

# Postupci toplinske obrade strojnog dijela JI.23-ST.18

---

**Holjević, Ivana**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:144389>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-14**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**POSTUPCI TOPLINE OBRADJE STROJNOG DIJELA**

**Jl.23-ST.18**

Rijeka, studeni 2023.

Ivana Holjević

0069086007

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**POSTUPCI TOPLINE OBRADJE STROJNOG DIJELA**

**Jl.23-ST.18**

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

Rijeka, studeni 2023.

Ivana Holjević

0069086007

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

Rijeka, 13. ožujka 2023.

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

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Ivana Holjević (0069086007)**  
Studij: **Stručni prijediplomski studij strojarstva**

Zadatak: **Postupak toplinske obrade strojnog dijela JI.23-ST.18 / Heat treating process of workpiece JI.23-ST.18**

Opis zadatka:

Potrebno je proanalizirati proces toplinske obrade strojnog dijela JI.23-ST.18. Potrebno je teorijski opisati postupak i sve promjene u mikrostrukturi koje nastaju pri odabranom postupku toplinske obrade. Potrebno je opisati metode određivanja parametara toplinske obrade te pretkazivanja rezultata toplinske obrade.

Nadalje, potrebno je definirati proces toplinske obrade te opisati postrojenje za toplinsku obradu strojnog dijela JI.23-ST.18. Potrebno je verificirati definirani proces toplinske obrade, proanalizirati rezultate toplinske obrade i donijeti odgovarajuće zaključke.

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

Ivana Holjević

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Dario Iljkić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



Izv. prof. dr. sc. Samir Žic

## IZJAVA

Ja, Ivana Holjević, izjavljujem da sam samostalno izradila završni rad sukladno članku 8. pravilnika o završnom radu. Rad sam izradila na temu „Postupak toplinske obrade strojnog dijela JI.23-ST.18“ sukladno dobivenom zadatku iz kolegija „Materijali“. Izrada završnog rada bila je pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Daria Iljkića. Za izradom ovog završnog rada koristila sam skripte koje sam imala za učenje te dodatne literature.

X

---

Ivana Holjević

## ZAHVALA

Htjela bi se ovim putem zahvaliti svojim roditeljima koji su mi uvijek pružali ruku potpore tijekom cijelog procesa studiranja, slušali moje probleme i pomagali mi ih riješiti kako god su znali. Osim svojim roditeljima, želim se zahvaliti i svojoj posebnoj osobi koja je sa mnom proživljavala svaki stres ispita, bodrila me, vjerovala u mene i podizala moral kada mi je to bilo najpotrebnije.

Također se želim zahvaliti i svojem mentoru Dariju Ilkiću koji mi je tijekom cijelog procesa pisanja završnog rada pomagao i uvijek bio dostupan za sva pitanja. Nikako ne smijem zaboraviti zahvaliti se i asistentu Dariju Kvirgiću i asistentu Lovri Liveriću koji su mi olakšali izvršavanje praktičnog dijela završnog rada. Još jednom, hvala Vam

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TOPLINSKA OBRADA.....	2
3. MIKROSTRUKTURE ČELIKA .....	4
4. FAZE PRETVROBE ČELIKA .....	10
4.1. Nastajanje austenita.....	11
4.2. Pretvorba austenita u perlit .....	12
4.3. Pretvorba austenita u martenzit.....	13
4.4. Pretvorba austenita u bainit .....	14
5. POBOLJŠAVANJE ČELIKA.....	15
5.1. Klasično poboljšavanje.....	16
5.2. Izotermno poboljšavanje.....	16
5.1. Kaljenje čelika .....	18
5.2. Popuštanje čelika.....	19
5.3. Prokaljivost čelika.....	20
5.4. Hlađenje.....	22
6. TTT dijagram .....	24
6.1. Izotermički TTT- dijagram .....	26
6.2. Kontinuirani TTT dijagram.....	27
6.3. Usporedba izotermičkog i kontinuiranog TTT- dijagrama .....	28
7. ISPITIVANJE TVRDOĆE.....	30
7.1. Tvrdoća po Rockwellu .....	31
7.2. Tvrdoća po Brinellu.....	32
7.3. Tvrdoća po Vickersu.....	34

8. DEFINIRANJE PARAMETARA KOD AUSTENITIZACIJE .....	35
8.1 Režimi ugrijavanja na temperaturu austenitizacije .....	35
8.2. Trajanja austenitizacije .....	36
8.2.1. Ordinanz metoda.....	37
8.2.2. Smoljnikova metoda .....	38
8.2.3. Metoda Newton .....	40
9. TOPLINSKA OBRADA STROJNOG DIJELA JI.23 – ST.18 .....	42
10. ZAKLJUČAK .....	54
LITERATURA .....	55
POPIS SLIKA.....	56
POPIS TABLICA .....	58
POPIS OZNAKA .....	59
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	61
SUMMARY ANS KEY WORDS .....	62



## 1. UVOD

Ovime završnim radom baviti ćemo se temom toplinske obrade, gdje ćemo opisati utjecaj temperature prema materijalu, a sve u cilju promjene njegove mikrostrukture i svojstava. Najviše se toplinski obrađuju čelici, ali i neki drugi materijali kao što keramika.

Toplinsku obradu čelika najčešće upotrebljavamo kako bi postigli očvršnuće čelika i povećali mu mehanička svojstva, žilavost ili smanjili unutarnja naprezanja.

U praktičnom dijelu baviti ćemo se poboljšanjem čelika Č1530 kako bi dobili tražene parametre. Postupak poboljšanja bitan je kako bi pravilo odredili vrijeme i temperaturu obrade. Definirati ćemo mikrostrukture, TTT- dijagram a sve u cilju lakšega razumijevanja promjena do kojih dolazi.

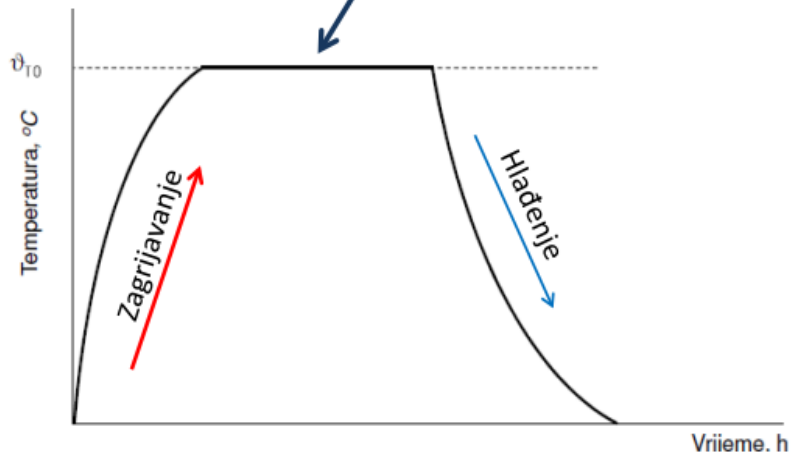
## 2. TOPLINSKA OBRADA

Toplinska obrada podrazumijeva proces temperaturnog djelovanja na materijala te na njegovu mikrostrukturu, čime dolazi do promijeni njegovih svojstava. To je obrada koja podrazumijeva ugrijavanje, grijanje na određenoj temperaturi i u konačnici hlađenje materijala. Sve se to radi u cilju postizanja određenih kemijskih i mehaničkih svojstava. Neke od svojstava koja se toplinskom obradom mogu promijeniti su otpornost na koroziju, mogućnost preoblikovanja, čvrstoća, povećanje žilavosti, povećanje duktilnost i sl. Toplinskom obradom se najčešće oblikuju čelici, a nerijetko i drugi metali te keramika (staklo).

Razlikujemo četiri vrste toplinske obrade: termička, termokemijska, termomehanička ili prirodna. Kod termičke obrade prvo se komad treba ugrijati, nakon toga se drži na određenoj temperaturi i potom se hladi. Primjer takve vrste obrade je žarenje, kaljenje, popuštanje, poboljšanje i normalizacija. Dok kod termokemijske obrade nastojimo čeliku povećati tvrdoću, ali samo površinskog sloja (otprilike 2 mm). Nju čine cementiranje, nitriranje, karbonitriranje i boriranje. Termomehanička vrsta obrade se kombinira s mehaničkim deformiranjem te u konačnici prirodna koju čini starenje na sobnoj temperaturi te umjetno starenje (pri povišenim temperaturama).

Najvažniji parametri kod toplinske obrade su vrijeme i temperatura, a dijagramom koji predstavlja odnos temperature i vremena možemo opisati svaku toplinsku obradu (Slika 2.1.).

## Zadržavanje metalnog obratka na kritičnoj temperaturi toplinske obrade



Slika 2.1. Dijagram toplinske obrade [1]

U dijagramu (Slika 2.1.) možemo vidjeti tri područje:

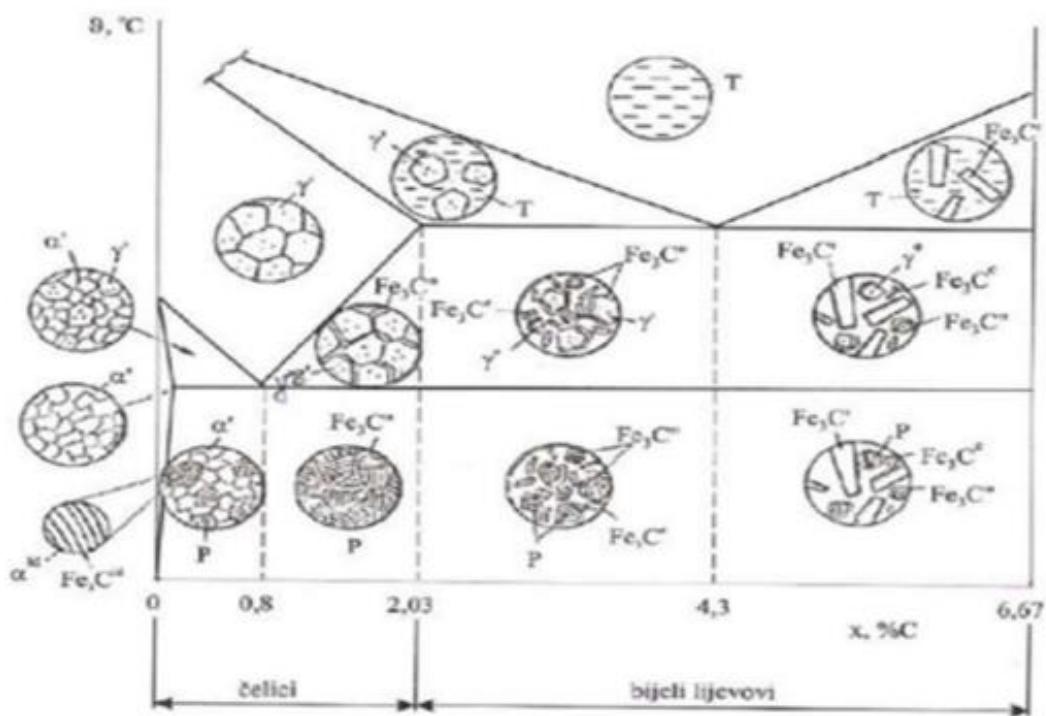
-zagrijavanje

-održavanja komada na kritičnoj temperaturi

-hlađenje

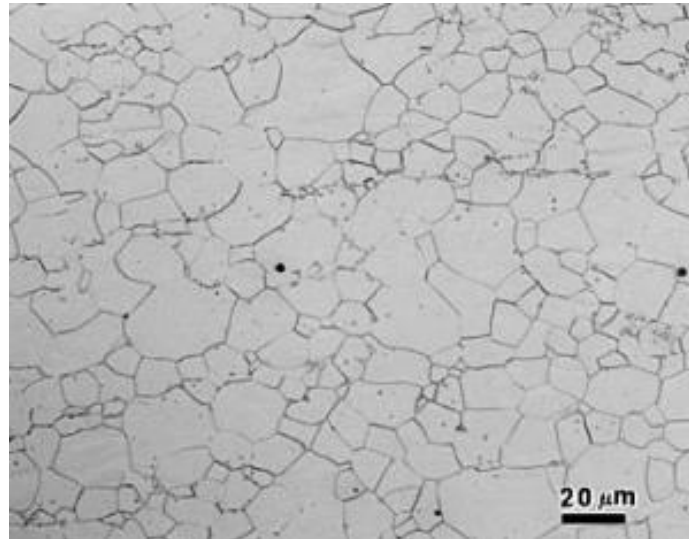
### 3. MIKROSTRUKTURE ČELIKA

Čelik je slitina željeza s ugljikom. Postotak ugljika koji sadrži ova slitina je od 0,008 % do 2,14 %. Čelik je slitina koja osim ugljika u svojem sastavu ima silicija, mangana, sumpora i fosfata. Dobiva se čišćenjem sirovog željeza od silicija, mangana, sumpora. Odlikuje visokom čvrstoćom, tvrdoćom, žilavošću, mogućnosti lijevanja i mehaničke obrade. Čelik možemo podijeliti ovisno o sastavu, mikrostrukturi i namjeni. Mikrostruktura čelika određena je postupcima toplinske obrade te možemo vidjeti austenit, cementit, ferit, perlit, martenzit, ledeburit i bainit, a razlikujemo ih prema kemijskom sastavu i temperaturi (Slika 3.1.).



