

# Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela UN.24-PP.86

---

Mesić, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:190:187346>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni preddiplomski studij strojarstva

Završni rad

**PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG  
DIJELA UN.24-PP.86**

Rijeka, studeni 2024.

Tomislav Mesić

Mat. br. 0069056205

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni preddiplomski studij strojarstva

Završni rad

**PROCJENA DUBIN PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA**

**UN.24-PP.86**

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

Rijeka, studeni 2024.

Tomislav Mesić

Mat. br. 0069056205

Rijeka, 15.03.2024.

Zavod: Zavod za inženjerstvo materijala  
Predmet: Postupci toplinske obrade

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Tomislav Mesić (0069056205)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (2010)

Zadatak: **Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela UN.24-PP.86 / Estimation of hardening depth of workpiece UN.24-PP.86**

Opis zadatka:

Potrebno je procijeniti prokaljivost strojnog dijela UN.24-PP.86 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 UN.24-PP.86. Tvrdću 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 pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

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

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

## IZJAVA

Sukladno članku 10. pravilnika o završnom radu i završnom ispitu na preddiplomskim sveučilišnim i stručnim studijima Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod nazivom "Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela UN.24-PP.86" u razdoblju od 20. ožujka 2024. do studenog 2024.

Rad sam izradio iz kolegija Postupci toplinske obrade primjenjujući stečena znanja tijekom studija i koristeći se literaturom kolegija, prema zadatku Povjerenstva za završne ispite preddiplomskog sveučilišnog studija strojarstva br. 602-04/17-01/110 pod vodstvom mentora izv.prof. dr. sc. Daria Iljkića.

Zadatak je zadan 20. 03. 2024.

## **ZAHVALA**

*Ovim putem htio bih se zahvaliti mentoru izv.prof. dr. sc. Dariu Iljkiću i asist. Lovri Štici na ukazanom strpljenju, stručnoj pomoći te podršci kao i vremenu odvojenom za rješavanje završnog rada.*

# SADRŽAJ

1.	UVOD .....	7
2.	FAZNE PRETVORBE U ČELIKU.....	8
2.1.	Mikrostrukture pri toplinskoj obradi čelika .....	8
2.2.	Tvorba austenita.....	10
2.3.	Pretvorba austenita u perlit.....	12
2.4.	Pretvorba austenita u martenzit.....	13
2.5.	Pretvorba austenita u bainit.....	14
3.	TTT DIJAGRAMI .....	17
4.	POSTUPAK KALJENJA ČELIKA I KALJIVOST .....	19
4.1.	Kaljjenje .....	19
4.2.	Kaljivost.....	26
5.	PROKALJIVOST I ZAKALJIVOST ČELIKA .....	28
5.1.	Jominyjeva metoda.....	30
6.	METODE ISPITIVANJA TVRDOĆE.....	36
6.1.	Ispitivanje tvrdoće po Brinellu .....	36
6.2.	Ispitivanje tvrdoće po Rockwellu.....	37
6.3.	Ispitivanje tvrdoće po Vickersu.....	38
7.	PROCJENA PROKALJIVOSTI STROJNOG DIJELA UN.24-PP.86 .....	39
7.1.	Procjena prokaljivanja čelika C45E.....	40
7.2.	Procjena prokaljivanja čelika 42CrMo4.....	42
7.3.	Procjena prokaljivanja čelika 50CrV4.....	44
8.	ZAKLJUČAK.....	46
	LITERATURA.....	47
	POPIS SLIKA .....	48
	POPIS TABLICA.....	50
	SAŽETAK.....	53
	ABSTRACT .....	54

## 1. UVOD

Tema ovog završnog rada je procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela UN.24-PP.86 nakon kaljenja.

Za potrebe preciznije procijene tvrdoće i dubine prokaljenog sloja strojnog dijela UN.24-PP.86 u radu je korišten Jominyjev pokus. Jominyjev pokus je eksperimentalna metoda koja se najčešće koristi kod ispitivanja prokaljivosti čelika te se sama metoda bazira na eksperimentalno određenoj Jominyjevoj krivulji koja predstavlja tijek tvrdoća u ovisnosti o udaljenosti od gašenog čela epruvete.

Rad se sastoji od uvoda, teorijskog i praktičnog dijela te zaključka.

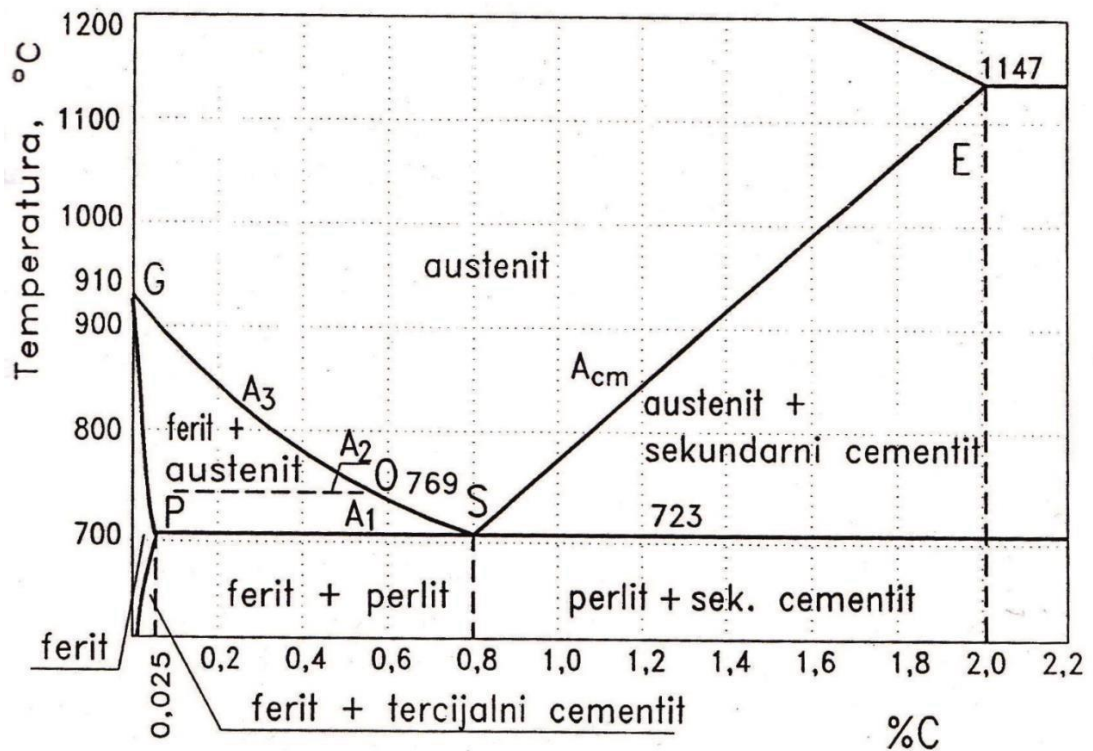
U prvom dijelu završnog rada govori se općenito o toplinskoj obradi, postupcima i faznim pretvorbama čelika koje se događaju tijekom njihovih provođenja. Nakon prvog dijela rada teorijski se opisuju postupci kaljenja i njihove razlike između svojstava čelika, prokaljivost i zakaljivost. Opisane su metode procjene prokaljivosti, te metode ispitavanja tvrdoće. U završnom dijelu rada opisuje se praktični dio, odnosno postupak gdje je opisan cijeli pokus, te korištena oprema koja je potrebna za provođenje Jominyjevog eksperimenta.

Drugi dio rada bavi se samom procjenom dubine prokaljivanja strojnog dijela UN.24- PP.86 uz primjenu Jominyjevog pokusa. U ovom dijelu rada je opisan cijeli postupak pokusa te su prikazani i analizirani dobiveni rezultati.



## 2. FAZNE PRETVORBE U ČELIKU

Dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C (slika 2.1.) je polazište za odabir i samu izvedbu toplinske obrade čelika. Na njemu se mogu vidjeti fazna područja, temperature prekrystalizacija u ravnotežnim uvjetima, koja sukladno navedenome odgovaraju ili ohlađivanju čelika ili dovoljno sporom ugrižavanju.



Slika 2.1. Fazni Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram [1]

### 2.1. Mikrostrukture pri toplinskoj obradi čelika

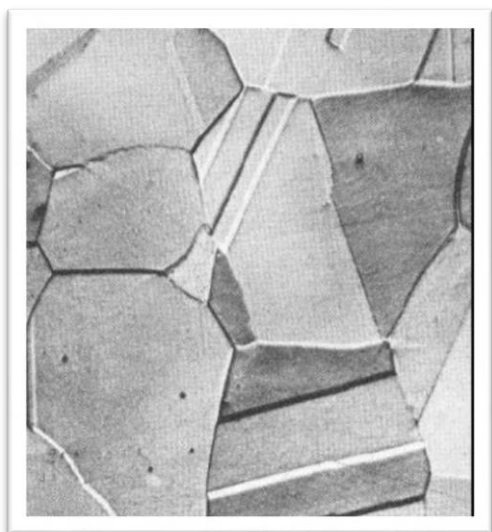
U navedenom ravnotežnom dijagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C mikrostrukturni sastojci čelika su ferit, perlit, sekundarni cementit te austenit:

- ferit je uključni mješani kristal ugljika i željeza ili, drugim riječima, kruta otopina ugljika u  $\alpha$ -željezu s najviše 0,025% C;
- sekundarni cementit je također spoj ugljika i željeza, takozvani željezov karbid Fe<sub>3</sub>C, sa 6,67 % C;
- perlit je sastavljen od eutektoidnih kristalnih zrna ferita i cementita te ima visok stupanj kaljivosti
- austenit je uključinski mješani kristal ugljika i željeza ili, drugim riječima, kruta otopina ugljika u  $\gamma$ -željezu s najviše 2,03% C [1].

## Austenit

Austenit (slika 2.2.) je kruti rastvor legirajućih elemenata u  $\gamma$  željezu i ugljika. Prisustvo veće praznine u centru plošno centrirane rešetke  $\gamma$  željeza ukazuje na mogućnost rastvaranja znatnih količina ugljika. Maksimalna rastvorljivost ugljika u austenitu je 2% (težinski) ili približno 5% (atomska). Atom ugljika nalazi se u centru plošno centriranog kuba, dok su sredine bridova slobodne ili nezaposjednute. Što je koncentracija ugljika u austenitu veća, to se proporcionalno koncentraciji povećava i parametar rešetke austenita. Pored ugljika praznine u rešetki austenita popunjavaju još: dušik, vodik, kisik i bor [3].

Dodatno, postoji mješanac cementita (grafita) i austenita koji sadrži 4,3 % ugljika i nastaje kod temperature od 1147 °C pod nazivom Ledeburit, (slika 2.3.) a nastaje kada je sadržaj ugljika u željezu između 2,06% i 6,67% (maseni udio) [4].



*Slika 2.2. Austenitna mikrostruktura*



*Slika 2.3. Ledeburitna mikrostruktura*

## **Martenzit**

Pri martenzitnoj pretvorbi (slika 2.4.) pomicanje atoma je vrlo maleno, ali je moć pretvorbe velika. Zbog toga pretvorba se može dogoditi u tako kratko vrijeme da se može smatrati vremenski nezavisnom. Martenzitna pretvorba uključuje samo promjenu kristalne rešetke bez ikakve promjene sastava. Iznad početne temperature pretvorbe ne događa se nikakva pretvorba, dok je nakon temperature završetka pretvorbe, postignuto 100% moguće pretvorbe.

Kao rezultat martenzitne pretvorbe imamo promjenu rešetke pri čemu se ne mijenja sastav, te dobivamo fazu koja predstavlja neravnotežno stanje kod čega se svojstva veoma razlikuju od svojstava koja bi imala faza odgovarajuća ravnotežnom stanju. Najpoznatija i najčešća primjena ove pojave je martenzitna pretvorba u slitini željezo – ugljik [4].

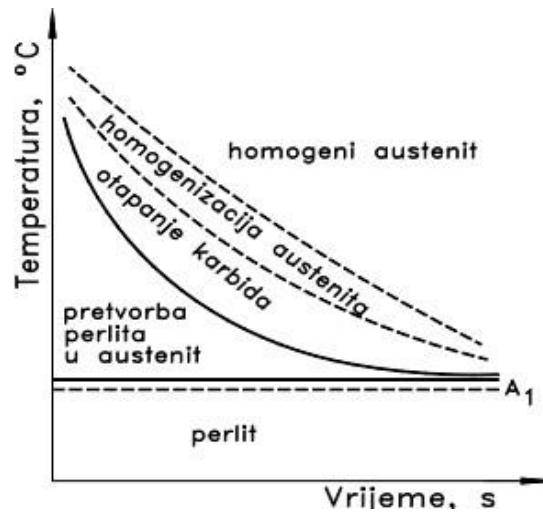


*Slika 2.4. Martenzitna mikrostruktura*

## **2.2. Tvorba austenita**

Temelj toplinske obrade čelika bazira se na eutektoidnoj reakciji raspada austenita na cementit i ferit. Koja fizička i mehanička svojstva će čelik poprimiti zavisi o načinu na koji će se austenit raspasati, a to pak ovisi o našem izboru postupka toplinske obrade samog čelika. Prije svake toplinske obrade osnovni zahtijev je dobivanje austenita.

Za brzinu austenitne pretvorbe eksperimentalno je utvrđeno kako ovisi o brzini difuzije ugljika u novonastaloj fazi. Tokom toplinske obrade vrlo je važna brzina procesa pri ohlađivanju čelika, pa postoje procesi u kojima je nužno poznavanje brzine tvorbe austenita.. Na slici 2.5. vidimo kako se s povećanjem temperature skraćuje tvorba austenita[1].

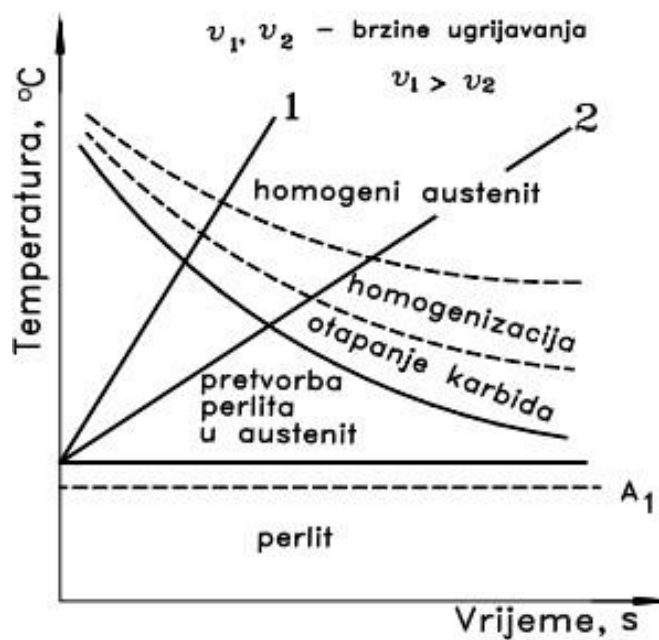


Slika 2.5. Dijagram izotermičke tvorbe austenita

Proces tvorbe homogenog austenita sastoji se od:

1. pretvorbe perlita u austenit,
2. otapanja karbida,
3. homogenizacije austenita[1].

