

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Stručni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA

OZ.24-ST.74

Rijeka, rujan 2024.

Nikola Vučić

0069076259

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Stručni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA

OZ.24-ST.74

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

Rijeka, rujan 2024.

Nikola Vučić

0069076259

Rijeka, 15.03.2024.

Zavod: Zavod za inženjerstvo materijala
Predmet: Materijali

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Nikola Vučić (0069076259)**
Studij: Stručni prijediplomski studij strojarstva (1050)

Zadatak: **Postupak toplinske obrade strojnog dijela OZ.24-ST.74 / Heat treating process of workpiece OZ.24-ST.74**

Opis zadatka:

Potrebno je proanalizirati proces toplinske obrade strojnog dijela OZ.24-ST.74. 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 OZ.24-ST.74. Potrebno je verificirati definirani proces toplinske obrade, proanalizirati rezultate toplinske obrade i donijeti odgovarajuće zaključke.

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

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

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

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:
izv. prof. dr. sc. Samir Žic

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno te da sam se tijekom pisanja i izrade koristio navedenom literaturom i savjetima mentora izv. prof. dr. sc. Daria Iljkića.

ZAHVALA

Ovim putem želim se zahvaliti izv. prof. dr. sc. Dariu Iljkiću na kolegijalnosti i susretljivosti prilikom izrade završnog rada.

SADRŽAJ

1. UVOD	8
2. OSNOVE TOPLINSKE OBRADJE ČELIKA.....	9
2.1. Vrste toplinske obrade.....	10
2.1.1. Žarenje prekrizacijom.....	10
2.1.2. Žarenje bez prekrizacije.....	11
2.1.3. Gašenje	11
2.1.4. Ugrijavanje gašene strukture	11
2.1.5. Toplinsko-kemijska obrada	12
3. FAZNE PRETVORBE ČELIKA	13
3.1. Dijagram ravnotežnih stanja legura.....	14
3.2. Nastajanje austenita.....	15
3.3. Raspad austenita	17
3.3.1. Raspad austenita u perlit	18
3.3.2. Raspad austenita u martenzit.....	19
3.3.3. Raspad austenita u bainit.....	21
4. TTT DIJAGRAM.....	25
5. POBOLJŠAVANJE ČELIKA.....	29
5.1. Kaljenje	30
5.2. Popuštanje čelika.....	36
5.3. Klasično poboljšavanje	37
5.4. Izotermičko poboljšavanje	39
5.5. Čelici za poboljšavanje.....	40
5.5.1. Nelegirani čelici za poboljšavanje.....	41
5.5.2. Legirani čelici za poboljšavanje.....	41
6. POBOLJŠAVANJE STROJNOG DIJELA OZ.24 – ST.74	42
6.1. Probno poboljšavanje	48
7. ZAKLJUČAK	50

LITERATURA.....	51
POPIS SLIKA.....	52
POPIS TABLICA.....	54
SAŽETAK.....	55
ABSTRACT.....	56
PRILOZI.....	57

1. UVOD

Čelik je legura primarno sastavljena od željeza i ugljika te ostalih elemenata. Zbog njegove velike tvrdoće, čvrstoće, elastičnosti i žilavosti te mehaničke obrade i mogućnosti lijevanja ubrajamo ga u najzastupljenije materijale. Čelik možemo podijeliti na niskougljični, srednjeugljični te visokougljični, a sama podjela ovisi o zastupljenosti ugljika. Toplinska obrada je jedan od načina obrađivanja čelika sa svrhom mijenjanja njegove mikrostrukture shodno tome i mijenjanja njegovih svojstava.

Ovim završnim radom bit će obuhvaćena toplinska obrada strojnog dijela OZ.24-ST.74 gdje je detaljnije opisana predložena metoda toplinske obrade poboljšavanjem. Navedena metoda je postupak toplinske obrade koji obuhvaća dva osnovna postupka, kaljenje i visokotemperaturno popuštanje. Zbog sadržaja ugljika od 0,25% do 0,6% čelici za poboljšavanje pripadaju kategoriji srednjeugljičnih čelika.

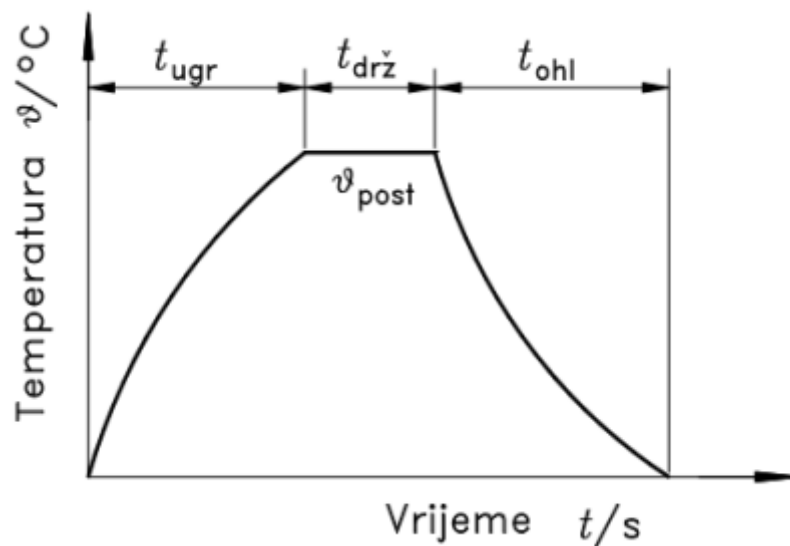
Teorijski dio završnog rada obuhvatiti će osnove toplinske obrade, a radi lakšeg razumijevanja detaljnije će biti objašnjene fazne pretvorbe, kao i TTT-dijagram i osnove o tvorbi te raspadu austenita. Dok će praktičnim dijelom biti obuhvaćen postupak poboljšavanja na zadanom strojnom dijelu.

Toplinska obrada je postupak zagrijavanja materijala do definirane temperature, držanja i hlađenja određenom brzinom ovisnom o sredstvu, pri čemu se mijenja struktura materijala, a time i kemijska, fizikalna i mehanička svojstva. Najčešći razlozi toplinske obrade čelika su očvršćivanje, povećanje žilavosti i duktilnosti te mogućnosti preoblikovanja.

2. OSNOVE TOPLINSKE OBRADJE ČELIKA

Sve pretvorbe u slitinama proučavaju se na temelju dijagrama stanja, pod pretpostavkom da mogu završiti u temperaturnom intervalu koji je određen dijagramom stanja. Dijagram stanja predstavlja faze i strukture za stanje potpune ravnoteže. U većoj mjeri svojstva slitina su uglavnom ovisna o procesima pretvorbe te je procesom toplinske obrade cilj dobiti tražene uvjete metala ili slitine na način da se zagrijavanjem dođe do određene temperature i naposljetku ohladi. Na osnovu toga sve pretvorbe završavaju u određenom vremenu pri promjeni temperature, tako da su temperatura i vrijeme osnovni parametri koji se javljaju. Postupci toplinske obrade prikazuju se dijagramom $\vartheta-t$ (Slika 2.1.), opisuje odnos temperature i vremena [1].

- ϑ_{post} – temperatura žarenja, °C
- t_{zar} – vrijeme žarenja na maksimalnoj temperaturi, s
- t_{zagr} – vrijeme zagrijavanja, s
- t_{ohl} – vrijeme ohlađivanja, s



Slika 2.1. Shema dijagrama toplinske obrade [3]

Na ordinatu se unosi vrijednost temperature, a na apscisu vrijednost vremena. Proporcionalno brzini ohlađivanja ili zagrijavanja nanosi se raspodjela na apscisi u jedinici vremena. Ukoliko bi dijagram toplinske obrade u potpunosti bio definiran sa četiri navedena parametra tada bi zagrijavanje i ohlađivanje bilo linearno. Međutim, to nije tako pa je u pojedinim slučajevima potrebno dodatno definirati promjenu temperature u vremenu, kako bi bolje definirali krivulje ohlađivanja i zagrijavanja. Kada krivulja zagrijavanja i ohlađivanja nije ravna linija, tada se brzina zagrijavanja i ohlađivanja mijenja sa temperaturom te stvarnu brzinu izražavamo derivacijom opisanom izrazom 2.1. [2]:

$$v_{\text{stvarna}} = \frac{dt}{d\tau} \quad (2.1.)$$

2.1. Vrste toplinske obrade

Toplinska obrada predstavlja otklon dijagrama stanja, to jest slitina se može približavati ili udaljavati od stabilnog stanja. Držanjem slitine na konstantnim temperaturama ili sporim promjenama temperatura približavamo se stabilnom stanju, dok naglim hlađenjem slitina se udaljava od stanja stabilnosti. Temeljem strukturnih promjena i promjena svojstava izdvojiti će se sljedeći postupci: žarenje s prekrizacijom, žarenje bez prekrizacije, gašenje, ugrijavanje gašene strukture i toplinsko-kemijska obrada [3].

2.1.1. Žarenje prekrizacijom

Slitina se ugrijava iznad temperature pretvorbi, odnosno iznad temperature nastajanja promjene topljivosti ili alotropske pretvorbe, to jest pretvorbe kemijskog elementa iz primarne kristalne strukture u sekundarnu uslijed promjene temperature ili tlaka. Kasnijim ohlađivanjem ne smije se udaljiti od stabilnog stanja. Ovim tipom obrade slitinu približavamo stabilnom stanju. Osnovne vrste žarenja prekrizacijom su:

- Homogenizacijsko žarenje – dovodi do ujednačavanja razdiobe elemenata u strukturi
- Normalizacijsko žarenje – dovodi do ujednačavanja mikrostrukture, odnosno ujednačava se oblik i veličina kristalnih zrna te raspodjela mikrokonstituenata [2]

2.1.2. Žarenje bez prekrystalizacije

Kod ovog tipa žarenja slitina se zagrijava ispod temperature prekrystalizacije te se slitina približava stabilnom stanju. Vrste žarenja bez prekrystalizacije su:

- Stabilizacijsko žarenje – dolazi do ubrzavanja spontanijih procesa u slitini koje se nalaze u ravnoteži čijim bi se naknadnim odvijanjem kroz duži vremenski period promijenila dimenzija ili oblika strojnog dijela
- Rekrystalizacijsko žarenje – ovim tipom žarenja deformirana se zrna nakon hladne deformacije ponovno prevode u poligonalni oblik te se dovodi u stanje bolje oblikovljivosti, dok kod povećanog stupnja hladne deformacije, deformacija kristalnih zrna teži plastičnoj deformaciji
- Žarenje za smanjenje vlastitih, zaostalijih naprežanja – dugotrajnim držanjem strojnog dijela na sobnoj temperaturi, elastičnim vibracijama, ali i žarenjem pri povoljnim temperaturama umanjuju se zaostala naprežanja [3]

2.1.3. Gašenje

Gašenje se sastoji od brzog ohlađivanja slitina sa višijih temperatura nego šta su temperature pretvorbe kojima se onemogućuju ravnotežne pretvorbe u procesu hlađenja. Ovom obradom udaljujemo se od stabilnog stanja. Koristimo se dvjema osnovnim vrstama gašenja:

- Kaljenje – transformacija mikrostruktura u novu neravnotežnu mikrostrukturu
- Zadržavanje – učvršćivanje visokotemperaturne strukture na nižijim temperaturama [2]

2.1.4. Ugrijavanje gašene strukture

Naknadnim ugrijavanjem nakon gašenja postiže se stabilnije stanje za razliku od samog gašenja. Susrećemo se sa dvije temeljne vrste:

- Dozrijevanje – pri precipitacijskom žarenju dolazi do izdvajanja nakupina. to jest precipitata iz prezasićene pothlađene visokotemperaturne faze
- Popuštanje – postupak kojim postižemo djelomičnu ili potpunu promjenu mikrostrukture dobivene kaljenjem [3]

2.1.5. Toplinsko-kemijska obrada

Toplinsko-kemijska obrada sastoji se od ugrijavanja slitine u sredinama sa povišenim potencijalom difundirajućih elemenata. Difuzijom atoma sa okoline na slitinu približavamo se stabilnom stanju. Navedenim tipom obrade mijenja se mikrostruktura i kemijski sastav površine strojnog dijela [2].

Postupci toplinsko – kemijske obrade čelika su:

- Nitiranje – postupak kojim dušik difundira u površinske slojeve
- Cementiranje – postupak kojim se povećava sadržaj ugljika površinskog sloja, strojni dijelovi imaju tvrde površinske slojeve i meku jezgru nakon cementiranja
- Karbonitriranje – postupak kojim dušik i ugljik difundiraju u površinske slojeve obratka [3]

3. FAZNE PRETVORBE ČELIKA

Tvar teži stanju minimalne slobodne energije te slobodna energija slitine na definiranom tlaku i temperaturi ovisi o veličini i obliku kristalnih zrna stanju naprezanja, količini nesavršenosti kristala i sastavu mikrostrukture. Zanimarimo li čimbenike koji utječu na veličinu slobodne energije, dolazimo do pretpostavke da će slitina određenog sastava kod određene temperature transformirati u strukturu minimalne slobodne energije. Pretvorbe u slitinama ostvaruju se pri konstantnom volumenu, stoga slobodnu energiju sa dovoljnom točnošću možemo izraziti pomoću Helmholtzove slobodne energije (3.1.):

$$F = U - TS \quad (3.1.)$$

gdje je:

