

# Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela NT.23-DP.77

---

**Soldatić, Matteo**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:867901>

*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**  
Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG  
DIJELA NT.23-DP.77**

Rijeka, srpanj 2023.

Matteo Soldatić

0069078867

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG  
DIJELA NT.23-DP.77**

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

Rijeka, srpanj 2023.

Matteo Soldatić

0069078867

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

Rijeka, 11. ožujka 2023.

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

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Matteo Soldatić (0069078867)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva  
Modul: Inženjerstvo materijala

Zadatak: **Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela NT.23-DP.77 / Estimation of hardening depth of workpiece NT.23-DP.77**

Opis zadatka:

Potrebno je procijeniti prokaljivost strojnog dijela NT.23-DP.77 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 NT.23-DP.77. Tvrdocu i dubinu prokaljenog sloja strojnog dijela potrebno je procijeniti na temelju eksperimentom dobivenih rezultata Jominyjevog pokusa odgovarajućeg čelika. Potrebno je opisati postrojenje za izvođenje Jominyjevog pokusa. 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.

*Soldatić Matteo*

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

*Dario Iljkić*  
Izv. prof. dr. sc. Dario Iljkić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

*Igor Bonefačić*  
Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## **IZJAVA O SAMOSTALNOM RADU**

Sukladno s člankom 7. „Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku sveučilišnih diplomskih studija“ Tehničkog fakulteta, Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam ja, Matteo Soldatić, samostalno izradio diplomski rad prema dobivenom zadatku pod nazivom teme „Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela NT.23-DP.77 / Estimation of hardening depth of workpiece NT.23-DP.77“ iz kolegija Termalni procesi materijala pod vodstvom mentora izv. prof. dr.sc. Daria Iljkića. Pri izradi navedenog diplomskog rada koristio sam stečena znanja, eksperimentalne dobivene podatke te stručnu literaturu koja je navedena pri kraju rada.

## ZAHVALNICA

Zahvaljujem se svom mentoru profesoru Dariju Iljkiću na svim savjetima, informacijama te utrošenom vremenu tokom rada na ovome diplomskom radu.

Zahvaljujem se asistentu Lovri Liveriću na savjetima i pomoći te utrošenom trudu tokom rada na eksperimentalnom dijelu ovoga diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na svojoj podršci i vremenu koje su mi pružili tijekom studiranja.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. ČELIK.....	2
2.1. PODIJELA ČELIKA .....	3
2.2. UTJECAJ PRATEĆIH ELEMENATA.....	4
2.3. UTJECAJ NEMETALNIH UKLJUČAKA.....	5
2.4. UTJECAJ LEGIRAJUĆIH ELEMENATA .....	6
2.5. TOPLINSKA OBRADA ČELIKA .....	11
3. MIKROSTRUKTURE ČELIKA .....	15
4. FAZNE PRETVORBE PRI TOPLINSKOJ OBRADI ČELIK .....	20
4.1. TVORBA AUSTENITA .....	20
4.2. PRETVORBA AUSTENITA U PERLIT.....	22
4.3. PRETVORBA AUSTENITA U MARTENZIT .....	24
4.4. PRETVORBA AUSTENITA U BAINIT.....	26
5. KALJENJE ČELIKA.....	29
5.1. IZBOR PARAMETARA TOPLINSKE OBRADE KALJENJA .....	29
5.2. ZAKALJIVOST .....	33
5.3. PROKALJIVOST .....	34
6. ISPITIVANJE PROKALJIVOSTI .....	36
6.1. JOMINYEVA METODOM ISPITIVANJA PROKALJIVOSTI.....	36
6.2. ODREĐIVANJE TOKA TVRDOĆE POMOĆU CRAFTS-LAMONTOVIH DIJAGRAMA.....	40
7. PROKALJIVOSTI STROJNOG DIJELA NT.23-DP.77 .....	43
7.1. STROJNI DIO NT.23-DP.77 .....	43
7.2. SVOJSTVA ČELIKA 16MnCr5 .....	44
7.3. PROVEDBA JOMINYEVOG POKUSA .....	45
7.4. REZULTATI JOMINYEVOG POKUSA .....	52
7.5. PROCJENA PROKALJIVOSTI STROJNOG DIJELA NT.23-DP.77.....	54
ZAKLJUČAK .....	56
LITERATURA.....	58
POPIS SLIKA .....	60
POPIS TABLICA.....	62
SAŽETAK.....	63
SUMMERY.....	64

# 1. UVOD

Osnovni zadatak diplomskog rada je procijeniti dubinu prokaljivanja strojnoga dijela NT.23-DP.77 nakon kaljenja. Dubinu prokaljenog sloja strojnoga dijela potrebno je procijeniti na temelju eksperimentom dobivenih rezultata Jominyjevog pokusa na temelju norme HRN EN ISO 642. Nakon završetka Jominyjevog pokusa provodi se ispitivanje tvrdoće Rockwellovom metodom nakon koje se na osnovi rezultata dobivenih Jominyjevim pokusom i Rockwellovom metodom konstruira Jominyjeva krivulja. Na temelju konstruirane Jominyjeve krivulje uz korištenje Crafts-Lamontovih dijagrama konstruiraju se U-krivulje koje predstavljaju tok tvrdoće za slučaje gašenja u ulju i vodi strojnog dijela.

U prvome dijelu ovoga diplomskog rada obrađen je teorijski dio o čeliku s naglaskom na osnovna svojstva, njegovu karakterizaciju po raznim kriterijima te utjecaju raznih pratećih elemenata, legirajućih elemenata i nemetalnih uključaka na svojstva čelika.

U središnjem dijelu obrađen je teorijski dio o toplinskoj obradi čelika. U ovom dijelu opisan je postupak toplinske obrade čelika sa naglaskom na fazne pretvorbe čelika uslijed toplinske obrade. Također detaljnije je opisan postupak toplinske obrade kaljenja, svojstva prokaljivosti i zakaljivosti čelika te opis Jominyjeve metode procjene prokaljivosti čelika.

U posljednjem dijelu diplomskog rada opisuju se strojni dio (svornjak) i karakteristike materijala od kojega je izrađen strojni dio (16MnCr5) te se detaljno prikazuje izvođenje Jominyjevog pokusa i ispitivanja tvrdoće uz svu korištenu opremu i naprave. Na kraju diplomskog rada korištenjem eksperimentom dobivenih rezultata, konstruiraju se U-krivulje kojima se procjenjuje dubina prokaljivanja strojnog dijela NT.23-DP.77 za prethodno navedene slučaje.