U nastavku, na slici 2.6., prikazuje se dijagram pretvorbe austenita u kontinuiranim uvjetima ugrijavanja.



Slika 2.6. Dijagram pretvorbe austenita u kontinuiranim uvjetima ugrijavanja

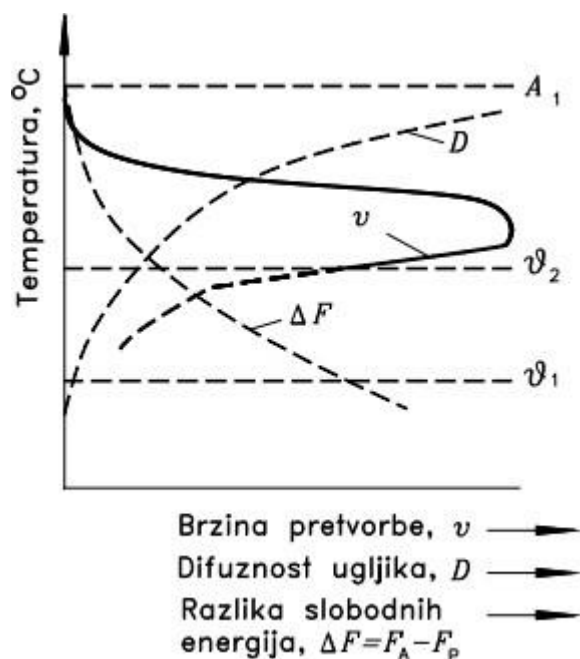
Na slici 2.6., linijama 1 i 2, su prikazana dva različita režima ugrijavanja. Povećanjem brzine zagrijavanja dobivamo više temperature te se skraćujemo vrijeme pretvorbe. Osim toga, vidimo kako se karakteristična temperatura tvorbe samog austenita kod većih brzina ugrijavanja kreću prema višim temperaturama[1].

### 2.3. Pretvorba austenita u perlit

Sporijim ohlađivanjem austenita doalzi do raspadanja na perlit. Usred tvorbe perlita, austenit se još dodatno raspada u dvije potpuno nove faze, ferit i željezov karbid. Za nastajanje perlita potrebna je potpuna difuzija metalnih i nemetalnih atoma, ili uslučaju kod nelegiranih čelika, sam perlit nastaje uz potpunu difuziju atoma željeza i atoma ugljika. Stoga su nam za perlitnu pretvorbu potrebna dva uvjeta:

- dovoljna energetska nestabilnost, odnosno zadovoljavajuća razlika između slobodnih energija početnog austenita i konačnog perlita,
- dovoljna difuzija atoma.

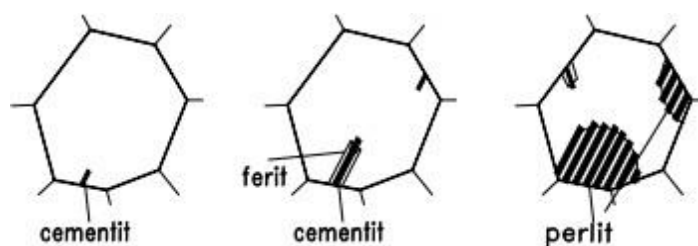
Kao što je vidljivo na slici 2.7., u nastavku, shematski se prikazuje ovisnost same brzine perlitne pretvorbe o temperaturi jednog nelegiranog čelika koji sadrži eutektoidni ugljik.



Slika 2.7. Utjecaj temperature na brzinu perlitne pretvorbe

U temperaturi  $A_1$  vidljiva je razlika slobodnih energija između perlita i austenita te je ona jednaka je nuli. Ispod temperature  $\vartheta_2$  ( $\approx 200^\circ\text{C}$ ) ne događa se raspad austenita jer nismo u mogućnosti ostvariti uvjete za neophodnu difuziju ugljika. Difuzijski raspad austenita je zato ostvariv ispod temperatura  $A_1$  i  $\vartheta_1$ .

Snižavanjem temperature ispod temperature  $A_1$  (većim pothlađivanjem), povećava se razlika slobodnih energija i smanjuje difuzija. Ispod temperature  $\vartheta_1$  moguća je samo bezdifuzijska pretvorba. Na temperaturama pretvorbe između temperatura  $A_1$  i  $\vartheta_2$  (perlitno područje) pretvorba počinje kad se pojave cementitne klice, u pravilu na krajnjim granicama zrna austenita (slika 2.8) [1].

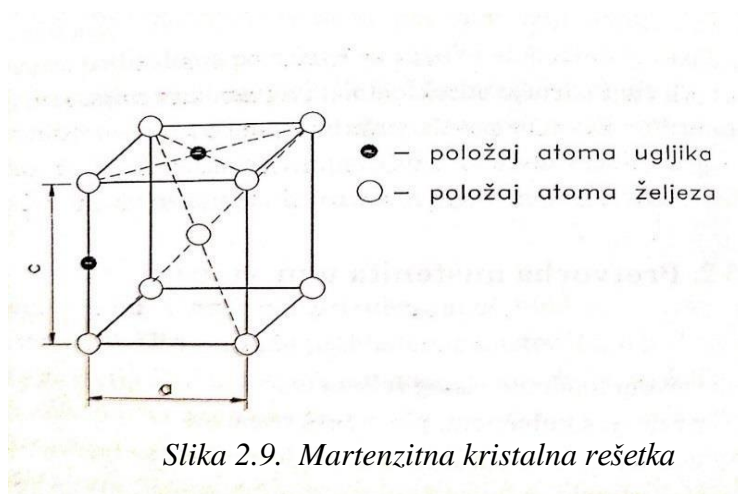


Slika 2.8. Shematski prikaz pretvorbe perlita

## 2.4.Pretvorba austenita u martenzit

Prilikom dovoljno brzog hlađenja čistog željeza ( $v_{\text{ohl}} \approx 600^\circ\text{C/s}$ ) na temperaturi od  $500^\circ\text{C}$ , od  $\gamma$ -željeza dobivamo  $\alpha$ -željezo. Kod oba željeza riječ je o kubično, prostorno centrirano kristalnoj rešetki. Mehanizam bezdifuzijske  $\gamma \rightarrow \alpha$  tzv. martenzitne pretvorbe se sastoji od procesa smicanja te na taj način dobivamo martenzit.

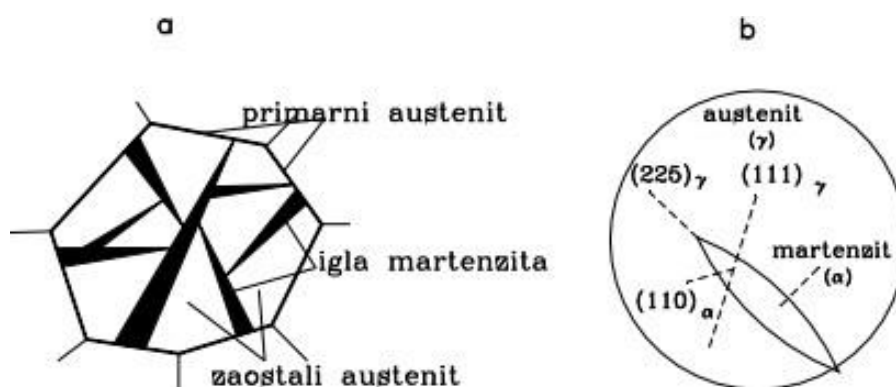
Martenzit je kruta otopina ugljika u  $\alpha$ -željezu s najviše 2,03%C. Prilikom usporedbe martenzita i austenita, vidljivo je kako je koncentracija ugljika oba slučaja jednaka. Što se tiče martenzita, negova kristalna rešetka je teragonalna, a ne kubična kao kod ferita (slika 2.9.)[1].



Slika 2.9. Martenzitna kristalna rešetka

Martenzit u odnosu na smjesu karbida i ferita, uvijek ima nešto veću slobodnu energiju, pa nije moguće izravno od same smjese karbida i ferita dobiti martenzit. U želji da dobijemo martenzitnu strukturu, prvo se ugrijavanjem čelika do austenitnog područja smjesa karbida i ferita mora pretvoriti u austenit, a nakon toga, gašenjem čelika se austenit može pretvoriti u martenzit. Drugim riječima, da bi se dobila martenzitna struktura, procesu gašenja čelika mora prethoditi tzv. proces austenizacija čelika. Postupak austenizacije s naknadnim gašenjem kako bi dobili martenzitnu strukturu naziva se kaljenjem čelika.

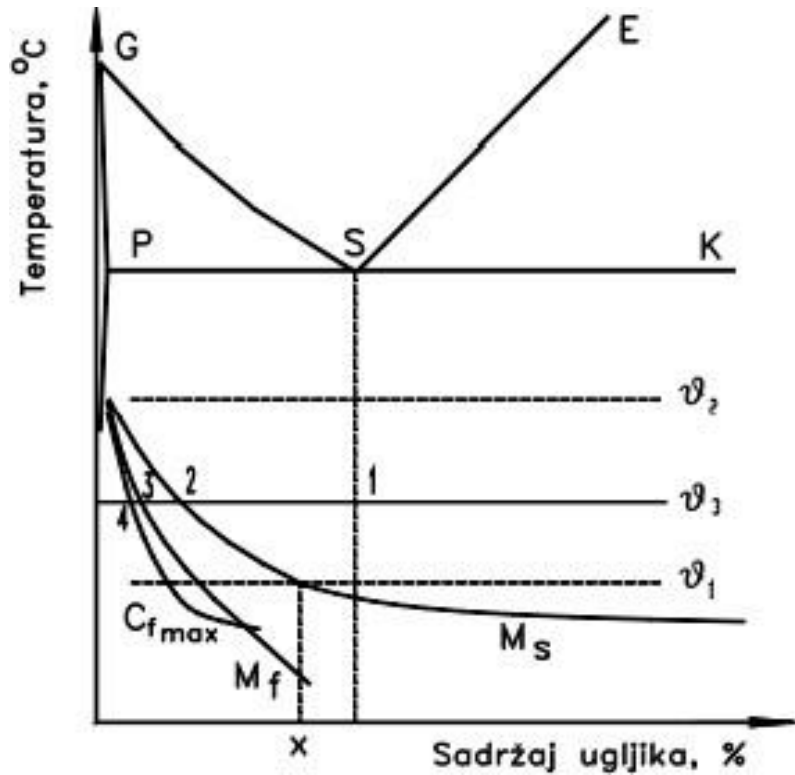
Martenzitna struktura ima karakterističan igličast izgled (slika 2.10.). Zrno kristala martenzita je u obliku pločice. Postoji orijentacijska ovisnost između matičnih zrna kristala austenita i martenzita, koju možemo očitati u ispravnom položaju pločica martenzita. Ravnina (111) austenita i ravnina (110) martenzita su identične, a pločica martenzita raste po ravnini (225) ili (259). Zaostali austenit nalazi se između martenzitnih iglica [1].



Slika 2.10. Martenzitna struktura

## 2.5.Pretvorba austenita u bainit

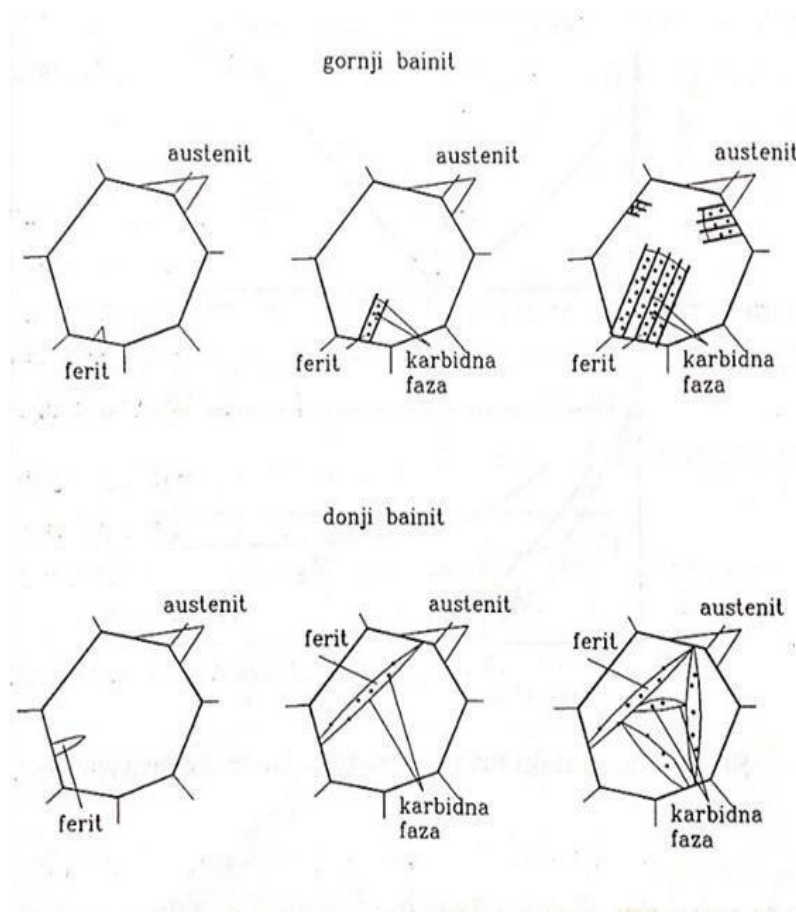
Fino dispergirana mješavina karbida i prezasićenog ferita naziva se bainit. Temperatura koja je potrebna za bainitnu pretvorbu definiramo između područja martenzitne i perlitne pretvorbe, odnosno između temperatura  $\vartheta_1$  i  $\vartheta_2$  (slika 2.11.). Stoga bainit nazivamo i međustupanj.



Slika 2.11. Shematski prikaz područja bainitne pretvorbe

Bainitna se pretvorba odvija bezdifuzijskim i difuzijskim mehanizmom, u različitim temperaturnim omjerima. Smanjivanjem udjela ugljika u osiromašenim dijelovima austenita dovoljno ispod koncentracije 2 i 3, ostvarujemo uvjete za tvorbu pločice martenzita bezdifuzijskim i koordiniranim pomakom atoma. Difuzija ugljika u  $\alpha$ -rešetki je veća od difuzije u  $\gamma$ -rešetki te njome dolazi do izoliranja ugljika i formiranja karbidnih čestica u prezasićenom feritu (slika 2.12).