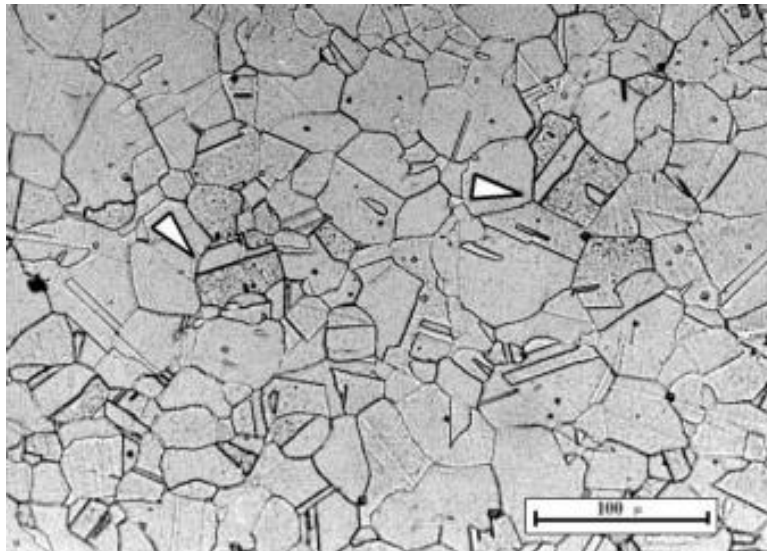
Slika 3.1. Mikrostrukture čelika ovisno o postotku ugljika i temperature zagrijavanja [2]

Ferit je zapravo naziv za alfa-željezo ( $\alpha$ -Fe), a predstavlja mješanac željeza i ugljika. Pri čemu je najveća topivost ugljika u feritu 0,025 % kod temperature od 723 °C i samo 0,008 % pri optimalnoj temperaturi, što ga čini jednom od najmekših faza u dijagramu. Njegov je oblik prostorno centrirana kubična rešetka, što čeliku daje jako dobra magnetska svojstva, što daje klasičan primjer feromagnetnog materijala. Feritnu mikrostrukturu vidimo na slici 3.2.



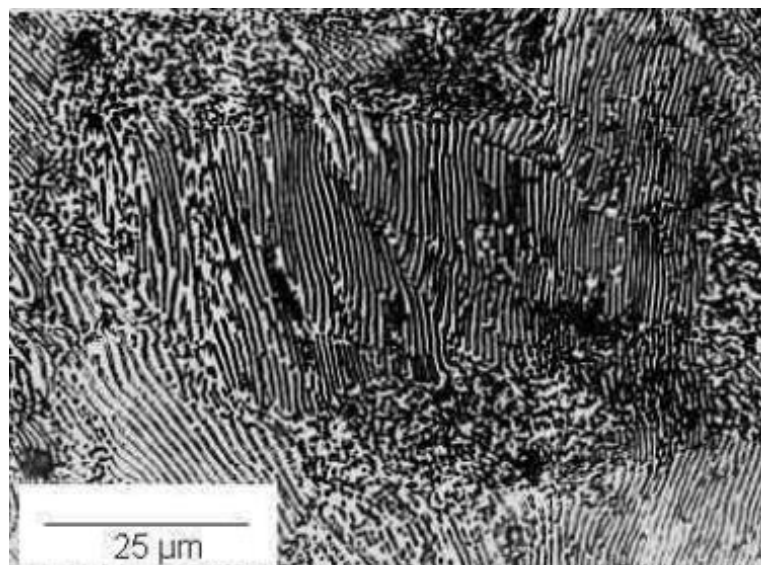
*Slika 3.2. Feritna mikrostruktura [3]*

Austenit je zapravo gama željezo ( $\gamma$ -Fe), što ga čini kompaktna otopina atoma ugljika u čvrstom željezu, a sve zbog toga jer su atomi ugljika manji od atoma čvrstog željeza. Topivost ugljika u austenitu je 2,06 % pri temperature od 1147 °C. Glavna karakteristika je austenita da nije stabilan na optimalnoj (sobnoj) temperaturi, ali ga u nekim posebnim uvjetima možemo dobiti i na sobnoj temperaturi (kaljenjem). Stabilno područje mu je na temperaturi od 911 °C do 1392 °C, a njegov je oblik plošno centrirana kubična rešetka. Austenitnu mikrostrukturu vidimo na slici 3.3.



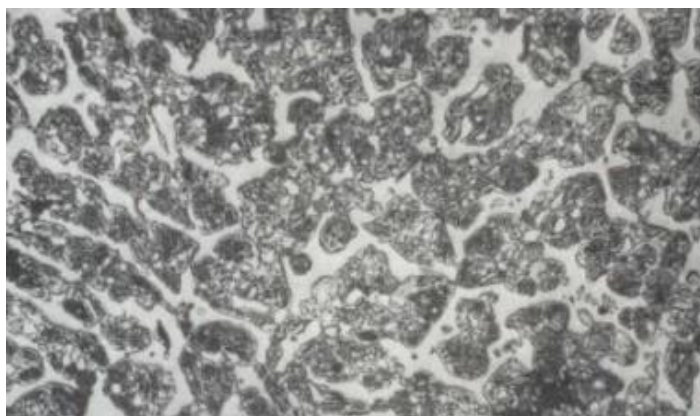
*Slika 3.3. Austenitna mikrostruktura [4]*

Perlit čini eutekoidna mješavina cementita i ferita, sadrži 0,8 % ugljika i stvara se prije temperaturi od 723 °C pri polaganom hlađenju. Sastoji se od 88 % ferita i 12 % cementita. Samim time dobivamo slojeve ferita 7 puta deblje od slojeva cementita. Mikrostruktura perlita vidljiva je na slici 3.4.



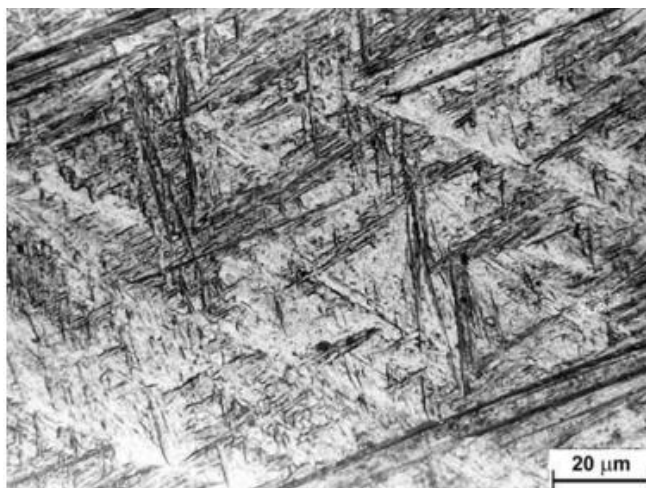
*Slika 3.4. Perlitna mikrostruktura [5]*

Cementit (željezov karbid) se sastoji od tehničkog željeza koji uzrokuje njegovu tvrdoću, jer je cementit zapravo jako tvrd i krhki kemijski spoj. Sadrži oko 6,67 % ugljika, izrazito je tvrd i krhki, a tvrdoća mu iznosi 850 HV. Cementit ima svojstva feromagnetičnosti do temperature oko 207 °C, a nakon toga postane paramagnetičan. Postoje čak tri vrste cementita: primarni, sekundarni i tercijarni. Mikrostrukturu cementita možemo vidjeti na slici 3.5



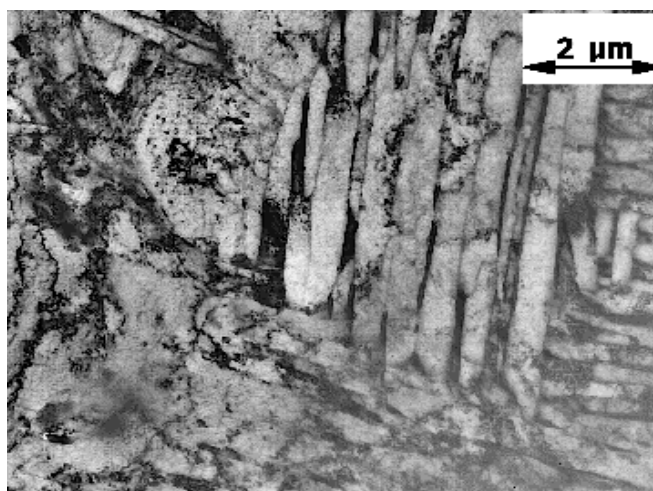
*Slika 3.5. Cementitna mikrostruktura [5]*

Martenzit čini prezasićena otopina ugljika u željezu. Ima oblik volumno centrirane tetragonalne rešetke, a stvara se kada čelik austenitne mikrostrukture ohladimo na zadanu, dovoljno nisku temperaturu. Javlja se u obliku nakupina kristala igličastog oblika koje su vidljive samo mikroskopom, a njegova pretvorba ne ovisi o vremenu, nego samo o temperaturi. To je mikrostruktura koja je nestabilna, krhka i tvrdoće oko 728 HB (po Brinellu) zbog čega kaljeni čelik poprima veliku tvrdoću. Martenzitnu mikrostrukturu vidimo na slici 3.6.



*Slika 3.6. Martenzitna mikrostruktura [5]*

Bainit ima pločasti oblik mikrostrukture, dobivamo ga hlađenjem čelika na niskim temperaturama, točnije temperaturama koje odgovaraju formiranju martenzita i perlita. Hlađenjem se dobiva struktura koja je sastavljena od ferita i cementita. Difuzija atoma ugljika na ovoj temperaturi je jako mala, pri čemu se atomi ugljika ne mogu pomicati na veće udaljenosti i stvarati listiće cementita, stoga se stvaraju samo listići ferita, ali se na njegovim granica se izdvaja cementit u obliku sitnih čestica. Mikrostruktura bainita prikazana je slikom 3.7 i velike je sličnosti s martenzitom.



*Slika 3.7. Bainitna mikrostruktura [5]*



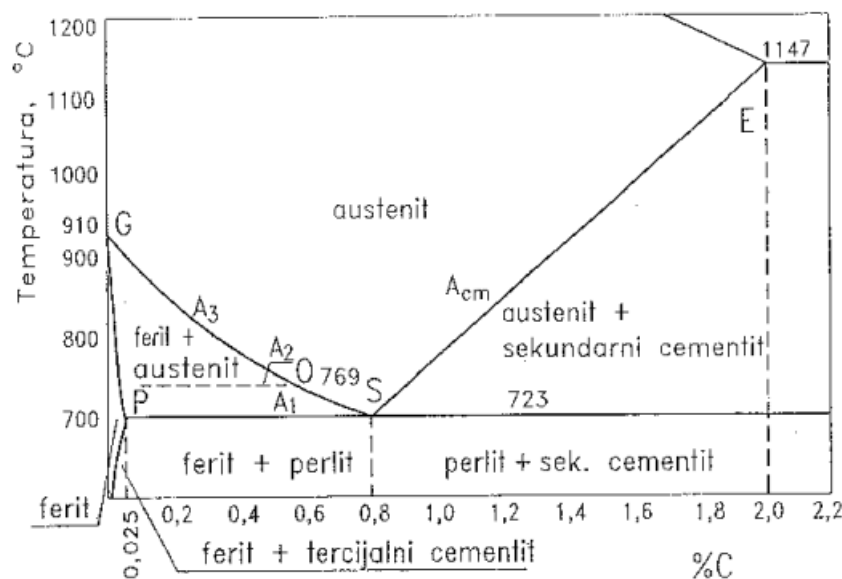
Ledeburit čini kruta eutektik austenita i cementita te sadrži 4,3 % ugljika i stvara se pri temperaturi od 1147 °C. Ledeburit se počinje stvarati kada sadržaj ugljika u željezu bude u rasponu od 2,06 % – 6,67 %. U  $Fe-Fe_3C$  dijagramu ta granica je 2,06 %, ali se može pomaknuti jedino djelovanjem nekih kemijskih elemenata, a naročito silicija u lijevo (ispod 2,06 %). Mikrostruktura ledeburita prikazana je slici 3.8.



*Slika 3.8. Ledeburitna mikrostruktura [5]*

## 4. FAZE PRETVROBE ČELIKA

Čelik je slitina željeza s ugljikom. Postotak ugljika koji sadrži ova slitina je od 0,008 % do 2,14 %. Čelik je slitina koja osim ugljika u svojem sastavu ima silicija, mangana, sumpora i fosfata. Kao polazište za svaku toplinsku obradu koristi se dijagram  $Fe-Fe_3C$  (Slika 4.1.). Gdje su prikazane različite mikrostrukture koje čelika poprima, za određenu temperaturu i udio ugljika.