## 2. ČELIK

Čelik je metastabilna kristalizirana legura željeza s ugljikom u masenom udjelu manjim od 2% uz prisutne pratećih korisnih elemente (mangan, silicij, aluminijski i bakar) i pratećih štetnih elemenata (sumpor, fosfor, kisik, dušik i vodik) uz dodavanje jednoga ili više legirajućih elemenata. Čelici se nakon lijevanja taljevine prilagođenog sastava u kalupe oblikuju raznim postupcima obrade deformiranjem oblikuju u željeni oblik poluproizvoda (limova, traka, šipki, cijevi i profila). Čelici su u današnje vrijeme najvažniji tehnički materijali zbog dobre kombinacije mehaničkih svojstava kao što su: visoka čvrstoća, tvrdoća, žilavost, deformabilnost, magnetičnost, toplinska i električna vodljivost, dobra temperaturna otpornost i mnoga druga svojstva. Još jedno važno svojstvo čelika je dobra obradivost što daje mogućnost obrade čelika u gotove proizvode različitim postupcima kao što su: obrada deformiranjem u toplom ili hladnom stanju (valjanje, kovanje, prešanje, utiskivanje i slično), obrada odvajanjem čestica (tokarenje, glodanje, rezanje i slično), obrada spajanjem (zavarivanje, lemljenje), toplinska obrada (kaljenje, žarenje, prevlačenje i slično) i legiranje. [1, 2]

Opća podijela čelika radi se prema namjeni na sljedeće tri velike skupine:

- konstrukcijske čelike,
- specijalne ili posebne čelike i
- alatne čelike.

Konstrukcijski čelici kako im naziv govori koriste se za konstrukcijske dijelove strojeva i uređaja (osovine, vratila, zupčanici, čelični profili, opruge, vijci, matice, žice, limovi, itd.) koji obavljaju neku funkciju (prenošenje gibanja, preuzimanje sila i momenata, transportiranje i skladištenje tekućina i plinova, spajanje elemenata). [1, 2]

Specijalni čelici su konstrukcijski čelici legirani elementima koji daju posebna svojstva koja zadovoljavaju tražene primjene (otpornost na koroziju, otpornost na trošenje, temperaturna postojanost). [1, 2]

Alatni čelici kako im naziv govori koriste se za izradu različitih alata za obradu rezanjem i oblikovanjem metalnih i nemetalnih materijala te alata za mjerenje i kontrolu (alati za obradu odvajanjem čestica, za hladno ili toplo oblikovanje metala, za rezanje te za oblikovanje nemetala i mjerni alati). [1, 2]

## 2.1. PODIJELA ČELIKA

Podjela čelika po grupama može se izvesti na više načina ovisno s kojeg se stajališta promatraju prema sljedećim obilježjima:

- kemijskom sastavu,
- mikrostrukturi,
- načinu proizvodnje,
- obliku i stanju,
- području primjene i
- svojstvima.

Čelici se prema kemijskom sastavu dijele na više načina, čelici mogu biti garantiranog sastava ili ne garantiranog sastava, a po kvaliteti masovni, kvalitetni i plemeniti. Prema udjelu legirajućih elemenata mogu biti nelegirani, niskolegirani, visokolegirani te jednostruko ili višestruko legirani i prema vrsti glavnih legirajućih elemenata na ugljični, kromov, vanadijev, molibdenski, volframov, manganski, silicijev čelik i slično. [1, 2]

Prema tipu mikrostrukture čelici se mogu podijeliti prema svakoj od svojih struktura, a najpoznatije strukture u praksi su feritne čelike, austenitne čelike, martenzitne čelike, perlitne čelike i ledeburitne čelike. [1, 2]

Prema načinu proizvodnje čelici se mogu podijeliti na Bessemerov čelik, Thomasov čelik, Siemens-Martinov čelik, Elektro čelik, čelik iz kisikovih konvertera (upuhivanje zraka ili kisika), čelik koji je proizveden sekundarnom metalurškom obradom (vakumsko pročišćivanje i otplinjavanjem pod argonom) i pretaljivanje, prema načinu dezoksidacije i lijevanja čelici mogu biti nesmireni, polusmireni, smireni ili posebno smireni. [1, 2]

Osnovni oblici čeličnih poluproizvoda su limovi, šipke, cijevi, trake i profili, a mogu biti u sljedećim osnovnim stanjima: toplovaljani ili hladnovaljani, lijevani, hladnovučeni, kovani, brušeni i polirani, ljušteni te toplinski obrađeni. [2]

Prema području primjene čelici se dijele na sljedeće tri velike skupine: konstrukcijske čelike za opću primjenu (opći konstrukcijski čelici, čelici povišene čvrstoće, sitnozrnati čelici, čelici za cementiranje, poboljšanje, opruge, žice, tanke limove, čelici za vijke, matice i zakovice te čelici poboljšane rezljivosti) ili posebnih svojstva i primjene (nehrđajući čelici, čelici otporni

na trošenje, čelici za rad pri niskim temperaturama, čelici za rad pri visokim temperaturama te visokočvrsti čelici) te alatni čelici (čelici za hladni rad, čelici za topli rad te brzorezni čelici). [1, 2]

## **2.2. UTJECAJ PRATEĆIH ELEMENATA**

Prateći elementi imaju u određenoj mjeri utjecaj na njegova svojstva, a time i na kvalitetu čelika. Prateći elementi mogu biti zahtijevani legirajući elementi i neželjeni pratioci u obliku nečistoća i nemetalnih uključaka. Uz samo djelovanje na svojstva čelika svojom prisutnošću, njihova jednolika raspodjela ili lokalizirana koncentracija također ima utjecaj na svojstva čelika. Prateći elementi su prisutni u svakom čeliku pa je glavni zadatak svesti njihove udjele u čeliku na što je moguće manju vrijednost. [1, 2, 3]

### **SUMPOR (S)**

Sumpor je neželjeni pratioc koji dolazi u čelik iz rudače i goriva i sa željezom tvori željezni sulfid koji se u mikrostrukturi čelika stvara na granicama kristalnih zrna. Željezni sulfidi osjetno smanjuju žilavost te povećava krhkost čelika pri toploj obradi čelika jer mu je talište na 985 °C što može dovesti do tzv. crvenog loma prilikom plastične obrade na višim temperaturama. Udio sumpora u čeliku do 0,3% može imati pozitivan utjecaj ako je potrebna povećana obradljivost odvajanjem čestica. Najveći dopušteni udio sumpora u čeliku ne smije prijeći 0,05%.

### **VODIK (H)**

Vodik je neželjeni pratioc koji dolazi u čelik iz procesne atmosfere. Vodik se izlučuje u mikrostrukturnim greškama koje stvaraju naprezanja koja dovode do nastanka mikropukotina i smanjenja žilavosti čelika tzv. vodikova krhkost.

### **DUŠIK (N)**

Dušik kao i kisik je neželjeni pratioc koji dolazi u čelik iz procesne atmosfere. Dušik se javlja u čeliku u obliku nitrida koji smanjuju žilavost i deformabilnost ali povisuje granicu razvlačenja i čvrstoću što se naziva deformacijsko starenje koje se najviše pojavljuje kod hladno deformiranih čelika.

## **KISIK (O)**

Kisik je neželjeni pratioc koji dolazi u čelik pri oksidaciji na kojoj je temeljen proces dobivanja čelika. Kisik slično kao vodik i dušik povisuje krhkost čelika kroz smanjenje žilavosti i dinamičke izdržljivosti, a kod čelika gdje je udio kisika izuzetno visok može dovesti do crvenog loma.