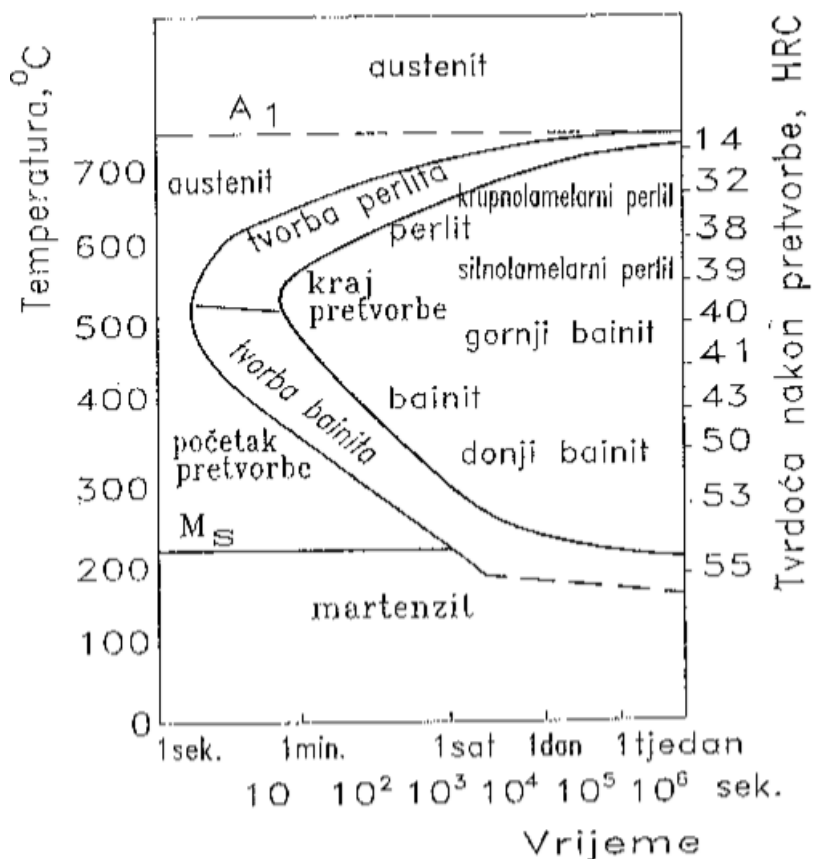
Slika 2.12. Shema pretvorbe austenita u bainit

Da bi se obavila pretvorba austenita u bainit potrebno je zadovoljiti oba uvjeta. Prvi uvjet je adekvatno ohlađivanje osiromašenog austenita za smičnu pretvorbu u martenzit, a drugi je dovoljna difuzija ugljika. Nijedan od navedenih uvjeta nije uvijek ispunjen u cijelosti pa se pretvorba u bainit može odgoditi, te u samoj mikrostrukturi može doći do pojave zaostalog austenita[1].

### 3. TTT DIJAGRAMI

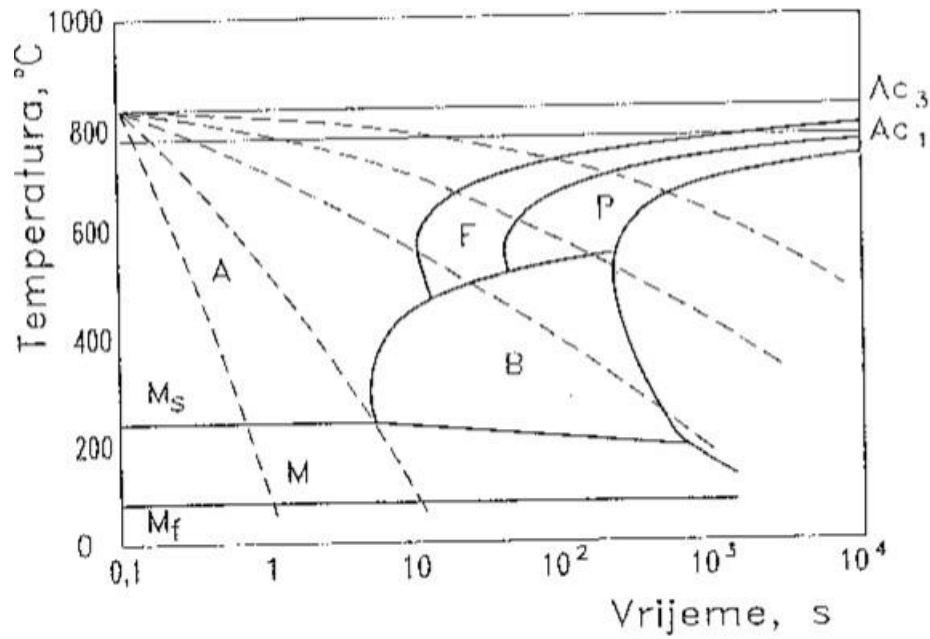
Pod skraćenicom TTT-dijagramma kriju se termini preuzeti iz engleskog: vrijeme, pretvorba, temperatura: time, transformation, temperature, a prikazuju dinamiku faznih pretvorbi pri ohlađivanju određenog čelika iz austenitnog područja. Raspad austenita može se odvijati u kontinuiranim uvjetima ohlađivanja te u izotermičkim uvjetima. Kod raspada austenita u izotermičkim uvjetima temperatura je prilikom pretvorbe austenita u neke druge faze, konstantna, dok u slučaju raspada austenita pri kontinuiranim uvjetima ohlađivanja, temperatura neprekidno pada. Prema tome postoje TTT-dijagrami za izotermičke pretvorbe i TTT-dijagrami za pretvorbe pri kontinuiranom ohlađivanju [1].

Izotermični TTT-dijagram prikazan je na slici 3.1. Njime se prikazuje vrijeme početka i završetka pretvorbe na određenim temperaturama. Vrijeme koje prođe do početka pretvorbe zove se vrijeme inkubacije. Različite temperature pretvorbe postižu različite konačne mikrostrukture pa tako i različita mehanička svojstva.



Slika 3.1. Izotermički TTT-dijagram eutektoidnog čelika

Slikom 3.2. prikazan je TTT-dijagram za kontinuirano ohlađivanje. Isprekidanim linijama prikazane su krivulje ohlađivanja, a unutar krivulja ucrtana su polja koja predstavljaju pojedine fazne pretvorbe. Polje M odgovara pretvorbi austenita u martenzit, polje B pretvorbi austenita u bainit, polje F pretvorbi austenita u ferit i polje P pretvorbi austenita u perlit.



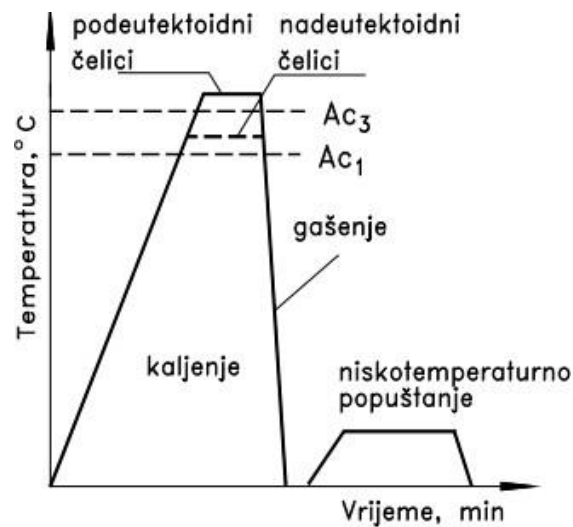
Slika 3.2. TTT-dijagram podeutektoidnog čelika za kontinuirano ohlađivanje

Pri kontinuiranom ohlađivanju austenit se raspada u različitim uvjetima zbog mijenjanja temperature tijekom raspada austenita. Konačna mikrostruktura je mješavina mikrostruktura visokotemperaturnog i niskotemperaturnog raspada austenita . [1].

## 4. POSTUPAK KALJENJA ČELIKA I KALJIVOST

### 4.1. Kaljenje

Kaljenje je proces kojim se čelik zagrijava do temperatura nešto iznad kritične, a zatim hladi brzinom većom od kritične u cilju dobivanja martenzitne strukture. Uspješno izvođenje kaljenje čelika i dobivanje pretežno martenzitne strukture po cijelom poprečnom presjeku dijela ovisi o više faktora: temperaturi zagrijavanja, vremenu zagrijavanja, sredini u kojoj se izvodi zagrijavanje, brzini hlađenja i prokaljivosti materijala (slika 4.1.)[1].



Slika 4.1. Dijagram postupka kaljenja s niskotemperaturnim popuštanjem čelika

Temperatura kaljenja određena je položajem kritičnih točaka  $A_1$  i  $A_3$  kod većine čelika. Kod čelika koji su legirani ugljikom (ugljičnih čelika) možemo temperaturu kaljenja odrediti na dijagramu željezo-ugljik. Obično je temperatura zagrijavanja kod podeutektoidnih čelika u području 30-50 °C iznad linije  $A_3$ , dok je kod nadeutektoidnih čelika u istom temperaturnom području iznad temperature linije  $A_1$ .

Ukoliko zagrijavamo podeutektoidni čelik iznad  $A_{c1}$ , te ispod  $A_{c3}$ , onda dobijemo u zakaljenom čeliku sačuvani ferit, koji snižava tvrdoću kaljenog čelika i isto tako negativno utječe na mehanička svojstva napuštenog čelika. Zagrijavanjem iznad temperature  $A_{c3}$  nije baš preporučljivo zbog opasnosti koje su povezane sa tako visokim zagrijavanjem. Takvo visoko zagrijavanje ne dovodi do povišenja tvrdoće čelika.

Uz to se javlja opasnost povećanja veličine kristalnog zrna austenita, a također postoji mogućnost pojave većih naprezanja kao posljedica kaljenja čelika nadeutektoidnog sustava sa temperaturom iznad  $A_{c3}$ , zatim razugljichenje površine čelika može biti intenzivnije itd.

Prilikom razmatranja brzine zagrijavanja razlikujemo dva faktora:

- dozvoljenu brzinu zagrijavanja određenog proizvoda, koji je izrađen iz čelika određene kvalitete

- tehnički moguća izvedba maksimalno dozvoljene brzine zagrijavanja određenog proizvoda. Zagrijavanje konvekcijom javlja se kada je temperatura u peći ispod 600-700 °C. Iznad 700-800°C uslijed zračenja zagrijavanja elemenata, javlja se pretežno zagrijavanje zračenjem [2].

Postupke kaljenja dijelimo na:

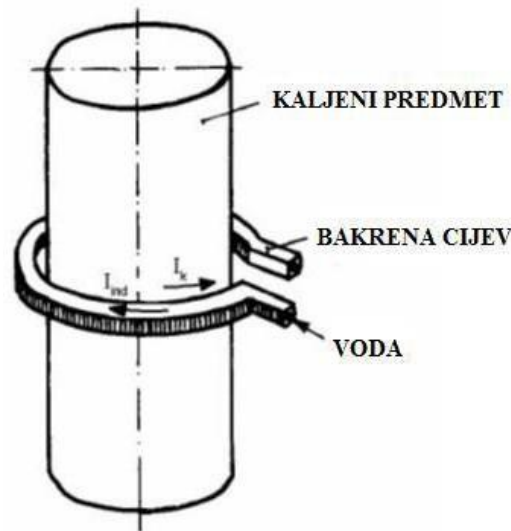
1. Kaljenje čitavog volumena
2. Plameno kaljenje
3. Indukcijsko kaljenje
4. Kaljenje elektronskim snopom
5. Impulsno kaljenje
6. Kaljenje djelomičnim uranjanjem
7. Kaljenje laserom

1. Kaljenje čitavog volumena se provodi u peći za kaljenje. Postupak se provodi tako da se obradak stavlja u peć i zagrijava na temperaturu austenizacije. Obradak se zatim hladi vađenjem iz peći, te uranjanjem u rashladno sredstvo kako bi se postiglo naglo ohlađivanje koje donosi povećanu tvrdoću. Nakon kaljenja se provodi popuštanje, radi vlastitih zaostalih naprezanja koja se pojavljuju unutar čelika nakon kaljenja, gdje se obradak obično zagrijava na temperaturu 180-220°C.

2. Plameno kaljenje se izvodi pomoću plinskog plamena. Lokalno ograničeno ugrijavanje površinskog sloja na temperaturu austenizacije se ostvaruje izgaranjem smjesa gorivih plinova, a hlađenje se izvodi uz pomoć odgovarajućih prskalica sa različitim sredstvima kao što su: voda, emulzija ulja i različite otopine polimera. Postoje 4 vrste plamenog kaljenja, a to su: stacionarna, rotaciona, posmična i rotaciono posmična.

3. Od postupaka površinskog kaljenja čelika, u strojarskoj se praksi najčešće primjenjuje

indukcijsko kaljenje (slika 4.2.). Pri indukcijskom se kaljenju elektromagnetnom indukcijom u obratku inducira elektromotorna sila koja u obratku izaziva električnu struju, odnosno, prouzrokuje tzv. vrtložne struje. Zbog skin-efekta gustoća se inducirane struje eksponencijalno smanjuje prema unutarnjim slojevima obratka.



Slika 4.2. Shematski prikaz indukcijskog kaljenja

Indukcijskim se kaljenjem relativno jednostavno i uspješno mogu površinski otvrdnuti čelici koji sadrže više od 0,35% C, te čelici za poboljšavanje. Dubine zakaljena sloja pri indukcijskom kaljenju najčešće iznose od 0,4 do 2,5 mm (maksimalno 50 mm).

4. Kaljenje elektronskim snopom se izvodi u vakuumu. Predmet se ugrijava na principu pretvorbe kinetičke energije visoko ubrzanih čestica na površini obratka, iz razloga što se energija vrlo precizno regulira i dozira te lako postižu zahtijevane dubine kaljenih slojeva.

5. Impulsno kaljenje služi za ugrijavaње male površine na temperaturu austenizacije pomoću energetske impulsa, a oni se ostvaruju uz pomoć visokofrekventne struje, plazme, elektronskim ili laserskim snopom. Za hlađenje se koristi sredstvo ovisno o materijalu.