Slika 4.1.  $Fe-Fe_3C$  dijagram [6]

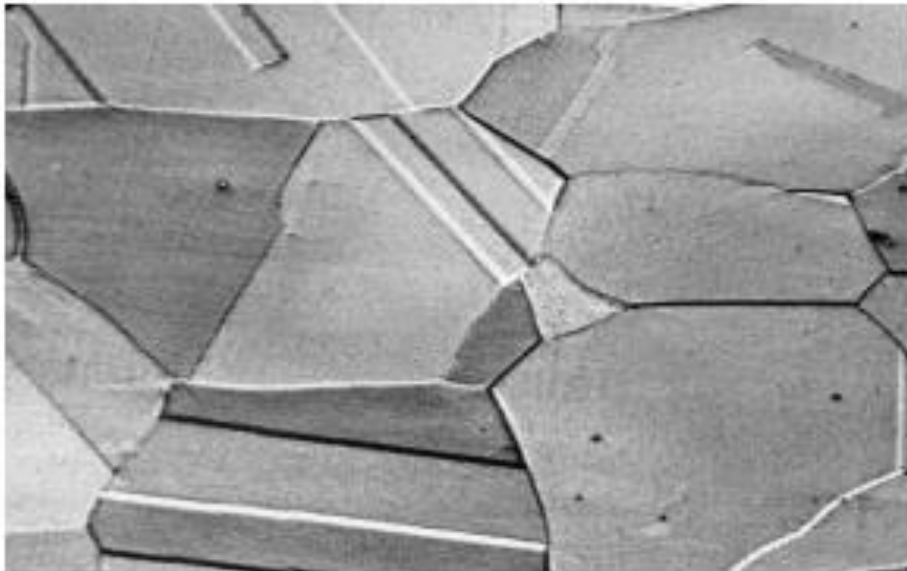
Kako bi lakše razumjeli samo dijagram, nužno je pravilno shvaćanje postupka i rezultata koji toplinskom obradom želimo postići. Korist  $Fe-Fe_3C$  dijagrama je da utvrdimo temperaturu na koju čelik moramo zagrijati prije ohlađivanja da bi dobili željenu mikrostrukturu.

Crte u dijagramu (Slika 4.1.) prikazuju odvajanje karakterističnih faznih područja. Unutar svakog pojedinog područja razlikujemo četiri određene faze: austenit, perlit, martenzit i bainit.

#### 4.1. Nastajanje austenita

Austenit se stvara na način da otopimo čisto željezo, te ga nakon toga sporo hladimo. Njegovo skrućivanje započinje na temperaturi od 1538 °C gdje se dobiva oblik volumno centrirane kubične kristalne strukture, čije ime je delta željezo ( $\delta$ -Fe). Ta se kristalna struktura održava sve do temperature od 1392 °C , a nakon čega željezo mijenja kristalnu strukturu u plošno centriranu kubičnu rešetku i nazivamo gama željezo ili austenit ( $\gamma$ -Fe). Proces stvaranja austenita najlakše se odvija na granici feritne i cementitne faze gdje austenit ima najmanju slobodnu energiju za određenu temperaturu i kemijski sastav. Mikrostruktura austenita prikazana je na slici 4.2.

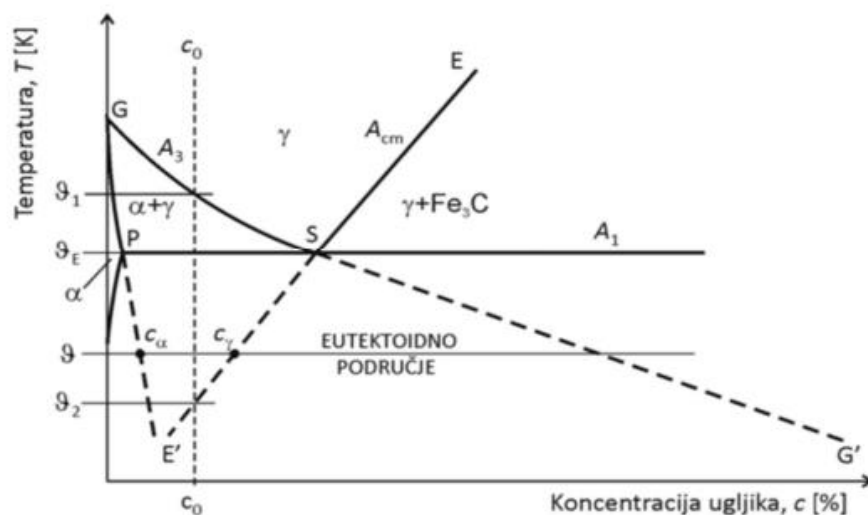
Iz austenita dobijemo strukture martenzita, perlita i bainita.



*Slika 4.2. Mikrostruktura austenita [7]*

## 4.2. Pretvorba austenita u perlit

Perlit čini eutektoidna mješavina ferita i cementita, odnosno dvoslojna lamelarna struktura. To je struktura koja se javlja u lijevanom željezu i čelicima. Sam postupak nastajanja je eutektoidnom reakcijom tijekom polaganog hlađenja legure željeza i ugljika. Nastanak perlita odvija se pri cjelovitoj difuziji metalnih i nemetalnih atoma ugljika. Uvjeti nastanka čine dovoljno velika razlika između austenitnih zrna i perlita pri difuziji atoma ugljika. Dijagram pretvorbe perlita vidimo na slici 4.3.



Slika 4.3. Dijagram perlitne pretvorbe u Fe-Fe<sub>3</sub> dijagramu [8]

### 4.3. Pretvorba austenita u martenzit

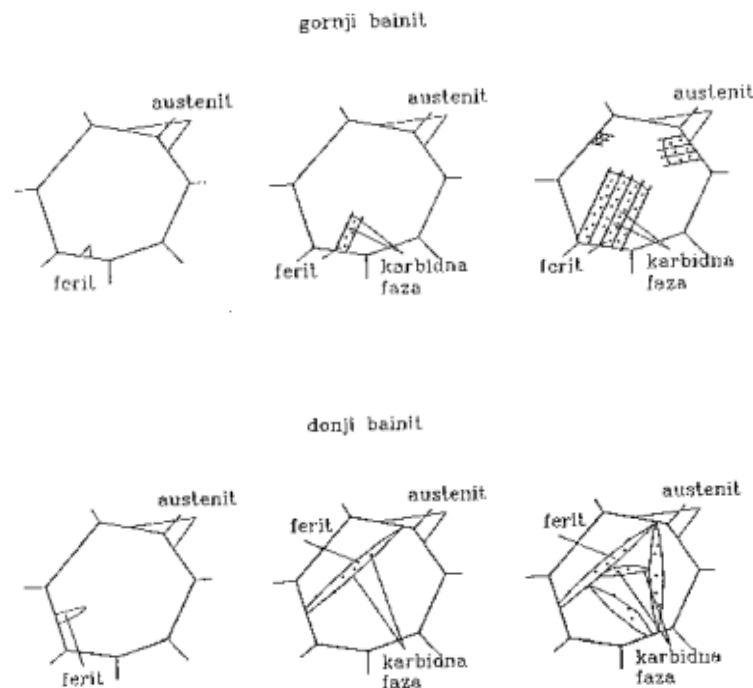
Ako povećamo brzinu hlađenja austenita krivulje  $A_1$ ,  $A_3$  i  $A_{cm}$  u  $Fe-Fe_3C$  dijagramu spajaju se u jedinstvenu krivulju  $M_s$ . Nakon što austenit dođe do sjecišta  $Fe-C$  legure s krivuljom  $M_s$  tada će započeti proces transformacije austenita u martenzit. Pri čemu se dolazi do stvaranja pothlađenog austenita koji je održava između  $A_3$  i  $M$  te se pretvorba pothlađenog austenita u martenzit odvija u određenom rasponu temperatura. Završna krivulja stvaranja martenzita označava se sa  $M_f$ . Količina ugljika u martenzitu i primarnome austenitu su iste, ali će zbog većih količina ugljika kod primarnog austenita biti će i veći udio zaostalog austenita nakon pretvorbe martenzita. Zaostali austenit smanjuje čelicima čvrstoću, obradivost i tvrdoću. Ako pogledamo sliku 4.4. možemo vidjeti mikrostrukturu martenzita koja ima igličasti izgled, a njeno zrno oblik igličaste pločice.



Slika 4.4. Mikrostruktura martenzita [8]

#### 4.4. Pretvorba austenita u bainit

Bainit čini mješavina prezasićenog ferita i cementita, nastaje na području između perlita i martenzita, točnija na temperaturi između 500 °C i 350 °C. Bainit se stvara pri hlađenju čelika između donje i gornje kritične brzine s niskim temperaturama pri čemu se stvara struktura od cementita i ferita, ali drugačija od perlita. Pri ovoj temperaturi difuzija atoma postiže malu brzinu te se atomi ugljika ne mogu pomicanja na velike udaljenosti. Čestice cementita su kuglastog oblika, jer zbog male udaljenosti umjesto listića cementita i ferita nastaju isključivo listići ferita. Za pretvorbu bainita potrebno je pothladiti austenit koji je osiromašen i potrebna je dovoljna difuzija ugljika. Austenit se u bainit može pretvarati bezdifuzijskim i difuzijskim mehanizmom. (Slika 4.5.). [8]

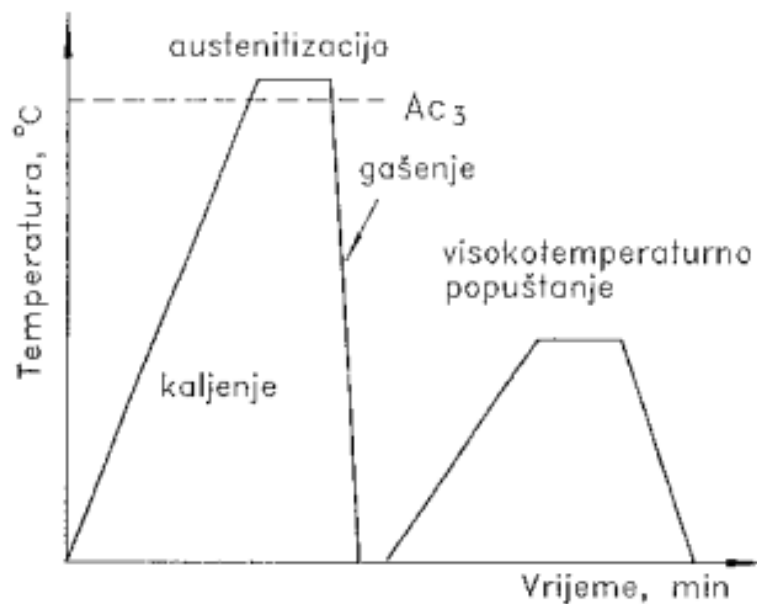


Slika 4.5. Gornji i donji bainit [8]

## 5. POBOLJŠAVANJE ČELIKA

Poboljšanje čelika podrazumijeva proces koji se čini kaljenjem i visokotemperaturno popuštanjem. Poboljšanje se vrši nakon popuštanja, a temperatura poboljšanja se određuje prema zahtijevanim osobinama dijelova. Poboljšanje izvodimo najčešće u pećima koje su zaštićene atmosferom što u velikoj mjeri sprječava od oksidaciju i razugljeničenje površine. Benefiti ove metode su povećanje granice tečenja, žilavosti, tvrdoće i dr. Ovaj postupak se primjenjuje kod opterećenih dijelova koje čini vijčana roba, osovine, vratila, zupčanici, dijelovi oružja itd.

Dijagramom nam je prikazan postupak poboljšanja čelika (slika 5.1.).



Slika 5.1. Dijagram poboljšavanja čelika [6]

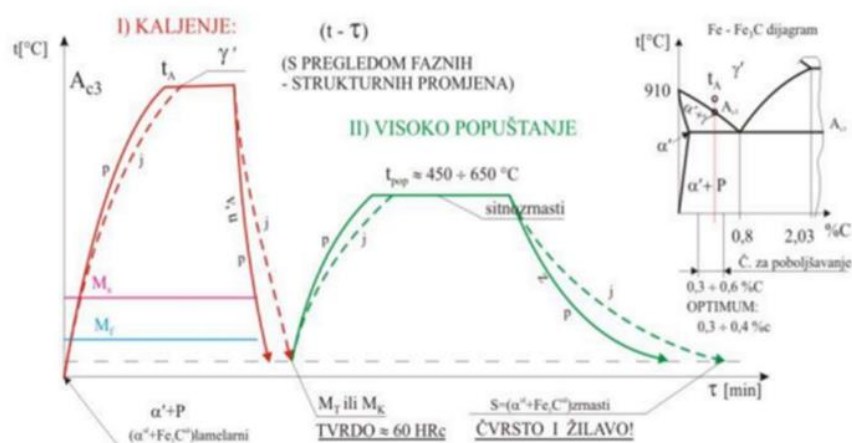
Poboljšavanje se izvodi na dva načina:

- klasično (anizotermički)
- izotermički

## 5.1. Klasično poboljšavanje

Klasično poboljšavanje izvodi kaljenjem i visokotemperaturnim popuštanjem, a hlađenje nakon popuštanja može biti ili brzo ili polagano, a sve ovisi o vrsti čelika koja se koristi. Najviša temperatura popuštanja je 650 °C.

U dijagramu (Slika 5.2.) možemo vidjeti isprekidanu liniju koja predstavlja krivulju jezgre te ako bolje pogledamo vidimo da krivulja jezgre zapravo „kasni“ u odnosu na temperaturu površine. Kod obradaka koji imaju puno veću dimenziju to se kašnjenje povećava.



Slika 5.2. Dijagram klasičnog poboljšavanja [11]

## 5.2. Izotermno poboljšavanje

Izotermno poboljšavanje izvodi se prekidnim kaljenjem. Odnosno hlađenjem s točne temperature austenitizacije u kupki izotermičke temperature iznad temperature  $M_s$ , uz držanje do potpunog završetka pretvorbe. Cilj je da se dobije bainit.