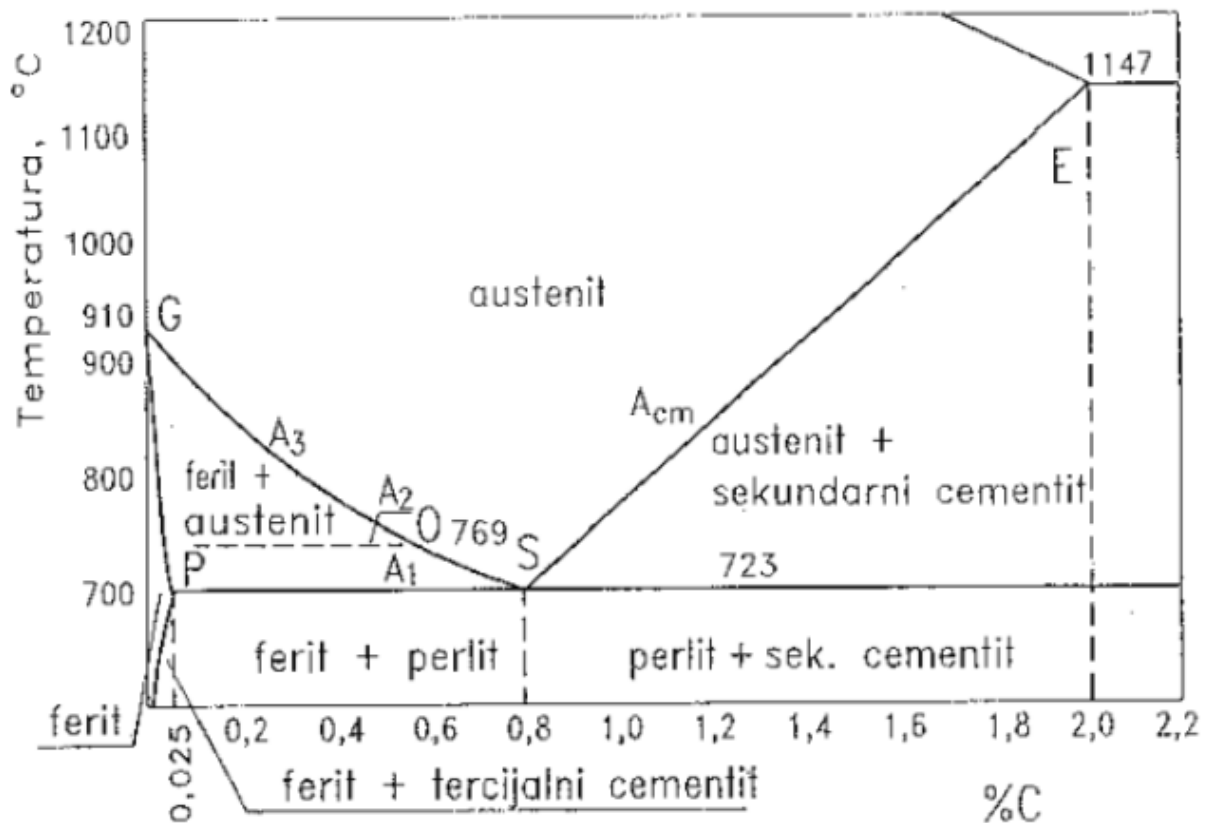
- F – slobodna energija, J
- U – unutarnja energija, J
- T – temperatura, K
- S – entropija, J/K

Analiza toplinske obrade čelika temelji se na Fe-Fe₃C dijagramu stanja. Navedenim dijagramom prikazana su nam karakteristična fazna područja, kritične temperature prekrystalizacije u ravnotežnim uvjetima odgovaraju sporom ugrijavanju ili ohlađivanju čelika. Strukture čelika koje odgovaraju Fe-Fe₃C ravnotežnom dijagramu su perlit, ferit, sekundarni cementit te iznad kritične temperature, austenit [3].

Susrećemo se sa četiri osnovne pretvorbe od kojih je pretvorba perlita u austenit prva te redom pretvorba autenita u perlit, austenita u martenzit i naposljetku pretvorba martenzita u perlit [1].

3.1. Dijagram ravnotežnih stanja legura

Pod uvjetom da je odgovarajući dijagram stanja osnova prilikom promatranja toplinske obrade slitina kod izučavanja toplinske obrade čelika osnova je dijagram stanja željezo-ugljik. Ako se razrađuju pitanja toplinske obrade čelika za naša očitovanja proučavamo dio dijagrama do koncentracije 2% ugljika (C) prikazan slikom 3.1.



Slika 3.1. Dio faznog Fe-Fe₃C dijagrama [3]

Na priloženoj slici sadržaj ugljika približno je zadan u donjem dijelu dijagrama. Crtkana linija označava magnetnu pretvorbu faze α (na 769°C) jer magnetnu pretvorbu ne svrstavamo u fazne pretvorbe. Rastvorljivost ugljika u feritu mijenja se temperaturom stoga moramo imati tercijalni cementit u svim slitinama, osim u slitinama manjim od 0,01% C. Na sobnoj temperaturi ferit uopće ne rastvara ugljik dok kod temperature od 720°C maksimalno rastvara 0,018% C. Dodatno ćemo protumačiti i kritične točke označene slovom A. Donja kritična točka A₁ označava pretvorbu austenit I u perlit, nalazi se na liniji P-S-K dok nam oznaka A₃ predstavlja gornju kritičnu točku. Ona nam pokazuje temperaturu početka izlučivanja ili kraja rastvaranja ferita, to jest cementita. Točkom A₂ definirana je magnetna pretvorba željeza.

Kako bi se razlikovala točka ohlađivanja i točka zagrijavanja stavljamo indeks „r“ i za ohlađivanje te za zagrijavanje indeks „c“. Na temelju navedenog dana su pojašnjenja oznaka kritičnih točaka:

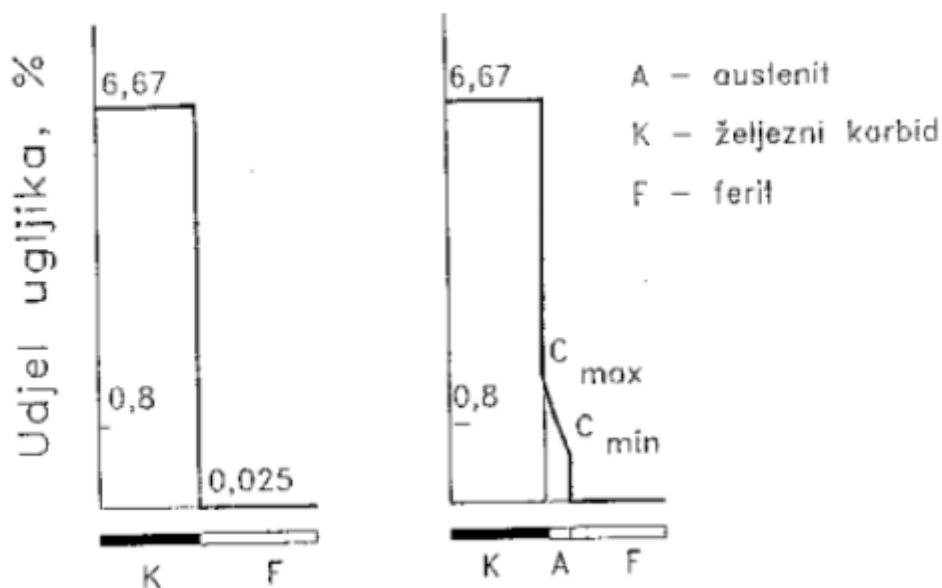
- A_{r1} – pretvorba austenita u perlit
- A_{c1} – pretvorba perlita u austenit
- A_{r3} – početak izlučivanja ferita u austenit
- A_{c3} – kraj rastvaranja ferita u austenit [1]

3.2. Nastajanje austenita

Zagrijavanjem podeutektoidnog čelika, čija se struktura sastoji od ferita i cementita dostizanjem temperature 727°C dolazi do izmjene kristalne rešetke željeza α u γ rešetku. Do temperature završetka transformacije obje strukture će se pretvoriti u austenit. Austenit predstavlja čvrst rastvor ugljika u željezu γ . Površinski centrirana kubna rešetka ima veću rastvorivost stoga najveći sadržaj ugljika se događa pri temperaturi 1147°C . Težinski iznosi 2,14% na atomskoj razini iznosi oko 5%. U središtu plošno centriranog kuba smješten je atom ugljika, dok su sredine bridova slobodne. Većom koncentracijom ugljika u austenitu raste parametar rešetke. Praznine u rešetki austenita popunjavaju vodik, kisik, dušik i bor. Ostali elementi rastvaraju se u austenitu tako da promijene položaj sa atomima željeza [1].

Prilikom pretvorbe austenita dvije faze (ferit i cementit) difuzijom prelaze u treću fazu u trenu kada se ostvare termodinamički i kinetički uvjeti potrebni za tvorbu austenita, to jest kada je slobodna energija austenita puno manja od energije feritno-karbidne smjese i ima dovoljno vremena da nastane austenit.

Na granici feritne i cementitne faze najjednostavnije dolazi do nastanka austenita, zato što austenit ima minimalnu slobodnu energiju u području kritične veličine. Na slici 3.2. prikazana je raspodjela ugljika u procesu nastajanja austenita.



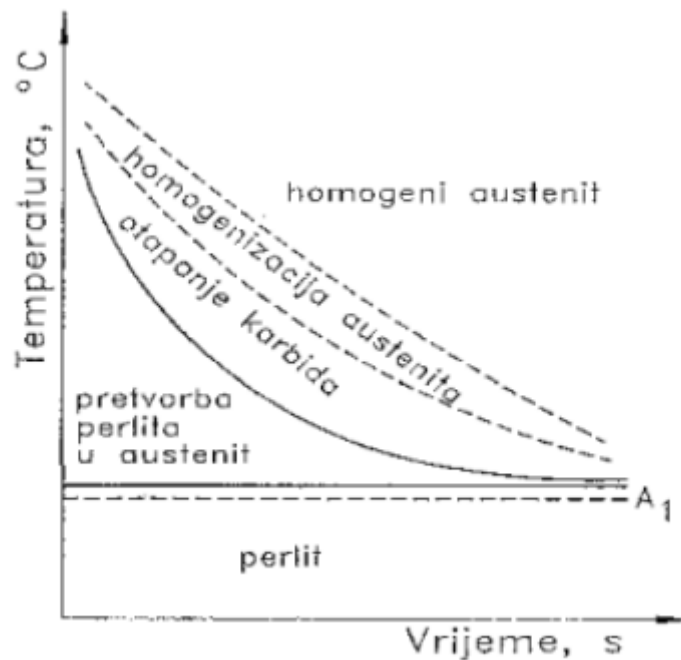
Slika 3.2. Raspodjela ugljika u mikrostrukturnim fazama pri tvorbi austenita [2]

Na slici 3.1. koja nam prikazuje dijagram stanja Fe-Fe₃C možemo vidjeti maksimalnu koncentraciju ugljika u austenitu (C_{max}) koja se nalazi na području austenita sa karbidnom fazom te nam je prikazana linijom između točaka S i E, dok je minimalna koncentracija ugljika (C_{min}) na granici austenita sa feritnom fazom te odgovara liniji među točkama G i S.

Povišenjem temperature smanjujemo vremenski period pretvorbe austenita. Tvorba homogenog austenita sadržava:

- Pretvorbu perlita u austenit
- Otapanje karbida
- Homogenizaciju austenita

Izotermička pretvorba austenita prikazana je slikom 3.3.

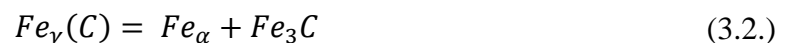


Slika 3.3. Izotermička tvorba austenita [3]

Nagli rast austenitnog zrna nastaje kada dođe do prekida djelovanja prepreka koje su do tada onemogućavale rast zrna. Čelik sa finom mikrostrukturom ima bolja mehanička svojstva od čelika sa grubom mikrostrukturom [3].

3.3. Raspad austenita

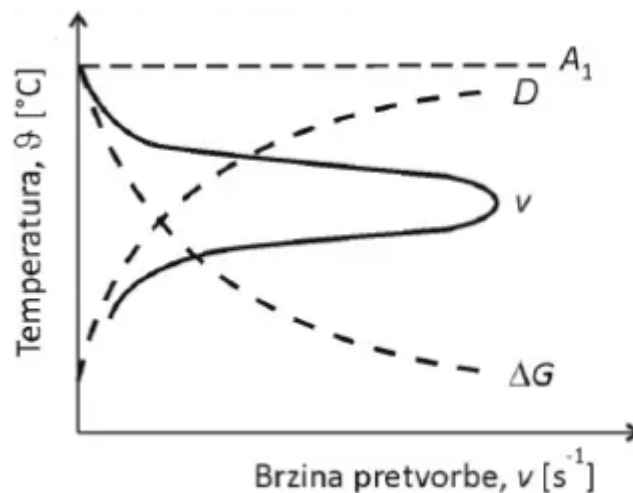
Ispod točke A_1 feritno-karbidna smjesa je termodinamički stabilnija od austenita te dolazi do njegovog raspada. Reakciju pretvorbe može se prikazati izrazom 3.2.



Austenit se raspada u α željezo, koje ne sadrži ugljik i cementit sadržaja 6,7% ugljika. Rezultat je raspad jednofazne strukture u dvofaznu. Svaka faza se razlikuje s obzirom na ugljični sadržaj [1].

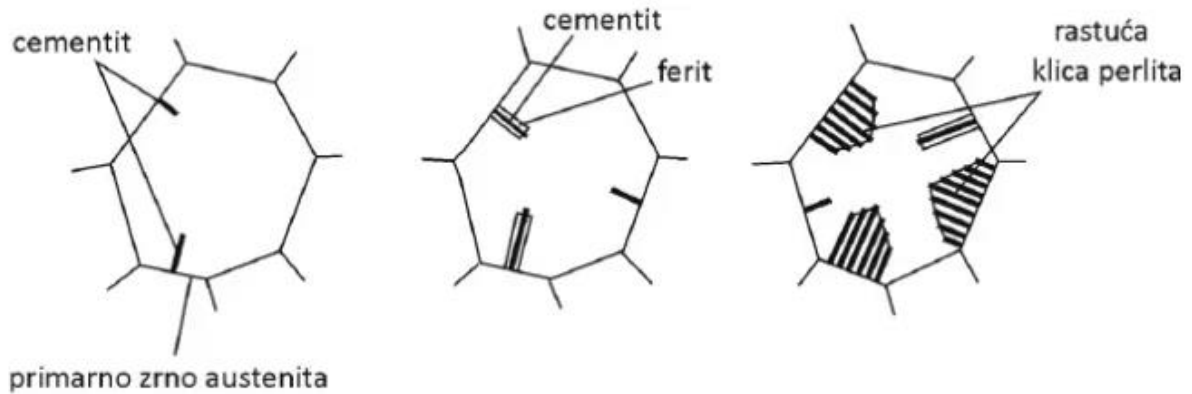
3.3.1. Raspad austenita u perlit

Perlit je eutektoidna smjesa koja se sastoji od eutektoidnih kristalnih zrna cementita i ferita. Formira se iz austenita pri sporom hlađenju na temperaturi nižoj od kritične temperature A_1 , uz potpunu difuziju nemetalnih i metalnih atoma. Za ostvarenje perlitne pretvorbe moraju biti zadovoljena dva uvjeta: velika razlika između slobodnih energija austenita i perlita, ΔG te dovoljna difuzija atoma, D . Na slici 3.4. vidljiv je utjecaj temperature na brzinu perlitne pretvorbe.



