prikazanom na slici 6.6. Čelik se početno ugrijava na temperaturu austenitizacije i progrijava kako bi slojevi jezgre postigli temperaturu austenitizacije. Nakon toga se čelik drži na temperaturi austenitizacije kako bi se ugljik i legirajući elementi uspjeli otopiti u austenitu. U zadnjoj fazi, austenitizirani čelik se gasi kako bi se postigla martenzitna mikrostruktura. [9]



Slika 6.6. Dijagram postupka kaljenja podutektoidnog čelika [9].

Na slici 6.6. prikazana je temperatura austenitizacije koja iznosi 30 do 70 °C više od temperature  $A_3$  i koja vrijedi za podutektoidne čelike, međutim, ukoliko se kale nadeutektoidni čelici, temperatura austenitizacije mora iznositi 50 do 70 °C više od temperature  $A_{c1}$ . [8]

Postoje 2 osnovna cilja postupka kaljenja. Prvi cilj je da se čelik zakali, što znači da čelik postigne što višu tvrdoću na površini. Postiziva tvrdoća ovisi o sadržaju ugljika koji se na temperaturi austenitizacije uspio otopiti u primarnom austenitu te o intenzivnosti gašenja, točnije vrijedi da je tvrdoća maksimalna ukoliko je gašenje natkritično. [9]

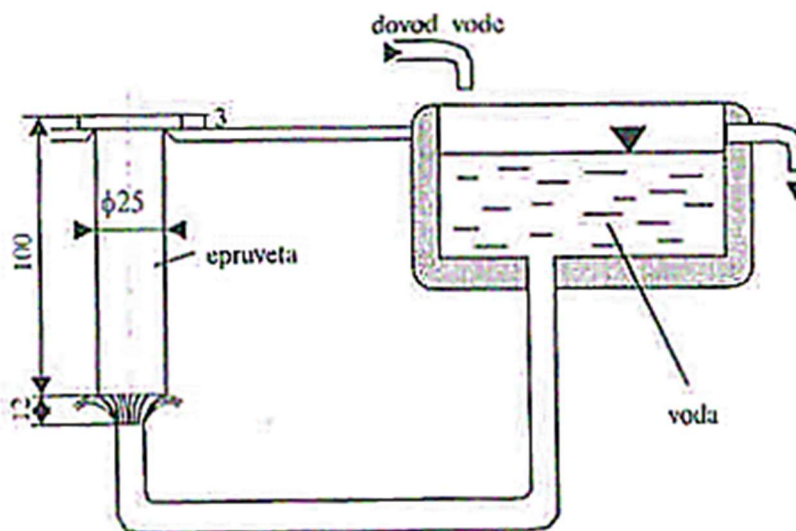
Drugi cilj je da se čelik prokali tj. da se postigne što jednoličnija tvrdoća po poprečnom presjeku koja će biti tim bolja što je kaljeni predmet manjih dimenzija i što je gašenje intenzivnije.

Prokaljivost je od iznimnog značaja za poboljšavanje budući da će konačna svojstva u poboljšanom stanju biti to jednoličnija što je prethodno kod kaljenja ostvarena bolja prokaljivost.

Mjera prokaljivosti je tzv. stupanj prokaljenosti  $S_z$  koji se definiran kao omjer tvrdoće kaljenja na nekom presjeku ( $H_{kalj}$ ) i maksimalno postizive tvrdoće za neki čelik ( $H_{maks}$ ), što je vidljivo i iz sljedećeg izraza: [1]

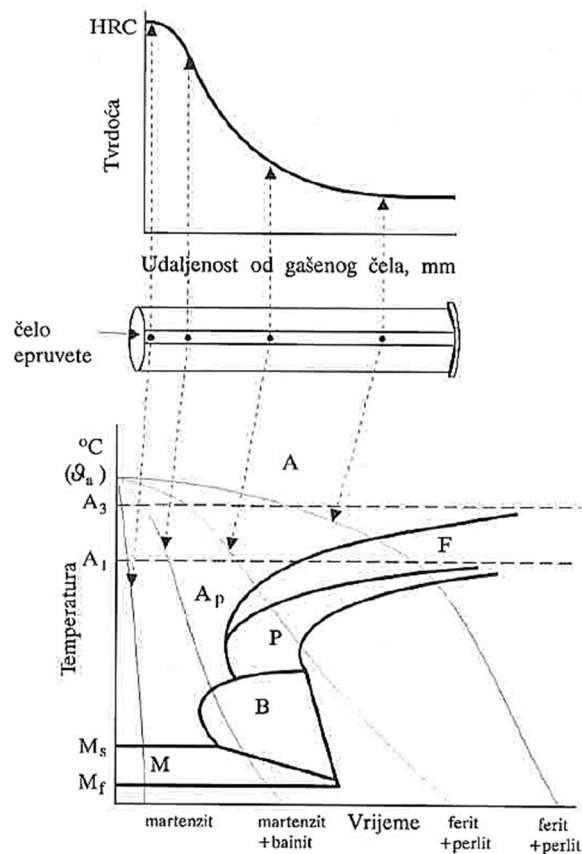
$$S_z = \frac{H_{kalj}}{H_{maks}} \quad (6.1.)$$

Ispitivanje prokaljivost vrši se Jominy-ovim pokusom. Metoda se zasniva na pokusa s jednom epruvetom, propisanih dimenzija i oblika, kojoj se nakon zagrijavanja na temperaturu austenitizacije intenzivno hladi samo čelo, što je vidljivo na slici 6.7. [9]



Slika 6.7. Shema uređaja za ohlađivanje epruvete po Jominyju [9]

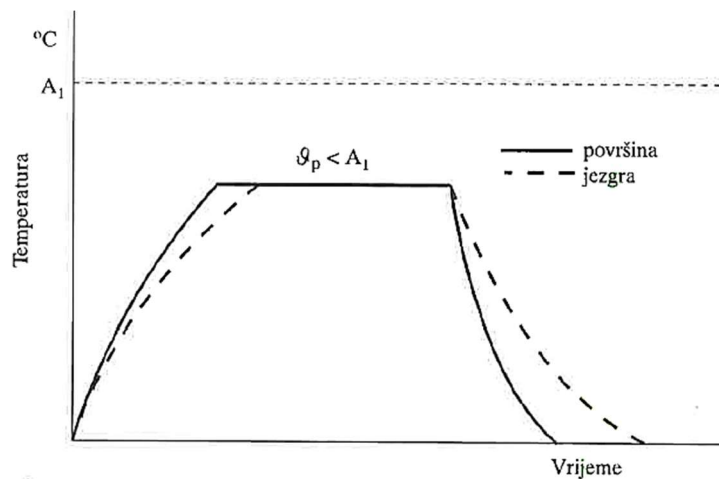
Tako se na probnom uzorku postiže niz različitih brzina ohlađivanja ( $v_{ohl}$ ) u ovisnosti o udaljenosti od gašenog čela. Najintenzivnije gašenje postiže se uz gašeni rub, udaljavanjem se intenzivnost sve više smanjuje što dovodi do toga da se pri različitim udaljenostima od gašenog čela tj. pri različitim brzinama ohlađivanja postižu i različite tvrdoće te mikrostrukture. Na gašenom čelu tvrdoća je najveća, kao i udio martenzita. Sve većim udaljavanjem od gašenog čela, tvrdoća i udio martenzita se smanjuju budući da je brzina ohlađivanja manja što je vidljivo iz slike 6.8. [9]



Slika 6.8. Prikaz krivulja ohlađivanja Jominyjeve epruvete u TTT-dijagramu i tijekom postignutih tvrdoća [9]

### 6.3. Popuštanje čelika

Popuštanje čelika definira se kao postupak ugrijavanja već kaljenog čelika na neku temperaturu ispod temperature  $A_1$  u svrhu povišenja žilavosti martenzita koji se prethodno postigao kaljenjem te sniženja zaostalih naprezanja martenzita. Na slici 6.9. nalazi se opći dijagram popuštanja čelika: [9]



Slika 6.9. Opći dijagram popuštanja [9]

Obzirom na temperaturu popuštanja razlikujemo tri osnovna postupka popuštanja prikazana u sljedećoj tablici:

Tablica 6.3. Postupci popuštanja s pripadajućim temperaturama

| Naziv                          | Temperatura popuštanja  |
|--------------------------------|---|
| Niskotemperaturno popuštanje   | $\vartheta_p < 220 \text{ }^\circ\text{C}$                              |
| Srednjetemperaturno popuštanje | $220 \text{ }^\circ\text{C} < \vartheta_p < 400 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Visokotemperaturno popuštanje  | $400 \text{ }^\circ\text{C} < \vartheta_p < A_1$                        |

Kao što je već prethodno navedeno, za postupak poboljšavanje čelika koristi se visokotemperaturno popuštanje, a razlog tome je dobivanje zrnate eutektoidne strukture.

#### 6.4. Izotermičko poboljšavanje čelika

Izotermičko poboljšavanje postupak je toplinske obrade koje se provodi naglim hlađenjem austenitiziranog čelika, s temperature austenitizacije, u kupki izotermičke temperature  $\vartheta_{iz}$  za koju vrijedi sljedeće: [12]

$$\vartheta_i < \vartheta_{iz} < M_s \quad (6.2.)$$

gdje je:

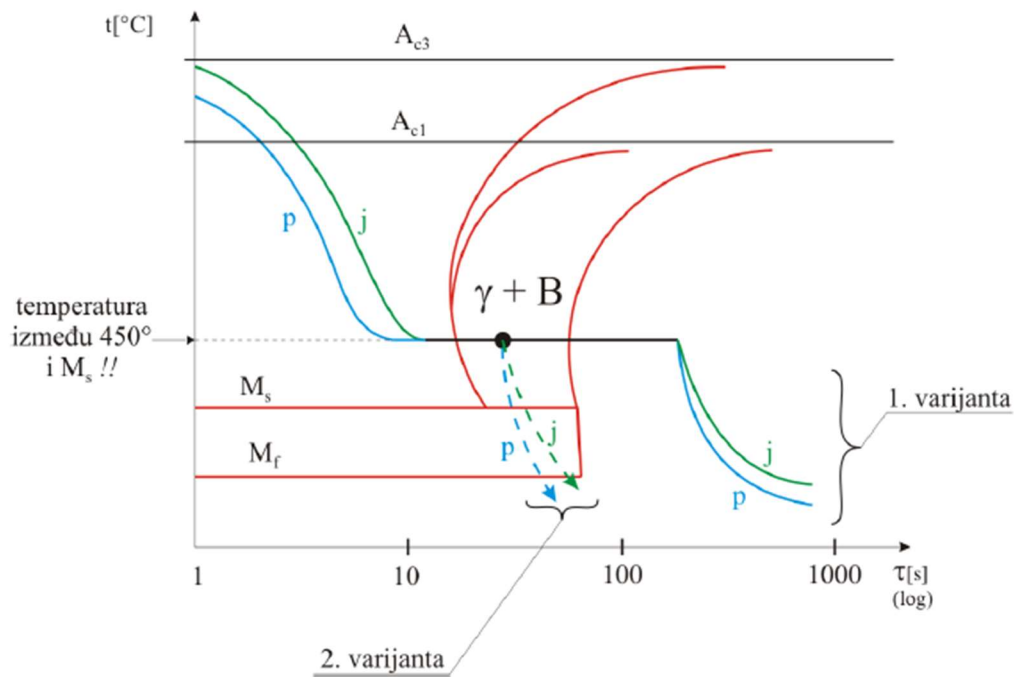
$\vartheta_i$  – temperatura na kojoj je trajanje inkubacije austenita minimalno