## **FOSFOR (P)**

Fosfor je neželjeni pratioc koji kao i sumpor dolazi u čelik iz rudače i sa željezom čini supstitucijski kristal mješanac. Fosfor utječe na rastvor ugljika pa stoga dovodi do neravnomjerne raspodjele ugljika u čeliku, također smanjuje žilavost čelika i uzrokuje pojavu krhkosti u hladnom stanju. Fosfor kao i sumpor u nekim čelicima poboljšava obradljivost odvajanjem čestica. Najveći dopušteni udio fosfora u čeliku ne smije prijeći 0,06%.

## **MANGAN (Mn) I SILICIJ (Si)**

Mangan i silicij su pozitivni pratioci koji dolazi iz rudače ili ih se dodaje kao dezoksidatore u čelik, a glavni utjecaj imaju na smanjenje štetnog djelovanja sumpora vežući se na njega stvaranjem sulfida koji se onda odstranjuju prilikom postupka proizvodnje čelika dok je čelik u rastaljenom stanju.

## **ALUMINIJ (Al)**

Aluminij dolazi u čelik iz rudače ili se dodaje radi dezoksidacije čelika. Aluminij na sebe privlači dušik s kojim stvara nitride pa čelik postaje otporan na starenje ali u većim masenim udjelima povećava krhkost i smanjuje prokaljivost čelika.

## **2.3. UTJECAJ NEMETALNIH UKLJUČAKA**

Nemetalni uključci određuju svojstva oblikovljivosti i otpornosti na lom svojom količinom, vrstom i raspodjelom unutar strukture čelika. Uključci mogu biti sulfidne, oksidne ili silikatne vrste. u manjoj mjeri kao čisti spojevi, a u većoj mjeri kao kristali mješanci. Prema obliku nemetalni uključci mogu biti poligonalni, okrugli ili izduženi. Nemetalni uključci su pretežito tvrdi i krhki čime utječu na svojstva tvrdoće i krhkosti čelika, dovode do smanjenja žilavosti te ovisno o obliku mogu dovest do znatne anizotropnosti svojstva čvrstoće i žilavosti.

Anizotropnost uključaka se otklanja dodavanjem čeliku elemenata cirkonija, cerija ili titanija koji stvaraju nedeformabilni sulfid. [2]

## 2.4. UTJECAJ LEGIRAJUĆIH ELEMENATA

Čelik legiranjem može mijenjat svoja mehanička svojstva u vrlo širokom rasponu u odnosu na druge materijale. Dodavanjem legirajućih elemenata čeliku mijenjamo sljedeća svojstva:

- povećanje vlačne čvrstoće bez značajnog smanjenja deformabilnosti,
- povećanje tvrdoće,
- održavanje čvrstoće pri višim temperaturama prerade i uporabe,
- poboljšanje kaljivosti,
- poboljšavanje postojanosti na razne vrste korozije,
- pospješuje otpornost na razne tipove trošenja i
- postizanje tražene veličine kristalnih zrna tijekom i nakon toplinske obrade.

Legirani čelik uz osnovne elemente željezo i ugljik često sadrži jedan ili više legirajućih elemenata. Najčešći legirajući elementi su nikal, volfram, krom, silicij, mangan, molibden i vanadij, a posebno se čelik još može legirati kobaltom, aluminijem, titanom, kobaltom i niobijem. Legirajući elementi se u čeliku nalaze otopljeni u alfa ili gama željezu, kao spojevi (karbidi ili intermetalni spojevi) ili kao nemetalni uključci (oksidi, nitridi, sulfidi, fosfidi). [1, 2, 3, 5]

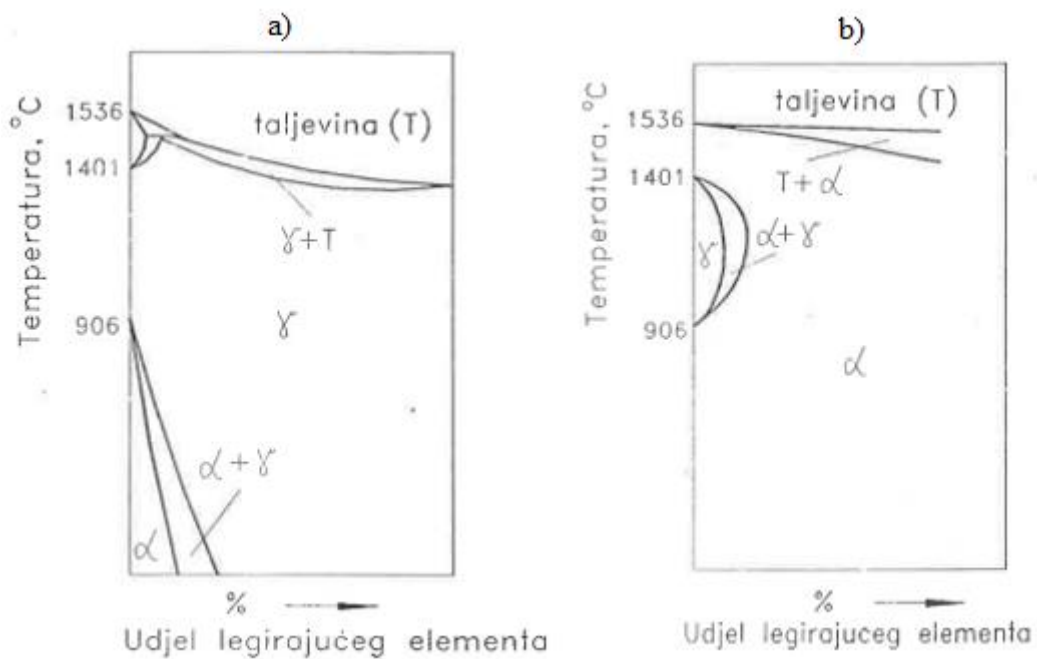
Prema afinitetu prema ugljiku legirajući elementi se dijele u dvije skupine:

- karbidotvorci (ugljik, krom, volfram, molibden, vanadij, titan, niobij i tantanal) i
- nekarbidotvorci (aluminij, silicij, nikal, mangan i kobalt) [3, 5]

Karbidi se u mikrostrukturi čelika pojavljuju u obliku lamela u perlitu, u obliku ljuske oko zrna, u obliku sitnih čestica. Osnovno svojstvo karbida je visoka tvrdoća i visoka krhkost što čelicima daje visoku otpornost na trošenje. [5]