Slika 3.4. Utjecaj temperature na srednju brzinu perlitne pretvorbe [2]

Pri temperaturi A_1 ne postoji razlika slobodnih energija perlita i austenita. Ispod temperature $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ povećana je razlika slobodnih energija te se smanjuje i difuzija koja je potrebna za raspad austenita. Na temperaturama pretvorbe određenim područjem između temperatura A_1 i područja perlita počinje pojava klica cementita. Klince se formiraju na granicama zrna austenita te radijalno rastu dok se ne sudare sa obližnjim perlitnim zrnima. Na slici 3.5. shematski je prikazana perlitna pretvorba.



Slika 3.5. Shematski prikaz perlitne pretvorbe [2]

Temperatura transformacije bitan je faktor o kojem ovisi međulamelarni razmak perlita. Međulamelarni razmak obrnuto je proporcionalan pothlađenju ispod temperature A_1 . Na temperaturama neposredno ispod eutektoidne dolazi do stvaranja mekog grubolamelarnog perlita, dok se na najnižim temperaturama perlitnog stupnja formira finolamelarni, čvršći i tvrdi perlit čije su lamele vidjive uporabom elektronskog mikroskopa.

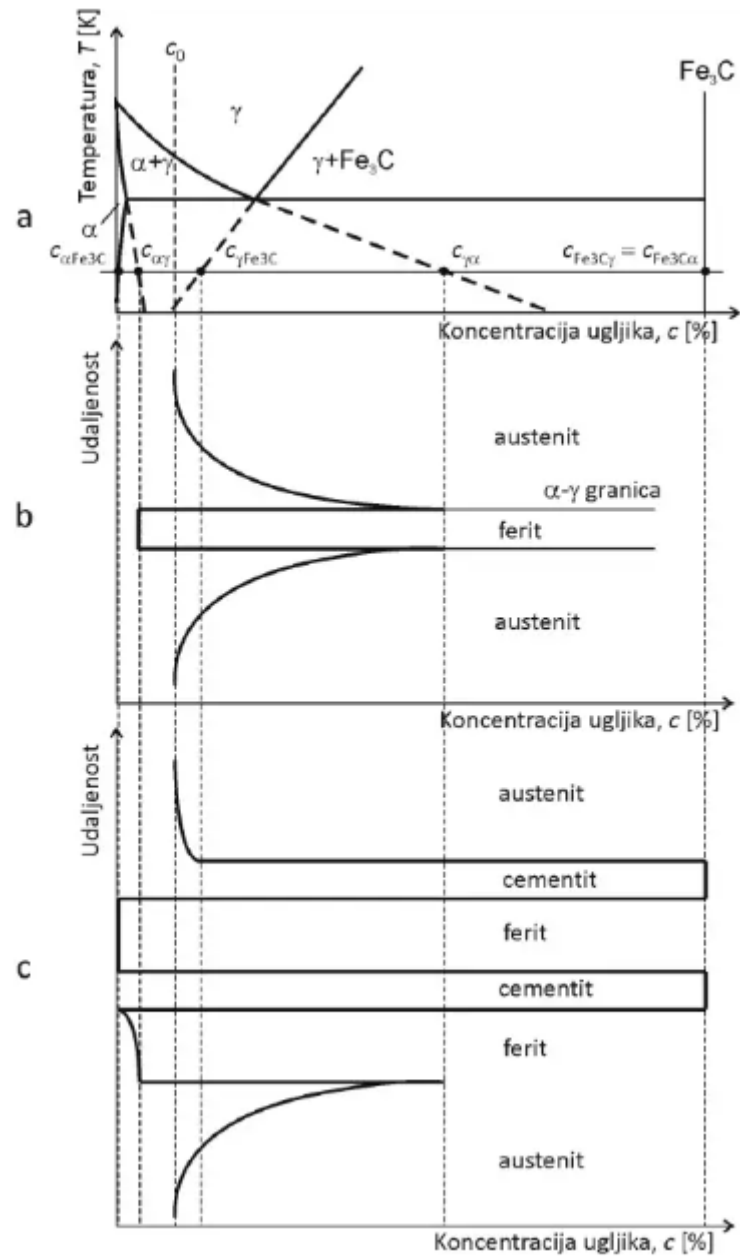
Na primjeru podeutektoidnog čelika, prikazanog slikom 3.6a evidentan je postupak određivanja karakterističnih koncentracija faza pri perlitnoj pretvorbi, dok se na slikama 3.6b i 3.6c prikazani profili koncentracija prilikom raspada austenita [1, 7].

3.3.2. Raspad austenita u martenzit

Za razliku od drugih produkata raspada austenita, martenzit nastaje trenutno, kada se ohlađivanjem postigne temperatura niža od temperature M_s , koja označava početak martenzitne pretvorbe. Kraj martenzitne pretvorbe definiran je temperaturom završetka martenzitne pretvorbe M_f , prilikom ohlađivanja. Koncentracija ugljika martenzita identična je koncentraciji primarnog austenita.

Mehanizam bezdifuzijske martenzitne pretvorbe temelji se na smicanju: atomi austenita pomiču se unutar rešetke uzduž karakterističnih pravaca kako bi zauzeli položaj martenzitne rešetke.

Struktura martenzita ima karakterističan igličast oblik. Javlja se na granicama austenitnih zrna te napreduje prema kristalnom zrnu austenita. Rast se zaustavlja kada iglica martenzita naiđe na zrno austenita ili drugu iglicu. Slikom 3.7. prikazan je rast martenzitne iglice.



Slika 3.6. a) koncentracije faza pri perlitnoj pretvorbi; b) profil koncentracija faza pri izlučivanju proeutektoidnog ferita; c) profil koncentracija faza pri eutektoidnoj pretvorbi [7]



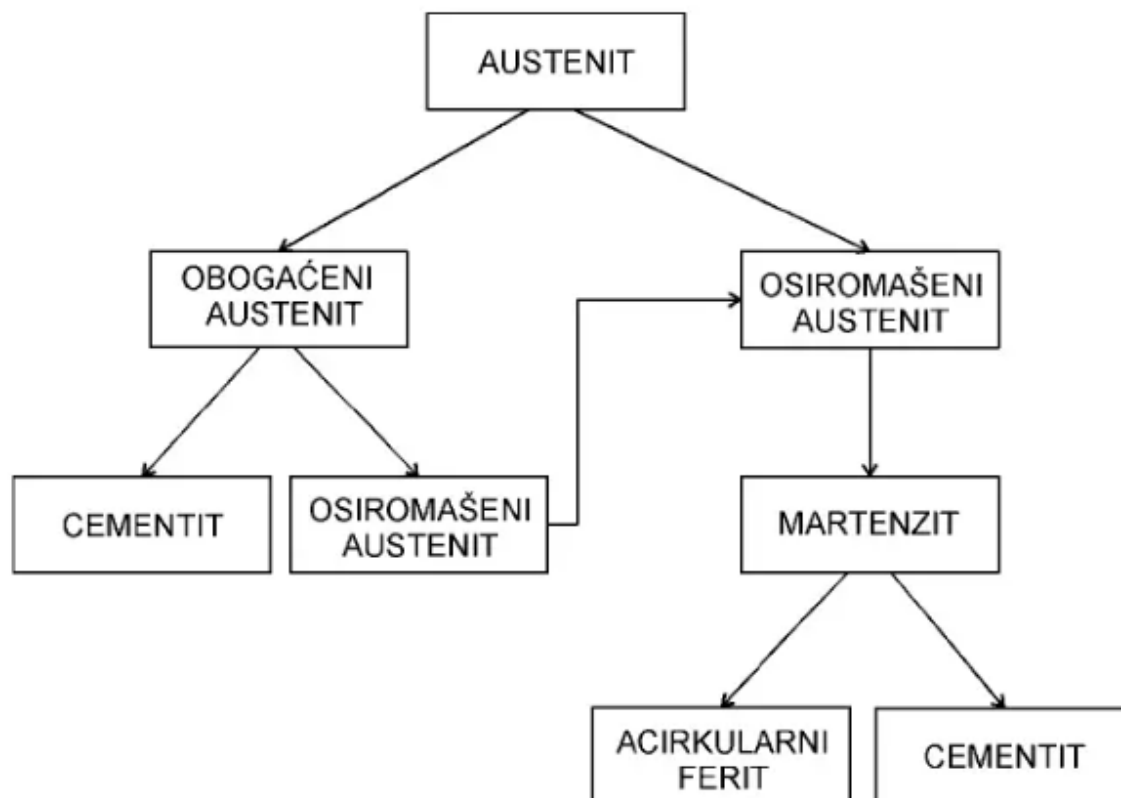
Slika 3.7. Rast iglica martenzita [3]

Zaostali austenit javlja se unutar martenzitnih iglica. Veća količina zaostalog austenita u martenzitnoj strukturi nije poželjna, osobito ako je zaostali austenit prisutan kao zasebna faza. Porastom koncentracije ugljika u primarnom austenitu dolazi do porasta količine zaostalog austenita u mikrostrukturi [1, 7].

3.3.3. Raspad austenita u bainit

Ispod temperatura 450-500°C, a iznad temperatura 200-250°C nalazi se bainitna pretvorba. Difuzija intersticijskih atoma ugljika ima značajan utjecaj na brzinu raspada austenita u bainit. Bainit je fino raspoređena mješavina ferita i cementita.

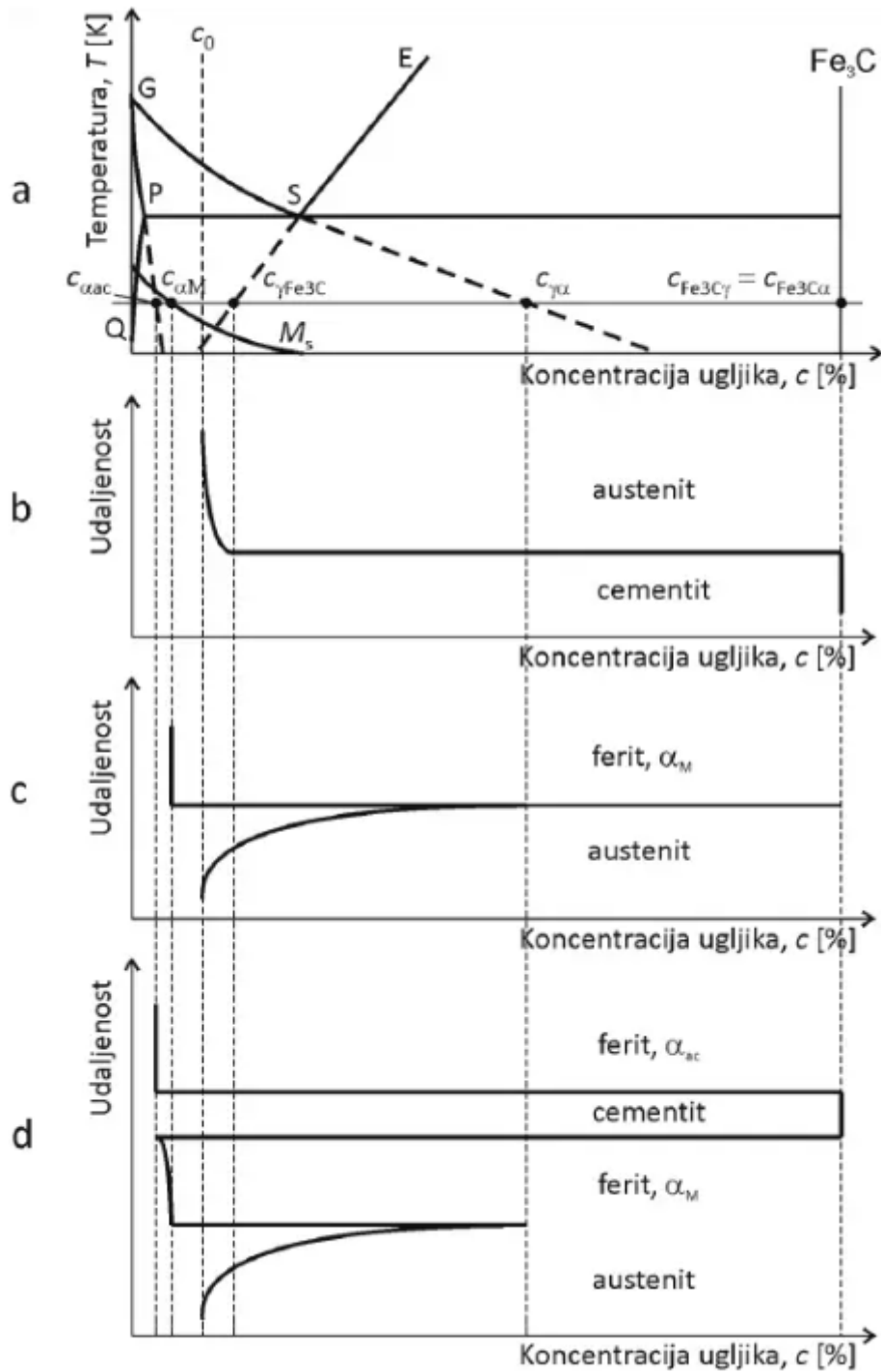
Na slici 3.8. prikazana je shematski bainitna pretvorba koja počinje preraspodjelom ugljika unutar pothlađenog austenita, što rezultira stvaranjem područja niske i visoke koncentracije ugljika unutar austenita.



Slika 3.8. Shematski prikaz bainitne pretvorbe [7]

Na slici 3.9a vidljive su karakteristične koncentracije faza bainitne pretvorbe. Po G – P liniji očitava se koncentracija acirkularnog ferita, dok koncentracija austenita na granici sa cementitom i feritom očitava se po E – S, odnosno G – S liniji. Koncentracija prezasićenog ferita određuje se prema M_s krivulji koja označava početak pretvorbe martenzita.