$\vartheta_{iz}$  – temperatura izotermičke pretvorbe

$M_s$  – temperatura početka stvaranja martenzita

Austenitizirani čelik zadržava se u kupki sve do potpunog završetka pretvorbe. Postupak je prikazan na slici 6.10





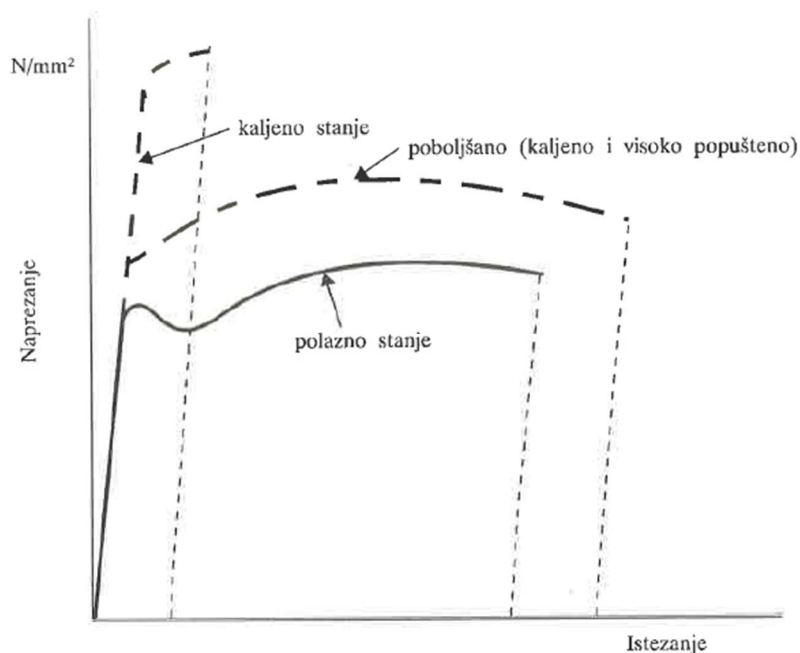
Slika 6.10. Postupak izotermičkog poboljšavanja čelika prikazan u TTT dijagramu [12]

Postoje dvije moguće varijante izotermičkog kaljenja, prikazane na slici 6.10. U prvoj varijanti se dobije samo bainit. Tvrdoća je manja, ali je žilavost dobra. Kod druge se varijante izradak vadi ranije iz kupke, točnije prije završetka pretvorbe austenita te se dalje hladi na zraku. Rezultat druge varijante je smjesa bainita i martenzita čime se ostvaruje veća tvrdoća nego kod prve varijante. [12]

Zaključno, prednosti izotermičkog poboljšavanja su minimalna toplinska naprežanja, kao i konačno ostvarena žilavost nakon toplinske obrade. S druge strane, nedostaci su manja tvrdoća u odnosu na zakaljeni čelik te potreba za dugim trajanjem toplinske obrade. [12]

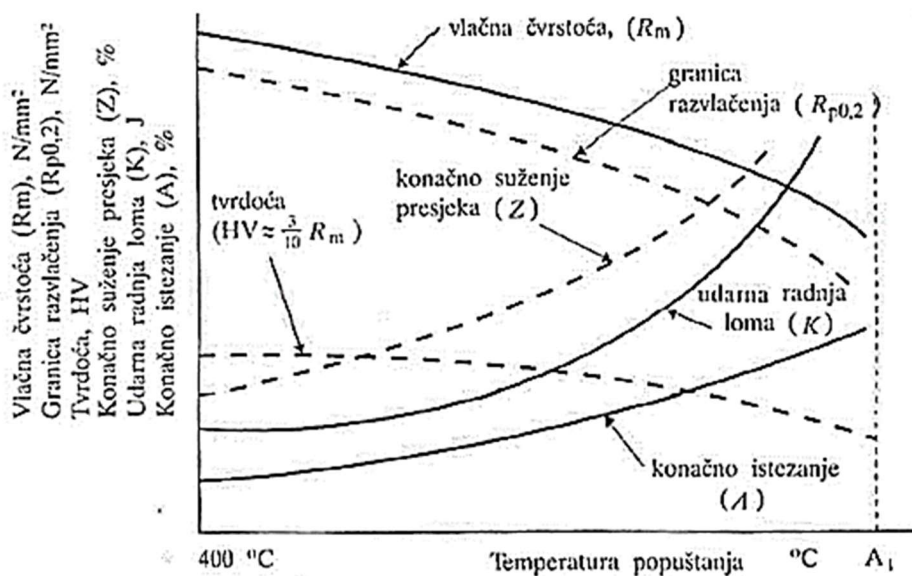
## 6.5. Rezultati poboljšavanja čelika

Čelik u zakaljenom i nepopuštenom stanju ima visoku granicu tečenja, ali mu je duktilnost slaba. Zbog slabe duktilnosti i žilavost je niska. S druge strane, čelik u poboljšanom stanju ima višu granicu tečenja u odnosu na onu prije kaljenja, ali konačno istežanje mu je veće. Iz toga slijedi da se poboljšanom čeliku znatno povećava površina ispod krivulje razvlačenja što ukazuje i na znatno povišenje žilavosti. Navedena usporedba prikazana je dijagramom naprežanje-istežanje prikazanim na slici 6.11. [9]



Slika 6.11. Usporedba dijagram naprezanje-istezanje za pojedina stanja u postupku poboljšavanja čelika [9]

Uz dijagram naprezanje-istezanje, rezultati poboljšavanja prikazani su i na dijagramu poboljšavanja (slika 6.12.), gdje je vidljivo da mehanička svojstva zavise o temperaturama popuštanja.



Slika 6.12. Dijagram poboljšavanja nekog čelika

Zaključno iz dijagrama slijedi da što je viša temperatura popuštanja, tim su niže vrijednosti vlačne čvrstoće, granice tečenja i tvrdoće, a tim su više vrijednosti istezanja i žilavosti

## 7 ISPITIVANJE TVRDOĆE

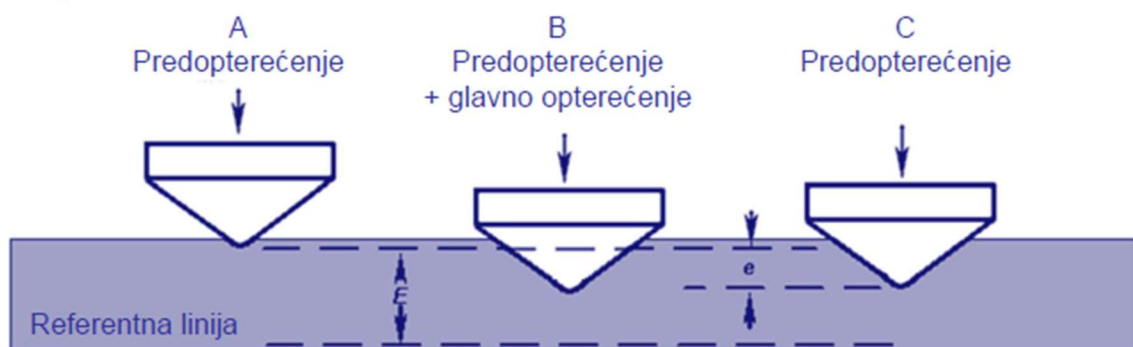
Tvrdoća materijala predstavlja otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog, znatno tvrdog tijela. Tvrdoću možemo definirati i kao otpor prema plastičnoj deformaciji. Tvrdoća se isključivo odnosi na krutine budući da tekućine i plinovi nemaju svojstvo tvrdoće.

Za strukturalnu primjenu materijala nema korisnijeg mjerljivog svojstva od mehaničke tvrdoće. Ispitivanje tvrdoće brzo je i praktično rješenje kojim se materijal u primjeni može sortirati. Iz dobivenih saznanja o tvrdoći materijala vrše se razne kontrole kvalitete te razvijanje novih materijala i proizvoda. Također se mogu dobiti informacije o otpornosti površina na habanje te učinkovitosti korištenja nekog materijala za određenu namjenu. Podaci o tvrdoći neophodni su za strojnu obradu tj. vrijedi da alati moraju biti tvrdi od materijala koji se obrađuje. [13,14]

Kod ispitivanja tvrdoće koriste se sljedeće metode: [15]

- Brinellova metoda (HB)
- Vickersova metoda (HV)
- Rockwellova metoda (HRC)
- Shoreova metoda
- Knoopova metoda
- Leebova metoda

Rockwellova metoda mjeri tvrdoću po principu da se u metal utiskuje stožac ili kuglica od kaljenog čelika. Metoda se može koristiti isključivo za metalne materijale. Za mekše materijale koristi se mala čelična kuglica dok se za tvrde materijale koristi dijamanti stožac. Nakon utiskivanja, mjeri se dubina penetracije. Iz izmjerene dubine, preračunavanjem se u konačnici dobije tvrdoća po Rockwellu. [13]



Slika 7.1. Rockwellova metoda [13]

Izraz iz kojeg slijedi konačna tvrdoća:

$$HR = E - e \quad (7.1.)$$

Gdje  $e$  predstavlja dubinu prodora utiskivača pod utjecajem ukupne sile mjereno u jedinicama po 0,002 mm, dok je  $E$  konstanta, točnije referenta dubina ovisna o vrsti utiskivača te primjerice za dijamantni stožac iznosi 100, a za čeličnu kuglicu 130. [13]

Brinellova metoda također se bazira na utiskivanju. Kao penetrator se koristi kuglica od kaljenog čelika, standardnih promjera  $D$  koji iznose 10, 5 i 2,5 mm. Kuglica od kaljenog čelika utiskuje se u ravnu i čistu površinu materijala određenom silom  $F$  za koju je važno da bude takva da veličina proizvedenog otiska  $d$  bude u sljedećem omjeru s promjerom kuglice: [13]

$$D : d = (0,24 - 0,6)D \quad (7.2.)$$

U slučaju da je promjer otiska  $d$  manji od  $0,24D$  znači da je primijenjena sila  $F$  bila premala. Ukoliko je promjer otiska  $d$  veći od  $0,6D$  sila koju primjenjujemo je prevelika. Ukupno možemo reći da će rezultat mjerenja kod Brinellove metode biti ovisan o primijenjenoj sili te da će izraz za tvrdoću prema Brinellu biti: [13]