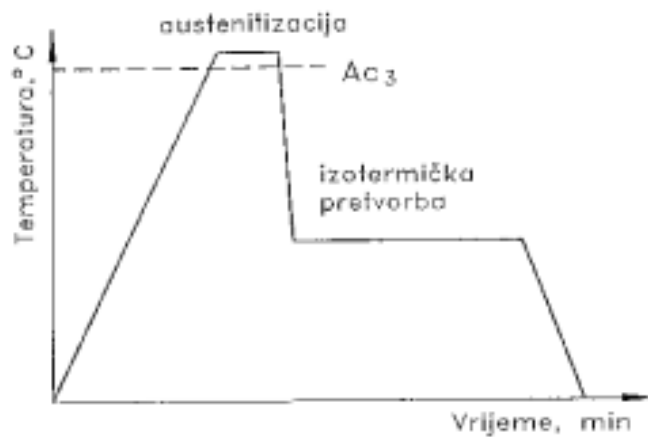
Prednosti izotermičke metode: [11]

- Modifikacija austenita odvija se pri konstantnoj temperaturi istovremeno u svim slojevima što rezultira minimalnim toplinskim naprezanjima
- Dobra žilavost nakon ovakve toplinske obrade (proistječe iz svojstava bajnitne faze)

Nedostatci: [11]

- Manja tvrdoća u odnosu na zakaljeni čelik
- Dugo trajanje toplinske obrade (prema TTT-dijagramu) – tim duže što je temperatura izoterma niža – veća tvrdoća bajnita

S izotermičkim načinom kaljenja moguće je dobiti dvije varijante. Ovako dobijemo samo bainit, čime tvrdoća manja, ali žilavost je dobra. Dok drugom varijantom ako se izradak izvadi ranije (prije nego završi pretvorba austenita) i ohladi na zraku, rezultat je smjesta bainita i martenzita, veće čvrstoće. Ovaj postupak se ne primjenjuje kod plitko kaljenih – ugljičnih čelika gdje je dimenzija izratka manja od 5 mm debljine. Dijagram izotermičke pretvorbe vidimo na slici 5.3.



Slika 5.3. Dijagram izotermičkog poboljšavanja [6]

## 5.1. Kaljenje čelika

Kaljenje čelika čini toplinsku obradu kojom se postiže otvrdnuće čelika. Do povećanja tvrdoće dolazi uslijed formiranja martenzitne strukture. A do otvrdnuća dolazi zagrijavanjem komada do temperature austenizacije, progrijavanja, držanjem komada na maksimalnoj temperaturi i u konačnici gašenja. Ohlađivanjem komada znatan dio austenita se pretvori u martenzit.

Na tvrdoću martenzita završetkom kaljenja najviše utječe postotak ugljika.

Time razlikujemo tri vrste čelika ovisno o udjelu ugljika: [6]

-čelici s malim udjelom ugljika manjim od 0,25 %

-čelici s udjelom ugljika od 0,3 %

-čelici za poboljšanje od 0,3 % do 0,6 %

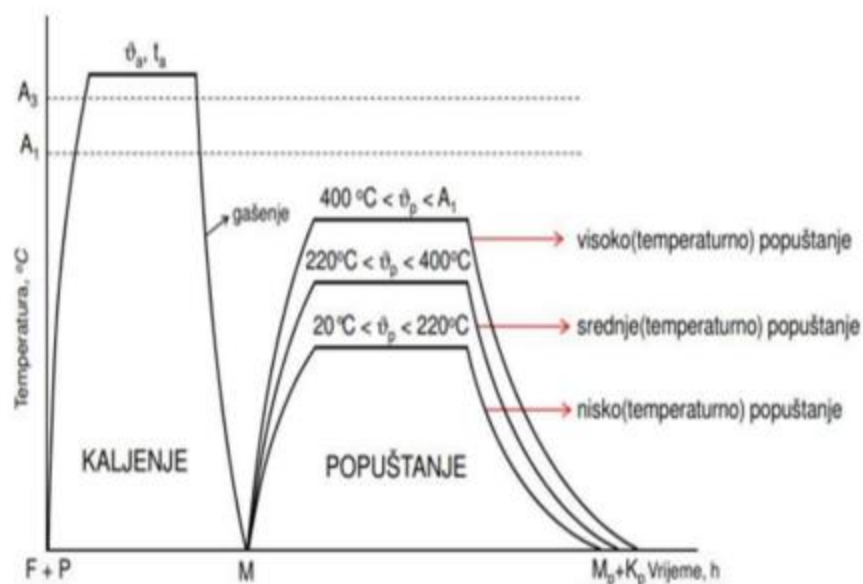
Čelikom koji sadrži mali udio ugljika koji je manji od 0,25 % nakon kaljenja dobivamo premalu čvrstoću, a čelici s udjelom ugljika manjim od 0,3 % u pravilu se ne kale. Dok se kod čelika za poboljšanje s udjelom ugljika od 0,3 % do 0,6 % pri kaljenju stvaraju naprezanja zbog fazne pretvorbe, zbog tih naprezanja može doći do puknuća ili deformiranja čelika.

Cilj svega je zapravo kod kaljenja postići minimalna naprezanja.

## 5.2. Popuštanje čelika

Popuštanje čelika je toplinska obrada koja se odvija u pravilu nakon kaljenja, a razlog tome je postizanje određenih svojstava duktilnosti i žilavosti. Vršiti se na način da se čelik zagrijava na određenu temperaturu (ali ispod  $A_{c1}$ ) potrebnu za kaljenje, te se nakon toga odvija brzo hlađenje da bi se dobili martenzitnu strukturu. To je struktura koja je krta i nije za eksploataciju, zbog čega se nakon kaljenja vrši popuštanje. Postoje i tri vrste popuštanja: [9]

- niskotemperaturno ( $\leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- srednjetemperaturno ( $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- visokotemperaturno ( $400\text{ }^{\circ}\text{C} - 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



Slika 5.4. Temperature popuštanja [12]

### 5.3. Prokaljivost čelika

Prokaljivost je jedno od svojstava čelika da kaljenjem otvrdnuje do određene dubine i određenog rasporeda tvrdoće, točnije da poprimi najveću moguću tvrdoću po presjeku.

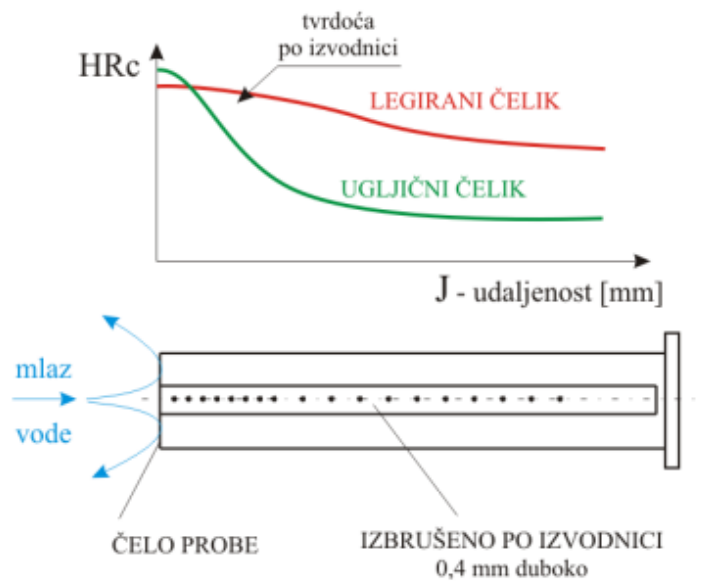
Prilikom gašenja intenzitet gašenja će ovisi o sredstvu u koju se hladi:

- slana voda
- slatka voda (sobna temperatura)
- topla voda
- ulje
- komprimirani zrak
- mirni zrak

Kako bi ispitali prokaljivost imamo nekoliko metoda, ali kod nas je najčešće korištena Jominy metoda.

Ispitivanje prokaljivosti po Jominyju:

Postupak ispitivanja je jednostavan i ekonomičan. Za standardni uzorak ispitivanog čelika uzima se promjer  $\varnothing$  25 mm i duljinu 100 mm. Čelo austenitiziranog uzorka na pravilnoj temperaturi austenitizacije hladi se mlazom vode, točno određenih karakteristika. Hlađenje se izvodi sve dok se uzorak upotpunosti ne ohladi. Nakon čega se cijelom dužinom obje nasuprotne izvodnice epruvete brusi površina gdje se onda mjeri tvrdoća na različitim udaljenostima od čela epruvete. Ispitivanje prokaljivosti možemo vidjeti na slici 5.5. [11]



Slika 5.5. Ispitivanje prokaljivosti po Jominyju [11]

Na slici 5.5. prikazane su krivulje dvjema boja:

- Crvena (Za legirani čelik)
- Zelena (Za ugljični nelegirani čelik)

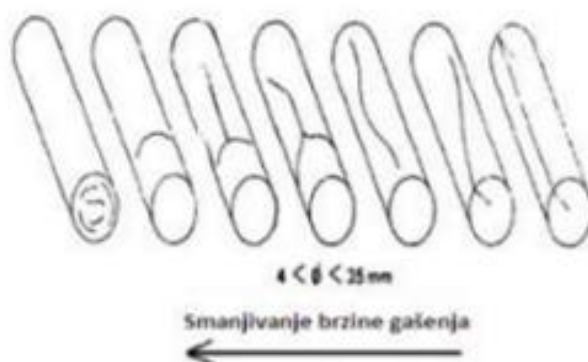
Iz slike 5.5 zapažamo nagli pad tvrdoće kod ugljičnog čelika kako se sve više udaljavamo od čela epruvete, dok kod legiranog čelika udaljavanjem od čela krivulja ima blagi pad tvrdoće. Iz čega zaključujemo da legirani čelici imaju puno veću prokaljivost od ugljičnih.

## 5.4. Hlađenje

Važna stavka kod toplinske obrade je i rashladno sredstvo, odnosno hlađenje. Kod hlađenja veliku ulogu igra i brzina kojom se hladi, jer će svojstva i mikrostruktura čelika ovisi o brzini hlađenja. Bitno je pravilno odrediti rashladno sredstvo koje će se koristiti.

Gašenjem čelika s temperature austenizacije dolazi do stvaranja razlike u temperaturi oko presjeka obratka. Čime ta razlika temperature dovodi do stvaranja toplinskih naprezanja, ali i do transformacijskih naprezanja što se primjećuje u promjeni volumena te stvaranja plastičnosti.

Kada odabiremo sredstvo gašenja, najbolje je odabrati ono sredstvo koje će ostvariti najmanju potrebnu, ali i dovoljno veliku brzinu hlađenja, da bi se formirala martenzitna mikrostruktura. Ako je brzina hlađenja prevelika tada je velika vjerojatnost da će doći do stvaranja pukotina (Slika 5.6.) stvaranjem pukotina dolazi do uništenja samog obratka. Najvažniji cilj koji gašenje ima jest da se postigne tražena mikrostruktura i svojstva čelika.



Slika 5.6. Pojavljivanje pukotina prilikom hlađenja [12]

Sredstva kod kojih je vrelište niže od temperatura austenizacije čelika: [6,12]

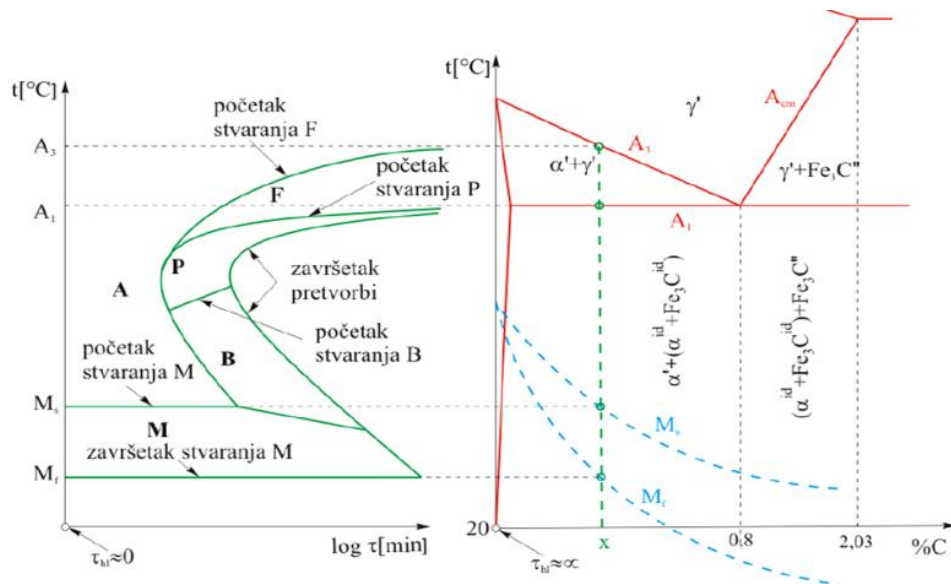
- Emulzija
- Voda
- Ulje
- Otopina polimera

Sredstva kod kojih je vrelište više nego li je temperatura austenizacije čelika: [6,12]

- Rastaljena sol
- Rastaljeni metal

## 6. TTT dijagram

TTT dijagram za čelike se koristi kako bi prikazali transformaciju čelika. Ovim dijagramom moguće je odrediti količinu već pretvorenog austenita u funkciji brzine i temperature hlađenja. Koristi se za određivanje načina hlađenja s ciljem postizanja odgovarajuće mikrostrukture i faznog sastava. TTT-dijagram nam daje dobru orijentaciju za odabir odgovarajućeg rashladnog sredstva, a sve kako bi postigli određeni fazni sastava. Konstrukciju TTT – dijagrama vidimo na slici 6.1.