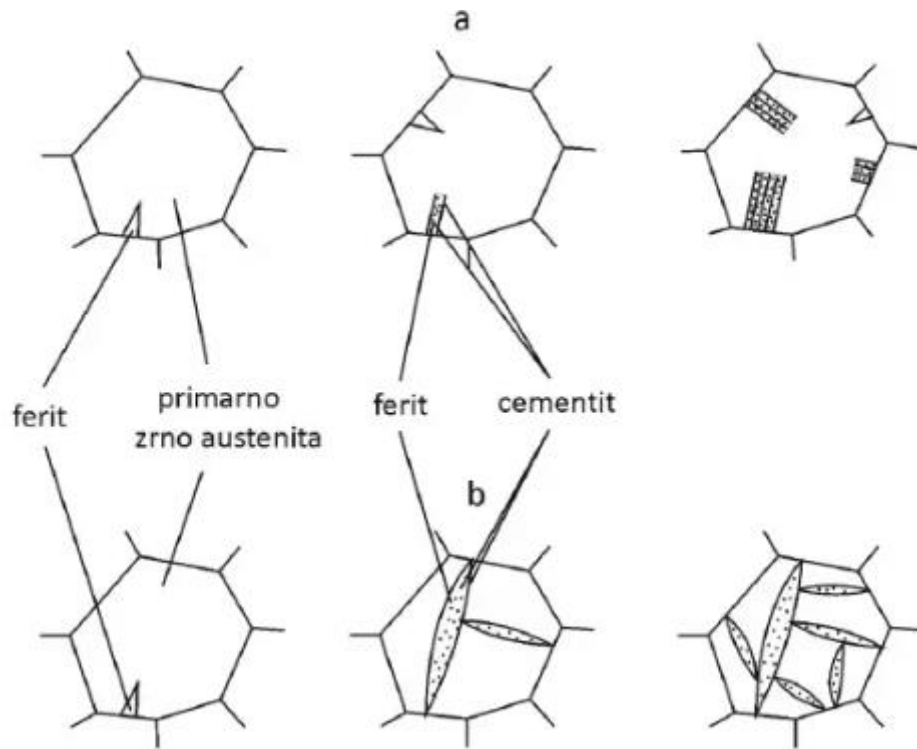
Profili koncentracija faza bainitne pretvorbe prikazana su na slikama 3.9b i 3.9c.



Slika 3.9. a) karakteristične koncentracijefaza pri bainitnoj pretvorbi; b, c, d) profili koncentracija faza [7]

Mehanizam bainitne transformacije mijenja se promjenom temperature. Na višim temperaturama područja bainita dolazi do intenziviranja difuzijskih procesa, što rezultira nastankom gornjeg bainita. Nasuprot tome, pri nižim temperaturama nastaje donji bainit uslijed intenzivnijeg bezdifuzijskog procesa.

Shematski prikaz pretvorbe austenita u bainit prikazan je slikom 3.10. Mogu se primijetiti razlike mikrostrukture donjeg i gornjeg bainita. Pločice ferita donjeg i gornjeg bainita razlikuju se po širini. Mikrostruktura donjeg bainita gotovo je identična kao mikrostruktura martenzita.



Slika 3.10. Shematski prikaz nastanka: a) gornjeg bainita, b) donjeg bainita [7]

Bainitna pretvorba se ne odvija do kraja, to je njena karakteristika. To jest, bainitna pretvorba započinje na temperaturi, B_s nižoj od temperature metastabilne ravnoteže austenita i ferita, T_0 . Budući da se austenit obogaćuje ugljikom, vrijednost temperature opada te u trenu kada se postigne koncentracija $B_s=T_0$ prestaje bainitna pretvorba. Iz toga se može zaključiti da stupanj bainitne pretvorbe ovisi o temperaturi: na višim temperaturama stvara se manje bainita, a ostaje više zaostalog austenita [1, 7].

4. TTT DIJAGRAM

Nedostatak metastabilnog Fe-C dijagrama ne pruža uvid u faze i količine koje nastaju većim brzinama ohlađivanja. Praksom je dokazano da su brzine ohlađivanja veće od metastabilne stoga dolazi do razlike među faza dobivenih praksom i onih prikazanih dijagramom.

Smjesa cementita i ferita su faze koje nastaju u dijelu između vrlo malih i poprilično velikih brzina ohlađivanja. Povećanjem brzine hlađenja nastaju sve profinjenije strukture.

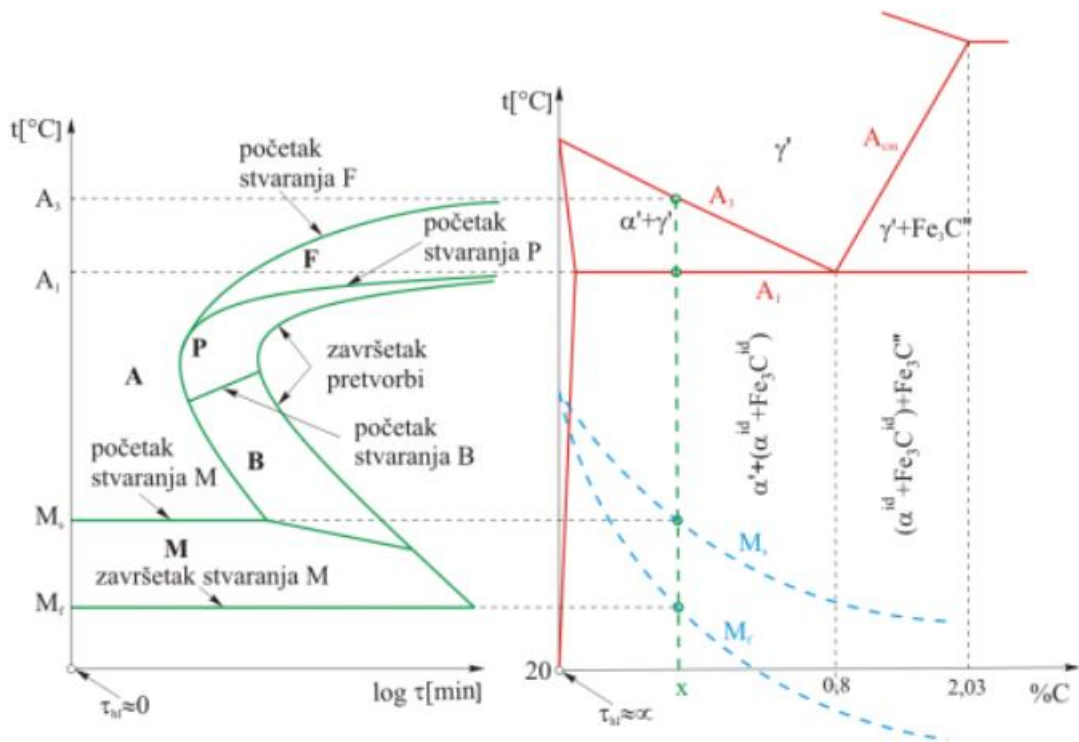
Kako bi mogli precizno odrediti količinske udjele i fazni sastav nastale naglim hlađenjem, temperatura i promjena faze moraju biti prikazane dijagramom kao vremenska funkcija.

TTT-dijagrami (eng. Temperature-Time-Transformation) prate promjene nastale naglim hlađenjem te se razlikuju u ovisnosti o čeliku. Pomoću spomenutih dijagrama omogućeno je utvrditi količinu austenita funkcijom brzine i temperature ohlađivanja samim time količine i vrste faza nastalih pretvorbom. S ciljem postizanja specifične strukture i faznog sastava spomenuti dijagrami koriste se za određivanje načina hlađenja.

Kod ekstremnih slučajeva hlađenja spomenut ćemo dvije vrste dijagrama:

1. Metastabilni Fe-Fe₃C dijagram za iznimno sporo ohlađivanje
2. Uptonov dijagram za iznimno brzo ohlađivanje

Zbog preglednosti, uslijed konstruiranja TTT-dijagrama, u istom dijagramu ucrtava se stanje metastabilnog Fe-Fe₃C dijagrama te Uptonov dijagram (Slika 4.1.).



Slika 4.1. Konstrukcija TTT-dijagrama [4]

U Fe-Fe₃C dijagramu linije prikazane crvenog bojom A₁, A₃, A_{cm} vrijede samo u slučajevima grijanja i izrazito sporog hlađenja, dok linije M_s i M_f prikazane iscrtkano plavom linijom Uptonovim dijagramom vrijede samo kod izrazito brzog ohlađivanja.

TTT dijagramom za točno određenu koncentraciju x[%C] kod poznatog režima hlađenja „θ -t“ (krivulja ohlađivanja), moguće je pratiti transformaciju unutar čelika. Spomenuti dijagram prikazan je slikom 4.2.

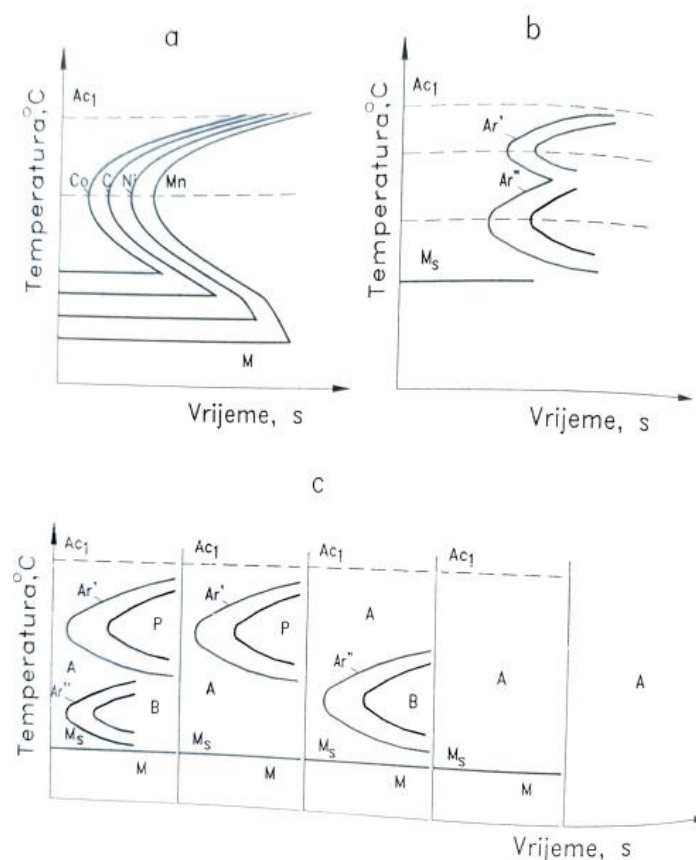
Područja pretvorbe u TTT dijagramu:

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

Izrada TTT dijagrama provodi se u određenim uvjetima, drugačijim od onih toplinske obrade stvarnog izratka. Uzorci koji se koriste za izradu dijagrama, takozvani modeli manjih su dimenzija od onih na kojima vršimo ispitivanje toplinskom obradom. TTT- dijagrami pomažu nam prilikom odabira sredstva hlađenja da bi mogli postići određena fazna svojstva. Međutim, to nije uvijek moguće te se provode pokusi prilikom postizanja optimalnih svojstava [4].

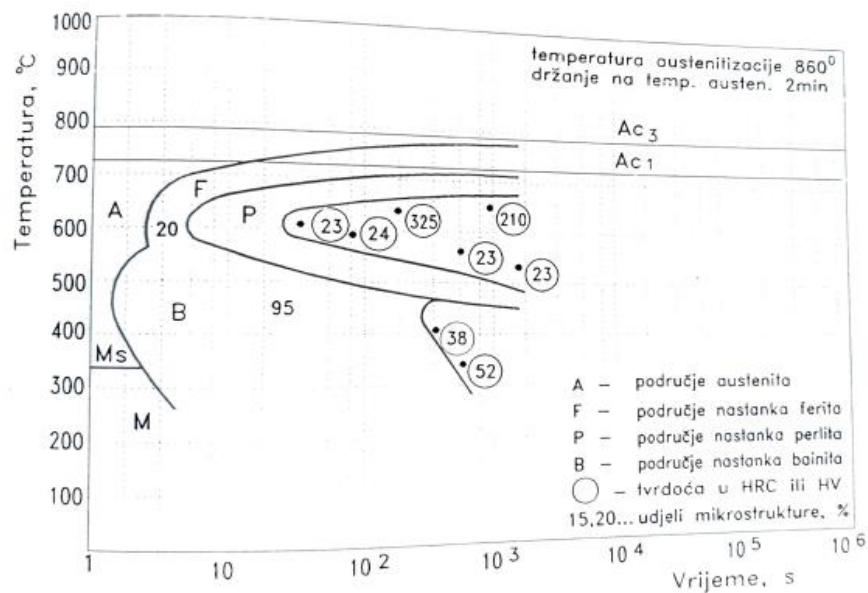
Difuznost ugljika i ostalih elemenata mijenja se promjenom kemijskog sastava, dok se u TTT-dijagramu mijenjaju veličina i položaj mikrostrukturnih područja. Legirajućim elementima usporavaju se difuzijski procesi te oni pomiču krivulje u desno, dok temperature M_s i M_f padaju (Slika 4.2a).

Kod čelika sa povišenim sadržajem ugljika difuzijski procesi postaju sporiji, dok temperatura martenzitne pretvorbe pada. Pothlađeni austenit je stabilniji kod takvih čelika te unutar bainitne i perlitne pretvorbe može doći do pojave područja veće stabilnosti austenita. U tom slučaju jasnije su nam prikazani temperaturni intervali između perlitne i bainitne pretvorbe (Slika 4.2b) [2, 8].

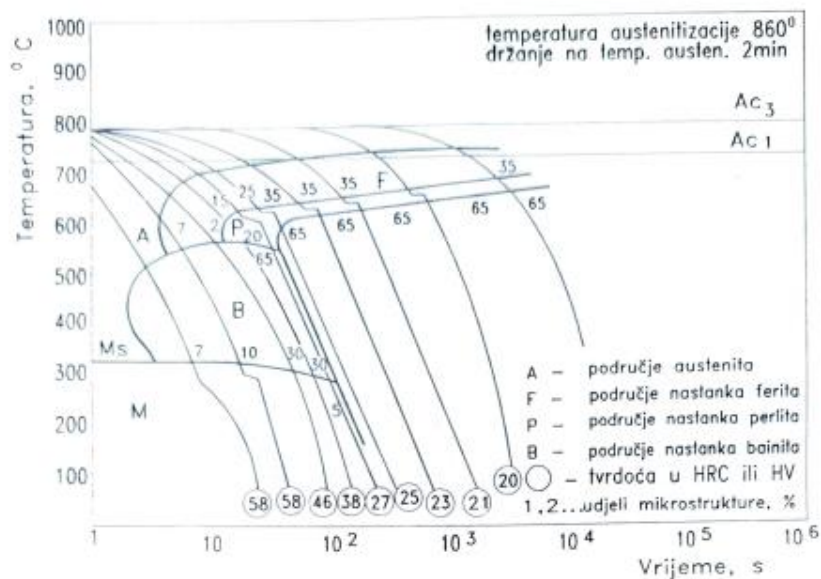


Slika 4.2. Prikaz utjecaja legirajućih elemenata na TTT-dijagram [2]

Uz pomoć izotermičkih TTT-dijagrama (Slika 4.3.) određuje se vrijeme početka i kraja pretvorbe za točno definiranu temperaturu te se mogu ustanoviti neka od osnovnih svojstava čelika poput tvrdoće i mikrostrukture. Za kontinuirano ohlađivanje se u izotermičke TTT-dijagrame ucrtavaju krivulje ohlađivanja (Slika 4.4.).