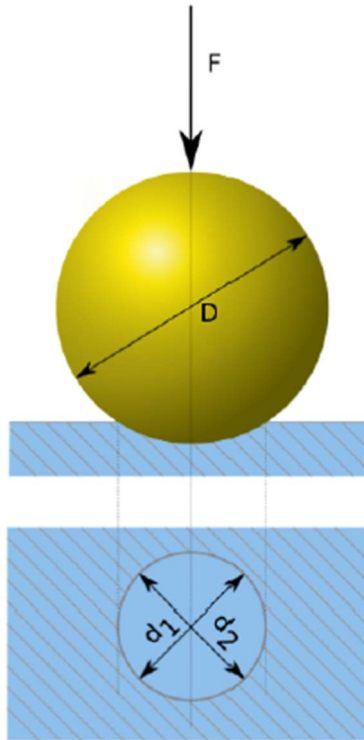
$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (7.3.)$$

gdje je:

$F$  – sila djelovanja na penetrator

$D$  – promjer kuglice

$d$  – promjer otiska na uzorku nakon ispitivanja

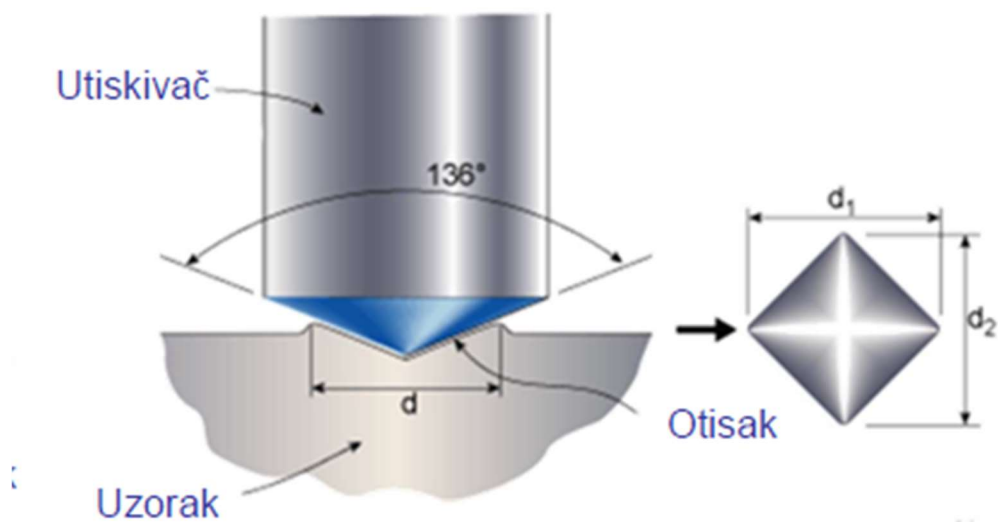


Slika 7.2. Brinellova metoda [13]

Glavni nedostaci Brinellove metode su da se materijali visoke tvrdoće ne mogu mjeriti te otisak koji ostaje nakon utiskivanja je prevelik pa funkcionalno ili estetski nagrađuju površinu zbog čega se razvija nova Vickersova metoda. [13]

Vickersovom metodom otklonili su se glavni nedostaci Brinellove metode odnosno metodom je omogućeno mjerenje i najtvrdih materijala, a sama tvrdoća više nije ovisna o primijenjenoj sili. Problem mjerenja tvrdih materijala otklonjen je korištenjem dijamanta kao materijala za utiskivač. Drugi problem koji se odnosi na primjenu sile, otklonjen je geometrijom utiskivača, točnije, utiskivač kod Vickersove metode je oblika istostrane četverostrane piramide s kutom između stranica od  $136^\circ$ . Tako odabrani kut utiskivanja omogućuje da izmjere vrijednosti tvrdoće budu neovisne o primijenjenoj sili odnosno tvrdoća mekih i tvrdih materijala može se izmjeriti primjenom iste sile, ali isto tako se tvrdoća istog materijala može mjeriti s različitim opterećenjima. Konačno se tvrdoća dobije pomoću mjernog mikroskopa kojim se mjere dijagonale baze piramide  $d_1$  i  $d_2$  otisnute u materijalu, da bi se tvrdoća izračunala preko izraza: [13]

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (7.4.)$$



Slika 7.3. Vickersova metoda [13]

Shoreova metoda bazira se na mjerenju odskoka čelične kuglice koja je spuštena s određene visine na površinu uzorka gdje visina odskoka predstavlja mjeru tvrdoće. [13]

Knoopova metoda slična je Vickersovoj metodi, točnije, za utiskivač se koristi četverostrana dijamantna piramida s kutovima  $130^\circ$  i  $172^\circ 30'$  koja se utiskuje u materijal ispitivanja. Utiskivač tako ostavlja romboidni otisak s jednom stranicom sedam puta većom od druge. Metoda se koristi pretežito za vrlo krte materijale ili tanke limove. [13]

Leebova metoda temelji se na izračunu tvrdoće iz omjera udara i brzine odskoka. Tvrdoća će se kod ove metode indirektno mjeriti preko gubitka energije tzv. udarnog tijela. Udarno tijelo odnosno utiskivač se pod određenim ubrzanjem izbacuje na površinu mjerena i udara u nju definiranom brzinom tj. kinetičkom energijom. Udar će stvoriti određenu plastičnu deformaciju zbog čega će utiskivač izgubiti dio brzine tj. energije. [13]

## 8 PARAMETRI AUSTENITIZACIJE

Austenitizacija označuje postupak unutar kojeg se čelik ugrijava na temperaturu iznad temperature  $A_1$  ili  $A_3$ , ovisno o udjelu ugljika unutar čelika. Kada se čelik ugrije na potrebnu temperaturu, na njoj se i drži određeno vrijeme. Važnost austenitizacije očituje se u tome što se uspješno izvršava potpuna ili djelomična pretvorba mikrostrukture čelika u austenitnu mikrostrukturu. Iz takve prvobitne pretvorbe dalje je moguće ostvariti martenzitnu mikrostrukturu koju je moguće dobiti samo iz austenitne. Za pravilno provođenje austenitizacije potrebno je odrediti parametre koji se odnose na: [9,16]

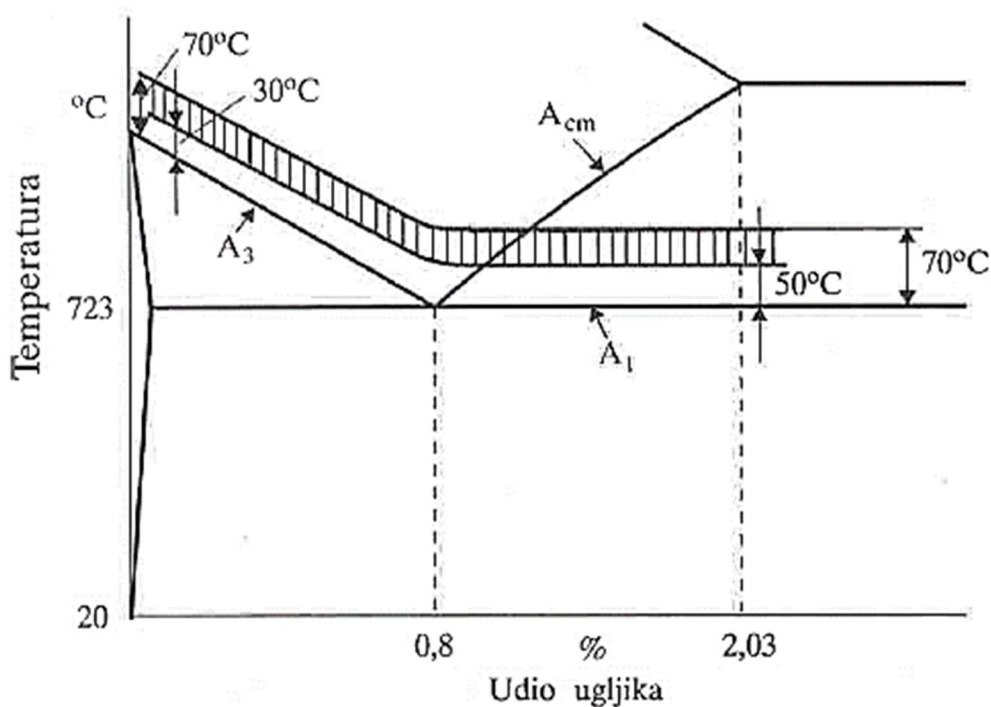
- temperaturu austenitizacije
- režime ugrijavanja na temperaturu austenitizacije
- vrijeme austenitizacije

### 8.1 Temperatura austenitizacije

Temperatura austenitizacije  $\vartheta_A$  određuje se obzirom na temperature  $A_1$  ili  $A_3$  uz pomoć dijagrama kao što su TTT, Fe-C ili pseudobinarni Fe-C dijagrami, uz pomoć empiričkih izraza ili pak pomoću određenih stručnih priručnika koje deklariraju sami proizvođači čelika. [9]

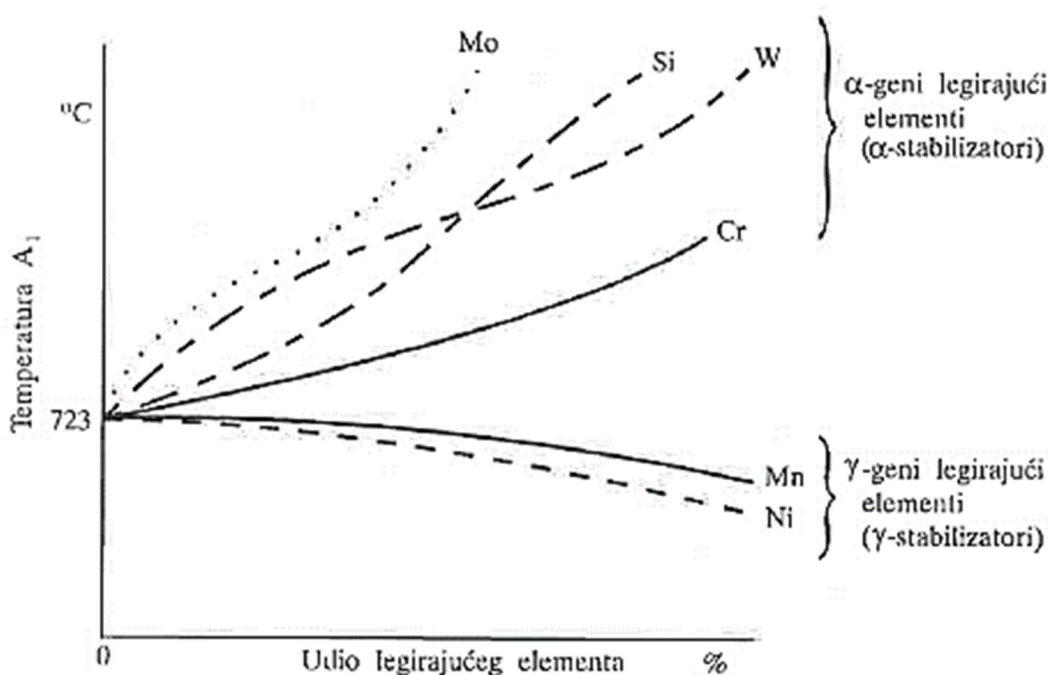
Za slučajeve kada se toplinskoj obradi tj. konvencionalnom ugrijavanju, unutar plinskih, električnih ili vakumskih peći, podvrgavaju ugljični (nelegirani) čelici, temperaturu austenitizacije moguće je očitati iz Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagrama. Tada kao opće pravilo možemo uzeti da će temperatura austenitizacije iznositi: [9]

