

# Procjena dubine prokaljivosti strojnog dijela JR.23.- PP.68

---

**Prvonožec, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:835971>

*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

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA**

**JR.23-PP.68**

Rijeka, 06.09.2023.

Ivan Prvonožec

0069088641

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA**

**JR.23-PP.68**

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

Rijeka, 06.09.2023.

Ivan Prvonožec

0069088641

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

Rijeka, 11. ožujka 2023.

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

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Ivan Prvonožec (0069088641)**  
Studij: **Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva**

Zadatak: **Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela JR.23-PP.68 / Estimation of hardening depth of workpiece JR.23-PP.68**

### Opis zadatka:

Potrebno je procijeniti prokaljivost strojnog dijela JR.23-PP.68 nakon kaljenja. Potrebno je teorijski obraditi i opisati pojam prokaljivosti, a zatim opisati i usporediti postojeće metode za procjenu prokaljivosti.

Nadalje, potrebno je procijeniti dubinu prokaljivanja strojnog dijela JR.23-PP.68. Tvrdocu i dubinu prokaljenog sloja strojnog dijela potrebno je procijeniti na temelju propisanih vrijednosti rezultata Jominyjevog pokusa odgovarajućeg čelika. Potrebno je proanalizirati rezultate procjene prokaljenog sloja i donijeti odgovarajuće zaključke.

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



Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Dario Ilić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



Izv. prof. dr. sc. Samir Žic

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam prema članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku studija preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, samostalno izradio završni rad „Procjena dubine prokaljivosti strojnog dijela JR.23-PP.68“ pod mentorstvom izv prof. dr. sc. Daria Iljkića.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Dariu Iljkiću na njegovoj pomoći i usmjeravanju prilikom pisanja završnog rada na datu temu, kao i svojoj obitelji te prijateljima koji su mi pomogli prilikom izrade ovog rada.

## Sadržaj

1.	UVOD .....	1
2.	ČELIK .....	2
2.1.	Čelik općenito .....	2
2.1.1.	Vrste čelika .....	2
2.2.	Konstruktivski čelici .....	3
2.2.1.	Mehanička svojstva .....	4
2.2.2.	Otpornost na trošenje .....	4
2.2.3.	Otpornost na koroziju .....	4
2.2.4.	Tehnološka svojstva .....	4
3.	TOPLISNKA OBRADA .....	5
3.1.	Fazne pretvorbe u čeliku .....	7
3.1.1.	Cementit .....	8
3.1.2.	Ferit .....	8
3.1.3.	Perlit .....	9
3.1.4.	Ledeburit .....	9
3.1.5.	Austenit .....	10
3.2.	Martenzitna pretvorba .....	11
3.2.1.	Pretvorba austenita u martenzit .....	12
3.2.2.	Martenzitna mikrostruktura .....	13
4.	TTT – DIJAGRAM .....	16
4.1.	Izotermički TTT-dijagram .....	17
4.2.	TTT-dijagram kontinuiranog hlađenja .....	18
5.	KALJENJE ČELIKA .....	19
5.1.	Klasični postupci kaljenja .....	20
5.1.1.	Izravno kaljenje .....	21
5.1.2.	Slomljeno kaljenje .....	21
5.2.	Prokaljivost i zakaljivost .....	21
5.3.	Metode procjene prokaljivosti .....	22
5.3.1.	Metoda totalne prokaljivosti .....	22
5.3.2.	Grossmannov postupak kvantifikacije .....	23
5.3.3.	Jominyjeva metoda kvantifikacije prokaljivosti .....	26
6.	PROCJENA DUBINE PROKALJIVOSTI STROJNOG DIJELA JR.23-PP.68 .....	29
6.1.	Čelik C45E .....	30

6.2. Čelik 50CrV4.....	32
6.3. Čelik 42CrMo4.....	34
7. ZAKLJUČAK .....	36
LITERATURA .....	37
POPIS SLIKA .....	38
POPIS TABLICA,.....	39
SAŽETAK.....	40
SUMMARY .....	40



## **1. UVOD**

Završni rad je vezan za toplinsku obradu određenog materijala u ovom slučaju govorimo o prokaljivosti čelika strojnog dijela JR.23-PP.68.

Materijali su osnova na temelju koje se razvilo cijelo čovječanstvo te se koriste u svakoj djelatnosti kako bi mogli izraditi neki gotov proizvod. Kako bi se iz neke sirovine mogao dobiti gotov proizvod veoma je bitno poznavati svojstva materijala koji se obrađuje. Postoje brojni postupci obrade materijala, a jedan širok spektar obuhvaća upravo toplinska obrada.

Toplinska obrada metala je skup postupaka kojima se metal u čvrstom stanju podvrgava promjenama temperature s određenim vremenom da bi mu se promijenila struktura, a time i svojstva. Postupci toplinske obrade primjenjuju se kao pripremni radi poboljšavanja određenih proizvodnih svojstava ili kao završni kako bi se postigla konačna mehanička, fizikalna i kemijska svojstva.

## 2. ČELIK

### 2.1. Čelik općenito

Čelik je i biti će najvažniji konstrukcijski te alatni materijal u strojarstvu. Sve je to zbog njegovih dobrih svojstva, koja se mogu regulirati u širokom rasponu: legiranjem, deformiranjem, toplinskom obradom te kombinacijom ova tri postupka. Čelici se također lako spajaju međusobno, a i sa drugim materijalima pomoću postupaka zavarivanja, lemljenja i lijepljenja. Čelik je slitina željeza sa ugljikom (do 2% FeC) ili još nekih dodataka i nečistoća. Čelik se dobiva oksidacijskim pročišćavanjem sirovog željeza koje sadrži 3,5% do 4% ugljika te ostale elemente (silicij, mangan, fosfor i sumpor). Čelik se danas proizvodi uglavnom na dva načina, a to su: oksidacijskim pročišćavanjem sirovog željeza u kisikovu konvertoru te taljenjem čeličnog otpada u visokoučinskim električnim pećima. U pojedinim zemljama se koriste još uvijek Siemens-Martinove peći. Legiranjem Fe-C legure legirajućim elementima (Si, Mn, Ni, W itd.) mogu se svojstva čistih legura znatno poboljšati. [1, 10]

#### 2.1.1. Vrste čelika

Podjela čelika je: prema sastavu, mikrostrukturi, svojstvima, proizvodnom postupku, namjeni i sl. S obzirom na sastav dijele se na ugljične i legirane čelike. Ugljični čelici su čelici koji uz željezo (Fe) sadrže i ugljik (C), a legirani su oni koji osim ugljika sadrže neke druge elemente. Prema svojstvima se razlikuju obični, kvalitetni i plemeniti čelici. Obični je čelik nelegira, kvalitetni čelici su nelegirane i legirane vrste čelika za koje nije potrebna termička obrada, a pri proizvodnji treba zadovoljiti neku određenu kvalitetu površine, strukturu i žilavost. Pod plemenite čelike spadaju nelegirani i legirani čelici kojima se posebna svojstva postižu termičkom obradom te zbog specijalnih uvjeta proizvodnje imaju veći stupanj čistoće od kvalitetnih čelika. Mikrostruktorna podjela je na: austenitni čelik, martenzitni čelik, feritni čelik, perlitni čelik i ledeburitni čelik. Prema namjeni čelik se dijeli na konstrukcijski (obični, poboljšani), specijalni, alatni čelik, čelik za cijevi, opruge, za kotrljajuće ležajeve itd. [1, 10]

## 2.2. Konstrukcijski čelici

Konstrukcijski čelici su najzastupljeniji te se primjenjuju za izradu konstrukcijskih dijelova strojeva i uređaja koji obavljaju neku funkciju kao što je prijenos gibanja sila i momenata (slika 1), razni spremnici ili transportni vodovi za tekućine i plinove itd. Pod konstrukcijske čelike spadaju razni elementi kao npr. osovine, vratila, zupčanici, opruge itd. [2, 10]



*Slika 1 Primjer konstrukcijskog čelika (opruga) [8]*

Konstrukcijski čelici trebaju zadovoljavati određena svojstva koja proizlaze iz zahtjeva s obzirom na funkciju i namjenu pojedinog konstrukcijskog dijela. Ti zahtjevi su sljedeći:

1. Mehanička svojstva
2. Otpornost na trošenje
3. Otpornost na koroziju
4. Tehnološka svojstva

### 2.2.1. Mehanička svojstva

Kod konstrukcijskih čelika važna mehanička svojstva koja se prate su:

- visoka granica razvlačenja (čvrstoća) povezana s plastičnom deformabilnošću (istežljivošću) radi sigurnosti od pojave krhkog loma
- dovoljno visoka granica puzanja i čvrstoća pri povišenim temperaturama
- dovoljna žilavost i čvrstoća pri normalnim, sniženim i niskim temperaturama
- otpornost na umor – dovoljna dinamička izdržljivost [2, 10]

### 2.2.2. Otpornost na trošenje

Otpornost na trošenje je svojstvo koje se promatra kroz što manji gubitak mase. Odnosno kroz promjenu stanja površine zbog međusobnog djelovanja dijelova u dodiru. [2, 10]

### 2.2.3. Otpornost na koroziju

Ovo svojstvo se promatra kroz korozijsku postojanost u atmosferi ili u agresivnim tekućinama te otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama uz prisutnost različitih plinova. [2, 10]

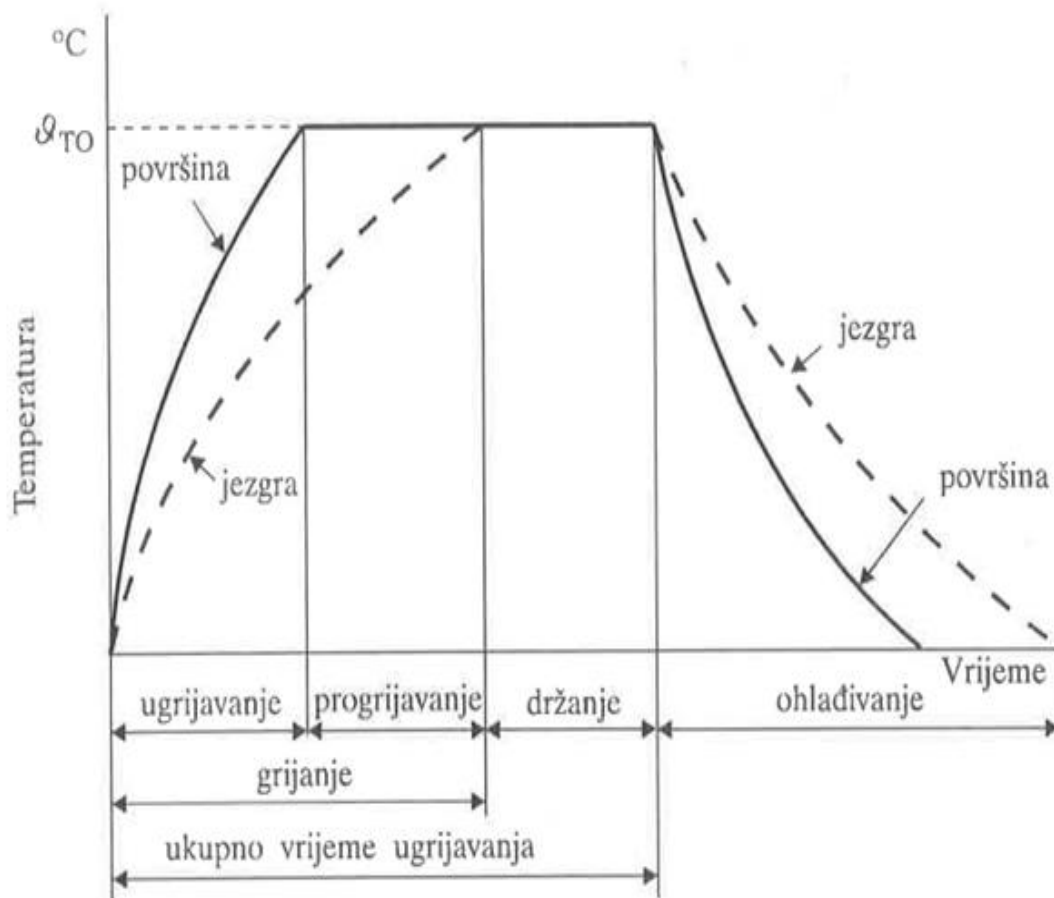
### 2.2.4. Tehnološka svojstva

To su svojstva vezana uz postupke prerade materijala, odnosno oblikovanja dijelova. Neka od važnijih svojstava su: rezljivost odnosno sposobnost obrade odvajanjem čestica, zavarljivost i hladna oblikovljivost ( obrade savijanjem, štancanjem i sl.). Kako bi mogli odabrati čelik bitno je poznavati svojstva tog čelika! [2, 10]

### 3. TOPLISNKA OBRADA

Toplinskom obradom smatraju se tehnološki procesi zagrijavanja slitine do određene temperature, zadržavanja na tim temperaturama određeno vrijeme i ohlađivanje određenim brzinama u svrhu postizanja traženih svojstva (mehanička, fizička, kemijska) legure za određen proizvod, a za to nam služe razni dijagrami (slika 2). Pomoću toplinske obrade postižu se najraznovrsnije promjene svojstava. Promjene svojstva ostvaraju se promjenom mikrostrukture te promjene gustoće kristalnih nesavršenosti. Toplinskom obradom se strojni dio može naknadno obraditi, praktično nakon što je formiran konačni oblik strojnog dijela (bitno za napomenuti je da je toplinski proces SKUP proces). Prema svemu navedenom zaključuju se temeljni parametri postupka toplinske obrade [4]:

- temperatura,  $T$  (K),  $\vartheta$  ( $^{\circ}\text{C}$ )
- trajanje (vrijeme),  $t$  (s, min, h)



Slika 2 Dijagram toplinske obrade (kaljenje) [4]

Objašnjenje veličina na dijagramu:

– temperatura toplinske obrade

ugrijavanje – vrijeme do trenutka kada površinski slojevi postignu temperaturu toplinske obrade

progrijavanje – dio vremena do trenutka kada i slojevi jezgre postignu  $\vartheta_{T,O}$ , tj. kada je  $\vartheta =$  konst.

