

# Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela MJ.22-DP.42

---

**Jurić, Mario**

**Master's thesis / Diplomski 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:190:182297>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-25**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA**

**MJ.22-DP.42**

Rijeka, svibanj 2023.

Mario Jurić

0069091724

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA**

**MJ.22-DP.42**

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

Rijeka, svibanj 2023.

Mario Jurić

0069091724

Rijeka, 16. ožujka 2022.

Fakultet: **Tehnički fakultet**  
Predmet: **Termalni procesi materijala**  
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Mario Jurić (0069091724)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**  
Modul: **Inženjerstvo materijala**

Zadatak: **Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela MJ.22-DP.42 / Estimation of hardening depth of workpiece MJ.22-DP.42**

### Opis zadatka:

Potrebno je procijeniti dubinu prokaljivanja strojnog dijela MJ.22-DP.42 nakon kaljenja. Potrebno je teorijski obraditi i opisati pojam prokaljivosti, a zatim opisati i usporediti postojeće metode za procjenu prokaljivosti.

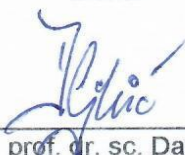
Tvrdoću i dubinu prokaljenog sloja strojnog dijela MJ.22-DP.42 potrebno je procijeniti primjenom Jominyjevog pokusa, na osnovi eksperimentalno utvrđene Jominyjeve krivulje. Potrebno je proanalizirati rezultate Jominyjevog pokusa i donijeti odgovarajuće zaključke. Također, potrebno je opisati postrojenje za izvođenje Jominyjevog pokusa i svu korištenu opremu.

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



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Dario Iljkić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## **IZJAVA**

Ja, Mario Jurić, izjavljujem da sam diplomski rad na temu „Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela MJ.22-DP.42“ napisao samostalno, uz savjete i vodstvo mentora izv. prof. dr. sc. Daria Iljkića.

Prilikom izrade diplomskog rada koristio sam znanje stečeno tijekom diplomskog studija, osobito iz predmeta „Termalni procesi materijala“, savjete mentora te stručnu literaturu navedenu na kraju diplomskog rada.

U Rijeci, svibanj 2023.

Mario Jurić

---

## ZAHVALA

Prvenstveno želim zahvaliti svom mentoru izv. prof. dr. sc. Dariju Iljkiću, najprije što je prihvatio mentorstvo za moj diplomski rad, a zatim i za svo preneseno znanje, savjete, trud i izdvojeno vrijeme tijekom samog studija, a onda i prilikom izrade diplomskog rada. Hvala i asistentu Lovri Liveriću koji mi je pomogao sa praktičnim dijelom diplomskog rada i izlazio u susret kada je to bilo potrebno.

Veliko hvala mojim prijateljima na svim lijepim uspomenama i potpori koju su mi pružali tijekom ovog diplomskog studija.

Najveće hvala mojoj obitelji, ocu Petru, majci Željki i sestri Mariji. Hvala vam na neizmjernoj podršci koju ste mi pružili tijekom studija. Hvala vam na strpljenju, razumijevanju, brizi i svim dobronamjernim savjetima.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. ČELICI .....	2
3. MIKROSTRUKTURNA PRETVORBA PRI TOPLINSKOJ OBRADI ČELIKA .....	4
3.1. Utjecaj legirajućih elemenata na ravnotežni dijagram stanja Fe-Fe <sub>3</sub> C .....	7
3.2. Tvorba austenita .....	10
3.3. Pretvorbe pothlađenog austenita na niskotemperaturne faze .....	12
3.3.1. Pretvorba austenita u perlit .....	12
3.3.2. Martenzitna pretvorba .....	14
3.3.3. Bainitna pretvorba .....	18
3.4. TTT-dijagrami .....	20
3.4.1. Izotermički TTT-dijagram .....	21
3.4.2. TTT-dijagrami za kontinuirano ohlađivanje .....	23
4. KALJIVOST .....	26
4.1. Kaljenje .....	26
4.2. Zakaljivost i prokaljivost čelika .....	30
5. PROCJENA PROKALJIVOSTI .....	32
5.1. Grossmannova metoda ispitivanja prokaljivosti .....	32
5.2. Jominyeva metoda ispitivanja prokaljivosti .....	33
5.3. Crafts–Lamont metoda procjene tvrdoće .....	39
6. PROCJENA PROKALJIVOSTI STROJNOG DIJELA MJ.22-DP.42 .....	42
7. ZAKLJUČAK .....	52
LITERATURA .....	53
POPIS SLIKA .....	55
POPIS TABLICA .....	57
SAŽETAK .....	58
SUMMARY .....	59

# 1. UVOD

Zadatak ovog diplomskog rada je procijeniti dubinu prokaljivanja strojnog dijela MJ.22-DP.42 izrađenog od čelika 20MnCr5. Procjena prokaljivosti nekog čelika vrlo je važna za njegovu primjenu budući da izravno opisuje njegovu tvrdoću. Nisu svi čelici prokaljivi. Općenito, prokaljivi čelici imaju veliku tvrdoću i otpornost na habanje, te se upravo zbog tih svojstava koriste u područjima gdje je velika trajnost i izdržljivost proizvoda od velike važnosti.

Primjer primjene prokaljivih čelika je u automobilskoj industriji gdje se koriste za proizvodnju različitih dijelova motora kao što su klipovi, ležajevi, osovine i ventili budući da upravo oni zahtijevaju visoku tvrdoću uslijed konstantnog pritiska, trošenja i visokih temperatura. Također se koriste za proizvodnju dijelova pogonskog sustava o kojima ovisi pouzdanost i sigurnost samog vozila, primjerice zupčanici i vratila.

Zahvaljujući svojim svojstvima visoke tvrdoće i otpornosti na habanje, prokaljivi čelici se primjenjuju i u građevinskoj industriji za proizvodnju različitih komponenti kao što su šipke, vijci, matice i nosači, odnosno dijelovi koji zahtijevaju veliku pouzdanost i dugotrajnost u određenim uvjetima rada. Također, prokaljivi čelici se koriste za proizvodnju medicinskih instrumenata kao što su različiti kirurški instrumenti koji moraju biti dovoljno tvrdi kako bi zadržali svoj oblik i oštrinu. Iz istog razloga se prokaljivi čelici koriste i u proizvodnji oružja i municije, različitih lanaca korištenih u rudarstvu i građevinarstvu, različitih noževa i opruga, sve zahvaljujući istim svojstvima tvrdoće i otpornosti na habanje.

Kako bi se uopće procijenila prokaljivost nekog čelika, potrebno je najprije poznavati sam pojam čelika i što predstavlja njihovo svojstvo prokaljivosti. Tako će se u prvom dijelu diplomskog rada teorijski objasniti što je to čelik, koja su njegova svojstava, toplinske obrade kojima se može podvrgnuti i iz kojih razloga te će se objasniti svojstvo prokaljivosti kao glavna tema ovog diplomskog rada. U drugom dijelu diplomskog rada provesti će se praktični dio u kojem će se procijeniti tvrdoća strojnog dijela MJ.22-DP.42 načinjenog od čelika 20MnCr5, koristeći teorijsko znanje objašnjeno i usvojeno u prvom dijelu rada.



## 2. ČELICI

Čelik predstavlja metastabilnu kristaliziranu leguru željeza i ugljika sa maksimalnim udjelom ugljika do 2,03%. Pored njih, čeliku se mogu dodati različiti legirni elementi, razni pratioči, kao što su mangan i siliciji, te mogu biti prisutne i nečistoće (npr. fosfor, sumpor i dr.).

Ovisno o sadržaju različitih legirnih elemenata u čeliku, on može imati različita svojstva. Na svojstva čelika, osim vrste i sadržaja legirnih elemenata, utječe i primjena različitih postupaka proizvodnje i prerade, dok najveći utjecaj na obradivost i kvalitetna svojstva čelika ima sadržaj ugljika koji se u odnosu na ukupni maseni sastav kreće od približno 0,002% do 2,03%.

U današnjoj proizvodnji i primjeni, čelici predstavljaju najvažniji tehnički materijal. Više od 50% ukupne svjetske proizvodnje svih tehničkih materijala pripada čeliku, budući da njegova proizvodnja na svjetskoj razini premašuje 900 milijuna tona. Razlog zbog kojega se čeliku daje prednost u primjeni krije se u kombinaciji njegovih svojstava – čvrstoće, žilavosti, obradivosti, mogućnosti spajanja, sposobnosti oblikovanja deformacijom, mogućnosti mijenjanja svojstava legiranjem, toplinskom obradom i obradom deformiranjem, te relativno niske cijene. [1]

Jedan od načina promjene svojstava čelika, odnosno njegove mikrostrukture, je toplinska obrada. Toplinska obrada podrazumijeva tehnološki proces ugrijavanja slitine do pojedine temperature, držanja na toj temperaturi izvjesno vrijeme te ohlađivanja na određeni način i određenim brzinama kojima se postiže željena mikrostruktura, a samim time i željena svojstva čelika. Postoje različiti načini toplinske obrade čelika, a najvažniji su kaljenje, popuštanje, poboljšavanje i žarenje.

Svaki čelik se može opisati i sistematizirati obzirom na [1]:

- a) kemijski sastav
- b) način proizvodnje
- c) mikrostrukturu
- d) područje primjene
- e) svojstva
- f) oblik i stanje

Prema kemijskom sastavu, čelici mogu biti [1]:

- zajamčenog ili nezajamčenog sastava
- prema kvaliteti, odnosno masenom udjelu S i P: masovni, kvalitetni (ujednačena kvaliteta) i plemeniti (visoka kvaliteta)
- legirani i nelegirani (ugljični) – jednostruko ili višestruko, niskolegirani ili visokolegirani
- prema vrsti legirnih elemenata razlikujemo: Cr, Mn, W, Mo, Ni, V, Si – čelike ili Cr-Mo, Cr-Mn, Cr-Ni, Si-Mn čelike ili W-Cr-V, Cr-Ni-Mo čelike

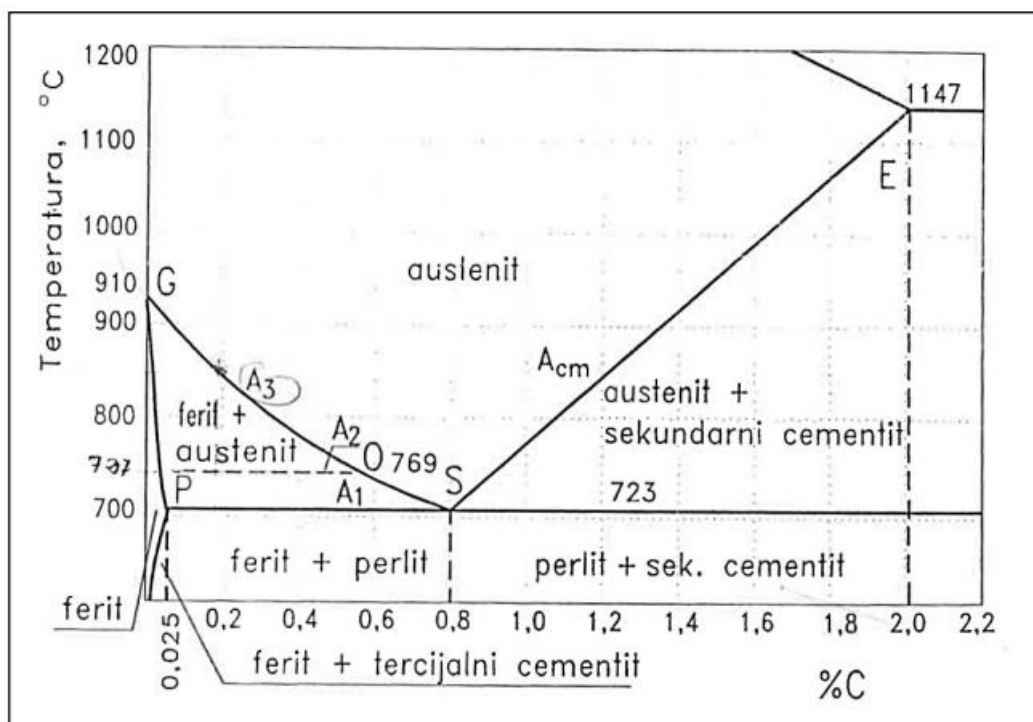
Obzirom na način proizvodnje razlikujemo:

- konverterski (dobiva se Bessemerovim ili Thomasovim postupkom)
- kisikovim konvertorima (upuhivanjem zraka ili kisika)
- pretaljivanjem pod troskom (EPT)
- elektropretaljivanjem
- sekundarnom metalurškom obradom (tzv. lončanom metalurgijom): vakuumskim pročišćavanjem (VOD – Vacuum Oxygen Degasation); otplinjavanjem pod argonom (AOD – Argon Oxygen Degasation) [1]

Obzirom na tip mikrostrukture razlikuju se feritni čelici, perlitni, feritno-perlitni, austenitni, martenzitni, ledeburitni, bainitni, itd. Različite šipke, trake, limovi i cijevi predstavljaju osnovne oblike čeličnih poluproizvoda, a mogu biti lijevani, kovani, toplovaljani, hladnovaljani, brušeni i polirani, hladnovučeni i sl. [1]

### 3. MIKROSTRUKTURNA PRETVORBA PRI TOPLINSKOJ OBRADI ČELIKA

Struktura čelika u ravnotežnom stanju se određuje pomoću ravnotežnog dijagrama stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C koji predstavlja osnovu pri analizi toplinske obrade čelika. Prikazan na slici 3.1, na njemu se mogu uočiti karakteristična fazna područja te kritične temperature njihovih pretvorbi koje vrijede u uvjetima dovoljno sporog ohlađivanja ili ugrijavanja čelika.

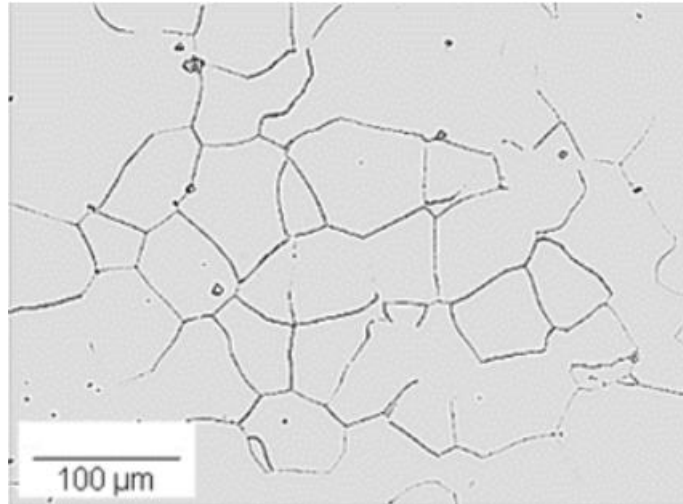


Slika 3.1 Metastabilni fazni dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C [2]

Na dijagramu su slovom „A“ označene kritične temperature faznih pretvorbi kojima se, ovisno radi li se o ohlađivanju ili zagrijavanju, pridružuje odgovarajući indeks. Ukoliko je riječ o ohlađivanju, dodaje se indeks „r“, dok se zagrijavanje označava indeksom „c“.

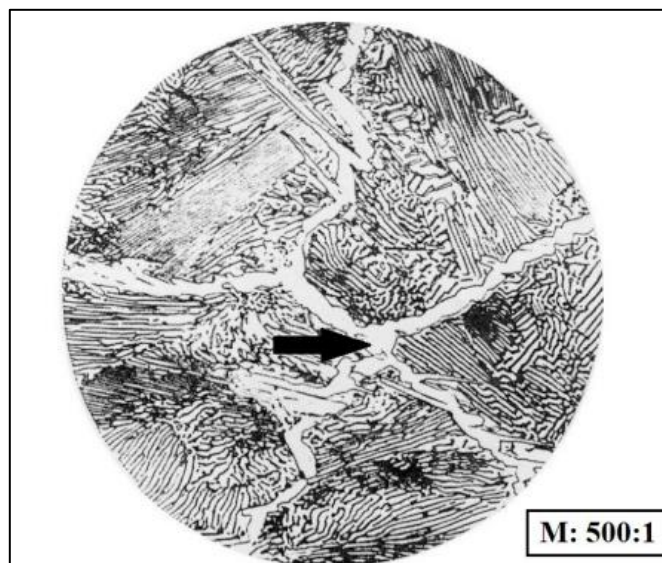
Prema Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagramu, mikrostrukturni sastojci čelika su [2]:

- ferit ( $\alpha$ -faza) – uključinski kristal mješanac željeza i ugljika s prostorno centriranom kubičnom rešetkom, odnosno kruta otopina ugljika u  $\alpha$ -željezu s najviše 0,025% C



*Slika 3.2 Metalografski prikaz feritne strukture [3]*

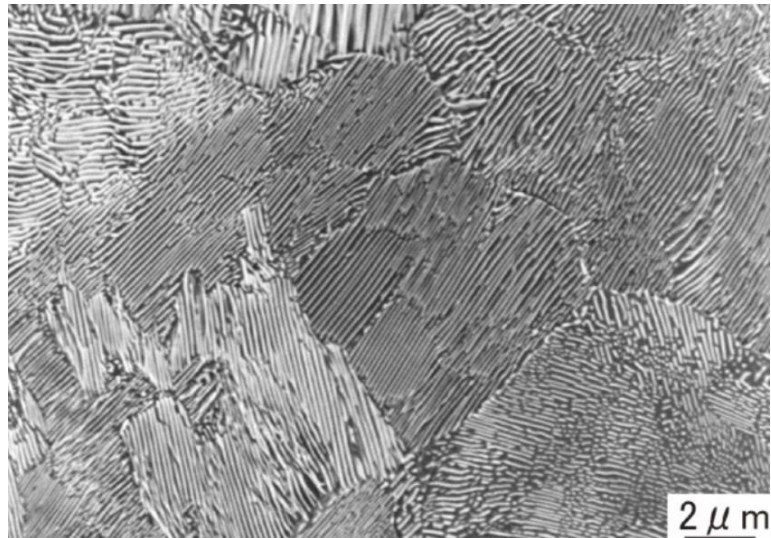
- sekundarni cementit – kemijski spoj, željezni karbid  $\text{Fe}_3\text{C}$  sa 6,67% C



*Slika 3.3 Metalografski prikaz strukture sekundarnog cementita [4]*

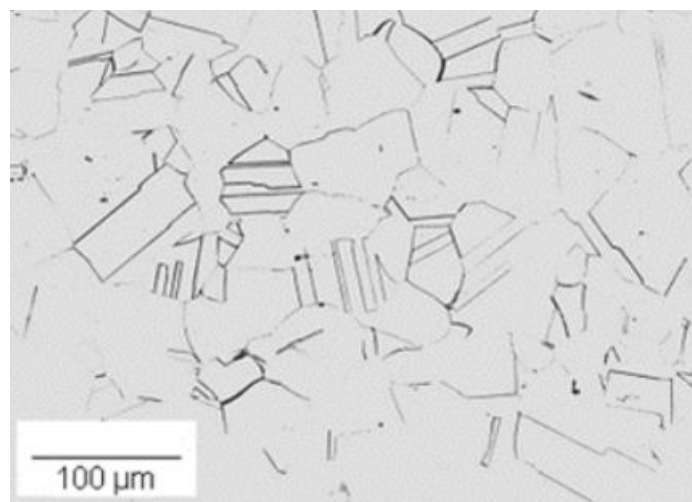
- perlit – eutektoid sastavljen od eutektoidnih kristala ferita i cementita

Eutektoidom, odnosno perlitom, se naziva čelik koji sadrži 0,8% C. Prema tome, čelik s udjelom ugljika ispod 0,8% C naziva se podeutektoidnim (potperlitnim ili hipoeutektoidnim) čelikom, dok će se nadeutektoidnim (natperlitnim ili hipereutektoidnim) čelikom zvati čelik sa sadržajem ugljika u rasponu 0,8-2,03% C.



