

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

---

**Premužić, Krsto**

**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:190:085687>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-02**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**POSTUPAK TOPLINSKE OBRADE STROJNOG DIJELA KP.22-  
PT.41**

Rijeka, srpanj 2022.

Krsto Premužić

0069085704

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA KP.22-  
PT.41**

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

Rijeka, srpanj 2022.

Krsto Premužić

0069085704

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Rijeka, 16. ožujka 2022.

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

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Krsto Premužić (0069085704)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

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

### Opis zadatka:


Potrebno je definirati proces toplinske obrade te opisati postrojenje za toplinsku obradu strojnog dijela KP.22-PT.41. Potrebno je proanalizirati rezultate toplinske obrade i donijeti odgovarajuće zaključke. Nadalje, potrebno je proanalizirati proces toplinske obrade strojnog dijela KP.22-PT.41. 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.


*Premužić*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

  
Izv. prof. dr. sc. Dario Ilić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

  
Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## **IZJAVA**

Sukladno s člankom 9. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci od lipnja 2011., izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku postupak toplinske obrade strojnog dijela KP.22-PT.41 od 21.03.2022.

Rijeka, srpanj 2022.

Krsto Premužić

## ZAHVALA

Ovim putem zahvalio bih se svojim roditeljima i djevojci na pružanju potpore tijekom cijelog studiranja jer bez njih bi završetak studija bio mnogo teži. Ujedno bih im se zahvalio na velikoj potpori tokom pisanja završnog rada.

Zahvalio bih se i svome mentoru Dariju Iljkiću koji mi je uveliko olakšao rad te mi je tijekom cijelog vremena pisanja rada davao savjete kako da ga poboljšam.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. OPĆENITO O TOPLINSKOJ OBRADI .....	2
3. MIKROSTRUKTURE ČELIKA .....	4
3.1 Fazne pretvorbe čelika.....	8
3.1.1 Stvaranje austenita .....	9
3.1.2 Raspadanje austenita.....	9
3.1.3 Pretvorba austenita u perlit .....	10
3.1.4 Prelazak austenita u martenzit .....	10
3.1.5 Prelazak austenita u bainit .....	12
4. TTT DIJAGRAM.....	13
4.1 Izotermički TTT dijagrami .....	14
4.2 TTT dijagram kontinuiranog ohlađivanja.....	15
5. POBOLJŠAVANJE ČELIKA.....	16
5.1 Klasično poboljšavanje.....	17
5.2 Izotermičko poboljšavanje.....	18
5.3 Glavne komponente pri toplinskoj obradi poboljšavanjem.....	19
5.3.1 Kaljenje .....	19
5.3.2 Popuštanje .....	20
5.4 Hlađenje.....	22
5.5 Čelici za poboljšavanje.....	23
5.5.1 Konstrukcijsko nelegirani čelici korišteni pri poboljšavanju.....	24
5.5.2 Legirani čelici korišteni za poboljšavanje.....	24
5.6. Karakteristike čelika za poboljšavanje .....	25
5.6.1. Manganski čelik .....	25
5.6.2. Čelici legirani kromom .....	25
5.6.3. Krom – molibdenski čelici.....	26
5.6.4. Krom – nikal – molibdenski čelici.....	26

5.6.5. Krom – molibden - vanadijevi čelici .....	26
6. DEFINIRANJE PARAMETARA KOD AUSTENIZACIJE ČELIKA.....	27
6.1. Režimi korišteni pri grijanju na temperaturu austenizacije .....	27
6.2. Vrijeme trajanja austenizacije .....	28
6.2.1. Ordinanz metoda .....	29
6.2.2. Smoljnikova metoda .....	30
6.2.3. Newtonova metoda .....	31
7. TOPLINSKA OBRADA STROJNOG DIJELA KP.22-PT.41.....	33
7.1. Kemijski sastav čelika KP.22-PT.41 .....	33
7.2. Parametri toplinske obrade .....	34
7.3. Prikaz operacijskog lista.....	38
8. ZAKLJUČAK .....	40
LITERATURA.....	41
POPIS SLIKA .....	43
POPIS .....	44
POPIS OZNAKA .....	45
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	47
SUMMARY AND KEY WORDS.....	48



## 1. UVOD

Toplinskom obradom opisujemo utjecaj temperature prema materijalu sa ciljem mijenjanja mikrostrukture i svojstava. Metali koji se najviše toplinski obrađuju su čelici, no ujedno se može i keramika te drugi metali.

Postupak toplinske obrade najčešće se upotrebljava da bi se čelik očvrstio, pri čemu mu se povećavaju mehanička svojstva. Ujedno se koristi kako bi se povećala žilavost, duktilnost, smanjila unutrašnja naprezanja te kako bi se predmet pripremio za obradu rezanja.

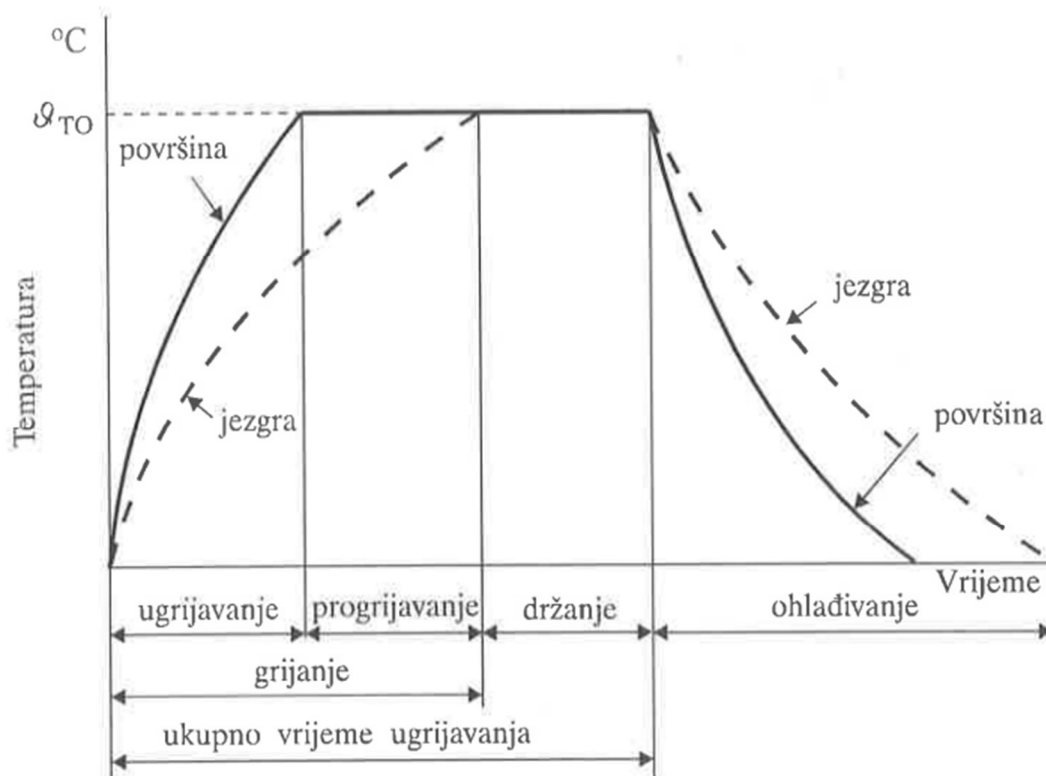
Završni rad bavit će se temom poboljšavanja čelika 34CrNiMo6 kako bi se na kraju obrade dobila tražena poboljšanja. Poboljšavanje smatramo kao jednu od najbitnijih toplinskih obrada te se ostvaruje kaljenjem i visokotemperaturnim popuštanjem.

Rad se bavi opisivanjem procesa poboljšavanja te postupaka nužnih kako bi se pravilno odredile temperature i vremena obrada. Ujedno se definiraju mikrostrukturalne promjene do kojih dolazi kod procesa obrade, opisuje se TTT dijagram radi lakšeg razumijevanja promjena u strukturi materijala te načina zagrijavanja i hlađenja.

Posljednje poglavlje bavi se temom poboljšavanja zadanog čelika te određivanjem parametara kao i prikazivanjem rezultata toplinske obrade.

## 2. OPĆENITO O TOPLINSKOJ OBRADI

Toplinska obrada je postupak namjernog izlaganja predmeta vremensko-temperaturnim ciklusima sa ciljem postizanja zadovoljavajuće mikrostrukture i željenih mehaničkih, kemijskih i fizičkih svojstava. Sastoji se od zagrijavanja predmeta na danu temperaturu, zadržavanja na zadanoj temperaturi neko vrijeme te hlađenja. Toplinski se najviše obrađuju čelici, ali isto tako mogu se i metali, nemetali, keramike i staklo. Toplinska obrada pomaže nam kako bi se izradio čvršći i savitljiviji predmet uz otpornost na abraziju te kako bi mu se povećala duktilnosti. U stvarnosti nije moguće dobiti sve što poželimo jer će se povećanjem čvrstoće povećati krhkost, a omekšavanjem će se smanjiti čvrstoća. Iz toga proizlazi da poboljšavanjem pojedinih svojstva ujedno pogoršavamo druga. Postupak toplinske obrade možemo prikazati dijagramom (Slika 2.1.). [1,2]



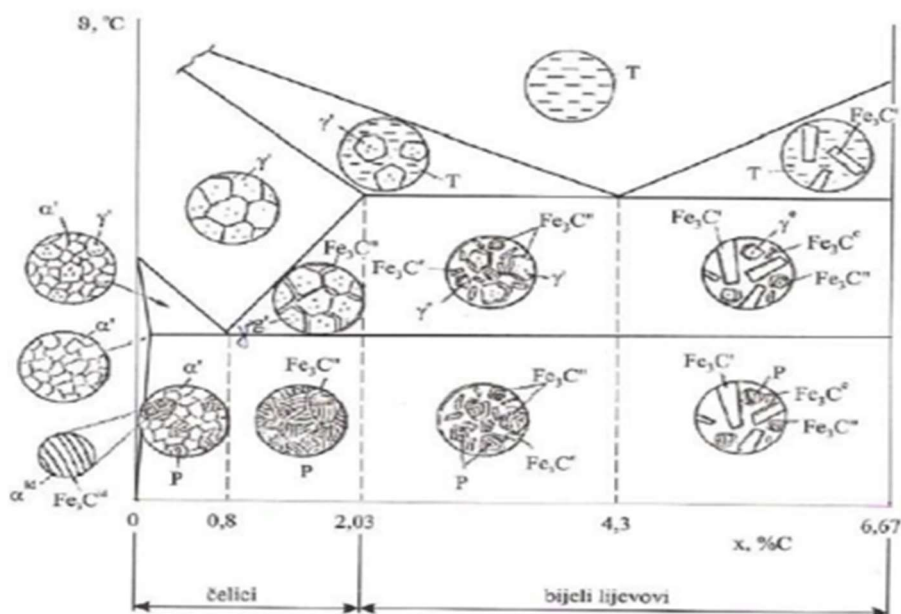
Slika 2. 1. Dijagram toplinske obrade [2]

Pri čemu je :

- $\vartheta_{TO}$  - temperatura toplinske obrade
- ugrijavanje – vrijeme kada će površinski slojevi doseći temperaturu  $\vartheta_{TO}$
- progrijavanje – vremenski period od ugrijavanja do trenutka postignuća slojeva jezgre temperature  $\vartheta_{TO}$
- grijanje – zbroj ugrijavanja i progrijavanja
- držanje – vrijeme predmeta na  $\vartheta_{TO}$  od trenutka progrijavanja do trenutka početka hlađenja
- ohlađivanje – vrijeme snižavanja temperature do trenutka dostignuća zadane temperature slojeva jezgre [2]

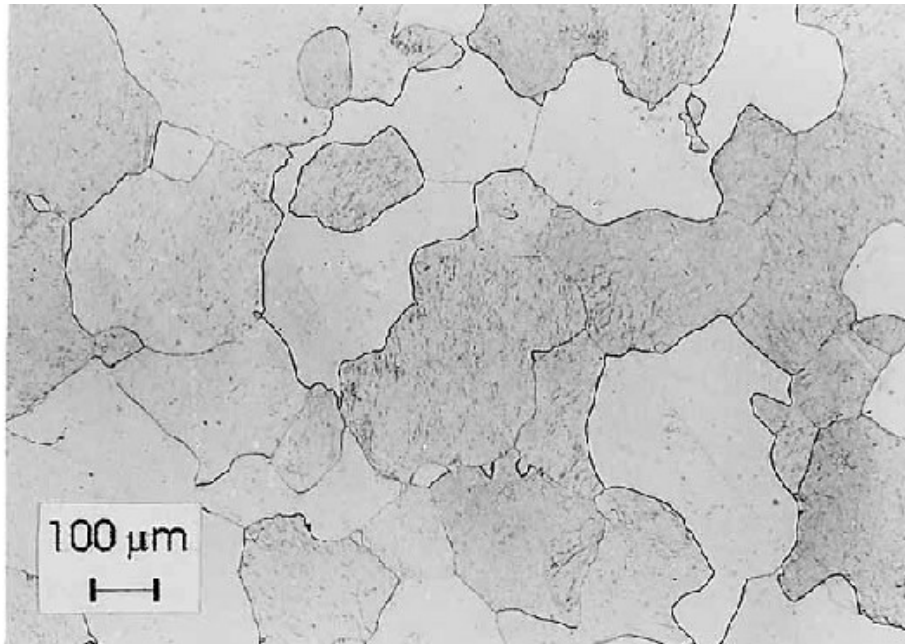
### 3. MIKROSTRUKTURE ČELIKA

Promatrajući područje tehnike, čelik je među najvažnijim konstrukcijskim materijalima, a predstavlja metastabilnu leguru željeza i ugljika ( $\leq 2,03\% \text{ C}$ ). Njegova golemu primjena zasniva se na izvanrednim svojstvima kao što su velika čvrstoća, otpornost prema koroziji i toplini, toplinska vodljivost, magnetska permeabilnost i drugo. Dobiva se oksidacijskim pročišćavanjem sirovog željeza koje se sastoji od ugljika, silicija, mangana, fosfora i sumpora koji se nalazi u najmanjoj mjeri. Čelik možemo podijeliti prema puno osnova od kojih su najvažnije: prema sastavu, mikrostrukтури, namjeni i svojstvima. Mikrostruktura čelika određena je postupkom dobivanja legure, postupcima toplinske obrade i oblikovanja te o njoj ovise svojstva materijala. Ovisno o kemijskom sastavu i temperaturi razlikujemo ferit, cementit, martenzit, perlit, ledeburit, bainit te austenit (Slika 3.1.). [3,5]