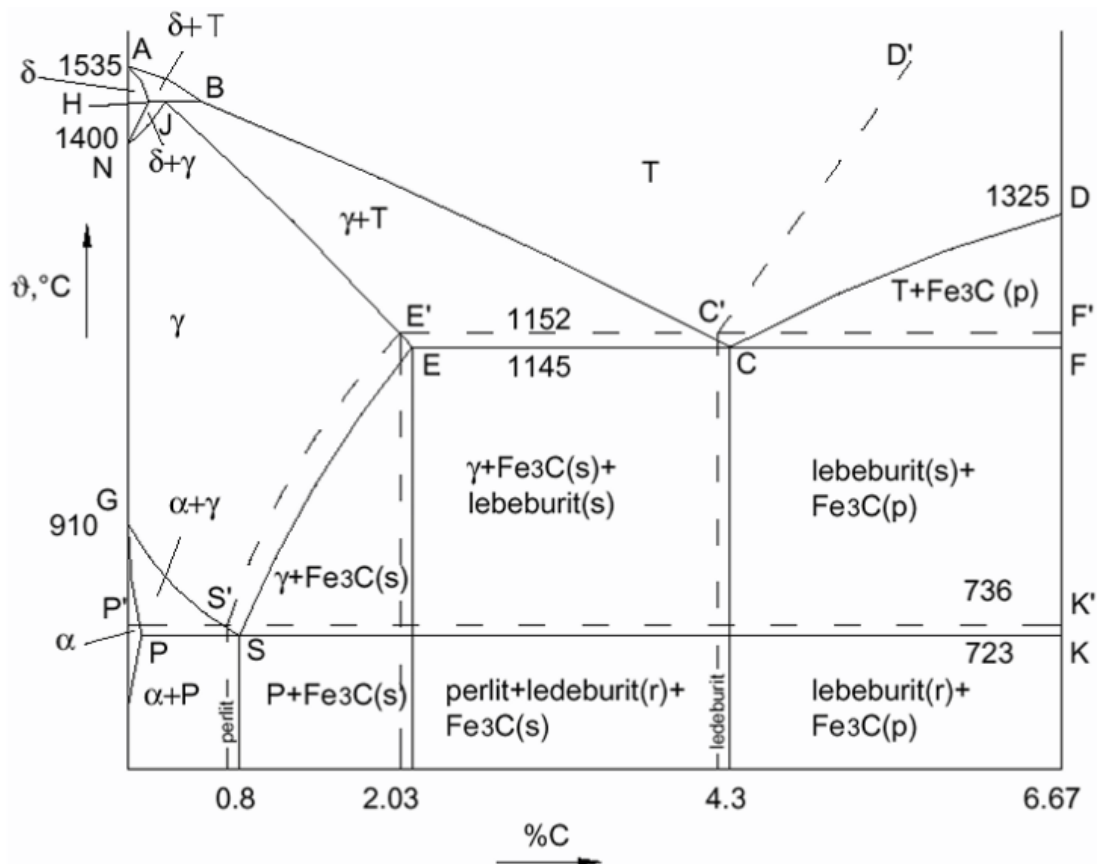
grijanje – zbroj trajanja ugrijavanja i progrijavanja

držanje – trajanje koliko obradak ostaje na  $\vartheta_{T,O}$ , od trena kada je on progrijan do početka

ohlađivanje – vrijeme snižavanja temperature predmeta dok slojevi jezgre ne dostignu željenu temperaturu (izjednače je s temperaturom površinskih slojeva i okoliša). [4]

### 3.1. Fazne pretvorbe u čeliku

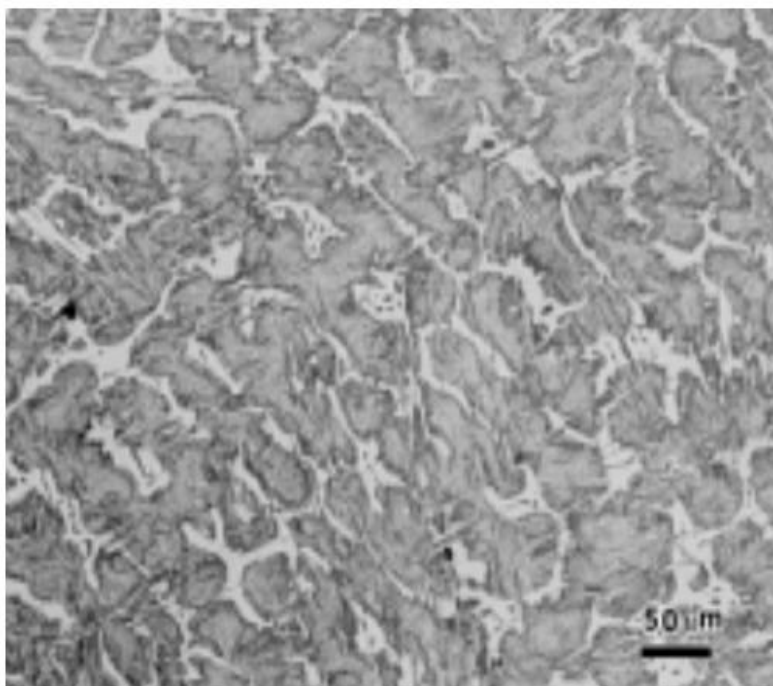
Kada je riječ o toplinskoj obradi čelika temelj analize je dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C (slika 3). Pomoću ovog dijagrama uočavaju se karakteristična fazna područja, kritične prekrystalizacije u ravnotežnim uvjetima koji odgovaraju sporom ugrižavanju ili ohlađivanju čelika. Ovo je složeni dijagram koji sadrži peritektički, eutektički i utektoidni dio. Razlikuju se dva tipa kristalizacije kod Fe-C legura: stabilna i metastabilna kristalizacija. **Stabilna kristalizacija** nastupa samo kod ekstremno sporog hlađenja, što ovisi o temperaturi i sastavu. Atomi ugljika ulaze u rešetku željeza gdje nastaju intersticijski kristali mješanci ( $\delta, \gamma, \alpha$ ) ili se tvore kristali grafita (C). Metastabilna kristalizacija nastupa kod konačnih i relativno sporih brzina ohlađivanja. Kod ove kristalizacije također nastaju intersticijski kristali mješanci ( $\delta, \gamma, \alpha$ ), no umjesto grafita pojavljuje se cementit (Fe<sub>3</sub>C) [4, 8].



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

### 3.1.1. Cementit

Cementit je intermetalni spoj (željezni karbid,  $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Zbog komplicirane ortorombske rešetke nema kliznih ravnina pa je zbog toga tvrd i krhak. Cementit je jako stabilan te se smatra ravnotežnom fazom. Nastaje u primarnoj kristalizaciji: ledeburit (s) +  $\text{Fe}_3\text{C}$  (p) te u sekundarnoj kristalizaciji: prelit (P) +  $\text{Fe}_3\text{C}$  (s). Sadržaj ugljika je 6,67 %C. Mikrostruktura cementita je prikazana na slici 4. [4, 8]

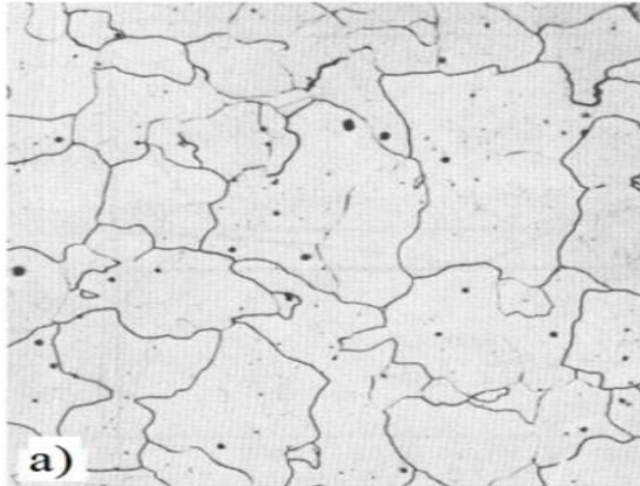


*Slika 4 Mikrostruktura cementita [4]*

### 3.1.2. Ferit

Ferit je intersticijski kristal mješanac ugljika i  $\alpha$  željeza s deformiranom BBC (prostorno centrirana kubična rešetka) rešetkom. Nastaje u primarnoj kristalizaciji, a maksimalna topljivost mu je 0,09 %C na 1495°C. U sekundarnoj kristalizaciji nastaje kao primarni ferit ( $\alpha$ ) ili eutektoidni ferit (P). Maksimalna topljivost mu je 0,025 %C na 723 °C . Njegova mikrostruktura se može vidjeti na slici 5. [4, 8, 12]





*Slika 5 Mikrostruktura ferita [5]*

### 3.1.3. Perlit

Perlit je eutektoid metastabilno kristaliziranih legura Fe-C. Sadrži 0,8 %C, a sastoji se od eutektoidnog frita i eutektoidnog cementita. Nastaje sekundarnom kristalizacijom austenita na eutektoidnoj temperaturi ood 723 °C . Mikrostruktura perlita je prikazana na slici 6. [4, 8, 12]

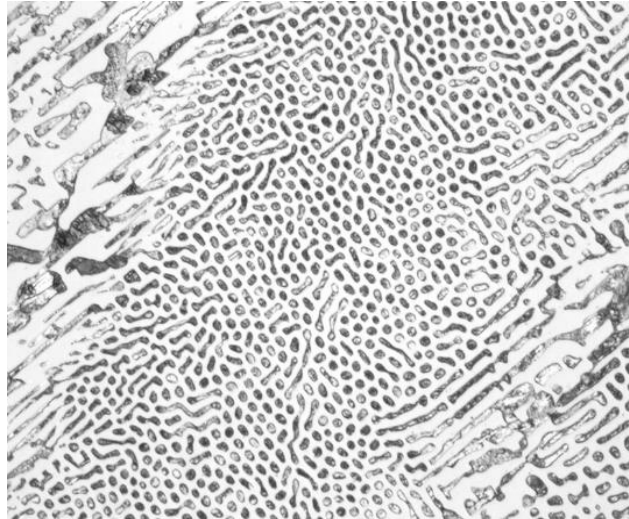


*Slika 6 Mikrostruktura perlita [6]*

### 3.1.4. Ledeburit

Ledeburit je eutektikum metastabilno kristaliziranih legura Fe-C. Sadrži 4,3 %C, a sastoji se od eutektičkog austenita i eutektičkog cementita. Nastaje primarnom kristalizacijom taline na

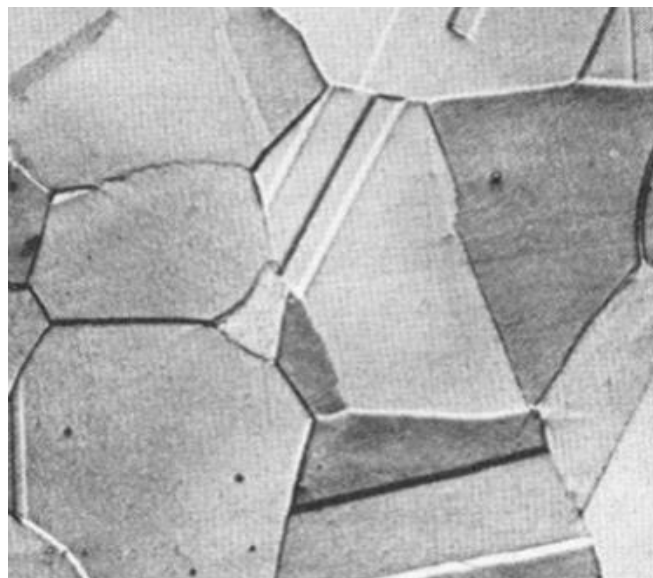
eutektnoj temperaturi 1147 °C zbog toga što se na granicama eutektnog austenita izlučuje sekundarni cementit. Prikaz mikrostrukture ledeburita se nalazi na slici 7.