*Slika 3.4 Metalografski prikaz perlitne strukture [6]*

- austenit ( $\gamma$ -faza) – uključinski kristal mješanac željeza i ugljika s plošno centriranom kubičnom rešetkom, definira se i kao kruta otopina ugljika u  $\gamma$ -željezu s najviše 2,03% C [7]



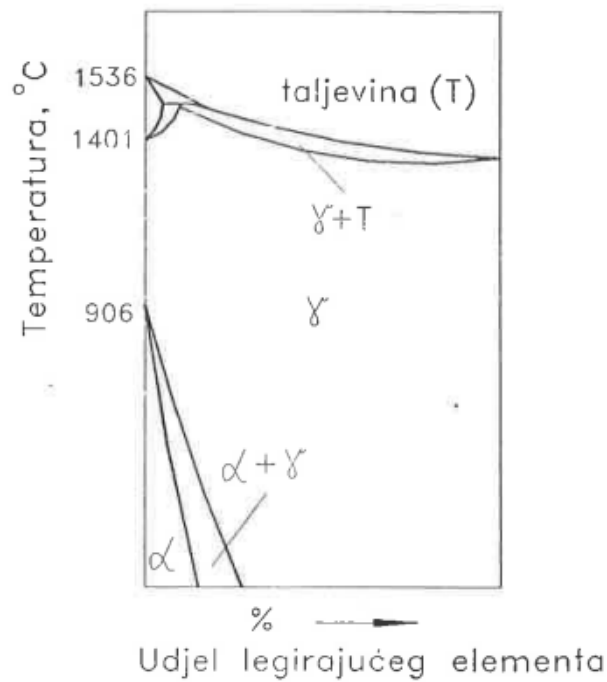
*Slika 3.5 Metalografski prikaz austenitne strukture [3]*

### 3.1. Utjecaj legirajućih elemenata na ravnotežni dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C

U prvom poglavlju je navedeno kako čelici, pored ugljika i željeza, sadrže i redovite pratioce, nečistoće, različite legirne elemente koji utječu na karakteristične temperature fazne pretvorbe, topivost ugljika u fazama čelika čime je osigurana velika kompleksnost i mogućnost toplinske obrade čelika. Takvi dodaci, ovisno o njihovoj vrsti, mogu sami ili sa željezom tvoriti karbide i intermetalne spojeve.

Karbidotvorni elementi prisutni u čeliku, pored željeza, poredani po sklonosti stvaranja karbida su: titan, niobij, vanadij, volfram, molibden, krom te mangan. Ovi elementi ulaze u kristalnu rešetku cementita te pri tome u relativno maloj količini formiraju (Fe,Me)<sub>3</sub>C, legirani cementit koji se malo razlikuje od običnog cementita. S druge strane, pri višim koncentracijama ovih elemenata stvaraju se posebni karbidi koji su uglavnom izrazito tvrdi i teško taljivi. Primjer posebnih karbida su karbid titana TiC, karbid vanadija V<sub>4</sub>C<sub>3</sub>, karbid volframa W<sub>2</sub>C, karbid kroma Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, itd. Također, takvi karbidi mogu primati i željezo, npr. (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, a ponekad se mogu stvarati i dvostruki karbidi (npr. Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C). [2]

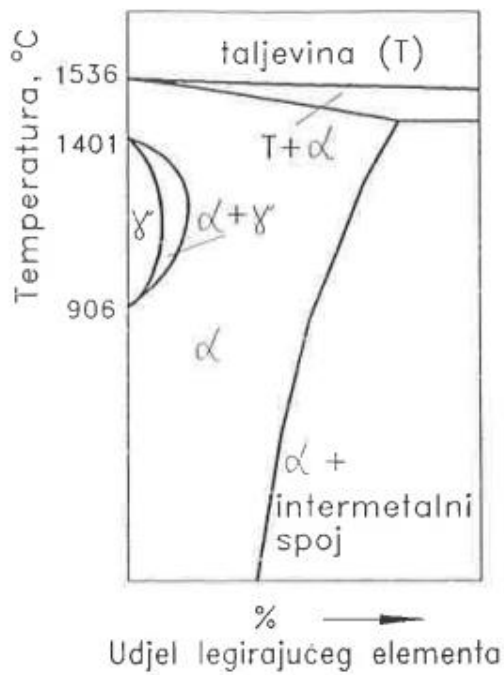
Velik utjecaj na dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C imaju tzv.  $\gamma$ -geni elementi koji snižavaju linije P-S-K, G-S i S-E iz dijagrama stanja što znači da proširuju područje austenita. Elementi koji se nazivaju  $\gamma$ -genim elementima su nikal, mangan, kobalt i bakar, te se pri njihovoj određenoj količini u čeliku, temperatura fazne pretvorbe A<sub>3</sub> može sniziti ispod sobne temperature. Utjecaj  $\gamma$ -genih elemenata na sustav Fe-Me (metal) može se primijetiti na slici 3.6. [7]



Slika 3.6 Utjecaj  $\gamma$ -genih elemenata na sustav Fe-Me [7]

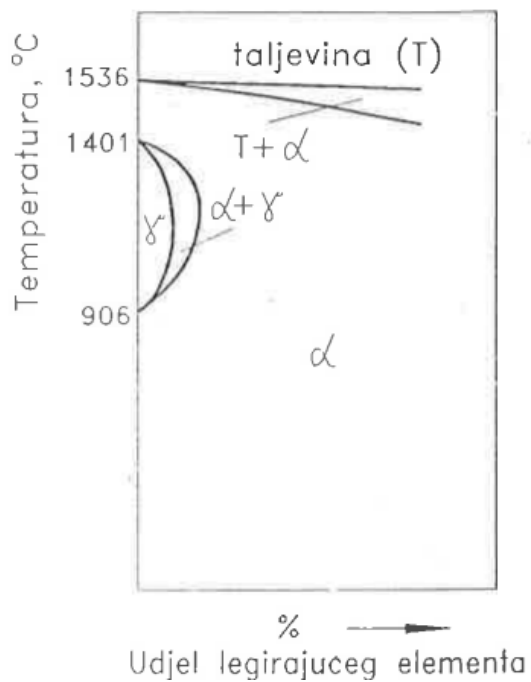
S druge strane, dodavanjem tzv.  $\alpha$ -genih elemenata proširuje se područje stabilnosti feritne faze, odnosno linije temperatura P-S-K, G-S te S-E se u dijagramima povisuju. Ovi elementi snižavaju koncentraciju maksimalne topivosti ugljika u  $\gamma$ -željezu, te se legiranjem čelika ovim elementima, pri nižim koncentracijama ugljika, može pojaviti ledeburit. Ledeburit predstavlja eutektičku smjesu cementita i austenita, ima maseni udio ugljika oko 4,3%, a temperatura nastanka je 1147 °C.

Poredani po utjecaju na proširenje feritnog područja,  $\alpha$ -geni elementi su: vanadij, titan, volfram, molibden, silicij i krom. Ne uzimajući u obzir krom i vanadij, pri dodatku viših koncentracija navedenih elemenata pojavljuje se intermetalni spoj (slika 3.7).



Slika 3.7 Utjecaj većine  $\alpha$ -genih elemenata na sustav Fe-Me [7]

Za razliku od ostalih, vanadij i krom sa željezom ne tvore intermetalne spojeve, pa se dodavanjem tih elemenata  $\alpha$ -područje proteže do 100% tih elemenata. Njihov utjecaj može se uočiti na slici 3.8 [2]



Slika 3.8 Utjecaj  $\alpha$ -genih elemenata (vanadij i krom) na sustav Fe-Me [7]



Dok se čelici sa određenom količinom  $\gamma$ -genih elemenata, kada je temperatura  $A_3$  niža od sobne temperature, nazivaju austenitni čelici, čelici s otvorenim feritnim područjem se nazivaju feritni čelici.

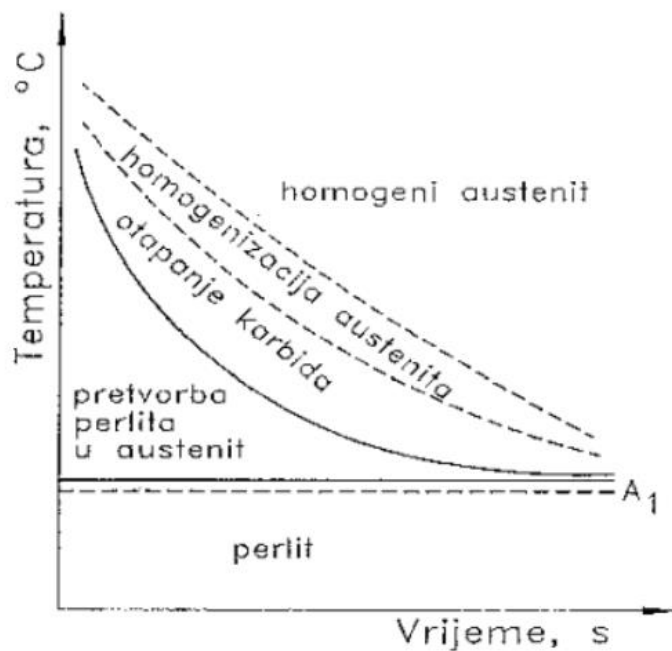
### 3.2. Tvorba austenita

Austenitna mikrostruktura nastaje difuzijskim mehanizmom kada dvije faze različitih kemijskih sastava (ferit i cementit) prelaze u treću fazu, odnosno austenit. Ta pretvorba nastaje u slučaju kada slobodna energija austenita bude dovoljno manja od slobodne energije koju ima feritno-karbidna smjesa. Pri tome je također potrebno dovoljno vremena kako bi se difuzijski mehanizam uspio odviti. Drugim riječima, feritno-karbidna smjesa se pretvara u austenit kada se zbog povišene temperature ostvare potrebni termodinamički i kinetički uvjeti potrebni za nastanak samog austenita.

Minimalnu količinu slobodne energije austenit ima na granici feritne i cementitne faze, te na toj granici on i najlakše nastaje. Austenitna faza dalje raste difuzijom ugljika u novonastaloj fazi, odnosno austenitu, a o brzini te difuzije ugljika u novonastaloj fazi ovisi brzina austenitne pretvorbe što je eksperimentom i utvrđeno.

Minimalna koncentracija ugljika u austenitu se nalazi na granici austenita s feritnom fazom te odgovara liniji GS u dijagramu stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C, dok se maksimalna koncentracija ugljika u austenitu nalazi na granici austenita s karbidnom fazom te odgovara liniji SE u dijagramu stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C. [2]

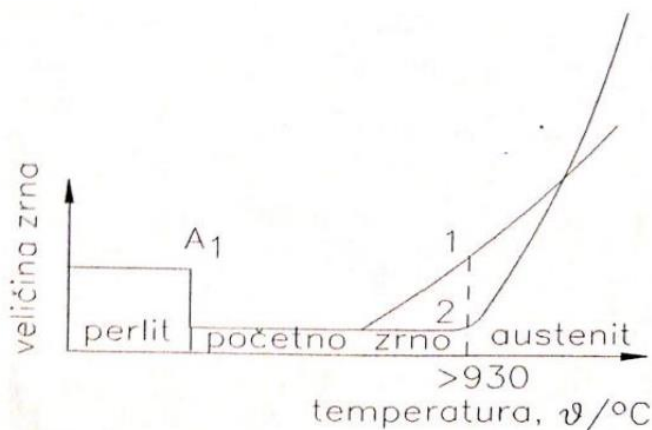
Na slici 3.9 prikazan je dijagram izotermičke tvorbe austenita. Na dijagramu je prikazana ovisnost temperature i brzine austenitne pretvorbe, te se može uočiti kako se povišenjem temperature proces austenitne pretvorbe ubrzava.



Slika 3.9 Shematski prikaz dijagrama izotermičke tvorbe austenita [2]

Proces dobivanja austenita započinje pretvorbom perlita u austenit, nakon čega slijedi otapanje karbida čime se dobije nehomogeni austenit. Kako bi se dobio konačni homogeni austenit, potrebno je još vremena za homogenizaciju austenitnih zrna.

Kristalno zrno austenita raste dodatnim držanjem čelika na povišenim temperaturama. Na slici 3.10 prikazana je promjena veličine kristalnog zrna ovisno o temperaturi.



Slika 3.10 Promjena veličine kristalnog zrna austenita ovisno o temperaturi [2]

Povećanje austenitnog zrna spontan je proces prilikom kojeg se smanjuje slobodna energija. Prema sklonosti rastu austenitnog zrna mogu se razlikovati dvije vrste čelika: sitnozrnati i krupnozrnati. Povoljnija mehanička svojstva u pravilu imaju čelici sa finom sitnozrnatom mikrostrukturom. [2]

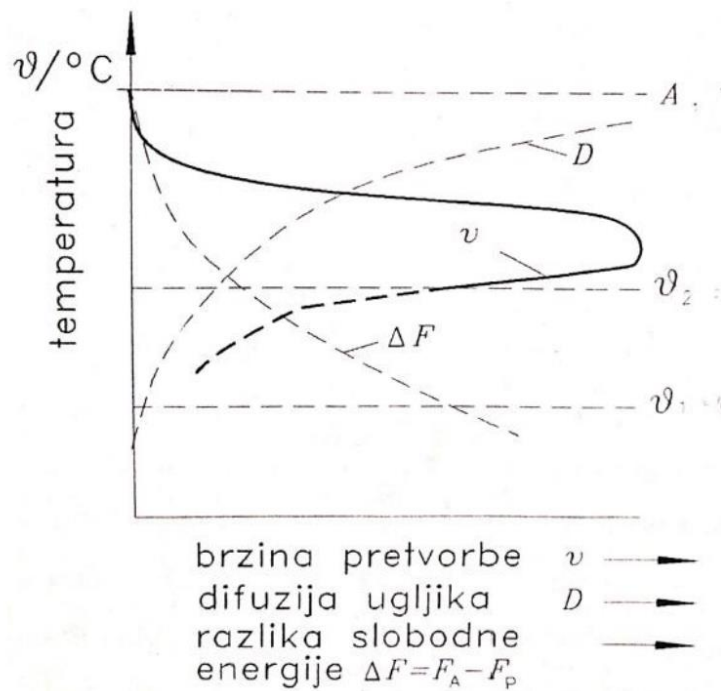
### **3.3. Pretvorbe pothlađenog austenita na niskotemperaturne faze**

U slučaju da se čelik hladi ispod ravnotežne temperature  $A_1$  ( $A_3$ ,  $A_{cm}$ ), austenit će težiti raspadu na niskotemperaturne faze budući da postaje nestabilan. Koja faza će nastati, ovisi o mehanizmima raspadanja na faze koji se razlikuju ovisno o brzini ohlađivanja. [2]

#### **3.3.1. Pretvorba austenita u perlit**

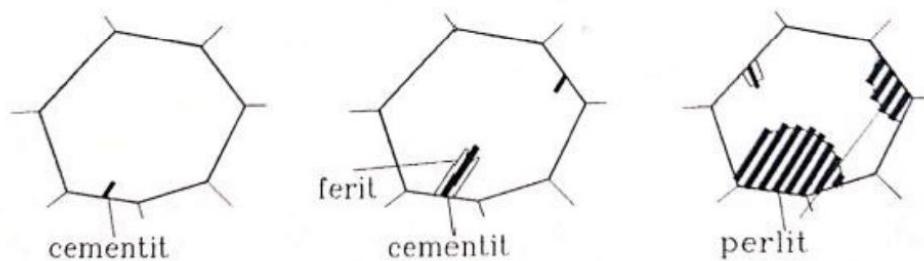
U koliko se austenita hladi sporije pomoću mehanizma difuzije na temperature niže od ravnotežne temperature, on se raspada na dvije nove faze, ferit i cementit (karbid željeza). Sadržaj ugljika u cementitu je 6,67% C, dok s druge strane ferit ima dosta manji sadržaj ugljika, manji od 0,025%.

Da bi se perlitna pretvorba ostvarila, potrebno je zadovoljiti uvjet energetske stabilnosti, odnosno dovoljnu razliku između slobodnih energija početne austenitne faze i konačne perlitne faze, te mora biti zadovoljena difuzija atoma. Na slici 3.11 dijagramom je shematski prikazana ovisnost brzine perlitne pretvorbe o temperaturi. [2]



Slika 3.11 Ovisnost brzine perlitne pretvorbe i temperature [2]

Budući da je na temperaturi  $A_1$  razlika slobodnih energija austenita i perlita jednaka nuli, te da ispod temperature  $\vartheta_1$  (približno oko  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ) nema difuzije ugljika potrebne za raspad austenita, nego je on moguć samo ispod temperature  $A_1$  i temperature  $\vartheta_1$ , u tom području koje se naziva perlitno područje započinje pretvorba perlita pojavom klica cementita. Klince cementita se pojavljuju na granicama austenitnih zrna te rastu prema unutarnjim slojevima zrna. Okolni dio cementita se pretvara u ferit budući da to područje cementita postaje siromašno ugljikom. Shematski prikaz perlitne pretvorbe prikazan je na slici 3.12. [2]



Slika 3.12 Shematski prikaz perlitne pretvorbe [2]

Također, pri raspadu pothlađenog austenita, u nadeutektoidnom čeliku dolazi do smanjenja količine sekundarnog cementita, dok se kod podeutektoidnog čelika smanjuje količina ferita. Na nižim temperaturama se povećava razlika slobodnih energija, povećava se broj potencijalnih klica novih faza te se smanjuje difuzija ugljika u austenitu, što za rezultat daje finolamelarni, tvrd i čvrst perlit. S druge strane, na višim temperaturama se stvara grubolamelarni, meki perlit.