6. Kaljenje djelomičnim uranjanjem je površinsko kaljenje. Dio predmeta se uranja u rastaljeno solno kupku, a kada se uroni u kupku jezgra predmeta ostaje relativno hladna dok se uronjeni površinski sloj brzo ugrije. Postupak se uglavnom primjenjuje u pojedinačnoj obradi i u slučaju kada su postupci plamenog kaljenja ili indukcijskog kaljenja neprimjenjivi iz tehnoloških ili ekonomskih

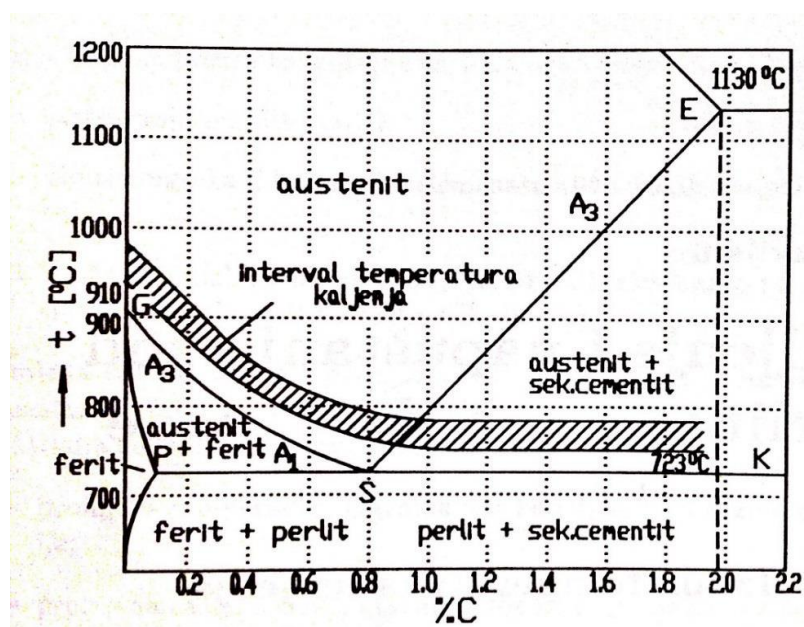
razloga.

7. Kod kaljenja laserskim snopom koriste se vrlo visoke gustoće energije te se ugrijavanje postiže ekstremno brzo. Kratko je trajanje postupka i zbog korištenja vrlo visokih gustoća energije, potrebne temperature austenizacije su više za 100 °C pa i više u odnosu na klasične postupke kaljenja. Postiže se i visoka tvrdoća kaljenih slojeva koja je viša od onih postignutih klasičnim načinima kaljenja. Hlađenje se izvodi tako da se odvodi toplina u unutrašnjost mase predmeta, tzv. samohlađivanje, gdje se postižu vrlo velike brzine hlađenja. Ovaj postupak kaljenja ima dvije osnovne podjele. Jedno je kaljenje snopom za pretaljivanje površine, a drugo je kaljenje laserskim snopom bez pretaljivanja površine.

### Izbor temperatura kaljenja

Temperatura kaljenja kod većine čelika određena je položajem točaka  $A_1$  i  $A_3$ . Kod ugljičnih čelika (ili čelika koji su legirani ugljikom) možemo temperaturu kaljenja odrediti na dijagramu željezo-ugljik, kako je prikazano na slici 4.3.

Obično je temperatura zagrijavanja kod podeutektoidnog čelika u području 30-50°C iznad linije  $A_3$ , dok je kod nadeutektoidnih čelika u istom temperaturnom intervalu iznad temperature linije  $A_1$ [3].



Slika 4.3. Dio dijagrama željezo-ugljik i optimalni intervali temperatura zagrijavanja (austenitizacije) kod kaljenja ugljičnih čelika

Temperatura kaljenja čelika legiranih samo sa ugljikom izabire se po pravilu[3]:

- kod podeutektoidnog čelika:  $t_{\text{kaljenja}} = A_{c3} + (30-50)$
- kod nadeutektoidnih čelika:  $t_{\text{kaljenja}} = A_{c1} + (30-50)$

### **Vrijeme zagrijavanja**

Obično u tehničkoj praksi tražimo da se zagrijavanje čelika do određene temperature sprovede u što kraćem vremenskom intervalu, jer se na taj način povećava proizvodnja agregata koje imamo na raspolaganju u kalionici. Također se prema tome smanjuje količina nužno potrebnih agregata i ostale opreme u kalionici da bi se mogao ispuniti određeni program proizvodnje itd.

Prilikom razmatranja brzine zagrijavanja možemo razlikovati dva faktora:

- dozvoljena brzina zagrijavanja određenog proizvoda, koji je izrađen iz čelika određene kvalitete
- tehnički moguća izvedba maksimalno dozvoljene brzine zagrijavanja određenog proizvoda u određenom agregatu, na primjer u električnoj peći.

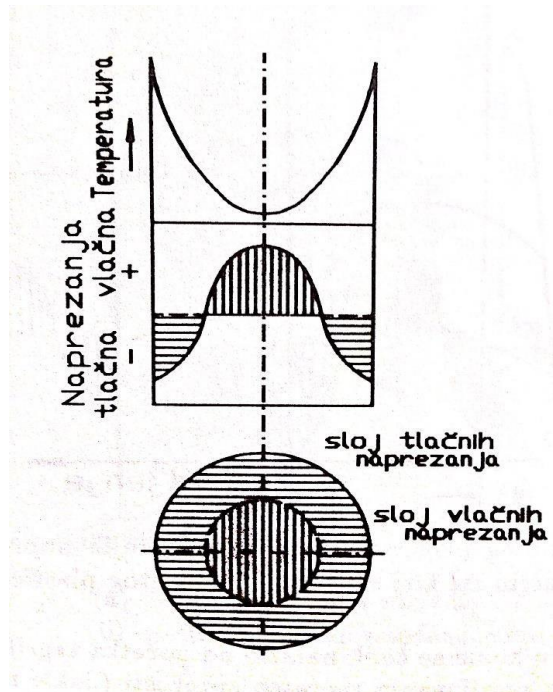
U pećima se čelični komadi zagrijavaju na dva načina:

1. Konvekcijom
2. Zračenjem

Zagrijavanjem konvekcijom javlja se kada je temperatura u peći ispod 600-700°C. Iznad 700-800°C uslijed zračenja grijaćih elemenata, oblika i stijenki peći, javlja se pretežno zagrijavanje zračenjem. U rastaljenoj soli zagrijavanje je dva puta brže nego kod zagrijavanja plinom, dok zagrijavanje u rastaljenom olovu je dva puta brže od rastaljene soli[3].

Prilikom definiranja procesa toplinske obrade uzimamo u obzir da se za vrijeme zagrijavanja javlja pad temperature po presjeku komada koji zagrijavamo. Slojevi na površini su zagrijani do viših temperatura od sredine komada. Slika 4.4. pokazuje takav slučaj.



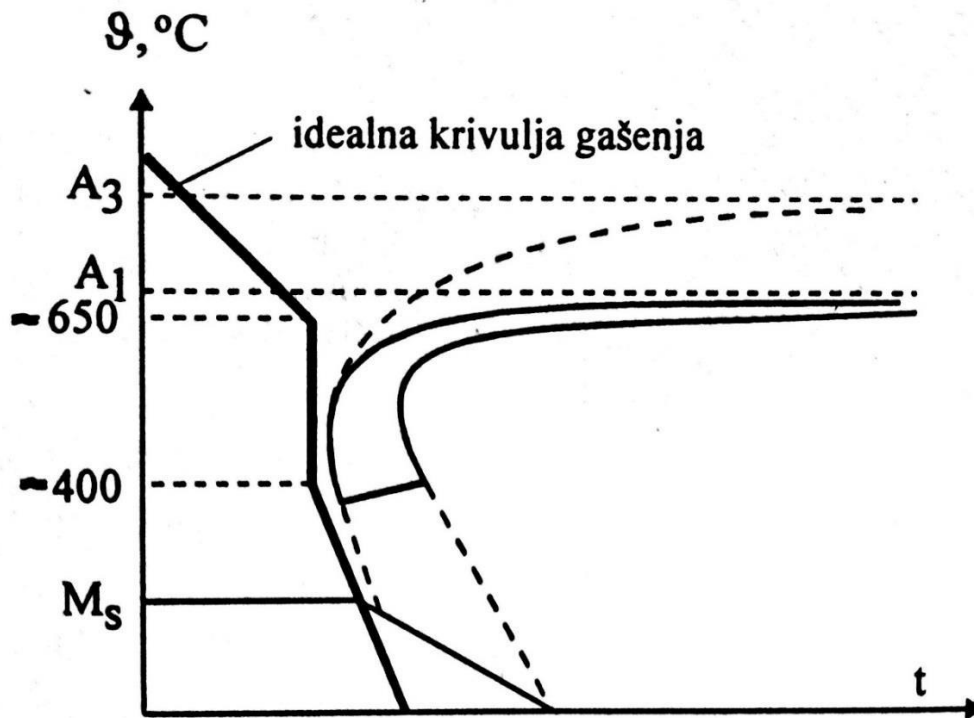


Slika 4.4. Raspodjela temperatura i naprezanja preko presjeka detalja prilikom zagrijavanja

Površina komada se nastoji proširiti, a toj tendenciji suprotstavlja se srednji sloj gdje su temperature niže. Prema tome na površinskom sloju djeluje tlačna naprezanja, a u sredini vlačna naprezanja. Budući da su ta naprezanja posljedica različitih temperatura površinskog sloja i unutrašnjosti, unutrašnja naprezanja komada postaju to veća što je temperaturna razlika između površine i unutrašnjosti komada veća [3].

## Gašenje

Gašenje je naglo odvođenje topline (npr. voda će ugaziti vatru objekta jer će vrlo brzo odvesti toplinu plamena i sniziti time temperaturu ispod plamišta, toplina austenitiziranog predmeta vrlo brzo će se odvesti u sredstvo za gašenje). Svrha gašenja je dovoljno pothlađivanje da bi se od austenita preklonom stvorio martenzit (slika 4.5.)[5].



Slika 4.5. "Idealizirana" krivulja gašenja u dijagramu TTT (kvalitativno)

U ostalim područjima brzina hlađenja ne bi morala biti velika zbog mogućnosti pojave toplinskih napetosti, što osobito vrijedi za područje ispod  $M_s$ .

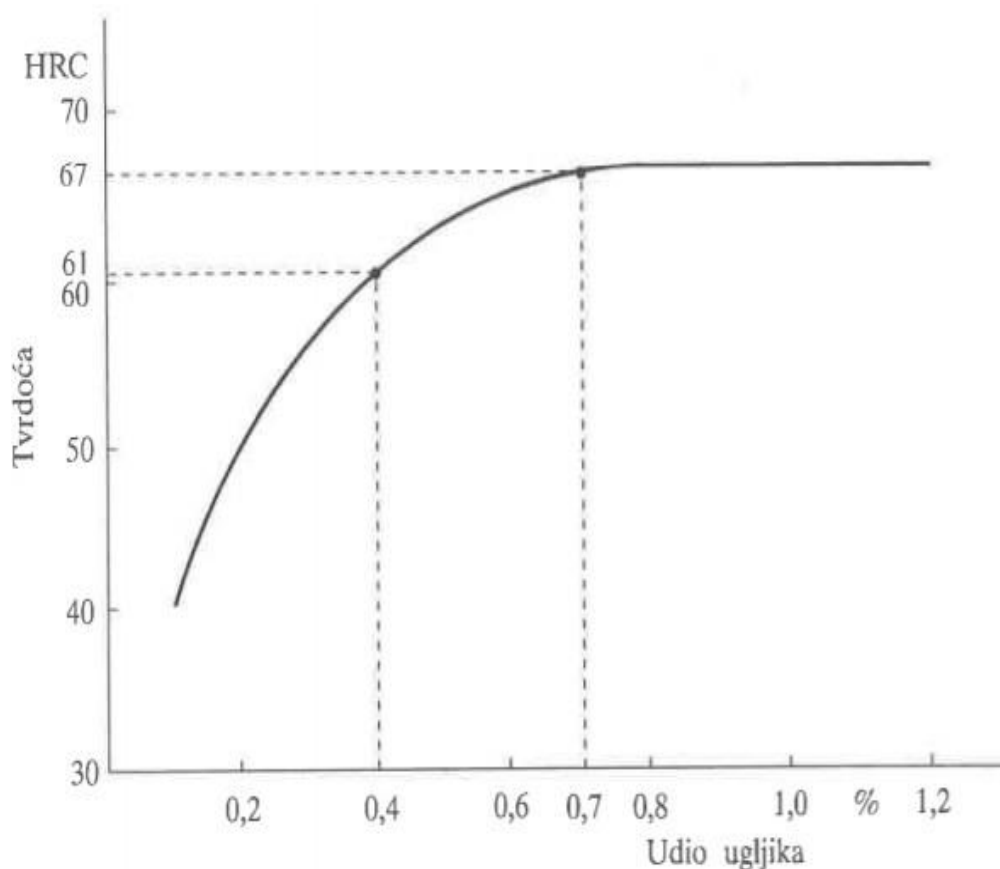
Sredstva za gašenje dijele se po svojim fizikalnim svojstvima u skupine:

1. Skupina ima vrelište ispod  $\vartheta_a$  čelika, a posljedica toga je stvaranje parnog filma oko predmeta (Leidenfrostova pojava). Lokalno isparavanje usporava odvođenje topline. U tu skupinu spadaju voda i vodene otopine te biljna i mineralna ulja.
2. Skupina ima vrelište iznad  $\vartheta_a$  čelika, pa nema lokalne promjene agregatnog stanja, tj. nema stvaranja filma pare. Ovamo ulaze rastaljene soli i rastaljeni metali. U praksi se gašenje ovim sredstvima ostvaruje pri temperaturi većoj od  $150^\circ\text{C}$ .
3. Skupina su plinovi: zrak (mirni ili komprimirani), dušik, helij, argon, dakle plemeniti odnosno bar manje ili više inertni plinovi. U širem smislu ovdje spada i vakuum [5].

## 4.2. Kaljivost

Kaljivost čelika je svojstvo čelika da se gašenjem s temperature austenitizacije: 1) zakali odnosno postigne što višu tvrdoću na površini i 2) prokali odnosno postigne što jednoličniju tvrdoću na poprečnom presjeku. Zakaljivost i prokaljivost su dva svojstva čelika o kojima, uz dimenziju obratka i sredstvo kojim se obradak gasi, ovisi koja će se mikrostruktura i tvrdoća postići kaljenjem.

Na Burnsovom dijagramu ispod (slika 4.6.) prikazan je slučaj čelika s 0,7% i čelika s 0,4% ugljika iz kojega je jasno vidljivo da je postiziva tvrdoća veća u onom slučaju gdje je udio ugljika veći.



Slika 4.6. Burnsov dijagram

Kako je postiziva tvrdoća veća u slučaju čelika s većim udjelom ugljika tako je i zakaljivost čelika veća kada je udio ugljika veći te se može zaključiti da zakaljivost čelika ovisi o udjelu ugljika otopljenog u primarnom austenitu. Uz ovisnost o količini ugljika koja se otapa u primarnom austenitu na temperaturi austenitizacije, tvrdoća zakaljenog čelika ovisi i o intenzivnosti gašenja. Da bi se postigla maksimalna tvrdoća potrebno je gasiti čelik nadkritičnim gašenjem. Na zakaljivost čelika ne utječe prisutnost legirajućih elemenata [3].