- za pondeutektoidne čelike:  $\vartheta_a = A_3 + (30 \dots 70) \text{ }^\circ\text{C}$
- za nadeutektoidne čelike:  $\vartheta_a = A_1 + (50 \dots 70) \text{ }^\circ\text{C}$



Slika 8.1. Područje optimalnih temperatura austenitizacije za kaljenje ugljičnih čelika [9]

Međutim, isto tako postoje i čelici koji su legirani. Legirajući elementi utječu na temperature  $A_1$  i  $A_3$ , a obzirom na to da se temperatura austenitizacije određuje u odnosu na temperature  $A_1$  i  $A_3$ , samim time će legirajući elementi posljedično imati utjecaj i na temperaturu austenitizacije. Na slici 8.2. prikazan je dijagram iz kojeg je vidljiv utjecaj: [9]



Slika 8.2. Utjecaj legirajućih elemenata na temperaturu pretvorbe austenita u ferit [9]



Iz dijagrama zaključujemo da će:

- $\alpha$ -geni legirajući elementi povisiti temperature  $A_1$ ,  $A_3$  i  $A_{CM}$ , pa će temperature austenitizacije legiranih čelika morati biti više nego temperature austenitizacije ugljičnih (nelegiranih) čelika jednakog sadržaja ugljika [9]
- $\gamma$ -geni legirajući elementi snizuju temperature  $A_1$ ,  $A_3$  i  $A_{CM}$ , pa će temperature austenitizacije legiranih čelika morati biti niže nego temperature austenitizacije ugljičnih (nelegiranih) čelika jednakog sadržaja ugljika [9]

## 8.2 Režim ugrijavanja

Režim ugrijavanja predstavlja i označuje brzinu ugrijavanja, gdje razlikujemo tehnički moguću brzinu ugrijavanja i tehnološki dozvoljenu brzinu ugrijavanja. [16]

Razlikuju se u tome što će tehnički moguća brzina ugrijavanja ovisiti o opremi, radnom mediju, rasporedu obradaka te o obliku obratka, dok će tehnološki dozvoljena brzina ugrijavanja zavisi o konfiguraciji obradaka te strukturi i sastavu materijala. [16]

Važnost tehnološki dozvoljene brzine ugrijavanja je što ona mora osigurati potrebno ugrijavanje unutar kojeg neće doći do pojave pukotina. Obzirom da se takve pojave svakako žele izbjeći, potrebno je definirati izraz koji opisuje osjetljivost na pukotine prilikom ugrijavanja: [16]

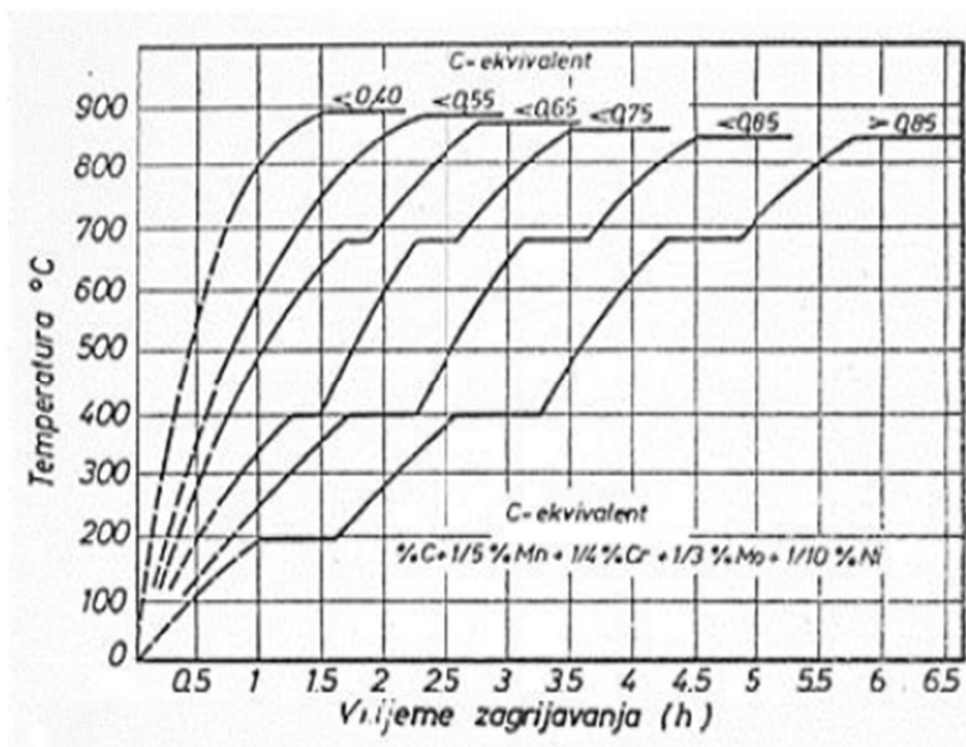
$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + \frac{V}{5} + \frac{Si - 0,5}{5} + \frac{Ti}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Al}{10} \quad (8.1)$$

Bitno je napomenuti da navedeni izraz vrijedi ukoliko su sadržaji elemenata unutar granica prikazanih u tablici 8.1.

Tablica 8.1. Dopuštene vrijednosti elemenata

|    |        |
|----|--------|
| Al | 2 %    |
| C  | 0,9 %  |
| Mn | 1,1 %  |
| Cr | 1,8 %  |
| Mo | 0,5 %  |
| Ni | 0,5 %  |
| V  | 0,25 % |
| Si | 1,8 %  |
| Ti | 0,5 %  |
| W  | 2 %    |

Konačno, pomoću izračunate osjetljivosti na pukotine prilikom ugrijavanja  $C_{ekv}$  i dijagrama prikazanog na slici 8.3., moguće je odrediti predgrijavanje koje se mora izvršiti nad čelicima prilikom ugrijavanja kako bi izbjegli pojavu pukotina. [16]



Slika 8.3. Dijagram režima ugrijavanja [16]

### 8.3 Trajanje grijanja

Za trajanje grijanja odnosno austenitizacije ne postoji egzaktno opće pravilo već se potrebno vrijeme izračunava za svaki pojedini slučaj iz razloga što na samo trajanje austenitizacije utječu mnogobrojni faktori. Utjecajne čimbenike dijelimo u tri osnovne skupine: [16]

- utjecajni čimbenici zavisni o obratku
- utjecajni čimbenici zavisni o tehnološkim parametrima
- utjecajni čimbenici zavisni o postrojenju

Pod utjecajne čimbenike koje zavise o obratku ubrajamo dimenzije, masu, oblik (omjer  $V/A$ ), površinu i toplinsku vodljivost. Slijede utjecajni čimbenici koji zavise o tehnološkim parametrima unutar kojih ubrajamo temperaturu ugrijavanja (austenitizacije), broj obradaka, raspored obradaka i režim grijanja. Konačno, pod utjecajnim čimbenicima koji zavise o postrojenju ubrajamo vrstu postrojenja, veličinu postrojenja, način ugrijavanja, raspored temperatura u unutrašnjosti peći ili kupke, zadanu temperaturu, prijelaz topline i radni medij. Sveukupno se ovisnost trajanje grijanja o faktorima može izraziti preko sljedećeg izraza: [16]

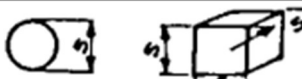
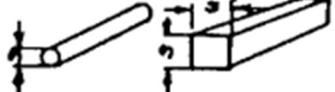


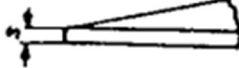
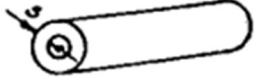
$$t_{gr} = f\left(p, \frac{V}{A}, \lambda, \alpha, c, \vartheta_a, \vartheta_{peć}, \vartheta_{zav}, \dots\right), \quad [\text{min}] \quad (8.1)$$

Za točno određivanje koristimo se sljedećim metodama: [16]

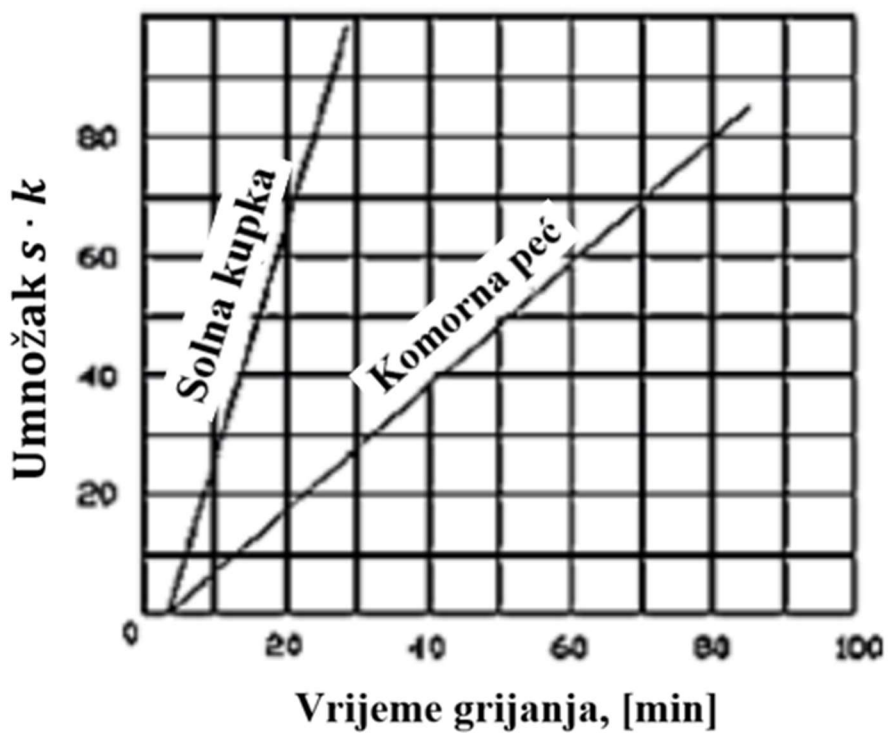
- metoda Ordinanz
- metoda Smolnjikov
- metoda Newton