Slika 6.1. Konstrukcija TTT-dijagrama [11]



Prema čemu je: [11]

A – područje čistog austenita

F – područje pretvorbe austenita u primarni ferit

P – područje pretvorbe austenita u perlit

B – područje pretvorbe austenita u bainit

M – područje pretvorbe austenita u martenzit

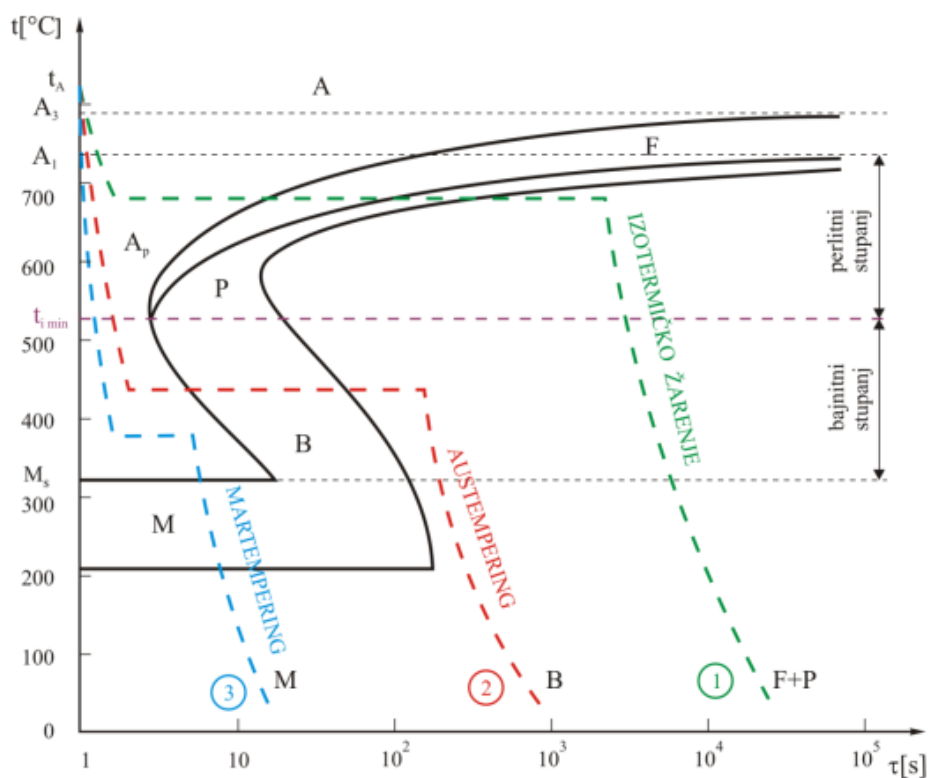
$A_1$  – temperatura početka formiranja austenita

$A_3$  – temperatura završetka pretvorbe ferita u austenit

Praćenjem raspada austenita možemo razlikovati dvije vrste dijagrama, a to su izotermički TTT-dijagram i TTT-dijagram kontinuiranog hlađenja.

## 6.1. Izotermički TTT- dijagram

Izotermički TTT dijagram predstavlja promjenu mikrostrukture čelika u uvjetima izotermičkog hlađenja koje se odvija s temperature austenitizacije na temperaturu izoterme do završetka pretvorbe, gdje se primjenjuje lagano hlađenje zbog redukcije zaostalih naprezanja. Hlađenje se vrši do određene temperature, izotermičkim držanje na toj temperaturi do potpunog ili djelomičnog završetka pretvorbe austenita. Pretvorba se odvija pri konstantnoj temperaturi, a očitavanja se vrše na krivulji izoterme. Izotermički TTT – dijagram vidimo na slici 6.2.



Slika 6.2. Izotermički TTT dijagram [11]

## 6.2. Kontinuirani TTT dijagram

Kontinuirani TTT dijagram (Slika 6.3.) koristi se za kontinuirano hlađenje s temperature austenitizacije do sobne temperature. Ovaj dijagram koristi logaritamski prikaz mikrostruktura zbog lakše preglednosti mikrostruktura kod kratkog i dugog trajanja ohlađivanja. Najvažnija krivulja u ovome dijagramu naziva se gornja kritična krivulja hlađenja (gašenja), gdje se iz nje može izračunati gornja kritična brzina gašenja. S tom brzinom se osigurava da se 100% austenita transformira u 100% martenzita. Formula za gornju kritičnu brzinu gašenja:

$$v_{ohl} \approx \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \rightarrow v_{kr g} = \frac{t_A - t_i}{\tau_{imin}} \quad (6.1.)$$

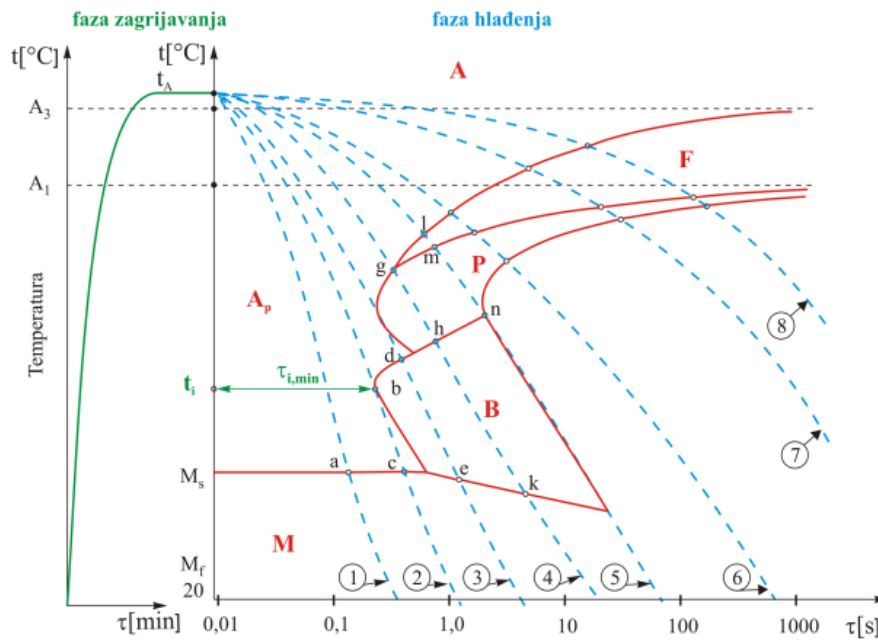
Gdje je: [11]

$v_{kr g}$  – gornja kritična brzina gašenja, °C/s

$t_A$  – temperatura austenitizacije, °C

$\tau_{imin}$  – minimalno trajanje inkubacije pothlađenog austenita, s

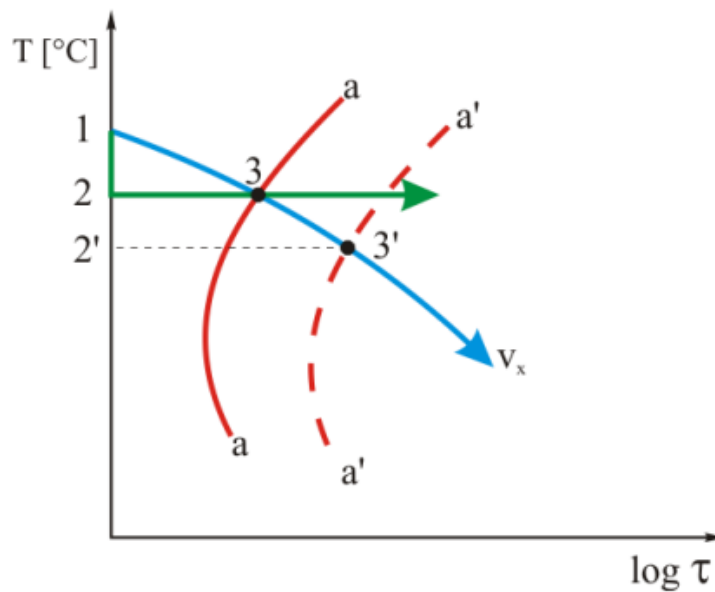
$t_i$  – temperatura na kojoj je trajanje inkubacije pothlađenog austenita najkraća, °C



Slika 6.3. Kontinuirani TTT- dijagram [11]

### 6.3. Usporedba izotermičkog i kontinuiranog TTT- dijagrama

Ako usporedimo izotermički i kontinuirani TTT- dijagram, vidimo da načelno izgledaju jednako, ali ako pogledamo linije tih dvaju dijagrama vidimo da se linije tog istog čelika ne podudaraju. Linije kod kontinuiranog dijagrama pomiču se udesno prema dolje, jer hlađenje nije moglo biti naglo, već je teklo sporije nekom brzinom  $v_k$ . Dijagram usporedbe izotermičkog i kontinuiranog TTT- dijagrama možemo vidjeti na slici 6.4. [11]



*Slika 6.4. Pomicanje linije pretvorbe TTT- dijagrama pri prijelazu s izotermičkog na kontinuirano hlađenje [11]*

Objašnjenje dijagrama (Slika 6.4.)

Početak izotermičke pretvorbe počinje u točki 3 gdje dolazi čekanje u trajanju od 2 - 3 točke. Kontinuiranim hlađenjem brzinom  $v_x$ , do početka pretvorbe dolazi tek u točki 3', jer se uzorak na ovaj način hlađenja duže zadržava na višim temperaturama. Do početka pretvorbe imamo duže vrijeme od 2'- 3' točke. Zbog toga se krivulja a - a pomaknula u kontinuirani položaj a' - a'.

## 7. ISPITIVANJE TVRDOĆE

Tvrdoća čelika kao i ostalih krutina predstavlja svojstvo materijala koje se protivi zadiranju stranog tijela u njegovu strukturu. Podaci vezani za tvrdoću su neophodni kada se radio bilo kojoj obradi. Najvažnija stvar kod mjerenja tvrdoće je da alata uvijek mora biti tvrdi od materijala predmeta koji se mjeri. U strojarstvu postoji nekoliko načina mjerenja tvrdoće: [13]

- Tvrdoća po Vickersu (HV)
- Tvrdoća po Rockwellu (HRC i HRB)
- Tvrdoća po Brinellu (HB)

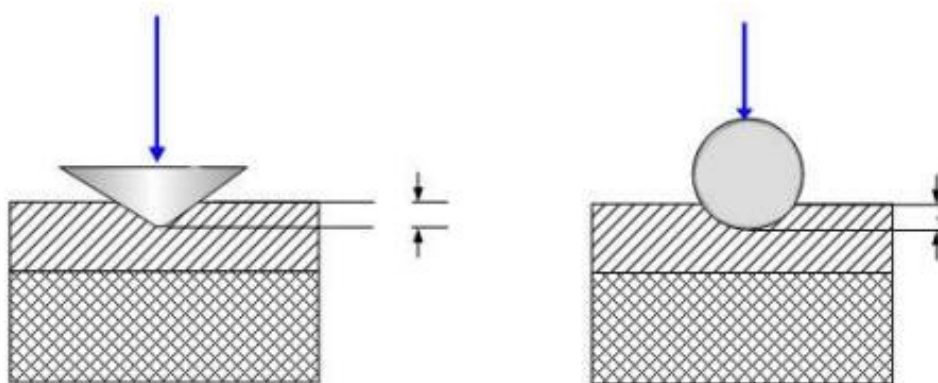
Postoji metoda za mjerenje tvrdoće koju je razvio Friedrich Mohs, a to je Mohsova skala koja čini niz od deset minerala poredanih po tvrdoći od najmekšeg prema najtvrdem, te se koristi za procjenu tvrdoće drugih minerala ili tvari.