Od udjela 0,7% ugljika na više Burnsova krivulja postaje horizontalni pravac iz razloga što nadeutektoidni čelici otapaju jednake količine ugljika pri određenim temperaturama austenitizacije. Osim toga, koncentracija zaostalog austenita raste s povećanjem koncentracije ugljika u čeliku, a kako zaostali austenit ima manju tvrdoću od martenzita tako negativno utječe na prosječnu tvrdoću čelik[3].

U ovom poglavlju proučeno je kaljenje kao jedna od osnovnih toplinskih obrada čelika. Definiran je pojam kaljivosti te je podijeljen na pojmove zakaljivosti i prokaljivosti. Zakaljivost je obrađena u ovom poglavlju, a detaljna analiza prokaljivosti koja je ujedno i glavna tema ovog rada slijedi u nastavku.

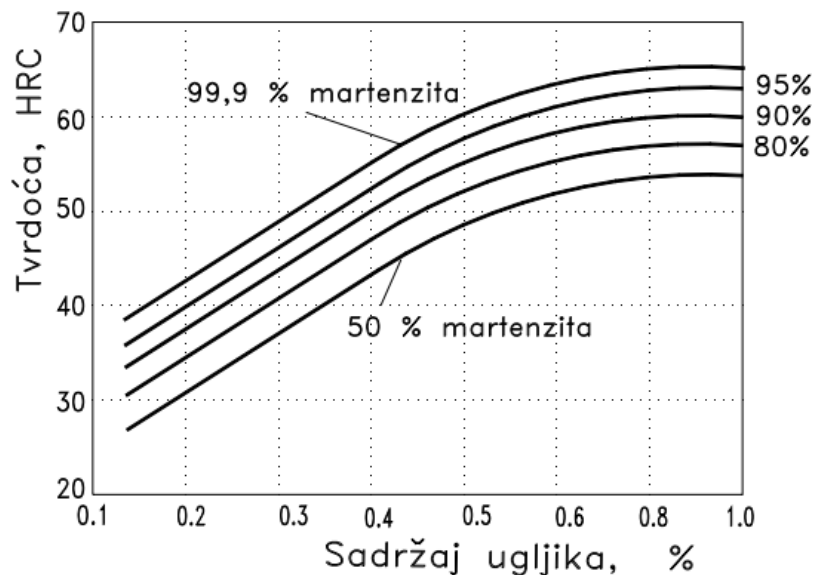
## 5. PROKALJIVOST I ZAKALJIVOST ČELIKA

Svojstva čelika prokaljivosti i zakaljivosti definiramo na slijedeći način:

- Prokaljivost je svojstvo koje omogućava da se pri gašenju čeličnih obradaka u dubljim slojevima formira martenzitna struktura, odnosno mikrostruktura s više od 50% martenzita, povezana je s gornjom kritičnom brzinom gašenja te ovisi o brzini perlitne pretvorbe u čelik. Svi čimbenici koji usporavaju brzinu perlitne pretvorbe povećavaju prokaljivost čelika.

- Zakaljivost je svojstvo koje omogućava da čelik pri kaljenju postigne tvrdu, pretežito martenzitnu strukturu. Tvrdoća prokaljenog sloja nisko i srednjelegiranih čelika izravno ovisi o tvrdoći martenzita i njegovom udjelu u strukturi. Sama tvrdoća martenzita ovisna je o sadržaju ugljika u čeliku (slika 5.1.).

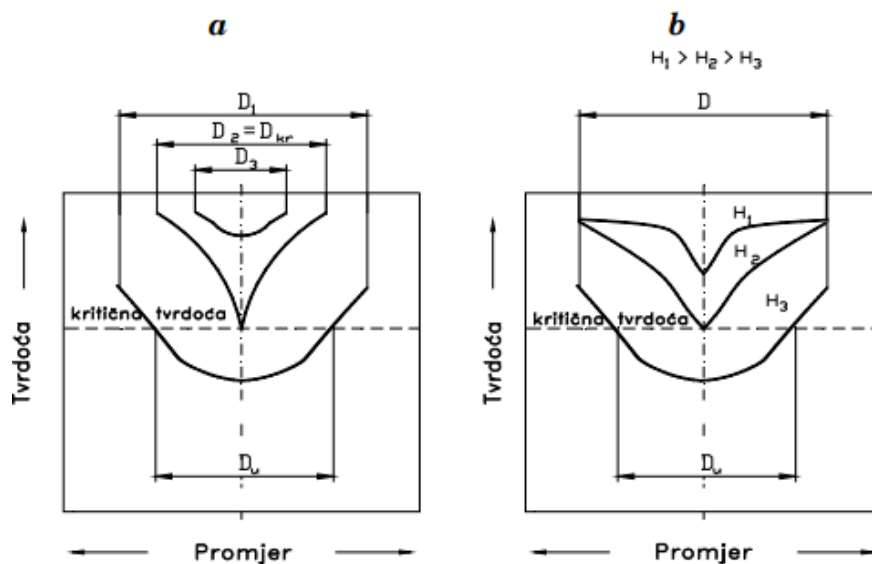
Iz navedenog proizlazi da će obradak izrađen iz čelika veće zakaljivosti nakon postupka kaljenja biti tvrdi.



Slika 5.1. Orijentacijske vrijednosti tvrdoće čelika u ovisnosti o koncentraciji ugljika u martenzitu i udjelu martenzita u mikrostrukturi čelika

Raspodjela tvrdoća u zakaljenih čeličnih obradaka ovisi o prokaljivosti i zakaljivosti čelika, ali ovisi i o dimenziji obratka i o sredstvu u kojem se obradak gasi. Na slici 5.2 shematski je prikazana mogućnost raspodjele tvrdoće u valjkastim obracima različitih promjera koji su zakaljeni u istom sredstvu.

Na slici 5.2.a uvedena je nova veličina koja se naziva kritičnom tvrdoćom. Kritičnu tvrdoću definiramo kao minimalnu tvrdoću prokaljena sloja. Kritični promjer je maksimalni promjer čelična obratka koji se potpuno prokali u nekom sredstvu. Tvrdoća je u jezgri obratka s kritičnim promjerom jednaka kritičnoj tvrdoći. Ukoliko se zahtijeva potpuno prokaljenje obradaka, obradak s promjerom  $D_1$  bio bi nedovoljno prokaljen, a obradak s promjerom  $D_3$  bio bi nepotrebno gašen prevelikim brzinama.



Slika 5.2. Primjeri raspodjele čvrstoće nakon gašenja čelika

Tvrdoća zakaljena obratka ovisi i o sredstvu u kojem se obradak gasio. M. A. Grossmann je sposobnost sredstva da u procesu kaljenja djelotvorno odvodi toplinu iz ugrijana obradka pokušao definirati kao tzv. intenzivnost gašenja  $H$ .

Intenzivnost gašenja  $H$  brojčano prikazuje odnos srednjih brzina gašenja valjkastog uzorka 12,7 mm (1/2 inch) od ugljičnog čelika s 0,45 % C u intervalu temperatura od 700 do 300 °C u promatranom sredstvu i mirujućoj vodi temperature 18°C. Intenzivnost gašenja  $H$  u osnovi ovisi o vrsti sredstva, ali i o brzini strujanja sredstva i temperaturi sredstva.

Orijentacijske vrijednosti intenzivnosti gašenja različitih sredstva bez strujanja pri sobnoj temperaturi su sljedeće:

$H = 1$  voda

$H = 0,3$  ulje

$H = 0,025$  zrak

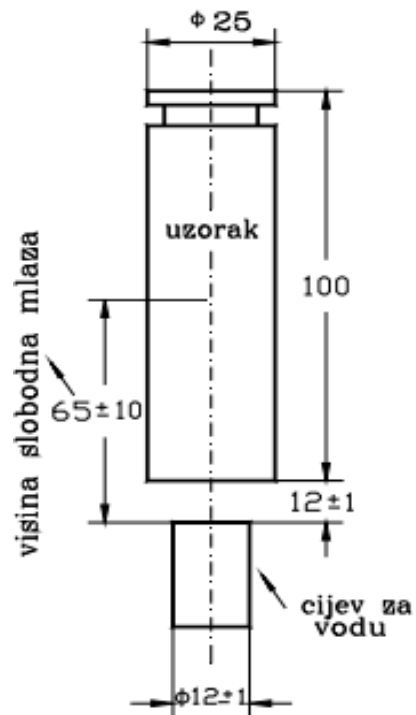
Na slici 5.2.(pod b) prikazana je raspodjela tvrdoće u obratku zakaljenom tri različita sredstva ( $H_1 > H_2 > H_3$ ). Kad je postavljen zahtjev za potpuno prokaljenim obratkom s promjenom jednakim  $D$  (slika 5.2., pod b), obradak bi bio nepotrebno gašen prevelikim brzinama u sredstvu s intenzivnosti gašenja  $H_1$ , a u sredstvu s intenzivnosti gašenja  $H_3$  obradak bi se nedovoljno prokalio. Kritična se brzina gašenja, pa tako i prokaljivost čelika, može izravno ocijeniti pomoću TTT-dijagrama. No, izrada TTT-dijagrama je relativno skupa. Stoga se TTT-dijagrami izrađuju za određeni reprezentativni kemijski sastav određenog tipa čelika i za određenu temperaturu austenizacije. Eventualne se razlike u prokaljivosti čelika, koje nastaju zbog razlike u kemijskom sastavu ili veličine kristalnog zrna austenita, moraju naknadno procijeniti.

Za procjenu prokaljivosti čelika najčešće se koriste slijedeće metode: metoda totalne prokaljenosti, Justova metoda, Grosmanova metoda i Jominyjeva metoda[5]:

### **5.1. Jominyjeva metoda**

Neusporedivo jednostavniji i jeftiniji pokus u usporedbi s procedurom koja se rabi za izradu TTT-dijagrama jest Jominyjev pokus, koji zauzima najvažnije mjesto u procjeni prokaljivosti čelika. (slika 5.3.). Jominyjev uzorak se najprije zagrije na temperaturu austenizacije za koju će se ispitivati prokaljivost čelika i nakon toga se s mlazom vode gasi s čeone strane. Nakon gašenja potrebno je uzorak uzdužno brusiti na valjkastoj plohi plašta s dvije suprotne strane. Debljina odbrušenog sloja jednaka je 0,4 mm. Nakon toga se ispita tvrdoća na različitim udaljenostima od gašenog čela.

Za ispitivanje tvrdoća mogu se primijeniti Rockwellova i Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće. Ovisnost tvrdoće o udaljenosti od gašenog čela Jominyjevog uzorka u ovom je slučaju obilježje prokaljivosti čelika.



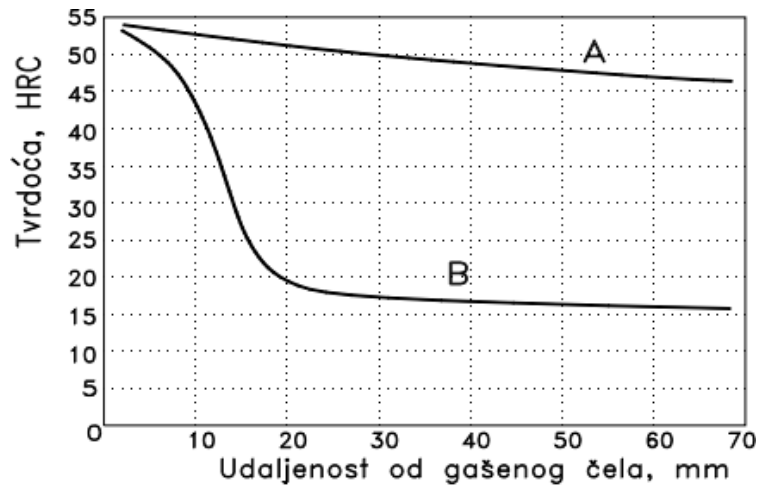
Slika 5.3. Shema položaja pokusnog uzorka pri Jominyjevom pokusu

U Jominyjevom pokusu se normiraju:

- oblik i dimenzija pokusnog uzorka,
- uvjeti ugrijavanja,
- uvjeti ohlađivanja,
- mjesta i metoda ispitivanja tvrdoće.

Krivulja ovisnosti tvrdoće o udaljenosti od gašenog čela naziva se Jominyjevom krivuljom. Na slici 5.4. prikazane su ovisnosti tvrdoće o udaljenosti od gašena čela na primjeru dvaju čelika različite prokaljivosti.

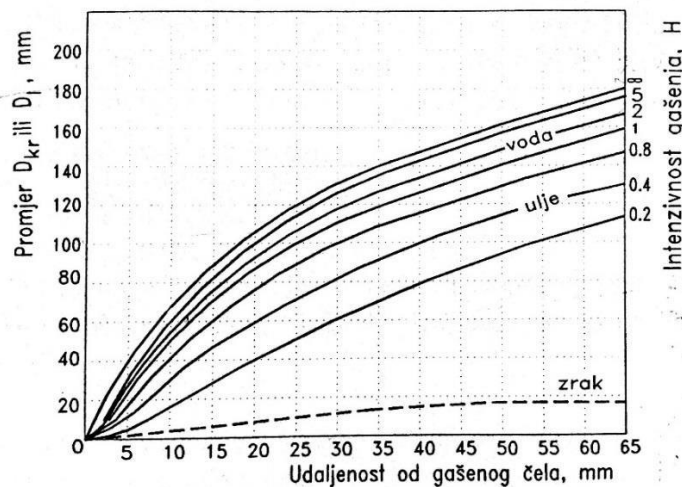




Slika 5.4. Jominyjeve krivulje dvaju čelika različite prokaljivosti

Čelik s Jominyjevom krivuljom označenom s “A“ ima veću prokaljivost od čelika s Jominyjevom krivuljom označenom s “B“.

Pomoću dijagrama na slici 5.5. moguće je za određenu kritičnu tvrdoću orijentacijski procijeniti u kojem će se sredstvu obradak zadanog promjera potpuno prokaliti.



Slika 5.5. Odnos između kritičnih promjera i udaljenosti od gašena čela Jominyjeva pokusa

Za preciznije definiranje rezultata postupaka kaljenja čelika koriste se metode kojima se,

pomoću rezultata Jominyjevog pokusa, dimenzija i oblik obradaka te podacima o sredstvu, može procijeniti raspodjela tvrdoća zakaljenih obradaka.