*Slika 7 Mikrostruktura ledeburita [6]*

### 3.1.5. Austenit

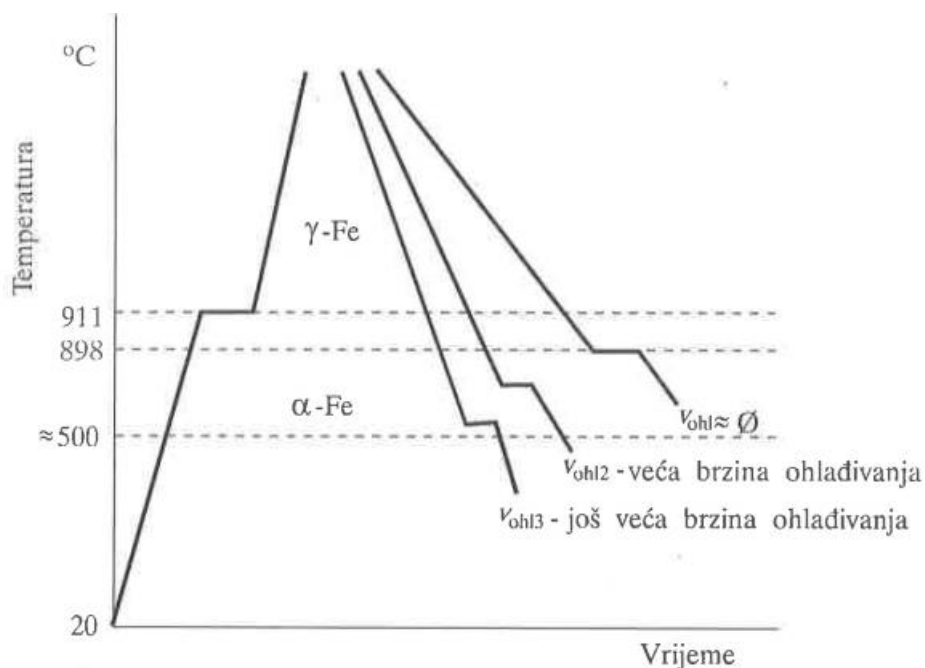
Austenit je intersticijski kristal mješanac ugljika i  $\gamma$  željeza. Sadrži deformirani FCC rešetku (prostorno centrirana kubična rešetka) jer je atom ugljika veći od raspoloživih šupljina. Nastaje u primarnoj kristalizaciji kao primarni ili eutektnički austenit. Maksimalna topljivost mu je sa 2,03 %C na temperaturi od 1147 °C [9, 4 \*]. Mikrostruktura austenita se nalazi na slici 8. [4, 8, 12]



*Slika 8 Mikrostruktura austenita [12]*

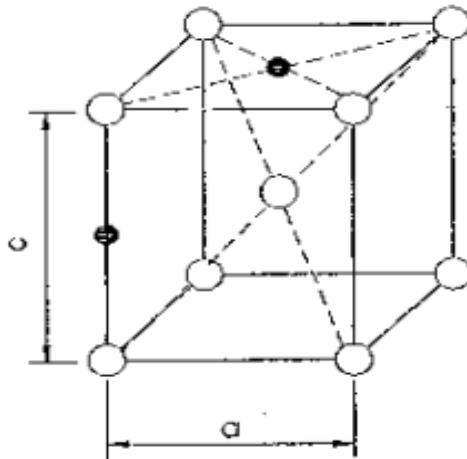
### 3.2. Martenzitna pretvorba

U slučaju dovoljno brzog hlađenja čistog željeza ( $v_{ohl} \sim 0$ ) na temperaturi oko  $500^\circ\text{C}$  prilikom prijelaza  $\gamma\text{-Fe}$  u  $\alpha\text{-Fe}$  postoji temperatura histereza u iznosu od  $13^\circ\text{C}$ . Dakle postoji prijelaz iz plošno centrirane kristalne rešetke u kubično, prostorno centriranu kristalnu rešetku. Martenzitna pretvorba (tkzv. bezdifuzijski mehanizam) sastoji od procesa smicanja na način da se atomi u rešetki  $\gamma\text{-željeza}$  pomiču uzduž karakterističnih pravaca, na taj način atomi na kraju zauzimaju položaje koji odgovaraju rešetki  $\alpha\text{-željeza}$ . U trenutku povećanja brzine ohlađivanja temperatura histereza postaje sve veća. To bi značilo da bi do prekrizalizacije  $\gamma\text{-Fe}$  u  $\alpha\text{-Fe}$  dolazilo na sve nižim temperaturama (slika 9) [8].



Slika 9 Prikaz utjecaja brzine na prekrizalizaciju [8]

Otapanjem ugljika u austenitu se stabilizira  $\gamma$  područje, te nakon dovoljno brzog gašenja jedan dio čelika iz austenitnog područja transformira u martenzit, a drugi dio se ustaljuje u mikrostrukturi. S obzirom na to pri sobnoj temperaturi određeni dio netransformiranog austenita zaostaje te se zatim mikrostruktura sastoji od martenzita i zaostalog austenita. Martenzit je kruta otopina ugljika u  $\alpha\text{-Fe}$  koja sadrži najviše  $2,03\% \text{C}$ . Koncentracija ugljika u martenzitu je jednaka koncentraciji ugljika u prethodnom austenitu te je martenzitna kristalna rešetka tetragonala (slika 10) [8].

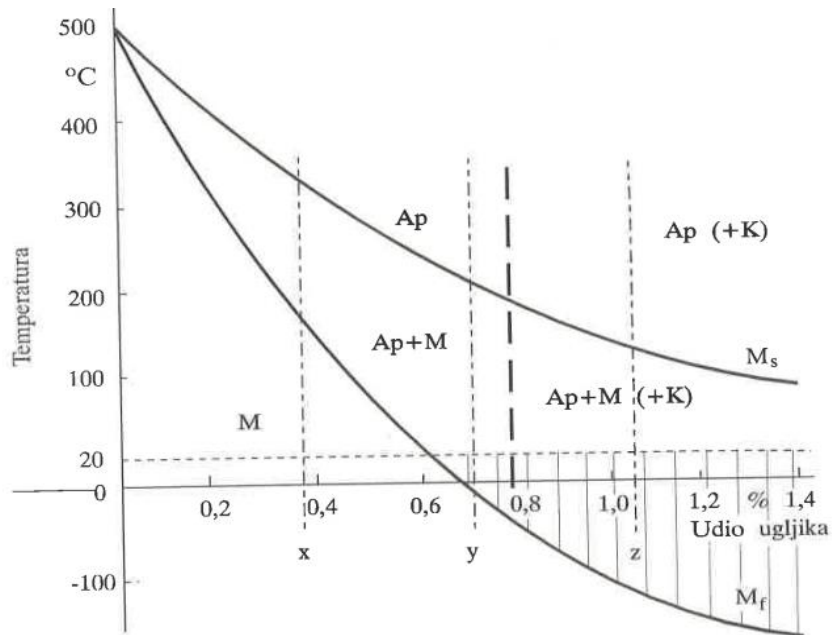


Slika 10 Kristalna rešetka martenzita [8]

Martenzit uvijek ima veću slobodnu energiju od smjese ferita i karbida, kako bi se postigla martenzitna struktura potrebno je prije procesa gašenja odraditi proces austenitizacije čelika. Postupak austenitizacije uz naknadno gašenje naziva se kaljenje čelika [8, 9].

### 3.2.1. Pretvorba austenita u martenzit

Pretvorba započinje na određenoj početnoj temperaturi  $M_s$  ("Martensite Start"). Dovoljno povišenje brzine ohlađivanja potisnulo je krivulje (slika 12)  $A_3$ ,  $A_1$  i  $A_{cm}$  metastabilnog Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagrama u krivulju  $M_s$ . U slučaju dovoljno brzog ohlađivanja austenit će ostati postojan sve do sjecišta čelika s krivuljom  $M_s$  te tada započinje transformacija u martenzit. Taj austenit se nalazi između  $M_s$  i  $A_3$ , a naziva se pothlađeni austenit ( $A_p$ ). Pretvorba završava na konačnoj temperaturi  $M_f$ . Početna i završna temperatura ovise o koncentraciji ugljika i legirajućih elementa u prethodnom austenitu (slika 11). Legirajući elementi imaju utjecaj na temperaturu martenzitne pretvorbe kada su otopljeni u austenitu dok određene koncentracije utječu na sniženje temperature i povećanje količine zaostalog austenita [8, 9].



Slika 11 Dijagram početka i završetka martenzitne pretvorbe [8]

### 3.2.2. Martenzitna mikrostruktura

Struktura martenzita je igličasta (slika 12), njegovo kristalno zрно je u obliku pločice (igle). Između matičnih kristalnih zrna martenzita i austenita postoji orijentacijska ovisnost, a ona se očituje u pravilnom položaju martenzitnih pločica. Ravnine austenita i martenzita su identične, a između iglica martenzita nalazi se zaostali austenit [4, 8].



Slika 12 Martenzitna mikrostruktura [8, 12]

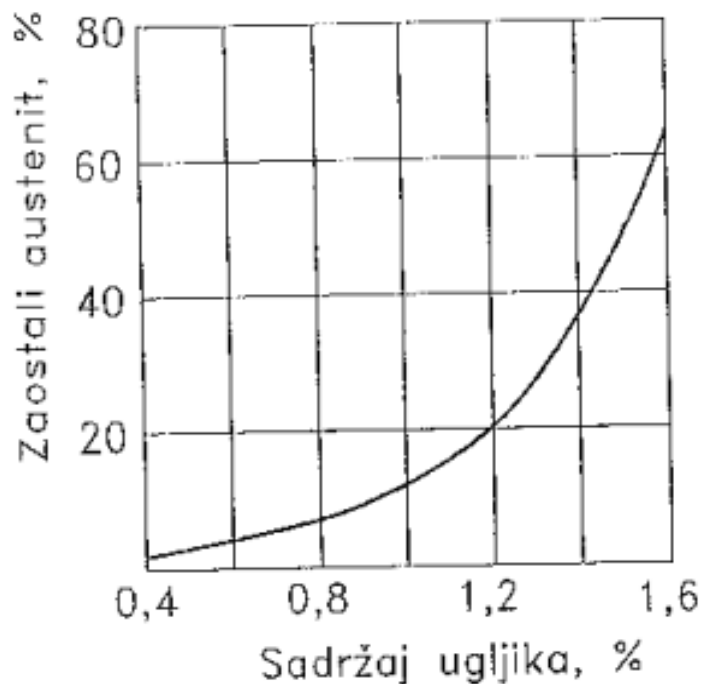
Atom ugljika koji je prisilno rastvoren u M-rešetci uzrokuje njenu distorziju u jednom smjeru. Ovom distorzijom vrijedi da će čelik u martenzitnoj strukturi imati vrlo visoku tvrdoću uz vrlo nisku duktilnost i žilavost. Posljedica ove pretvorbe je povećanje tako da će čelik martenzitne strukture imati veći volumen nego čelik u feritno-perlitnoj strukturi. S obzirom na to vrijedi:

$$V_F = a_F^3$$

$$V_M = a_M^2 \cdot c \quad (c > a_M)$$

$$V_M > V_F$$

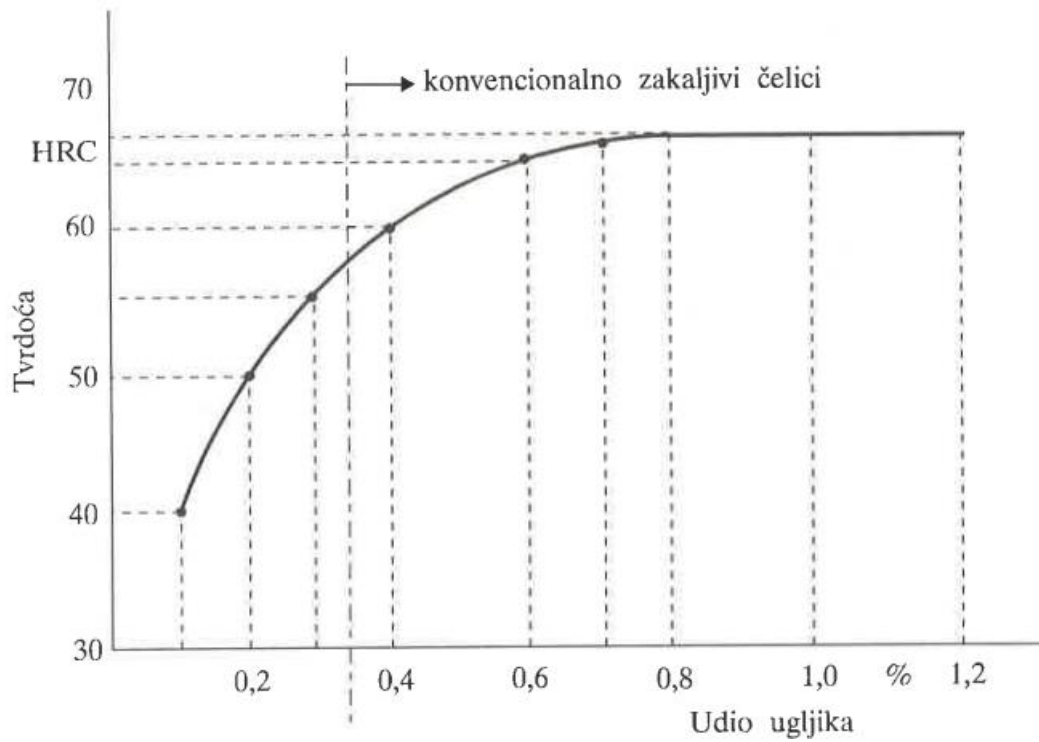
Nije poželjno imati veću količinu zaostalog austenita, a posebno je nepoželjan kao posebna izdvojena faza. Zaostali austenit u mikrostrukturi raste s koncentracijom ugljika u primarnom austenitu (slika 13).



Slika 13 Dijagram ovisnosti ugljika i zaostalog austenita [9]

Sadržaj ugljika također ima utjecaj na tvrdoću martenzita (slika 14). Sa povećanjem količine ugljika raste tvrdoća martenzita dok se žilavost smanjuje. Što je veći sadržaj ugljika martenzit

je poprilično tvrd i krhak. Tvrdoća zakaljena čelika također ovisi o udjelu ostalih faza u mikrostrukturi čelika kao npr. udjelima zaostalog austenita i karbida. Uz veću količinu zaostalog austenita u mikrostrukturi austenit se izlučuje u obliku izdvojene faze te se smanjuje tvrdoća zakaljenog čelika [8, 9].