*Tablica 7.1. Mohsova skala [13]*

Tvrdoća po Mohsu	Mineral
1	Talk
2	Gips
3	Kalcit
4	Fluorit
5	Apatit
6	Ortoklas
7	Kvarc
8	Topaz
9	Korund
10	Dijamant

## 7.1. Tvrdoća po Rockwellu

Rockwellovom metodom mjeri se tvrdoća isključivo metalnih materijala na način da se u metal utiskuje dijamanтни stožac (HRC – metoda) ili kuglica od kaljenog čelika (HRB – metoda). Za mekane materijale se upotrebljava mala čelična kuglica dok ta tvrde materijale dijamanтни stožac (Slika 7.1.). Na ovaj način se mjeri dubina penetracije koja se preračunava u tvrdoću po Rockwellu. [13]



Slika 7.1. Dijamanтни stožac i kuglica od kaljenog čelika [13]

Formula izračuna tvrdoće:

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

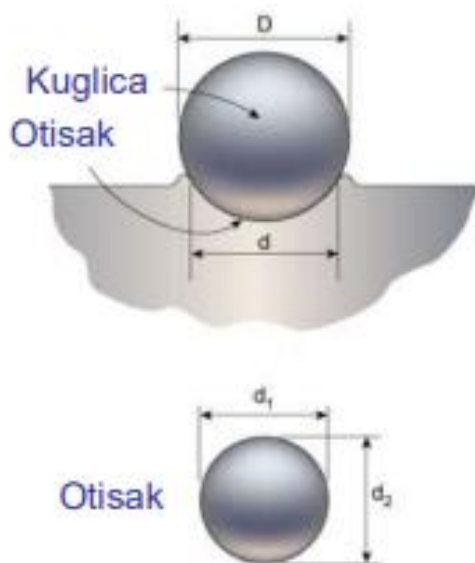
Gdje je: [13]

$E$  – konstanta, referentna dubina ovisna o utiskivaču. Uzima se 100 jedinica za dijaman, a 130 za čeličnu kuglicu

$e$  – dubina prodora utiskivača pod utjecajem ukupne sile

## 7.2. Tvrdoća po Brinellu

Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom jednostavan je postupka koji koristi kuglicu od kaljenog čelika (standardnih promjer). Princip mjerenja tvrdoće je da se kuglica utiskuje u ravnu površinu materijala, određenom silom  $F$ , nakon čega se kuglica miče, a u materijalu ostaje otisak (Slika 7.2.). Tvrdoća se određuje temeljem veličine otiska. [13]



Slika 7.2. Princip mjerenja tvrdoće po Brinellu [13]

Formula za izračun tvrdoće:

$$HB = \frac{2F}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (7.2.)$$



Gdje je: [13]

$F$  – sila djelovanja penetratora

$D$  – promjer kuglice

$d$  – promjer otiska na uzorku nakon ispitivanja

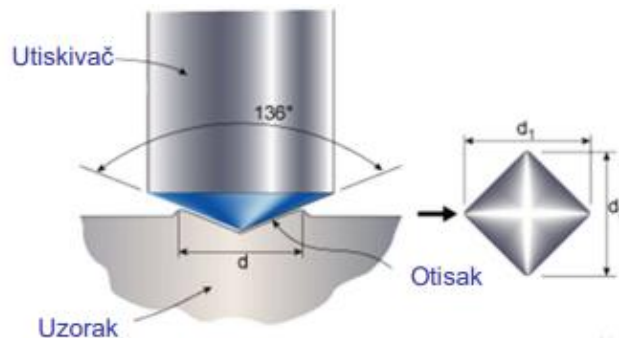
Nedostatak ove metode je što se ne može mjeriti visoka tvrdoća, a otisak koji ostaje na materijalu (Slika 7.3.) je dosta velik, pa funkcionalno i estetski nagrđuje površinu. [13]



*Slika 7.3. Otisak na materijalu [13]*

### 7.3. Tvrdoća po Vickersu

Vickersovom metodom se mogu mjeriti najtvrdi materijali, a ovdje tvrdoća ne ovisi o primijenjenoj sili. Kod ove metode utiskivač je istostrana četverostrana piramida koja ima kutem između stranica od 136° (Slika 7.4.). Izabrani kut omogućava da se izmjere vrijednosti tvrdoće koje ne ovise o primijenjenoj sili. [13]



Slika 7.4. Princip mjerenja po Vickersu [13]

Formula za izračun tvrdoće prema Vickersu:

$$HV = 0.102 \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 0.1891 \frac{F}{d^2} \quad (7.3.)$$

Gdje je: [13]

$F$  – primijenjena sila

$d$  – ukupni promjer

Ukupni promjer se dobije izračunom srednje vrijednosti dijagonala baza piramide  $d_1$  i  $d_2$

## 8. DEFINIRANJE PARAMETARA KOD AUSTENITIZACIJE

Austenitizacijom opisujemo proces kod kojega se izradak grije i zadržava na određenoj temperaturi iznad  $A_{c1}$  kako bi se struktura pretvorila u austenit. Postoji nekoliko načina za uspješno određivanja temperature austenitizacije: [6]

- Određivanje u odnosu na temperature  $A_{c1}$  i  $A_{c3}$
- Određivanje pomoću različitih priručnika proizvođača čelika
- Očitavanje iz dijagrama (TTT, Fe-C)

### 8.1 Režimi ugrijavanja na temperaturu austenitizacije

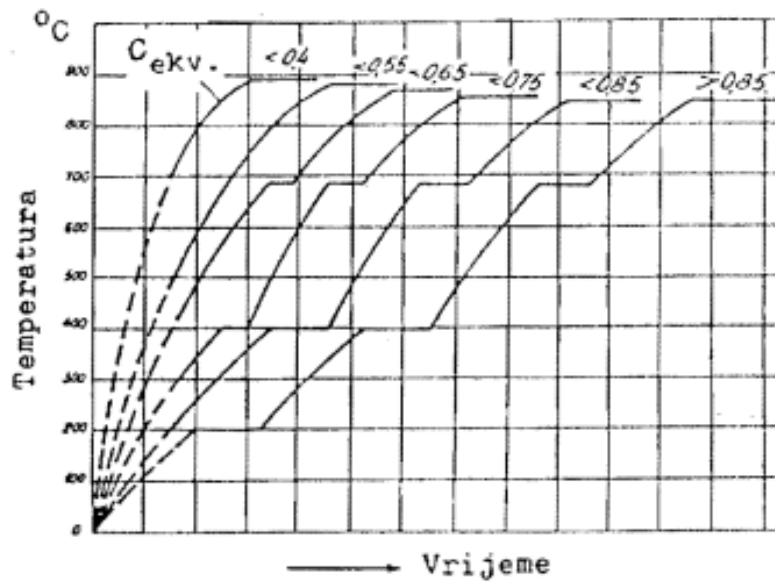
Kod određivanja režima bitno je poznavati brzine ugrijavanja: [6]

- Tehnički moguća koja zavisi o opremi i mediju, obliku i rasporedu obratka, razlici temperatura
- Tehnički dozvoljena koja zavisi od konfiguracije obradaka, sastava i strukture materijala

Dozvoljene brzine koriste se kako bi spriječili pojavu pukotina uslijed zagrijavanja. Pomoću njih vrši se ugrijavanja bez da se stvore pukotine, dok osjetljivost pri nastajanju pukotina se može izračunati prema sljedećoj formuli:

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

Prethodna formula koristi se ako elementi imaju sljedeće vrijednosti:  $C$  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%;  $Al$  2%. Izračun  $C_{ekv}$  koristi se za određivanje potrebnog predgrijavanja korištenjem dijagrama (Slika 8.1.).



Slika 8.1. Ugrijavanje s obzirom na  $C_{ekv}$  [6]

## 8.2. Trajanja austenitizacije

Vrijeme trajanja austenitizacije posebno je za svaki pojedini obradak. Ukupno vrijeme možemo podijeliti na vrijeme ugrijavanja obratka, progrijavanje, zadržavanje na određenoj temperaturi i grijanjem. Vrijeme grijanja ovisi o brojnim faktorima kao što su tehnološki parametri, obratku te postrojenju.

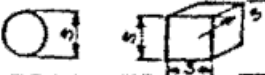
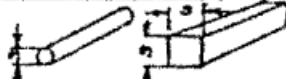

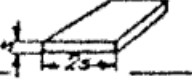

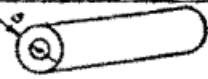
Postoji nekoliko metoda prema kojima možemo odrediti trajanje grijanja: [6]

- Ordinanz metoda
- Smoljnikov metoda
- Newton metoda

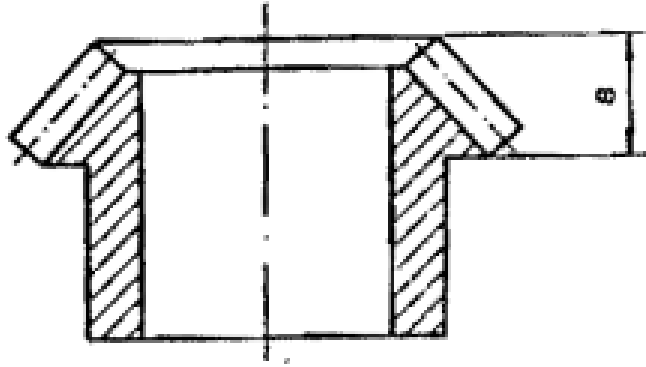
### 8.2.1. Ordinanza metoda

Ordinanza metoda uzima u obzir kemijski sastav čelika, dimenzije i oblik medija koji se koristi za ugrijavanje. Oblik obratka određuje se preko koeficijenta u odnosu na karakterističnu dimenziju „s“. To je dimenzija koja predstavlja mjerodavna mjesta presjeka za rezultata toplinske obrade te u čijem se smjeru odvodi toplina prilikom ugrijavanja ili hlađenja. Kod pojedinih oblika potrebno je odrediti i koeficijent oblika „k“ (Tablica 8.1.). Za određivanje vremena trajanja grijanja množimo koeficijent oblika „k“ i dimenzije „s“.

Tablica 8.1. Koeficijent oblika „k“ [6]

Oblik izratka	Koeficijent oblika „k“
	0,70
	1,0
	1,5
	1,5
	2,0
	2 za kratke nezatvorene cijevi 4 za duge na kraju zatvorene cijevi

Karakteristične dimenzije „s“ za neke komplicirane obratke moguće je odrediti iz TGL 25 473 /1.3/ (Slike 8.1.). [6]



Slika 8.2. Karakteristična dimenzija „s“ za neki obradak prema /1.3/ [6]

### 8.2.2. Smoljnikova metoda

Smoljnikova metoda uzima u obzir također kemijski sastav čelika, konfiguraciju, dimenziju obratka i medij potreban za ugrijavanje. Ukupno vrijeme potrebno za ugrijavanje dobijemo prema sljedećoj formuli:

$$t_{uk} = t_{gr} + t_{id} \quad (8.2.)$$

Pri čemu je:

$t_{gr}$  – vrijeme grijanja, min

$t_{id}$  – vrijeme izotermičkog držanja, min

Za različite veličine obratka imamo i različite formule: [6]

Za kratke obratke ( $H/D < 5$ ):

$$t_{gr} = m \cdot K_1 \cdot \frac{V}{A} \cdot K_f \cdot K_k \quad [\text{min}] \quad (8.3.)$$

Za dugačke obratke ( $H/D > 5$ ):

$$t_{gr} = \frac{1}{60} \cdot m \cdot K_2 \cdot \beta \cdot D \quad [\text{min}] \quad (8.4.)$$

Za dugačke šuplje obratke:

$$t_{gr} = \frac{1}{60} \cdot m \cdot K_2 \cdot \beta \cdot (D - d) \quad [\text{min}] \quad (8.5.)$$

Pri čemu je: [6]

$m$  – značajka medija za ugrijavanje, a ovisi o vrsti medija (solna kupka, zrak)

$K_1$  – koeficijent specifičnog vremena progrijavanja za kratke obratke, min /cm

$K_2$  – koeficijent specifičnog vremena progrijavanja za dugačke obratke, s/mm

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

$K_f$  – kriterij forme za kratke obratke

$K_k, \beta$  – koeficijent konfiguracije

$D, d$  – promjer ili debljina obratka

$H$  – duljina obratka

### 8.2.3. Metoda Newton

Kod uzimanja u obzir ove formule, vrijeme grijanja računamo na sljedeći način:

$$t_{\text{gr}} = \frac{V \cdot c \cdot \rho}{\alpha \cdot \varepsilon} \cdot \ln \frac{\vartheta_{\text{peć}} - \vartheta_{\text{poč}}}{\vartheta_{\text{peć}} - \vartheta_{\text{zavr}}} \quad [\text{s}] \quad (8.6.)$$

Pri čemu je: [6]

$V/A$  – odnos volumena i površine, m

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

$\rho$  – gustoća, kg/m<sup>3</sup>

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

$\varepsilon$  – koeficijent usporenja ugrijavanja, zavisi o značajki  $Bi = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda}$  vrijedi samo za deblje predmete  $Bi > 0,25$ . Za vrlo tanke i tanke predmete uzima se  $\varepsilon = 1$ .



Računamo ga prema sljedećoj formuli: [6]

Za ploču:

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{3} \cdot Bi} \quad (8.7.)$$

Za valjak:

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{3,5} \cdot Bi} \quad (8.8.)$$

Za kuglu:

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{5} \cdot Bi} \quad (8.9.)$$

Pri čemu je: [6]

$x$  – dimenzija presjeka progrijavanja, m

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

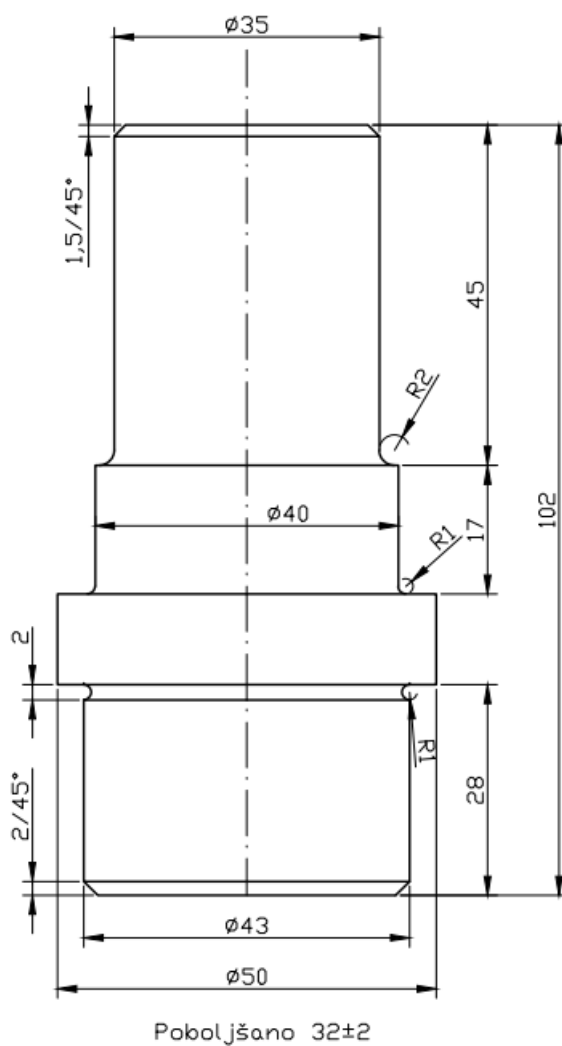
$\vartheta_{\text{peć}}$  – temperatura peći, °C

$\vartheta_{\text{poč}}$  – početna temperatura, °C

$\vartheta_{\text{zavr}}$  – završna temperatura, °C

## 9. TOPLINSKA OBRADA STROJNOG DIJELA JI.23 – ST.18

Zadani strojni dio JI.23 – ST.18 potrebno je poboljšati kako bi dobili tvrdoću u rasponu od  $32 \pm 2$  HRC. Poboljšani strojni dio JI.23 – ST.18 možemo vidjeti na slici 9.1.