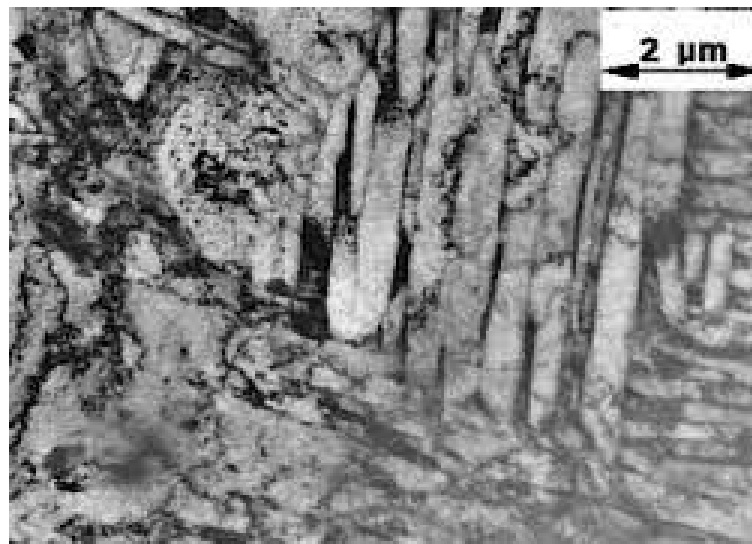
Slika 3. 1. Mikrostrukture s obzirom na postotak ugljika i temperature zagrijavanja [8]

Ferit ima nisku tvrdoću, ali visoku duktilnost sa centriranom kubičnom kristalnom rešetkom. Alotropna modifikacija mu je stabilna do 911 °C. Magnetska svojstva su im vrlo izražena te se u njima gotovo da i ne stvaraju vrtložne struje zbog velike električne otpornosti. Udio ugljika mu je maksimalno 0,025% C, a nastaje na 723 °C. Mikrostrukturu ferita možemo vidjeti na slici 3.2. [4,5]



*Slika 3. 2. Mikrostruktura ferita [2]*

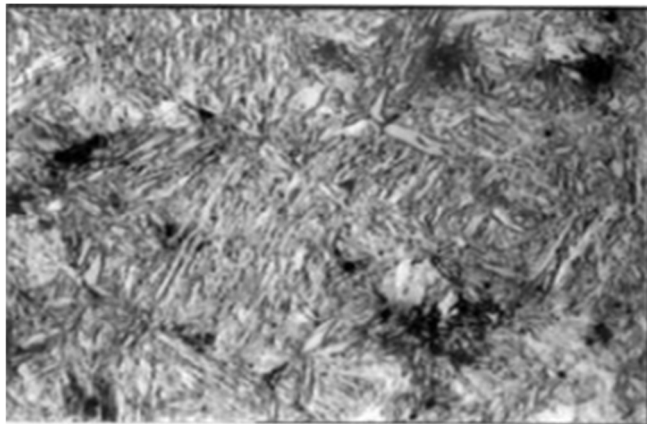
Cementit ili drugim nazivom željezni karbid sastavljen je od 6,67% ugljika i 93,3% željeza. Veoma je tvrd i lomljiv materijal te je poprilično važan u crnoj metalurgiji. Tvrdoća cementita iznosi 850 HV, a vlačna čvrstoća mu je  $750 \text{ N/mm}^2$ . Mikrostruktura cementita prikazana je slikom 3.3. [5]



*Slika 3. 3. Mikrostruktura cementita [2]*

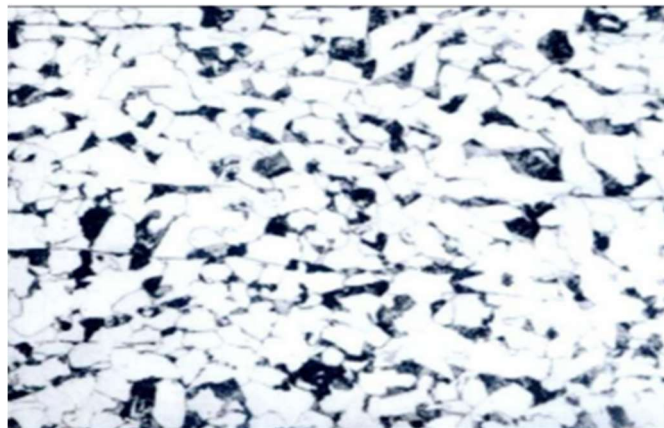
Martenzit nastaje iz austenita ako se čelik na temperaturi austenizacije hladi na dosta nisku temperaturu ili se hladi gornjom kritičnom brzinom. Nakon kaljenja dobiva visoku čvrstoću i

tvrdocu te je vrlo krhki pa se iz toga razloga primjenjuje obrada popuštanja čelika. Kristalna rešetka mu je tetragonalna. Martenzitnu mikrostrukturu možemo vidjeti na slici 3.4. [6]



*Slika 3. 4. Mikrostruktura martenzita [6]*

Perlit je mješavina sastavljena od 12% cementita i 88% ferita sa 0,8% ugljika. U rasponu od 700 do 900 N/mm<sup>2</sup> kreće mu se vlačna čvrstoća dok je tvrdoća oko 220 HV pri istezljivosti koja iznosi 10%. Nastaje pri temperaturi od 723 °C. Feritno-perlitna mikrostruktura prikazana je slikom 3.5. [5]



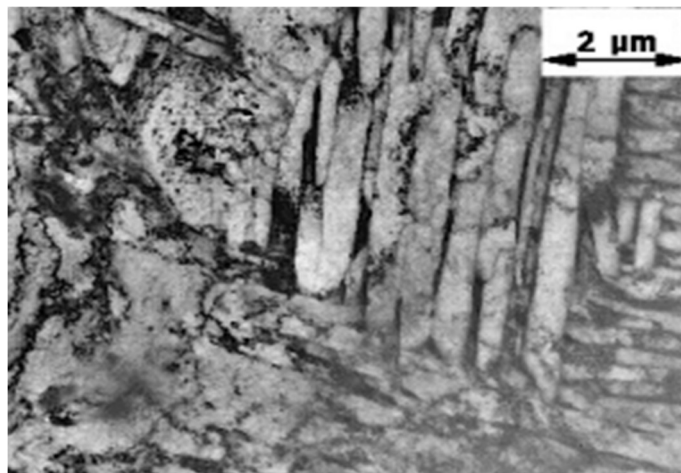
*Slika 3. 5. Feritno-perlitna mikrostruktura [6]*

Ledeburit predstavlja eutektični spoj austenita i cementita sa udjelom ugljika od 4,3% te se dobiva na temperaturi od 1147 °C. Ledeburitna mikrostruktura prikazana je slikom 3.6. [5]



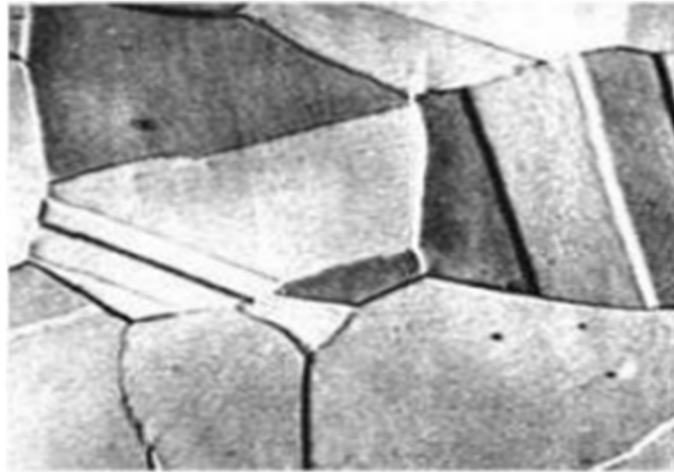
*Slika 3. 6. Mikrostruktura ledeburita [7]*

Bainit nastaje tokom hlađenja čelika pri nižim temperaturama, između temperatura koje odgovaraju formiranju perlita i martenzita pri brzinama između donje i gornje kritične brzine hlađenja. Naspram perlita, odlikuje ga veća tvrdoća i čvrstoća, a sastavljen je od cementita i ferita. Izgled mikrostrukture mu je sličan martenzitu te je prikazan slikom 3.7. [2]



*Slika 3. 7. Mikrostruktura bainita [6]*

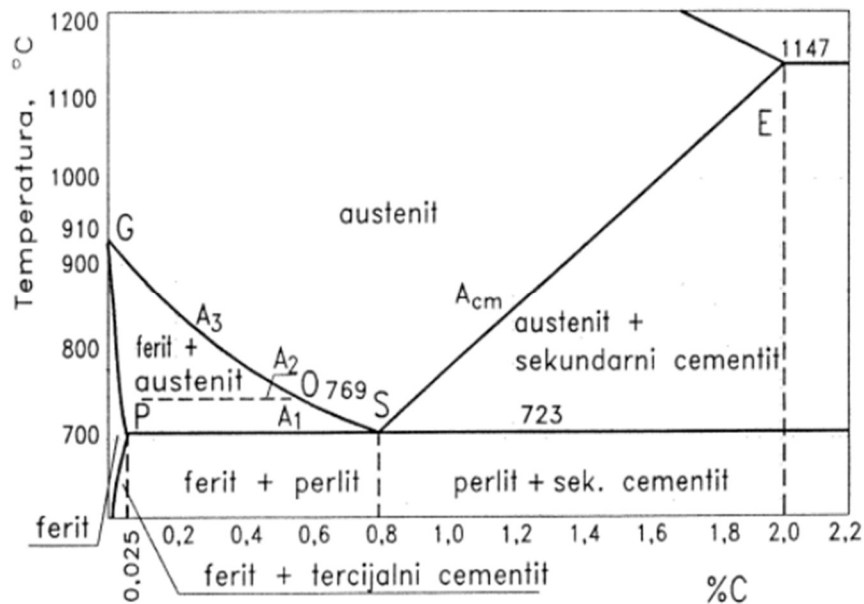
Austenit ima topivost ugljika od 2,06% pri 1147 °C te nema stabilnosti na sobnoj temperaturi kod nelegiranih čelika. Dodavanjem gamagenih elemenata rješava se nestabilnost. Struktura mu je plošno centrirana, a mikrostruktura mu je prikazana slikom 3.8. [4]



Slika 3. 8. Mikrostruktura austenita [6]

### 3.1 Fazne pretvorbe čelika

Poznavanje Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagrama izrazito nam je bitno zbog postupka toplinske obrade. Pomoću dijagrama možemo vidjeti karakteristična područja faza te kritične temperature prekrystalizacije. Fazne pretvorbe kod čelika su tvorba austenita te njegova pretvorba u perlit, martenzit i bainit (Slika 3.9.). [2]

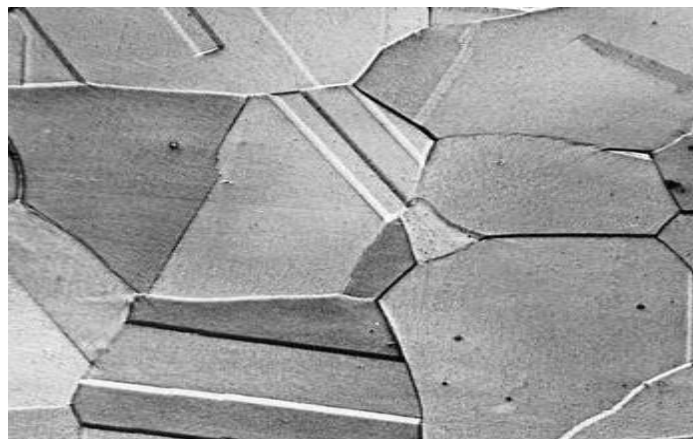


Slika 3. 9. Dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C [2]



### 3.1.1 Stvaranje austenita

Otapanjem čistog željeza te njegovim sporim hlađenjem ono se počinje skrućivati kod temperature od 1538 °C pri čemu nastaje volumno centrirana kubična kristalna struktura koju zovemo delta-željezo ( $\delta$ -Fe). Struktura je održana do temperature od 1392 °C te nakon toga počinje pretvorba kristalne strukture u plošno centriranu kubičnu kristalnu rešetku. Željezo koje sadrži opisanu kristalnu rešetku nazivamo gama-željezo ili austenit ( $\gamma$ -Fe). Nastajanje austenita najlakše se događa na granici cementitne i feritne faze te tamo austenit ima najmanju slobodnu energiju za određenu temperaturu i kemijski sastav. Austenitom nazivamo čvrstu intersticijsku otopinu ugljika u gama-željezu ( $\gamma$ -Fe). Kod temperature od 1147 °C ugljikova topivost unutar austenita iznosi 2,06% te je to ujedno i maksimalna topivost. Pri sobnoj temperaturi austenit nije stabilan no kaljenjem pod posebnim uvjetima možemo ostvariti njegovu stabilnost i na sobnoj temperaturi. Njegova stabilnost kreće se u području od 911 °C do 1392 °C. Mikrostruktura austenita prikazana je na slici 3.10. [4]