Slika 4.3. Izotermički TTT-dijagram Č3230 [2]

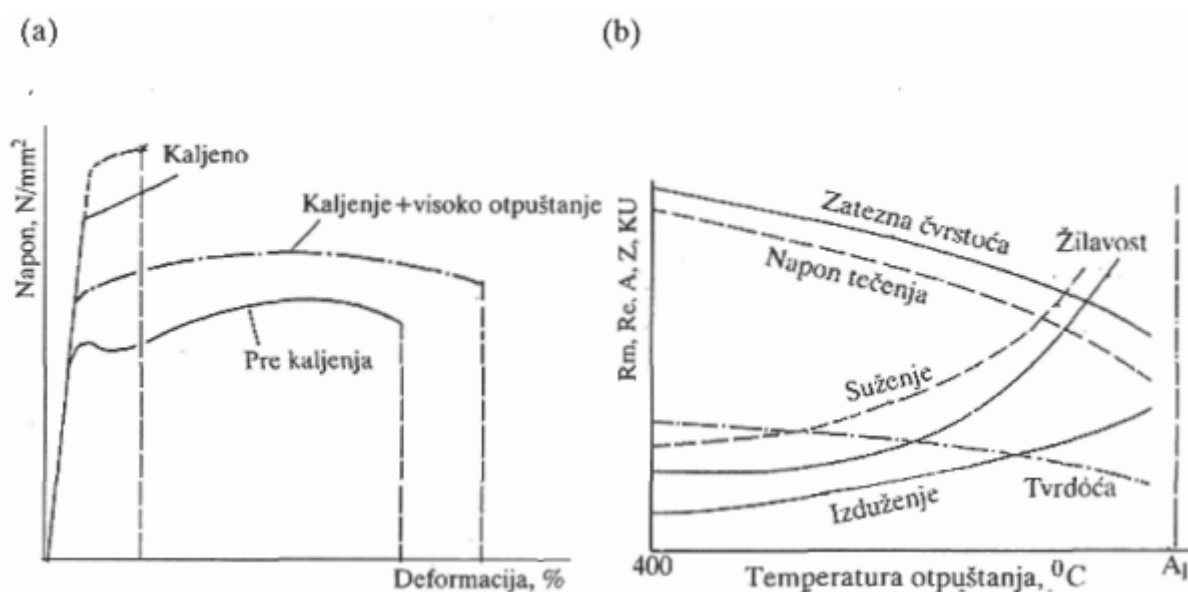


Slika 4.4. TTT-dijagram kontinuiranog ohlađivanja Č3230 [2]

5. POBOLJŠAVANJE ČELIKA

Svojstva čvrstoće čelika poboljšavamo posebnim postupkom toplinske obrade, uključuju postupke kaljenja i popuštanja pri visokim temperaturama kojima se približavamo temperaturama mekog žarenja.

Najširu primjenu nalazimo kod niskolegiranih i srednjelegiranih čelika sadržaja ugljika od 0,3% do 0,6%. Najodgovorniji strojni dijelovi koriste se u poboljšanom stanju stoga možemo zaključiti od kakve važnosti nam je toplinska obrada poboljšavanjem. Navedeni postupak u praksi je poznat i pod nazivom oplemenjivanje. Nakon kaljenja čelik ima visoku vrijednost granice tečenja time nisku žilavost i malu plastičnost. Popuštanjem nakon kaljenja, to jest zagrijavanjem do temperatura 530-680°C i sporim hlađenjem u potpunosti se uklanjaju ili samo smanjuju unutrašnja naprezanja te dolazi do pretvorbe martenzita u perlit. Porastom temperature popuštanja smanjuje se vlačna čvrstoća, tvrdoća i granica tečenja, a povećavaju se žilavost i istezanje što se može vidjeti na slici (slika 5.1b). Ovim načinom dobiven perlit ima bolja mehanička svojstva u odnosu na perlit dobiven kaljenjem. Poboljšani čelik ima veću vrijednost granice tečenja i istezanje nego kaljeni, čime se znatno povećava površina ispod krivulje naprezanje-istezanje prikazanoj na slici 5.1a, što ukazuje na povećanje žilavosti u odnosu na žilavost prije poboljšavanja u odnosu na stanje poslije kaljenja [7].



Slika 5.1. a) dijagram naprezanje-produljenje, prije kaljenja, poslije kaljenja i poboljšavanja; b) promjena mehaničkih svojstava u ovisnosti o temperaturi popuštanja [9]

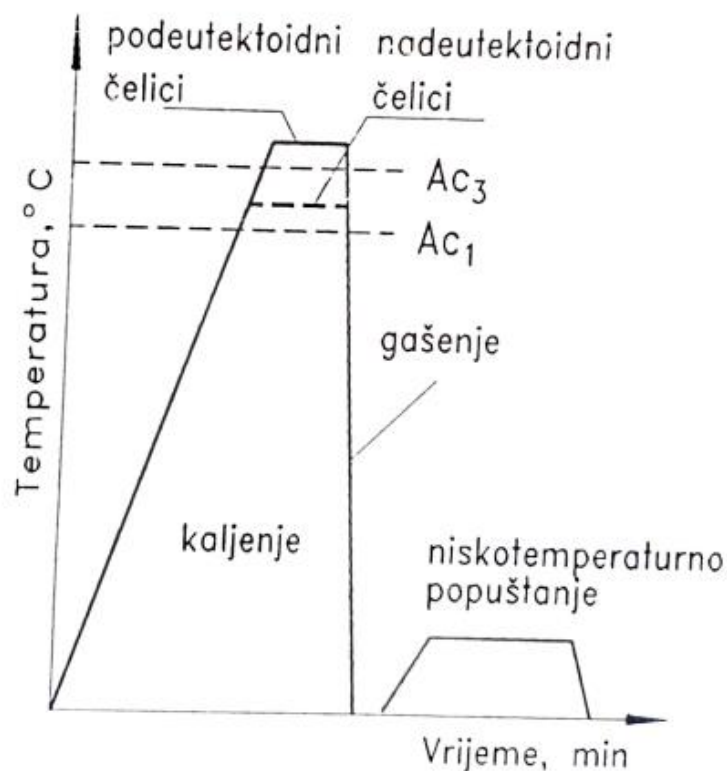
Ukratko, svrha kaljenja je dobivanje martenzitne strukture, a cilj visokotemperaturnog popuštanja je dobivanje zrnate eutektoidne strukture, samim time i povišenja čvrstoće i žilavosti.

Razlikujemo dva osnovna postupka poboljšavanja čelika, to su: obično poboljšavanje, sastoji se od kaljenje i visokotemperaturnog popuštanja te izotermičko poboljšavanje koje se sastoji od gašenja na razinu bainitne ili finolamelarne perlitne strukture [2].

U nastavku ćemo se dotaknuti i kratko objasniti dva osnovna elementa običnog poboljšavanja, a to su kaljenje i visokotemperaturno popuštanje.

5.1. Kaljenje

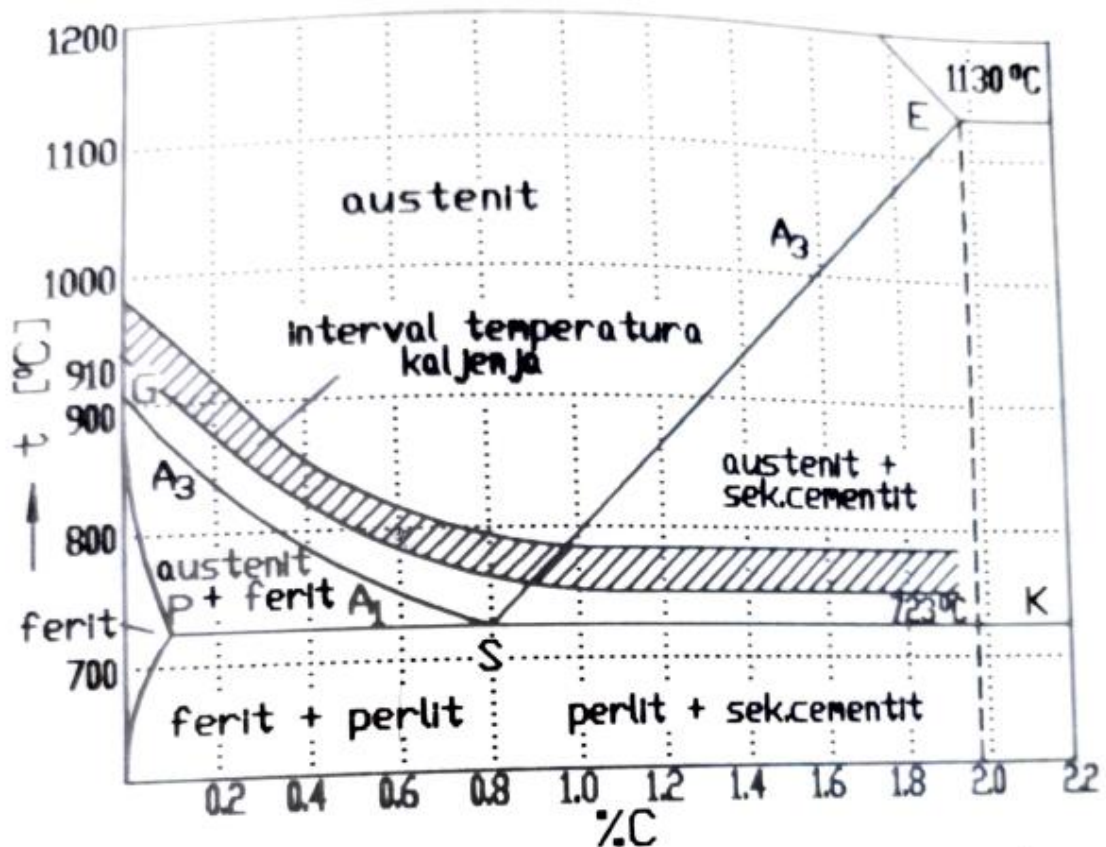
Kaljenje je postupak toplinske obrade brzog ohlađivanja čelika s definirane temperature kaljenja (područje austenita), pri čemu dolazi do stvaranja posebno tvrde strukture (područje martenzita). Čelik se udaljava od stanja ravnoteže, povećanom brzinom kontinuiranog hlađenja austenita do sobne temperature ili diskontinuiranim pothlađivanjem na temperaturu ispod A_{c1} , zadržavanjem na određenoj temperaturi i naknadno hlađenjem do sobne temperature. Postupak kaljenja prikazan je na slici 5.2.



Slika 5.2. Dijagram postupaka kaljenja s niskotemperaturnim popuštanjem [3]

Vrsta čelika, brzina hlađenja i temperatura austenitizacije bitni su parametri koji nam ovise o rezultatima kaljenja. Možemo zaključiti da su nam za podjednak čelik utjecajne samo dvije komponente: brzina hlađenja v_{hl} i temperatura austenitizacije T_A .

Ako je brzina hlađenja veća od kritične, onemogućuje se pretvorba austenita u perlit i ferit, već se austenit, iz čijeg smo temperaturnog područja izveli hlađenje, pretvara u martenzit. Direktnim hlađenjem od temperature područja austenita do sobne temperature mogu nastati velika unutarnja naprezanja zato što se u strukturi martenzita pojavljuju dijelovi nestabilnog austenita i to može dovesti do mehaničkih oštećenja. Zbog toga nakon kaljenja primjenjujemo otpuštanje kojim smanjujemo unutrašnja naprezanja nastale uslijed procesa kaljenja, kao i poboljšanje mehaničkih i fizičkih osobina. Izborom rashladnog sredstva regulira se brzina hlađenja. Kod većine čelika temperatura kaljenja određena je točkama A_1 i A_3 . Temperaturu kaljenja ugljičnih čelika moguće je odrediti na temelju dijagrama željezo-ugljik prikazanog na sljedećoj slici (slika 5.3.). Temperatura austenitizacije podeutektoidnih čelika viša je za 30-70°C od temperature A_3 , dok je za nadeutektoidne čelike temperatura viša za isti iznos od temperature A_1 . Nadeutektoidne čelike ne zagrijavamo iznad temperature A_3 zato što bi dobili martenzit bogatiji ugljikom, a dobili bi i veću količinu mekog zaostalog austenita [4].



Slika 5.3. Izbor pravilne temperature kaljenja [4]

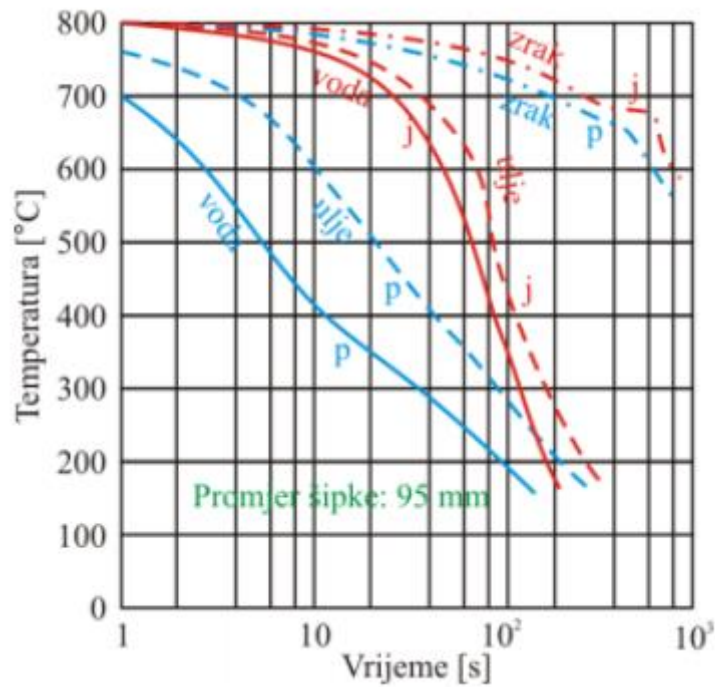
Sredstva za kaljenje mogu biti tvrda, tekuća i plinovita. Međusobno se razlikuju po svojim fizičkim svojstvima, odnosno sposobnosti oduzimanja topline. S aspekta sposobnosti kaljenja možemo ih podijeliti na:

1. Sredstva koja nisu ispitivana u temperaturnom intervalu
2. Sredstva ispitivana u temperaturnom intervalu

Pod sredstva ne ispitivana temperaturnim intervalom spadaju rastaljene soli i metali, zrak te druga plinovita sredstva, dok voda i vodeni rastvori te ulja spadaju pod sredstva ispitana u temperaturnom intervalu.