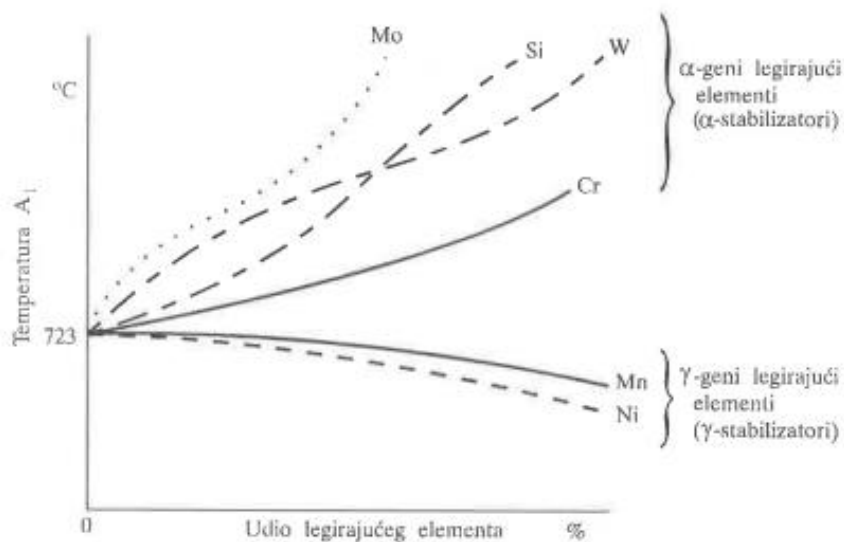
Legirajući elementi imaju različit utjecaj na dijagram stanja željezo-ugljik prema kojem se dijele u dvije skupine:

- Legirajući elementi koji proširuju  $\gamma$ -područje (slika 2.1. a) i time snizuju temperaturu austenitizacije, a to su najčešće sljedeći elementi: nikal, kobalt i mangan. Navedeni elementi još se nazivaju i gamageni elementi.
- Legirajući elementi koji smanjuju  $\alpha\gamma$ -područja (slika 2.1.b) i time povisuju temperaturu austenitizacije, a to su najčešće sljedeći elementi: krom, volfram, molibden, silicij, titan i vanadij. Navedeni elementi još se nazivaju i alfageni elementi. [5]



Slika 2.1. a) Utjecaj  $\gamma$ -genih elemenata na sustav željezo-metal; b) Utjecaj  $\alpha$ -genih elemenata na sustav željezo-metal [4]

Utjecaj legirajućih elemenata na temperaturu austenitizacije nije jednolika, neki elementi imaju veći utjecaj, a neki manji kao što je prikazano na slici 2.2.



Slika 2.2. Utjecaj udjela legirajućih elemenata na temperaturu austenitizacije  $A_1$  [5]

U nastavku opisati će se najčešći legirajući elementi i njihov utjecaj na mehanička, fizička i kemijska svojstva čelika.

### UGLJIK (C)

Ugljik je osnovni element čelika pa ga se u većini definicija ne smatra legirajućim elementom. Ugljik ima najveći utjecaj na svojstva čelika. Porastom udjela ugljika u čeliku raste čvrstoća i granica razvlačenja, a smanjuje se žilavost i duktilnost. Ugljik ima i važan utjecaj na osiguravanje zakaljivosti nelegiranih i legiranih čelika. [1, 2, 3]

### ALUMINIJ (Al)

Aluminij se najčešće koristi kao sredstvo za dezoksidaciju tijekom proizvodnje čelika, a kao legirajući element potpomaže u stvaranju sitnijeg kristalnog zrna i stvaranju nitrida kod postupka toplinske obrade nitriranja. Granični udio aluminija da bi se smatrao legirajućim elementom iznosi 0,10%. [2, 3]

### MANGAN (Mn)

Mangan se uz korištenje kao dezoksidator i desulfurizator tijekom proizvodnje čelika, kao legirajući element koristi za povećanje prokaljivosti čelika te poboljšanje čvrstoće i žilavosti. Kod čelika sa udjelom mangana većim od 12% čelici poprimaju austenitnu strukturu. Granični udio mangana da bi se smatrao legirajućim elementom iznosi 1,60%. [2, 3]

## **SILICIJ (Si)**

Silicij se kao i mangan koristi kao dezoksidator pri proizvodnji čelika, a kao legirajući element najviše utječe na povišenje granice elastičnosti odnosno dinamičke izdržljivosti čelika uz povišenje čvrstoće čelika i njegove otpornosti na trošenje. Silicij negativno utječe na difuziju ugljika u čelik te povišuje sklonost čelika razugljičenju površine prilikom toplinske obrade. Granični udio silicija da bi se smatrao legirajućim elementom iznosi 0,50%. [2, 3]

## **KOBALT (Co)**

Kobalt kao legirajući element poboljšava vlačnu čvrstoću čelika i poboljšava njegovu postojanost na popuštanje pri povišenim temperaturama. Granični udio kobalta da bi se smatrao legirajućim elementom iznosi 0,10%. [2, 3]

## **KROM (Cr)**

Krom uz stvaranje tvrdih karbida koji povećavaju otpornost čelika na trošenje kao legirajući element povišuju prokaljivost čelika i u udjelima većim od 12% daje čeliku potpunu korozijsku postojanost. Nedostatak kroma je smanjenje toplinske vodljivosti i rastezljivosti nakon toplinske obrade popuštanja što se očituje u povećanju krhkosti čelika, a izbjegava se legiranjem u kombinaciji sa molibdenom. Granični udio kroma da bi se smatrao legirajućim elementom iznosi 0,30%. [2, 3]

## **MOLIBDEN (Mo)**

Molibden kao legirajući element povećava prokaljivost i čvrstoću čelika te sprječava pojavu krhkosti kod toplinske obrade visokotemperaturnog popuštanja. Granični udio molibdena da bi se smatrao legirajućim elementom iznosi 0,08%. Legiranjem čelika molibdenom u kombinaciji sa kromom povećavamo otpornost čelika na opću koroziju. [2, 3]

## **NIKAL (Ni)**

Nikal kao legirajući element povećava žilavost čelika i pri niskim temperaturama uz nedostatak smanjenja toplinske vodljivosti i rastezljivosti čelika. Granični udio nikla da bi se smatrao legirajućim elementom iznosi 0,30%. U kombinaciji sa minimalno 12% kroma povećava postojanost čelika na koroziju. [2, 3]

## **NIOBIJ (Nb) I TANTAL (Ta)**



Niobij i tantanal se zbog približno jednakih djelovanja često koriste zajedno za legiranje čelika. Oba legirajuća elementa su karbidotvorci, a niobij je još i tvorac nitrida i karbonitrida. Oba elementa se koriste za stabilizaciju čelika koji su otporni na kiseline, a niobij još pospješuje stvaranje sitnog zrna. Granični udio niobija i tantanala da bi se smatrali legirajućim elementom iznosi 0,05%. [2, 3]

### **VANADIJ (V)**

Vanadij kao legirajući element pripada skupini nitridotvoraca i karbidotvoraca koji u udjelima većim od 0,4% stvara stabilni karbide kojima povećava otpornost na trošenje. Vanadij također usitnjava kristalno zrno primarnog austenita. Granični udio vanadija da bi se smatrao legirajućim elementom iznosi 0,10%. [2, 3]

### **VOLFRAM (W)**

Volfram kao legirajući element pripada skupini karbidotvoraca i stvara karbide koji su izrazito otporni na trošenje. Volfram također smanjuje rast kristalnih zrna, povišuje vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja te u manjoj mjeri povišuje žilavost čelika. Granični udio volframa da bi se smatrao legirajućim elementom iznosi 0,10%. [2, 3]