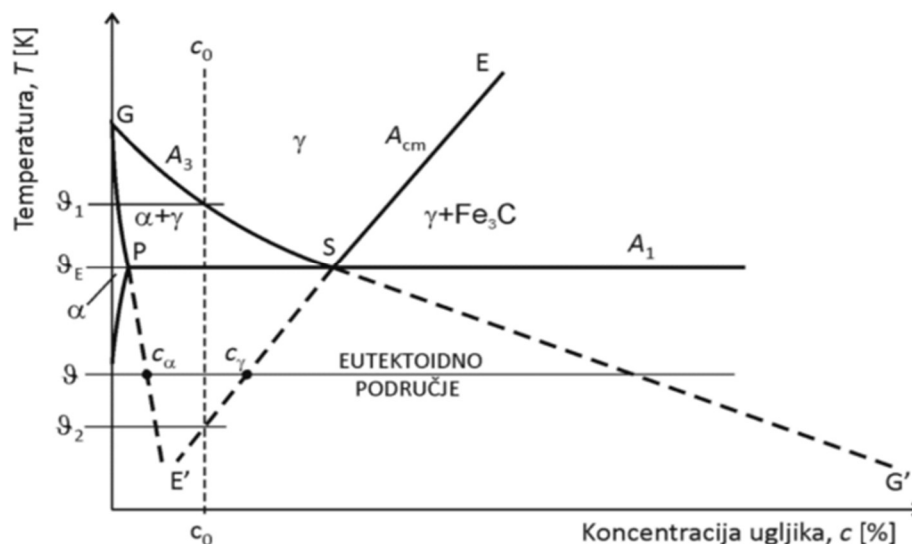
*Slika 3. 10. Mikrostruktura austenita [6]*

### 3.1.2 Raspadanje austenita

U termodinamičkom smislu austenit je manje stabilan od feritno-karbidne mješavine ako ga promatramo ispod ravnotežne točke  $A_1$  pri čemu dolazi do njegovog raspadanja. Austenit će se raspadati u  $\alpha$ -željezo koje ne sadrži karbid niti ugljik. Jednofazna struktura će se pri tome raspadati u dvofaznu, a svaka nova faza razlikovati će se od prethodne zbog različitog udjela ugljika te se zbog toga prelazak austenita u perlit karakterizira raspodjelom udjela ugljika. [11]

### 3.1.3 Pretvorba austenita u perlit

Perlit je slojevita dvofazna lamelarna struktura izgrađena iz slojeva ferita koji zauzimaju 88% i cementita koji zauzima 12% prostora te se javlja u lijevanom željezu i čelicima. Perlit nastaje eutektoidnom reakcijom tijekom sporog hlađenja legure željeza i ugljika dok se ispod 723 °C austenit hladi. Pri potpunoj difuziji metalnih i nemetalnih atoma dolazi do nastanka perlita, a pri nelegiranim čelicima nastaje uz apsolutnu difuziju željeza i atoma ugljika. Uvjeti potrebni za pretvorbu su dovoljno velika razlika između zrna austenita i perlita te dovoljna difuzija atoma. Perlitna pretvorba prikazana je slikom 3.11. [11]



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

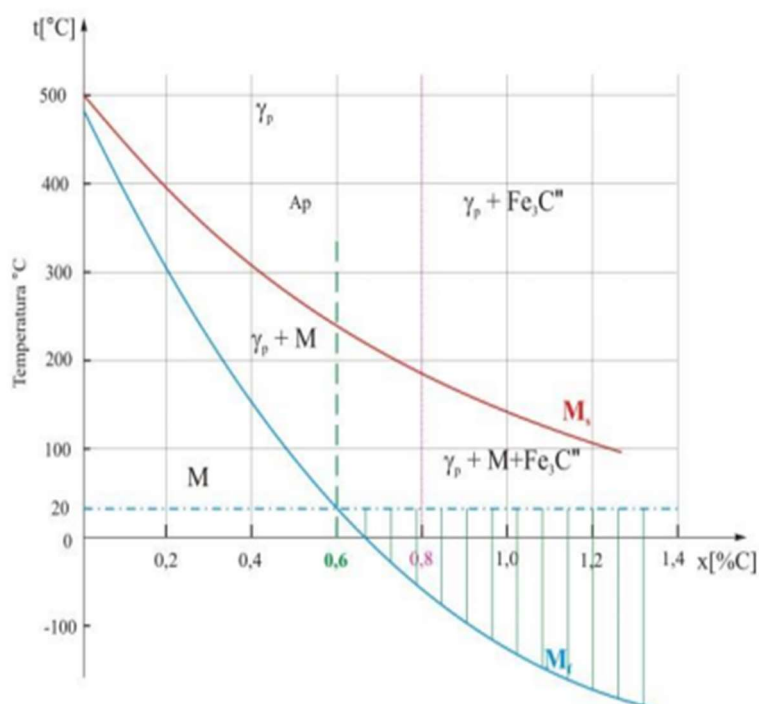
### 3.1.4 Prelazak austenita u martenzit

Povišenje brzina ohlađivanja austenita potisnulo je krivulje A<sub>3</sub>, A<sub>1</sub> i A<sub>cm</sub> metastabilnog Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagrama u jedinstvenu krivulju M<sub>s</sub>. Pri dovoljno brzom ohlađivanju čelika austenitne mikrostrukture, austenit će ostati postojan do sjecišta Fe-C legure s krivuljom M<sub>s</sub> te će tada započeti transformacija u martenzit. Uslijed toga doći će do pothlađenog austenita koji je postojan između A<sub>3</sub> i M te se transformacija pothlađenog austenita u martenzit odvija u određenom rasponu temperatura. Krivulja završetka stvaranja martenzita označava se sa M<sub>f</sub>. Brzina nastajanja martenzita je 5000 m/s. Koncentracije ugljika u martenzitu i primarnome austenitu su jednake. Pri većim koncentracijama ugljika kod primarnog austenita biti će i veći udio zaostalog austenita

nakon pretvorbe martenzita. Martenzitna mikrostruktura sadrži igličasti izgled te je njeno kristalno zрно oblika igličaste pločice. U sredini zrna austenita i martenzita postoji ovisnost o orijentaciji te ona ovisi o položaju pločica. Martenzitna mikrostruktura prikazana je slikom 3.12., a Uptonov dijagram prikazuje slika 3.13. [11]



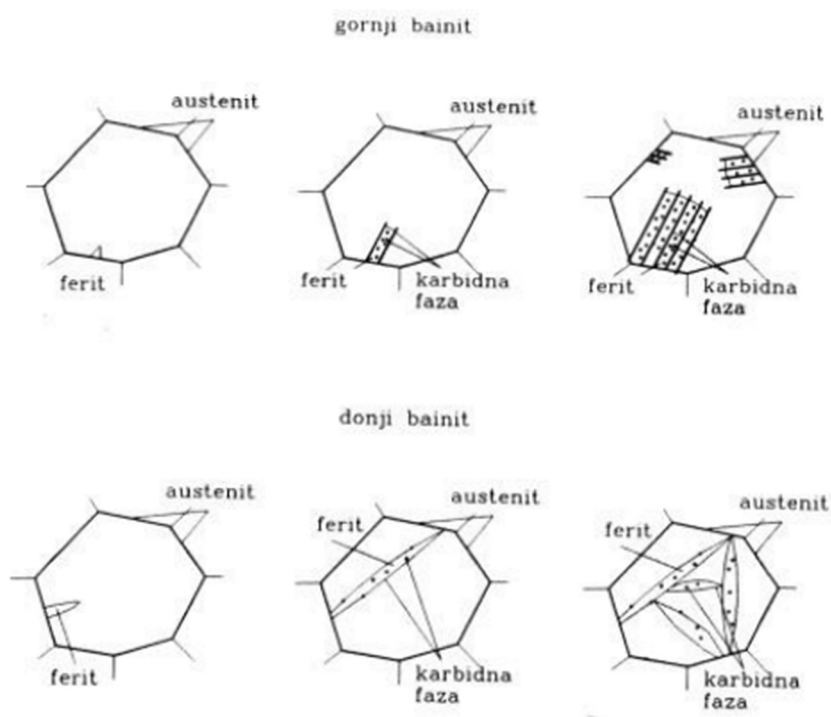
Slika 3. 12. Martenzitna mikrostruktura [11]



Slika 3. 13. Uptonov dijagram [2]

### 3.1.5 Prelazak austenita u bainit

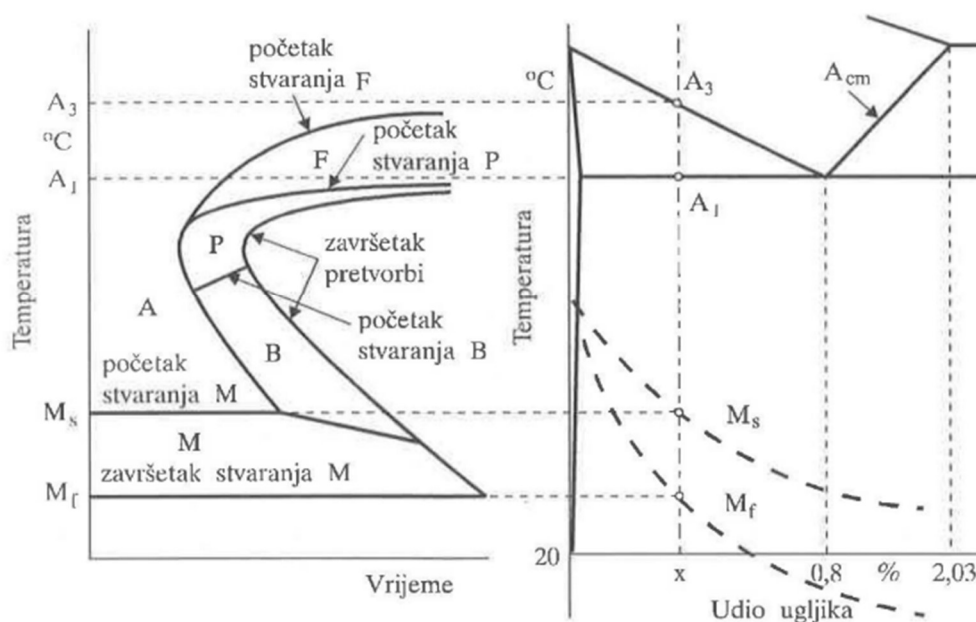
Bainitom se naziva mješavina prezasićenog ferita i karbida. Područje nastanka bainita nalazi se između nastanka perlita i martenzita, a odvija se između 500 i 350 °C. Bainit nastaje pri ohlađivanju čelika u rasponu između donje i gornje kritične brzine sa nižim temperaturama te se stvara struktura od cementita i ferita, pri čemu je ona drugačija od perlita. Pri ovoj temperaturi difuzija atoma ima izrazito malu brzinu te ugljični atomi nemaju mogućnost pomicanja na velike udaljenosti. Čestice cementita su kugličaste jer se zbog male udaljenosti umjesto listića cementita i ferita proizvode isključivo listići ferita. Za pretvorbu bainita potrebno je pothlađivanje austenita koji je osiromašen i dovoljna difuzija ugljika. Austenit se u bainit može pretvarati bezdifuzijskim i difuzijskim mehanizmom (Slika 3.14.). [11]



Slika 3. 14. Stvaranje bainita [11]

## 4. TTT DIJAGRAM

TTT dijagram za čelik koristi se za razumijevanje transformacije čelika. On objašnjava područje transformacije martenzita, prikazuje kakvu važnost ima brzina hlađenja, zadržavanje austenita u mikrostrukturi i stvaranje bainita u čeliku. TTT dijagram prikazuje odnose vremena, transformacije u čeliku i odnose temperatura. Razlikujemo više dijagrama od čega Uptonov vrijedi za ohlađivanje pri vrlo velikim brzinama dok se za veoma dugo vrijeme ohlađivanja koristi Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram. Pomoću TTT dijagrama prikazuje se i dinamika faznih pretvorbi čelika pri ohlađivanju iz austenitnog područja. Raspad austenita ostvaruje se pri izotermičkim uvjetima gdje je temperatura tokom vremena promjene austenita u neke sekundarne faze konstantna te pri kontinuiranim uvjetima gdje tijekom vremena promjene austenita u sekundarne faze temperatura stalno pada (Slika 4.1.). [12]



Slika 4. 1. TTT dijagram [12]

Oznake u TTT dijagramu su:

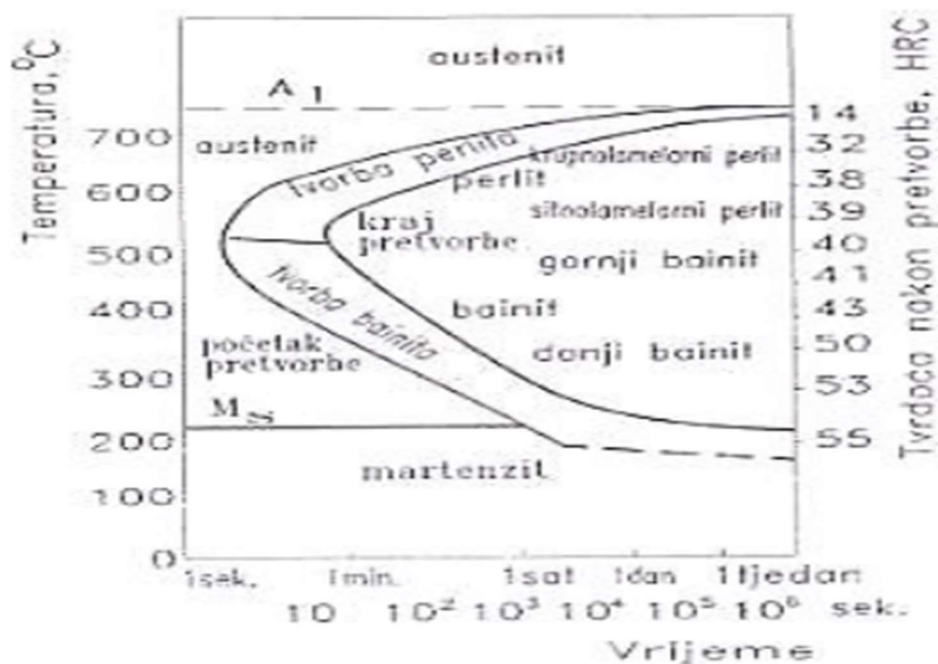
- F – pretvorba austenita u primarni ferit
- P – pretvorba austenita u perlit
- B – pretvorba austenita u bainit
- M – pretvorba austenita u martenzit