Praksom su brzine zagrijavanje veće stoga će se povećati i vrijednosti A_1 i A_3 u odnosu na metastabilno zagrijavanje čelika. Iz tog razloga eutektoidni karbidi se ne stignu rastvoriti u potpunosti, stoga je zadržavanje na temperaturi austenitizacije neophodno kako bi se ugljik mogao rastvoriti iz austenita.

TTT-dijagramima koristimo se kako bi procijenili tvrdoću dobivenu kaljenjem površinski i dubinski uz uvjet da su nam krivulje pojedinih slojeva izratka poznate. Slikom 5.4. prikazane su krivulje hlađenja za površinu i jezgru uzorka cilindričnog oblika promjera 95mm u raznim rashladnim sredstvima sa temperature $T_A=800$ C.



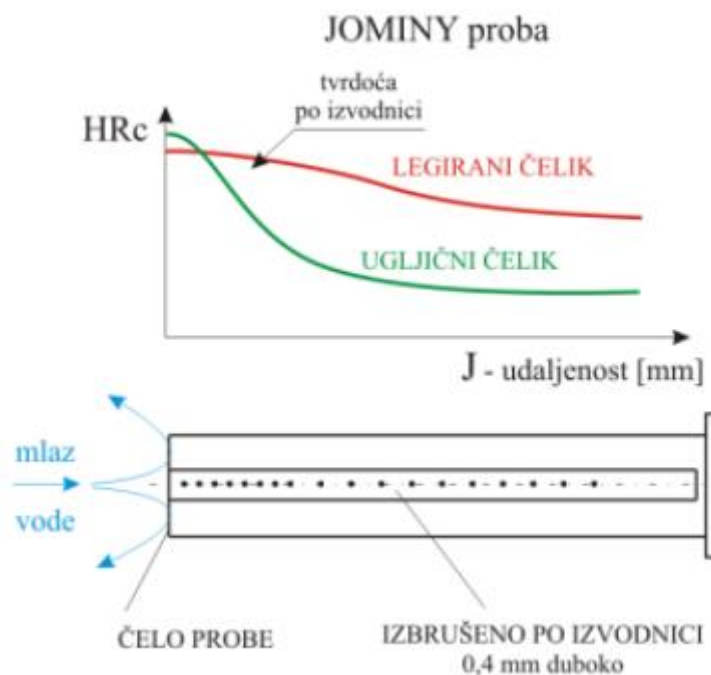
Slika 5.4. Krivulje hlađenja u ovisnosti o sredstvu [8]

Prokaljivost je svojstvo čelika pri kojem se formira martenzitna struktura u jezgri prilikom gašenja čeličnih obradaka. Dok je zakaljivost svojstvo čelika koje omogućava dobivanje tvrde, pretežno martenzitne strukture prilikom kaljenja.

Ispitivanje prokaljivosti vrši se s ciljem određivanja kaljene dubine te postignutih tvrdoća. Koristi se više postupaka ispitivanja prokaljivosti od kojih ćemo spomenuti:

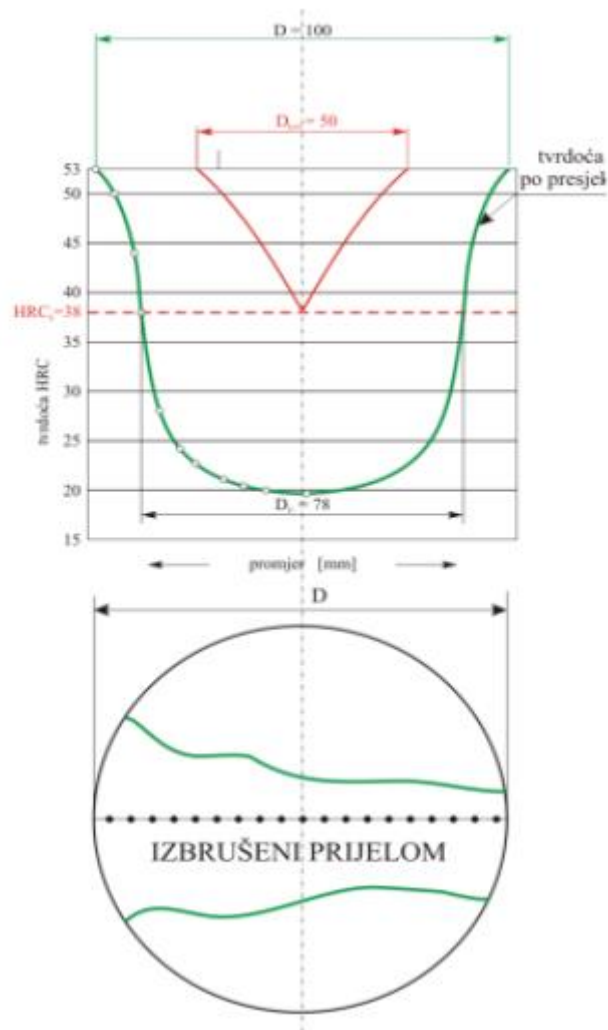
- Prokaljivost po Jominyju
- Prokaljivost po Grossmanu
- Prokaljivost po Shepherdu

Ispitivanje po Jominyju (Slika 5.5.), najčešće je korištena metoda, a sastoji se u gašenju čela normiranih proba cilindričnog oblika, promjera 25 mm te duljine 100 mm. Probe je potrebno gasiti vodenim mlazom na strani čela. Nakon gašenja cilindričnoj površini plašta potrebno je odbrusiti dvije plohe, sa dvije strane te se naposljetku izmjeri tvrdoća probe u ovisnosti o udaljenosti gašene čeone plohe. Vrijednost tvrdoće dobivene Jominy metodom karakteristična je za prokaljivost čelika [1].



Slika 5.5. Ispitivanje prokaljivosti Jominy postupkom [8]

Ispitivanje po Grossmanu (Slika 5.6.) je metoda neovisna o dimenzijama probnog komada i iskorištenom sredstvu kaljenja. Struktura sa udjelom martenzita od 50% u kaljenoj strukturi predstavlja graničnu prokaljivost, gdje se maksimalno opadanje prikazuje dubinskom krivuljom tvrdoće. Tvrdoća koja se postiže Grossmanovom metodom simbolizira kritičnu tvrdoću. Određivanje prokaljivosti obuhvaća: intenzitet gašenja upotrebljavanog sredstva prilikom kaljenja te kritičnog promjera i idealnog kritičnog promjera za sredstvo korišteno pri kaljenju [1].



Slika 5.6. Ispitivanje prokaljivosti Grossman postupkom [8]

Ispitivanje prokaljivosti po Shepherdu najjednostavnija je metoda ispitivanja među navedenim, a sastoji se od kaljenja uzorka iz cilindričnih šipki promjera 20 mm s različitim temperatura austenitizacije [4].

Klasični postupci poboljšavanja izvode se neprekidnim ohlađivanjem do zadane sobne temperature te se iz tog razloga koriste anizotermni TTT-dijagrami. Razlikujemo dva postupka neprekidnog kaljenja, to su direktno kaljenje koje se ostvaruje hlađenjem u samo jednom rashladnom sredstvu i slomljeno kaljenje koje se postiže naglim hlađenjem u jačem rashladnom sredstvu, a onda hlađenjem u blažem sredstvu kao na primjer ulju.

Izotermički postupci kaljenja izvode se kod određene temperature izoterme.

5.2. Popuštanje čelika

Popuštanjem podrazumijevamo ugrijavanje kaljenog čelika na temperaturu nižu od temperature A_1 , pri kojem zakaljenu strukturu približavamo stanju veće stabilnosti [3].

Kako bismo izbjegli pucanje izradaka složenog oblika provodi se toplinska obrada popuštanja čime težimo ravnoteži faza. Popuštanje nakon kaljenja dovodi do smanjenja čvrstoće, tvrdoće i granice elastičnosti, a dolazi do povećanja rastezljivosti i žilavosti u odnosu na zakaljeno stanje. Smanjenje tvrdoće je posljedica popuštanja. Podjela postupaka toplinske obrade u ovisnosti o temperaturi T_{pop} :

- Niskotemperaturno popuštanje: $20\text{ C} < T_{pop} < 220\text{ C}$
- Srednjetemperaturno popuštanje: $220\text{ C} < T_{pop} < 400\text{ C}$
- Visokotemperaturno popuštanje: $400\text{ C} < T_{pop} < A_1$

Provedbom postupka popuštanja teži se balansu svojstva, a kontrolira se temperaturom te trajanjem u skladu sa parametarskim Hollomon-Jaffe zakonom prikazanim izrazom 5.1.

$$H = f(P) \quad (5.1.)$$
$$P = \frac{273,15 + t}{1000} [C + \log(\tau)]$$

gdje je:

H – tvrdoća, HRC

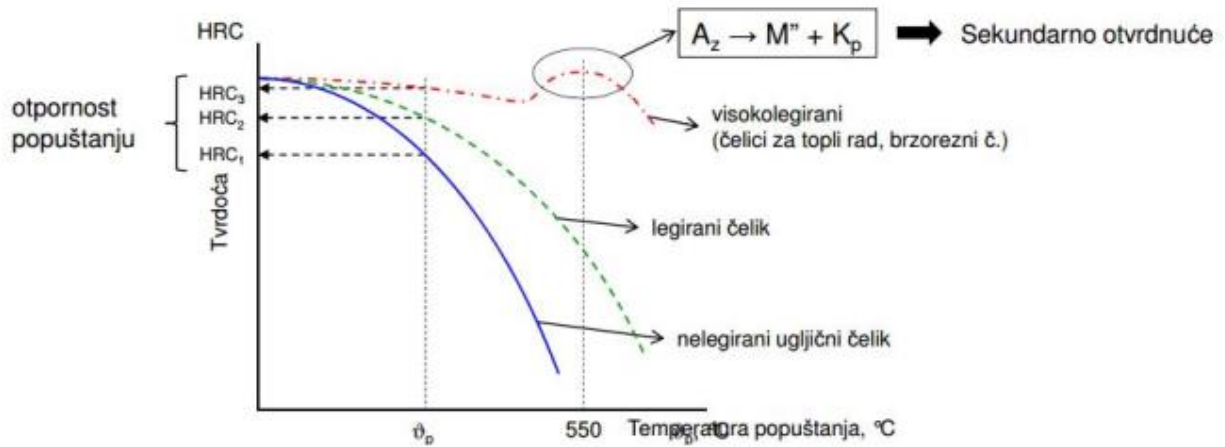
T – temperatura, K

C – konstanta čelika u ovisnosti o sadržaju ugljika, %

P – Hollomon-Jaffeov parametar, K

τ – trajanje popuštanja, s

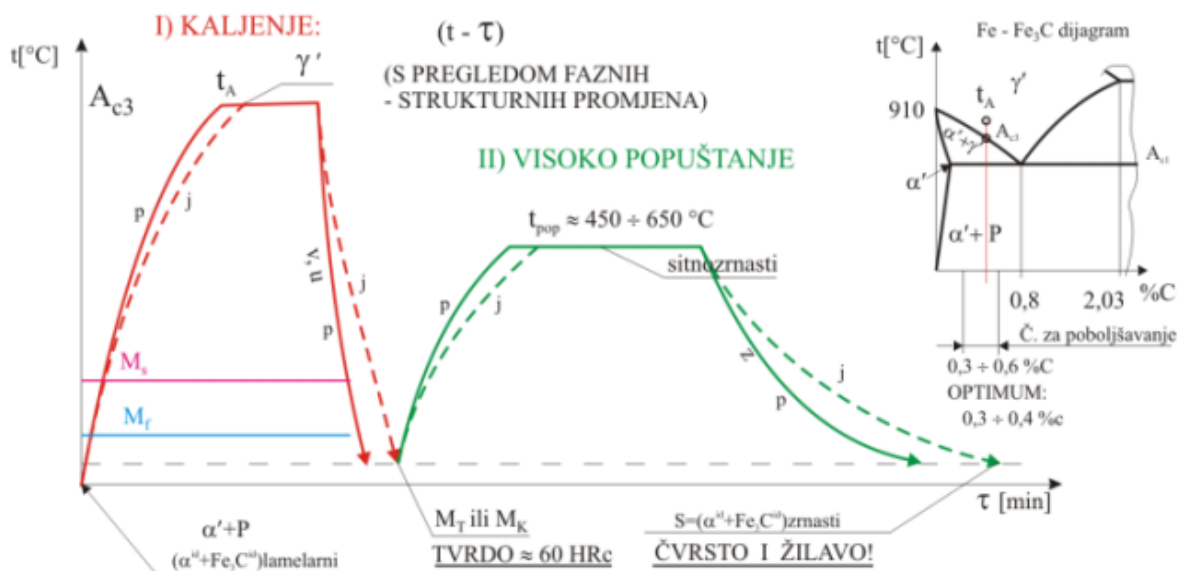
Iz izraza možemo zaključiti da ako je parametar P konstantan, tvrdoća će imati istu vrijednost pri dužem trajanju i nižim temperaturama isto kao i pri kraćem trajanju i višim temperaturama popuštanja.



Slika 5.7. Dijagram popuštanja čelika [8]

5.3. Klasično poboljšavanje

Klasično poboljšavanje čelika je postupak određen dvjema osnovnim toplinskim obradama, to su kaljenje s temperature austenitizacije te visokotemperaturno popuštanje na temperaturama od 450 C do 600 C.



Slika 5.8. Dijagram toplinske obrade klasičnog poboljšavanja [8]

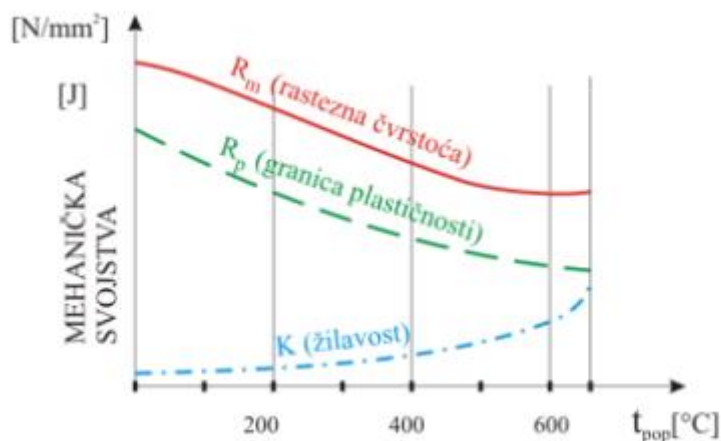
Slika 5.8. prikazuje nam krivulje grijanja i hlađenja površine i jezgre. Možemo primijetiti da temperatura jezgre zaostaje za temperaturom površine kod grijanja i hlađenja, a zaostajanje postaje veće u ovisnosti o dimenzijama presjeka. Što je presjek izratka veći to nam je veća digresija krivulja.