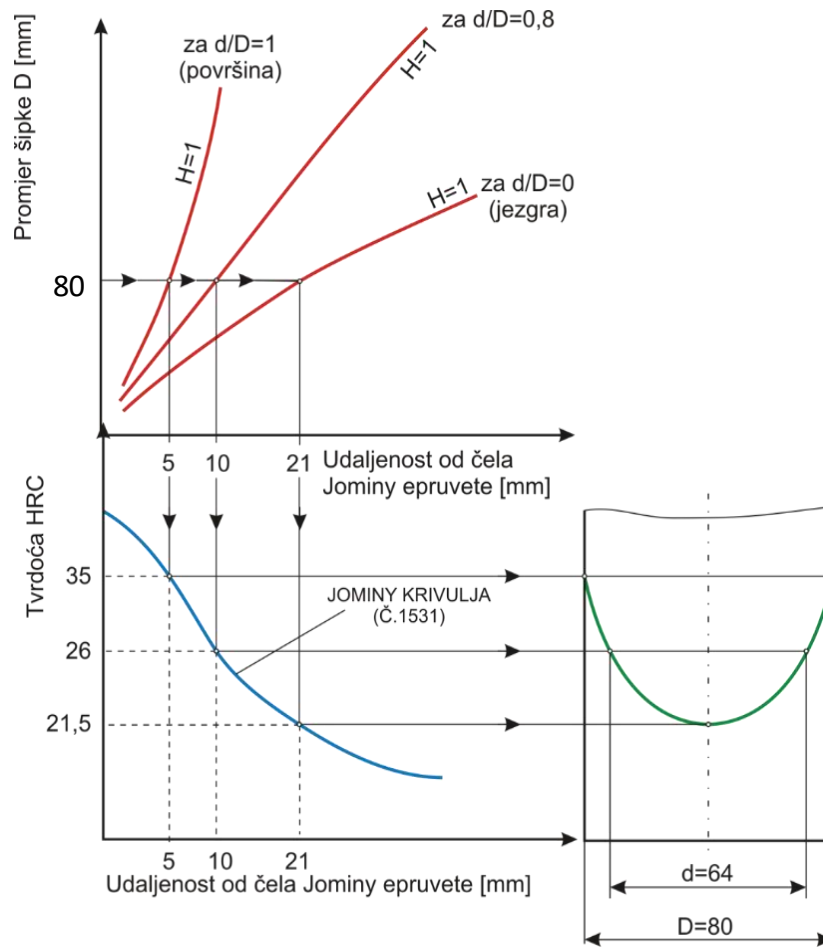
### **Crafts-Lamontovi dijagrami**

Faktor prokaljivosti čelika određujemo prema raspodjeli tvrdoće po presjeku nakon izvršenog procesa kaljenja u specifičnom rashladnom sredstvu  $H$ . Dijagrami se primjenjuju za više vrsta rashladnih sredstva i samo za jednu udaljenost od površine šipke što se iskazuje omjerom promjera  $d/D$ . Intenzitet rashladnog sredstva  $H$  određujemo prema tablici 5.1. [9].

*Tablica 5.1. Ovisnost gibanja i intenzitet ohlađivanja u različitim sredstvima [5]*

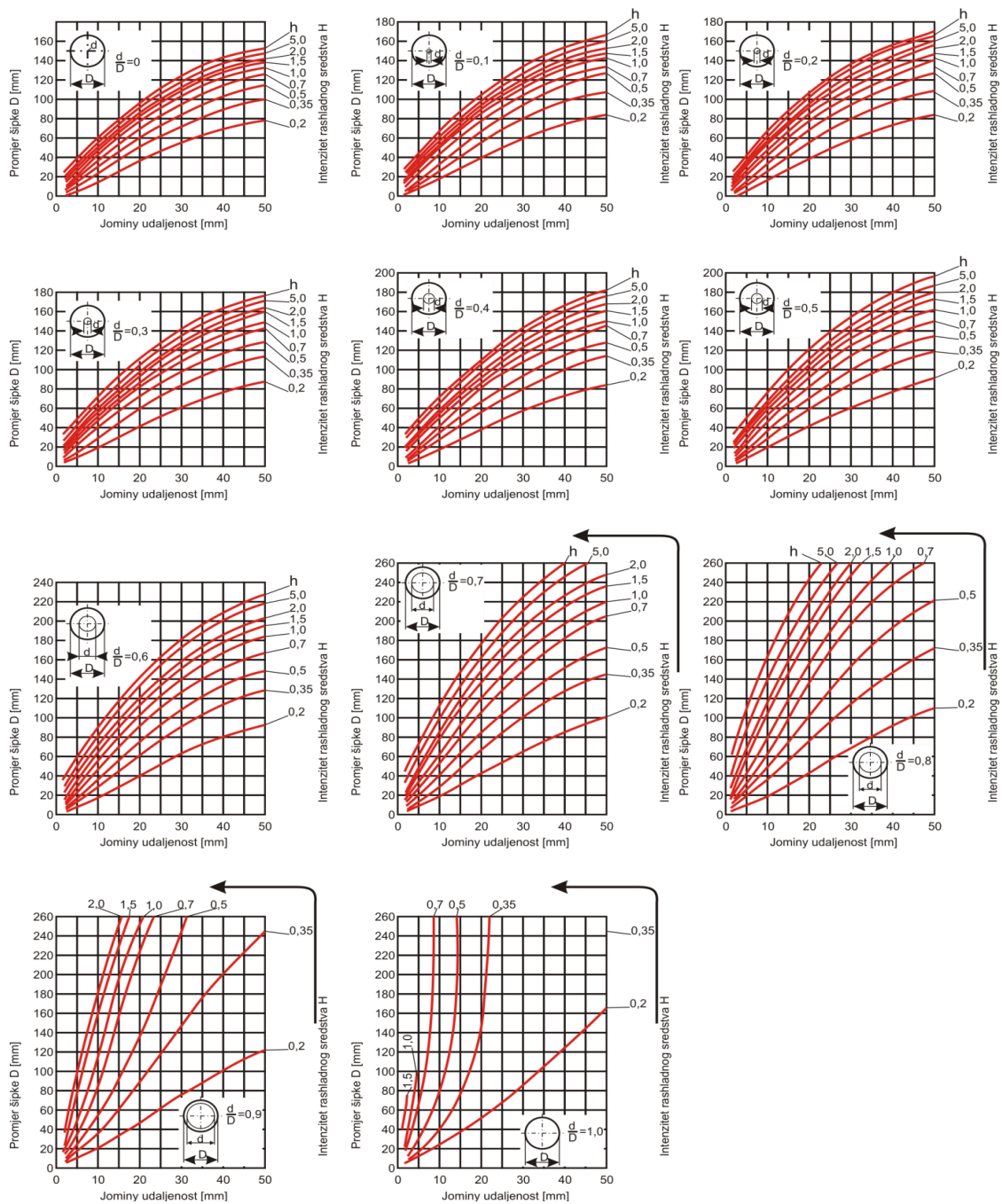
<b>Rashladna sredstva/ Vrsta gibanja</b>	Bez gibanja	Slabo gibanje	Srednje gibanje	Jače gibanje	Intenzivno gibanje	Najintenzivnije
ulje	0,25 - 0,3	0,3 - 0,35	0,35 - 4	0,4 - 0,5	0,5 - 0,8	0,8 - 1,1
voda	0,9 - 1	1,1 - 1	1,2 - 1,3	1,4 - 1,5	1,5 - 2	2 - 6
slana voda	2	2 - 2,2	-	-	-	2 - 8

Za određivanje U- krivulja prikazana shema korištenja Craft Lamontovih dijagrama vidi se na slici 5.6.



Slika 5.6. Shema Crafts-Lamontovih dijagrama za određivanje U-krivulja

Za opisani primjer prikazali smo šipku s promjerom od 80 mm koju smo nakon austenitizacije gasili u vodi  $H=1$ . Za sve dijagrame vidljive na slici 5.7. ponavljamo postupak mjerenja kako bi što preciznije odredili U-krivulje [9].



Slika 5.7. Crafts-Lamontovi dijagrami [9]

## 6. METODE ISPITIVANJA TVRDOĆE

U tehnici pod pojmom tvrdoće podrazumijevamo otpor protiv utiskivanja, kojim se neko tijelo suprotstavlja utiskivanju nekog drugog tvrđeg tijela. U konstrukciji su važni samo oni podaci o tvrdoći, do kojih se došlo postupcima ispitivanja po Brinellu, Rockwellu i Vickersu. Rezultati ispitivanjem po različitim metodama za isti materijal znatno se razlikuju i zbog toga se ne mogu zamjenjivati vrijednosti jedne sa vrijednostima druge tvrdoće. Ipak, postoje empirijski obrasci za preračunavanje jedne u drugu tvrdoću ili usporedne tablice, ali one važe samo za jedan materijal. Za napomenuti je da za mjerenje tvrdoće nisu potrebni posebno izrađeni uzorci već je mjerenje moguće, ovisno o metodi, na poluproizvodima ili čak na gotovim proizvodima.

Postupak mjerenja tvrdoće po Vickersu može se univerzalno primjenjivati, a područje primjene proteže se na sve minerale i metalne tvari čime nam je omogućeno određivanje maksimalne tvrdoće dijelova kaljenih na površini, a isto tako možemo njime određivati tvrdoću krutih stakala, karbida i mineralnih tvari. Najveća tvrdoća koju možemo postići kod kaljenja čelika postignuta je kod postupka nitriranja [3].

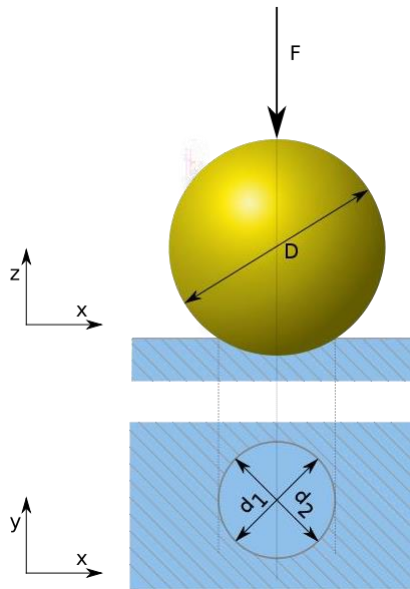
Načini određivanje tvrdoće u strojarstvu su:

- tvrdoća po Brinellu, oznaka *HB*,
- tvrdoća po Rockwellu, oznake *HRC* i *HRB*,
- tvrdoća po Vickersu, oznaka *HV*.

### 6.1. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu

Ispitivanje tvrdoće po Brinellu odrađuje se tako da kaljenu čeličnu kuglicu utiskujemo u glatku, ravnu površinu komada kojeg ispitujemo, sa opterećenjem koje djeluje mirujuće. Na osnovu deformacijske sposobnosti materijala, kuglica se utiskuje u komad, za dubinu ( $t$ ). Ukoliko je sila utiskivanja malena, deformacija je čisto elastična, te je ( $t$ ) u tom slučaju ovisan samo o modulu elastičnosti. Stoga moramo utiskivati kuglicu s takvim opterećenjem da se materijal trajno deformira, te da površina poslije rasterećenja prikazuje utisak u obliku kalote. Što je materijal mekši, to je veći otisak kuglice koji ostaje u površini. Veličina utiska predstavlja mjerilo za otpor materijala nasuprot utiskivanja tijela.

Način određivanja tvrdoće po Brinellu prikazan je na slici 6.1. [3].

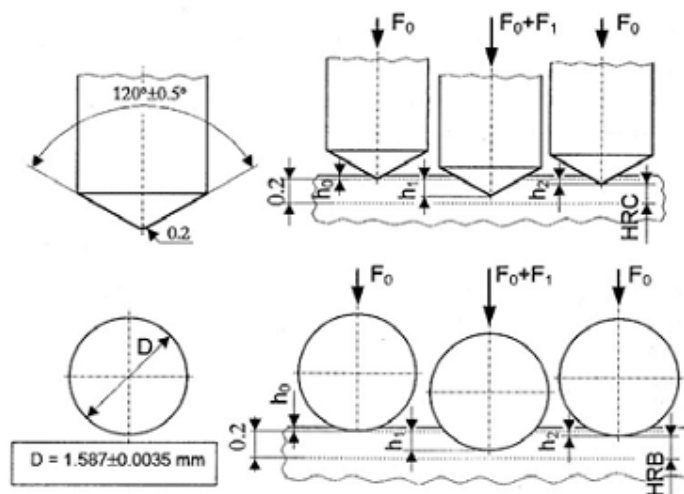


Slika 6.1. Skica penetratora i otiska kod Brinellove metode

## 6.2. Ispitivanje tvrdoće po Rockwellu

Ispitivanjem tvrdoće po Rockwellu mjerimo dubinu otiska vrha (utiskivača) dijamanog čunja i to poslije rasterećenja (slika 6.2.) tj. kod ovog postupka radimo sa predopterećenjem. Dubina utiskivanja služi direktno kao mjerilo tvrdoće. Skala mjernog sata je tako izvedena, da mala udubina utiskivanja odgovara visoko Rockwell broju i obrnuto. Tvrdoća po Rockwellu prema tome nema nikakve dimenzije pa tako govorimo na primjer o 60 jedinica po Rockwellu.

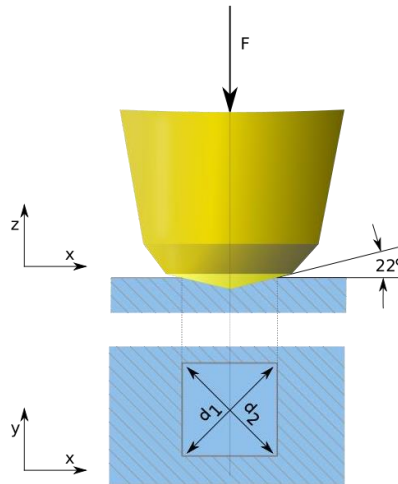
Ispitivanje tvrdoće po Rockwellu je u pogonu najjednostavniji i najbrži postupak te se stoga i najviše primjenjuje [3].



Slika 6.2. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po HRC i HRB metodi

### 6.3. Ispitivanje tvrdoće po Vickersu

Ispitivanje tvrdoće po Vickersu izvodimo uz upotrebu dijamantne piramide kao tijelo za utiskivanje (slika 6.3.). Potrebno je odrediti površinu piramidnog utiska, analogno tvrdoću po Brinellu.

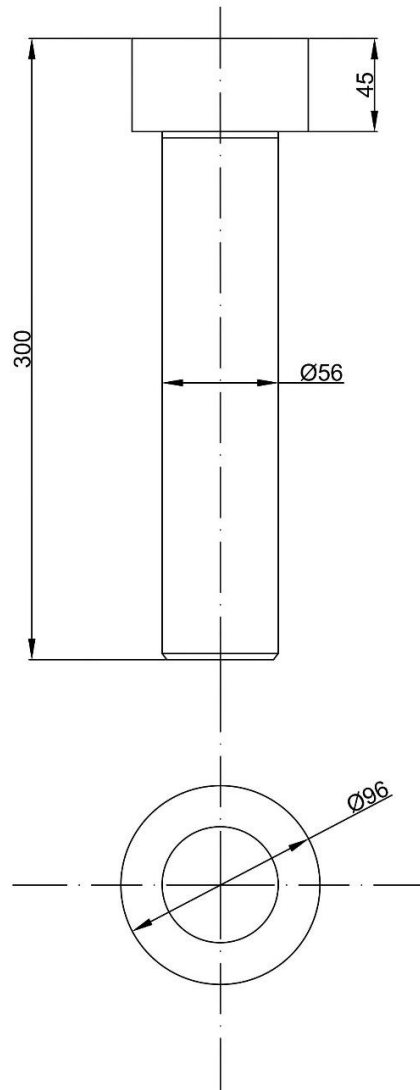


Slika 6.3. Skica penetratora i otiska kod Vickersove metode

Rezultati ispitivanja tvrdoće po Vickersu mogu se primijeniti gotovo u svim slučajevima. Velika prednost tog načina ispitivanja sastoji se u tome što je rezultat mjerenja neovisan o opterećenju. Sva opterećenja koja primjenjujemo kod ispitivanja daju praktički isti rezultat.