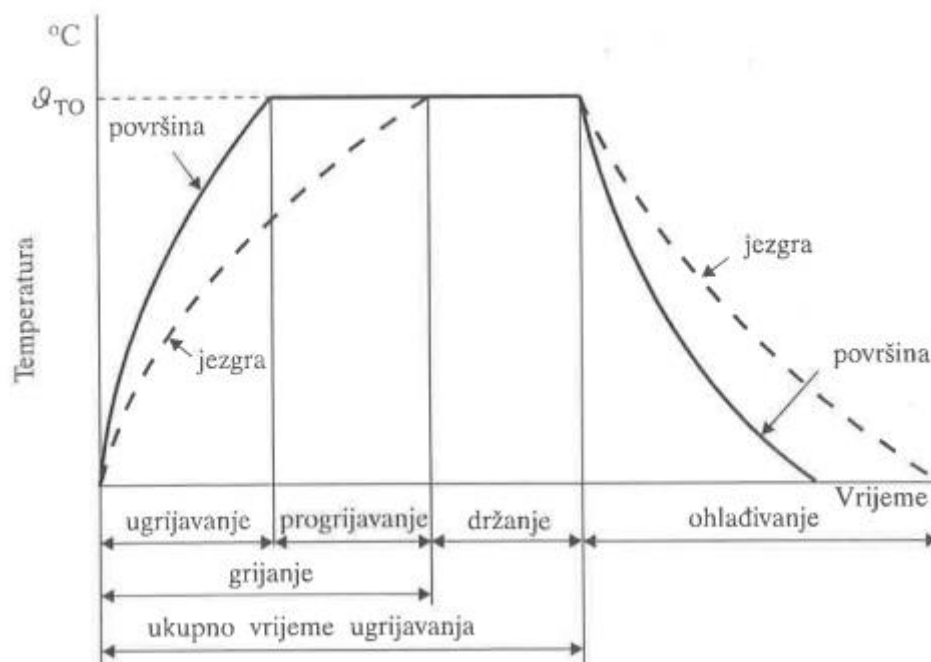
### **TITAN (Ti)**

Titan je najjači karbidotvorac čiji karbidi ostaju stabilni i na povišenim temperaturama čime poboljšavaju čelikovu otpornost na trošenje pri povišenim temperaturama. Granični udio titana da bi se smatrao legirajućim elementom iznosi 0,05%. [2, 3]

## 2.5. TOPLINSKA OBRADA ČELIKA

Toplinskom se obradom nazivaju tehnološki procesi ugrijavanja slitine do određenih karakterističnih temperatura koje ovise o vrsti slitine, držanje na tim temperaturama određeno vremensko razdoblje, te ohlađivanje različitim brzinama odnosno sredstvima kako bi se postigla tražena mikrostruktura, a time i tražena svojstva čelika. Toplinska obrada je jedan od načina promjene svojstva slitine koja se još mogu postići drugim postupcima ili metodama poput deformiranjem ili legiranjem. Promjene mehaničkih svojstava slitine ostvaruju se promjenom vrste, veličine i oblika mikrostrukturnih sastojaka slitine te promjenom gustoće i pokretljivosti mikronepravilnosti u strukturi slitine. [4, 5]

Svaki proces toplinske obrade sastoji se od promjene temperature strojnog dijela koji se obrađuje, a ta promjena temperature se prikazuje odnosno definira pomoću dijagrama toplinske obrade prikazanog na slici 2.3.



Slika 2.3. Dijagram općenite toplinske obrade [5]

Pri čemu je:

- $\vartheta_{TO}$  - temperatura na kojoj se vrši toplinska obrada (fazna pretvorba),

- ugrijavanje - vrijeme potrebno da površinski slojevi dosegnu temperaturu  $\vartheta_{TO}$ ,
- progrijavanje – vrijeme od kraja ugrijavanja površine na temperaturu  $\vartheta_{TO}$  do trenutka kada se postiže temperatura  $\vartheta_{TO}$  u jezgri presjeka,
- grijanje - zbroj vremena potrošenog na ugrijavanje i progrijavanje,
- držanje - vrijeme držanja na  $\vartheta_{TO}$  od kraja progrijavanja odnosno grijanja do trenutka početka ohlađenja dok se ne dobije tražena mikrostruktura i
- ohlađivanje - vrijeme snižavanja temperature do trenutka kada jezgre presjeka dosegne temperaturu okoliša. [5]

Iz definicije toplinske obrade i dijagrama toplinske obrade vidi se da su osnovni parametri svakog postupka toplinske obrade temperatura  $\vartheta_{TO}$  i vrijeme  $t$ . Maksimalna temperatura toplinske obrade ovisi o vrsti slitine i faznoj pretvorbi s kojom će tražena svojstva strojnog dijela biti zadovoljena, vremena grijanja, držanja i ohlađivanja ovise o željenom udjelu mogućih faza slitine s kojima se zadovoljavaju zahtjevi za strojni dio te o toplinskoj otpornosti slitine odnosno otpornosti slitine na naprezanja koja nastaju zbog promjena temperature. [4, 5]

Toplinske obrade se na temelju mikrostrukturnih promjena i promjena svojstva slitine na sljedeće skupine toplinskih obrada:

- žarenje bez prekrystalizacije (rekristalizacijsko žarenje, stabilizacijsko žarenje i žarenje za smanjenje zaostalih naprezanja),
- žarenje s prekrystalizacijom (normalizacijsko, visokotemperaturno i homogenizacijsko žarenje),
- gašenje (kaljenje i gašenje bez faznih pretvorbi),
- ugrijavanje nakon gašenja (popuštanje i precipitacijsko žarenje) i
- toplinsko-kemijska obrada. [4, 5]

## **ŽARENJE BEZ PREKRISTALIZACIJE**

Toplinska obrada žarenja bez prekrystalizacije vrši se zagrijavanjem slitine na temperaturu koja je manja od temperature prekrystalizacije, odnosno ispod temperature pri kojoj dolazi do bitnih transformacija ili fazne pretvorbe. Ovim toplinskim obradama slitina se približava stabilnom stanju. Osnovne vrste žarenja bez kristalizacije i njihova svrha su:

- rekristalizacijsko žarenje (promjena oblika kristalnog zrna slitine u svrhu povećanja duktilnosti nakon hladnog oblikovanja čelika),
- žarenje za smanjenje zaostalih naprežanja (razgradnja naprežanja zaostalih nakon obrade deformiranjem ili toplinske obrade) i
- stabilizacijsko žarenje (očuvanje dimenzijske stabilnosti strojnog dijela). [4, 5]

## **ŽARENJE S PREKRISTALIZACIJOM**

Toplinska obrada žarenja s prekrystalizacijom vrši se zagrijavanjem slitine do temperature iznad temperature prekrystalizacije, odnosno iznad temperature pri kojoj dolazi do bitnih transformacija ili fazne pretvorbe. Ovim toplinskim obradama slitina se također približava stabilnom stanju. Osnovne vrste žarenja s prekrystalizacijom i njihova svrha su:

- normalizacijsko žarenje (izjednačavanje oblika i veličine kristalnog zrna slitine i izjednačavanje raspodjele faza u svrhu postizanja sitnozrnate i jednolične mikrostrukture),
- visokotemperaturno žarenje (poboljšanje obradljivosti odvajanjem čestica kod niskougličnih čelika)
- homogenizacijsko žarenje (ujednačavanje raspodjele elemenata u slitini). [4, 5]

## **GAŠENJE**

Toplinska obrada gašenja vrši se brzim ohlađenjem slitine s temperature iznad temperature fazne pretvorbe kojim se onemogućuje ravnotežne pretvorbe pri gašenju. Ovim toplinskim obradama slitina se udaljava od stabilnog stanja. Osnovne vrste gašenja i njihova svrha su:

- kaljenje (dobivanje nove neravnotežne faze ili mikrostrukture kroz transformaciju visokotemperaturne faze ili mikrostrukture u svrhu postizanja maksimalne pozitivne tvrdoće) i
- gašenje bez faznih pretvorbi (ustaljšivanje visokotemperaturne faze ili mikrostrukture na nižim temperaturama). [4, 5]

## **UGRIJAVANJE NAKON GAŠENJA**

Toplinska obrada ugrijavanja nakon gašenja vrši se zagrijavanjem strojnih dijelova obrađenih toplinskom obradom gašenja u svrhu dobivanja stabilnijeg stanja strukture. Osnovne vrste ugrijavanja nakon gašenja i njihova svrha su:

- popuštanje (djelomična ili potpuna promjena mikrostrukture dobivene kaljenjem u svrhu poboljšanja žilavosti strojnog dijela) i
- precipitacijsko žarenje (odvajanje izlučevina, nakupina i precipitata iz pothlađenih prezasićenih visokotemperaturnih faza). [4]

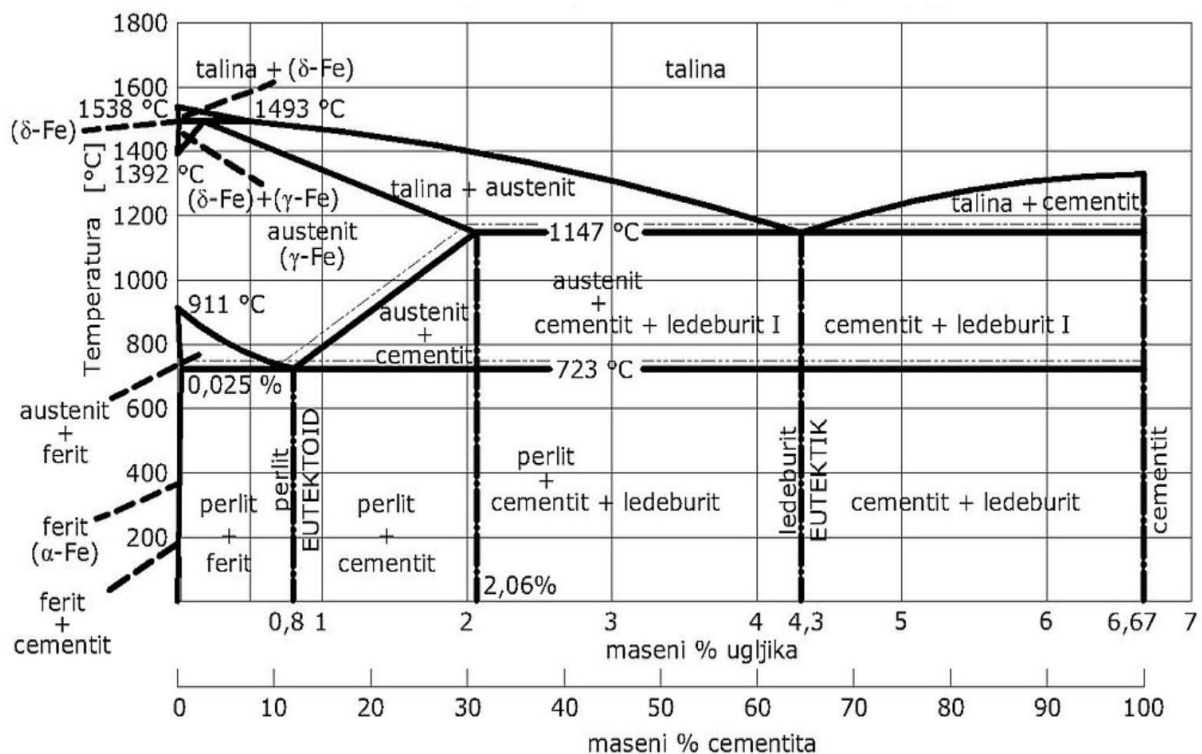
## **TOPLINSKO-KEMIJSKA OBRADA**

Toplinsko-kemijska obrada vrši se zagrijavanjem slitine u okolini bogatoj difundirajućih elemenata koji uzrokuju promjenu kemijskog sastava površinskog sloja strojnog dijela uz približavanje slitine stabilnom stanju. Toplinsko-kemijskom obradom mijenja se kemijski sastav i mikrostruktura površinskog dijela strojnoga dijela najčešće u svrhu poboljšanja otpornosti na trošenje. Osnovne vrste toplinsko-kemijskih postupaka obrade su:

- difuzijski postupci i
- toplinski postupci prevlačenja. [4, 5]

### 3. MIKROSTRUKTURE ČELIKA

Dijagram stanja željezo-ugljik (Fe-Fe<sub>3</sub>C) jedan je od najvažnijih dijagrama u tehničkoj struci pogotovo u praksi toplinske obrade. Legure željeza i ugljika prekrystaliziraju prema dijagramu stanja prikazanog na slici 3.1. iz kojega se mogu vidjeti tipične temperature prekrystalizacije postignute sporim grijanjem ili ohlađenjem čelika i karakteristična fazna područja. Mikrostruktura svakog čelika ovisi o postupku dobivanja slitine, postupcima toplinske obrade i kemijskom sastavu čelika. U mikrostrukтури čelika pojavljuju se sljedeće faze koje će biti naknadno opisane, a to su: ferit, perlit, austenit, cementit, ledeburit, bainit i martenzit. [3, 4]

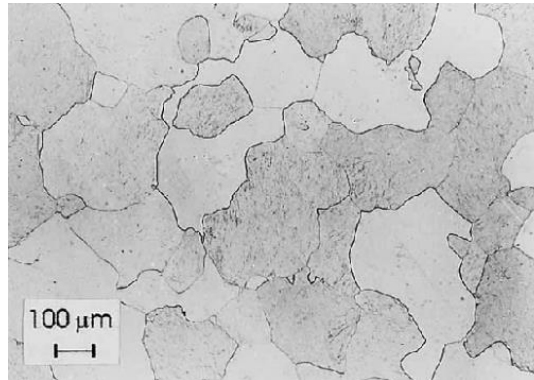


Slika 3.1. Stabilni dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C [6]