Postotak ugljika u čelicima za poboljšavanje iznosi 0,3-0,6%, dok se optimalnim podrazumijeva sadržaj od 0,3-0,4%, jer kaljenjem čelika sa manjim udjelom ugljika ne dobiva tetragonalni martenzit M_T već kubni martenzit M_K . Dobivanje kubnog martenzita izrazito je važno jer dolazi do smanjenja zaostalih naprezanja.

Kaljenje kao međufaza izrazito je bitna jer dolazi do raspada lamelnog eutektoida, dok visokotemperaturnim popuštanjem dobivamo fino raspršeni zrnati cementit Fe_3C u feritnoj matrici.

Naposljetku preko martenzita kao konačni rezultat, dobivamo zrnati eutektoid, sorbit (S) ili trostit (T). Time dolazi do rasta žilavosti i opadanja tvrdoće u odnosu na zakaljano stanje, vidljivo sa slike 5.9.

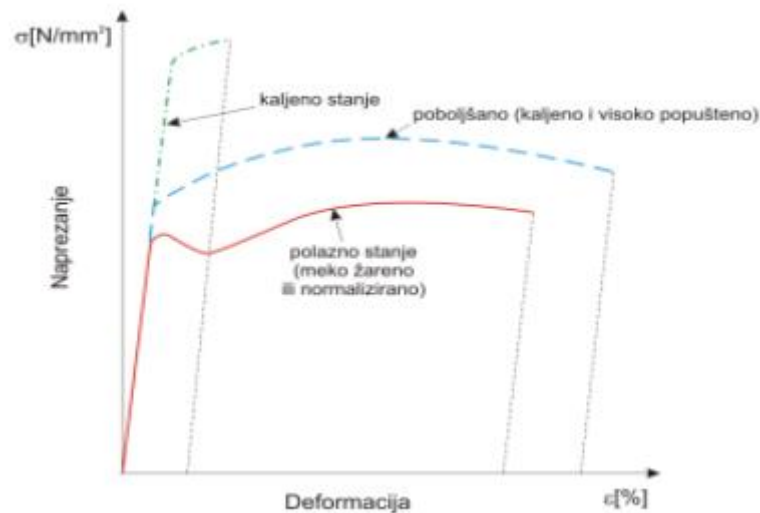
Za debljine do 10 mm koriste se ugljični nelegirani čelici, dok se kod većih presjeka koriste legirani čelici zbog veće prokaljivosti. Nakon visokotemperaturnog popuštanja poboljšanu strukturu će biti prisutna na dijelu presjeka prethodne martenzitne strukture, zbog čega nam je prokaljivost izrazito bitna.



Slika 5.9. Dijagram promjene mehaničkih svojstava ovisno o temperaturi popuštanja [8]

Poboljšavanje je postupak koji se koristi samo kod dinamički opterećenih strojeva. Ovisnost mehaničkih svojstava o temperaturi popuštanja prikazana je dijagramom na slici 5.9.

Dijagram σ - ϵ istog čelika kod različitih stanja temperature prikazan je na slici 5.10.



Slika 5.10. Dijagram rastezanja čelika prije i nakon neke faze poboljšavanja [8]

Kaljeni čelik ima visoku granicu popuštanja, ali malu istezljivost shodno tome mala je žilavost, dok poboljšani čelik ima veću granicu popuštanja i veće produljenje u odnosu na polazno stanje. Površina ispod krivulje implicira na povišenje žilavosti u usporedbi sa polaznim stanjem [4].

5.4. Izotermičko poboljšavanje

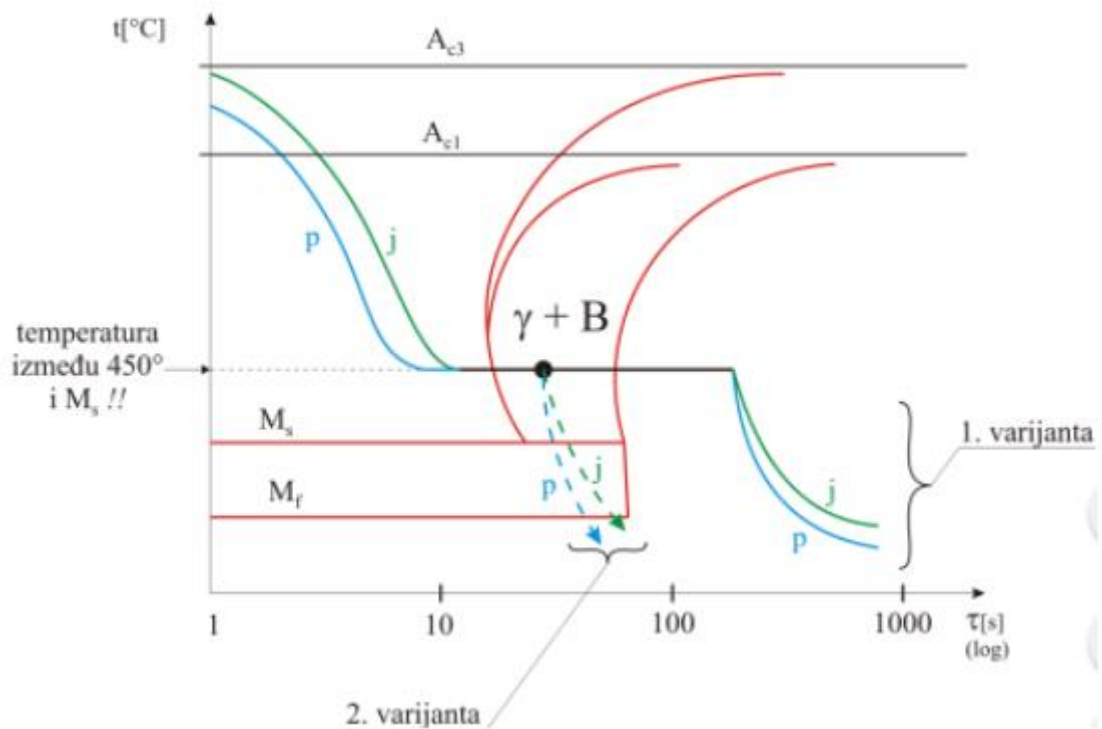
Provodi se rapidnim hlađenjem s temperature austenitizacije t_A u kupki izotermičke temperature t_{iz} , iznad temperature M_S uz zadržavanje do potpunog završetka. Krajnji cilj je nastanak gornjeg i donjeg bainita, više o tome opisano je u potpoglavlju 3.3.3.

Prednosti postupka izotermičkog poboljšavanja su:

- Pri konstantnoj temperaturi u svim slojevima istovremeno se odvija modifikacija austenita
- Dobra žilavost

Nedostatci postupka izotermičkog poboljšavanja:

- Manja tvrdoća
- Dugo trajanje toplinske obrade



Slika 5.11. Prikaz izotermičkog poboljšavanja u TTT-dijagramu [8]

Postupak se primjenjuje kod plitko kaljivih ugljičnih čelika dimenzija većih od 5mm [5].

5.5. Čelici za poboljšavanje

Čelici za poboljšavanje su nelegirani ili niskolegirani konstrukcijski čelici, ova skupina čelika sadrži 0,25-0,6% ugljika. Odgovarajuća mehanička svojstva poput granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i žilavosti postižu se kaljenjem i popuštanjem. Kaljenjem se nastoji postići potpuni martenzitna struktura, a naknadnim popuštanjem veća žilavost [5].

5.5.1. Nelegirani čelici za poboljšavanje

Kod nelegiranih ugljičnih čelika sadržajem ugljika i mangana povećava se čvrstoća. Upotrebljavaju se za strojne dijelove presjeka do 100 mm, zbog male prokaljivosti. Kod većih presjeka nisu osigurana mehanička svojstva zbog nemogućnosti prokaljivanja jezgre.

Karakteristike nelegiranih čelika za poboljšavanje:

- Mala sklonost stvaranju pukotina pri zagrijavanju i hlađenju
- Slaba obradivost skidanjem strugotine u meko žarenom stanju
- Nemaju sklonost prema krhkosti pri popuštanju
- Otpornost habanja raste sadržajem ugljika
- Neotpornost prema koroziji [5]

5.5.2. Legirani čelici za poboljšavanje

Pod legirane čelike svrstavamo sve plemenite čelike. Legirane čelike upotrebljavamo u poboljšanom stanju, zato što njihova upotreba nije svrsishodna u kaljenom stanju. Kao glavne sastojke ubrajamo mangan, silicij, krom, molibden, vanadij i nikal. Na temelju navedenog vrste legiranih čelika za poboljšavanje su:

- Mn čelik
- Cr čelik
- Cr-Mn-V čelik
- Cr-Mo čelik
- Cr-Mo-V čelik
- Ni-Cr-Mo čelik [5]

6. POBOLJŠAVANJE STROJNOG DIJELA OZ.24 – ST.74

U ovom dijelu su definirani parametri toplinske obrade poboljšavanja strojnog dijela OZ.24-ST.74 kako bi zadovoljili zahtjeve minimalne tvrdoće 32+1 HRC (Prilog 1).

Strojni dio izrađen je od čelika C45E koji je prikazan slikom 6.1.



Slika 6.1. Strojni dio OZ.24 - ST.74 izrađen iz čelika C45E

Tablicom 6.1. prikazani su udjeli kemijskih elemenata ispitivanog čelika C45E.

Tablica 6.1. Kemijski sastav čelika C45E

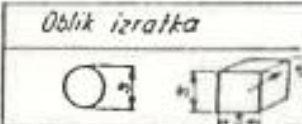
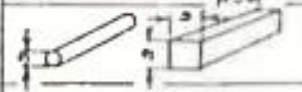
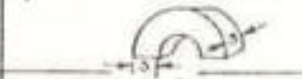
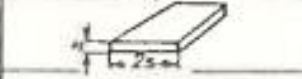


Kemijski sastav	C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P	S	Si
Udio (%)	0,45	0,4	0,3	0,6	0,1	0,4	0,02	0,035	0,2

Dimenzije i zahtjev za poboljšanje strojnog dijela OZ.24-ST.74 prikazani su u prilogu 1.

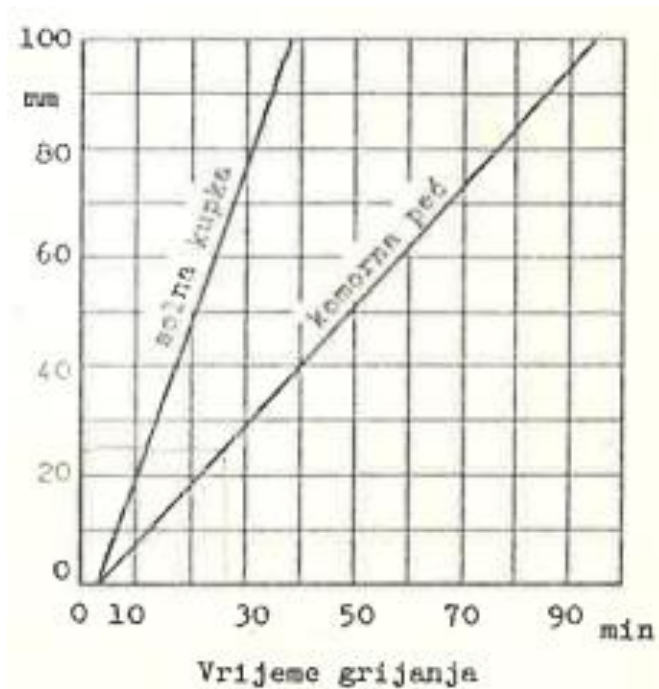
Kako bi postigli željena svojstva potrebno je definirati parametre toplinske obrade. Temperatura austenitizacije određena nam je tehničkom dokumentacijom proizvođača čelika. Za čelik C45E propisana temperatura austenitizacije je određena rasponom 830-860°C. Za potrebe ovog rada koristiti će se temperatura 860°C.

Potrebno je odrediti i ukupno vrijeme ugrijavanja kod kaljenja. Za potrebe rada koristiti će se Ordinanz metoda za određivanje vremena trajanja. Navedena metoda u obzir uzima dimenziju „s“, promjer strojnog dijela i faktor oblika „k“ koji je unaprijed definiran. Za strojni dio OZ.24-ST.74 uzimamo najveći promjer $s=40\text{mm}$. Faktor oblika u ovom slučaju je $k=1$, a određuje se prema danoj tablici 6.2.

Tablica 6.2. Karakteristična dimenzija "s" i koeficijent oblika "k" [9]

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

Prema umnošku faktora oblika „k“ i dimenzije „s“ iz dijagrama danog na slici 6.3. očitava se vrijeme grijanja. Prema dijagramu potrebno vrijeme grijanja zadanog strojnog dijela iznosi $t_{gr}=40\text{min}$.



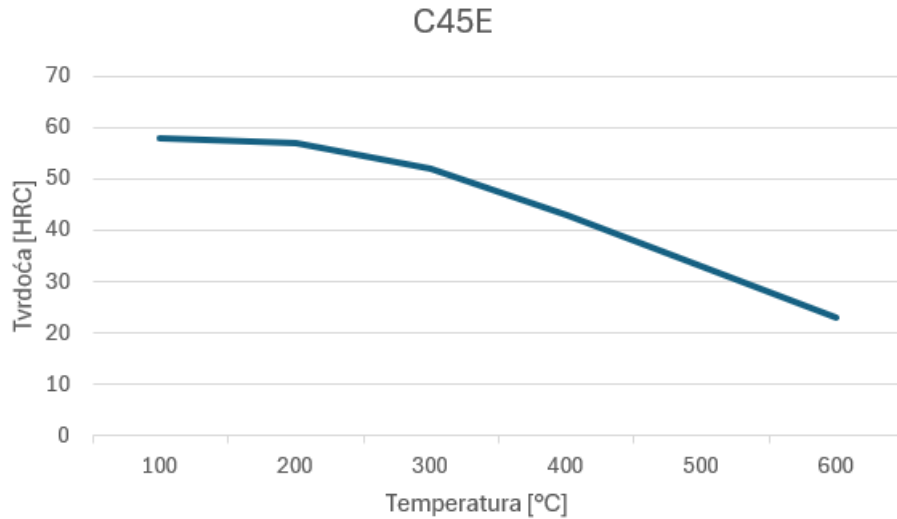
Slika 6.2. Vrijeme grijanja u zavisnosti o "sk" [9]

Osim vremena grijanja potrebno je odrediti vrijeme izotermičkog držanja. Za nelegirane čelike vrijeme držanja iznosi $t_{id}=10\text{min}$, prikazano na tablici 6.4.