Slika 14 Dijagram ovisnosti količine ugljika o tvrdoći [4]

## 4. TTT – DIJAGRAM

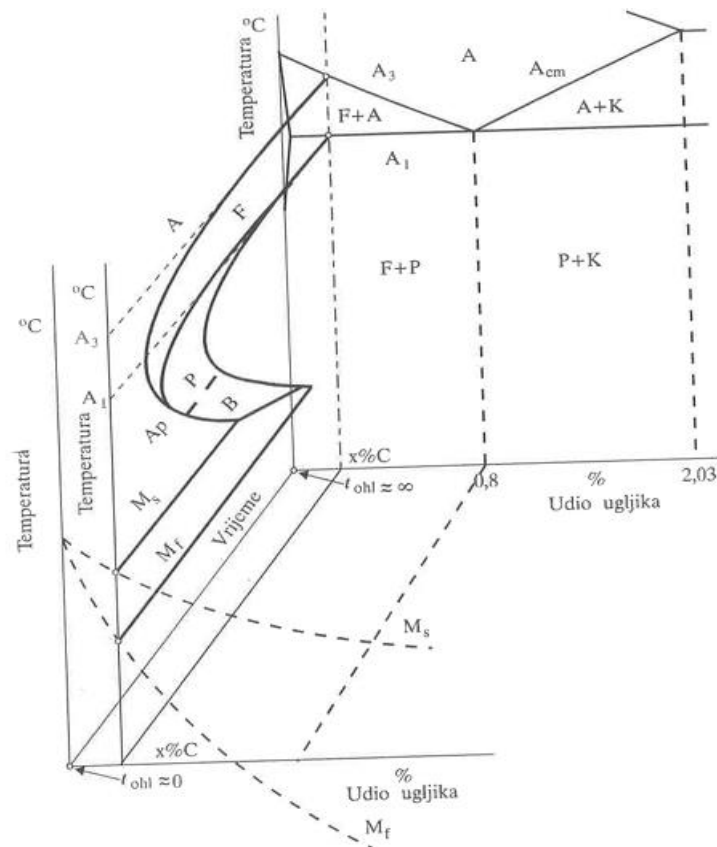
TTT-dijagram (slika 15), odnosno dijagram: vrijeme, temperatura i pretvorba je dijagram na kojemu se najbolje mogu prikazati fazne pretvorbe pri ohlađivanju čelika iz austenitnog područja. Austenit se raspada u izotermičkim uvjetima. Razlikuju se TTT-dijagrami za izotermičke pretvorbe i TTT-dijagram za kontinuirano ohlađivanje. Ovaj dijagram se koristi kod ubrzanog hlađenja te se razlikuje za svaki čelik (različiti kemijski sastav čelika rezultira različitim dijagramima). Uz pomoć TTT-dijagrama moguće je odrediti količinu pretvorenog austenita. Metastabilni Fe-Fe<sub>3</sub>C vrijedi dugačko trajanje ohlađivanja (mala brzina ohlađivanja) [8]:

- $t_{ohl} = \infty$

Uptonov koji vrijedi za kratko vrijeme ohlađivanja (velika brzina ohlađivanja):

- $t_{ohl} = \emptyset$

Između ova dva ekstrema nastaje kvalitativna slika u slučaju vertikalnog presjeka trokomponentnog prostornog sustava pri određenom udjelu ugljika.

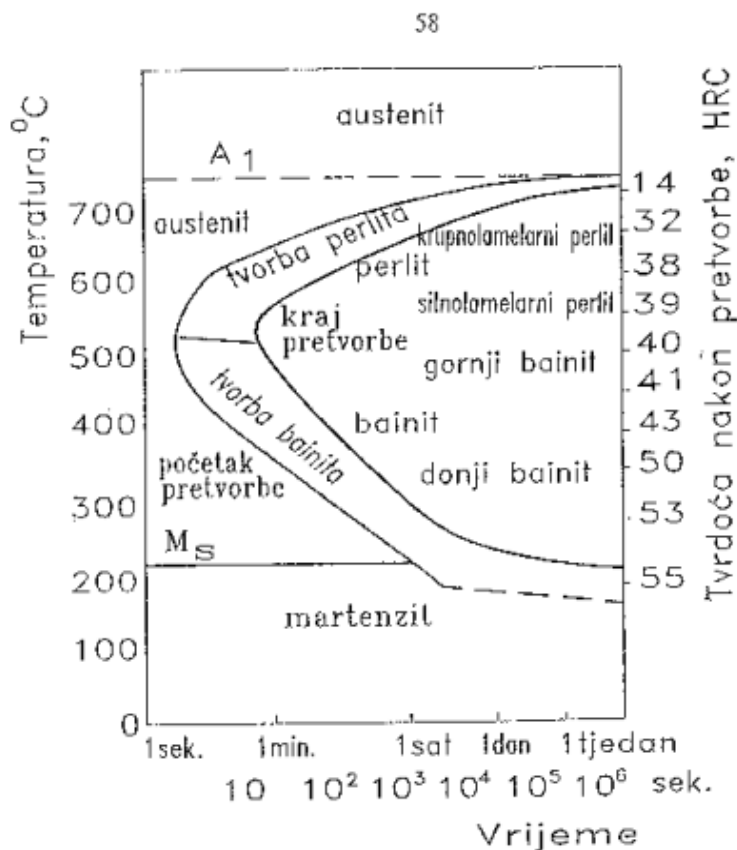


Slika 15 TTT-dijagram kao presjek prostornog dijagrama [4]



#### 4.1. Izotermički TTT-dijagram

Pomoću izotermičkog dijagrama prikazuju se trajanja s početka i kraja pretvorbi na određenim temperaturama. Za početak pretvorbe dozvoljava se vrijeme koje protekne do 1% transformiranog austenita i za kraj pretvorbe dozvoljeno vrijeme od 99% transformiranog austenita. Vrijeme koje protekne od početka pretvorbe naziva se inkubacijsko vrijeme. Svakoj od temperaturnih pretvorbi odgovara druga konačna mikrostruktura kao i druga mehanička svojstva. Oblik dijagrama uvjetovan je djelovanjem dva suprotna faktora. U slučaju porasta pothlađenja austenita ispod temperature  $A_1$  (slika 16) raste termodinamička nestabilnost austenita i zbog toga se raspad austenita pomiče prema kraćem vremenu, a snižavanjem temperature samnjuje se brzina difuzije ugljika. Ovo uzrokuje sporiji raspad austenita difuzijskim mehanizmom na nižim temperaturama [8, 9].

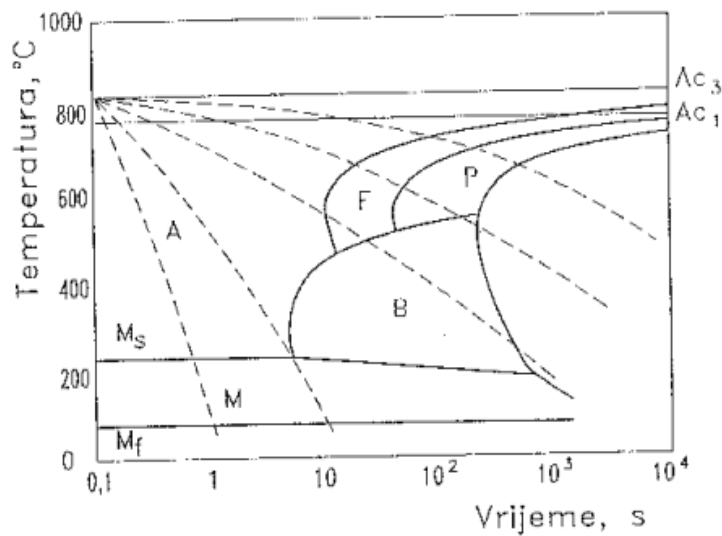


Slika 16 Izotermički TTT-dijagram [8]

## 4.2. TTT-dijagram kontinuiranog hlađenja

Prema slici 17, krivulje ohlađivanja su prikazane isprekidanim linijama, a polja unutar krivulja kod početka i kraja pretvorbi odgovaraju nekim pojedinim faznima pretvorbama npr:

- područje F predstavlja pretvorbu austenita u ferit
- područje P predstavlja pretvorbu austenita u perlit
- područje B odgovara pretvorbi austenita u bainit
- područje M označava pretvorbu austenita u martenzit

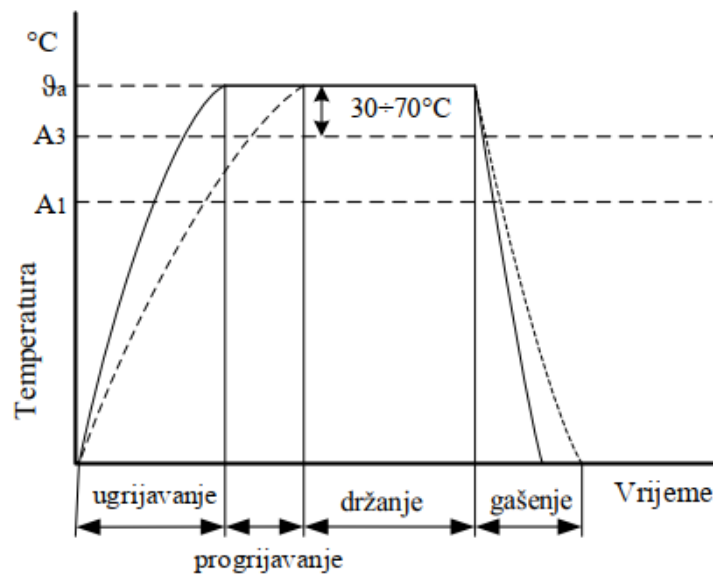


Slika 17 TTT-dijagram za kontinuirano hlađenje [8]

Prilikom kontinuiranog ohlađivanja mijenja se temperatura koja utječe na raspad austenita tj. mijenjaju se uvjeti u kojima se austenit raspada. Mikrostruktura nije jednolična već je mješavina mikrostruktura visoko i niskotemperaturnog raspada austenita. Kako bi se austenit izravno pretvorio u martenzit čelik je potrebno brzo ohladiti iz austenitnog područja do temperature stvaranja martenzita (postupak se naziva gašenje). Sa brzom promjenom temperature povećati će se vlastita naprezanja te deformacija samog obradka. Kako bi se postigla martenzitna struktura potrebno je znati minimalnu brzinu ohlađivanja tokom koje dolazi do direktne pretvorbe austenita u martenzit (gornja kritična brzina gašenja). Tokom samog procesa gašenja obradak se hladi konstantom brzinom, a brzine gašenja u početku procesa su znatno veće od onih brzina u kasnijoj fazi. U slučaju kada martenzit nije poželjan bitnu ulogu ima donja kritična brzina gašenja (maksimalna brzina ohlađivanja) kod koje se u mikrostrukturi ne pojavljuje martenzit. Ove dvije brzine gašenja daju dobru sliku ponašanja čelika pri samom gašenju. [8]

## 5. KALJENJE ČELIKA

Postupak gašenja čelika gdje se iz austenitnog područja postiže pretežito martenzitna struktura naziva se kaljenje. Slučajevi gdje se želi postići udio martenzita u mikrostrukturi od 100% su rijetki. Dijagram postupka kaljenja se nalazi na slici 18. Prihvatljiva donja granica je mikrostruktura s 50% martenzita (propise postavlja konstruktor ovisno o situaciji). Kaljenje čelika je toplinska obrada s ciljem postizanja što veće i jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku [2, 7, 8].



Slika 18 Primjer dijagrama kaljanja [2]

Kaljenje je postupak koji sadrži sljedeće:

1. ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i progrijavanja na toj temperaturi
2. držanja na temperaturi austenitizacije
3. gašenje

Obradak se pri gašenju ohlađuje različitim brzinama i površinskim slojevima te jezgri. Svojstva obratka odgovaraju mikrostrukturama koje su dobivene postignutim brzinama gašenja. Sama mikrostruktura koja se postiže ovisi o svojstvima prokaljivosti i zakaljivosti. U slučaju da su ostali uvjeti pri kaljenju jednaki kod obratka veće prokaljivosti doći će do lakšeg formiranja martenzita u dubljim slojevima [4, 8, 2].

Postoje četiri uvjeta kaljenja kod čelika:

1. mikrostrukturna pretvorba ferita u austenit i obrnuto
2. kako bi se ostvario dovoljan broj kristalnih rešetki  $\gamma$ -željeza koje tope atome ugljika čelik mora sadržavati najmanje 0,35% C
3. čelik se ugrijava u austenitnom području (optimalna temperatura austenitizacije)
4. austenitizirani čelik treba intenzivno hladiti radi sprječavanja difuzije ugljikovih atoma kako bi se ostvarilo njihovo prisilno zadržavanje u novonastaloj martenzitnoj rešetci

Kada dolazi do povišenja temperature nakon kaljenja dolazi do povećanje zaostalog austenita te zagrijavanjem na previsoke temperature ova pojava je izraženija, a ti se čelici nazivaju **prekaljeni čelici**. U slučaju preniske temperature rezultat je mekši martenzit sa manjim udjelom ugljika i zaostalog austenita. Ukupno gledajući tvrdoća smjese u oba slučaja je manja od one nastala pravilnom austenitizacijom. Vrijeme utječe na način da mora biti dovoljno dugo za postizanje potrebne temperature po cijelom poprečnom presjeku obratka (završetak svih faznih pretvorbi). U slučaju da vrijeme zagrijavanja traje predugo dolazi do porasta austenitnog zrna i smanjena količine ugljika u površini čelika. Vrijeme zagrijavanja do zadane temperature ovisi o sljedećim faktorima:

- temperaturi zagrijavanja
- sadržaju ugljika
- sadržaju legiranih elemenata
- veličini i obliku obratka
- načinu postavljanja obratka u peći
- vrsti peći itd.