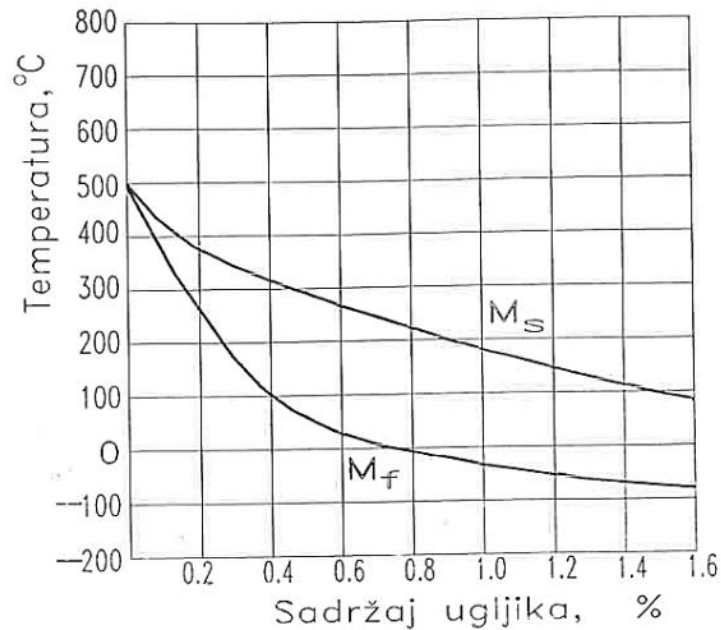
Brzina perlitne pretvorbe ovisi o:

- stabilnosti austenita,
- brzini nicanja novih faza,
- brzini rasta novih faza. [2]

### 3.3.2. Martenzitna pretvorba

Mehanizam pretvorbe je bezdifuzijski te se sastoji od procesa smicanja gdje se atomi u FCC kristalnoj rešetki  $\gamma$ -željeza, pri dovoljno brzom hlađenju (gašenju), na temperaturi otprilike 410 °C, pomiču uzduž karakterističnih pravaca, tako da na kraju zauzmu položaje koji odgovaraju BCC kristalnoj rešetki  $\alpha$ -željeza. Na taj način se  $\gamma$ -željezo s FCC kristalnom rešetkom transformira u  $\alpha$ -željezo koje ima BCC kristalnu rešetku, te se takva pretvorba naziva martenzitna pretvorba i ona je u čeliku anizotermička. Dobiveni martenzit ima prostorno centriranu tetragonalnu kristalnu rešetku (BCT).

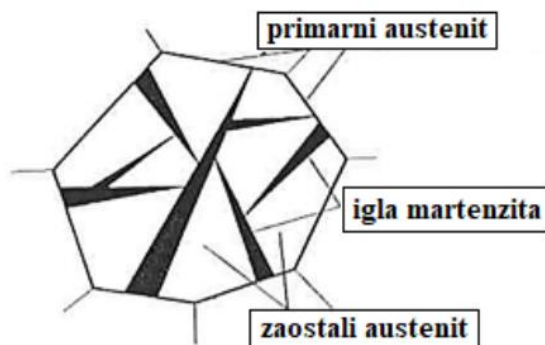
Temperatura na kojoj martenzitna pretvorba počinje označava se sa  $M_s$  („*Martensite Start*“), dok je završetak pretvorbe na konačnoj temperaturi  $M_f$  („*Martensite Finish*“). Navedene temperature nisu ovisne o brzini ohlađivanja, nego o sadržaju ugljika i legirajućih elemenata u prethodnoj austenitnoj fazi. Sadržaj ugljika u martenzitu jednak je sadržaju ugljika u prethodnom austenitu. Na slici 3.13 prikazan je utjecaj sadržaja ugljika na temperature  $M_s$  i  $M_f$ , karakteristične za martenzitnu pretvorbu. [2]



Slika 3.13 Utjecaj sadržaja ugljika na temperature martenzitne pretvorbe [2]

Martenzit nije moguće dobiti izravno od smjese ferita i karbida budući da on uvijek ima veću slobodnu energiju od njihove smjese. Iz tog razloga, feritno-karbidnu smjesu najprije je potrebno pretvoriti u austenit, grijanjem čelika do austenitnog područja. Nakon toga, austenit se gasi kako bi se dobila martenzitna struktura. Proces koji se odvija prije gašenja čelika naziva se austenitizacija čelika, koja u kombinaciji sa njegovim naknadnim gašenjem, u svrhu dobivanja martenzitne mikrostrukture, čini postupak toplinske obrade koji se naziva kaljenje čelika, a tako dobiven čelik naziva se zakaljeni čelik.

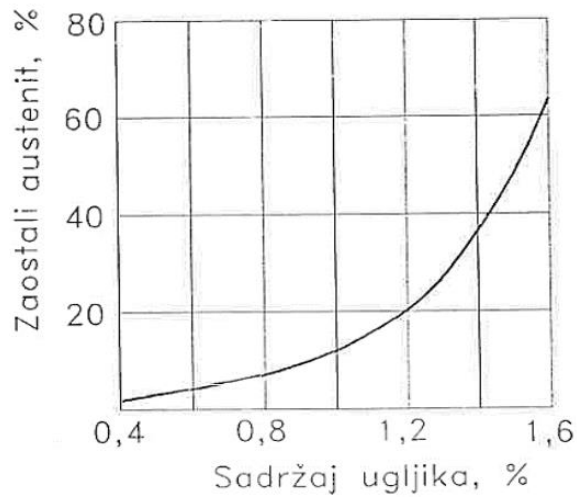
Dobiveni martenzit ima igličastu strukturu prikazanu na slici 3.14, gdje se između iglica nalazi zaostali austenit koji je u većoj količini nepoželjan, posebno ukoliko je izdvojen u posebna zrna.



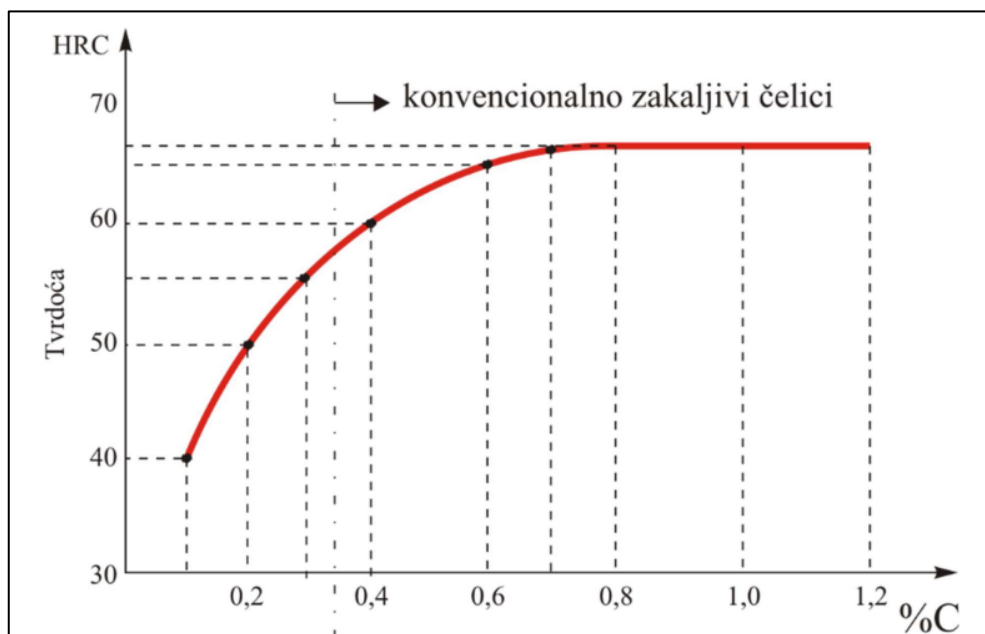
Slika 3.14 Igličasta struktura martenzita [2]

Na sadržaj zaostalog austenita utječe sadržaj ugljika u primarnom austenitu te legirajući elementi, no samo u slučaju kada su otopljeni u austenitu budući da samo tada utječu na temperature martenzitne pretvorbe. Povećanjem temperature martenzitne pretvorbe, snižava se količina zaostalog austenita i obratno. Tako će količinu zaostalog austenita povećavati mangan (Mn), krom (Cr), nikal (Ni), vanadij (V) i molibden (Mo), budući da snižavaju temperature martenzitne pretvorbe, dok će količinu zaostalog austenita smanjivati kobalt (Co) i aluminij (Al), budući da povisuju temperature martenzitne pretvorbe.

Sadržaj ugljika u primarnom austenitu ima veliku ulogu u martenzitnoj strukturi. Porastom sadržaja ugljika u primarnom austenitu, količina zaostalog austenita u martenzitnoj strukturi će također rasti, što se može uočiti na slici 3.15. Osim toga, povećanjem sadržaja ugljika, tvrdoća martenzitne strukture raste, dok se smanjuje žilavost. Tako će martenzit sa većim sadržajem ugljika biti tvrdi i krhkiji, kako je i prikazano u Burnsovom dijagrama (slika 3.16).



Slika 3.15 Rast zaostalog austenita u martenzitnoj strukturi izazvan porastom sadržaja ugljika u primarnom austenitu [2]



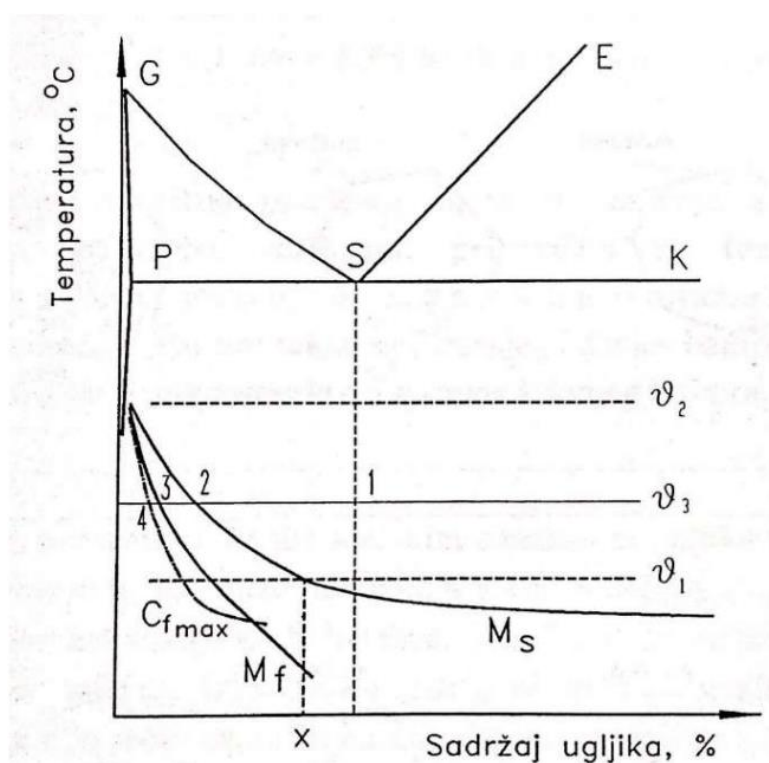
Slika 3.16 Burnsov dijagram [8]

Iz Burnsovog dijagrama se može uočiti kako tvrdoća naglo raste do sadržaja ugljika 0,5% C, nakon čega se uočava blaži porast tvrdoće za  $C > 0,5\%$ , dok će se za sadržaj ugljika  $C > 0,9\%$  porast tvrdoće praktički zaustaviti uslijed povećanja količine tvrdog željeznog karbida i mekog zaostalog austenita.



### 3.3.3. Bainitna pretvorba

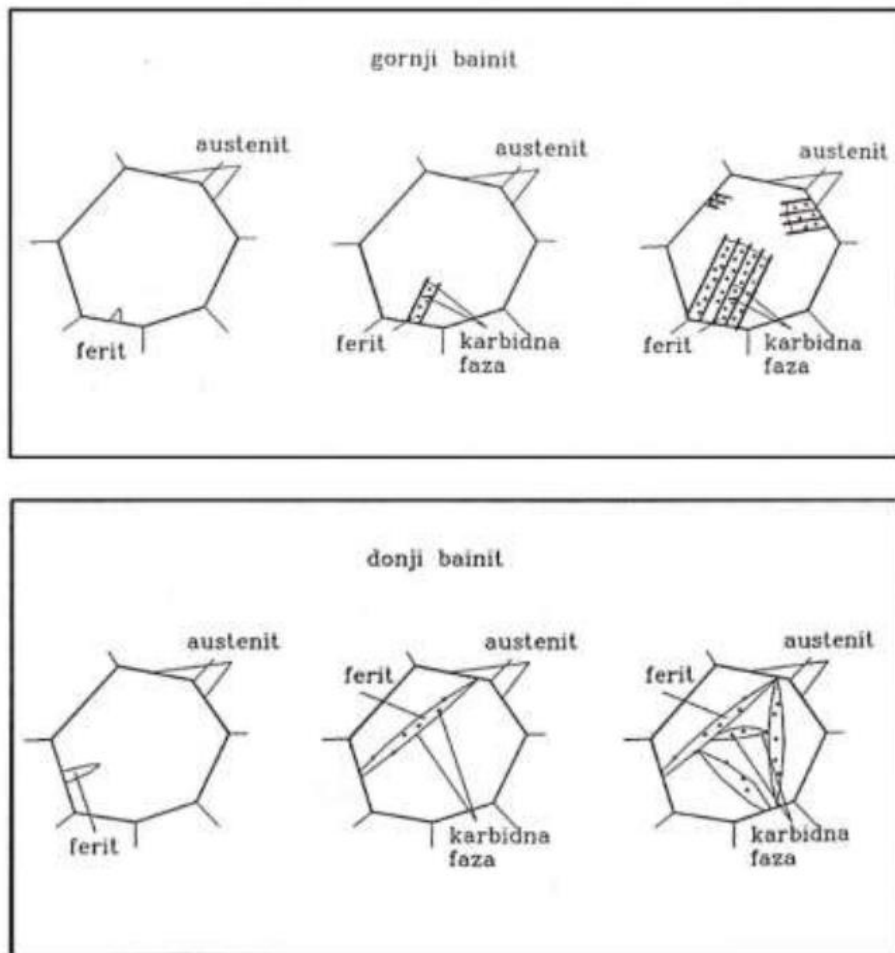
Bainitna pretvorba se odvija kada se austenit dijelom raspada bezdifuzijskim, a dijelom difuzijskim mehanizmom. Koji mehanizam će biti intenzivniji tijekom pretvorbe ovisi o temperaturi same pretvorbe. Bezdifuzijski procesi će biti intenzivniji na nižim temperaturama, dok će pri višim temperaturama biti intenzivniji difuzijski procesi. Budući da se temperaturno područje bainitne pretvorbe nalazi između područja perlitne i martenzitne pretvorbe, odnosno između temperatura  $\vartheta_1$  i  $\vartheta_2$ , bainit, fino dispergirana mješavina prezasićenog ferita i karbida, još se naziva i međustupanj. Temperaturno područje bainitne pretvorbe se može uočiti na slici 3.17.



Slika 3.17 Grafički prikaz područja bainitne pretvorbe [2]

Da bi se bainitna pretvorba mogla ostvariti, potrebno je zadovoljiti dva uvjeta. Prvi uvjet je da se osiromašeni austenit dovoljno pothladi za smičnu pretvorbu u martenzit, ispod krivulje 2, odnosno 3 na slici 3.17, dok je drugi uvjet dovoljna difuzija ugljika koja je znatno veća u  $\alpha$ -rešetki nego u  $\gamma$ -rešetki.

Po strukturi se razlikuju gornji i donji bainit, prikazani na slici 3.18. Na višim temperaturama, u području od 500 °C do 350 °C, formira se gornji bainit koji smanjuje plastičnost čelika. Na nižim temperaturama, u području od 350 °C do temperature početka martenzitne pretvorbe  $M_s$ , formira se donji bainit koji ima igličastu strukturu koja podsjeća na martenzit te osigurava dobru plastičnost i žilavost.



Slika 3.18 Shematski prikaz bainitne pretvorbe [2]

Bainitna pretvorba započinje difuzijskim gibanjem atoma ugljika u pothlađenom austenitu, gdje zatim nastaju područja austenita sa manjim ili većim sadržajem ugljika. Austenit osiromašen ugljikom se transformira po mehanizmu martenzitne pretvorbe te nastaje niskougljični martenzit koji je nestabilan i odmah na temperaturi međufaznog područja stvara bainitnu strukturu. Ako je u austenitu obogaćenom ugljikom prezasićenost ugljikom velika, u procesu izotermičkog razlaganja se izdvajaju čestice cementita ( $Fe_3C$ ), što dovodi do osiromašivanja austenita ugljikom i njegove daljnje transformacije sve do nastajanja bainitne mikrostrukture. Budući da se

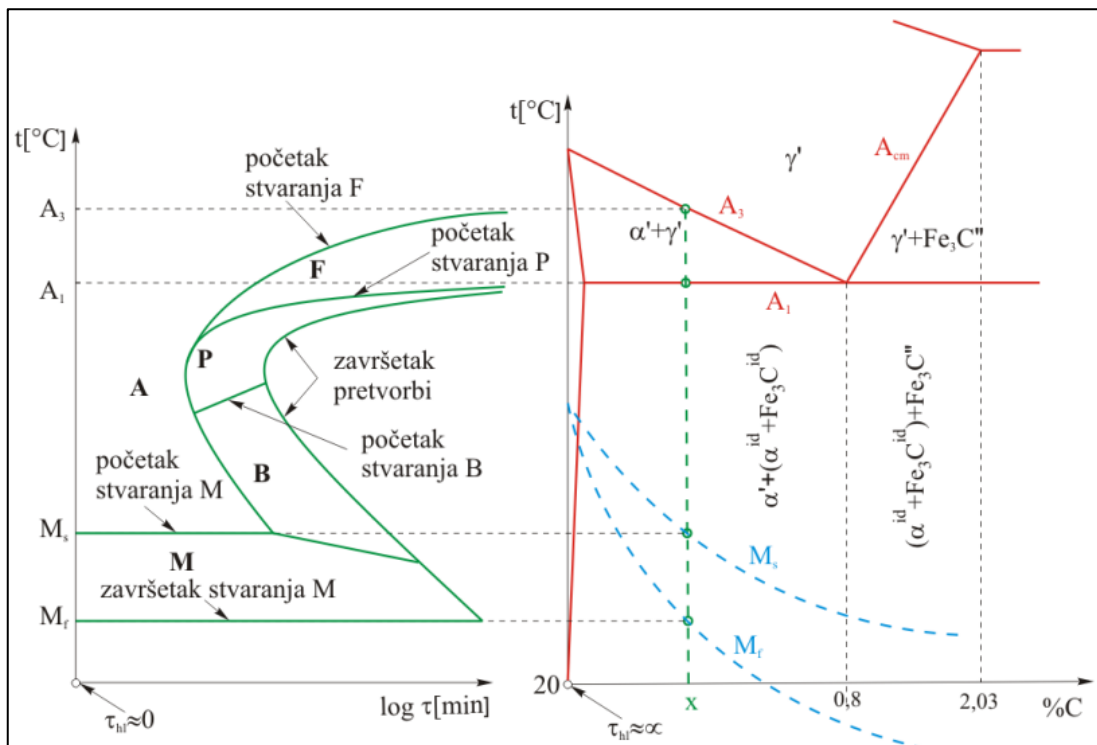
međufazna pretvorba austenita i martenzitna pretvorba ne odvijaju u potpunosti, te prethodno navedeni uvjeti nisu uvijek u cijelosti ispunjeni, u strukturi čelika se prilikom pretvorbe, osim bainita može pojaviti i određena količina zaostalog austenita koji nije poželjan. [2]

### 3.4. TTT-dijagrami

Budući da su u praksi brzine hlađenja uglavnom veće od metastabilne, faze nastale većim brzinama hlađenja su bitno drugačije od onih koje se nalaze u metastabilnom Fe-C dijagramu. Tako će pri većim brzinama hlađenja nastati martenzit uz određenu količinu zaostalog austenita, pri jako malim brzinama hlađenja nastaju metastabilne faze, odnosno ferit, lamelarni perlit i sekundarni cementit, a između tih dviju ekstremnih brzina nastaju smjesa cementita i ferita (što je brzina hlađenja veća, to je njihova struktura finija).