- $A_{c1}$  – temperatura početka formiranja austenita
- $A_{c3}$  – temperatura završetka pretvorbe ferita u austenit

Promatrajući raspad austenita razlikujemo izotermički TTT dijagram i TTT dijagram kontinuiranog hlađenja. [12]

#### 4.1 Izotermički TTT dijagrami

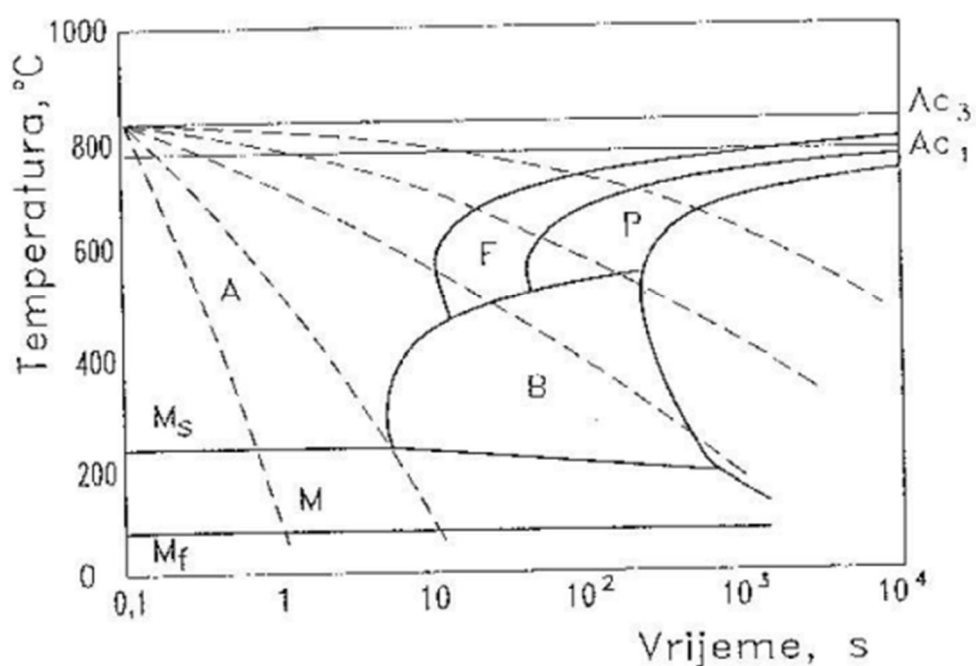
Dijagrami izotermne transformacije (ITT) su dijagrami koji prikazuju odnos temperature i vremena najčešće na logaritamskoj skali (Slika 4.2.). Veoma su korisni pri razumijevanju transformacija legiranog čelika pri višim temperaturama. ITT dijagram vrijedi samo za jedan materijal pri konstantnoj temperaturi tijekom transformacije te uz brzo hlađenje na istu temperaturu. On prikazuju raspad austenita uz konstantnu temperaturu te omogućuje uvid u kraj i početak pretvorbe. 1% vremena utrošenog do transformiranog austenita uzima se kao početak pretvorbe, a kraj kao 99% utrošenog vremena. Inkubacijsko vrijeme je vrijeme koje se izgubi od početka pretvorbe. Pri dovoljno dugom držanju austenita na temperaturi izotermičke pretvorbe dolazi do izotermičke transformacije pothlađenog austenita. [12]



Slika 4. 2. Izotermički TTT dijagram [1]

## 4.2 TTT dijagram kontinuiranog ohlađivanja

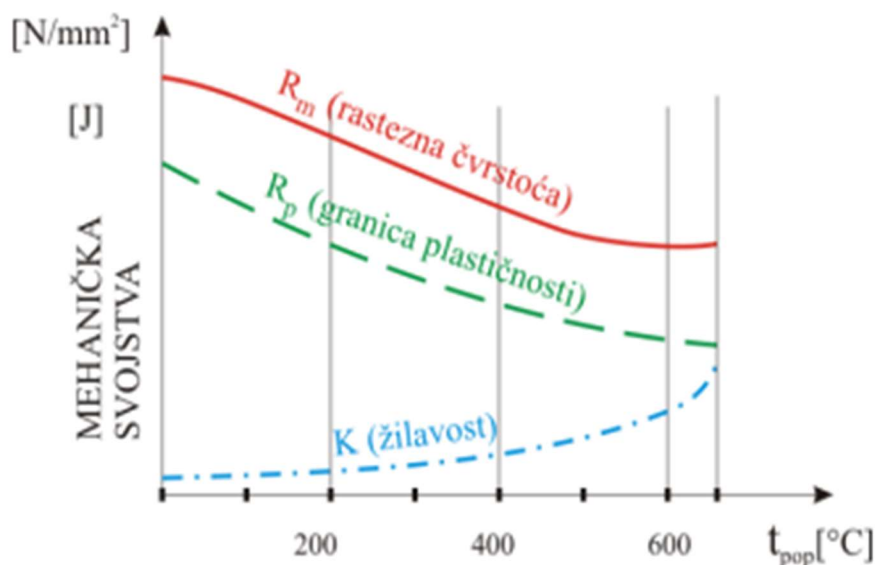
Dijagram kontinuiranog ohlađivanja koristi mjerilo koje je logaritamsko te zbog toga bolje prikazuje mikrostrukture kod dugih i kratkih trajanja ohlađivanja (Slika 4.4.). Promjene koje se prate moraju biti kod neprekidnog ohlađivanja te bez ugrijavanja. Mikrostruktura je mješavina nisko i visokotemperaturnog raspada austenita. Gornja kritična brzina gašenja služi nam za minimaliziranje zaostalog unutarnjeg naprezanja i za deformaciju obratka. Kontinuirano ohlađivanje podeutektoidnog čelika prikazano je slikom 4.3. [12]



Slika 4. 3. TTT dijagram kontinuiranog ohlađivanja podeutektoidnog čelika [1]

## 5. POBOLJŠAVANJE ČELIKA

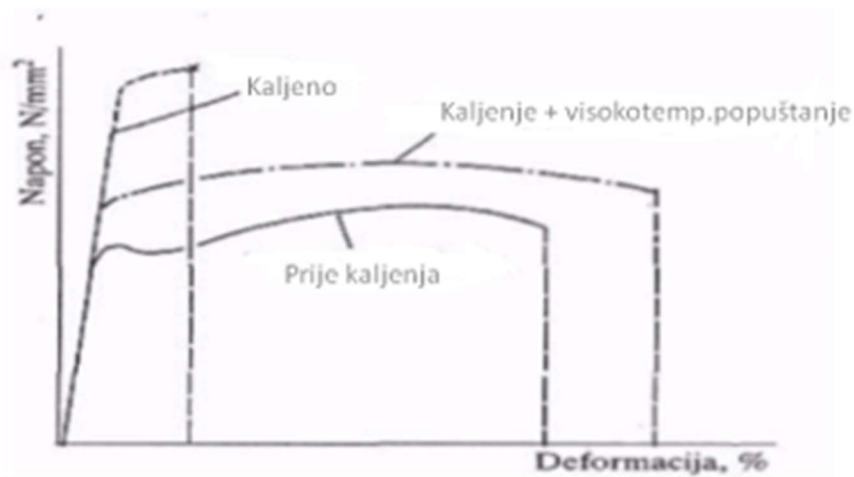
Jedan od najvažnijih postupaka toplinske obrade čelika jest njegovo poboljšanje koje se često naziva i oplemenjivanje te je jedan od kompleksnijih postupaka. Najčešće se sastoji od kombinacije visokotemperaturnog popuštanja i kaljenja. Zadatak poboljšavanja čelika jest postizanje tvrdoće i čvrstoće. Tim postupkom stvara se visoka granica razvlačenja i tečenja što je jednako povećanju žilavosti. Za proces poboljšavanja uzimaju se podeutekdoidni čelici, tj. oni s udjelom ugljika od 0,3% do 0,6%. Poslije postupka kaljenja čelik postiže visoku granicu tečenja, ali ujedno i malu plastičnost te nisku žilavost. Kako bi se riješili navedeni nedostaci koristi se visokotemperaturno popuštanje. Pri tom procesu predmet se zagrijava na oko 600 °C te se kasnije sporo hladi. Perlit formiran ovim postupkom izrazito je boljih svojstava nego onaj dobiven direktnim kaljenjem. Ovisnost mehaničkih svojstva čelika o temperaturi popuštanja prikazana je slikom 5.1. [13]



Slika 5. 1. Dijagram ovisnosti mehaničkih svojstava čelika o temperaturi popuštanja [10]

Poslije poboljšavanja dobiva se čelik sa višom granicom tečenja te izduženja nego li je imao prije korištenja postupka kaljenja. Iz zadanog se jako povećava površina ispod krivulje naprezanja - izduženja što daje povećanje žilavosti nasuprot stanja prije poboljšanja, a pogotovo pri usporedbi sa stanjem nakon kaljenja. Postupak poboljšanja prikazujemo slikom 5.2. [9]



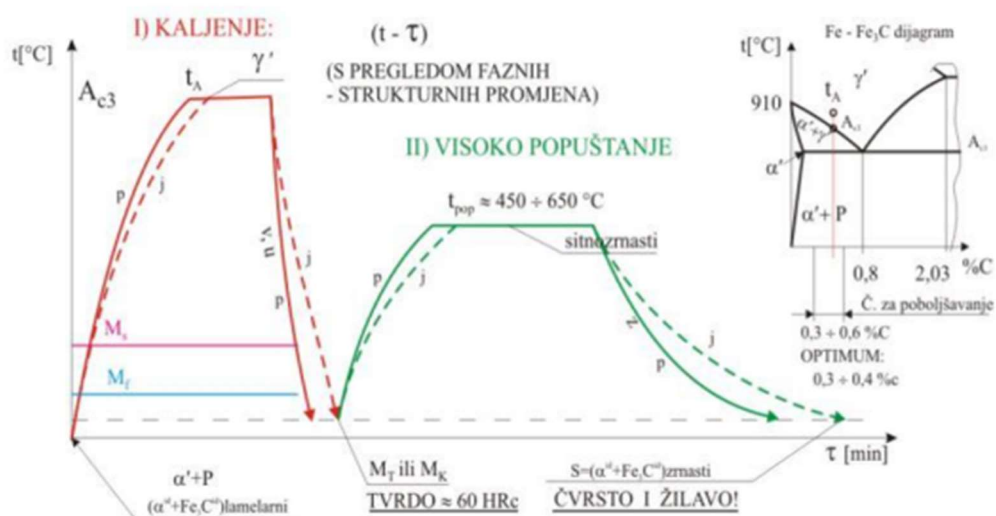


Slika 5. 2. Postupak poboljšanja [13]

Možemo reći da se kaljenjem dobiva martenzitna struktura, a visokotemperaturnim popuštanjem stvaramo uvjete za stvaranje zrnate eutektoidne strukture pri čemu se dobiva veća čvrstoća i žilavost čelika. Postupke za poboljšavanje čelika dijelimo na klasično poboljšavanje i izotermičko poboljšavanje. [9]

### 5.1 Klasično poboljšavanje

Sa slike 5.3 možemo vidjeti klasično poboljšavanje koje je kombinacija kaljenja s temperaturom austenizacije i visokotemperaturnog popuštanja pri temperaturama od 450 do 600 °C [14].

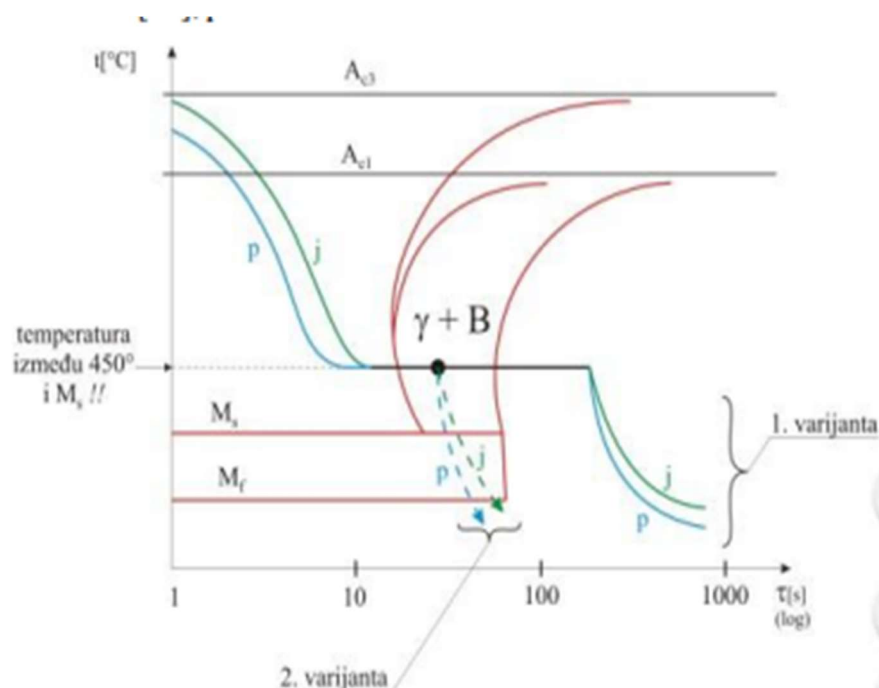


Slika 5. 3. Dijagram klasičnog poboljšavanja [14]

Ujedno možemo uočiti krivulje hlađenja te grijanja o ovisnosti o vremenu kod poboljšavanja i kaljenja. Krivulja jezgre prikazana je linijama koje su isprekidane iz čega se može uočiti da temperatura jezgre kasni sa obzirom na temperaturu površine. Za obratke koji imaju veće dimenzije ujedno se povećava i kašnjenje. Udio ugljika navedenih čelika kreće se od 0,3% do 0,6%, ali najbolji su oni između 0,3% i 0,4% jer se kaljenjem ne stvara tetragonalni nego kubični martenzit pa se time ujedno i umanjuju unutrašnja naprezanja. Poboljšavanja se provode kod dinamički opterećenih strojnih dijelova. [15]