### 5.1. Klasični postupci kaljenja

Klasični postupci kaljenja se izvode kontinuiranim hlađenjem do sobne temperature, a postoje dva postupka kontinuiranog hlađenja:

- a. Izravno kaljenje
- b. Slomljeno kaljenje

### 5.1.1. Izravno kaljenje

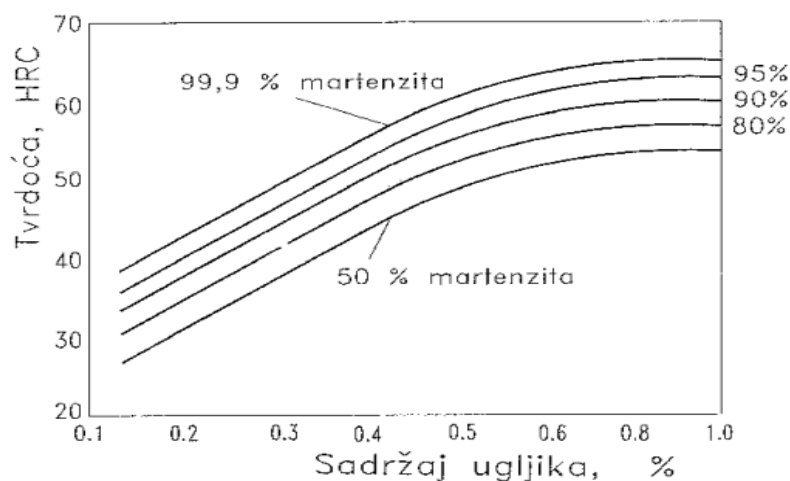
Ostvaruje se hlađenjem u jednom rashladnom sredstvu te se primjenjuje kod jednostavnijih oblika i legiranih čelika (primjena blažeg rashladnog sredstva) jer nema velikih opasnosti od zaostalih naprezanja.

### 5.1.2. Slomljeno kaljenje

Ova vrsta kaljenja se izvodi prvo naglim hlađenjem (voda), a nakon toga se hladi u blažem rashladnom sredstvu kao što su neka ulja zbog smanjenja toplinskih napetosti i zaostalih naprezanja nakon kaljenja. Naglo hlađenje na visokim temperaturama nije opasno jer se tamo nalazi područje visoke plastičnosti. Kada se obradak uranja u blaže rashladno sredstvo dolazi do smanjenja temperaturne razlike između slojeva i zaostala naprezanja na kraju obrade su minimalna.

## 5.2. Prokaljivost i zakaljivost

Zakaljivost čelika je svojstvo koje omogućava da čelik postigne tvrdu i pretežito martenzitnu strukturu. Zakaljivošću se smatra visina postizive tvrdoće nakon gašenja u idealnim uvjetima. Postiziva tvrdoća ovisi o udjelu ugljika (slika 19) koji je bio otopljen u austenitu prije gašenja te koji je prisilno otopljen u martenzitu.



Slika 19 Vrijednost tvrdoće (HRC) u ovisnosti o koncentraciji ugljika u martenzita [8]

Svojstvo čelika koje omogućuje da se tokom gašenja čeličnih obradaka u dubljim slojevima formira martenzitna struktura (više od 50%) naziva se **prokaljivost**. **Prokaljivost** je direktno povezana s gornjom kritičnom brzinom gašenja i ovisi o brzini perlitne pretvorbe u čeliku. Sve što usporava brzinu perlitne pretvorbe utječe na povećanje prokaljivosti. To je sposobnost čelika da postigne jednoličnu tvrdoću po poprečnom presijeku. Čelik će biti potpuno prokaljen onda kada je u svakoj točki svoga presjeka maksimalno zakaljen. Tvrdoća obratka ne može prekoračiti maksimalnu tvrdoću zakaljenosti. Potrebno je uočiti glavnu razliku između tehnološke prokaljivosti čelika te prokaljenosti stanja dobivenog nakon kaljenja. Prokaljivost čelika ovisi o:

- dimenziji proizvoda
- sastavu čelika (prokaljivosti)
- brzini gašenja

### 5.3. Metode procjene prokaljivosti

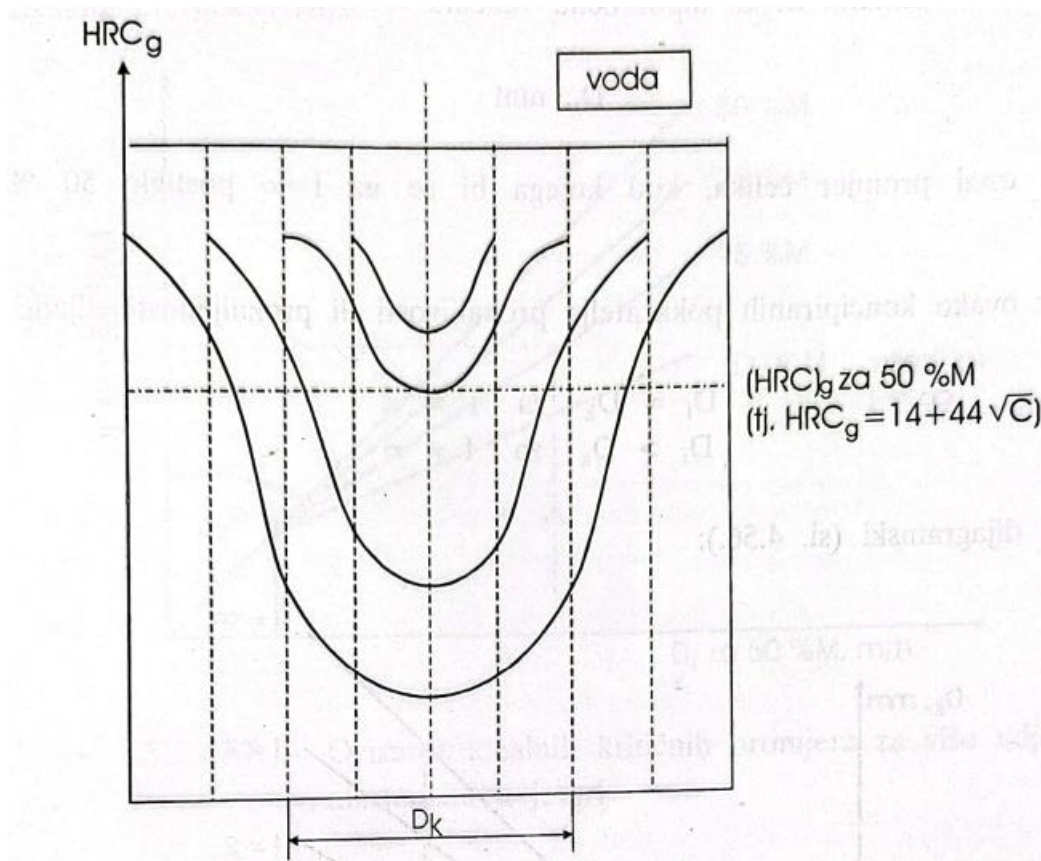
Prokaljivost čelika može se utvrditi pokusima kaljenja valjkastih uzoraka različitih dimenzija primjenom različitih sredstava za gašenje. Kriterij prokaljivanja je najčešće „kritična tvrdoća“ tj. tvrdoća čelika zadanog udjela ugljika kod kojeg se postiglo 50% martenzita u mikrostrukturi. Ovisno o debljini presjeka dobivaju se različite krivulje ohlađivanja za površinu i jezgru zadanog strojnog dijela. Što je predmet manjih dimenzija uz intenzivnije gašenje prokaljivost je bolja.

#### 5.3.1. Metoda totalne prokaljivosti

Čelik će biti totalno prokaljen kada je u svakoj točki svog presjeka maksimalno i jednoliko zakaljen. Totalna ili još teorijska prokaljivost je vrlo skupa kod većih dimenzija zbog potrebe za višim legiranjem. U praksi se zadovoljava parcijalna (djelomična) prokaljenost tj. dopušteno je da u jezgri bude i manje od 100% martenzita. U obzir se uzima da se pomoću postupka popuštanja smanjuje nejednoličnost svojstva po presjeku nakon gašenja. Minimalni dopušteni postotak martenzita ovisi o budućem opterećenju datog strojnog dijela pri radi.

### 5.3.2. Grossmannov postupak kvantifikacije

Grossmannov postupak utvrđivanja prokaljivosti se sastoji od: gašenja serije od 10 komada valjaka čiji se promjeri kreću od 10 do 100 mm, prerezivanju valjaka okomito na os, mikrografskoj ocjeni strukture u jezgri te mjerenju  $HRC_g$  duž promjera presjeka. Dijagram mjerenja na cilindričnim uzorcima prikazan je na slici 20 [7].



Slika 20 Mjerenje tvrdoće gašenja na presjecima valjaka [7]

Promjer u kojem se u zadanom sredstvu postiže u jezgri 50% martenzita tj.  $HRC_g = 14 + 44\sqrt{C}$  naziva se kritični promjer  $D_k$ . Nakon postupka određivanja slijedi odabir sastava čelika i sredstva za gašenje:

$$D_k = f \quad (5.1)$$

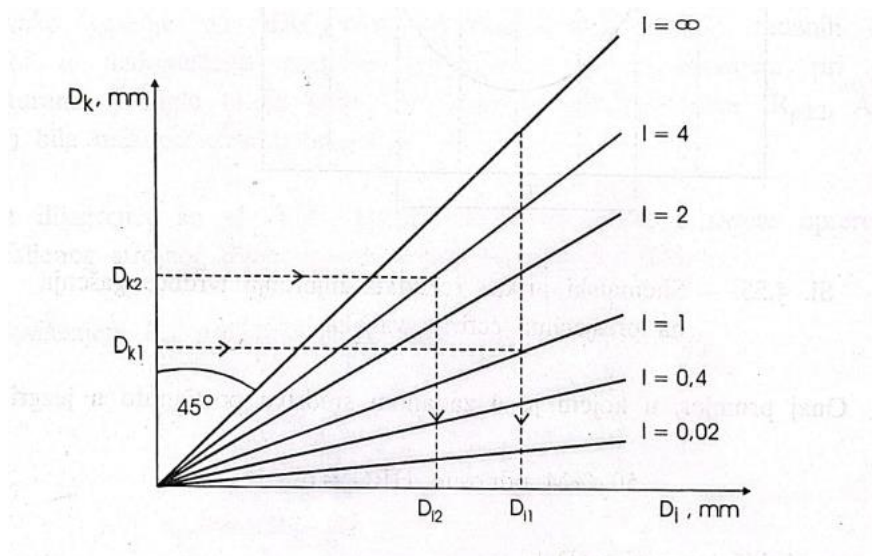
U slučaju da je čelik isti slijedi:

$$D_{k \text{ voda}} > D_{k \text{ ulje}} > D_{k \text{ zrak}} \quad (5.2)$$

Iz ovoga vidimo da kritični promjer može biti samo za usporedbu prokaljivosti ili prokaljivosti različitih čelika koji se gase u istom sredstvu. Zbog toga je potrebno uvesti univerzalnu veličinu, a to je hipotetička veličina  $D_i$ . To je promjer čelika kod kojeg bi se postiglo 50% martenzita uz  $I=\infty$  te slijedi (slika 21):

$$D_i = D_k \quad \text{za } I = \infty$$

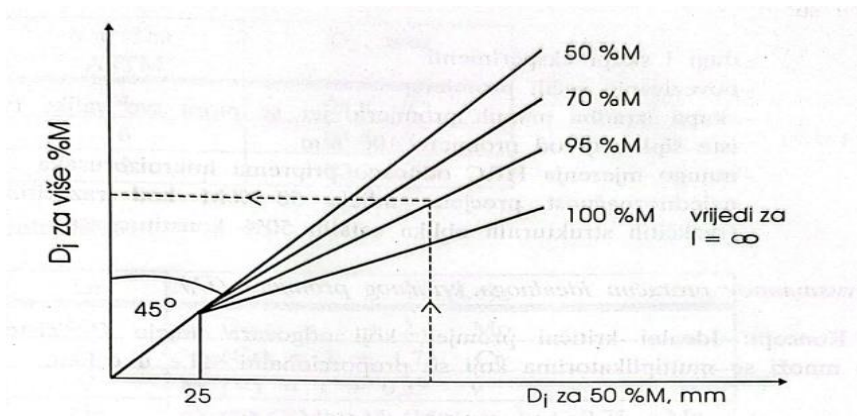
$$D_i > D_k \quad \text{za } I \neq \infty$$



Slika 21 Dijagramski prikaz koncipiranih pokazatelja prokaljivosti [7]

Promjer  $D_i$  omogućava usporedbu prokaljenosti čelika neovisno o primijenjenom  $I$ . Pošto je ovaj promjer karakteristika šarže čelika iz Grossmannova dijagrama može se očitati potrebni  $I$  da se dobije željeni kritični promjer  $D_k$  odnosno realna veličina promjera za konstruiranje i izvedbu. Za ostale čelika (postotka različitog od 50%), postoji mogućnost dijagramskog proučavanja (slika 22) [7].