#### FERIT

Ferit je intersticijska kruta otopina ugljika u  $\alpha$ -željezu sa prostorno centriranom kubičnom kristalnom rešetkom. Maksimalna topivost ugljika u  $\alpha$ -željezu iznosi 0,025% na temperaturi od 723 °C dok na sobnoj temperaturi udio ugljika pada na samo 0,008%. Ferit je

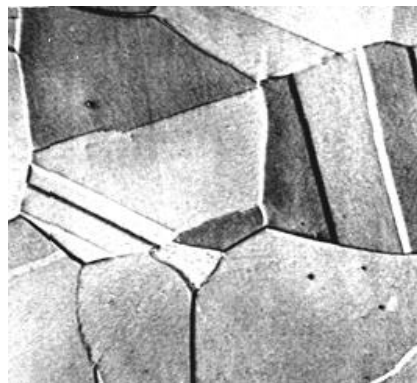
najmekša faza strukture čelika (tvrdoća iznosi oko 100 HV). Na povećanje udjela faze ferita u čeliku utječemo dodavanjem alfa genih legirnih elemenata. Mikrostrukturu ferita možemo vidjeti na slici 3.2. [3, 4]



*Slika 3.2. Mikrostruktura ferita [7]*

## **AUSTENIT**

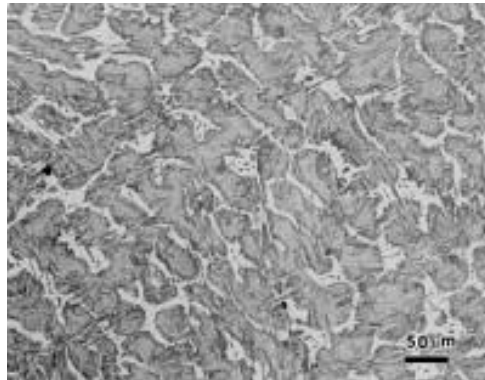
Austenit je intersticijska kruta otopina ugljika u  $\gamma$ -željezu sa plošno centriranom kubičnom kristalnom rešetkom. Maksimalna topivost ugljika u  $\gamma$ -željezu iznosi 2,06% na temperaturi od 1147 °C. Austenit je tvrda i žilava faza strukture čelika. Austenit je nestabilan na sobnoj temperaturi, stabilizira ga se i povećava mu se udio dodavanjem gama genih legirnih elemenata. Austenit ima i najmanji specifični volumen u odnosu na sve faze strukture čelika. Mikrostrukturu austenita možemo vidjeti na slici 3.3. [3, 4]



*Slika 3.3. Mikrostruktura austenita [8]*

## CEMENTIT

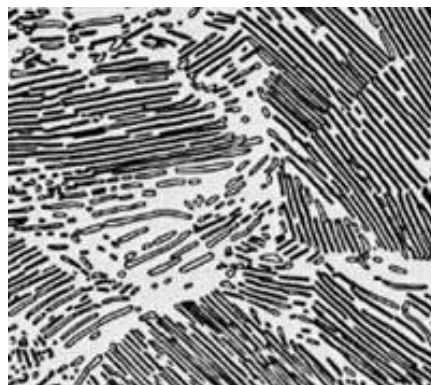
Cementit je metastabilni intermetalni spoj koji sadrži udio ugljika od 6,67%. Cementit ima kompliciranu ortorombsku rešetku koja nema kliznih ravnina što čini cementit krhkim i čini ga najtvrdom (iznosi oko 1000 HV) fazom strukture čelika. Mikrostrukturu cementita možemo vidjeti na slici 3.4. [3, 4, 5]



*Slika 3.4. Mikrostruktura cementita [8]*

## PERLIT

Perlit je eutektoidna smjesa lamelne strukture koja se sastoji od faze ferita u obliku matrice i faze cementita u obliku tankih pločica. Topivost ugljika u perlitu iznosi 0,8%. Čelik poprima ovu fazu zagrijavanjem na 723 °C i vrlo sporim ohlađenjem. Mikrostrukturu perlita možemo vidjeti na slici 3.5. [3, 4]



*Slika 3.5. Mikrostruktura perlita [8]*



## LEDEBURIT

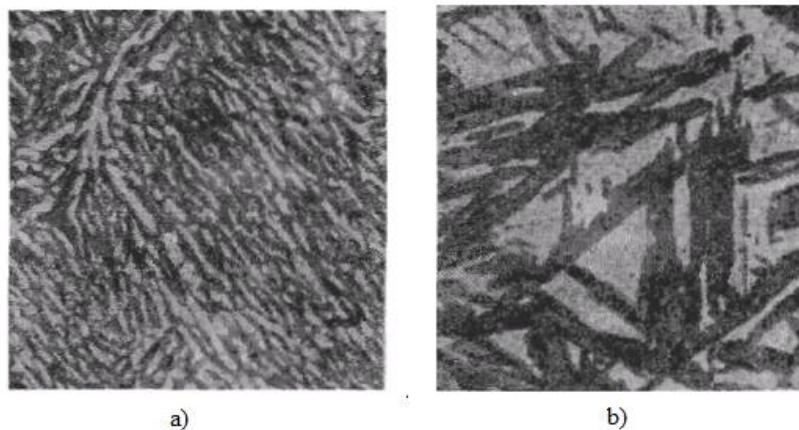
Ledeburit je eutektična smjesa faze austenita i faze cementita koja sadrži udio ugljika od 4,3%, a nastaje na temperaturi od 1147 °C. Ova faza se javlja kod čelika sa udjelom ugljika većim od 2,03%. Mikrostrukturu ledeburita možemo vidjeti na slici 3.6. [3]



*Slika 3.6. Mikrostruktura ledeburita [9]*

## BAINIT

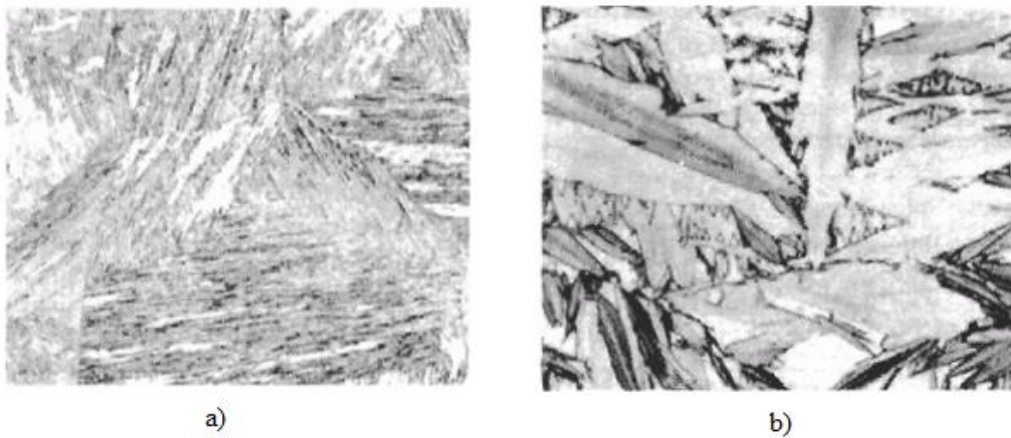
Bainit je smjesa igličaste strukture koja se sastoji od faze ferita u obliku iglica na čijim se granicama izdvaja faza cementita u obliku sitnih kuglica. Bainit nastaje ohlađenjem čelika između gornje i donje kritične brzine hlađenja. Bainitna faza ima relativno visoku tvrdoću (400-600 HV) uz relativno visoku žilavost. Mikrostrukturu bainita možemo vidjeti na slici 3.7. [3, 5]