Zbog toga, Fe-C dijagram ne može dati uvid u faze i količine faza koje nastaju prvi većim brzinama hlađenja, već je potrebno promjenu faza i temperaturu u dijagramu prikazati kao vremensku funkciju. Iz tog razloga se koristi TTT-dijagram (*Time, Temperature, Transformation*; vrijeme, temperatura, pretvorba), koji prikazuje dinamiku faznih pretvorbi pri ubrzanom hlađenju austenita za zadani čelik. Tako će čelici različitog kemijskog sastava imati različite TTT-dijagrame koji vrijede za odabranu temperaturu austenitizacije, a izrađuju se eksperimentalnim ispitivanjima toga čelika u posebnim uvjetima.

Kako bi se TTT-dijagram konstruirao, metastabilni Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram, na kojemu su prikazane temperature austenitizacije, te Uptonov dijagram koji predstavlja dijagram početka i završetka martenzitne pretvorbe, kombinira se sa dijagramom temperatura-vrijeme ( $\vartheta, t$ ).



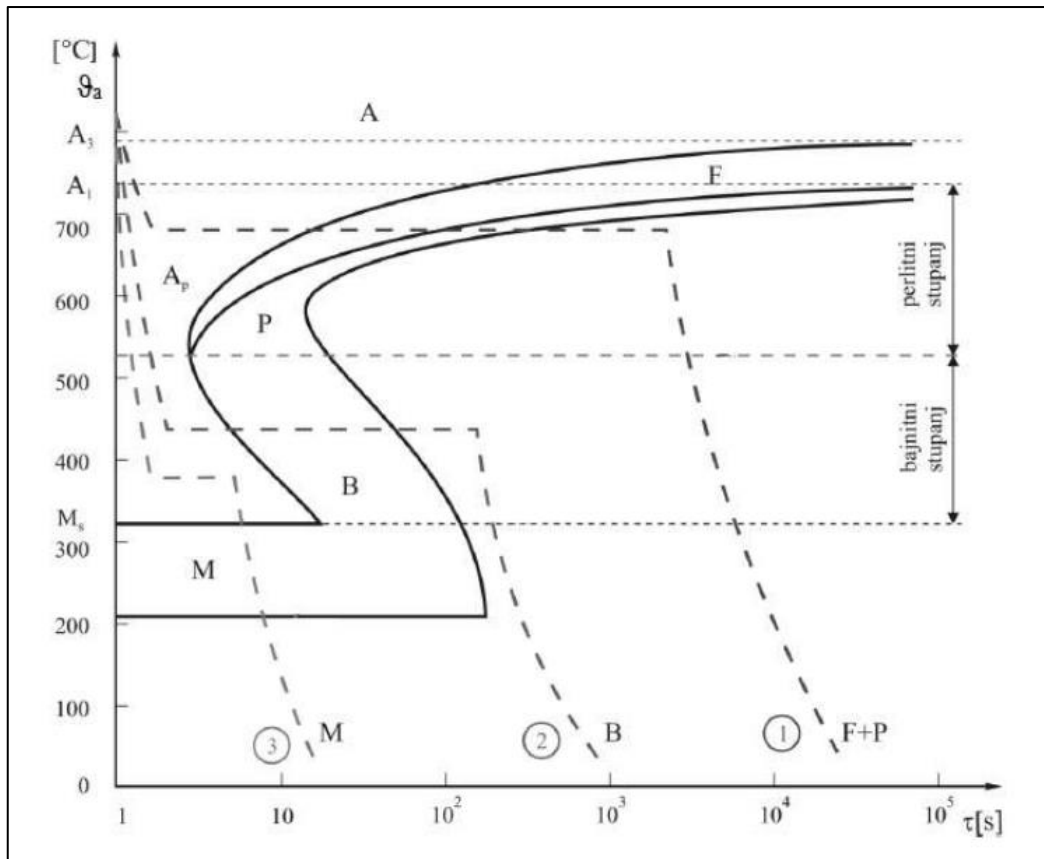
Slika 3.19 Konstrukcija TTT-dijagrama [10]

Razlikuju se dva načina raspada austenita, pri izotermičkim uvjetima, gdje se pretvorba austenita odvija pri jednoj konstantnoj temperaturi, te pri kontinuiranim uvjetima ohlađivanja, gdje temperatura kontinuirano za vrijeme pretvorbe opada. Tako se, ovisno o načinu raspada austenita, razlikuju izotermički TTT-dijagrami i TTT-dijagrami za kontinuirano ohlađivanje.

### 3.4.1. Izotermički TTT-dijagram

Izotermički TTT-dijagrami se čitaju samo duž izoterma, prikazuju vrijeme početka i kraja pretvorbe za određenu temperaturu te omogućavaju procjenu mikrostrukture i tvrdoću obrađenog čelika. U dijagram se simbolički, velikim slovima upisuju područja stvaranja pojedinih struktura, gdje: *A* predstavlja područje čistog austenita, *F* područje pretvorbe austenita u primarni ferit, *P* područje pretvorbe austenita u perlit, *B* područje pretvorbe austenita u bainit te *M* područje pretvorbe austenita u martenzit. Također se upisuju temperatura martenzitne pretvorbe  $M_s$ , tvrdoća i količina pojedinih struktura u postocima te temperatura i vrijeme austenitizacije.

Prilikom konstrukcije izotermičkog TTT-dijagrama, uzorci zadanog čelika se potpuno austenitiziraju, a zatim se izotermički hlade do određene temperature na kojoj se zadržavaju sve dok se ne izvrši pretvorba, djelomično ili u potpunosti. Na slici 3.20 prikazan je izotermički TTT-dijagram za podeutektoidni ugljični čelik koji sadrži oko 0.5% C.



Slika 3.20 Izotermički TTT-dijagram za podeutektoidni čelik [10]

Na slici 3.20 su prikazani i postupci toplinske obrade koji se obično prate izotermičkim TTT-dijagramima, označeni su crtkanim krivuljama te predstavljaju sljedeće postupke toplinske obrade:

- 1) izotermičko žarenje
- 2) izotermičko poboljšavanje („austempering“)
- 3) gašenje u toploj kupki („martempering“) [11]

### 3.4.2. TTT-dijagrami za kontinuirano ohlađivanje

Prilikom kontinuiranog ohlađivanja mijenjaju se uvjeti, odnosno temperatura, raspada austenita, te je u pravilu, u takvom slučaju struktura zapravo mješavina struktura niskotemperaturnog i visokotemperaturnog raspada austenita.

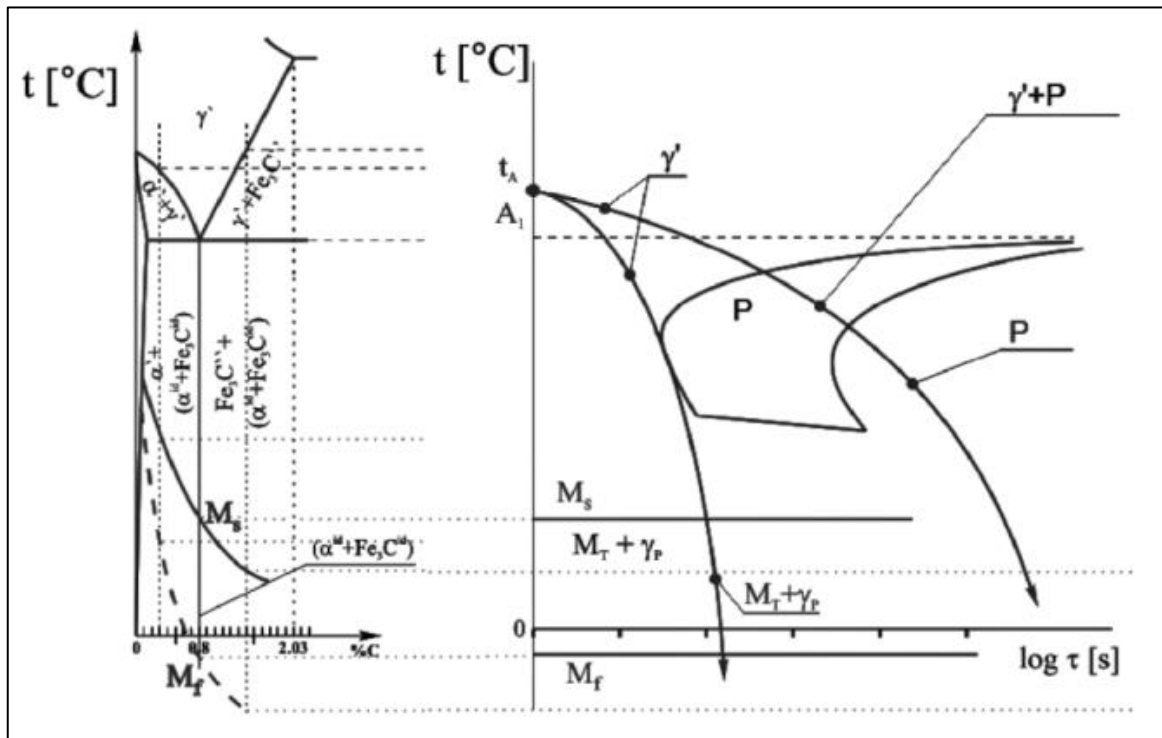
Dok se izotermički TTT-dijagrami koriste za prikazivanje vremena početka i vremena kraja pretvorbe za određene temperature, prilikom kontinuiranog ohlađivanja, TTT-dijagrami će prikazati vremena početka i vremena kraja pretvorbi za različite brzine ohlađivanja. Osim vremena početka i kraja pretvorbe, mogu se odrediti i tvrdoća i struktura nakon ohlađivanja. Tako je u TTT-dijagramima za kontinuirano ohlađivanje, osim podataka koje sadrži i izotermički TTT-dijagram, potrebno ucrtati i krivulje ohlađivanja.

Kako bi se postigla martenzitna struktura, čelik je potrebno hladiti velikim brzinama od austenitnog područja do područja, odnosno temperature, stvaranja martenzita. Iz tog razloga je iznimno važno poznavati gornju kritičnu brzinu gašenja. To je minimalna brzina kojom je potrebno hladiti čelik kako bi se sav austenit pretvorio u martenzit, a definirana je krivuljom koja tangira tzv. nos krivulje početka pretvorbe u perlitni ili bainitni stupanj. [2]

Druga karakteristična brzina kojom se opisuje ponašanje čelika prilikom gašenja je donja kritična brzina gašenja. Ona ima važnu ulogu u postupcima gdje struktura martenzita nije poželjna, a predstavlja maksimalnu brzinu ohlađivanja kod koje se još uvijek ne pojavljuje martenzit.

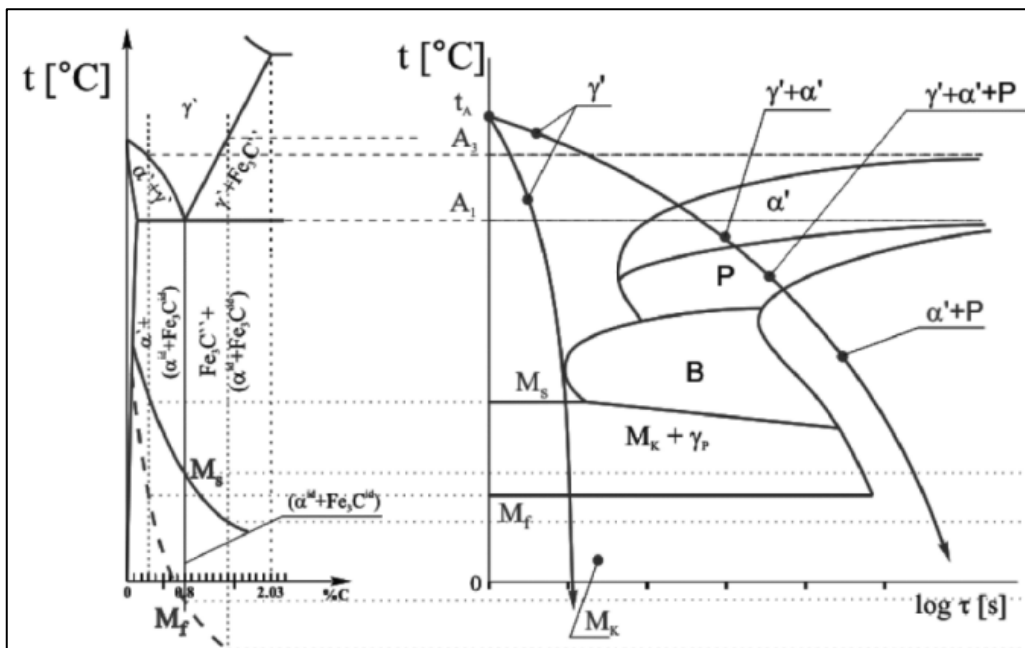
Gornja i donja kritična brzina gašenja direktno ovise o brzini perlitne pretvorbe. Tako će kritične brzine biti veće što je brzina perlitne pretvorbe veća. Obzirom na to, svi utjecajni čimbenici na brzinu perlitne pretvorbe, a to su: kemijski sastav austenita (ugljik i legirajući elementi), homogenosti kemijskog sastava austenita, veličina kristalnog zrna austenita te sadržaj neotopljenih čestica (karbida), utječu i na kritične brzine gašenja.

Ovisno o kemijskom sastavu čelika, odnosno udjelu legirajućih elemenata, mijenja se položaj i veličina pojedinih strukturnih područja u TTT-dijagramu. Legirajući elementi usporavaju difuzijske procese, te većina legirajućih elemenata u TTT-dijagramu, s njima i ugljik, pomiču krivulje difuzijskih pretvorbi u desno, dok temperature početka i završetka martenzitne pretvorbe pomiču prema dolje. Tako će primjerice, kod eutektoidnih čelika TTT-dijagrami na višim temperaturama imati samo područje perlitne pretvorbe (slika 3.21). [11]



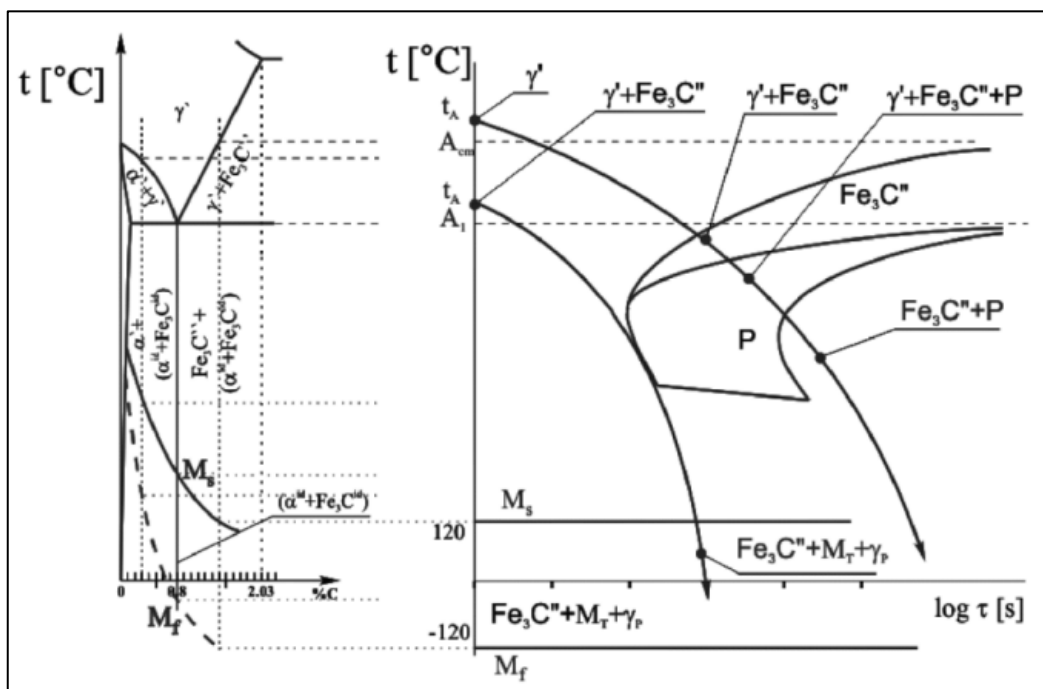
Slika 3.21 TTT-dijagram za kontinuirano hlađenje kod eutektoidnih čelika [11]

TTT-dijagrami podeutektoidnih čelika u visokotemperaturnom području imaju područje pretvorbe austenita u ferit i perlit (slika 3.22), dok TTT-dijagrami nadeutektoidnih čelika imaju područje pretvorbe austenita u perlit i sekundarni cementit, kao što je prikazano na slici 3.23.



Slika 3.22 TTT-dijagram za kontinuirano hlađenje podeutektoidnog čelika [11]

Gašenjem po gornjoj kritičnoj krivulji gašenja, mikrostruktura podeutektoidnog čelika sastoji od čistog martenzita, kod eutektoida se sastoji od martenzita i zaostalog austenita, a kod nadeutektoidnih čelika, mikrostruktura je sastavljena od martenzita, zaostalog austenita i sekundarnog cementita.