## 7. PROCJENA PROKALJIVOSTI STROJNOG DIJELA UN.24-PP.86

U ovom djelu rada potrebno je odabrati čelik strojnog djela UN.24-PP.86 na temelju prokaljivosti. Za izradu strojnog djela u obzir dolaze 3 čelika, a to su C45E, 42CrMo4 i 50 CrV4. Dubina prokaljenog sloja spomenutog strojnog djela određena je primjenom rezultata Jominyevog pokusa. Strojni dio UN.24-PP.86, tj. vijak je duljine 300 mm i promjera 40 mm, a glava vijka je promjera 96 mm (slika 7.1.).



Slika 7.1. Strojni dio UN.24-PP.86



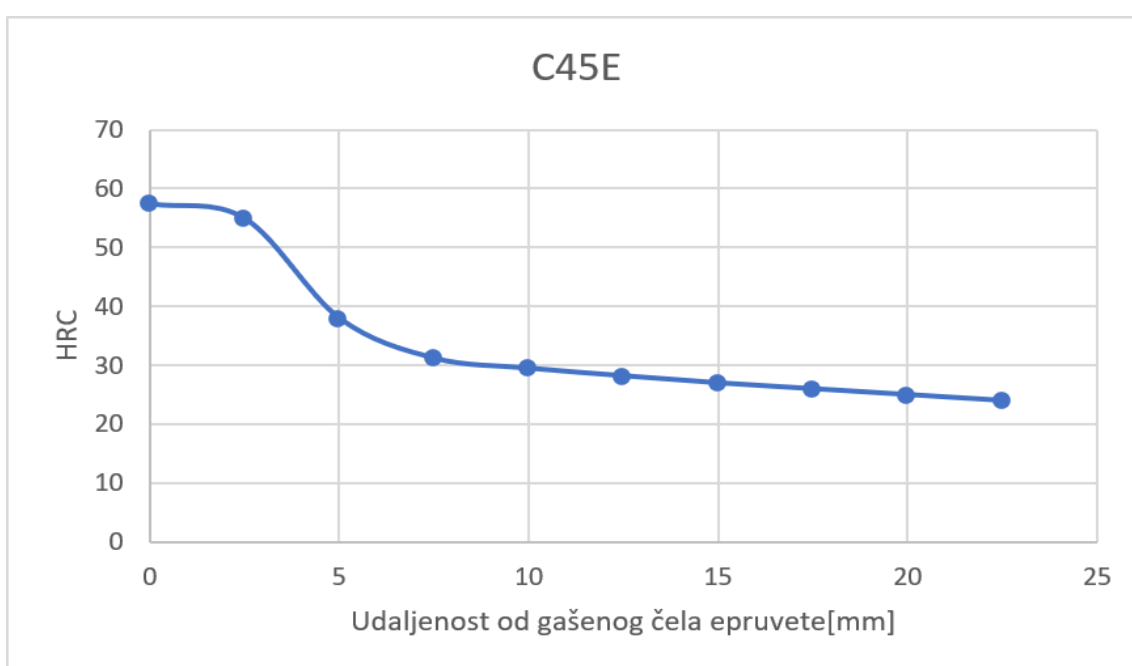
## 7.1. Procjena prokaljivanja čelika C45E

Za čelik C45E kemijski sastav se vidi u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Kemijski sastav čelika C45E

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

Jominyjeva krivulja čelika C45E prikazana je na slici 7.2.



Slika 7.2. Jominyjeva krivulja čelika C45E

U daljnjem procesu, za procjenu U-krivulja, koje će nam ukazati kako se tvrdoća raspoređuje unutar strojnog dijela UN.24-PP.86 prilikom gašenja u ulju s intenzitetom gašenja  $H=0,35$ , koriste se Jominyjeva krivulja i Crafts-Lamontovi dijagrami.

U prvom koraku koristimo Crafts- Lamontove dijagrame kako bi se odredila Jominyjeva udaljenost na različitim omjerima  $d/D$ , za promjer strojnog dijela od 56 mm i ulje  $H=0,35$ .

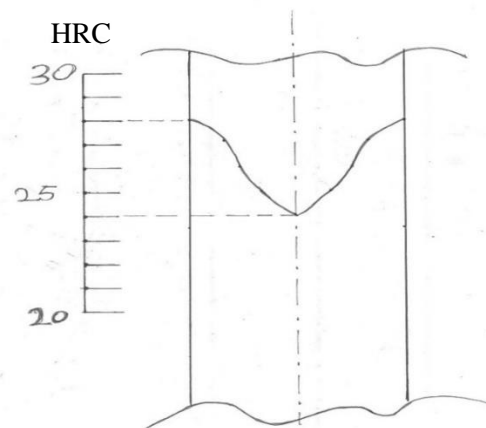
Na taj način su dobivene Jominyjeve udaljenosti za različite omjere  $d/D$  za intenzitet ohlađivanja  $H=0,35$  (tablica 7.2.). Iz tih Jominyjevih udaljenosti su za Jominyjevu krivulju dobivene tvrdoće (tablica 7.2.).

Koristeći se podacima iz tablice 7.2. konstruirati će se se U-krivulje kako bi bolje prikazali raspored tvrdoće unutar strojnog dijela nakon gašenja u ulju.

Tablica 7.2. Očitane vrijednosti prokaljivosti za  $H=0,35$

$d/D$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Jominyjeva udaljenost (mm)	21	20	20	19	19	18	17	16	15	14	13
Tvrdoća HRC	24	24	24	25	25	26	26	26	27	27	28

Nakon dobivenih vrijednosti, iscrtali smo U-krivulju kako bismo prikazali raspored tvrdoće unutar presjeka zadanog strojnog dijela. Navedena U-krivulja nalazi se na slici 7.3. Ova krivulja detaljno prikazuje promjenu tvrdoća materijala na različitim dubinama presjeka nakon procesa gašenja.



Slika 7.3. U-krivulja po presjeku strojnog dijela čelika C45E

Pomoću navedene U-krivulje iščitavamo tvrdoću jezgre u iznosu od 24 HRC, a na površini u iznosu od 28 HRC. Krična tvrdoća (tvrdoća za 50% martenzita) za C45E iznosi 45 HRC te se na temelju toga zaključuje kako je navedeni strojni dio nije uspješno prokaljen.

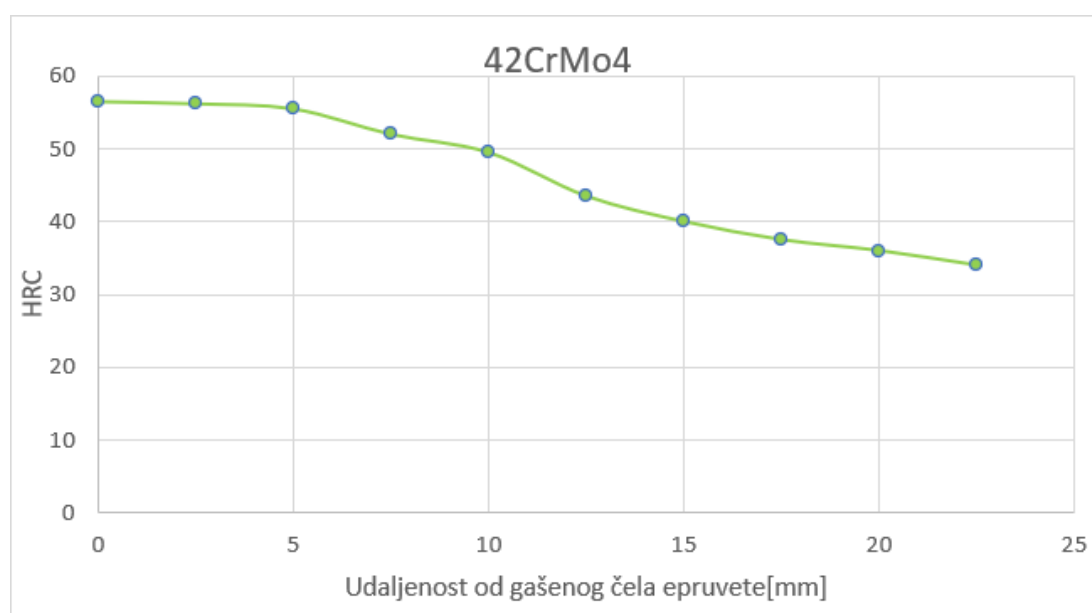
## 7.2. Procjena prokaljivanja čelika 42CrMo4

Istu proceduru ponavlja se i za druga dva čelika. Tablica 7.3. prikazuje kemijski sastav čelika 42CrMo4.

Tablica 7.3. Kemijski sastav čelika 42CrMo4

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ca	Mo	Ni	V
0,39	0,15	0,5	0,013	0,014	0,97	0,19	0,19	0,2	<0,01

Jominyjeva krivulja čelika 42CrMo4 nalazi se na slici 7.4.



Slika 7.4. Jominyjeva krivulja čelika 42CrMo4

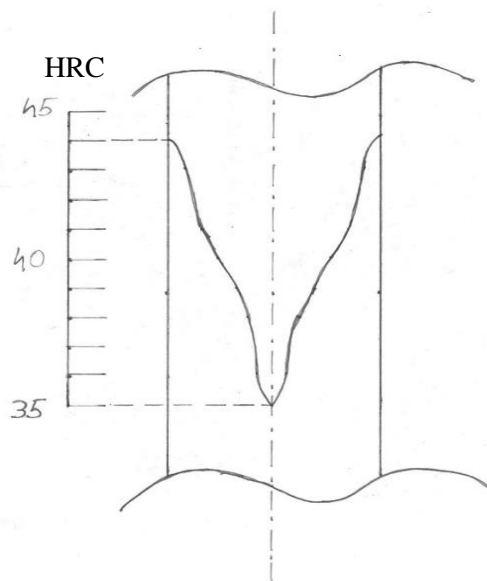
Korištenjem Crafts- Lamontovih dijagrama određujemo Jominyjevu udaljenost na različitim omjerima  $d/D$ , za promjer strojnog dijela od 56 mm i ulje  $H=0,35$ .

Na taj način su dobivene Jominyjeve udaljenosti za različite omjere  $d/D$  za intenzitet ohlađivanja  $H=0,35$  (tablica 7.4.). Iz tih Jominyjevih udaljenosti su za Jominyjevu krivulju dobivene tvrdoće (tablica 7.4.).

Tablica 7.4. Očitane vrijednosti prokaljivosti za  $H=0,35$

d/D	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Jominyjeva udaljenost	21	20	20	19	19	18	17	16	15	14	13
Tvrdoća (HRC)	35	35	35	36	36	38	39	40	41	43	44

Nakon što se isčitaju Jominyjeve udaljenosti koristeći Crafts-Lamontove dijagrame za različite omjere d/D, potrebno je vratiti se kako bi na Jominyjevu krivulju kako bi se očitale tvrdoće za svaku točku. Slijedeći korak je konstrukcija pripadajuće U-krivulje. U prilogu ispod prikazana je U-krivulju za  $H=0,35$  prema krivulji na slici 7.5.



Slika 7.5. U-krivulja po presjeku strojnog dijela za čelik 42CrMo4

Pomoću navedene U-krivulje iščitavamo tvrdoću jezgre u iznosu od 35 HRC, a na površini u iznosu od 44 HRC. Krična tvrdoća (tvrdoća za 50% martenzita) za 42CrMo4 iznosi 42 HRC te se na temelju toga zaključuje kako je navedeni strojni dio nije uspješno prokaljen.

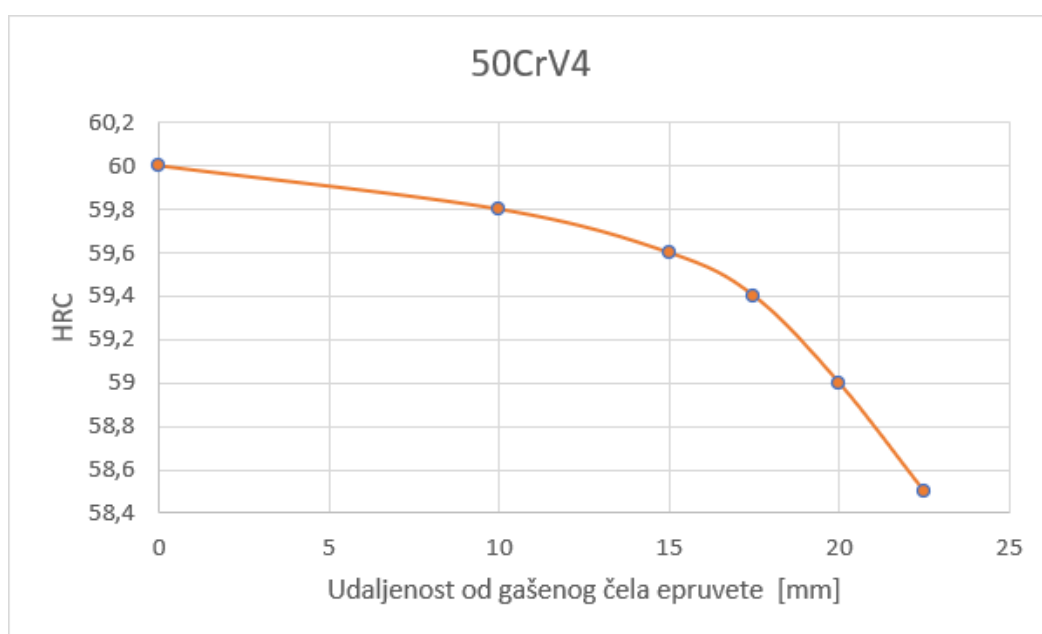
### 7.3. Procjena prokaljivanja čelika 50CrV4

Kemijski sastav čelika 50CrV4 nalazi se u tablici 7.5.

Tablica 7.5. Kemijski sastav čelika 50CrV4

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

Jominyjeva krivulja čelika 50CrV4 nalazi se na slici 7.6.