## 5.2 Izotermičko poboljšavanje

Izotermičko se poboljšavanje provodi vrlo brzim ohlađivanjem pri temperaturi austenizacije  $t_A$  u kupki kojoj je izotermička temperatura  $t_{iz}$  iznad temperature  $M_s$ , a cilj je dobivanje bainita (Slika 5.4.). [15]



Slika 5. 4. TTT dijagram izotermičkog poboljšanja [15]

Prednosti koje pruža izotermičko poboljšavanje su:

- Odvijanje modifikacije austenita pri konstantnoj temperaturi u svim slojevima istovremeno pri čemu dolazi do minimalnog toplinskog naprezanja;
- Dobra razina žilavosti poslije obrade (bainitna faza) [15]

Pri čemu su nedostaci:

- Veća tvrdoća zakaljenog čelika
- Dugo trajanje toplinske obrade pri čemu je proces dulji čim je temperatura izoterme niža [15]

Izotermičko kaljenje sadrži dvije varijante:

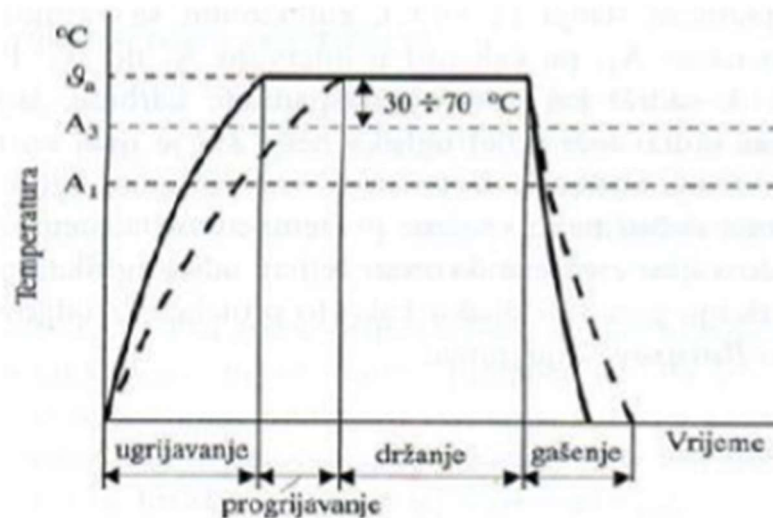
- Prvi slučaj kada se dobiva isključivo bainit pri čemu se obradak ne uzima iz kupke prije nego li se završi pretvorba. Time se dobiva manja tvrdoća uz veću žilavost
- Drugi slučaj gdje se dobiva kombinacija bainita i martenzita pri čemu se obradak iz kupke uzima prije kraja austenitne pretvorbe. Nakon toga se obradak hladi na zraku i time dobiva veću tvrdoću [15]

### **5.3 Glavne komponente pri toplinskoj obradi poboljšavanjem**

Kaljenje i visokotemperaturno popuštanje dvije su najbitnije komponente postupka poboljšavanja. [9]

#### **5.3.1 Kaljenje**

Kaljenje se izvodi na način pri kojemu se obradak zagrijava na temperaturu austenizacije, nakon toga se progrijava i na kraju gasi potrebnom brzinom da bi dobio određena svojstva. Najbitnija karakteristika koja se želi dobiti jest velika tvrdoća. Dobivena tvrdoća ovisi o ugljiku koji se nalazi u čeliku prije procesa kaljenja i o količini martenzita koji ispunjava mikrostrukturu poslije kaljenja. Dijagram kaljenog čelika prikazan je slikom 5.5. [9]



Slika 5. 5. Dijagram kaljenog čelika [6]

Obično je kaljenje samo još jedna operacija kojom obrađujemo materijal no postoji specijalni slučaj kod obrade austenitnih čelika koji su visokolegirani te je tamo kaljenje završna te ujedno i jedina operacija toplinske obrade. [9]

Kaljenje se izvodi kako bi:

- se povećala tvrdoća materijala te je nakon procesa kaljenja bitno provesti popuštanje koje je niskotemperaturno
- se poboljšale mehaničke karakteristike materijala te je nakon procesa kaljenja bitno provesti popuštanje koje mora biti visokotemperaturno
- se povećala stabilnost čelika koji su austenitni
- se poboljšala mehanička karakteristika konstrukcijskih čelika korištenjem postupka koji se naziva disperzijsko ojačavanje te je nakon procesa kaljenja bitno provesti postupak starenja (opuštanja) [9]

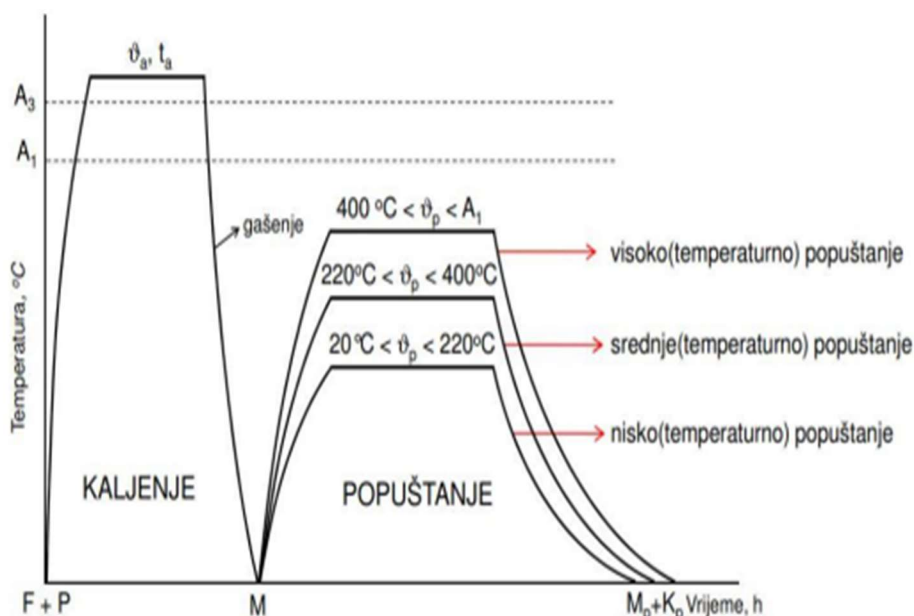
### 5.3.2 Popuštanje

Popuštanje definiramo kao jedan od postupka toplinske obrade koji se najčešće javlja poslije kaljenja. Nakon završetka kaljenja materijali dobivaju veliku čvrstoću i tvrdoću no isto tako postaju jako krhki i podložniji pucanju pri dinamičkim opterećenjima. Postupak popuštanja koristimo kako bi dobili materijal koji je žilaviji i otporniji na dinamička opterećenja. Prilikom popuštanja ujedno se smanjuje tvrdoća i vlačna čvrstoća. Postupak popuštanja izvodi se na način da se nakon zagrijavanja zakaljenog čelika na zadanu temperaturu, koja je niža od temperature

austenizacije, predmet jedno kratko vrijeme drži na toj temperaturi te se tako zagrijava po cijelom presjeku. Nakon navedenog zagrijavanja slijedi postupak hlađenja koje se izvodi na zraku, u ulju ili nekom drugom sredstvu. Popuštanje se može podijeliti u tri grupe s obzirom na temperaturu popuštanja : [17]

- popuštanje pri niskim temperaturama
- popuštanje pri srednjim temperaturama
- popuštanje pri visokim temperaturama [17]

Popuštanje pri niskim temperaturama izvodi se pri rasponu od 20 do 220 °C. Pri navedenom popuštanju tvrdoća se osjetno ne smanjuje. Atomi se pomiču uslijed zagrijavanja čelika te se ujedno smanjuju naprezanja unutar materijala. [17]



Slika 5. 6. Popuštanje pri različitim temperaturama [17]

Pri temperaturi od 220 do 400 °C izvodi se popuštanje pri srednjim temperaturama. Povećavanje elastičnosti te veća žilavost uz smanjenje tvrdoće glavni je cilj ovog popuštanja. Ova vrsta popuštanja najviše se koristi kod izrade opruga te alata za prešanja i kovanja. Popuštanje pri visokim temperaturama odvija se pri temperaturi od 400 °C te nadalje do temperature koja karakterizira austenizaciju. Najbitnija stvar je da se ne nadmaši temperatura austenizacije jer se tada dolazi do područja žarenja i gubi se učinak koji stvara postupak kaljenja. (Slika 5.6.)

Glavni cilj popuštanja kod visokih temperatura je da se povisi žilavost i čvrstoća. Pri popuštanju kod visokih temperatura mikrostruktura martenzita koja ima zaostali austenit dobiven kaljenjem

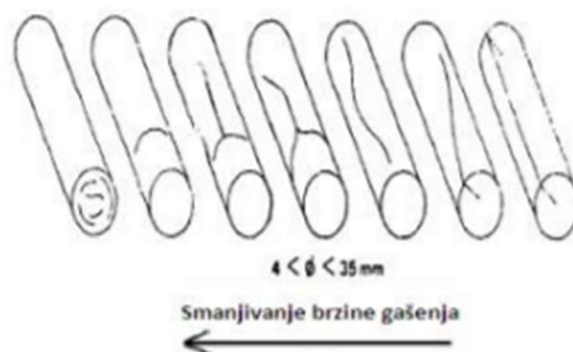
prelazi u sorbitnu mikrostrukturu koja je mekša i žilavija. Takvo popuštanje koriste dinamički opterećeni strojni elementi te elementi za rad koji imaju uvjete povišenih temperatura. [17]

## 5.4 Hlađenje

Bitna komponenta kod svih toplinskih obrada je hlađenje, tj. rashladno sredstvo. Najbitniji podatak kod hlađenja je brzina kojom se hladi. Svojstva i mikrostruktura koju će poslije toplinske obrade čelici primiti ovise o brzini ohlađivanja. Ukoliko želimo dobiti odgovarajuću brzinu ohlađivanja tada moramo odabrati pravilno rashladno sredstvo. Pri izboru rashladnog sredstva vrlo je bitno uzeti karakteristike koje to sredstvo ima jer one na kraju mogu utjecati o materijal koji ćemo gasiti.

Kada kalimo pri hlađenju tada je vrlo bitno da se postigne brzina ohlađivanja koja će biti veća nego li je kritična jer tako dolazi do stvaranja martenzitne strukture. Sredstvo koje ćemo odabrati za ohlađivanje je jako bitno jer ono ima direktan utjecaj na brzinu hlađenja.

Kod gašenja čelika s temperature austenizacije dolazi do razlike temperature u te oko presjeka obratka. Zbog takvih razlika temperature dolazi do toplinskih naprezanja, ali ujedno dolazi i do transformacijskih naprezanja što se vidi u promjeni volumena te stvaranja plastičnosti. Unutrašnjim naprezanjima nazivamo kombinaciju toplinskih i transformacijskih naprezanja. Ukoliko se dogodi da se kod gašenja naprezanja koja su unutarnja premaši granica razvlačenja materijala, tada će doći do nastanka pukotina (Slika 5.7.). [9,17,18]



Slika 5. 7. Pojavljivanje pukotine prilikom hlađenja materijala [16]

Kada izabiremo sredstvo kojim ćemo gasiti, najbolje je uzeti sredstvo koje će ostvariti najmanju potrebnu, ali isto tako i dovoljno veliku brzinu potrebnu da bi se formirala martenzitna mikrostruktura. Ako je brzina ohlađivanja prevelika tada je vrlo vjerojatno da će doći do nastanka pukotine te tada dolazi do uništenja obratka. Najbitniji cilj koji ima gašenje jest da se postigne tražena mikrostruktura i svojstva čelika. Ususret tome došlo je do razvoja mnogih različitih metoda gašenja. Sredstva kojima gasimo dijele se u tri skupine uzimajući u obzir pojavu kod koje se stvara parni omotač kod uranjanja obradaka na temperaturi koja odgovara austenizaciji. [9,17,18]

- ❖ Sredstva kod kojih je vrelište niže od temperatura austenizacije čelika:
  - Emulzija
  - Voda
  - Ulja koja se koriste za kaljenje
  - Otopine polimera
- ❖ Sredstva kod kojih je vrelište više nego li je temperatura austenizacije čelika:
  - Rastaljena sol
  - Rastaljeni metal
- ❖ Vakuum i tehnički plinovi:
  - Čestice koje su fluidizirane
  - Interni plinovi kao što je argon, helij te dušik
  - Zrak [9,17,18]

## 5.5 Čelici za poboljšavanje

Ovoj vrsti čelika pripadaju čelici koji su nisko-legirani te konstrukcijsko nelegirani. Kemijskim sastavom te udjelom ugljika omogućavaju kaljenje te se njihovim poboljšavanjem povećava žilavost za pojedinu vlačnu čvrstoću. Koriste se pri izradi materijala koji su izloženi visokim i složenijim opterećenjima. [19]

### 5.5.1 Konstrukcijsko nelegirani čelici korišteni pri poboljšavanju

Nelegirani čelici karakterizirani su kvalitetom i plemenitošću. Veća količina ugljika i mangana rezultira povećanjem čvrstoće. Prokaljivost im je malena te im je upotreba ograničena na dijelove sa presjekom koji je manji od 100 mm iz razloga što kod većih presjeka ne mogu biti osigurana mehanička svojstva iz razloga što je tada slaba prokaljivost. Nelegirani čelici korišteni za poboljšavanje karakterizirani su malim stupnjem stvaranja pukotina kada se zagrijavaju ili hlade bez obzira kako se izvodi hlađenje, iako se povećanjem količine ugljika povećava osjetljivost zareza, niskom obradivošću pomoću metode gdje se čestice odvajaju kod žarenog stanja te se obradivost poboljšava normaliziranjem. Spomenutim čelicima ujedno se povećava otpornost na habanje kada im povećavamo udio ugljika što se najviše osjeti sa završetkom površinskog kaljenja. Posljednja karakteristika navedenih čelika jest ta da im se povećanjem udjela smanjuje korozivna postojanost. [19]

### 5.5.2 Legirani čelici korišteni za poboljšavanje

Legirane čelike možemo podijeliti na više grupa kod kojih razlikujemo Mn, Cr, Cr-Mo, Cr-Mo-V i Ni-Cr-Mo čelike. Oni se koriste u slučaju gdje se proračunom utvrdi da korištenje najjeftinijeg nelegiranog čelika ne zadovoljava postavljene zahtjeve. U obzir moramo ujedno i uzeti geometriju i dimenziju izratka kako bi došlo do uniformnog poboljšavanja uzduž cijelog presjeka. Legirani čelici uglavnom teže dobivanju većih izduženja, većih dinamičkih čvrstoća te poboljšavanju čvrstoće. [19]



Tablica 5. 1. Standardi čelika pogodnog pri poboljšavanju [19]

EN 10083-1	Čelici za poboljšavaje. Dio 1: Tehnički zahtjevi za isporuku za specijalne čelike (uključujući izmjenu A1: 1996)
EN 10083-2	Čelici za poboljšavaje. Dio 2: Tehnički zahtjevi za isporuku za specijalne čelike (uključujući izmjenu A1: 1996)
EN 10083-3	Čelici za poboljšavaje. Dio 2: Tehnički uvjeti za isporuku čelika sa sadržajem bora
EN 10277-5	Proizvodi od sjajnog čelika. Tehnički uvjeti za isporuku. Čelici za poboljšavanje.