Slika 3.23 TTT-dijagram za kontinuirano hlađenje nadeutektoidnog čelika [11]

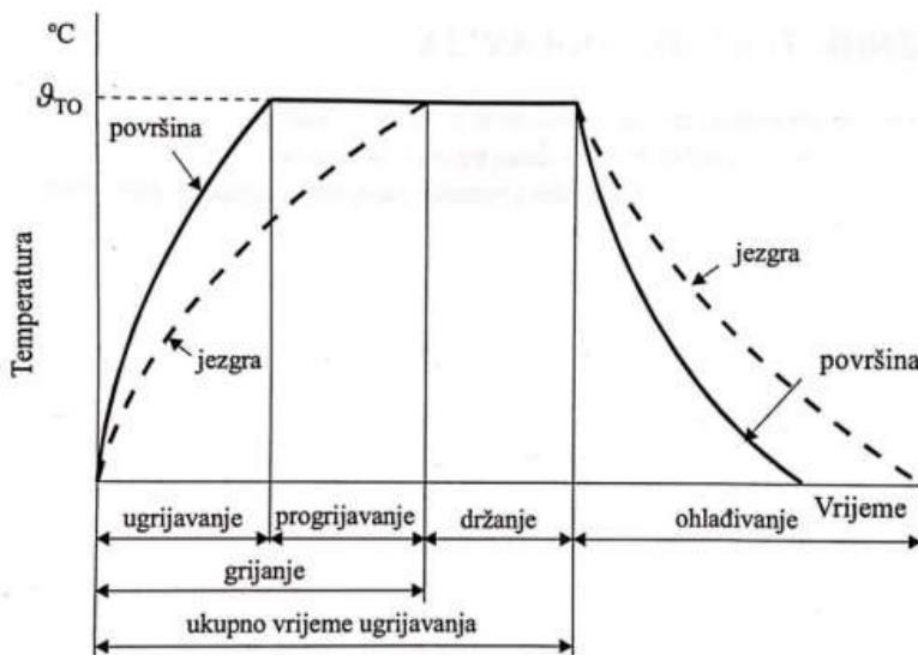


## 4. KALJIVOST

Svojstvo čelika da se gašenjem s temperature austenitizacije zakali, odnosno postigne što višu tvrdoću na površini, i prokali, odnosno postigne što jednoličniju tvrdoću na poprečnom presjeku, naziva se kaljivost. Kaljivost predstavlja tvrdoću čelika nakon kaljenja u slučaju potpuno martenzitne pretvorbe. Prvenstveno ovisi o sadržaju ugljika u čeliku, a zatim i o udjelu legirajućih elemenata kao i veličini austenitnog zrna.

### 4.1. Kaljenje

Postupak kaljenja predstavlja toplinsku obradu kojom se čelik udaljava od ravnotežnog stanja, zagrijavanjem na temperaturu austenitizacije, zadržavanjem na toj temperaturi određeno vrijeme i zatim naglim ohlađivanjem obratka s ciljem postizanja tvrde, pretežito martenzitne strukture (slika 4.1). Čelik podvrgnut postupku kaljenja će nakon obrade imati iznimnu tvrdoću i čvrstoću, otpornost na trošenje te veliku krhkost, no također će ostati i brojna zaostala naprezanja zbog čega je nakon kaljenja potrebno niskotemperaturno popuštanje čime se povećava žilavost, kao i dimenzijska stabilnost obratka.



Slika 4.1 Dijagram postupka kaljenja čelika [10]

Toplinska obrada kaljenjem, odnosno uspješnost postizanja martenzitne strukture po cijelom poprečnom presjeku obratka, ovisi o:

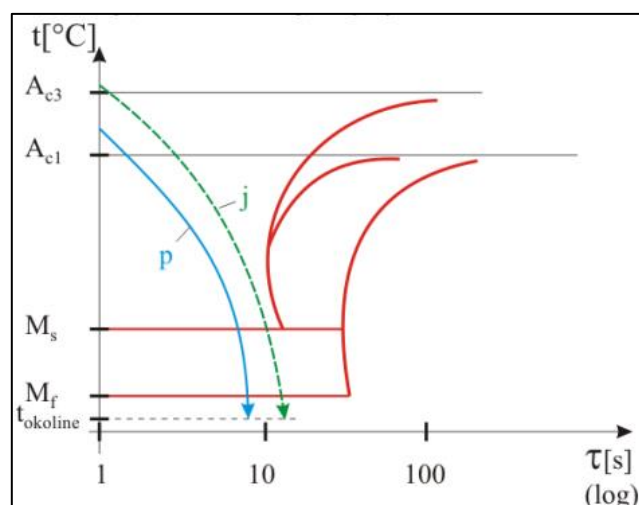
- vrsti čelika, odnosno svojstvu prokaljivosti
- temperaturi austenitizacije,  $\vartheta_A$
- vremenu ugrijavanja
- brzini hlađenja,
- okolini u kojoj se ugrijavanje izvodi

Važnu ulogu ima i brzina ugrijavanja koja treba biti pomno odabrana kako ne bi izazvala pukotine ili prevelika naprezanja i deformacije. Ovisi o legirnom sastavu čelika i njegovom stanju prije kaljenja, te o dimenziji i geometriji strojnog dijela. [2]

Razlikuju se klasični postupci kaljenja, koji se izvode kontinuiranim hlađenjem do sobne temperature pri čemu se koriste TTT-dijagrami za kontinuirano ohlađivanje, te izotermički postupci kaljenja koji se izvode izotermičkim hlađenjem pri određenoj temperaturi i pri tome koriste izotermičke TTT-dijagrame.

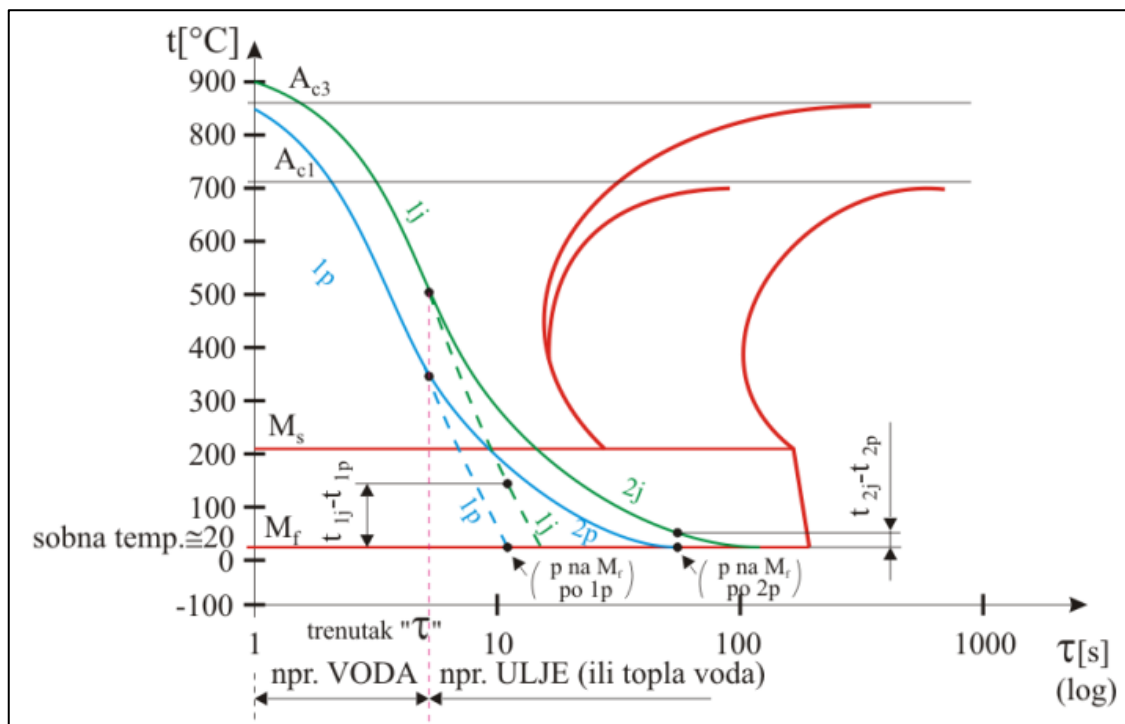
Klasični postupci kaljenja su:

- a) direktno kaljenje – predstavlja kontinuirano hlađenje do sobne temperature u jednom rashladnom sredstvu, budući da nema velike opasnosti od zaostalih naprezanja primjenjuje se kod jednostavnijih oblika i legiranih čelika



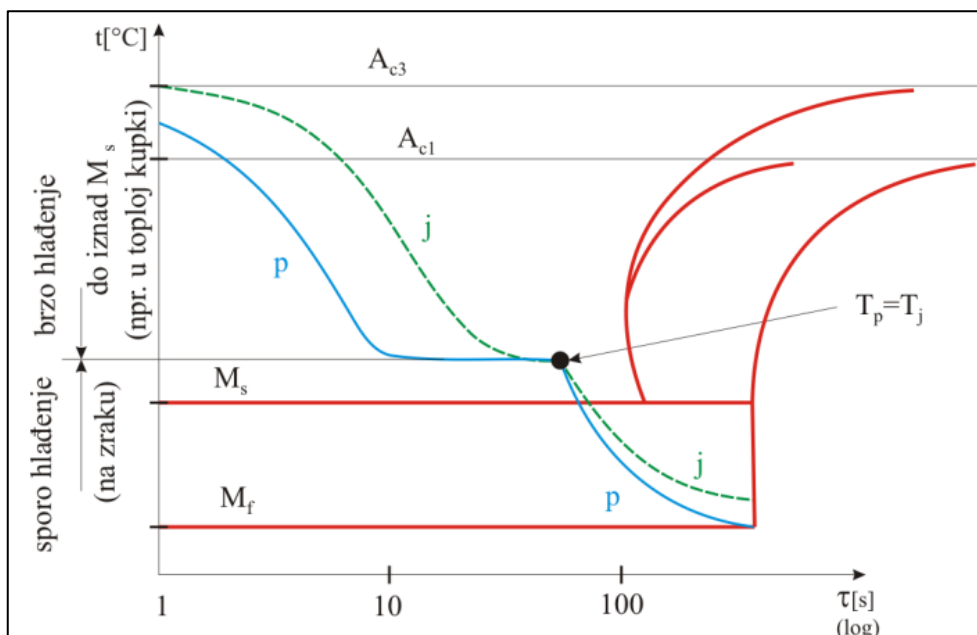
Slika 4.2 Klasični postupak direktnog kaljenja prikazan u TTT-dijagramu [11]

- b) slomljeno kaljenje – predstavlja kontinuirano hlađenje do sobne temperature u dva rashladna sredstva, postiže se najprije naglim ohlađivanjem, primjerice u vodi, s ciljem izbjegavanja nosa TTT-dijagrama, dok se dalje hlađenje vrši u blažem rashladnom sredstvu kao što je ulje kako bi se smanjile toplinske napetosti i zaostala naprezanja nakon kaljenja.



Slika 4.3 Klasičan postupak slomljenog kaljenja prikazan u TTT-dijagramu [11]

Primjer izotermičkog kaljenja je stepeničasto-martenzitno kaljenje koje se ostvaruje u toploj kupki, bilo solnoj, uljnoj ili metalnoj, u kojoj se izradak hladi s temperature austenitizacije tako da dođe do izjednačavanja temperature na površini izratka i u njegovoj jezgri. Nakon toga se izradak hladi na zraku. Budući da martenzit nastaje gotovo istodobno na površini i u jezgri izratka, toplinska naprezanja će biti minimalna. Proces stepeničasto-martenzitnog kaljenja može se promotriti na slici 4.4.



Slika 4.4 Proces stepeničasto-martenzitnog kaljenja prikazan u TTT-dijagramu [11]

Također postoji posebna vrsta toplinske obrade kaljenja čelika koja se naziva površinsko kaljenje. U ovom slučaju, površina se naglo zagrijava kako bi se na njenom sloju postigla odgovarajuća temperatura kaljenja, nakon čega se površinski sloj hladi natkritičnom brzinom s ciljem dobivanja martenzita, dok jezgra cijelo vrijeme ostaje nepromijenjena te omogućava zadovoljavajuću žilavost. Površinsko kaljenje omogućava smanjenje zaostalih naprezanja, tvrdi površinski sloj koji je otporan na habanje, žilavu jezgru, veću dinamičku izdržljivost te smanjuje utjecaj zareza. Izvori topline moraju biti izrazito jaki, pa se uglavnom koriste:

- elektromagnetska indukcija električnog toka u površinskom sloju izratka, i to predstavlja induksijsko kaljenje
- plameno ugrijavanje izgaranjem visokokaloričnog plina, zemnog plina, propan-butana, itd., poznato kao plameno kaljenje
- uporaba lasera, itd. [2]

Prema standardu ISO 6743-14, postoji šest različitih grupa u koje se svrstavaju sredstva koja se primjenjuju za ohlađivanje u postupku kaljenja, a to su [12]:

H – ulja

A – voda i emulzije

S – rastaljene soli

G – plinovi

F – fluidizirane kupke

K – ostala sredstva za gašenje

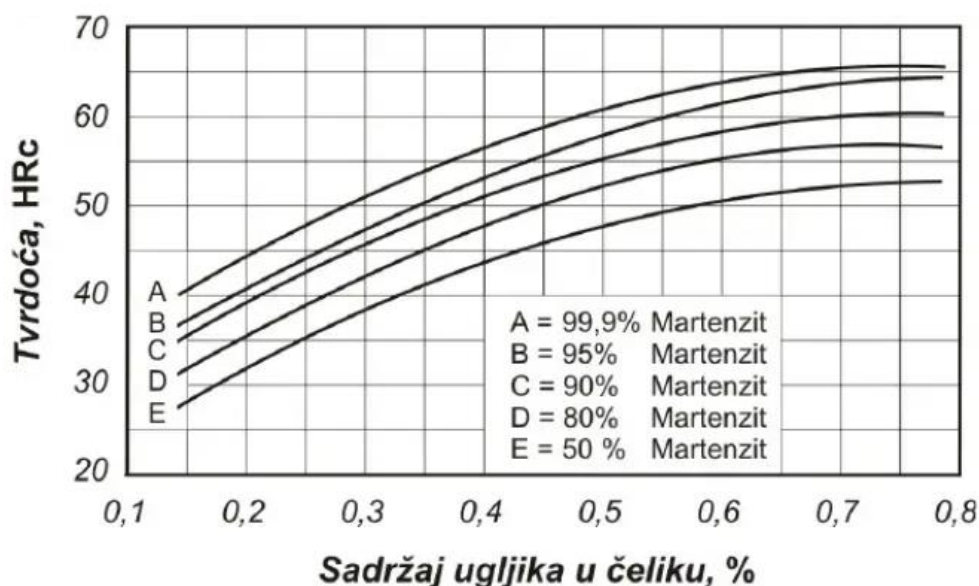
#### **4.2. Zakaljivost i prokaljivost čelika**

Prokaljivost i zakaljivost, kako je navedeno u uvodu u četvrto poglavlje, predstavljaju dva svojstva čelika koja imaju veliku ulogu i utjecaj u postizanju mikrostrukture nakon kaljenja čelika.

Prokaljivost je sposobnost čelika koja omogućava formiranje martenzitne strukture u dubljim slojevima čeličnog izratka prilikom njegova naglog ohlađivanja, s ciljem postizanja što je moguće ravnomjernijeg rasporeda tvrdoće po presjeku nakon kaljenja. Tako će se pri jednakim uvjetima kaljenja, martenzitna struktura u dubljim slojevima lakše formirati kod čeličnih izradaka veće prokaljivosti, nego kod onih manje prokaljivosti. Sama prokaljivost ovisi najprije o gornjoj kritičnoj brzini gašenja, a time i o brzini perlitne pretvorbe u čeliku, budući da njeni čimbenici utječu na kritične brzine gašenja. Svi ti čimbenici koji usporavaju brzinu perlitne pretvorbe povećavati će prokaljivost čelika. Prokaljivost čelika će povećavati i pojedini legirni elementi poput silicija, mangana, kroma, nikla, volframa, molibdena i vanadija (ukoliko je otopljen u austenitu). Osim kritične brzine gašenja, koja uvelike ovisi o sadržaju ugljika i legirajućih elemenata, na prokaljivost čelika utječe i vodljivost topline čelika koja se znatno manje mijenja promjenom kemijskog sastava. [2]

Zakaljivost je svojstvo čelika da postigne što je moguće višu tvrdoću na površini nakon brzog ohlađivanja s odgovarajuće temperature, kritičnom ili većom brzinom hlađenja. Dogovoreno je da se zakaljivim čelicima smatraju čelici koji sadrže više od 0.25% C, budući da su kritične brzine hlađenja kod ugljičnih čelika s manje od 0.25% C toliko velike da se u praksi mogu postići samo uz posebnu opremu i popratne visoke troškove. [12]

Budući da se nastoji postići tvrda, pretežito martenzitna struktura, a tvrdoća martenzitne strukture ovisi o sadržaju ugljika, zakaljivost čelika izravno će ovisiti o sadržaju ugljika u samom čeliku. Na slici 4.5 prikazano je kako tvrdoća čelika ovisi o sadržaju ugljika u čeliku te o sadržaju martenzita u mikrostrukтури, te se na temelju nje može odrediti praktična zakaljivost nekog čelika.



Slika 4.5 Vrijednosti tvrdoće čelika ovisno o sadržaju ugljika u čeliku i udjelu martenzita [12]

Prokaljivost i zakaljivost, kao svojstva čelika, utječu na raspodjelu tvrdoća kod zakaljenih čelika, no pored njih, na raspodjelu tvrdoća utječu još i dimenzije izratka te sredstvo u kojem se izradak gasi.

Također, pomoću dijagrama na slici 4.5 može se dovoljno točno odrediti kritična tvrdoća čelika. Kritična tvrdoća je tvrdoća koja odgovara strukturi s 50% martenzita za promatrani čelik te predstavlja minimalnu tvrdoću prokaljenog sloja. S pojmom kritične tvrdoće usko je povezan i kritični promjer  $D_k$ . Kritični promjer je maksimalni promjer čeličnog izratka koji se u određenom rashladnom sredstvu u potpunosti prokali. U jezgri izratka s kritičnim promjerom, tvrdoća je jednaka kritičnoj tvrdoći. [2]

## 5. PROCJENA PROKALJIVOSTI

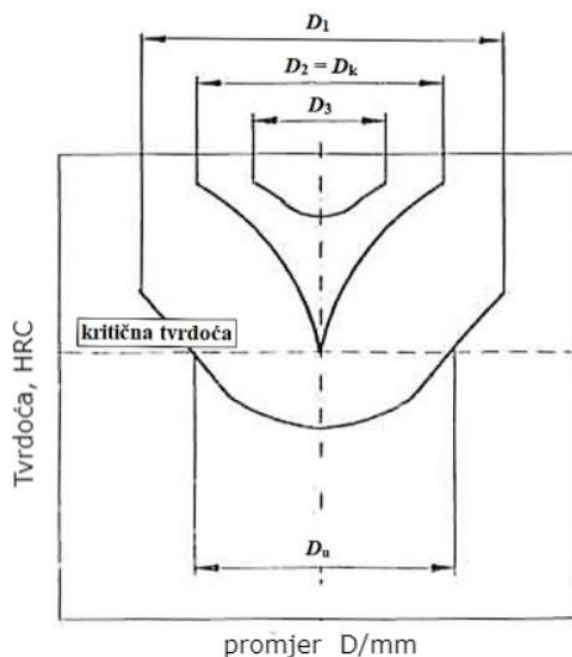
Prokaljivost nekog čeličnog komada određuje se eksperimentalno, pokusima kaljenja cilindričnih uzoraka različitih promjera u različitim sredstvima hlađenja, različitim intenzitetima gašenja. Intenzitet gašenja  $H$  prvenstveno ovisi o vrsti sredstva, brzini strujanja i temperaturi sredstva. Nakon kaljenja, kaljeni uzorci se režu kako bi se dobili poprečni presjeci na kojima se ispituje tvrdoća.