#### 8.3.1 Metoda Ordinanz

Kod metode Ordinanz za izračun trajanja grijanja potrebno je uzeti u obzir sve utjecajne čimbenike koje se odnose na metodu. U te čimbenike prvenstveno ubrajamo kemijski sastav čelika, oblik i dimenzije obratka te radni medij u kojem se izvodi ugrijavanje. Oblik obratka kao parametar biti će označen koeficijentom oblika  $k$  koji se pak dobije iz odnosa prema karakterističnoj dimenziji obratka  $s$  (slika 8.4.). Karakteristična dimenzija obratka  $s$  označuje mjesto na presjeku koje je mjerodavno i značajno za toplinsku obradu i sami rezultat toplinske obrade. Za takva mjesta se smatra da se tijekom ugrijavanja na njima odvodi najveća količina topline. Ukupno će umnožak dva navedena koeficijenta predstavljati veličinu potrebnu za određivanje konačno vremena trajanja prema dijagramu prikazanom na slici 8.5. [16]

| Oblik izratka   | Koeficijent oblika "k"                                      |
|---|---|
|  | 0,70  |
|  | 1,0   |
|  | 1,5   |
|  | 1,5   |
|  | 2,0   |
|  | 2- za kratke otvorene cijevi<br>4- za duge zatvorene cijevi |

Slika 8.4. Koeficijent oblika "k" potreban za metodu Ordinanz [16]



Slika 8.5. Dijagram vremena trajanja grijanja metode Ordinanz [16]

### 8.3.2 Metoda Smoljnikov

Metoda Smoljnikov predstavlja metodu koja obuhvaća i u obzir uzima kemijski sastav čelika, konfiguraciju i dimenzije obratka te medij za ugrijavanje. Osnovi izraz ove metode glasi: [16]

$$t_{uk} = t_{gr} + t_{id}, \quad [\text{min}] \quad (8.2)$$

gdje je:

$t_{gr}$  – vrijeme grijanja

$t_{id}$  – vrijeme izotermičkog držanja

U zavisnosti o veličini obratka, koristimo se izrazima prikazanim u tablici 8.2.:

Tablica 8.2. Izrazi za izračun potrebnog vremena grijanja prema metodi Smoljnikov [16]

|  |   |
|--|---|
| Za kratke obratke<br>( $H/D < 5$ )     | $t_{gr} = m \cdot K_1 \cdot \frac{V}{A} \cdot K_t \cdot K_k, \quad [\text{min}] \quad (8.3)$        |
| Za dugačke<br>obratke<br>( $H/D > 5$ ) | $t_{gr} = \frac{1}{60} \cdot m \cdot K_2 \cdot \beta \cdot D, \quad [\text{min}] \quad (8.4)$       |
| Za vrlo dugačke<br>obratke             | $t_{gr} = \frac{1}{60} \cdot m \cdot K_2 \cdot \beta \cdot (D - d), \quad [\text{min}] \quad (8.5)$ |

gdje je:

$m$  – značajka medija za ugrijavanje, zavisi o vrsti medija

$K_1$  – koeficijent specifičnog vremena progrijavana za kratke obratke

$K_2$  – koeficijent specifičnog vremena progrijavanja za dugačke obratke

$V/A$  – odnos volumena i površine

$K_f$  – kriterij forme za kratke obratke

$K_k, \beta$  – koeficijent konfiguracije

$D, d$  – promjer ili debljina obratka

$H$  – duljina obratka

### 8.3.3 Metoda Newton

Metoda Newton koristi se za „termodinamički tanke“ predmete što znači da se metoda bazira na pretpostavci zanemarivanja temperaturne raspodjele po volumenu obratka, visoke toplinske vodljivosti, nad kojim se vrši ugrijavanje. Kako bi ova pretpostavka bila validna, prije svega mora biti ispunjen uvjet koji glasi: [16]

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \left(\frac{V}{A}\right)}{\lambda} \leq 0,25 \quad (8.6)$$

gdje je:

$Bi$  – Biotov broj (značajka), [1]

$\alpha$  – koeficijent (konvekcijskog) prijelaza topline, [W/m<sup>2</sup>K]

$\lambda$  – koeficijent toplinske vodljivosti, [W/mK]

Za slučajeve u kojima nije ispunjen uvjet da je  $Bi < 0,25$ , tj. za slučajeve gdje vrijedi  $Bi > 0,25$  i gdje imamo „termodinamički masivnije“ predmete, uvodi se koeficijent usporenja ugrijavanja  $\varepsilon$ . Kod navedenih predmeta pojavljuje se zamjetna razlika temperatura između površine i jezgre pri ugrijavanju, a potrebni koeficijent usporavanja ugrijavanja  $\varepsilon$  računa se u ovisnosti o obliku obratka. U tablici 8.3. nalaze se jedinstveni izrazi za pojedine oblike obradaka. [16]

Tablica 8.3. Izrazi za izračun koeficijenata usporenja ugrijavanja  $\varepsilon$  za metodu Newton [16]

| Oblik obratka | Koeficijent obratka $\varepsilon$                                |
|---------------|--|
| Ploča         | $\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{3} \cdot Bi} \quad (8.7)$   |
| Valjak        | $\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{3,5} \cdot Bi} \quad (8.8)$ |
| Kugla         | $\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{3} \cdot Bi} \quad (8.9)$   |

Konačno, vrijeme trajanja grijanja određuje se sljedećim izrazom: [16]

$$t_{gr} = \frac{V}{A} \cdot \rho \cdot c \ln \left( \frac{\vartheta_{peć} - \vartheta_{poč}}{\vartheta_{peć} - \vartheta_{zavr}} \right), \quad [s] \quad (8.10)$$

gdje je, uz već prethodne objašnjene oznake:

$c$  – specifični toplinski kapacitet za interval temperatura  $\vartheta_{poč} - \vartheta_{peć}$ , [J/kgK]

$\rho$  – gustoća (za čelike = 7800), [kg/m<sup>3</sup>]

$\vartheta_{peć}$  – temperatura peći, [°C]

$\vartheta_{poč}$  – početna temperatura obratka, [°C]

$\vartheta_{zavr}$  – završna temperatura obratka, [°C]

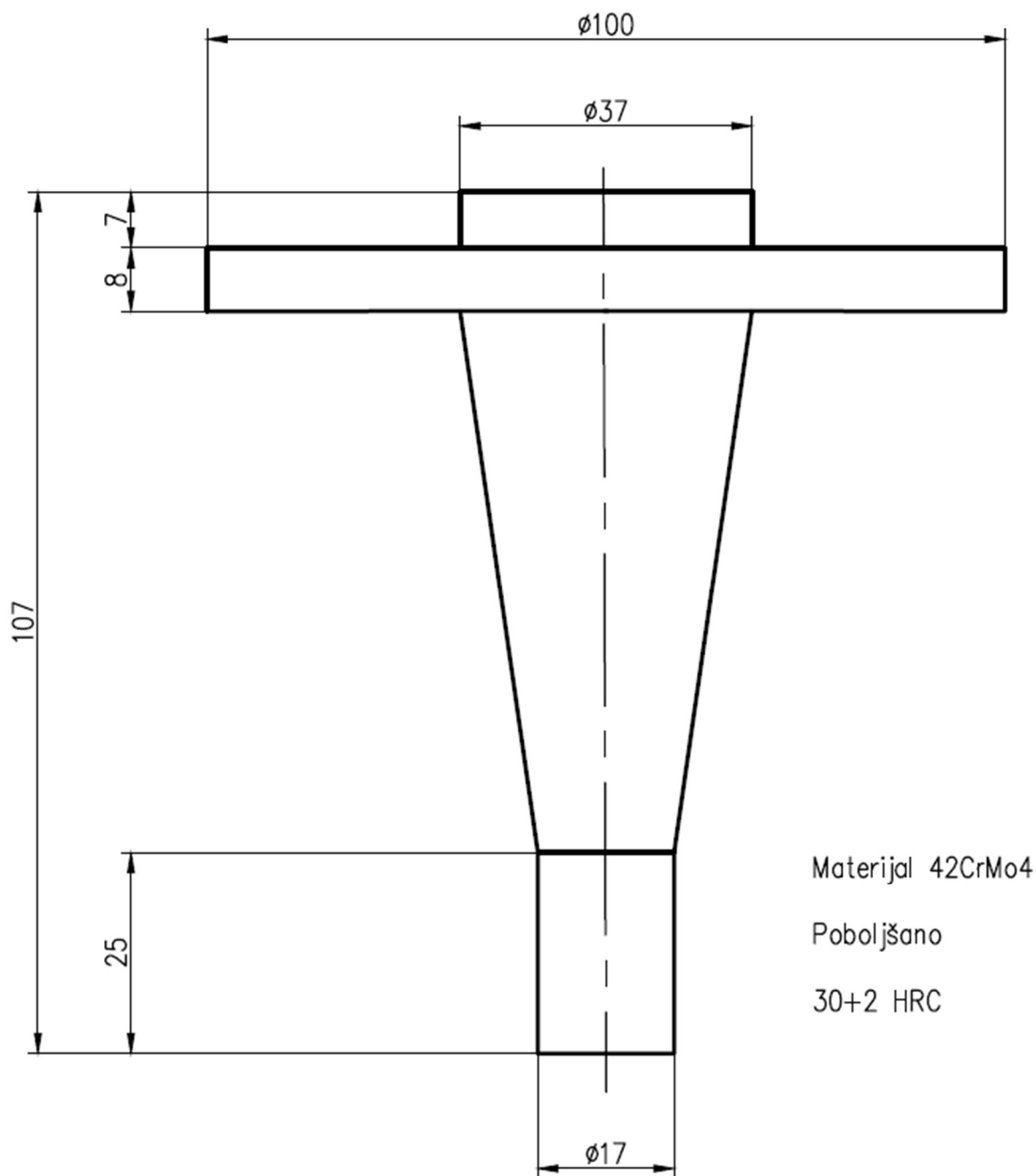
Ako bi prema ovom izrazi htjeli izjednačiti početnu temperaturu obratka  $\vartheta_{poč}$  sa temperaturom peći  $\vartheta_{peć}$ , tj. ostvarili potpuno ugrijanje, bilo bi nužno beskonačno dugo ugrijavanja pa se upravo iz tog razloga, za praktičnu primjenu, koriste vrijednosti prikazane u tablici 8.4. [16]

Tablica 8.4 Praktični izrazi potrebni za izjednačavanje temperatura prema metodi Newton [16]

|                      |  |        |
|----------------------|--|--------|
| za slučaj $Bi < 0,5$ | $\vartheta_{peć} - \vartheta_{zavr} = 2 \dots 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ | (8.11) |
| za slučaj $Bi > 0,5$ | $\vartheta_{peć} - \vartheta_{zavr} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$        | (8.12) |

## 9 POSTUPAK TOPLINSKE OBRADE STROJNOG DIJELA DTJ.22-PT.83

U praktičnom dijelu potrebno je definirati proces toplinske obrade za toplinsku obradu strojnog dijela DTJ.22-PT.83. Strojni dio DTJ.22-PT.83 (slika 9.1.) izrađen je od čelika 42CrMo4 i za njega je nakon poboljšavanja potrebno postići tvrdoću od 30+2 HRC.