Slika 22 Prikaz dijagrama za proučavanje [7]

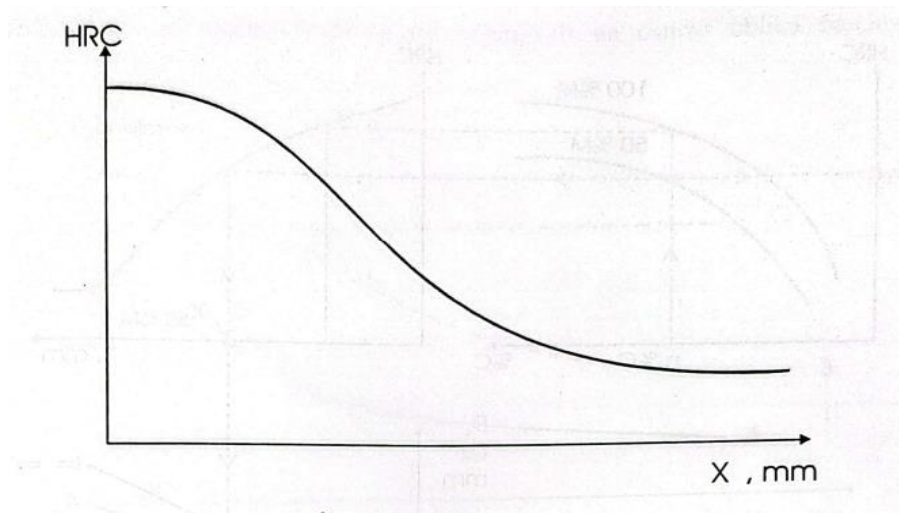
Teškoće kod Grossmannove grafičke metode su:

- dugi i skupi eksperimenti
- povezivanje većih promjera
- skupa izrada manjih promjera (sve valjke treba raditi od iste šipke)
- puno priprema mikroizbrusaka (mjerenja HRC)
- ne jednoznačnost procjene udjela 50 %M kod različitih čelika

### 5.3.3. Jominyjeva metoda kvantifikacije prokaljivosti

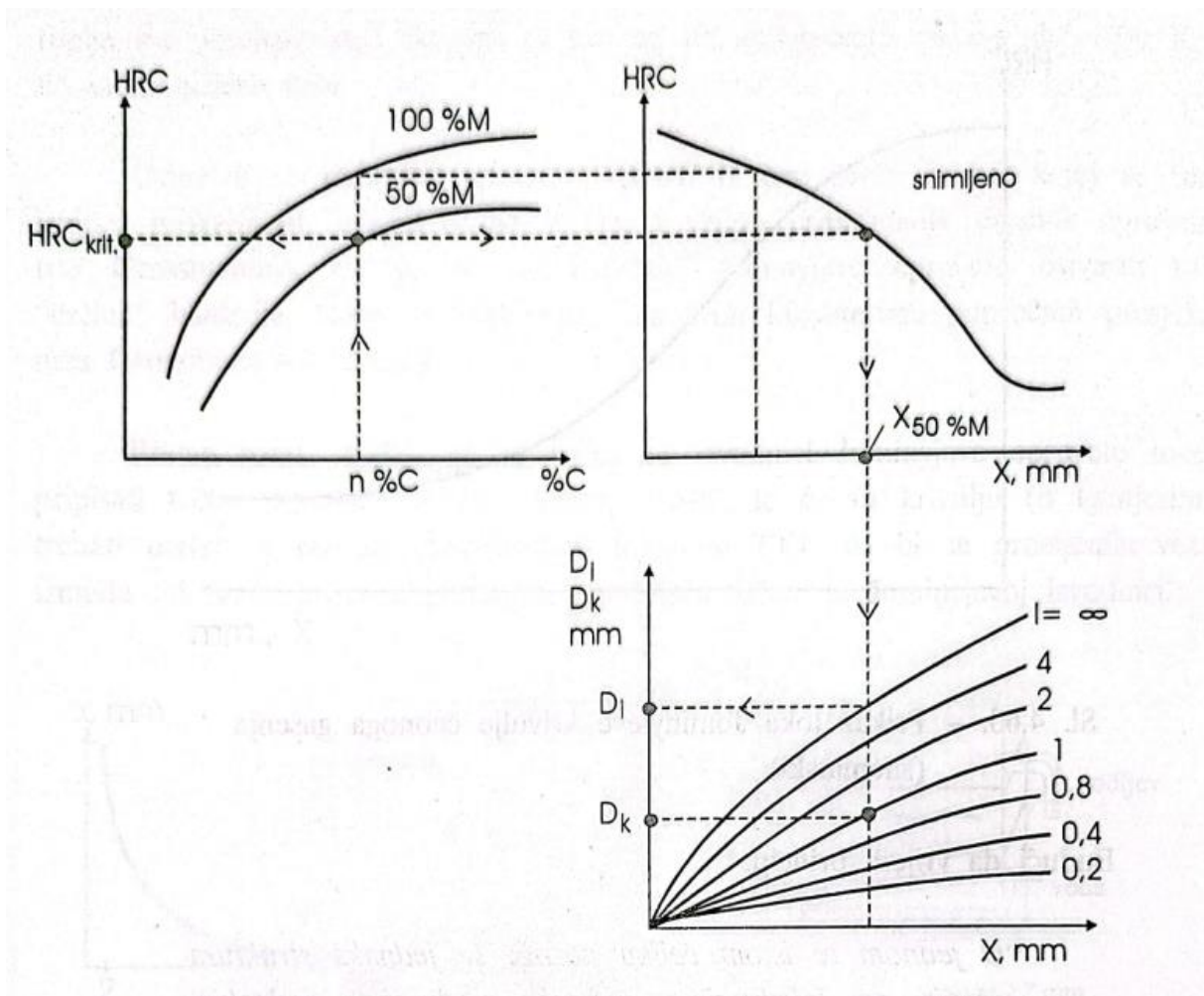
Ovo je metoda kod koje se čeono gasi cilindrična epruveta. Pomoću ovo metode je sam autor metode E. Jominy ostvario da se na jednom uzorku ostvare sve brzine gašenja od 2 K/s do približno 600 K/s uz samo gašeno čelo. Odabirom materijala epruvete iz šarže čelika kojoj se želi ispitati prokaljivost izbjegava se teško i skupo pripremanje više uzoraka zbog toga što se na izvodnici Jominyjeve epruvete ostvaruju svi intenziteti hlađenja kao i na svim lokalnim poprečnim presjecima kod Grossmannovog niza valjaka. Zbog toga se na svakoj točki Jominyjeve epruvete mogu pripisati točno određena krivulja gašenja, a tu će krivulju trebati ucrtati u pripadni kontinuirani TTT-dijagram kako bi se procijenila veza između lokaliteta presjeka predmeta i položaja točke a Jominyjevoj izvodnici. Mlaz vode hladi čelo dok ostali lokaliteti površine Jominyjeve epruvete ohlađuju se neprekidnim odvođenjem topline prema hladnom čelu. Pomoću ovoga se postiže neprekinuti niz brzina ohlađivanja površine od ~600 do ~2 K/s pri približno 700 °C. Kada se uzorak ohladi mjeri se HRC-tvrdoća duž izvodnice i ucrtava se Jominyjeva krivulja (slika 23) [7]:

$$\text{HRC} = f(x) \quad (5.3)$$



Slika 23 Slika 23. Jominyjeva krivulja [7]

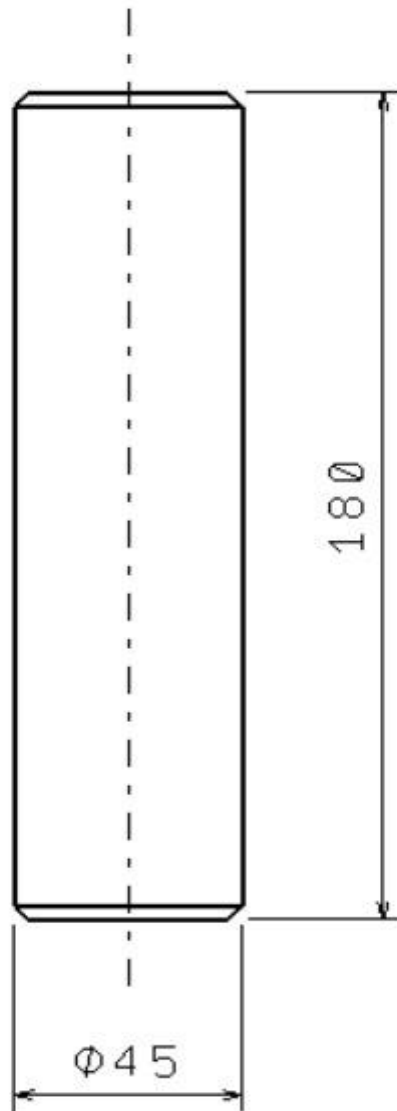
Kod Jominyjeve metode vrijedi princip da u jedno te istom čeliku se postiže jednaka struktura gašenja na lokalitetima gašenim međusobno jednakim režimom te da jednaka struktura daje uvijek jednaka mehanička svojstva. Potrebno je naći mjesta jednakih režima hlađenja na Jominyjevoj epruveti pa će se o toku tvrdoće moći zaključiti na osnovi jedne jedine Jominyjeve probe. Nakon što se odrede ekvidistantna mjesta mogu se dijagramski odrediti pripadni promjeri  $D_k$  i  $D_f$  kvantificirati prokaljivosti (slika 24).



Slika 24 Graf utvrđivanja idealnog kritičnog i kritičnog promjera [7]

## 6. PROCJENA DUBINE PROKALJIVOSTI STROJNOG DIJELA JR.23-PP.68

Procjena dubine prokaljivosti strojnog dijela JR.23-PP.68 vrši se pomoću Jominyjeve metode. Jominyjeva metoda će se provoditi na tri primjerka istih dimenzija ali različitih materijala. Strojni dio JR.23-PP.68 (slika 25) je izrađen od: C45E, 50CrV4 i 42CrMo4. Primjerci će biti hlađeni u ulju intenzitetom  $H=0.3$ .



Slika 25. Strojni dio JR.23-PP.68

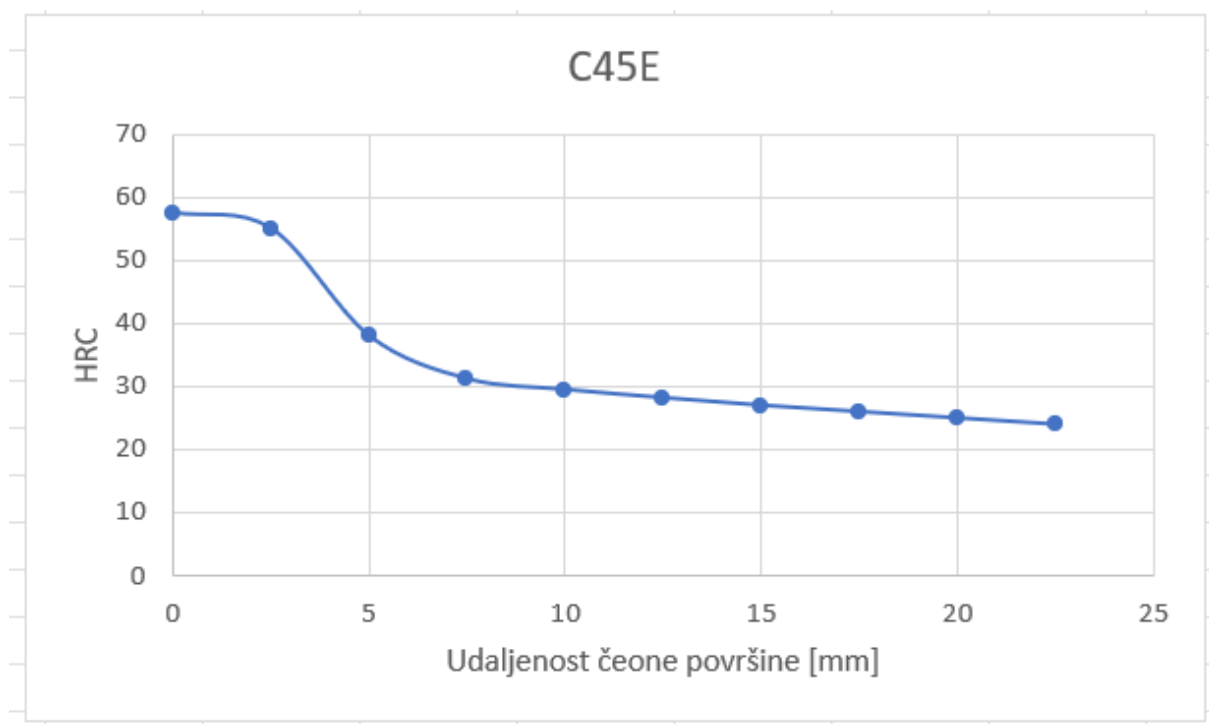
## 6.1. Čelik C45E

Kao što je navedeno izveden je Jominyjev pokus na tri uzorka od različitih materijala. Na temelju podataka dobivenih sa dijagrama (slika 26) dobiti će se U-krivulja koja će se hladiti u ulju (H=0.3). U tablici 1 prikazan je kemijski sastav 5 talina koje su odabrane za karakterizaciju prokaljivosti.