Jedan od načina procjene prokaljivosti je pomoću TTT-dijagrama spomenutog u trećem poglavlju. Budući da je njihova izrada relativno skupa, TTT-dijagrami se izrađuju za određeni reprezentativni kemijski sastav određenog tipa čelika i za određenu temperaturu austenitizacije. [2]

Ipak, procjena prokaljivosti se ne vrši pomoću TTT-dijagrama zbog njihove kompleksnosti i visoke cijene. U svrhu ispitivanja prokaljivosti razvile su se različite metode za procjenu prokaljivosti čelika. Najpoznatije su Grossmannova metoda i Jominyjeva metoda.

### 5.1. Grossmannova metoda ispitivanja prokaljivosti

Grossmannova metoda ispitivanja prokaljivosti se temelji na kritičnom promjeru  $D_k$ , spomenutom u prethodnom poglavlju. Ispitivanje se obično vrši na deset uzoraka koji imaju promjer u rasponu od 10 do 100 mm, a visine su četiri puta veće od promjera. Nakon kaljenja uzorci se poprečno prerežu uz istovremeno intenzivno hlađenje kako ne bi došlo do unosa topline nastale uslijed rezanja koja bi utjecala na promjenu strukture. Za svaki uzorak se dobiveni rezultati grafički prikazuju u obliku U-krivulje, kako je prikazano na slici 5.1, dok V-krivulja odgovara uzorku kritičnog promjera.



Slika 5.1 Raspodjela tvrdoće nakon gašenja čelika različitih promjera [2]

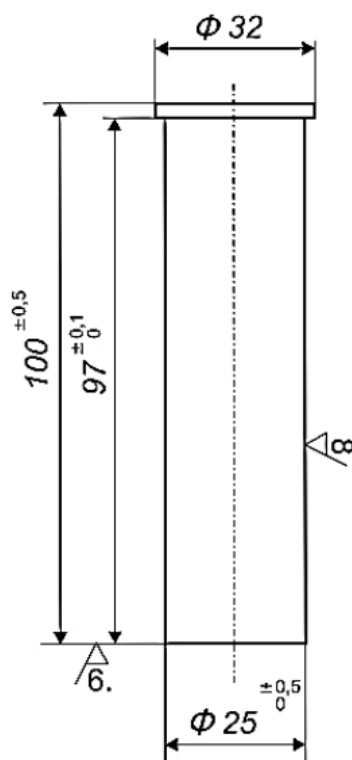
Budući da ne vrijedi univerzalno, nego se provodi za svaki čelik zasebno, Grossmannova metoda predstavlja skup i dugotrajan proces procjene prokaljivosti, a dodatani nedostatak je i njena velika ovisnost o uvjetima ohlađivanja, odnosno o intenzitetu rashladnog sredstva. Kako bi se izbjegla takva ovisnost kritičnog promjera o intenzitetu rashladnog sredstva, uvodi se teoretski pojam idealni kritični promjer  $D_i$  koji predstavlja onaj promjer za čiju se vrijednost, kaljenjem u idealnom rashladnom sredstvu ( $H = \infty$ ), u središtu dobije struktura s 50% martenzita.

## 5.2. Jominyeva metoda ispitivanja prokaljivosti

Jominyeva metoda ispitivanja prokaljivosti čelika je standardizirana metoda koja se zbog svoje jednostavnosti i relativno niske cijene najčešće koristi i najvažnija je metoda procjene prokaljivosti, te će se koristiti u praktičnom dijelu diplomskog rada.

Metoda se temelji na hlađenju uzorka, odnosno ispitne epruvete (slika 5.2), mlazom vode s temperature austenitizacije tako da se hladi jedan njen kraj, odnosno čeonu stranu epruvete. Standardizirana ispitna epruveta je šipkastog uzorka, potpuno glatka, duljine 100 mm i promjera 25 mm.

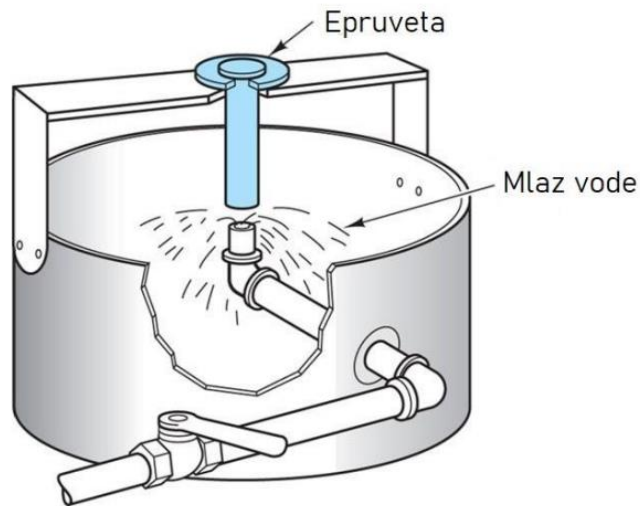




Slika 5.2 Standardizirana epruveta za Jominyev pokus [8]

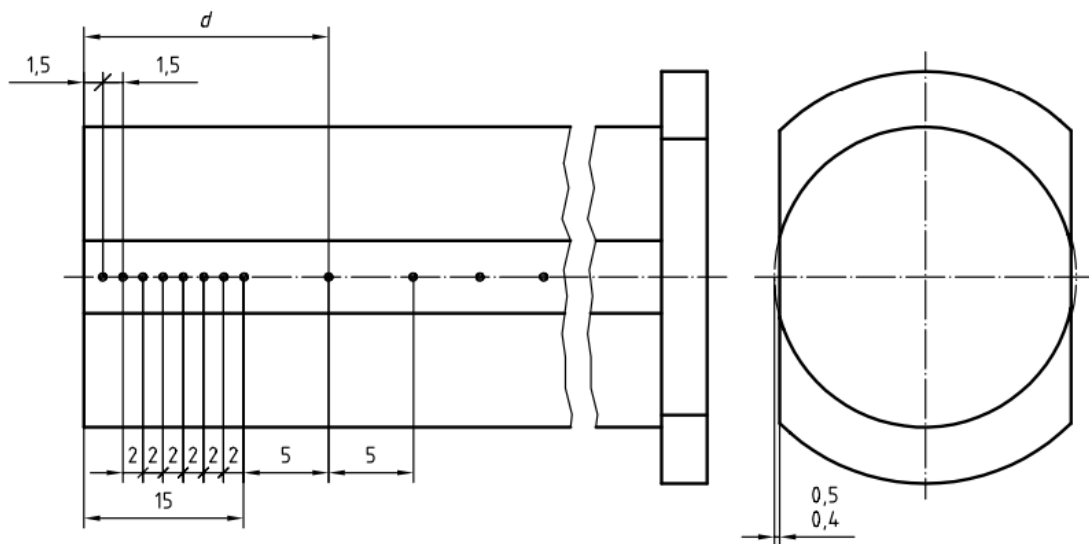
Epruveta se zagrijava u peći koja mora biti u mogućnosti epruvetu zagrijati na zahtijevanu temperaturu austenitizacije  $\vartheta_A$  unutar 40 minuta, uz točnost temperature austenitizacije u granicama  $\pm 5$  °C. Epruveta se mora moći lako izvaditi iz peći, a poželjno je i da peć ima zaštitnu atmosferu, no u nedostatku iste može se koristiti zaštitna kutija na čijem dnu treba ubaciti malo materijala bogatog ugljenom, primjerice grafitnu pločicu, grafitni prah ili sloj strugotine od sivog lijeva. Ako je peć unaprijed zagrijana na temperaturu austenitizacije, zagrijavanje epruvete trajati će 30 minuta. [8]

Nakon zagrijavanja, epruvetu je potrebno izvaditi iz peći te postaviti u uređaj za gašenje. Uređaj za gašenje se sastoji od nosača epruvete i mlaznice vode iznad koje je potrebno postaviti epruvetu tako da budu na istoj vertikalnoj osi. Razmak između mlaznice i epruvete jednak je promjeru mlaznice i iznosi  $12,5 \pm 1$  mm. Vertikalni mlaz vode prema epruveti postiže se hidrostatskim tlakom te mora biti visine  $65 \pm 5$  mm. Visina mlaza se vizualno nadgleda pomoću gornjeg i donjeg kontrolnika visine mlaza koji je ugrađen u uređaj za gašenje. Temperatura vode mlaza je 5 – 30 °C, te za vrijeme njegova trajanja od 15 minuta on udara u glatku čeonu stranu epruvete te se odbija u obliku otvorenog kišobrana. [8]



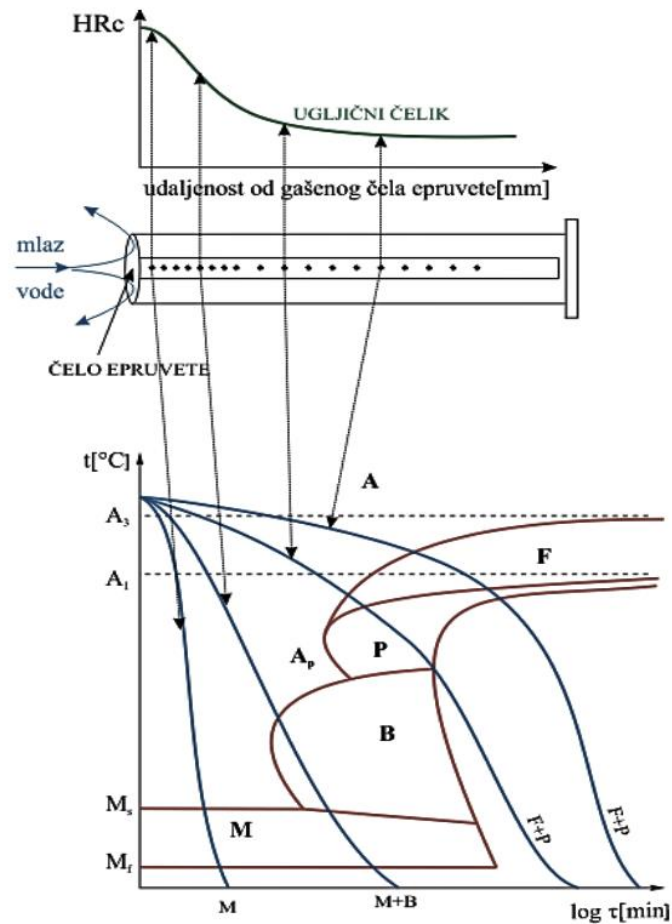
*Slika 5.3 Trenutak Jominyevog pokusa u kojemu mlaz vode hladi epruvetu udarom u glatko čelo [13]*

Nakon što se epruveta ohladila, duž nje se pažljivo bruse dvije nasuprotne, paralelne ravne površine na dubinu od 0,4 mm. Brušenje epruvete treba biti pažljivo kako bi se izbjegle moguće promjene strukture uslijed zagrijavanja do kojega dolazi prilikom brušenja. Jedna izbrušena površina se naliže u napravu za pričvršćenje epruvete koja sadrži mehanizam za pomicanje, a druga izbrušena površina služi za mjerenje tvrdoće. Naprava za pričvršćenje epruvete, odnosno diobeni stol za ekvidistantna mjerenja, se zajedno s epruvetom postavlja na aparat za ispitivanje tvrdoće. Ispitivanje tvrdoće može se izvoditi po Vickers-u (HV) ili češće prema Rockwell-u (HRC). Ispitivanje se provodi na način da se najprije mjeri tvrdoća na udaljenosti 1,5 mm od gašenog čela epruvete, zatim na 3 mm, da bi se nakon toga do udaljenosti 15 mm od gašenog čela epruvete tvrdoća ispitivala svaka 2 mm. Nakon 15 mm od gašenog čela epruvete, tvrdoća se ispituje svakih 5 mm duž izvodnice, odnosno po središnjici izbrušene površine (slika 5.4).



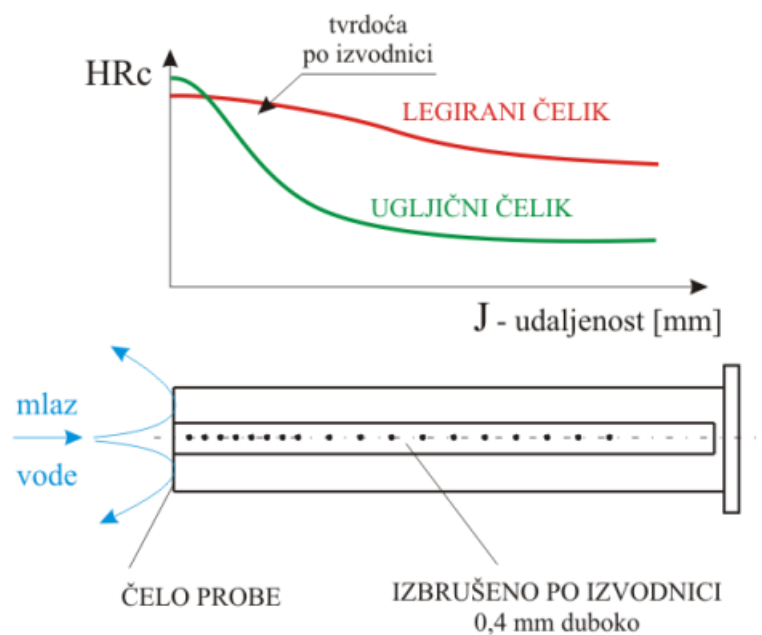
Slika 5.4 Ispitivanje tvrdoće po središnjici izbrušene površine [14]

Dobiveni rezultati, odnosno izmjerene tvrdoće, se dalje koriste za konstruiranje Jominyeve krivulje prikazane na slici 5.5. Jominyeva krivulja predstavlja grafički prikaz raspodjele tvrdoće ovisno o udaljenosti od gašenog čela epruvete, te se na taj način određuje i sama prokaljivost uzorka. Budući da mlaz vode direktno hladi čelo epruvete, ono se kali najvećom brzinom, a ta je brzina veća od kritične. Tako će se na čelu epruvete postići martenzitna struktura najveće tvrdoće. Udaljavanjem od čelone strane epruvete, slojevi se sve sporije hlade te se postiže struktura sa sve manje martenzita što znači i manju tvrdoću.



Slika 5.5 Shematski prikaz ohlađivanja epruvete u TTT-dijagramu [8]

Na taj način, pomoću kvalitativno prikazanih Jominyevih krivulja, može se usporediti prokaljivost legiranih i nelegiranih čelika. Na slici 5.6, kod Jominyeve krivulje crvene boje koja odgovara legiranom čeliku, uočava se znatno manje izražen pad tvrdoće udaljavanjem od čela epruvete u odnosu na Jominyevu krivulju zelene boje koja odgovara ugljičnom, odnosno nelegiranom čeliku. Prema tome, može se zaključiti kako će općenito legirani čelici imati veću prokaljivost od nelegiranih, odnosno ugljičnih čelika. [11]



Slika 5.6 Usporedba prokaljivosti legiranih i ugljičnih čelika primjenom Jominyeve krivulje [11]

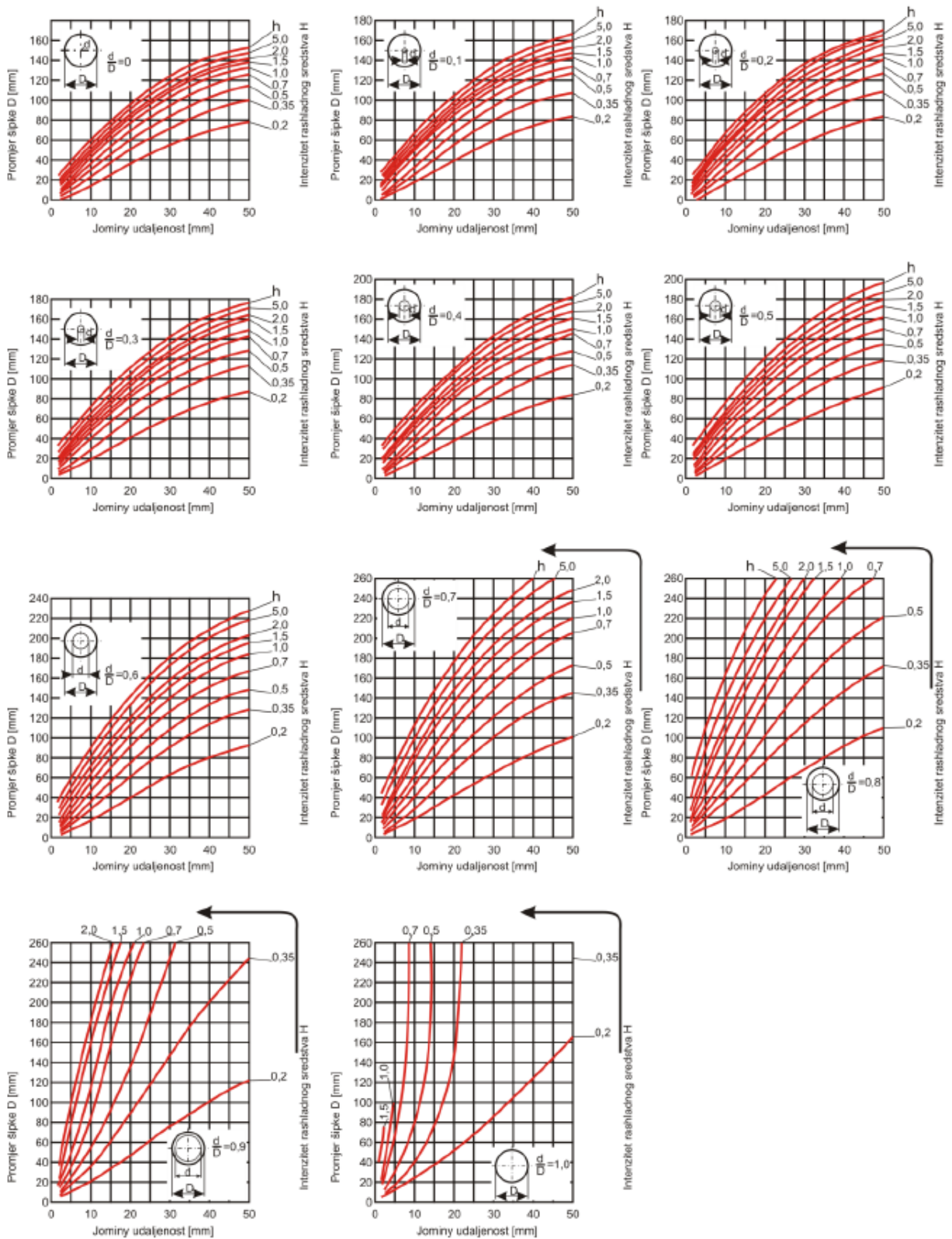
Kod Jominyeve metode, mogu se koristiti tri različita načina označavanja indeksa prokaljivosti čelika:

- 1)  $J_H = d$ , primjerice  $J_{50} = 40$ , to znači da se zahtjeva tvrdoća od 50 HRC na udaljenosti 40 mm od čela epruvete
- 2)  $J_{H_1 - H_2} = d$ , npr.  $J_{35-45} = 40$ , zahtjeva se tvrdoća u rasponu od 35-45 HRC na udaljenosti 40 mm od čela epruvete
- 3)  $J_H = d_1 - d_2$ , primjerice  $J_{35} = 25 - 40$ , zahtjeva se precizna tvrdoća od 35 HRC na rasponu udaljenosti od 25 do 40 mm od čela epruvete.