Slika 9.1. Strojni dio DTJ.22-PT.83



## 9.1 Karakteristike materijala strojnog dijela DTJ.22-PT.83

Čelik 42CrMo4 od kojeg je izrađen strojni dio DTJ.22-PT.83 spada u čelike za poboljšanje i njegov se propisani kemijski sastav nalazi u tablici 9.1. Sve vrijednosti masenih udjela prikazane su u postotcima prema normi DIN 17200.

Tablica 9.1. Maseni udio kemijskih elemenata za čelik 42CrMo4

| 42CrMo4 | Maseni udio kemijskih elemenata [%] |     |         |       |       |         |          |
|---------|-------------------------------------|-----|---------|-------|-------|---------|----------|
|         | C                                   | Si  | Mn      | P     | S     | Cr      | Mo       |
|         | 0,38-0,45                           | 0,4 | 0,6-0,9 | 0,025 | 0,035 | 0,9-1,2 | 0,15-0,3 |

## 9.2 Parametri toplinske obrade

Kao što je prethodno prikazano na dijagramu poboljšavanja čelika (slika 6.1.), proces poboljšavanja čelika započinje zagrijavanjem čelika na temperaturu austenitizacije koju je shodno tome potrebno odrediti, međutim, postoji i moguća potreba za predgrijavanjem predmeta prije nego li se izvrši samo zagrijavanje zbog čega se izračunava tzv. osjetljivost na pukotine. Za izračun će se koristiti srednje vrijednosti kemijskih elemenata prikazanih u tablici 9.1.

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + \frac{V}{5} + \frac{Si - 0,5}{5} + \frac{Ti}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Al}{10} \quad (8.1)$$

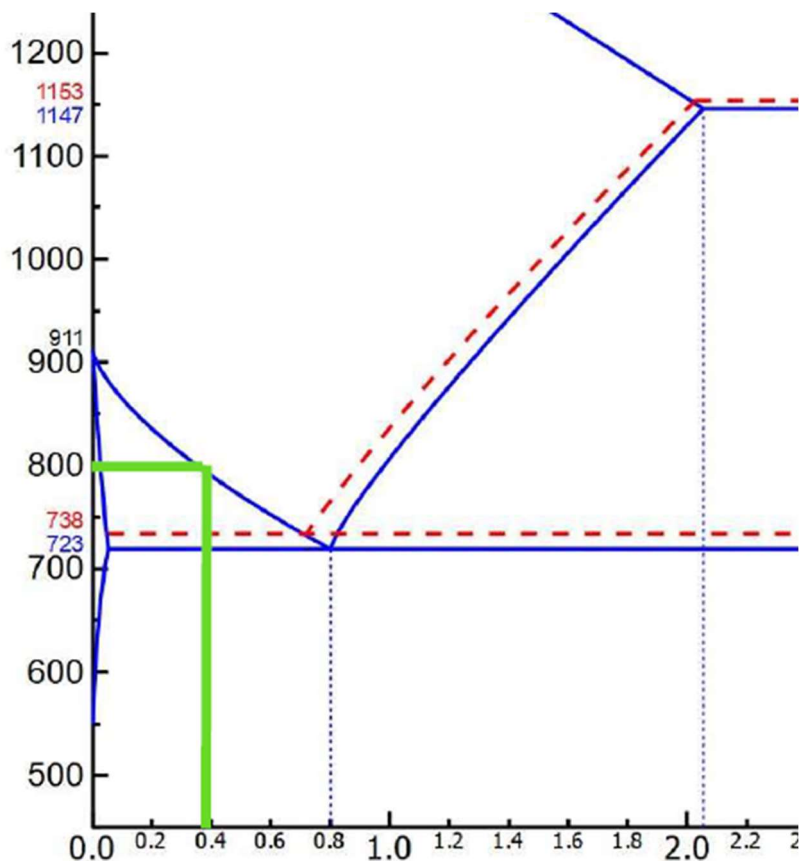
$$C_{ekv} = 0,415 + \frac{0,75}{5} + \frac{1,05}{4} + \frac{0,225}{3} + \frac{0}{10} + \frac{0}{5} + \frac{0,4 - 0,5}{5} + \frac{0}{5} + \frac{0}{10} + \frac{0}{10}$$

$$C_{ekv} = 0,8825$$

$$C_{ekv} = 0,8825 > 0,55$$

Iz prethodno priloženog dijagrama režima ugrijavanja (slika 8.3.) zaključuje se da je potrebno izvršiti predgrijavanje iz razloga što je izračunata osjetljivost na pukotine veća od 0,55. U praksi se izvodi jednostruko predgrijavanje pri temperaturama 400-500 °C [16]. Za strojni dio odabrano je predgrijavanje pri temperaturi od 450 °C.

Za određivanje temperature austenitizacije se koristi Fe-Fe<sub>3</sub>C gdje se pomoću udjela ugljika navedenog u tablici 9.1. određuje temperatura koja iznosi 800 °C što je vidljivo i u prikazanom dijagramu (slika 9.2.).



Slika 9.2. Očitavanje temperature austenitizacije iz Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagrama

Točnu, optimalnu temperaturu austenitizacije određujemo prema sljedećem izrazu:

$$\vartheta_A = A_3 + (30 \dots 70) \text{ °C} \quad (9.1.)$$

$$\vartheta_A = 800 + 50 \text{ °C}$$

$$\vartheta_A = 850 \text{ °C}$$

Drugi način očitavanja je prema normi DIN 17200, gdje su u tablici 9.2. prikazani podaci za čelik 42CrMo4. Iz tablice je vidljivo da su rezultati očitavanja iz dijagrama točni budući da su temperature austenitizacije jednake kao u tablici.

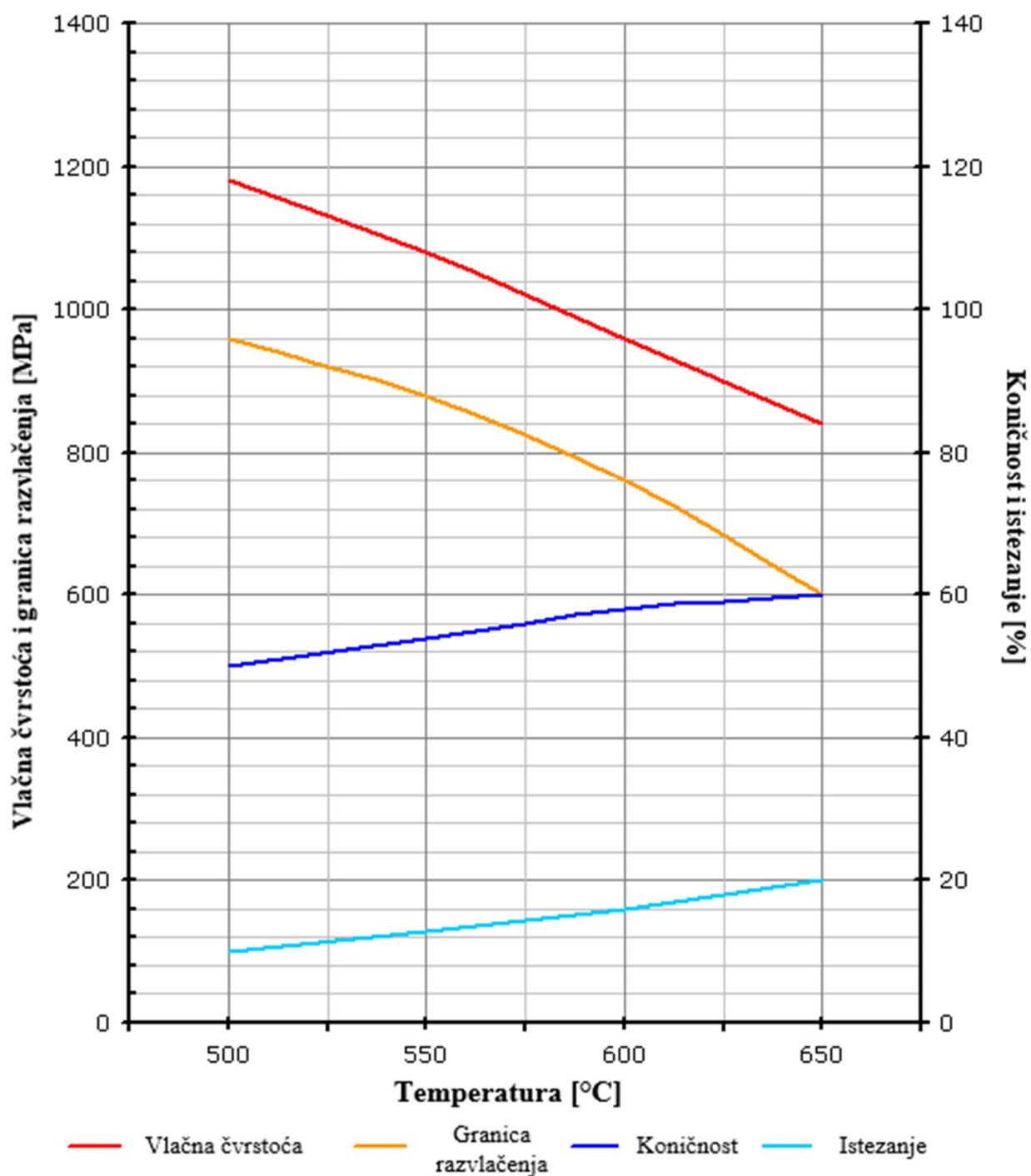
Tablica 9.2. Temperature austenitizacije prema normi DIN 17200 [18]