Tablica 1. Kemijski sastav C45E

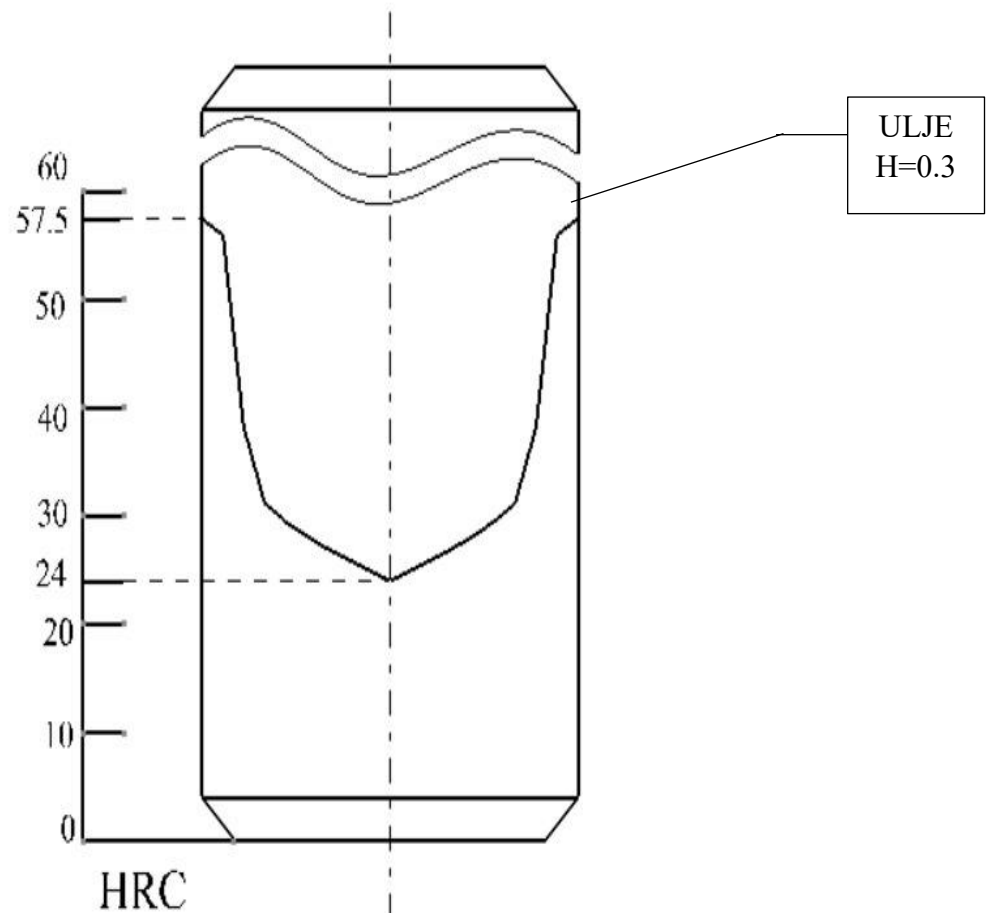
TALINA	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ca	Mo	Ni	V
3	0,44	0,22	0,66	0,022	0,029	0,15	n, b,	n, b,	n, b,	0,02

Jominyjev dijagram:



Slika 26. Jominyjev dijagram za materijal C45E

Na ordinati se nalazi izmjerena tvrdoća (HRC) po promjeru koji se određuje na apscisi. Korištena epruveta je promjera 45 mm, što znači da se na apscisi izmjeri polovica koja označava sredinu date epruvete. Sljedeći korak je smanjenje promjera koje rezultira povećanjem same tvrdoće, promjer se smanjuje postepeno sve do nule te se na taj način kreira U-krivulja (slika 27).



Slika 27. U-krivulja materijala C45E

Tvrdoća jezgre datog uzorka gašenog u ulju iznosi 24 HRC, a na površini 57.5 HRC. Krična tvrdoća za C45E iznosi 14 HRC te se na temelju toga zaključuje da je strojni dio prokaljen.

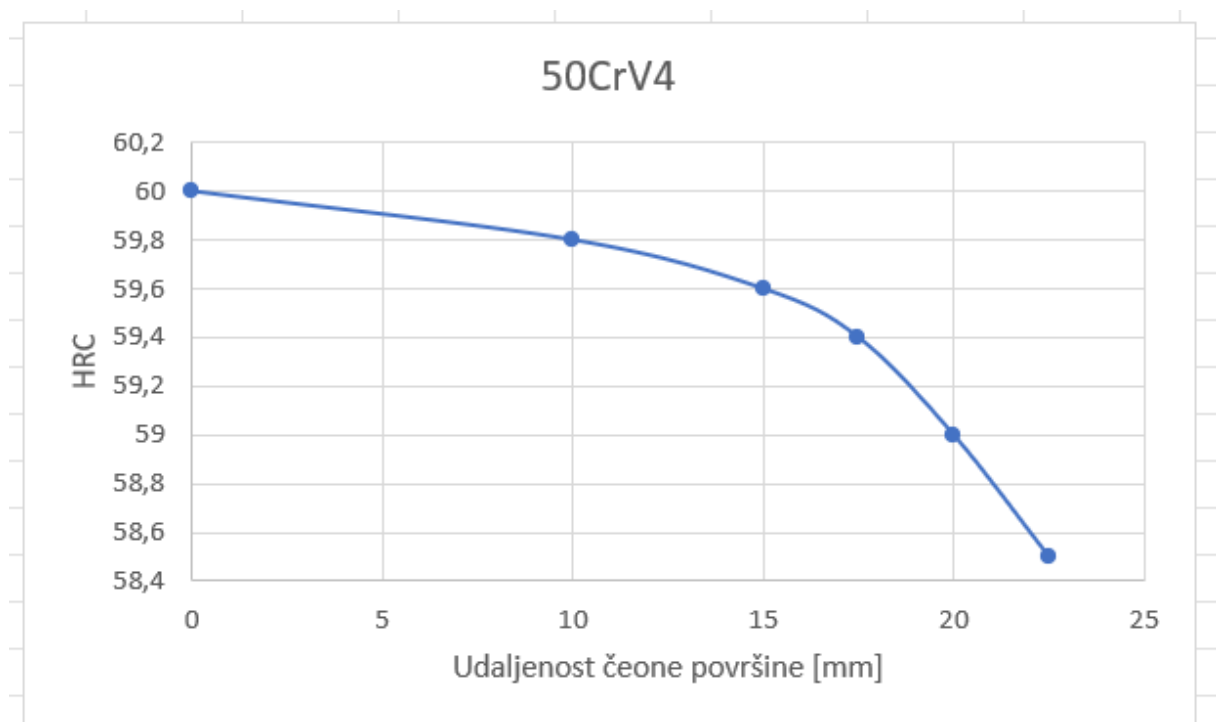
## 6.2. Čelik 50CrV4

Po istom principu sa Jominyevog dijagrama (slika 28) prema istim koracima odrediti će se U-krivulja (slika 29) pri gašenju u ulju. Tablica kemijskih sastava:

Tablica 2. Kemijski sastav 50CrV4

TALINA	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
2	0,53	0,27	0,93	0,029	0,013	0,98	0,2	0,05	0,33	0,07

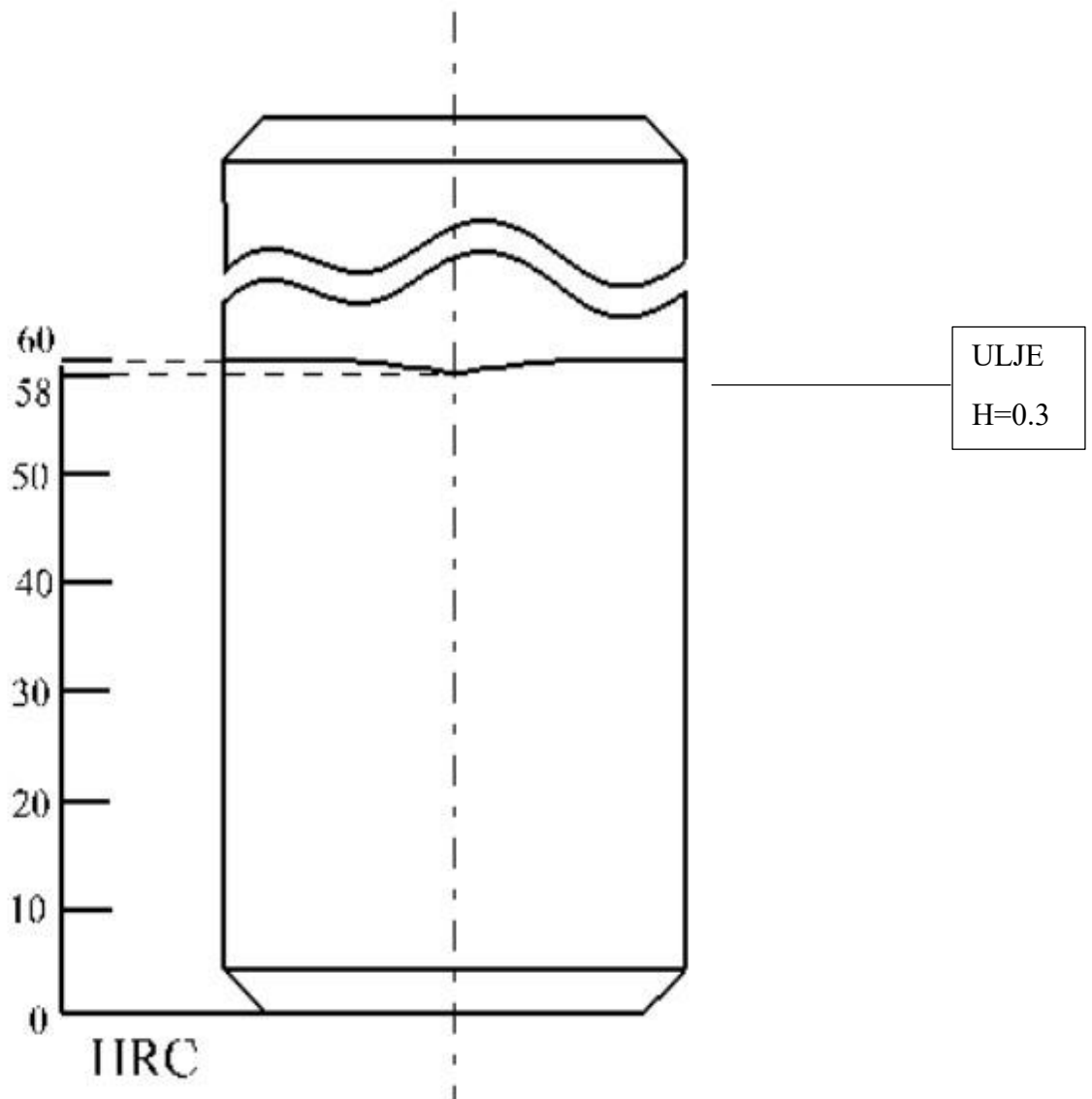
Jominyev dijagram:



Slika 28. Jominyev dijagram za materijal 50CrV4



Istim koracima kao na stranici 34. određuje se i crta U-krivulja (slika 29).



Slika 29. U-krivulja materijal 50CrV4

Sa U-krivulje iščitava se tvrdoća jezgre koja iznosi 58 HRC, a dok je na površini 60 HRC. Kritična tvrdoća za 50CrV iznosi 42 HRC te se na temelju toga zaključuje da je strojni dio prokaljen.

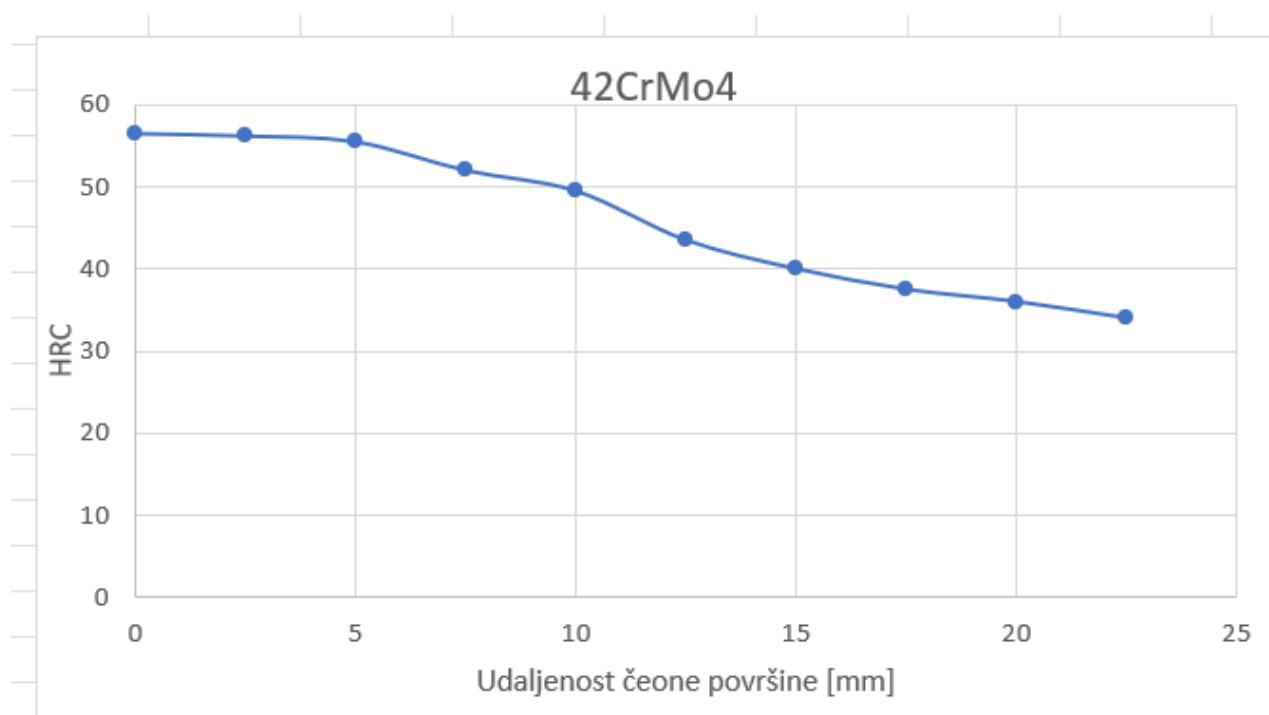
### 6.3. Čelik 42CrMo4

Pomoći Jominyevog dijagrama sa slike 30 crta se U-krivulja (slika 31). Kemijski sastav:

Tablica 3. Kemijski sastav 42CrMo4

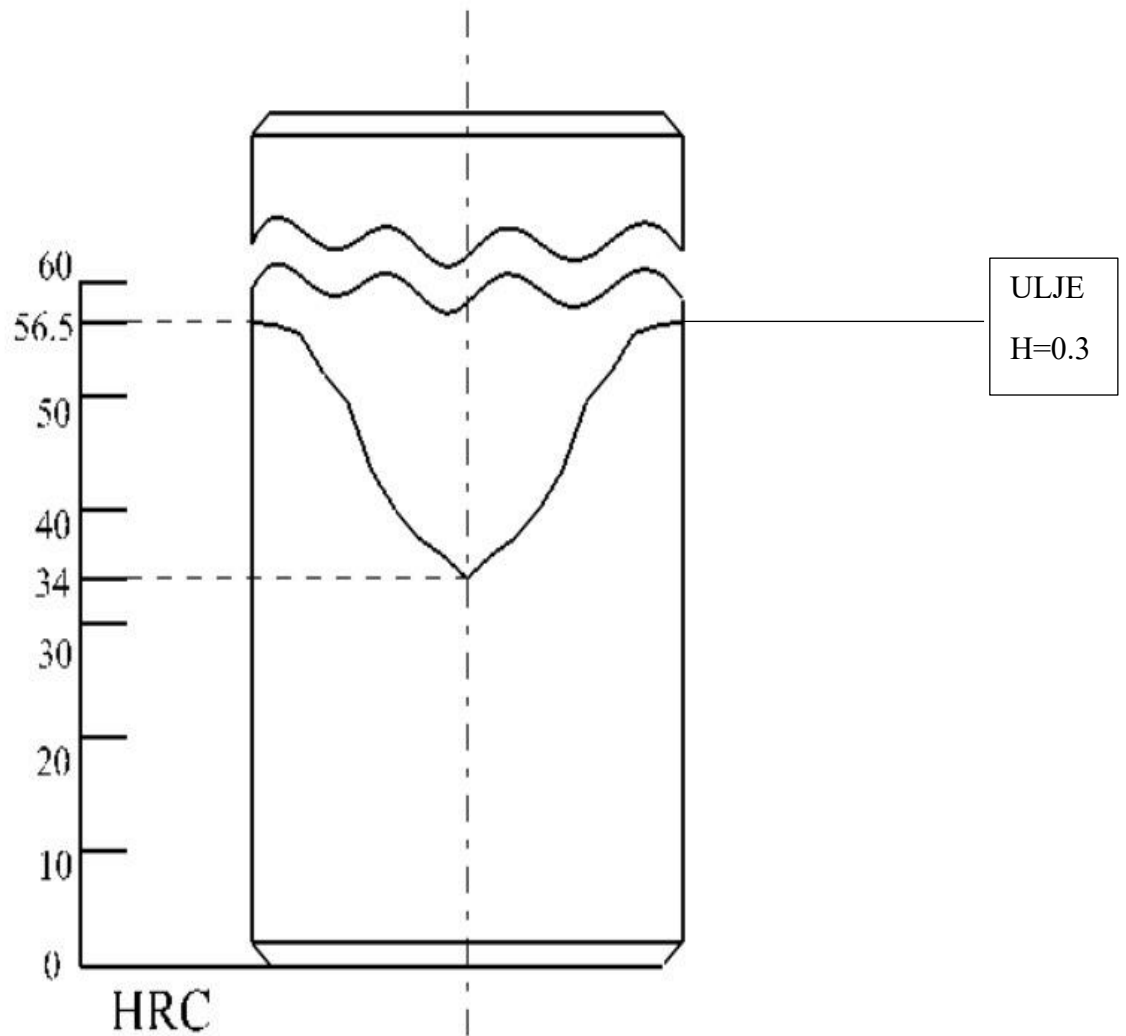
TALINA	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
3	0,39	0,15	0,50	0,013	0,014	0,97	0,19	0,19	0,2	<0,01

Jominyev dijagram:



Slika 30. Jominyev dijagram za materijal 42CrMo4

Dobivena je sljedeća U-krivulja (slika 31):



Slika 31. U-krivulja materijala 42CrMo4

Tvrdoća jezgre iznosi 34 HRC dok je na površini 56.5 HRC. Krična tvrdoća za 42CrMo4 iznosi 27 HRC te se na temelju toga zaključuje da je strojni dio prokaljen.

## 7. ZAKLJUČAK

Čelik spada pod najzastupljenije materijale današnjice te je najvažniji konstrukcijski kao i alatni materijal u strojarstvu. Njegovu primjenu mu pridonose njegova vrlo dobra svojstva koja se mogu regulirati raznim obradama. Podjela čelika se vrši prema sastavu, mikrostrukturi, svojstvima, proizvodnom postupku, namjeni itd. s obzirom na mikrostrukturu čelik može biti: austenitni čelik, martenzitni čelik, feritni čelik, perlitni čelik i ledeburitni čelik.

Toplinska obrada je jedan od postupaka kojim se najčešće služi za postizanje željenih svojstva. Ovom obradom se slitine zagrijavaju do određene temperature gdje se zadržavaju određeno vrijeme nakon čega se hlade određenim brzinama. Pomoću toplinske obrade moguće je postići najraznovrsnija svojstva.

Kaljenje je jedan od postupaka toplinske obrade gdje se iz austenitnog područja postiže pretežito martenzitna struktura. Donja granica martenzita koja je prihvatljiva iznosi 50%, a sam cilj je postizanje što jednoličnije tvrdoće po porednom presjeku. Svojstvo čelika koja osigurava martenzitnu strukturu u dubljim slojevima obratka naziva se prokaljivost. Čelik će biti potupno prokaljen kada je u svakoj točki svoga presjeka maksimalno zakaljen, a najpovoljnije metode za procjenu prokaljivosti su Grossmannova metode i Jominyeva metoda procjene prokaljivosti. Jominyeva metoda je metoda je puno korištenija zbog manjih troškova i jednostavnijeg postupka procjene.

Metoda procjene dubine prokaljivosti je upravo Jominyeva metoda iz koje možemo pratiti porast tvrdoće po poprečnom presjeku strojnog dijela JR.23-PP.68. Pomoću toga je izrađen U-dijagram za tri materijala (C45E, 50CrV4, 42CrMo4) iz kojeg se vidi da kako čvrstoća (HRC) opada s obzirom na tvrdoću po površini strojnog dijela. Na temelju dobivenih podataka dokazano je da su strojni dijelovi prokaljeni.

## LITERATURA

- [1] „Čelik-Hrvatska enciklopedija“, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=13250>, 15.06.
- [2] Stjepan G. „Tehnički materijali 1. dio, metalni materijali“, Veleučilište Bjelovar, 2019.
- [3] „Reca Hrvatska, eShop“ s interneta: <https://shop.reca.hr/spojna-tehnika/ostala-spojna-tehnika-ostali-spojni-elementi/vlacne-opruge-tlacne-opruge/tlacna-opruga-din-2095-opruzni-cek-pocincana.html>, 01.09.
- [4] Mladen S.; Franjo C. „,Osnove toplinske obrade metala“, Sveučilište u Zagrebu, 2001.
- [5] „Metalurgija Ugljanik“, s interneta: <https://ironlady003.wordpress.com/2013/11/27/ugljenik/>
- [6] „ResearchGATE-ledeburit“, s interneta: [https://www.researchgate.net/figure/Ledeburite-in-a-white-cast-iron-Fe-40-C-03-Si-016-Mn-091-Cr-etched-with\\_fig28\\_293719668](https://www.researchgate.net/figure/Ledeburite-in-a-white-cast-iron-Fe-40-C-03-Si-016-Mn-091-Cr-etched-with_fig28_293719668), 25.06.
- [7] Krumes D. „,Toplinska obrada metala“, Slavonski brod, Sveučilište u Slavonskom Brodu 2000.
- [8] Smoljan B. „,Toplinska obrada čelika, sivog i nodularnog lijeva“, Hrvatsko društvo za toplinsku obradu i inženjerstvo površine, Zagreb 1999.
- [9] Smoljan B. „,Toplinska obrada metala“, Slavonski Brod, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu 2000.
- [10] Novosel M.; Krumes D. „,Posebni čelici“, Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod 1998.
- [11] Šestan A. „,Tehnologije materijala i obrade“, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, 1998.
- [12] Ivušić V.; Franz M.; Španiček Đ.; Ćurković L.; „,Materijali 1“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje,

## POPIS SLIKA

Slika 1 Primjer konstrukcijskog čelika (opruga) [8] .....	3
Slika 2 Dijagram toplinske obrade (kaljenje) [4] .....	5
Slika 3 Fazni dijagram Fe-Fe <sub>3</sub> C [4] .....	7
Slika 4 Mikrostruktura cementita [4] .....	8
Slika 5 Mikrostruktura ferita [5] .....	9
Slika 6 Mikrostruktura perlita [6].....	9
Slika 7 Mikrostruktura ledeburita [6].....	10
Slika 8 Mikrostruktura austenita [12].....	10
Slika 9 Prikaz utjecaja brzine na prekrizaciju [8].....	11
Slika 10 Kristalna rešetka martenzita [8] .....	12
Slika 11 Dijagram početka i završetka martenzitne pretvorbe [8] .....	13
Slika 12 Martenzitna mikrostruktura [8, 12].....	13
Slika 13 Dijagram ovisnosti ugljika i zaostalog austenita [9].....	14
Slika 14 Dijagram ovisnosti količine ugljika o tvrdoći [4] .....	15
Slika 15 TTT-dijagram kao presjek prostornog dijagrama [4].....	16
Slika 16 Izotermički TTT-dijagram [8] .....	17
Slika 17 TTT-dijagram za kontinuirano hlađenje [8].....	18
Slika 18 Primjer dijagrama kaljanja [2] .....	19
Slika 19 Vrijednost tvrdoće (HRC) u ovisnosti o koncentraciji ugljika u martenzita [8] .....	21
Slika 20 Mjerenje tvrdoće gašenja na presjecima valjaka [7].....	23
Slika 21 Dijagramski prikaz koncipiranih pokazatelja prokaljivosti [7].....	24
Slika 22 Prikaz dijagrama za proučavanje [7].....	25
Slika 23 Slika 23. Jominyjeva krivulja [7].....	27
Slika 24 Graf utvrđivanja idealnog kritičnog i kritičnog promjera [7] .....	28
Slika 25. Strojni dio JR.23-PP.68 .....	29
Slika 26. Jominyev dijagram za materijal C45E .....	30
Slika 27. U-krivulja materijala C45E .....	31
Slika 28. Jominyev dijagram za materijal 50CrV4 .....	32
Slika 29. U-krivulja materijal 50CrV4 .....	33
Slika 30. Jominyev dijagram za materijal 42CrMo4.....	34
Slika 31. U-krivulja materijala 42CrMo4 .....	35

## **POPIS TABLICA,**

Tablica 1. Kemijski sastav C45E.....	30
Tablica 2. Kemijski sastav 50CrV4.....	32
Tablica 3. Kemijski sastav 42CrMo4 .....	34

## SAŽETAK

Kroz ovaj rad ukratko je objašnjeno nešto o materijalima (uglavnom čeliku) i toplinskoj obradi. Kroz teorijski dio raspisano je o temama koje povezuju čelik sa toplinskom obradom kao što su pretvorbe čelika (njegova mikrostruktura), razni dijagrami kojim se služi prilikom njegove obrade, toplinska obrada kaljenja te sama zakaljivost i prokaljivost obratka. Zadatak ovog rada je bila procjena dubine prokaljivosti strojnog dijela JR.23-PP.68 te izrada U-krivulje uz pomoć Yominyevog pokusa za tri materijala (C45E, 50CrV4 i 42CrMo4). Kroz U-krivulju se pratio porast tvrdoće po poprečnom presjeku.

**Ključne riječi:** Jominev pokus, zakaljivost, prokaljivost, čelik, toplinska obrada

## SUMMARY

Through this paper, something about materials (mainly steel) and heat treatment is briefly explained. Through the theoretical part, topics related to steel and heat treatment were discussed, such as transformations of steel (its microstructure), various diagrams used during its processing, heat treatment of hardening and the hardenability and hardenability of the workpiece itself. The task of this work was to estimate the depth of hardenability of the machine part JR.23-PP.68 and to create a U-curve with the help of Yomin's experiment for three materials (C45E, 50CrV4 and 42CrMo4). The increase in cross-sectional hardness was monitored through the U-curve.

**Key words:** Jominev experiment, hardenability, hardenability, steel, heat treatment