Na samom kraju, dobiveni rezultati se zajedno s ostalim podacima o ispitivanom čeliku upisuju u standardom propisan formular pod nazivom „Izveštaj o ispitivanju prokaljivosti“. [8]

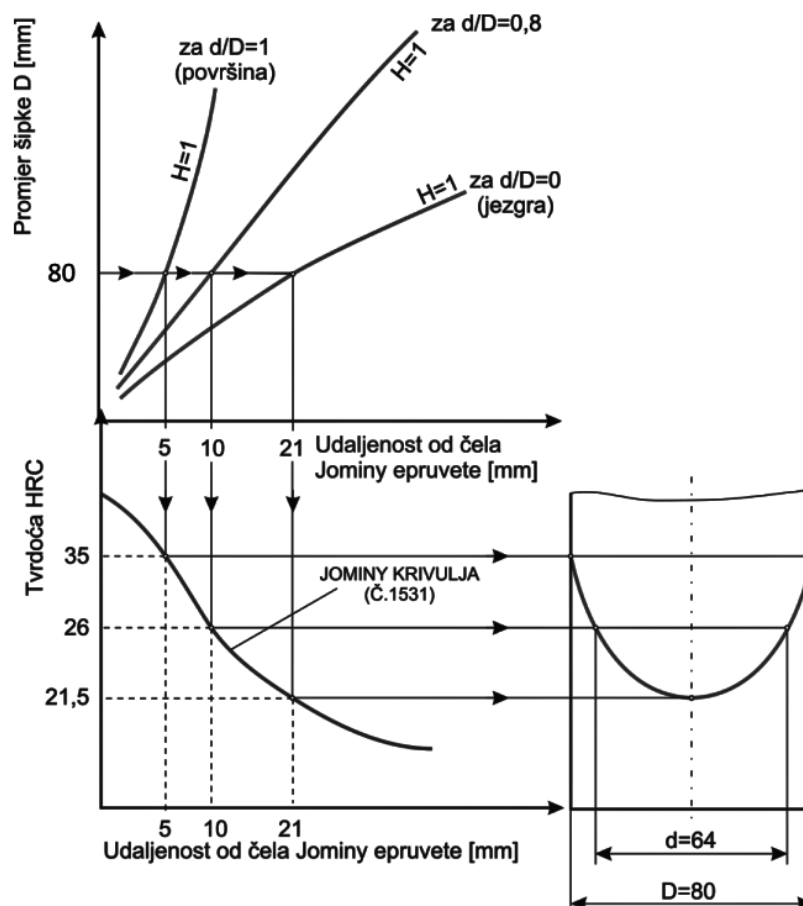
### 5.3. Crafts–Lamont metoda procjene tvrdoće

Postoje različite metode određivanja toka tvrdoće po presjeku zakaljenih izradaka različitih poprečnih presjeka. Jedna od takvih metoda je Crafts–Lamont metoda, ograničena na izratke kružnog poprečnog presjeka, a temelji se na 11 dijagrama (slika 5.7) od kojih svaki dijagram odgovara za samo jednu, točno određenu udaljenost od površine izratka te vrijedi za različite intenzitete gašenja  $H$ . Svakom pojedinom dijagramu pridružen je odgovarajući omjer  $d/D$ , gdje  $d$  predstavlja promjer na kojem želimo mjeriti tvrdoću, a  $D$  predstavlja vanjski promjer šipke. Tako će prilikom određivanja tvrdoće u središtu presjeka uzorka omjer  $d/D = 0$ , a prilikom određivanja tvrdoće na površini uzorka  $d/D = 1$ . [8]



Slika 5.7 Crafts-Lamontovi dijagrami [8]

Traženi tok tvrdoće, odnosno U-krivulja, ucrtava se u nacrt obratka, a dobiva se kombinacijom Jominyeve krivulje te Crafts-Lamontovih dijagrama. Postupak dobivanja U-krivulje vidljiv je na slici 5.8.



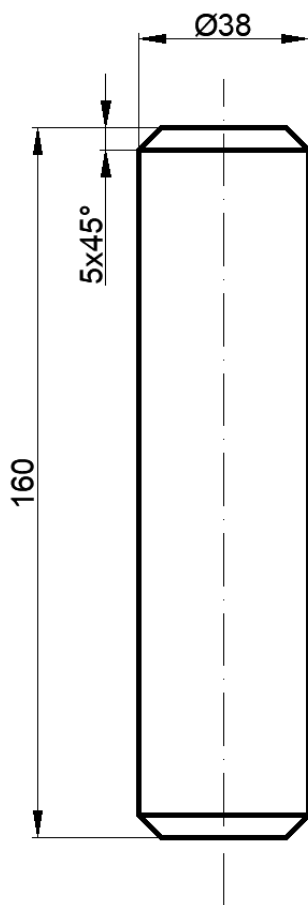
Slika 5.8 Shematski prikaz konstruiranja U-krivulje po presjeku kaljenog obratka pomoću Crafts-Lamontovog dijagrama i Jominyeve krivulje [8]

Na prethodnoj slici prikazan je primjer korištenja Crafts-Lamontovih dijagrama za određivanje toka tvrdoće, odnosno konstruiranje U-krivulje. U primjeru je korištena šipka promjera 80 mm koja je nakon austenitizacije gašena u mirnoj vodi ( $H = 1$ ). Najprije se za zadani promjer šipke odabire odgovarajući promjer u Crafts-Lamontovim dijagramima, te se potom pomoću Jominyeve krivulje očita tvrdoća za površinu izratka ( $d/D = 1$ ), jezgru izratka ( $d/D = 0$ ) te za mjesto koje je od površine izratka udaljeno 8 mm ( $d/D = 0,8$ ). Nakon toga slijedi povlačenje horizontalnih linija vrijednosti tvrdoće na izradak čijim se presijecanjem sa odgovarajućim promjerima dobivaju točke U-krivulje. [15]



## 6. PROCJENA PROKALJIVOSTI STROJNOG DIJELA MJ.22-DP.42

Prokaljivost strojnog dijela MJ.22-DP.42 procijenjena je za kaljenje u vodi intenziteta gašenja  $H = 1$  i za kaljenje u ulju intenziteta gašenja  $H = 0,35$ . Na slici 6.1 prikazan je strojni dio MJ.22-DP.42. Materijal strojnog dijela je 20MnCr5, niskouglični čelik za cementaciju, male tvrdoće i dobre otpornosti na habanje.



Slika 6.1 Strojni komad MJ.22-DP.42

Propisani kemijski sastav čelika 20MnCr5 nalazi se u tablici 6.1. Elementi koji nisu navedeni u tablici se ne smiju dodavati čeliku bez suglasnosti kupca (osim u svrhu završne obrade). [16]

Tablica 6.1 Propisani kemijski sastav čelika 20MnCr5 [16]

Kemijski element	C	Mn	Cr	Si	P	S
Udio pojedinog elementa (%)	0.17-0.22	1.1-1.4	1-1.3	max 0.4	max 0.035	max 0.035

Dubina prokaljivanja procijenit će se pomoću Crafts-Lamontovih dijagrama te rezultata dobivenih Jominyevim pokusom, odnosno Jominyevom krivuljom. Jominyev pokus se provodi po standardu HRN EN ISO 642, prema kojem je ispitna epruveta dimenzija sukladno slici 5.2.

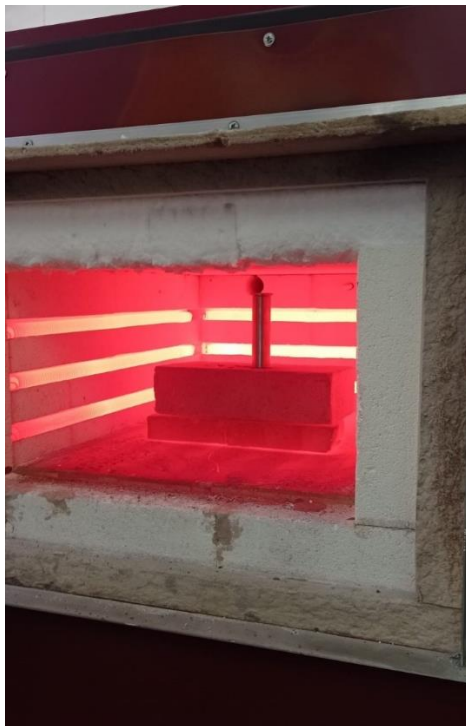
U svrhu određivanja kritične tvrdoće usvaja se koncentracija ugljika od 0.2%. Tako će kritična tvrdoća, prema dijagramu na slici 4.5 za koncentraciju ugljika od 0.2% i za minimalni udio martenzita od 50%, iznositi 33 HRC. To znači da će se strojni dio MJ.22-DP.42 smatrati prokaljenim ako je u jezgri postignuta tvrdoća od minimalno 33 HRC.

Jominyev postupak započinje postavljanjem ispitne epruvete u OVER komornu peć, prikazanu na slici 6.2, koja se prethodno zagrije na temperaturu austenitizacije, ovisno o materijalu ispitne epruvete. Prema specifikacijama različitih proizvođača i u njima navedenim intervalima temperature austenitizacije za čelik 20MnCr5, odabrana je temperatura austenitizacije 860 °C.



Slika 6.2 OVER komorna peć za zagrijavanje uzorka

Nakon što se peć zagrije na odgovarajuću temperaturu od 860 °C, ispitni uzorak se postavlja u peć (slika 6.3) koristeći zaštitnu opremu, odnosno zaštitne rukavice i hvataljku, te se unutra zadržava, odnosno zagrijava 30 minuta.



*Slika 6.3 Ispitna epruveta postavljena u komornu peć spremna za zagrijavanje*

Nakon 30 minuta epruvetu je iz peći potrebno postaviti u držač naprave za gašenje. Naprava za gašenje prikazana je na slici 6.4 te je u skladu sa propisanom normom. Vodeni mlaz koji se koristi za hlađenje sobne je temperature i visine  $65 \pm 5$  mm. Vrijeme koje protekne od trenutka otvaranja peći i vađenja uzorka, do njegova postavljanja u držač, ne smije biti dulje od 5 sekundi.



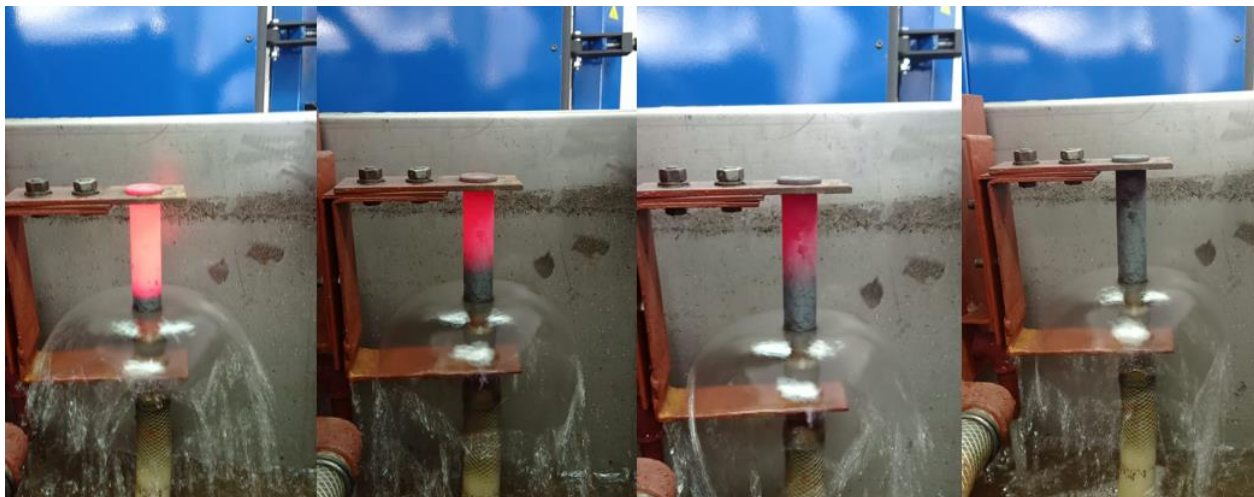
*Slika 6.4 Naprava za gašenje ispitnog uzorka*

Nakon postavljanja ispitne epruvete na držač (slika 6.5), epruveta se kontinuirano čeonu hladi 10 minuta. Nakon desetominutnog čeonog hlađenja, ispitna epruveta se u potpunosti uranja u vodu sobne temperature kako bi bila sigurna za daljnje rukovanje bez zaštitne opreme. Nakon što se epruveta ohladi na sobnu temperaturu, potrebno ju je brusiti prema propisanom standardu.



*Slika 6.5 Postavljanje zagrijanog ispitnog uzorka iz peći u držač naprave za gašenje*

Na slici 6.6 prikazano je hlađenje ispitne epruvete postavljene u držač tijekom desetominutnog čeonog hlađenja vertikalnim mlazom vode. Na slici 6.7 može se vidjeti konačno stanje uzorka nakon gašenja.



*Slika 6.6 Ohlađivanje ispitnog uzorka tijekom desetominutnog gašenja*



*Slika 6.7 Ispitni uzorak nakon gašenja*

Prema standardu HRN EN ISO 642, potrebno je izbrusiti dvije paralelne ravne površine na dubinu od 0,4 mm (slika 6.8) kako bi se tvrdoća mogla ispitivati po središnjici izbrušene površine od gašenog čela.



*Slika 6.8 Ispitni uzorak izbrušen 0,4 mm sa dvije paralelne strane*

Nakon brušenja, Jominyev uzorak je spreman za ispitivanje tvrdoće. Ispitivanje tvrdoće provodi se na tvrdomjeru, prikazanom na slici 6.9, prema Rockwellovoj C metodi.



*Slika 6.9 Tvrdomjer korišten za ispitivanje tvrdoće prema Rockwellovoj C metodi*

Najprije je potrebno na ispitnom uzorku označiti normom definirane udaljenosti od gašenog čela na kojima će se tvrdoća ispitivati. Zbog veće preciznosti, tvrdoća će se ispitivati na obje izbrušene strane te će se na kraju usvojiti prosječna vrijednost. Definirane udaljenosti na kojim je potrebno ispitivati tvrdoću su prikazane na slici 5.4, a za njihovo označavanje na ispitnom uzorku korištena je grafitna olovka i mjerilo. Na slici 6.10 prikazan je Jominyev uzorak na tvrdomjeru prilikom ispitivanja tvrdoće na jednoj od definiranih udaljenosti.



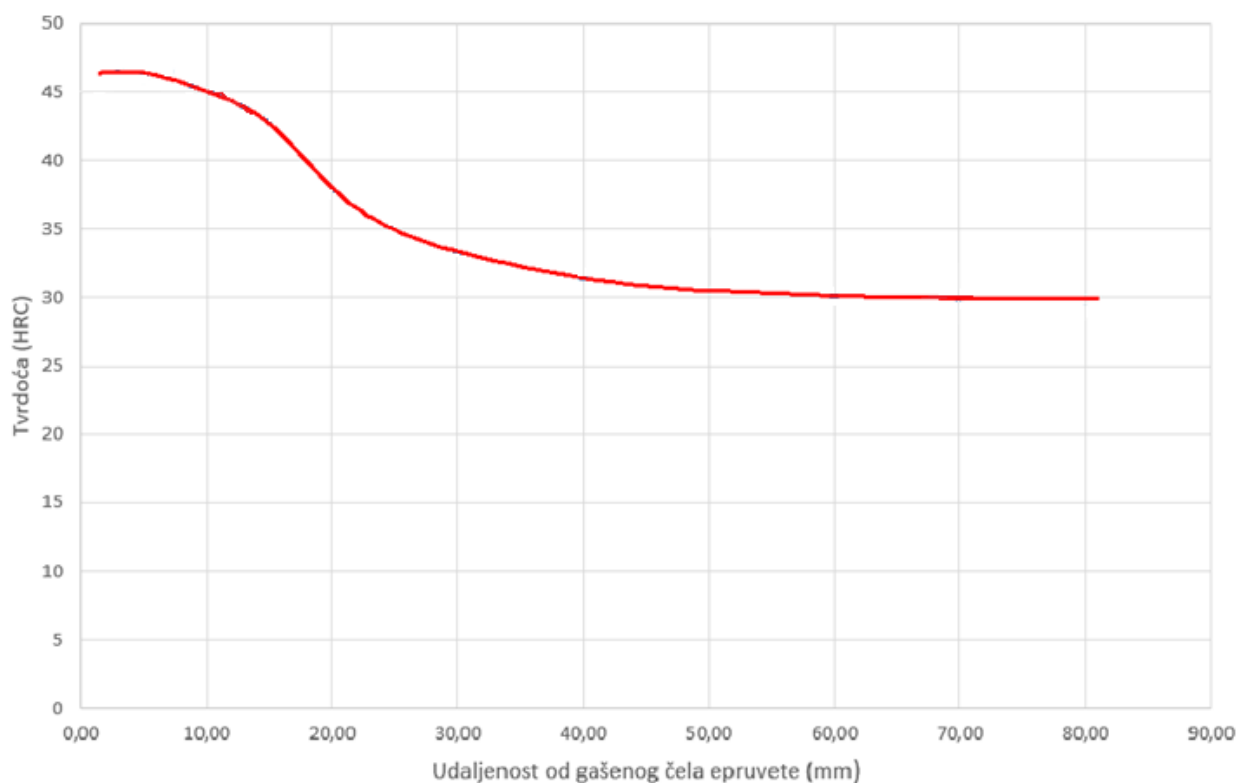
*Slika 6.10 Postupak ispitivanja tvrdoće ispitne epruvete na tvrdomjeru po Rockwellovoj C metodi*

Nakon ispitivanja tvrdoće na normom definiranim udaljenostima od gašenog čela epruvete, s obje njene strane, konstruira se Jominyeva krivulja. U tablici 6.2 prikazane su izmjerene vrijednosti tvrdoće u HRC s obje izbrušene strane Jominyevog uzorka. Od izmjerenih vrijednosti se uzima prosječna vrijednost (u tablici označena plavom bojom) koja će se pridružiti odgovarajućoj udaljenosti od gašenog čela Jominyevog uzorka.

Tablica 6.2 Izmjerene vrijednosti tvrdoće na definiranim udaljenostima od gašenog čela ispitnog uzorka

Udaljenost (mm)	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	40	50	60	70	80
1.strana uzorka (HRC)	45	48	46	46	46	45	44	43	38	35	32	31	31	30	30	30
2.strana uzorka (HRC)	45	46	46	47	45	45	44	43	37	36	34	32	32	30	30	28
Tvrdoća (HRC)	45	47	46	46,5	45,5	45	44	43	37,5	35,5	33	31,5	31,5	30	30	29

Vrijednosti prikazane u tablici 6.2 se zatim koriste za konstruiranje Jominyeve krivulje prikazane na slici 6.11.