## 5.6. Karakteristike čelika za poboljšavanje

### 5.6.1. Manganski čelik

Spomenuti čelik koristi oznaku 28 Mn 6 te ga karakterizira veća prokaljivost sa obzirom na nelegirane čelike pa je ona i razlog zbog kojeg je moguće gašenje u ulju. Zrna su mu gruba iz razloga što je on gamageni element, a ujedno je i osjetljiv na popuštanje. Zbog zadanih razloga toplinska je obrada manganskog čelika osjetljiva. Velika sklonost pregrijavanju te niska granica razvlačenja karakteriziraju negativne karakteristike, no one se mogu popraviti povećanjem silicija (Si) u rasponu od 0,8 do 1,2% te se time ujedno poboljšava i otpornost prema trošenju. Zadani čelici upotrebljavaju se pri veličinama promjera od 100 mm. [22]

### 5.6.2. Čelici legirani kromom

Navedeni čelici koriste oznaku 34 Cr 4 te su poznatiji kao nehrđajući čelici. Postotak kroma koji sadrže iznosi najmanje 12%. Koriste se kod proizvoda koji imaju promjer do 100 mm, a kod ekstremnih slučajeva i do 160 mm. Dodavanje kroma uzrokuje povećanje vlačne čvrstoće te granice razvlačenja. Ono ujedno dovodi do usitnjavanja zrna austenita iz čega proizlazi veća žilavost. Proizvodi koji su promjera do 60 mm imaju manju žilavost iz razloga što se tada u jezgri dešava pretvorba austenita u spoj martenzita i ferita. [22]

### 5.6.3. Krom – molibdenski čelici

Krom – molibdenski čelici za poboljšavanje imaju jako dobru prokaljivost te otpornost na pojavu krhkosti pri popuštanju. Oni su ujedno najotporniji na popuštanje te se koriste pri radu kod temperatura do 550 °C. Koriste se kod proizvoda koji imaju promjer do 250 mm. Njihova odlika je uporaba pri napregnutim konstrukcijama kao što je avijacija te se ujedno koriste i u automobilskoj industriji. [22]

### 5.6.4. Krom – nikal – molibdenski čelici

Krom – nikal – molibdenski čelici sadrže maksimalno 0,3% Mo te se time reducira krhkost popuštanja. Karakterizirani su najvećom prokaljivošću koja proizlazi iz međudjelovanja kroma i nikla. Korištenje nikla ujedno povećava žilavost. Molbidno – martenzitna struktura omogućuje pronalaženje bainitne strukture u jezgri proizvoda dimenzija do 1000 mm. Ujedno omogućuje rad pri temperaturama do -70 °C. Navedeni čelici koriste se za izradu dijelova aviona, raketa te svih strojeva koji djeluju pod ekstremnih uvjeta. [22]

### 5.6.5. Krom – molibden - vanadijevi čelici

CrMoV opisuje se kao čelik koji sadrži niskolegirani ferit. Ujedno je otporan na puzanje te se koristi kod povišenih temperatura. Navedeni čelici omogućuju čvrstoću do 580 °C te tada dolazi do pucanja. Navedeni čelik koristi se kod pričvršćivanja te za izradu dijelova za elektranu. [22]

## 6. DEFINIRANJE PARAMETARA KOD AUSTENIZACIJE ČELIKA

Austenizacijom opisujemo proces kod kojega se izradak grije te se pri tome zadržava na određenoj temperaturi iznad  $A_{C_1}$  iz razloga da se struktura pretvori u austenit. Austenitna pretvorba može se podijeliti na potpunu i djelomičnu. Postoji više načina određivanja temperature austenizacije kao što su:

- određivanje u odnosu na temperaturu  $A_{C_1}$  ili  $A_{C_3}$
- određivanje pomoću stručnih priručnika
- određivanje iz dijagrama

### 6.1. Režimi korišteni pri grijanju na temperaturu austenizacije

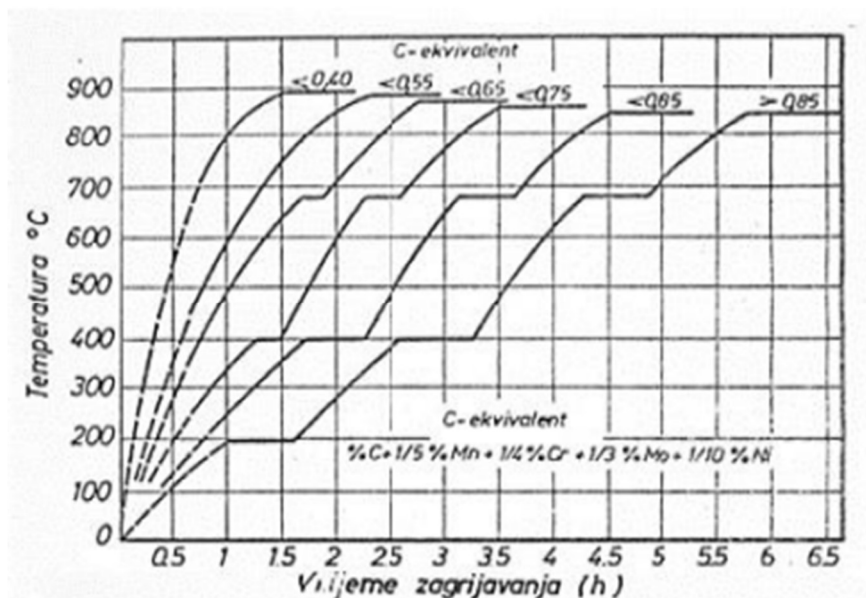
Kako bi se odredili navedeni režimi bitno je da se poznaju brzine ugrijavanja koje se mogu podijeliti na:

- tehnički moguće koje ovise o opremi i mediju, obliku i rasporedu te razlici kod temperatura
- tehnički dozvoljene koje ovise o konfiguraciji obratka te sastavu i strukturi materijala

Kako bi se spriječile pukotine koje nastaju usred ugrijavanja, moraju se koristiti dozvoljene brzine ugrijavanja. Pomoću njih ugrijavanje se vrši bez stvaranja pukotina, a osjetljivost kod nastanka pukotina pri ugrijavanju može se izračunati prema:

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + \frac{V}{5} + \frac{Si-0,5}{5} + \frac{Ti}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Al}{10} \quad (6.1.)$$

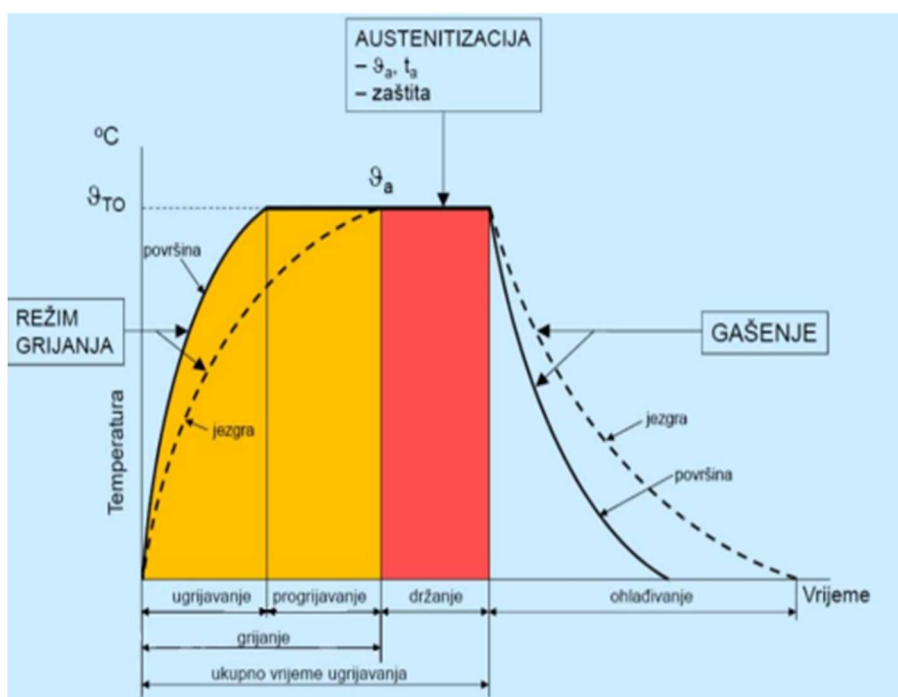
Opisani izraz koristi se ako su elementi u granicama : Al 2%; C 0,9%; Mn 1,1%; Cr 1,8%; Mo 0,5%; Ni 0,5%, V 0,25%; Si 1,8%; Ti 0,5%; W 2%.  $C_{ekv}$  koristi se za određivanje potrebnog predgrijavanja koristeći dijagram na slici 6.1.



Slika 6. 1. Režim ugrijavanja s obzirom na  $C_{ekv}$  [20]

## 6.2. Vrijeme trajanja austenizacije

Trajanje austenizacije nije fiksno te se za svaki obradak mora odrediti posebno. Vremena dijelimo na vrijeme ugrijavanja, progrijavanja, zadržavanja na određenoj temperaturi i grijanja. Vrijeme grijanja određeno je velikim brojem faktora kao što su tehnološki parametri, faktori ovisni o obratku i postrojenja. Režim grijanja prikazan je slikom 6.2.



Slika 6. 2. Režim grijanja [20]

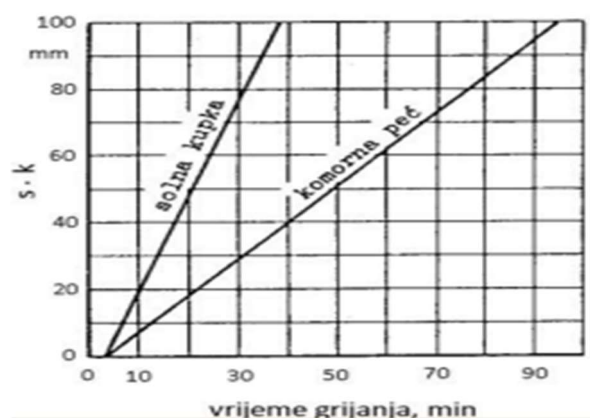
Postoje različite metode za određivanje vremena trajanja grijanja poput Ordinanz metode, Smoljnikov metode te Newton metode.

### 6.2.1. Ordinanz metoda

Kako bi se odredili vrijeme trajanja grijanja Ordinanz metodom potrebno je znati kemijski sastav čelika te ujedno i dimenzije, oblik i medij koji se koristi za ugrijavanje. Oblik se može izraziti pomoću koeficijenta u odnosu na karakterističnu dimenziju „s“. Opisana dimenzija obuhvaća mjesta na presjeku koja koristimo kao mjerodavna za određivanje rezultata toplinskih obrada. Kod nekih oblika nužno je ujedno odrediti i koeficijent oblika „k“ (Slika 6.3.). Množenjem koeficijenta oblika „k“ i dimenzije „s“ dolazimo do veličine potrebne kako bi odredili vrijeme trajanja grijanja (Slika 6.4.).

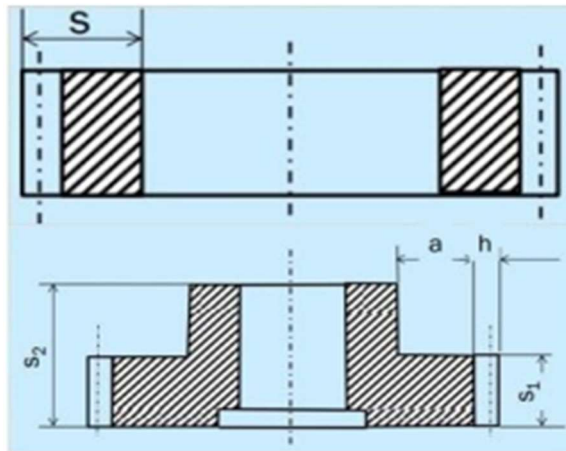
Tablica 6. 1. Koeficijent oblika "k" i dimenzija "s" [20]

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



Slika 6. 3. Dijagram trajanja grijanja [20]

Kod kompliciranijih obradaka koristi se određivanje karakteristične dimenzije „s“ iz TGL 25 473 /1.3/. Dimenziju „s“ za komplicirane obratke možemo vidjeti na slici 6.4.