Slika 9.1. Nacrt strojnog dijela JI.23 – ST.18

## Kemijski sastav čelika JI.23 – ST.18

Čelik JI.23 – ST.18 ima propisani kemijski sastav čije udjele vidimo u tablici 9.1.

Tablica 9.1. Kemijski sastav čelika JI.23 – ST.18

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
%	0,38-0,45	0,15-0,40	0,5-0,8	Max. 0,035	Max. 0,035	0,9- 1,2	0,15- 0,30

## Parametri toplinske obrade čelika JI.23 – ST.18

Za pravilno određivanje toplinske obrade potrebno je odrediti nekoliko parametara. Parametri koje je potrebno popratiti su prvenstveno temperatura austenitizacije, režimi ugrijavanja na temperaturu austenitizacije te temperatura na kojoj se vrši poboljšanje. Temperatura austenitizacije određujemo na temelju temperatura  $A_1$  i  $A_3$ .

Režim kojim će se ugrijavati obradak odnosno temperatura austenitizacije dobiti ćemo u ovisnosti o  $C_{ekv}$ . Ta veličina predstavlja osjetljivost na pojavu pukotina i računamo je prema sljedećem izrazu:

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + \frac{V}{5} + \frac{Si-0,5}{5} + \frac{Ti}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Al}{10} \quad (9.1.)$$

$$C_{ekv} = 0,42 + \frac{0,65}{5} + \frac{1}{4} + \frac{0,2}{3} + \frac{0}{10} + \frac{0}{5} + \frac{0,25-0,5}{5} + \frac{0}{5} + \frac{0}{10} + \frac{0}{10}$$

$$C_{ekv} = 0,82$$

Nakon dobivene vrijednosti očitavamo temperaturu na krivulji  $A_3$  u dijagramu stanja (Slika 4.1.) te dobivamo optimalnu temperaturu austenitizacije iz sljedećeg izraza:

$$\vartheta_A = A_{C3} + (30 \text{ }^\circ\text{C} \dots 70 \text{ }^\circ\text{C}) \quad (9.2.)$$

$$\vartheta_A = 730 \text{ }^\circ\text{C} + 70 \text{ }^\circ\text{C} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$$

Pri čemu je:

$\vartheta_A$  – temperatura austenitizacije,  $^\circ\text{C}$

$A_{C3}$  – temperatura austenitizacije jezgre,  $^\circ\text{C}$

Nakon određene temperatura austenitizacije treba odrediti i vrijeme trajanja, koje je različito za svaki pojedini obradak. Pomoću Ordinanz metode određujemo prvo dimenziju „s“ koja predstavlja najviši toplinski tok koji iznosi 50 mm razlog je što je to najveći promjer na izratku. Potrebno je još i odrediti koeficijent „k“ (Tablica 9.2.).


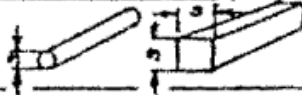

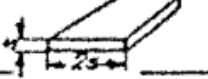

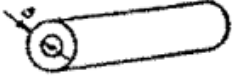
- Karakteristična dimenzija „s“:

$$s = 50 \text{ mm}$$

- Koeficijent „k“:

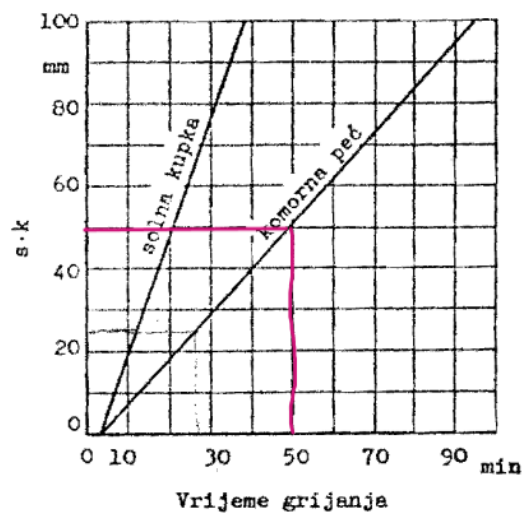
$$k = 1$$

Tablica 9.2. Karakteristična dimenzija „s“ i koeficijent „k“ za neke obratke

Oblik izratka	Koeficijent oblika „k“
	0,70
	1,0
	1,5
	1,5
	2,0
	2 za kratke nezatvorene cijevi 4 za duge na kraju zatvorene cijevi

Vrijeme ugrijavanja dobivamo umnoškom prethodno određene dimenzije i koeficijent kao veličina umnoška „s · k“:

$$s \cdot k = 50 \cdot 1 = 50 \text{ mm} \quad (9.3.)$$



Slika 9.2. Očitavanje vremena grijanja u zavisnosti od „s · k“ [6]

Očitavamo za vrijednost prethodnog umnoška vrijeme grijanja (Slika 9.2.) za komornu peć koje iznosi:

$$t_{gr} = 50 \text{ min}$$

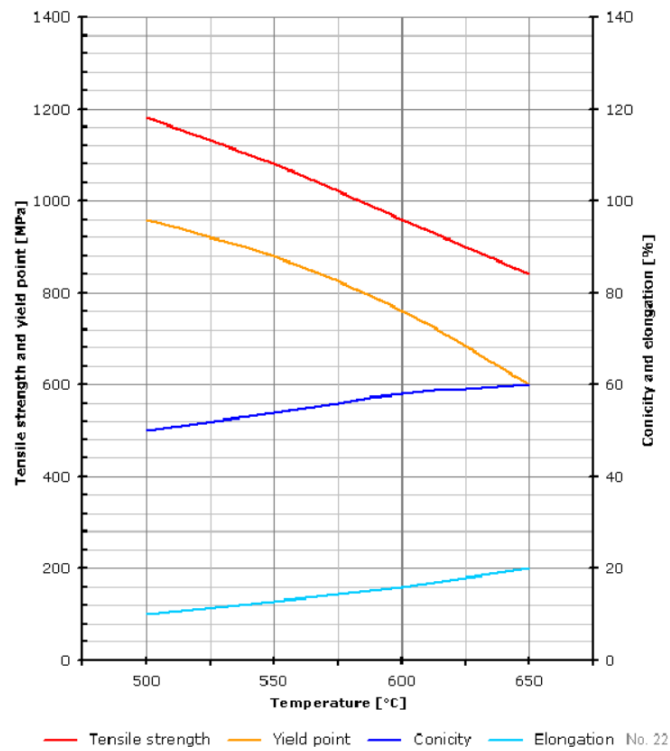
### Temperatura popuštanja

Za zadanu tvrdoću  $32 \pm 2$  HRC uzeta je približna vlačna čvrstoća čelika „ $R_m$ “ od  $1060 \text{ N/mm}^2$  (Tablica 9.3.).

Tablica 9.3. Odnos tvrdoće i vlačne čvrstoće

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

Nakon određene vlačne čvrstoće od  $1060 \text{ N/mm}^2$  (Tablica 9.3.) možemo iz dijagrama (Slika 9.3.) odrediti temperaturu popuštanja od  $575 \text{ }^\circ\text{C}$ .

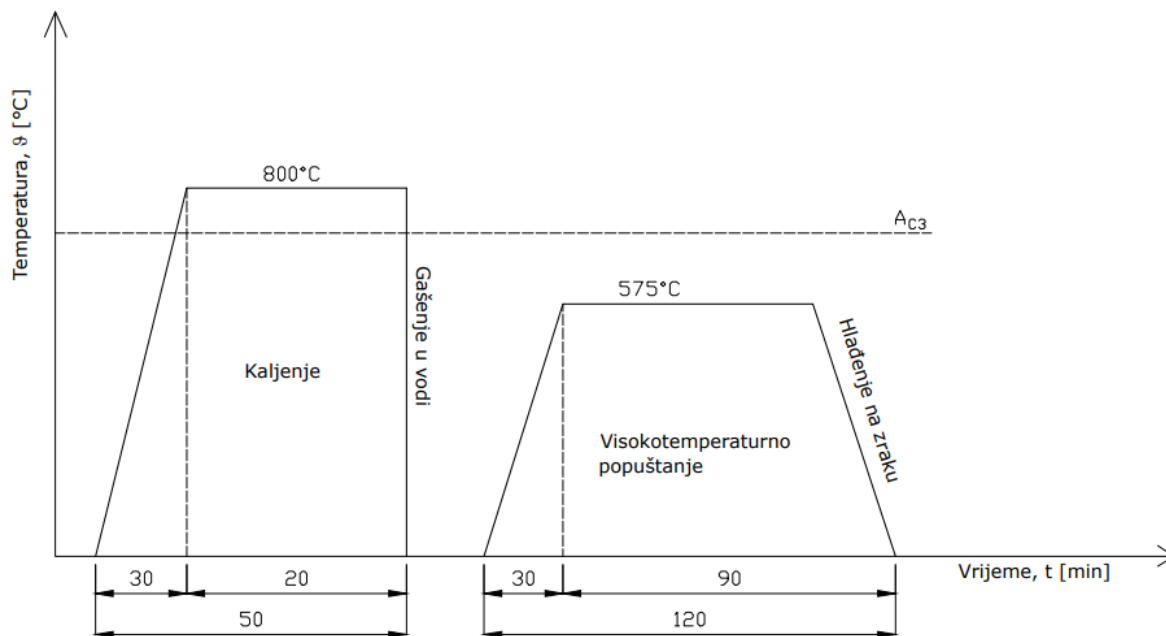


Slika 9.3. Dijagram ovisnosti mehaničkih svojstava o temperaturi popuštanja za čelik 42CrMo4 [14]

### Vrijeme popuštanja

Korištenjem raznih priručnika preporuča se držanje obratka na temperaturi popuštanja od 1 do 2 sata. Temeljem čega je odabrano vrijeme od 2 sata.

## Dijagram popuštanja za strojni dio JI.23 – ST.18



Slika 9.4. Postupak poboljšanja zadanog strojnog dijela

Na slici 9.4. prikazan je dijagram kaljenja i visokotemperaturno popuštanja za zadani strojni dio JI.23-ST.18.



## Operacijski listovi

Tehnološku dokumentaciju čine dva operacijska lista, gdje je jedan list kaljenja (Tablica 9.4.) drugi popuštanja (Tablica 9.5.).

Tablica 9.4. Operacijski list kaljenja

Poduzeće: Tehnički fakultete Rijeka		Naziv dijela: JI.23- ST.18		Materijal: 42CrMo4	Radno mjesto:	List: 1 Listovi: 2		
				Kvaliteta:	Naziv:			
Operacijski list: Toplinska obrada		Oznaka:		Oblik: JI.23-ST.18	Oznaka:	Operacija broj: 1		
		Naziv operacije: Kaljenje		Masa/Dim.:	Radionica: Laboratorij			
Zahv. br.	Opis zahvata	Kol.	Proizvodno sredstvo	T(°C)	Vrijeme (min)	Minuta		
		Kom.	Proizvodni materijal			$t_s$	$t_r$	
1	Stavljanje u peć	1	Ručno	-	1	-	1	
2	Ugrijavanje	1	Peć	800	50	50	-	
3	Gašenje i vađenje	1	Voda (kada)	-	5	-	5	
Izradio:		Datum:		Kontrola:		$\sum t_s$	$\sum t_r$	
Ivana Holjević		14.9.2023.				50	6	

Tablica 9.5. Operacijski list popuštanja

Poduzeće: Tehnički fakultete Rijeka		Naziv dijela: JI.23- ST.18		Materijal: 42CrMo4		Radno mjesto:		List: 2 Listovi: 2
				Kvaliteta:		Naziv:		
Operacijski list: Toplinska obrada		Oznaka:		Oblik: JI.23-ST.18		Oznaka:		Operacija broj: 2
		Naziv operacije: Popuštanje		Masa/Dim.:		Radionica: Laboratorij		
Zahv. Br.	Opis zahvata	Kol.	Proizvodno sredstvo	T(°C)	Vrijeme (min)	Minuta		
		Kom.	Proizvodni materijal			t <sub>s</sub>	t <sub>r</sub>	
1	Stavljanje u peć	1	Ručno	-	1	-	1	
2	Popuštanje	1	Peć	575	120	120	-	
3	Hlađenje na zraku	1	Zrak	-	60	-	60	
Izradio:		Datum:		Kontrola:		∑ t <sub>s</sub>	∑ t <sub>r</sub>	
Ivana Holjević		14.9.2023.				120	61	

## Verifikacija određenih parametara toplinske obrade

Nakon što smo prethodno odredili i definirali sve režime obrade, otišli smo na praktični dio rada u laboratorij, čime smo započeli obradu strojnog dijela JI.23-ST.18 na način da smo prvo peć modela „OVER“ (Slika 9.5.) zagrijavali 30 minuta na željenu temperaturu austenitizacije od 800 °C. Pri čemu smo strojni dio JI.23-ST.18 stavili u peć (Slika 9.6.) na 50 minuta. Nakon vađenja za 50 minuta odmah smo stavili na hlađenje u kadu. Gdje smo pomicali strojni dio kroz vodi kako bi se brže ohladio, jer povećanjem brzine prolaska kroz vodu obradak se brže hladi.