Slika 6.11 Jominyeva krivulja za čelik 20MnCr5



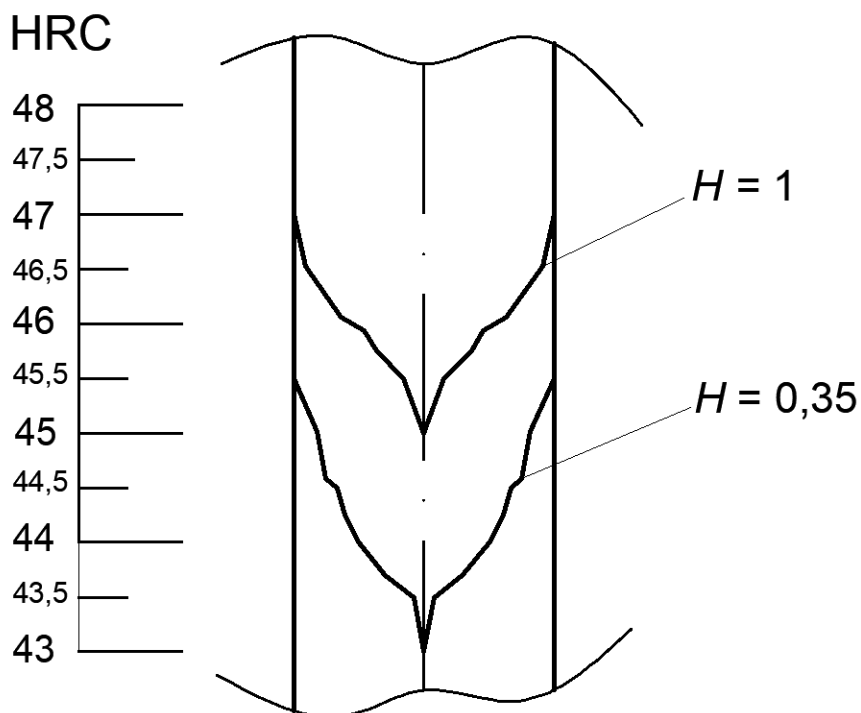
Pomoću konstruirane Jominyeve krivulje i Crafts-Lamontovih dijagrama (slika 5.7) potrebno je konstruirati U-krivulje koje prikazuju raspodjelu tvrdoće po presjeku strojnog dijela MJ.22-DP.42 za gašenje u vodi i ulju. Za gašenje u vodi vrijedi da je intenzitet gašenja  $H = 1$ , dok će za gašenje u ulju intenzitet gašenja biti  $H = 0,35$ . Najprije se pomoću Crafts-Lamontovih dijagrama, za zadani promjer strojnog dijela od 38 mm i intenzitet gašenja  $H = 1$ , odnosno  $H = 0,35$ , određuje Jominyeva udaljenost na različitim omjerima  $d/D$ , gdje za jezgru strojnog dijela vrijedi da je  $d/D = 0$ , dok je na površini omjer  $d/D = 1$ . Dobivene vrijednosti Jominyevih udaljenosti za različite omjere  $d/D$  i različite intenzitete ohlađivanja prikazane su u tablici 6.3.

Tablica 6.3 Vrijednosti dobivene iz Crafts-Lamontovih dijagrama

$d/D$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Jominyeva udaljenost za $H = 1$ (mm)	9	7,5	8,5	7	6,5	6,5	6	5,5	4,5	4	2,5
Jominyeva udaljenost za $H = 0,35$ (mm)	15	14	14	13	13	12,5	12,5	12	10,5	10	9,5
Tvrdoća HRC za $H = 1$	45	45,5	45,5	46	46	46	46,5	46,5	46,5	47	47
Tvrdoća HRC za $H = 0,35$	43	43,5	43,5	44	44	44,5	44,5	44,5	45	45	45,5

Nakon što se očitaju Jominyeve udaljenosti pomoću Crafts-Lamontovih dijagrama za svaki  $d/D$  omjer, potrebno se vratiti na konstruiranu Jominyevu krivulju (slika 6.11) te za dobivene vrijednosti Jominyeve udaljenosti očitati odgovarajuće tvrdoće (također prikazane u tablici 6.3).

Potom se konstruiraju U-krivulje za oba intenziteta gašenja s ciljem prikaza raspodjele tvrdoće po presjeku zadanog strojnog dijela. Konstruirane U-krivulje prikazane su na slici 6.12.



Slika 6.12 Tok tvrdoće, odnosno U-krivulje po presjeku strojnog dijela MJ.22-DP.42 za gašenje u vodi ( $H = 1$ ) i ulju ( $H = 0,35$ )

Za gašenje u vodi ( $H = 1$ ) tvrdoća u jezgri iznosi 45 HRC, a za gašenje u ulju ( $H = 0,35$ ) tvrdoća u jezgri iznosi 43 HRC. I za gašenje u vodi i za gašenje u ulju tvrdoća u jezgri je veća od definirane kritične tvrdoće od 33 HRC. Na početku je utvrđeno da će strojni dio MJ.22-DP.42 biti prokaljen ukoliko minimalna tvrdoća bude veća od 33 HRC kako je definirano prema dijagramu na slici 4.5, za koncentraciju ugljika 0,2% te udio martenzita 50%. Prema tome, možemo zaključiti kako će se strojni dio MJ.22-DP.42 načinjen od 20MnCr5, gašen u mirnoj vodi  $H = 1$ , kao i u ulju  $H = 0,35$ , u potpunosti prokaliti (zakaliti) budući da u oba slučaja ima više od 50% martenzita (preko 90%) u svojoj strukturi.

## 7. ZAKLJUČAK

Zadatak i cilj ovog diplomskog rada bio je procijeniti prokaljivost strojnog dijela MJ.22-DP.42 nakon kaljenja, prema normi HRN EN ISO 642. Kako bi se prokaljivost nekog čelika uopće procijenila, najprije je bilo potrebno upoznati termine čelika, kaljenja i prokaljivosti.

Tako se u prvom poglavlju može zaključiti da je čelik metastabilna kristalizirana legura željeza i ugljika (maksimalno 2,3%), u kojoj je moguća prisutnost različitih legiranih elemenata, koji se čeliku dodaju ovisno o zahtijevanim svojstvima. Zahvaljujući lakoj obradivosti i mogućnosti mijenjanja, odnosno poboljšanja, svojstava ovisno o udjelu ugljika i legirajućih elemenata, različitim postupcima toplinske obrade, čelik je u današnjoj proizvodnji zauzeo najvažnije mjesto.

U nastavku se može zaključiti da se tvrdoća čelika može povećati različitim toplinskim obradama, te da na nju najviše utječe udio ugljika u čeliku. Što je veći udio ugljika, tvrdoća čelika je veća. Postupak toplinske obrade objašnjen i korišten u praktičnom dijelu diplomskog rada je kaljenje čelika. U četvrtom poglavlju se može zaključiti da je kaljenje čelika zapravo njegovo zagrijavanje na definiranu temperaturu austenitizacije, zadržavanje na toj temperaturi određeno vrijeme, te naglo hlađenje, odnosno gašenje u rashladnom sredstvu određenog intenziteta gašenja, s ciljem postizanja strukture sa što više martenzita. Martenzit je izravno povezan sa tvrdoćom čelika, budući da veći postotak martenzita u strukturi znači i veću tvrdoću čelika, ali i veću krhkost. Prema tome, može se zaključiti da će čelik koji u svojoj jezgri lakše formira martenzitnu strukturu biti bolje prokaljivosti, odnosno imati će veću sposobnost postizanja jednolikog toka tvrdoće po poprečnom presjeku čeličnog uzorka nakon kaljenja.

Budući da se u petom poglavlju može zaključiti da je Jominyeva metoda najjednostavnija i najkorištenija metoda za procjenu prokaljivosti, ista je korištena i u praktičnom dijelu diplomskog rada kako bi se procijenila dubina prokaljivanja strojnog dijela MJ.22-DP.42 izrađenog od čelika 20MnCr5. Najprije je postupkom definiranim standardom HRN EN ISO 642 dobivena Jominyeva krivulja, kojom su zajedno s Crafts-Lamontovim dijagramima određene U-krivulje za slučaj gašenja strojnog dijela u vodi te u ulju. Na temelju dobivenih U-krivulja, može se donijeti zaključak da će se strojni dio MJ.22-DP.42, načinjen od 20CrMn5, u potpunosti prokaliti za oba slučaja gašenja (i u vodi i ulju).

## LITERATURA

- [1] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: „Svojstva i primjena materijala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [2] Smoljan, B.: „Osnove toplinske obrade čelika“, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1997.
- [3] Jay, E.: „Stainless Steel“, s Interneta, <https://www.hawkins.biz/insight/stainless-steels/>, 23.4.2023.
- [4] Iljkić, D.: „Materijali II“, materijali s predavanja, Merlin, 2017.
- [5] Kapetanović, K. i dr. : „Čelične konstrukcije - čelik“, s Interneta, <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/celik.pdf>, 23.4.2023.
- [6] Bhadeshia, H.K.D.H.; Honeycombe R.W.K.: „Steels: Microstructure and Properties“, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2017.
- [7] Smoljan, B.: „Toplinska obrada čelika, sivog i nodularnog lijeva“, Hrvatsko društvo za toplinsku obradbu i inženjerstvo površine, Zagreb, 1999.
- [8] Gabrić, I.: „Materijali 2 – praktikum za laboratorijske vježbe“, Sveučilište u Splitu, Split, 2018.
- [9] Pomenić, L.: „Toplinska obrada čelika“, s Interneta, <https://bit.ly/3QE8uKq>, 25.4.2023.
- [10] Stupnišek, M.; Cajner, F.: „Osnove toplinske obrade metala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [11] Gabrić, I.; Šitić, S.: „Materijali II“, Sveučilite u Splitu, Split, 2015.
- [12] Pedišić, Lj.; Matijević, B.; Munić, J.: „Utjecaj koncentracije vodomješivih tekućina za obradbu metala na sposobnost ohlađivanja“, Goriva i maziva, vol. 47, br. 6, str. 437-449, 2008.
- [13] Canale, L.C.F. i dr.: „Hardenability of steel“, I. Universidade de Sao Paulo, Escola de Engenharia de Sao Carlos, Sao Carlos, II. Portland State University, Department of Mechanical and Materials Engineering, Portland, 2014.
- [14] Norma: HRN EN ISO 642, 2008.
- [15] Matijević, B.: „TII i PT-toplinska obrada“, materijali s predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[16] Ambhe Ferro Metal Processors Private Limited: „20MnCr5 Steel Grade“, s Interneta, <https://ambhe.com/20mncr5-steel/>, 25.4.2023.

## POPIS SLIKA

Slika 3.1 Metastabilni fazni dijagram stanja Fe-Fe <sub>3</sub> C [2] .....	4
Slika 3.2 Metalografski prikaz feritne strukture [3] .....	5
Slika 3.3 Metalografski prikaz strukture sekundarnog cementita [4] .....	5
Slika 3.4 Metalografski prikaz perlitne strukture [6] .....	6
Slika 3.5 Metalografski prikaz austenitne strukture [3] .....	6
Slika 3.6 Utjecaj $\gamma$ -genih elemenata na sustav Fe-Me [7] .....	8
Slika 3.7 Utjecaj većine $\alpha$ -genih elemenata na sustav Fe-Me [7] .....	9
Slika 3.8 Utjecaj $\alpha$ -genih elemenata (vanadij i krom) na sustav Fe-Me [7] .....	9
Slika 3.9 Shematski prikaz dijagrama izotermičke tvorbe austenita [2] .....	11
Slika 3.10 Promjena veličine kristalnog zrna austenita ovisno o temperaturi [2] .....	11
Slika 3.11 Ovisnost brzine perlitne pretvorbe i temperature [2] .....	13
Slika 3.12 Shematski prikaz perlitne pretvorbe [2] .....	13
Slika 3.13 Utjecaj sadržaja ugljika na temperature martenzitne pretvorbe [2] .....	15
Slika 3.14 Igličasta struktura martenzita [2] .....	16
Slika 3.15 Rast zaostalog austenita u martenzitnoj strukturi izazvan porastom sadržaja ugljika u primarnom austenitu [2] .....	17
Slika 3.16 Burnsov dijagram [8] .....	17
Slika 3.17 Grafički prikaz područja bainitne pretvorbe [2] .....	18
Slika 3.18 Shematski prikaz bainitne pretvorbe [2] .....	19
Slika 3.19 Konstrukcija TTT-dijagrama [10] .....	21
Slika 3.20 Izotermički TTT-dijagram za podeutektoidni čelik [10] .....	22
Slika 3.21 TTT-dijagram za kontinuirano hlađenje kod eutektoidnih čelika [11] .....	24
Slika 3.22 TTT-dijagram za kontinuirano hlađenje podeutektoidnog čelika [11] .....	25
Slika 3.23 TTT-dijagram za kontinuirano hlađenje nadeutektoidnog čelika [11] .....	25
Slika 4.1 Dijagram postupka kaljenja čelika [10] .....	26
Slika 4.2 Klasični postupak direktnog kaljenja prikazan u TTT-dijagramu [11] .....	27

Slika 4.3 Klasičan postupak slomljenog kaljenja prikazan u TTT-dijagramu [11] .....	28
Slika 4.4 Proces stepeničasto-martenzitnog kaljenja prikazan u TTT-dijagramu [11] .....	29
Slika 4.5 Vrijednosti tvrdoće čelika ovisno o sadržaju ugljika u čeliku i udjelu martenzita [12].	31
Slika 5.1 Raspodjela tvrdoće nakon gašenja čelika različitih promjera [2] .....	33
Slika 5.2 Standardizirana epruveta za Jominyev pokus [8] .....	34
Slika 5.3 Trenutak Jominyevog pokusa u kojemu mlaz vode hladi epruvetu udarom u glatko čelo [13] .....	35
Slika 5.4 Ispitivanje tvrdoće po središnjici izbrušene površine [14].....	36
Slika 5.5 Shematski prikaz ohlađivanja epruvete u TTT-dijagramu [8] .....	37
Slika 5.6 Usporedba prokaljivosti legiranih i ugljičnih čelika primjenom Jominyeve krivulje [11] .....	38
Slika 5.7 Crafts-Lamontovi dijagrami [8] .....	40
Slika 5.8 Shematski prikaz konstruiranja U-krivulje po presjeku kaljenog obratka pomoću Crafts-Lamontovog dijagrama i Jominyeve krivulje [8].....	41
Slika 6.1 Strojni komad MJ.22-DP.42 .....	42
Slika 6.2 OVER komorna peć za zagrijavanje uzorka .....	43
Slika 6.3 Ispitna epruveta postavljena u komornu peć spremna za zagrijavanje .....	44
Slika 6.4 Naprava za gašenje ispitnog uzorka.....	45
Slika 6.5 Postavljanje zagrijanog ispitnog uzorka iz peći u držač naprave za gašenje .....	45
Slika 6.6 Ohlađivanje ispitnog uzorka tijekom desetominutnog gašenja.....	46
Slika 6.7 Ispitni uzorak nakon gašenja .....	46
Slika 6.8 Ispitni uzorak izbrušen 0,4 mm sa dvije paralelne strane .....	47
Slika 6.9 Tvrdomjer korišten za ispitivanje tvrdoće prema Rockwellovoj C metodi .....	47
Slika 6.10 Postupak ispitivanja tvrdoće ispitne epruvete na tvrdomjeru po Rockwellovoj C metodi.....	48
Slika 6.11 Jominyeva krivulja za čelik 20MnCr5 .....	49
Slika 6.12 Tok tvrdoće, odnosno U-krivulje po presjeku strojnog dijela MJ.22-DP.42 za gašenje u vodi (H = 1) i ulju (H = 0,35) .....	51

## POPIS TABLICA

Tablica 6.1 Propisani kemijski sastav čelika 20MnCr5 [16] .....	43
Tablica 6.2 Izmjerene vrijednosti tvrdoće na definiranim udaljenostima od gašenog čela ispitnog uzorka .....	49
Tablica 6.3 Vrijednosti dobivene iz Crafts-Lamontovih dijagrama.....	50



## SAŽETAK

Tema i zadatak ovog diplomskog rada bila je procijeniti dubinu prokaljivanja strojnog dijela MJ.22-DP.42 prema normi HRN EN ISO 642. Kako bi se sama prokaljivost uspješno procijenila, najprije je bilo potrebno upoznati se sa terminima čelika, prokaljivosti i samog postupka kaljenja. Tako su u prvom dijelu diplomskog rada teorijski objašnjeni pojmovi čelika te njegova karakterizacija, općenita svojstva te na koji način se ta svojstva mogu mijenjati. U trećem poglavlju opisana je mikrostrukturalna pretvorba čelika pri toplinskoj obradi, pripadajući Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram stanja, mikrostrukturni sastojci čelika te načini i uvjeti njihove pretvorbe, te je na samom kraju detaljno opisan i TTT-dijagram. Nakon toga je u četvrtom poglavlju detaljno objašnjen postupak toplinske obrade kaljenja budući da će se koristiti u praktičnom dijelu te pojam prokaljivosti čelika. Potom su opisane i moguće metode procjene prokaljivosti čelika, najčešće korištene, Grossmannova i Jominy metoda. Budući da se koristi u praktičnom dijelu, Jominy metoda je u nastavku detaljnije opisana.

Nakon teorijskog dijela slijedi praktični dio diplomskog rada u kojemu se ispituje, odnosno vrši postupak same procjene dubine prokaljivanja zadanog strojnog komada koristeći Jominyevu metodu i Crafts-Lamontove dijagrame. Pomoću njih se potom dobiju konačne U-krivulje za različite intenzitete gašenja  $H$ , koje opisuju tok tvrdoće po presjeku zadanog strojnog dijela za slučaj gašenja strojnog dijela u ulju i vodi. Detaljno je opisan svaki korak proveden u postupku te su prikazani konačni rezultati.

Ključne riječi: čelik, fazne pretvorbe, tvrdoća, kaljenje, prokaljivost, Jominy metoda

## SUMMARY

The topic and task of this master thesis was estimation of hardening depth of workpiece MJ.22-DP.42 according to the HRN EN ISO 642 standard. In order to successfully estimate the hardenability itself, first it was necessary to become familiar with the concepts of the steel, the hardenability and the hardening process. In the first part of the master thesis, the concepts of steel and its characterization, general properties and how these properties can be changed are theoretically explained. Third chapter describes the microstructural transformation and TTT-diagram in detail. In the fourth chapter, the process of heat treatment of hardening is explained in detail since it is used in practical part of master thesis, and concept of hardenability of steel as well. Then the possible methods for estimation of the hardenability of steel are described, the most commonly used, the Grossmann and Jominy methods. Since it is used in the practical part, Jominy method is described in more detail.

The theoretical part is followed by the practical part of master thesis, in which the process of estimation of hardening depth of given workpiece is performed by using Jominy method and Crafts-Lamonts diagrams in order to obtain the final U-curves for different quench intensity  $H$ . U-curves describes the flow of hardness across the section of the given workpiece for both quenching cases (water and oil). Each step in the procedure is described in detail and the final results are presented.

Key words: steel, phase transformations, hardness, hardening, hardenability, Jominy method