Slika 6. 4. Dimenzija "s" za kompliciranije obratke [20]

#### 6.2.2. Smoljnikova metoda

Kako bi došlo do korištenja ove metode potrebno je znati kemijski sastav čelika, dimenzije, konfiguraciju obratka i medij ugrijavanja.

$$t_{uk} = t_{gr} + t_{id} \quad (6.2.)$$

pri čemu je:

$t_{gr}$  – vrijeme grijanja

$t_{id}$  – vrijeme izotermnog držanja

Kod različitih veličina obradaka možemo koristiti različite formule pa je za :

a) Kratke obratke kod kojih je  $H/D < 5$

$$t_{gr} = m \cdot K_1 \cdot \frac{V}{A} \cdot K_f \cdot K_k, \quad \text{min} \quad (6.3.)$$

b) Dugačke obratke,  $H/D > 5$

$$t_{gr} = \frac{1}{60} \cdot m \cdot K_2 \cdot \beta \cdot D, \quad \text{min} \quad (6.4.)$$

c) Dugačke, šuplje obratke

$$t_{gr} = \frac{1}{60} \cdot m \cdot K_2 \cdot \beta \cdot (D - d), \quad \text{min} \quad (6.5.)$$

gdje je:

$m$  – značajka medija za ugrijavanje koja ovisi o vrsti medija

$K_1$  – koeficijent vremena potrebnog za progrijavanje kod kratkih obradaka, min/cm

$K_2$  – koeficijent vremena potrebnog za progrijavanje kod dugačkih obradaka, s/mm

$V/A$  – odnos volumena te površine, cm

$K_f$  – kriterij forme kod kratkih obradaka

$K_k, \beta$  – koeficijenti konfiguracije

$D, d$  – promjer obratka, mm

$H$  – duljina obratka, mm

### 6.2.3. Newtonova metoda

Prema ovoj metodi vrijeme trajanja grijanja može se odrediti kao:

$$t_{gr} = \frac{V \cdot c \cdot \rho}{\alpha \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\vartheta_{peć} - \vartheta_{poć}}{\vartheta_{peć} - \vartheta_{zavr}}, \quad \text{s} \quad (6.6.)$$

pri čemu je :

$V/A$  – odnos volumena te površine, m

$c$  – specifični toplinski kapacitet za  $\vartheta_{peć} - \vartheta_{poć}$ , J/kgK

$\rho$  – gustoća, kg/m<sup>3</sup>

$\alpha$  – koeficijent konventivnog prijelaza topline, W/m<sup>2</sup>K

$\varepsilon$  – koeficijent usporenja ugrijavanja gdje je  $Bi = \frac{x \cdot \alpha}{\lambda}$  i vrijedi samo kod  $Bi > 0,25$ . U protivnom je  $\varepsilon = l^2$

gdje je  $\varepsilon$ :

$$\text{za ploču:} \quad \varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{3} \cdot Bi} \quad (6.7.)$$

$$\text{za valjak:} \quad \varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{3,5} \cdot Bi} \quad (6.8.)$$

$$\text{za kuglu:} \quad \varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{5} \cdot Bi} \quad (6.9.)$$

gdje:

$x$  – označava dimenziju presjeka pregrijavanja, m

$\lambda$  – označava koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK

$\vartheta_{\text{peć}}$  – označava temperaturu peći, °C

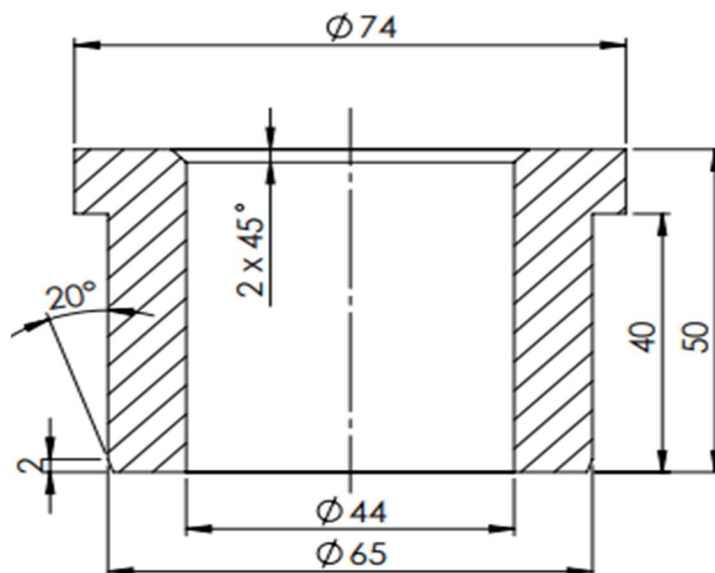
$\vartheta_{\text{poć}}$  – označava početnu temperaturu obratka, °C

$\vartheta_{\text{peć}}$  – označava završnu temperaturu obratka, °C [20]



## 7. TOPLINSKA OBRADA STROJNOG DIJELA KP.22-PT.41

Zadani strojni dio KP.22-PT.41 potrebno je poboljšati kako bi se dobila tvrdoća u rasponu  $33 \pm 1$  HRC.



Slika 7. 1. Nacrt strojnog dijela KP.22-PT.41

**Poboljšano:  $33 \pm 1$**

### 7.1. Kemijski sastav čelika KP.22-PT.41

Čelik strojnog dijela KP.22-PT.41 ima normom propisani udio određenih kemijskih elemenata koje možemo vidjeti u tablici 7.1.

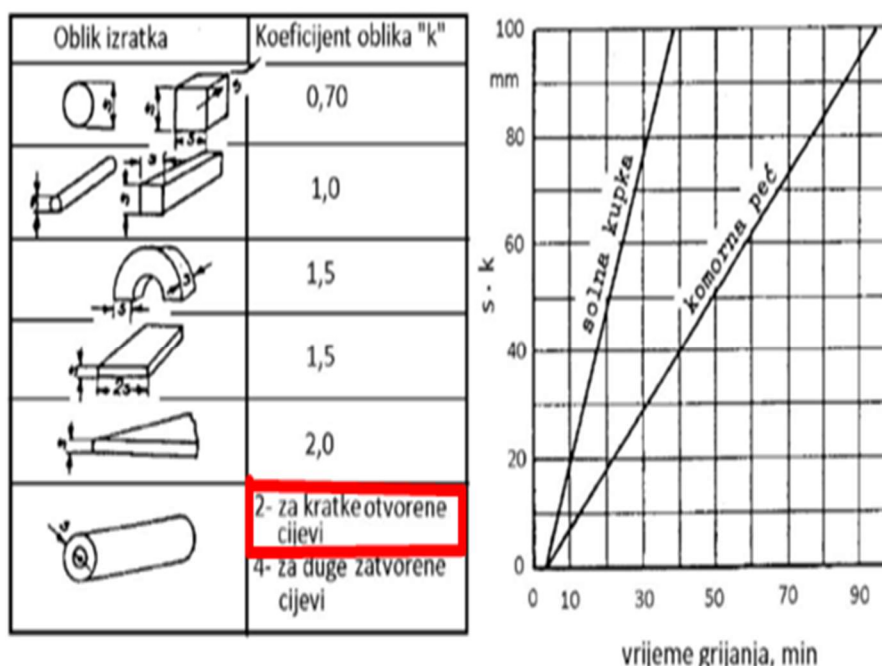
Tablica 7. 1. Propisani kemijski sastav čelika 34CrNiMo6

Kemijski element	C	Si	Mn	P/max	S/max	Cr	Mo	Ni	Cu/max	Al
%	0,30-0,38	0,10-0,40	0,50-0,80	0,025	0,035	1,30-1,70	0,15-0,30	1,30-1,70	0,40	0,020-0,050

## 7.2. Parametri toplinske obrade

Kako bi se toplinska obrada mogla pravilno definirati jako je bitno da se definiraju parametri njene obrade. Parametri koje promatramo su temperatura na kojoj se vrši austenizacija, režim kojim se vrši ugrijavanje na temperaturu austenizacije, dužina trajanja austenizacije, temperatura na kojoj se vrši poboljšavanje te dužina trajanja poboljšavanja. Temperaturu austenizacije određujemo s obzirom na temperaturu  $A_1$  i  $A_3$  te iznosi  $\vartheta_A = 860$  °C.

Vrijeme trajanja austenizacije nije fiksno te se za svaki obradak mora posebno odrediti koristeći Ordinaz metodu koja u obzir uzima dimenziju „s“ koja prikazuje dimenziju najvišeg toplinskog toka i iznosi 74 mm iz razloga što izradak ima najveći promjer  $\varnothing 74$  te koeficijent oblika „K“ (Slika 7.2.). Pomoću tablice na slici 7.2 očitamo  $K = 2$  te dobijemo vrijeme grijanja kao  $s \cdot K$  koje iznosi 148 minuta.



Slika 7. 2. Metoda Ordinaz koja prikazuje koeficijente oblika (a) i umnožak (b) [20]

Uz vrijeme grijanja dodajemo vrijeme držanja koje iznosi 20 minuta (Tablica 7.2.), a karakterizirano je za niskolegirane čelike za poboljšavanje. Tako će ukupno vrijeme na kraju iznositi 168 minuta.

Tablica 7. 2. Duljina držanja na određenoj temperaturi austenizacije [20]

grupa čelika	trajanje držanja na $\vartheta_A$ , min
konstrukcijski čelici	nelegirani čelici za poboljšavanje 10 ... 15 min niskolegirani čelici za poboljšavanje 15 ... 20 min
alatni čelici: – ugljični i niskolegirani – visokolegirani (s 5 do 14 % Cr) – brzorezni	$t_{id} = 1 + 0,6 Cr + 0,4 W + 3 V - 0,04 (\vartheta_{stv} - \vartheta_{rac})$ $t_{id} = 0,2 Cr + 0,5 W + V + Mo - 0,03 (\vartheta_{stv} - \vartheta_{rac})$ $t_{id} = 0,08 W + 0,2 V + 0,15 Mo - 0,024 (\vartheta_{stv} - \vartheta_{rac})$

Režim kojim će se ugrijavati obradak možemo odrediti pomoću dijagrama režima ugrijavanja pri ovisnosti o  $C_{ekv}$ . Opisana veličina pokazuje nam osjetljivost pri stvaranju pukotina u strukturi te se može izračunati kao:

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + \frac{V}{5} + \frac{Si-0,5}{5} + \frac{Ti}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Al}{10} \quad (7.1.)$$

$$C_{ekv} = 0,34 + \frac{0,65}{5} + \frac{1,50}{4} + \frac{0,22}{3} + \frac{1,50}{10} + \frac{0}{5} + \frac{0,25-0,5}{5} + \frac{0}{5} + \frac{0}{10} + \frac{0,035}{10}$$

$$C_{ekv} = 1,02$$

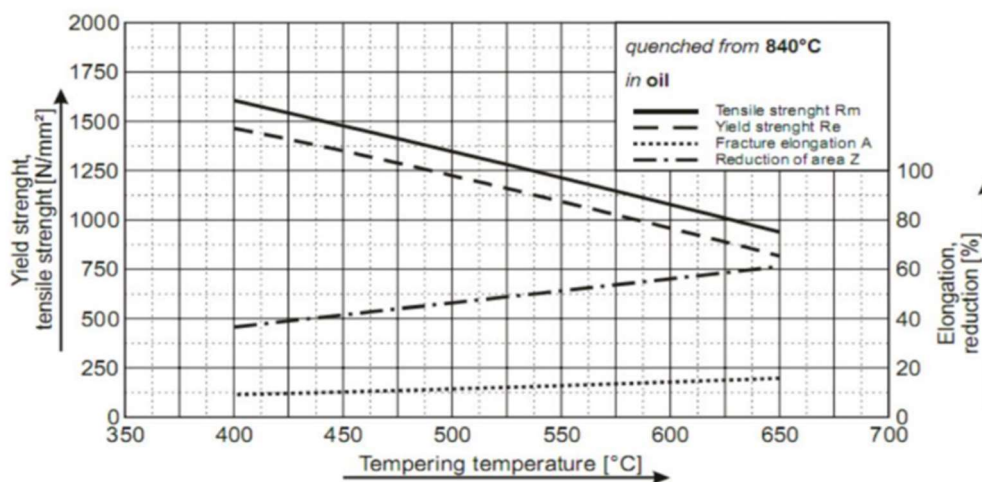
Ukoliko uvrstimo srednje vrijednosti iz tablice 7.1. u navedenu formulu tada ćemo dobiti  $C_{ekv}$  u vrijednosti od 1,02.

Iz raznih izvora možemo uočiti da je pri čelicima kod kojih je  $C_{ekv}$  veći od 0,55 potrebno višestruko predgrijavanje, ali isto tako možemo uočiti da se u praksi kod takvih slučajeva može koristiti i jednostruko predgrijavanje u rasponu temperatura od 400 do 500 °C [20]. Za ovaj slučaj uzet ćemo temperaturu od 475 °C u periodu od 40 minuta. Kako zadani obradak ima dobru prokaljivost tada odabiremo gašenje u ulju jer se tako smanjuje mogućnost pucanja materijala naspram gašenja u vodi (Slika 7.3.).