Tablica 6.3. Vrijeme izotermičkog držanja [9]

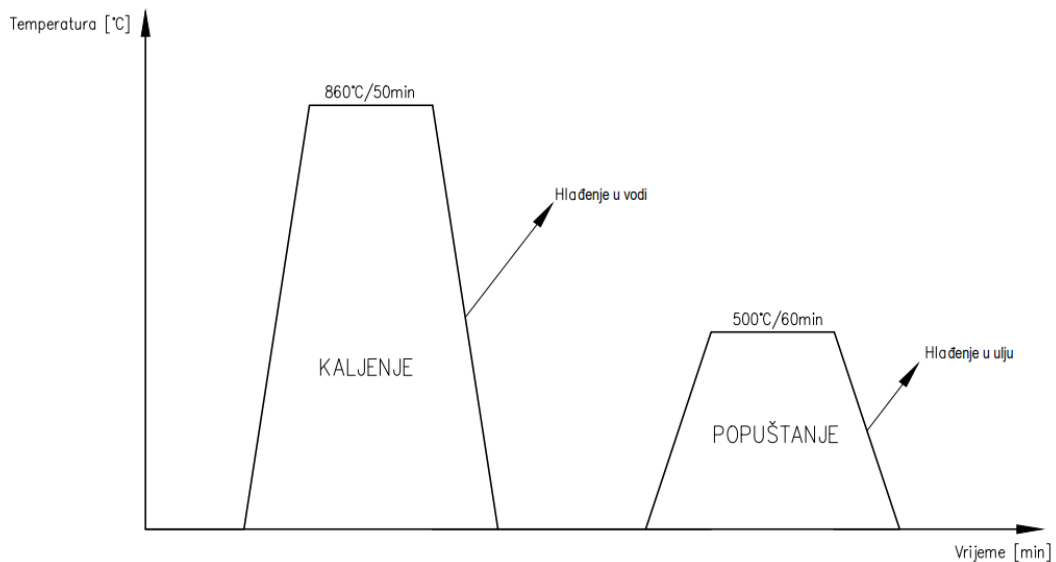
grupa čelika	trajanje držanja na ϑ_A , min
konstrukcijski čelici	nelegirani čelici za poboljšavanje 10 ... 15 min niskolegirani čelici za poboljšavanje 15 ... 20 min
alatni čelici: – ugljični i niskolegirani – visokolegirani (s 5 do 14 % Cr) – brzorezni	$t_{id} = 1 + 0,6 Cr + 0,4 W + 3 V - 0,04 (\vartheta_{stv}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

Zahtjev tvrdoće za zadani strojni dio iznosi 32+1 HRC, stoga se na temelju priloženog dijagrama (Slika 6.5.) određuje temperatura popuštanja, koja iznosi 500°C. Dijagram je dobiven na temelju kataloga proizvođača čelika.



Slika 6.3. Dijagram popuštanja čelika C45E

Potrebno je odrediti i vrijeme popuštanja. U praksi popuštanje traje u intervalu od 60 do 120 minuta, s naknadnim ohlađivanjem u ulju ili na zraku. U ovom slučaju odabrano je popuštanje u trajanju od 60 minuta s hlađenjem u ulju.



Slika 6.4. Dijagram toplinske obrade strojnog dijela OZ.24-ST.74

Tablica 6.4. Operacijski list kaljenje

Poduzeće: Tehnički fakultet	Naziv obratka: OZ.24- ST.74	Materijal: C45E	Radno mjesto:	List:1/2			
			Naziv:				
Naziv operacije: Kaljenje	Oznaka:	Oblik:	Oznaka:	Broj operacije: 1			
		Dimenzije:	Radionica: Laboratorij				
Broj zahvata:	Opis zahvata:	Količina:	Proizvodno sredstvo	T [°C]	Vrijeme [min]	Minuta	
		Komada:	Proizvodni materijal			t_s	t_r
1	Stavljanje u peć	1	Ručno	-	1	-	1
2	Zagrijavanje i progrijavanje	1	Peć	860	40	40	-
3	Držanje	1	Peć	860	10	10	-
4	Vađenje iz peći i hlađenje	1	Ručno	20	2	-	2
Izradio: Nikola Vučić	Datum: 28.08.2024	Kontrola:	Izmjene:	Broj:		$\sum t_s$	$\sum t_r$
				Datum:		50	3
				Ime:			

Tablica 6.5. Operacijski list popuštanje

Poduzeće: Tehnički fakultet	Naziv obratka: OZ.24- ST.74	Materijal: C45E	Radno mjesto:	List:2/2			
			Naziv:				
Naziv operacije: Popuštanje	Oznaka:	Oblik:	Oznaka:	Broj operacije: 2			
		Dimenzije:	Radionica: Laboratorij				
Broj zahvata:	Opis zahvata:	Količina:	Proizvodno sredstvo	T [°C]	Vrijeme [min]	Minuta	
		Komada:	Proizvodni materijal			t _s	t _r
1	Stavljanje u peć	1	Ručno	-	1	-	1
2	Popuštanje	1	Peć	500	60	60	-
3	Vađenje iz peći i hlađenje	1	Ručno	20	2	-	2
Izradio: Nikola Vučić	Datum: 28.08.2024	Kontrola:	Izmjene:	Broj:		∑t _s	∑t _r
				Datum:		60	3
				Ime:			

6.1. Probno poboljšavanje

U svrhu provjere postavljenih parametara toplinske obrade napravljeno je probno poboljšavanje jednog komada. Strojni dio zagrijan je u komornoj peći proizvođača OVER na temperaturu austenitizacije od 860°C u trajanju od 50 minuta. Kao sredstvo gašenja korištena je voda.



Slika 6.5. Komorna peć OVER snage 12 kW

Naknadno je ispitana tvrdoća kaljenog dijela Rockwell metodom. Dobivena je tvrdoća 56 HRC.



Slika 6.6. Tvrdoća strojnog dijela nakon kaljenja

Nakon postupka kaljenja proveden je postupak visokotemperaturnog popuštanja na temperaturi 500°C u trajanju od 60 minuta. Kao sredstvo gašenja korišteno je ulje. Završetkom kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja izmjerena je tvrdoća 32 HRC, čime su ispunjeni zahtjevi.



Slika 6.7. Tvrdoća strojnog dijela nakon popuštanja

7. ZAKLJUČAK

Toplinska obrada je postupak kojim se postižu bolja mehanička svojstva ili bolja obradivost strojnih dijelova. Promjenom stanja mijenja se struktura i fazni sastav, posljedično poboljšavaju nam se određena svojstva uz pogoršanje drugih svojstava (porast tvrdoće, pad žilavosti).

Raspadom austenita stvaraju se nove faze. Prilikom brzog hlađenja dio austenita može ostati nepretvoren, austenit se pretvara u bainit i martenzit. Sporijim hlađenjem iz austenita nastaju perlit, sorbit ili troostit.

TTT- dijagramom moguće je odrediti količinu pretvorenog austenita u funkciji brzine i temperature hlađenja te količine nastalih faza. Razlikujemo dva tipa TTT-dijagrama, to su izotermički dijagram i dijagram kontinuiranog hlađenja.

Poboljšavanje čelika je postupak kod kojeg se prvenstveno čelik kali te zatim popušta pri visokim temperaturama sa svrhom dobivanja željenih svojstava. Kaljenje je postupak zagrijavanja čelika do određene temperature te naposljetku gašenja. Potrebno je odrediti temperaturu austenitizacije, vrijeme držanja i medij za gašenje kako bi proveli što uspješnije kaljenje. Spomenutim postupkom postiže se velika tvrdoća, a kao posljedica gašenja javlja se krhkost zbog javljanja velikih naprezanja unutar materijala.

Kako bi se uklonila nastala naprezanja, slijedi visokotemperaturno popuštanje. Navedenim postupkom uklanjaju se zaostala naprezanja, ali dolazi i do smanjenja tvrdoće. Stoga se poboljšavanjem pokušava postići veća tvrdoća uz dobru žilavost i duktilnost materijala.

Poboljšavanjem strojnog dijela OZ.24-ST.74 izrađenog od čelika C45E, vidljivo je povećanje tvrdoće nakon postupka kaljenja te zanemariv pad tvrdoće nakon postupka visokotemperaturnog popuštanja.

LITERATURA

- [1] Pirš J.: „Toplinska obrada metala“, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1992.
- [2] Smoljan B.: „Osnove toplinske obrade čelika“, Pedagoški fakultet, Rijeka, 1997.
- [3] Smoljan B.: „Toplinska obrada čelika, sivog i nodularnog lijeva“, Hrvatsko društvo za toplinsku obradu i inženjerstvo površina, Rijeka, 1999.
- [4] Stupnišek M., Cajner F.: „Osnove toplinske obrade metala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [5] Guralj S.: „Termička obrada čelika“, Izdavačko preduzeće „Građevinska knjiga“, Beograd, 1962.
- [6] Pantelić I.: „Tehnologija termičke obrade čelika 1“, Radnički univerzitet „Radivoj Čirpanov“, Novi Sad, 1974.
- [7] Totten G.: „Steel heat treatment: metallurgy and technologies“, Taylor & Francis Group, Portland, 2006.
- [8] Gabrić I., Šitić S.: „Materijali II“, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [9] Liščić B. i dr.: „Toplinska obrada“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Shema dijagrama toplinske obrade [3].....	9
Slika 3.1. Dio faznog Fe-Fe ₃ C dijagrama [3].....	14
Slika 3.2. Raspodjela ugljika u mikrostrukturnim fazama pri tvorbi austenita [2]	16
Slika 3.3. Izotermička tvorba austenita [3]	17
Slika 3.4. Utjecaj temperature na srednju brzinu perlitne pretvorbe [2]	18
Slika 3.5. Shematski prikaz perlitne pretvorbe [2].....	19
Slika 3.6. a) koncentracije faza pri perlitnoj pretvorbi; b) profil koncentracija faza pri izlučivanju proeutektoidnog ferita; c) profil koncentracija faza pri eutektoidnoj pretvorbi [7]	20
Slika 3.7. Rast iglica martenzita [3]	21
Slika 3.8. Shematski prikaz bainitne pretvorbe [7]	22
Slika 3.9. a) karakteristične koncentracije faza pri bainitnoj pretvorbi; b, c, d) profili koncentracija faza [7].....	23
Slika 3.10. Shematski prikaz nastanka: a) gornjeg bainita, b) donjeg bainita [7]	24
Slika 4.1. Konstrukcija TTT-dijagrama [4].....	26
Slika 4.2. Prikaz utjecaja legirajućih elemenata na TTT-dijagram [2]	27
Slika 4.3. Izotermički TTT-dijagram Č3230 [2]	28
Slika 4.4. TTT-dijagram kontinuiranog ohlađivanja Č3230 [2]	28
Slika 5.1. a) dijagram naprezanje-produljenje, prije kaljenja, poslije kaljenja i poboljšavanja; b) promjena mehaničkih svojstava u ovisnosti o temperaturi popuštanja [9]	29
Slika 5.2. Dijagram postupaka kaljenja s niskotemperaturnim popuštanjem [3].....	31
Slika 5.3. Izbor pravilne temperature kaljenja [4].....	32
Slika 5.4. Krivulje halđenja u ovisnosti o sredstvu [8]	33
Slika 5.5. Ispitivanje prokaljivosti Jominy postupkom [8]	34
Slika 5.6. Ispitivanje prokaljivosti Grossman postupkom [8].....	35
Slika 5.7. Dijagram popuštanja čelika [8]	37
Slika 5.8. Dijagram toplinske obrade klasičnog poboljšavanja [8].....	37
Slika 5.9. Dijagram promjene mehaničkih svojstava ovisno o temperaturi popuštanja [8].....	38
Slika 5.10. Dijagram rastezanja čelika prije i nakon neke faze poboljšavanja [8].....	39
Slika 5.11. Prikaz izotermičkog poboljšavanja u TTT-dijagramu [8].....	40
Slika 6.1. Strojni dio OZ.24 - ST.74 izrađen iz čelika C45E	42
Slika 6.3. Vrijeme grijanja u zavisnosti o "sk" [9].....	44
Slika 6.5. Dijagram popuštanja čelika C45E.....	45

Slika 6.6. Dijagram toplinske obrade strojnog dijela OZ.24-ST.74.....	45
Slika 6.7. Komorna peć OVER snage 12 kW	48
Slika 6.8. Tvrdća strojnog dijela nakon kaljenja	48
Slika 6.9. Tvrdća strojnog dijela nakon popuštanja	49

POPIS TABLICA

Tablica 6.1. Kemijski sastav čelika C45E.....	42
Tablica 6.2. Karakteristična dimenzija "s" i koeficijent oblika "k" [9].....	43
Tablica 6.3. Vrijeme izotermičkog držanja [9]	44
Tablica 6.4. Operacijski list kaljenje	46
Tablica 6.5. Operacijski list popuštanje	47

SAŽETAK

Kroz ovaj završni rad opisan je postupak toplinske obrade poboljšavanjem. Teorijskim dijelom objašnjene su mikrostrukture i fazne pretvorbe čelika. Naknadno je objašnjen način korištenja TTT-dijagrama. Daljnjim dijelom obuhvaćen je postupak poboljšavanja, sukladno su opisani postupci kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Navedeni su i različiti čelici korišteni kod poboljšavanja. Praktičnim dijelom završnog rada određeni su parametri potrebni za poboljšavanje strojnog dijela OZ.24-ST.74, izrađenog od čelika C45E.

Ključne riječi: toplinska obrada, kaljenje, popuštanje

ABSTRACT

This undergraduate thesis describes the heat treating process of quenching and tempering. The theoretical part explains the microstructure and phase transformation of steel. Subsequently, the usage of the TTT-diagram is explained. The next part includes the process of quenching and tempering that are described accordingly. The thesis further discusses different types of steel suitable for quenching and tempering. In the practical part of the thesis, parameters for quenching and tempering of the machine part OZ.24-ST.74 made out of C45E steel are defined.

Key words: heat treatment, quenching, tempering

PRILOZI

Prilog 1.: Radionički nacrt strojnog dijela OZ.24-ST.74