*Slika 9.5. Peć modela „OVER“*



*Slika 9.6. Strojni dio unutar peći modela „OVER“*

Nakon što smo riješili proces kaljenja sljedeće što smo morali napraviti je izmjeriti tvrdoću, te je uslijedio proces visokotemperaturnog popuštanja. Proces visokotemperaturnog popuštanja također smo izvršili u peći modela „OVER“ (Slika 9.5.) koju smo zagrijali na temperaturu od 575 °C, a nakon toga u nju stavili strojni dio JI.23-ST.18 i držali smo ga 120 minuta. Nakon 120 minuta izvadili smo ga iz peći i ostavili da se ohladi na zraku, nakon čega je slijedilo ponovo mjerenje tvrdoće.

## Mjerenje tvrdoće

Tvrdoću ćemo izmjeriti pomoću mjerača tvrdoće (Slika 9.7.) koji služi za brzo mjerenje tvrdoće na površini. Postoje razni mjerači tvrdoće ovisno o materijalu. Kako bi izmjerili tvrdoću strojnog dijela JI.23 – ST.18 koristit ćemo Rockwellovu (HRC) metodu mjerenja.



*Slika 9.7. Uređaj za mjerenje tvrdoće (HRC)*

Nakon provedenog mjerenja. Očitali smo tvrdoću nakon kaljenja i nakon visokotemperaturnog popuštanja. Pri čemu smo tvrdoću nakon kaljenja dobili 57 HRC, te nakon visokotemperaturnog popuštanja 35 HRC.

Poanta svega je da se tvrdoća nakon kaljenja poveća, a nakon visokotemperaturnog popuštanja pada. Rezultat je poštovao zadane zahtjeve od  $33 \pm 2$  HRC te možemo utvrditi da je zahtjev zadovoljen.

## 10. ZAKLJUČAK

Toplinska obrada je važan proces gdje se u obzir uzima temperatura i vrijeme, uz korištenje odgovarajućih parametara, a sve u cilju postizanja odgovarajućih mehaničkih i kemijskih svojstava.

Promjenom mikrostrukture čelika koja se ostvaruje toplinskom obradom mijenjaju se tvrdoća, duktilnost, vlačna čvrstoća i žilavost. Ovisno o željenoj primjeni strojni dio podvrgavamo određenim temperaturno vremenskim promjenama čime dobivamo određenu mikrostrukturu sa zahtijevanim svojstvima.

Čelik je slitina koju sačinjava željezo i ugljik, dok njegove fazne pretvorbe možemo lakše razumjeti korištenjem  $Fe-Fe_3C$  dijagrama gdje pri određenoj temperaturi i udjelu ugljika razlikujemo pojedinu mikrostrukturu.

Postupak poboljšavanja je postupak koji čini kaljenje i visokotemperaturno popuštanje. Kaljenjem se postiže povećanje tvrdoće ovisno o udjelu ugljika, a kako bi postigli veću žilavost čelik podvrgavamo postupku poboljšavanja i u konačnici hlađenja.

Korištenjem TTT-dijagrama nastojimo utvrditi način hlađenja kako bi zadržali željenu mikrostrukturu.

Promjenom mikrostrukture mijenja se i tvrdoća koja predstavlja svojstvo čelika prodiranju stranog tijela u njegovu površinu. Razlikujemo tri načina mjerenja tvrdoće, a ovisno o mjernom uređaju odabiremo metodu mjerenja.

Definiranjem osjetljivosti na pukotine, temperature austenitizacije te vrijeme držanja možemo dobiti ako odredimo parametre austenitizacije. Za određivanje vremena austenitizacije i trajanje moramo poznavati kemijski sastav čelika te metode za određivanje trajanja grijanja.

U praktičnom dijelu zadatka definirali postupak toplinske obrade strojnog dijela JI.23 – ST.18. Postupak verifikacije definiran je probnim poboljšavanjem, gdje je utvrđeno da definirani parametri ispunjavaju zadane zahtjeve.

## LITERATURA

- [1] S interneta, 10 Toplinska obrada čelika (2).pdf, 1.11.2023.
- [2] Dr.sc. Emi Govorčin Bajsić, Polimerne mješavine, Sveučilište u Zagrebu 9. rujna 2016.
- [3] S interneta, UGLJENIK | Metalurgija (wordpress.com), 1.11.2023.
- [4] S interneta, Austenite | Metallurgy for Dummies, 1.11.2023.
- [5] S interneta, Giesserei Lexikon, 1.11.2023.
- [6] Božo Smoljan: „Toplinska obrada čelika sivog i nodularnog lijeva“
- [7] S interneta, „Microestructura y fases del acero. Ferrita Cementita Perlita Austenita | David González García - Academia.edu“, 1.11.2023.
- [8] Smokvina Hanza Sunčana: Doktorska disertacija „Matematičko modeliranje i računalna simulacija mikrostrukturnih pretvorbi i mehaničkih svojstava prilikom gašenja čelika“, 2011.
- [9] S interneta: Obrada-i-montaža\_Toplinska-obrada-Popuštanje-i-poboljšavanje\_1-razred.ppsx (live.com)
- [10] Race J., Scott L.: „Practical experience in the austempering of ductile iron (Heat treatment of metals)“, SAD, 1994
- [11] S interneta, [https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file\\_attach/Materijali%20II%20-%20Igor%20Gabri%C4%87%2C%20Slaven%20%C5%A0iti%C4%87.pdf](https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file_attach/Materijali%20II%20-%20Igor%20Gabri%C4%87%2C%20Slaven%20%C5%A0iti%C4%87.pdf), 1.11.2023.
- [12] Romeo Deželić, Metali 2, Sveučilište u Splitu, FESB, 1987.
- [13] S interneta, <https://repository.riteh.uniri.hr/>, 1.11.2023.
- [14] Mjerna tehnika, skripta Riteh
- [15] „Tempering Diagrams of Steels - 42CrMo4 Steel“, s interneta, <https://www.steeldata.info/tempering/demo/data/22.html>, 1.11.2023.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Dijagram toplinske obrade [1].....	3
Slika 3.1. Mikrostrukture čelika ovisno o postotku ugljika i temperature zagrijavanja [2] .....	4
Slika 3.2. Feritna mikrostruktura [3].....	5
Slika 3.3. Austenitna mikrostruktura [4].....	6
Slika 3.4. Perlitna mikrostruktura [5].....	6
Slika 3.5. Cementitna mikrostruktura [5] .....	7
Slika 3.6. Martenzitna mikrostruktura [5] .....	8
Slika 3.7. Bainitna mikrostruktura [5].....	8
Slika 3.8. Ledeburitna mikrostruktura [5] .....	9
Slika 4.1. Fe-Fe <sub>3</sub> C dijagram [6].....	10
Slika 4.2. Mikrostruktura austenita [7].....	11
Slika 4.3. Dijagram perlitne pretvorbe u Fe-Fe <sub>3</sub> dijagramu [8] .....	12
Slika 4.4. Mikrostruktura martenzita [8] .....	13
Slika 4.5. Gornji i donji bainit [8] .....	14



Slika 5.1. Dijagram poboljšavanja čelika [6].....	15
Slika 5.2. Dijagram klasičnog poboljšavanja [11] .....	16
Slika 5.3. Dijagram izotermičkog poboljšavanja [6].....	17
Slika 5.4. Temperature popuštanja [12].....	19
Slika 5.5. Ispitivanje prokaljivosti po Jominyju [11] .....	21
Slika 5.6. Pojavljivanje pukotina prilikom hlađenja [12].....	22
Slika 6.1. Konstrukcija TTT-dijagrama [11].....	24
Slika 6.2. Izotermički TTT dijagram [11].....	26
Slika 6.3. Kontinuirani TTT- dijagram [11].....	28
Slika 6.4. Pomicanje linije pretvorbe TTT- dijagrama pri prijelazu s izotermičkog na kontinuirano hlađenje [11] .....	29
Slika 7.1. Dijamantni stožac i kuglica od kaljenog čelika [13].....	31
Slika 7.2. Princip mjerenja tvrdoće po Brinellu [13] .....	32
Slika 7.3. Otisak na materijalu [13].....	33
Slika 7.4. Princip mjerenja po Vickersu [13].....	34
Slika 8.1. Ugrijavanje s obzirom na $C_{ekv}$ [6].....	36
Slika 8.2. Karakteristična dimenzija „s“ za neki obradak prema /1.3/ [6].....	38

Slika 9.1. Nacrt strojnog dijela JI.23 – ST.18 .....	42
Slika 9.2. Očitavanje vremena grijanja u zavisnosti od „s · k“ [6].....	45
Slika 9.3. Dijagram ovisnosti mehaničkih svojstava o temperaturi popuštanja za čelik 42CrMo4 [14] .....	47
Slika 9.4. Postupak poboljšanja zadanog strojnog dijela.....	48
Slika 9.5. Peć modela „OVER“ .....	51
Slika 9.6. Strojni dio unutar peći modela „OVER“.....	52
Slika 9.7. Uređaj za mjerenje tvrdoće (HRC) .....	53

## POPIS TABLICA

Tablica 7.1. Mohsova skala [13] .....	30
Tablica 8.1. Koeficijent oblika „k“ [6] .....	37
Tablica 9.1. Kemijski sastav čelika JI.23 – ST.18.....	43
Tablica 9.2. Karakteristična dimenzija „s“ i koeficijent „k“ za neke obratke.....	45
Tablica 9.3. Odnos tvrdoće i vlačne čvrstoće.....	46
Tablica 9.4. Operacijski list kaljenja .....	49
Tablica 9.5. Operacijski list popuštanja.....	50

## POPIS OZNAKA

$\vartheta$  – temperatura toplinske obrade, °C

$C$  – koncentracija ugljika, %C

$A_1$  - 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

$v_{krt}$  - gornja kritična brzina gašenja, °C / s

$t_A$  – temperatura austenitizacije, °C

$\tau_{min}$  – minimalno trajanje inkubacije pothlađenog austenita, s

$t_i$  – temperatura na kojoj je trajanje inkubacije pothlađenog austenita najkraća, °C

HV – tvrdoća po Vickersu

HRC – tvrdoća po Rockwellu

HB – tvrdoća po Brinellu

$K$  – koeficijent oblika

$s$  - dimenziju najvišeg toplinskog toka, mm

$t_{gr}$  – vrijeme grijanja, min

$t_d$  – vrijeme izotermičkog držanja, min

$m$  – značajka medija za ugrijavanje, a ovisi o vrsti medija (solna kupka, zrak)

$K_1$  – koeficijent specifičnog vremena progrijavanja za kratke obratke, min/cm

$K_2$  – koeficijent specifičnog vremena progrijavanja za dugačke obratke, s/mm

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

$K_f$  – kriterij forme za kratke obratke

$K_k, \beta$  – koeficijent konfiguracije

$D, d$  – promjer ili debljina obratka, mm

$H$  – duljina obratka

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

$\rho$  – gustoća, kg/m<sup>3</sup>

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

$\varepsilon$  – koeficijent usporenja ugrijavanja

$x$  – dimenzija presjeka progrijavanja, m

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

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

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

$\vartheta_{zavr}$  – završena temperatura, °C

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U ovome radu smo se bavili temom toplinske obrade, gdje smo teorijski dio potkrijepili praktičnim. Točnije poboljšanjem strojnog dijela JI.23 – ST.18.

U prvome dijelu teorijski je obrađena promjena mikrostrukture čelika, faze pretvorbe čelika, poboljšanje čelika te mjerenje tvrdoće.

Dok drugi dio završnog rada predstavlja poboljšanje čelika pomoću toplinske obrade.

**Ključne riječi:** toplinska obrada, čelik 42CrMo4, strojni dio JI.23 – ST.18, poboljšanje, TTT dijagram, tvrdoća

## SUMMARY AND KEY WORDS

In this paper we dealt with the topic of heat treatment, where we supported the theoretical part with practical. More precisely by improving the machine part JI.23 – ST.18.

The first part theoretically deals with the change in the microstructure of steel, the phase of steel conversion, improvement of steel and hardness measurement.

While the second part of the final work is the improvement of steel using heat treatment.

**Key Words:** heat treatment, steel 42CrMo4, machine part JI.23 – ST.18, improvement, TTT diagram, hardness