Tablica 7. 3. Odnos tvrdoće i vlačne čvrstoće kod čelika za poboljšavanje

Tvrdoća po Rockwellu	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]
35	1160
34	1120
33	1090
32	1060
31	1020

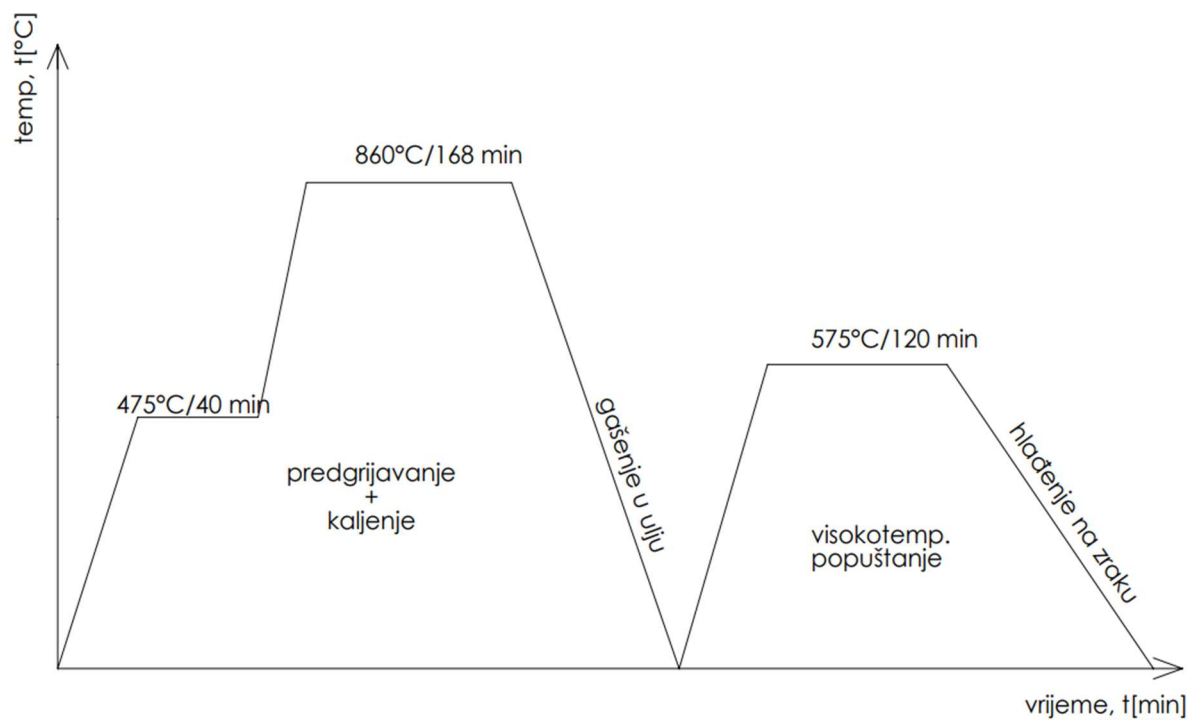
Obzirom da imamo zadani zahtjev od 33 HRC, te za zadani materijal uzimamo srednju vrijednost vlačne čvrstoće od 1090 N/mm<sup>2</sup> (Tablica 7.3.), tada možemo očitati temperaturu popuštanja od 575 °C.



Slika 7. 3. Dijagram popuštanja čelika [21]

Uzevši u obzir razne priručnike, određuje se vrijeme popuštanja koje iznosi 120 minuta te se nakon toga slijedi lagano popuštanje pri sobnoj temperaturi.

Dijagram toplinske obrade strojnog dijela KP.22-PT.41 prikazan je na slici 7.4.



Slika 7. 4. Dijagram toplinske obrade za 34CrNiMo6

### 7.3. Prikaz operacijskog lista

Tablica 7. 4. Operacijski list kaljenja

Poduzeće: Tehnički fakultet	Naziv obratka: KP.22-PT.41	Materijal: 34CrNiMo6	Radno mjesto:	List: 1 Listova: 2			
			Naziv:				
Naziv operacije: Niskotemp.popuštanje	Oznaka:	Oblik:	Oznaka:	Operacija broj: 1			
		Masa/dimenzija:	Radionica: Labaratorij:				
Zahvat broj	Opis zahvata:	Količina	Proizvodno sredstvo	T [°C]	Vrijeme [min]	Minuta	
		Komada	Proizvodni materijal			ts	tr
1	Stavljanje u peć 3 kW	1	Ručno	-	0	-	0
2	Predgrijavanje	1	Peć	475	40	40	-
3	Vađenje	1	Ručno	-	0	-	0
4	Stavljanje u peć 12 kW	1	Ručno	-	0	-	0
5	Grijanje	1	Peć	850	148	148	-
6	Držanje	1	Peć	850	20	20	-
7	Vađenje i gašenje	1	Ulje	20	0	-	0
Izradio: Krsto Premužić	Datum: 16.6.2022.	Kontrola:	Izmjene:	Broj:	Σ ts	Σ tr	
				Datum:			
				Ime:			

Tablica 7. 5. Operacijski list popuštanja

Poduzeće: Tehnički fakultet	Naziv dijela: KP.22-PT.41	Materijal: 34CrNiMo6	Radno mjesto:	List: 2 Listova: 2				
			Naziv:					
Naziv operacije: Niskotemp.popuštanje	Oznaka:	Oblik:	Oznaka:	Operacija broj: 2				
		Masa/dimenzija:	Radionica: Laboratorij:					
Zahvat broj	Opis zahvata:	Količina	Proizvodno sredstvo	T [°C]	Vrijeme [min]	Minuta		
		Komada	Proizvodni materijal			ts	tr	
1	Stavljanje u peć	1	Ručno	-	0	-	0	
2	Popuštanje	1	Peć	575	120	120	-	
3	Vađenje	1	Ručno	-	0	-	0	
Izradio: Krsto Premužić	Datum: 16.6.2022.	Kontrola:	Izmjene:	Broj:	Σ ts	Σ tr		
				Datum:			120	0
				Ime:				

## 8. ZAKLJUČAK

Čelik pripada materijalu koji se koristi u velikoj količini diljem cijelog svijeta. U najvažnije segmente čelika pripadaju ugljik i željezo. Koristeći proces toplinske obrade poboljšavanja, veliku pažnju potrebno je posvetiti čelicima za poboljšavanje. Čelici za poboljšavanje koriste se u uvjetima kada granice razvlačenja i vlačne čvrstoće ne zadovoljavaju potrebne zahtjeve.

Toplinska obrada pripada veoma bitnom procesu te se kao temeljni elementi uzimaju vrijeme i temperatura. Koristeći pravilne parametre možemo dobiti svojstva koja očekujemo, a najčešće težimo ka tvrdoći i žilavosti. Ukoliko smo dobro upoznati sa mikrostrukturom i TTT dijagramom, moguće je dobiti visoku preciznost.

Kaljenje i visokotemperaturno popuštanje procesi su koji tvore postupak toplinske obrade poboljšavanja. Korištenjem kaljenja i visokotemperaturnog pupuštanja moguće je dobiti bolju žilavost.

Određivanje osjetljivosti na pukotine prilikom ugrijavanja, temperature austenizacije te vrijeme držanja temperature austenizacije moguće je dobiti ukoliko određujemo parametre austenizacije. Poznavanje kemijskog sastava zadanog čelika veoma je bitno kako bi se pravilno odredila temperatura i vrijeme austenizacije.

Na samome kraju proveli smo traženje parametara toplinske obrade za KP.22-PT.41 kako bi došli te zadovoljili zahtjeve. Kako bi se uvjerali u sigurnost parametara te njihovu točnost proveli smo verifikaciju postupka. Poslije toplinske obrade ispitali smo strojni dio i došli do zaključka kako su parametri ispravni.





- [19] Priručnik za čelik, s Interneta, <http://www.celici.rs/index.html>, 10. lipnja 2022.
- [20] B. Liščić, M. Stupnišek, F. Cajner, T. Filetin: Toplinska obrada - Praktikum, Sveučilište u Zagrebu - FSB, 1992
- [21] S interneta, <http://www.premium-stahl.de/online-shop>, 15. lipnja 2022,
- [22] M. Novosel, D. Krumes: „Željezni materijali 2. dio – Konstrukcijski čelici za poboljšanje“

## POPIS SLIKA

Slika 2. 1. Dijagram toplinske obrade [2] .....	2
Slika 3. 1. Mikrostrukture s obzirom na postotak ugljika i temperature zagrijavanja [8].....	4
Slika 3. 2. Mikrostruktura ferita [2] .....	5
Slika 3. 3. Mikrostruktura cementita [2] .....	5
Slika 3. 4. Mikrostruktura martenzita [6].....	6
Slika 3. 5. Feritno-perlitna mikrostruktura [6] .....	6
Slika 3. 6. Mikrostruktura ledeburita [7].....	7
Slika 3. 7. Mikrostruktura bainita [6].....	7
Slika 3. 8. Mikrostruktura austenita [6].....	8
Slika 3. 9. Dijagram stanja Fe-Fe <sub>3</sub> C [2] .....	8
Slika 3. 10. Mikrostruktura austenita [6].....	9
Slika 3. 11. Fe- Fe <sub>3</sub> C dijagram perlitne pretvorbe [11].....	10
Slika 3. 12. Martenzitna mikrostruktura [11].....	11
Slika 3. 13. Uptonov dijagram [2].....	11
Slika 3. 14. Stvaranje bainita [11] .....	12
Slika 4. 1. TTT dijagram [12] .....	13
Slika 4. 2. Izotermički TTT dijagram [1] .....	14
Slika 4. 3. TTT dijagram kontinuiranog ohlađivanja podeutektoidnog čelika [1].....	15
Slika 5. 1. Dijagram ovisnosti mehaničkih svojstava čelika o temperaturi popuštanja [10].....	16
Slika 5. 2. Postupak poboljšanja [13].....	17
Slika 5. 3. Dijagram klasičnog poboljšavanja [14] .....	17
Slika 5. 4. TTT dijagram izotermičkog poboljšavanja [15].....	18
Slika 5. 5. Dijagram kaljenog čelika [6].....	20
Slika 5. 6. Popuštanje pri različitim temperaturama [17].....	21
Slika 5. 7. Pojavljivanje pukotine prilikom hlađenja materijala [16].....	22

Slika 6. 1. Režim ugrijavanja s obzirom na $C_{ekv}$ [20] .....	28
Slika 6. 2. Režim grijanja [20] .....	28
Slika 6. 3. Dijagram trajanja grijanja [20].....	29
Slika 6. 4. Dimenzija "s" za kompliciranije obratke [20].....	30
Slika 7. 1. Nacrt strojnog dijela KP.22-PT.41 .....	33
Slika 7. 2. Metoda Ordinaz koja prikazuje koeficijente oblika (a) i umnožak (b) [20] .....	34
Slika 7. 3. Dijagram popuštanja čelika [21] .....	36
Slika 7. 4. Dijagram toplinske obrade za 34CrNiMo6.....	37

## ***POPIS TABLICA***

Tablica 5. 1. Standardi čelika pogodnog pri poboljšavanju [19] .....	25
Tablica 6. 1. Koeficijent oblika "k" i dimenzija "s" [20] .....	29
Tablica 7. 1. Propisani kemijski sastav čelika 34CrNiMo6 .....	33
Tablica 7. 2. Duljina držanja na određenoj temperaturi austenizacije [20].....	35
Tablica 7. 3. Odnos tvrdoće i vlačne čvrstoće kod čelika za poboljšavanje .....	36
Tablica 7. 4. Operacijski list kaljenja .....	38
Tablica 7. 5. Operacijski list popuštanja .....	39

## POPIS OZNAKA

$\vartheta_{TO}$  - temperatura toplinske obrade, °C

$C$  – koncentracija ugljika, %C

HV – tvrdoća po Vickersu

HRC – tvrdoća po Rockwellu

HB – tvrdoća po Brinellu

$\delta$ -Fe – sigma željezo

$\gamma$ -Fe – gama željezo

$A_1$  - temperatura eutektoidne pretvorbe austenita, °C

$A_3$  - temperatura podeutektoidne pretvorbe austenita, °C

$A_{cm}$  – temperatura nadeutektoidne pretvorbe austenita, °C

$M_s$  - Linija stvaranja martenzita

$M_f$  – Linija završetka izrade martenzita

F – pretvorba austenita u primarni ferit

P – pretvorba austenita u perlit

B – pretvorba austenita u bainit

M – pretvorba austenita u martenzit

$t_A$  – temperatura austenizacije, °C

$t_{iz}$  – izotermička temperatura, °C

$D$  – promjer obratka, mm

$d$  – promjer obratka, mm

$K$  – koeficijent oblika

$s$  - dimenziju najvišeg toplinskog toka, mm

$t_{ugr}$  – vrijeme ugrijavanja, s

$t_{drž}$  – vrijeme držanja, s

$t_{ohl}$  – vrijeme ohlađivanja,

$x$  – označava dimenziju presjeka pregrijavanja, m

$\lambda$  – označava koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK

$\vartheta_{peć}$  – označava temperaturu peći, °C

$\vartheta_{poć}$  – označava početnu temperaturu obratka, °C

$\vartheta_{peć}$  – označava završnu temperaturu obratka, °C

$V/A$  – odnos volumena te površine, m

$c$  – specifični toplinski kapacitet za  $\vartheta_{peć} - \vartheta_{poć}$ , J/kgK

$\rho$  – gustoća, kg/m<sup>3</sup>

$\alpha$  – koeficijent konventivnog prijelaza topline, W/m<sup>2</sup>K

$m$  – značajka medija za ugrijavanje koja ovisi o vrsti medija

$K_1$  – koeficijent vremena potrebnog za progrijavanje kod kratkih obradaka, min/cm

$K_2$  – koeficijent vremena potrebnog za progrijavanje kod dugačkih obradaka, s/mm

$K_f$  – kriterij forme kod kratkih obradaka

$K_k, \beta$  – koeficijenti konfiguracije

$H$  – duljina obratka, mm

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Ovaj rad sadrži obrađivanje teme toplinske obrade poboljšavanja strojnog dijela KP.22-PT.41. Rad je podijeljen u dva dijela.

Prvim dijelom opisujemo znanje o materijalu kao i promjene u njegovoj mikrostrukturi, toplinsku obradu pri pojašnjavanju pojedine vrste te opisujemo metode pomoću kojih ispitujemo tvrdoću materijala.

Drugim dijelom opisujemo poboljšavanje čelika pomoću toplinske obrade.

**Ključne riječi:** strojni dio KP.22-PT.41, čelik 34CrNiMo6, poboljšavanje, toplinska obrada, tvrdoća, TTT dijagram

## **SUMMARY AND KEY WORDS**

This paper deals with the topic of heat treatment improvement of the machine part KP.22-PT.41. The paper is divided into two parts.

The first part describes the knowledge of the material as well as changes in its microstructure, heat treatment in the elucidation of a particular type of material, and describes the methods by which we examine the hardness of the material.

The second part describes the improvement of steel by heat treatment.

**Keywords:** KP.22-PT.41 machine part, 34CrNiMo6 steel, improvement, heat treatment, hardness, TTT diagram