Slika 7.6. Jominyjeva krivulja čelika 50CrV4

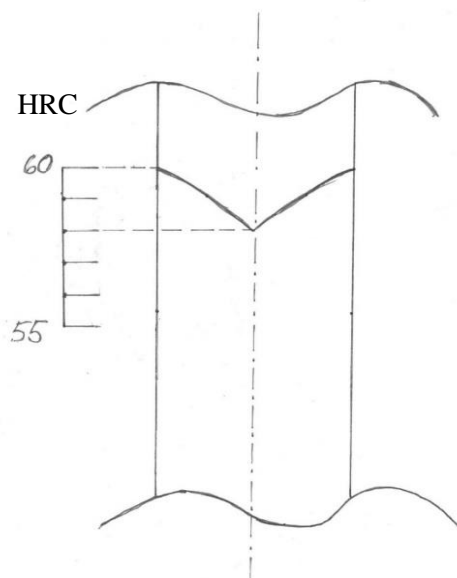
Korištenjem Crafts- Lamontovih dijagrama određujemo Jominyjevu udaljenost na različitim omjerima  $d/D$ , za promjer strojnog dijela od 56 mm i ulje  $H=0,35$ .

Na taj način su dobivene Jominyjeve udaljenosti za različite omjere  $d/D$  za intenzitet ohlađivanja  $H=0,35$  (tablica 7.6.). Iz tih Jominyjevih udaljenosti su za Jominyjevu krivulju dobivene tvrdoće (tablica 7.6.).

Tablica 7.6. Očitane vrijednosti prokaljivosti za  $H=0,35$

d/D	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Jominyjeva udaljenost	21	20	20	19	19	18	17	16	15	14	13
Tvrdoća (HRC)	58	58	58	59	59	59	59	59	60	60	60

Nakon što se isčitaju Jominyjeve udaljenosti koristeći Crafts-Lamontove dijagrame za različite omjere  $d/D$ , potrebno je vratiti se kako bi na Jominyjevu krivulju kako bi se očitale tvrdoće za svaku točku. Slijedeći korak je konstrukcija pripadajuće U-krivulje. U prilogu ispod prikazana je U-krivulju za  $H=0,35$  prema krivulji na slici 7.7.



Slika 7.7. U-krivulja po presjeku strojnog dijela za čelik 50CrV4

Pomoću navedene U-krivulje iščitavamo tvrdoću jezgre u iznosu od 58 HRC, a na površini u iznosu od 60 HRC. Krična tvrdoća (tvrdoća za 50% martenzita) za 50CrV iznosi 50 HRC te se na temelju toga zaključuje kako je navedeni strojni dio uspješno prokaljen.

## 8. ZAKLJUČAK

U ovom radu su obrađene neke od najvažnijih vrsta toplinskih obrada metala, a posebna pozornost bila je na Jominyevoj metodi i prokaljivosti čelika. Cilj toplinske obrade je uz pomoć djelovanja temperature na materijal promijeniti njegovu mikrostrukturu i time poboljšati željena svojstva materijala.

Tokom pisanja ovoga rada detaljno je opisan utjecaj legirajućih elemenata na ravnotežni dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C. Zatim je opisan postupak kaljivosti kojim se može povećati tvrdoća određenog strojnog dijela. Treba napomenuti kako sa porastom udjela ugljika u strojnom djelu raste i tvrdoća.

Sposobnost čelika da se nakon zagrijavanja do specifične temperature i brzog hlađenja pretvori u martenzitnu fazu, kojom se postiže visoka čvrstoća i tvrdoća, nazivamo kaljivost. Čelici koji posjeduju veći udio ugljika, također imaju i veću kaljivost, dok čelici koji posjeduju manji udio ugljika imaju ujedno i manju kaljivost. Koriste se četiri metode za procjenu prokaljivosti čelika, a to su metoda totalne prokaljenosti, Justova metoda utvrđivanja stupnja zakaljenosti, Grossmanova metoda i Jominyeva metoda. Zbog svoje ekonomičnosti i jednostavnosti, te same učestale primjene, u ovom radu smo koristili Jominyeva metodu.

Za procjenu dubine prokaljivosti je korištena Jominyeva metoda iz koje možemo pratiti porast tvrdoće po poprečnom presjeku strojnog dijela UN.24.-PP.86.. Pomoću toga su izrađene U-krivulje za sva tri zadana čelika, C45E, 42CrMo4 i 50CrV4, pomoću kojeg vidimo kako je čvrstoća opadala uzevši u obzir tvrdoću po površini strojnog dijela. Analizom spomenutih U-krivulja zaključeno je kako je jedini mogući prokaljivi strojni dio onaj koji je sastoji od čelika 50CrV4.

## LITERATURA

- [1] Smoljan B.: Toplinska obrada čelika, sivog i nodularnog lijeva, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1999.
- [2] Pirš, J.: Tehnologija materijala, termička obrada IV, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1977.
- [3] Pirš, J.: Toplinska obrada metala, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1992.
- [4] Matković T.: Matković P.: Fizikalna metalurgija I, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2009.
- [5] Krumes D.: Toplinska obradba, Sveučilište u Osijeku, Slavonski Brod, 2000.
- [6] Požar H.: Tehnička enciklopedija, Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb, 2009
- [7] Stupinšek, M; Cajner, F: : “Osnove toplinske obrade metala“, Fakultet strojarstva brodogradnje, Zagreb, 2001
- [8] Otvrđnjavanje površine čelika, sa interneta:  
[https://hr.wikipedia.org/wiki/Otvrđnjavanje\\_površine\\_čelika](https://hr.wikipedia.org/wiki/Otvrđnjavanje_površine_čelika)
- [9] Gabrić, I.: „Materijali 2 – praktikum za laboratorijske vježbe“, s Interneta,  
[https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file\\_attach/Materijali%20%2C%20praktikum%20%20Igor%20Gabri%C4%87.pdf](https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file_attach/Materijali%20%2C%20praktikum%20%20Igor%20Gabri%C4%87.pdf), 3. rujan 2021.



## POPIS SLIKA

Slika 2.1.: Dio faznog Fe-Fe <sub>3</sub> C dijagrama.....	8
Slika 2.2.: Austenitna mikrostruktura.....	9
Slika 2.3.: Ledeburitna mikrostruktura.....	9
Slika 2.4.: Martezitna mikrostruktura.....	10
Slika 2.5.: Dijagram izotermičke tvorbe austenita.....	11
Slika 2.6.: Dijagram pretvorbe austenita u kontinuiranim uvjetima ugrijavanja.....	11
Slika 2.7.: Utjecaj temperature na brzinu perlitne pretvorbe.....	12
Slika 2.8.: Shematski prikaz pretvorbe perlita .....	13
Slika 2.9.: Martenzitna kristalna rešetka.....	13
Slika 2.10.: Martenzitna struktura.....	14
Slika 2.11.: Shematski prikaz područja bainitne pretvorbe.....	15
Slika 2.15.: Shema pretvorbe austenita u bainit.....	16
Slika 3.1.: Izotermički TTT- dijagram eutektoidnog čelika.....	17
Slika 3.2.: TTT- dijagram podektoidnog čelika za kontinuirano ohlađivanje.....	18
Slika 4.1.: Dijagram postupka kaljenja s niskotemperaturnim popuštanjem čelika.....	19
Slika 4.2.: Shematski prikaz indukcijskog kaljenja.....	21
Slika 4.3.:Dio dijagrama željezo-ugljik i optimalni interval temperatura zagrijavanja (austenitizacije) kod kaljenja ugljičnih čelika.....	22
Slika 4.4.: Raspodjela temperatura i naprezanja preko presjeka detalja prilikom zagrijavanja.....	24
Slika 4.5.: “Idealizirana“ krivulja gašenja u dijagramu TTT (kvalitativno) .....	25
Slika 4.6. : Burnsov dijagram.....	26
Slika 5.1.: Orijentacijske vrijednosti tvrdoće čelika u ovisnosti o koncentraciji ugljika u martenzitu i udjelu martenzita u mikrostrukturi čelika.....	28
Slika 5.2.: Primjeri raspodjele čvrstoće nakon gašenja čelika.....	29
Slika 5.3.: Shema položaja pokusnog uzorka pri Jomineyjevom pokusu.....	31
Slika 5.4. Jominyjeve krivulje dvaju čelika različite prokaljivosti.....	32
Slika 5.5.: Odnos između kritičnih promjera i udaljenosti od gašena čela Jominyjeva pokusa....	32
Slika 5.6.:Shema Crafts-Lamontovih dijagrama za određivanje U-krivulja.....	32
Slika 5.7.: Crafts – Lamontovi dijagrami.....	35
Slika 6.1.: Skica penetratora i otiska kod Brinellove metode.....	37
Slika 6.2.: Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po <i>HRC</i> i <i>HRB</i> metodi.....	37

Slika 6.3.: Skica penetratora i otiska kod Vickersove metode.....	38
Slika 7.1.: Strojni dio UN.24-PP.86.....	39
Slika 7.2.: Jominyjeva krivulja čelika C45E.....	40
Slika 7.3.: U-krivulja po presjeku strojnog dijela čelika C45E.....	41
Slika 7.4.: Jominyjeva krivulja za čelik 42CrMo4.....	42
Slika 7.5.: U-krivulja po presjeku strojnog dijela za čelik 42CrMo4.....	43
Slika 7.6.: Jominyjeva krivulja za čelik 50CrV4.....	44
Slika 7.7.: U-krivulja po presjeku strojnog dijela za čelik 50CrV4.....	45

## POPIS TABLICA

Tablica 5.1.: Ovisnost gibanja i intenzitet ohlađivanja u različitim sredstvima.....	33
Tablica 7.1.: Kemijski sastav čelika C45E.....	40
Tablica 7.2.: Očitane vrijednosti prokaljivosti za H=0,35.....	41
Tablica 7.3.: Kemijski sastav čelika CrMo4.....	42
Tablica 7.4.: Očitane vrijednosti prokaljivosti za H=0,35.....	43
Tablica 7.5.: Kemijski sastav čelika 50CrV4.....	44
Tablica 7.6.: Očitane vrijednosti prokaljivosti za H=0,35.....	45

## POPIS OZNAKA

<u>Oznaka</u>	<u>Mjerna jedinica</u>	<u>Naziv</u>
<i>A</i>	%	- produljenje
<i>A<sub>1</sub></i>	°C	- eutektoidna temperatura
<i>A<sub>3</sub></i>	°C	- temperatura stojišta A3
<i>A<sub>cm</sub></i>	°C	- granica područja A i (A + K)
<i>C</i>	Mm	- visina rešetke
<i>C</i>	J(kgK) <sup>-1</sup>	- specifični toplinski kapacitet
<i>D</i>	Mm	- promjer
<i>D<sub>i</sub></i>	Mm	- kritični promjer za gašenje
<i>D<sub>i</sub></i>	Mm	- idealni kritični promjer
<i>D<sub>k</sub></i>	Mm	- kritični promjer
<i>D<sub>v</sub></i>	Mm	- promjer prokaljivosti
<i>HB</i>	-	- tvrdoća u Brinelima
<i>HV</i>	-	- tvrdoća u Vickersima
<i>HRC</i>	-	- tvrdoća u Rockwell C
<i>HRB</i>	-	- tvrdoća u Rockwell B
<i>M<sub>f</sub></i>	°C	- temperatura kraja stvaranja martenzita
<i>M<sub>s</sub></i>	°C	- početak martenzitne pretvorbe
<i>R</i>	-	- stupanj zakaljenja
<i>R<sub>p0,2</sub></i>	N/mm <sup>2</sup>	- tehnička granica razvlačenja
<i>T</i>	K	- termodinamička temperatura
<i>t</i>	°C	- temperatura
<i>t<sub>A</sub></i>	S	- vrijeme austenitizacije
<i>T<sub>ohl</sub></i>	°C/s	- brzina ohlađivanja

$V_{kd}$	$^{\circ}\text{C/s}$	- donja kritična brzina gašenja
$V_{kg}$	$^{\circ}\text{C/s}$	- gornja kritična brzina gašenja
$V_{kg}$	$^{\circ}\text{C/s}$	- kritična brzina gašenja
$V_{ohl}$	$\text{Ks}^{-1}$	- brzina ohlađivanja
$Z$	%	- smanjenje
$A$	$\text{W}(\text{mm}^2\text{K})^{-1}$	- koeficijent prijelaza topline
$P$	$\text{Kgm}^{-3}$	- gustoća materijala
$\Lambda$	$\text{W}(\text{mK})^{-1}$	- koeficijent provođenja topline
$\Psi$	-	- općeniti zapis fizikalne veličine

## SAŽETAK

Zadatak ovog rada bio je procijeniti dubinu prokaljivanja strojnog dijela UN.24-PP.86. Rad ima teorijski i praktični dio.

U teorijskom dijelu obrađene su fazne pretvorbe u čeliku, TTT-dijagrami, mikrostruktura i mehanička svojstva čelika, postupak kaljenja čelika, svojstva prokaljivosti i zakaljivosti te su opisane metode za procjenu prokaljivosti i metode za ispitivanje tvrdoće čime je postavljen okvir potreban za provedbu i interpretaciju praktičnog dijela završnog rada.

U praktičnom dijelu rada je primjenom Jominyjeve metode provedena procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela UN.24-PP.86.. Uz pomoć Crafts-Lamontovih dijagrama i nacrtanih U-krivulja zaključeno da će sva 3 čelika, C45E, 42CrMo4 i 50CrV4 prokaliti uz intenzitet ohlađivanja  $H = 0,35$ .

Ključne riječi:

toplinska obrada, žarenje, popuštanje, kaljenje, poboljšavanje, normalizacija, otvrdnjavanje, fazne pretvorbe, čelik, mikrostrukture, ferit, perlit, cementit, austenit, martenzit, temperatura kaljenja, vrijeme zagrijavanja, popuštanje, ispitivanje tvrdoće, Vickers, Brinell, Rockwell, granica razvlačenja, Jominy, Craft-lamont

## ABSTRACT

The task of this work was to evaluate the depth of hardening of the machine part UN.24-PP.86. The work has a theoretical and practical part.

In the theoretical part, we covered phase transformations in steel, TTT-diagrams, microstructure and mechanical properties of steel, the process of steel hardening, properties of hardenability are discussed, and methods for evaluating hardenability and methods for testing hardness are described, which sets the framework necessary for the implementation and interpretation of practical part of the final work.

In the practical part of the work, an assessment of the depth of hardening of the machine part UN.24-PP.86 was carried out using Jominy's method. With the help of Crafts-Lamont diagrams and drawn U-curves, it was concluded that all 3 steels, C45E, 42CrMo4 and 50CrV4, will harden with the intensity of cooling  $H = 0.35$ .

### Key words:

heat treatment, annealing, softening, hardening, tempering, normalization, hardening, phase transformations, steel, microstructures, ferrite, pearlite, cementite, austenite, martensite, tempering temperature, heating time, softening, hardness test, Vickers, Brinell, Rockwell, limit stretching, Jominy, Craft-lamont