| Steel grade<br>Symbol | Hardening temperature in the end quench test <sup>1)</sup><br>°C | Softening at<br>°C | Normalizing at<br>°C | Quenching                       |                               | Tempering <sup>3)</sup> at<br>°C |
|-----------------------|--|--------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
|                       |  |                    |                      | in water <sup>2)</sup> at<br>°C | in oil <sup>2)</sup> at<br>°C |                                  |
| Q 22, Ck 22, Cm 22    | —  |                    | 880 to 910           | 860 to 890                      | —                             |                                  |
| C 25, Ck 25, Cm 25    | —  |                    | 880 to 910           | 860 to 890                      | —                             |                                  |
| C 30, Ck 30, Cm 30    | —  |                    | 870 to 900           | 850 to 880                      | —                             |                                  |
| C 35, Ck 35, Cm 35    | 870  |                    | 860 to 890           | 840 to 870                      | 850 to 880                    |                                  |
| C 40, Ck 40, Cm 40    | 870  | 650 to 700         | 850 to 880           | 830 to 860                      | 840 to 870                    | 540 to 680                       |
| C 45, Ck 45, Cm 45    | 850  |                    | 840 to 870           | 820 to 850                      | 830 to 860                    |                                  |
| C 50, Ck 50, Cm 50    | 850  |                    | 835 to 865           | 810 to 840                      | 820 to 850                    |                                  |
| C 55, Ck 55, Cm 55    | 830  |                    | 830 to 860           | 805 to 835                      | 815 to 845                    |                                  |
| C 60, Ck 60, Cm 60    | 830  |                    | 820 to 850           | 800 to 830                      | 810 to 840                    |                                  |
| 28 Mn 6               | 850  | 650 to 700         | 850 to 880           | 820 to 850                      | 830 to 860                    | 540 to 680                       |
| 32 Cr 2, 32 CrS 2     | 850  | 650 to 700         | 860 to 890           | 840 to 870                      | 850 to 880                    | 540 to 680                       |
| 38 Cr 2, 38 CrS 2     |  |                    | 850 to 880           | 830 to 860                      | 840 to 870                    |                                  |
| 46 Cr 2, 46 CrS 2     |  |                    | 840 to 870           | 820 to 850                      | 830 to 860                    |                                  |
| 28 Cr 4, 28 CrS 4     | 850  | 680 to 720         | 860 to 900           | 840 to 870                      | 850 to 880                    | 540 to 680                       |
| 34 Cr 4, 34 CrS 4     |  |                    | 850 to 890           | 830 to 860                      | 840 to 870                    |                                  |
| 37 Cr 4, 37 CrS 4     |  |                    | 845 to 885           | 825 to 855                      | 835 to 865                    |                                  |
| 41 Cr 4, 41 CrS 4     |  |                    | 840 to 880           | 820 to 850                      | 830 to 860                    |                                  |
| 25 CrMo 4, 25 CrMoS 4 | 860  | 680 to 720         | 860 to 900           | 840 to 870                      | 850 to 880                    | 540 to 680                       |
| 34 CrMo 4, 34 CrMoS 4 | 850  |                    | 850 to 890           | 830 to 860                      | 840 to 870                    |                                  |
| 42 CrMo 4, 42 CrMoS 4 |  |                    | 840 to 880           | 820 to 850                      | 830 to 860                    |                                  |
| 50 CrMo 4             |  |                    | 840 to 880           | 820 to 850                      | 830 to 860                    |                                  |

Temperatura visokotemperaturnog popuštanja određuje se dijagramom prikazanim na slici 9.3. Iz tablice 9.3. vidljivo je da će za tvrdoću po Rockwellu, koja za strojni dio iznosi 30 HRC, vlačna čvrstoća iznositi 950 MPa što se dalje primjenjuje na dijagramu koji prikazuje odnos vlačne čvrstoće i temperature popuštanja za čelik 42CrMo4 iz kojeg se može očitati da će konačna temperatura popuštanja iznosi 560 °C. Trajanje popuštanja za praktičnu primjenu iznosi 120 minuta. Ovakva temperatura zadovoljava i okvirne vrijednosti prema normi DIN 17200 prikazane u tablici 9.2.

Tablica 9.3. Vrijednosti vlačnih čvrstoća u odnosu na tvrdoće po Rockwellu

| Tvrdoća po Rockwellu | Vlačna čvrstoća |
|----------------------|-----------------|
| 29 HRC               | 930 MPa         |
| 30 HRC               | 950 MPa         |
| 31 HRC               | 980 MPa         |



Slika 9.3. Dijagram popuštanja čelika 42CrMo4 [19]

Sve potrebne temperature koje će se koristiti u postupku su određene. Osim temperatura, potrebno je odrediti i vrijeme držanja predmeta na temperaturi austenitizacije, odnosno na temperaturi popuštanja. Za određivanje vremena držanja na temperaturi austenitizacije postoje tri metode opisane u poglavlju 8.3. Za ovaj slučaj koristiti će se metoda Smoljnikov.

Zbog veličine strojnog dijela, za izračun trajanja grijanja koristit će se sljedeći izraz:

$$t_{gr} = \frac{1}{60} \cdot m \cdot K_2 \cdot \beta \cdot (D - d) \quad (9.3)$$

Značajka medija za ugrijavanja  $m$  ovisi o vrsti medija te za komornu peć ona iznosi:

$$m = 3$$

Koeficijent specifičnog vremena progrijavana iznosi:

$$K_2 = 19 - 0,04 \cdot (\vartheta_A - 800) \quad (9.3)$$

$$K_2 = 19 - 0,04 (850 - 800)$$

$$K_2 = 17 \text{ s/mm}$$

Koeficijent konfiguracije izabran je iz literature [16]:

$$\beta = 2$$

Konačno, trajanje grijanja iznosi:

$$t_{gr} = \frac{1}{60} \cdot m \cdot K_2 \cdot \beta \cdot (D - d)$$

$$t_{gr} = \frac{1}{60} \cdot 3 \cdot 17 \cdot 2 \cdot (100 - 37)$$

$$t_{gr} = 107 \text{ min}$$

Izračunatom trajanju grijanja dodajemo i potrebno vrijeme držanja koje za niskolegirane čelike za poboljšavanje iznosi 20 minuta. [16]. Slijedi da ukupno potrebno vrijeme grijanja iznosi:

$$t_{uk} = t_{gr} + t_{id} \quad (9.4)$$

$$t_{uk} = 107 + 20$$

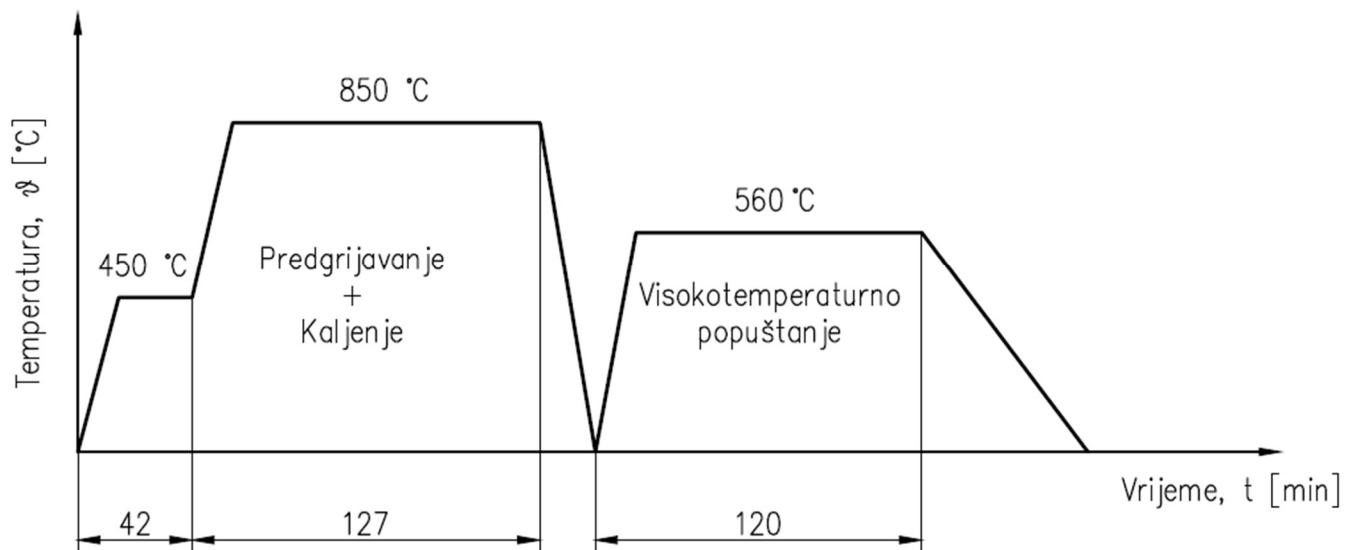
$$t_{uk} = 127 \text{ min}$$

Pomoću izračunat ukupnog potrebnog trajanja ugrijavanja, moguće je izračunati i potrebno vrijeme za prethodno izračunato predgrijavanje gdje slijedi:

$$t_{pred} : t_{uk} = 3 : 1 \quad (9.5)$$

$$t_{pred} \approx 42 \text{ min}$$

Konačno je moguće formirati potpuni dijagram toplinske obrade strojnog dijela DTJ.22-PT.83 sa svim izračunatim parametrima toplinske obrade (slika 9.4.)



Slika 9.4. Dijagram toplinske obrade strojnog dijela DTJ.22-PT.83

## 10 ZAKLJUČAK

Čelik, kao metastabilna legura ugljika i željeza, predstavlja materijal koji je visoko korišten u svim industrijama zbog svojih svojstava i cijene zbog čega se smatra najvažnijim konstrukcijskim i alatnim materijalom u strojarstvu.

Čelik ima izrazita svojstva, međutim, ta svojstva mogu biti još i bolja ukoliko se čelik podvrgne postupku toplinske obrade poboljšavanja. Za postupak se koriste čelici za poboljšavanje, odnosno niskolegirani ili nelegirani konstrukcijski čelici sa udjelom ugljika od 0,25 do 0,6 %.

Poboljšavanje se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Podvrgavanjem čelika za poboljšavanje toplinskoj obradi poboljšavanja postignuta su još bolja svojstva od prvobitnih, točnije, postignuta je viša granica tečenja, kao i konačno istežanje.

Promjena svojstava općenito je moguća zbog promjene mikrostrukture, stoga je mikrostruktura temelj prema kojem se odabire materijal i njegova svojstva za određenu praktičnu primjenu.

Izračunom svih parametara toplinske obrade, kao što su temperatura, vrijeme i osjetljivost na pukotine prije ugrijavanja, moguće je u potpunosti odrediti proces poboljšavanja. Za strojni dio DTJ.22-PT.83 utvrđeno je da postoji potreba za predgrijavanjem koje je uvršteno u cjelokupni proces poboljšavanja kako bi se u konačnici formirao dijagram poboljšavanja za strojni dio zbog provođenja postupka.

## LITERATURA

- [1] Golubić, S.: „Tehnički materijali“, Veleučilište u Bjelovaru, Bjelovar, 2019.
- [2] Kostadin, T.: „Čelici i željezni ljevovi“, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2017.
- [3] Kožuh, S.: „Specijalni čelici“, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [4] George F. Vander Voort: „ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures“, ASM International, Ohio, 2004.
- [5] Mineralogist: „Metallographie“, s interneta, <http://mineralogist.bplaced.net/Metallographie.php>, 23.08.2022.
- [6] Matković T.; Matković P.: "Fizikalna metalurgija I", Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2009.
- [7] Bhadeshia, H. K. D. H., & Christian, J. W.: „Bainite in steels“, University of Cambridge. Cambridge, 1990.
- [8] Smoljan, B.: „Toplinska obradba čelika, sivog i nodularnog lijeva“, Hrvatsko društvo za toplinsku obradbu i inženjerstvo površina, Zagreb, 1999.
- [9] Stupnišek, M.; Cajner, F.: „Osnove toplinske obrade metala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [10] Waldunsteel: „28MN6 / 1.1170 STEEL“, s interneta, <https://waldunsteel.com/products/28mn6-1-1170-steel/>, 10.08.2022.
- [11] Totten, G.E.: „Steel heat treatment: metallurgy and technologies“, Portland State University, Portland, 2006.
- [12] Gabrić, I.; Šitić, S.: „Materijali 2“, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [13] Pavletić, D.: „Nastavni materijal iz kolegija Mjerenja i kontrola kvalitete“, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2020.
- [14] Gilman, J.J.: „*Chemistry and physics of mechanical hardness*“, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009.
- [15] Gabrić, I.; Šitić, S.: „Materijali 2“, Sveučilište u Splitu, Split, 2012.
- [16] B. Liščić, M. Stupnišek, F. Cajner, T. Filetin: Toplinska obrada - Praktikum, Sveučilište u Zagrebu - FSB, 1992
- [17] Threeplants: „Cementite“, s interneta, <http://threeplanes.net/cementite.html>, 10.08.2022.



[18] Fushun special steel: „Steels for quenching and tempering“, s interneta, <https://www.fushunspecialsteel.com/wp-content/uploads/2015/09/DIN17200-Steels-for-Quenching-and-Tempering.pdf>, 1.09.2022.

[19] Steel dana: „Tempering diagrams of steel“, s interneta, <https://www.steeldata.info/tempering/demo/data/22.html>, 1.09.2022.

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 2.1. Visoka peć [2] .....  | 2  |
| Slika 3.1. Vrste toplinskih obrada .....   | 4  |
| Slika 3.2. 9-t dijagram [1] .....  | 5  |
| Slika 4.1. Feritna mikrostruktura [5] .....  | 6  |
| Slika 4.2. Austenitna mikrostruktura [5] .....   | 7  |
| Slika 4.3. Kristalna rešetka cementita [17] .....  | 7  |
| Slika 4.4. Perlitna mikrostruktura [6] .....   | 8  |
| Slika 4.5. Bainitna mikrostruktura [7] .....   | 8  |
| Slika 4.6. Martenzitna mikrostruktura [5] .....  | 9  |
| Slika 4.7. Ledeburit [6] .....   | 9  |
| Slika 5.1. Fe-Fe <sub>3</sub> C dijagram [8] .....   | 10 |
| Slika 5.2. Shematski prikaz perlitne pretvorbe [8] .....   | 11 |
| Slika 5.3. Ovisnost količine zaostalog austenita u martenzitnoj strukturi o koncentraciji ugljika u primarnom austenitu [8] .....                                      | 12 |
| Slika 5.4. Martenzitna struktura [8] .....   | 13 |
| Slika 5.5. Razvijanje faze bainita [8] .....   | 13 |
| Slika 5.6. Oblici bainitnih zrna [8] .....   | 14 |
| Slika 6.1. Dijagram postupka poboljšavanja čelika [9] .....  | 15 |
| Slika 6.2. Podjela čelika prema namjeni [3] .....  | 16 |
| Slika 6.3. Utjecaj mikrostrukture nakon gašenja i promjera čelika 50CrV4 (Č4830) na vlačnu čvrstoću i udarnu radnju loma popuštene jezgre čeličnog proizvoda [3] ..... | 17 |
| Slika 6.4. Čelik za poboljšanje 28Mn6 [10] .....   | 18 |
| Slika 6.5. Shematski prikaz flokule nastale zbog djelovanja vodika [3] .....   | 20 |
| Slika 6.6. Dijagram postupka kaljenja podeutektoidnog čelika [9] .....   | 21 |
| Slika 6.7. Shema uređaja za ohlađivanje epruvete po Jominyju [9] .....   | 22 |

|  |    |
|--|----|
| Slika 6.8. Prikaz krivulja ohlađivanja Jominyjeve epruvete u TTT-dijagramu i tijekom postignutih tvrdoća [9] ..... | 23 |
| Slika 6.9. Opći dijagram popuštanja [9].....   | 23 |
| Slika 6.10. Postupak izotermičkog poboljšavanja čelika prikazan u TTT dijagramu [12] .....                         | 25 |
| Slika 6.11. Usporedba dijagram naprezanje-istezanje za pojedina stanja u postupku poboljšavanja čelika [9].....    | 26 |
| Slika 6.12. Dijagram poboljšavanja nekog čelika .....  | 26 |
| Slika 7.1. Rockwellova metoda [13] .....   | 27 |
| Slika 7.2. Brinellova metoda [13] .....  | 29 |
| Slika 7.3. Vickersova metoda [13] .....  | 30 |
| Slika 8.1. Područje optimalnih temperatura austenitizacije za kaljenje ugljičnih čelika [9] .....                  | 32 |
| Slika 8.2. Utjecaj legirajućih elemenata na temperaturu pretvorbe austenita u ferit [9].....                       | 32 |
| Slika 8.3. Dijagram režima ugrijavanja [16] .....  | 34 |
| Slika 8.4. Koeficijent oblika "k" potreban za metodu Ordinanz [16] .....   | 36 |
| Slika 8.5. Dijagram vremena trajanja grijanja metode Ordinanz [16] .....   | 36 |
| Slika 9.1. Strojni dio DTJ.22-PT.83 .....  | 40 |
| Slika 9.2. Očitavanje temperature austenitizacije iz Fe-Fe <sub>3</sub> C dijagrama .....                          | 42 |
| Slika 9.3. Dijagram popuštanja čelika 42CrMo4 [19] .....   | 44 |
| Slika 9.4. Dijagram toplinske obrade strojnog dijela DTJ.22-PT.83 .....  | 46 |

## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 6.1. Čelici za poboljšanje [3].....  | 18 |
| Tablica 6.2. Čelici za površinsko kaljenje [3].....  | 20 |
| Tablica 6.3. Postupci popuštanja s pripadajućim temperaturama .....  | 24 |
| Tablica 8.1. Dopuštene vrijednosti elemenata .....   | 34 |
| Tablica 8.2. Izrazi za izračun potrebnog vremena grijanja prema metodi Smoljnikov [16].....                | 37 |
| Tablica 8.3. Izrazi za izračun koeficijenta usporenja ugrijavanja $\varepsilon$ za metodu Newton [16]..... | 38 |
| Tablica 8.4 Praktični izrazi potrebni za izjednačavanje temperatura prema metodi Newton [16]               | 39 |
| Tablica 9.1. Maseni udio kemijskih elemenata za čelik 42CrMo4 .....  | 41 |
| Tablica 9.2. Temperature austenitizacije prema normi DIN 17200 [18] .....                                  | 43 |
| Tablica 9.3. Vrijednosti vlačnih čvrstoća u odnosu na tvrdoće po Rockwellu .....                           | 43 |

## POPIS OZNAKA

%C – udio (postotak) ugljika u čeliku

$M_s$  – temperatura početka stvaranja martenzita [ $^{\circ}\text{C}$ , K]

$M_f$  – temperatura završetka stvaranja martenzita [ $^{\circ}\text{C}$ , K]

BTC - prostorno centrirana tetragonska rešetka

FCC - plošno centrirana kubna rešetka

BCC - prostorno centrirana kubna rešetka

$\vartheta_{\text{TO}}$  – temperatura toplinske obrade [ $^{\circ}\text{C}$ , K]

$\vartheta_p$  – temperatura popuštanja [ $^{\circ}\text{C}$ , K]

$\vartheta_{\text{iz}}$  – temperatura izotermičke pretvorbe [ $^{\circ}\text{C}$ , K]

HB – mjera tvrdoća po Brinellu

HV – mjera tvrdoća po Vickersu

HRC (HRB) - mjera tvrdoće po Rockwellu

$A_{C1} = A_1$  – temperatura austenitizacije slojeva površine [ $^{\circ}\text{C}$ ,K]

$A_{C3} = A_3$  – temperatura austenitizacije jezgre [ $^{\circ}\text{C}$ ,K]

$A_p$  – pothlađeni austenit

$A_z$  – zaostali austenit

$v_{\text{ohl}}$  – brzina ohlađivanja [ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ]

$S_z$  – stupanj prokaljenosti

$C_{\text{ekv}}$  – osjetljivost na pukotine prilikom ugrijavanja

$t_{\text{gr}}$  – vrijeme grijanja [min, h]

$t_{\text{uk}}$  – ukupno vrijeme grijanja [min, h]

$t_{\text{id}}$  – vrijeme izotermičkog držanja [min, h]

$k$  – koeficijent oblika

$s$  – karakteristična dimenzija obratka

## SAŽETAK

Kroz temu završnog rada „Postupak toplinske obrade strojnog dijela DTJ.22-PT.83“ opisana je toplinska obrada poboljšavanja. U prvom dijelu rada općenito je opisan čelik, kao i čelik za poboljšanje koji se koristi za toplinsku obradu poboljšavanja. Nadalje su opisane mikrostrukture čelika te fazne pretvorbe čelika. U završnom teoretskom dijelu opisane su metode ispitivanja tvrdoće te metode za određivanje parametara austenitizacije čelika. Praktičnim dijelom izračunati su svi parametri toplinske obrade strojnog dijela DTJ.22-PT.83 koji su primijenjeni za formiranje potpunog postupka poboljšanja koji je korišten za strojni dio.

**KLJUČNE RIJEČI:** toplinska obrada čelika, čelik za poboljšavanje, mikrostruktura čelika, poboljšavanje, kaljenje, popuštanje, visokotemperaturno popuštanje, parametri austenitizacije, tvrdoća

## SUMMARY

Through the topic of this undergraduate thesis "Heat treating process of workpiece DTJ.22-PT.83", the heat treatment process technique of quenching and tempering is described. In the first part steel is explained in general, as well as the improvement steel that is used for this kind of heat treatment. Furthermore, microstructures of steel and phase transformations of steel are described. In the end of theoretical part, hardness testing methods and methods for determining steel austenitization parameters are described. In the practical part, all parameters of the heat treatment of the workpiece DTJ.22-PT.83 were calculated, which were applied to form a complete quenching and tempering process that was applied to the workpiece.

**KEY WORDS:** heat treatment of steel, steel for quenching and tempering, microstructure of steel, quenching, tempering, high temperature tempering, parameters for austenization, hardness