*Slika 3.7. a) Mikrostruktura gornjeg bainita; b) Mikrostruktura donjeg bainita [10]*

## MARTENZIT

Martenzit je prezasićena kruta otopina ugljika u željezu igličaste strukture sa volumno centriranom tetragonalnom kristalnom rešetkom. Martenzit nastaje samo od faze austenita hlađenjem čelika brzinom ispod donje kritične brzine hlađenja na dovoljno niskoj temperaturi. Martenzit je nestabilna, tvrda (do 900 HV) i krhka faza strukture čelika. Martenzit ima i najveći specifični volumen u odnosu na sve faze strukture čelika. Mikrostrukturu martenzita možemo vidjeti na slici 3.8. [3, 5]



*Slika 3.8. a) Mikrostruktura paketastog martenzita; b) Mikrostruktura igličastog martenzita [10]*

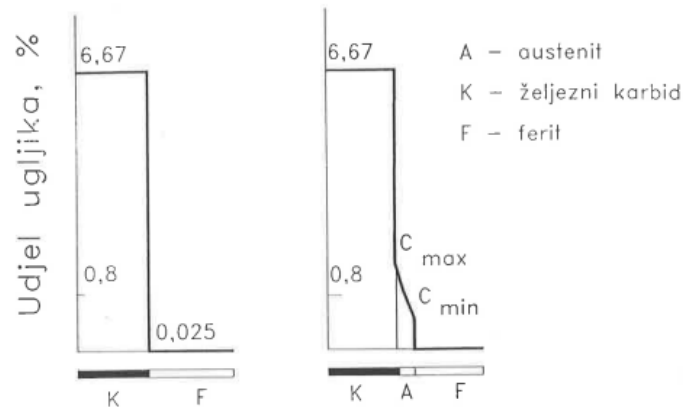
## **4. FAZNE PRETVORBE PRI TOPLINSKOJ OBRADI ČELIK**

Kako bi moglo doći do fazne pretvorbe u čeliku atomi moraju imati mogućnost difuzijskim ili bezdifuzijskim mehanizmima zauzeti novi položaj u kristalnoj rešetci. Iz navedenog zaključujemo da za uspješnu faznu pretvorbu potrebni sljedeći osnovni uvjeti: dovoljna termodinamička nestabilnost, odnosno dovoljno velika razlika trenutnog stanja strukture čelika i stabilnog stanja strukturne čelika te mogućnost difuzijskog ili bezdifuzijskog pomaka atoma po odgovarajućim kliznim pravcima za stvaranje novog rasporeda atoma, odnosno za stvaranje nove različite kristalne rešetke od početne kristalne rešetke. [4]

### **4.1. TVORBA AUSTENITA**

Kod tvorbe austenita difuzijskim mehanizmima dvije faze, ferit i cementit (feritno-karbidna smjesa), pretvaraju se u novu, treću fazu perlit. Ferit, cementit i austenit su međusobno različitih kemijskih sastava, odnosno imaju različite udjele ugljika što rezultira različitoj kristalnoj strukturi. Tvorba austenita kreće kada se zbog povišenja temperature ostvare termodinamički i kinetički uvjeti za tvorbu austenita, odnosno kada je vrijednost slobodne energija austenita niža od slobodne energije feritno-karbidne smjese i ima dovoljno vremena da difuzijskim mehanizmom nastaje austenit. Tvorba austenita kreće na granici feritne i cementitne faze zbog najpovoljnijih uvjeta nastajanja, a daljnji rast faze austenita ostvaruje se difuzijom ugljika iz feritno-karbidne faze u austenitnu fazu. [4]

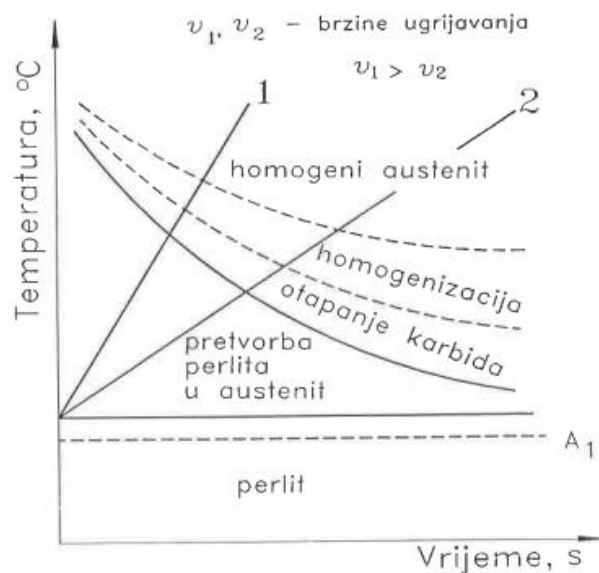
Na slici 4.1. shematski je prikazana raspodjela ugljika u procesu tvorbe austenita.



Slika 4.1. Raspodjela ugljika u mikrostrukturnim fazama pri tvorbi austenita [4]

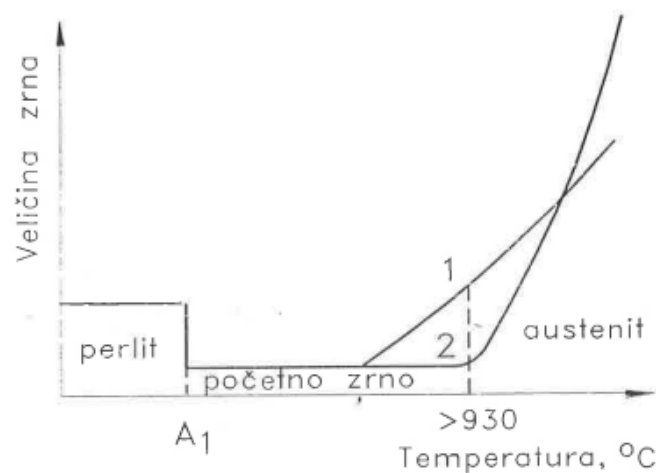
Brzina kojom će se tvoriti austenit ovisiti će o brzini difuzije ugljika iz feritno-karbidne faze u novu fazu. Povećanje brzine difuzije atoma i time ubrzanje pretvorbe smjese feritno-karbidne smjese u austenit postizuje se povišenjem temperature iznad ravnotežne temperature čime se povećava razlika slobodne energije stabilne i trenutne strukture. [4]

Na slici 4.2. prikazana je usporedba dva različita režima ugrijavanja pri kontinuiranim uvjetima u dijagramu procesa izotermičke tvorbe austenita.



Slika 4.2. Dijagram tvorbe austenita pri kontinuiranim uvjetima ugrijavanja [4]

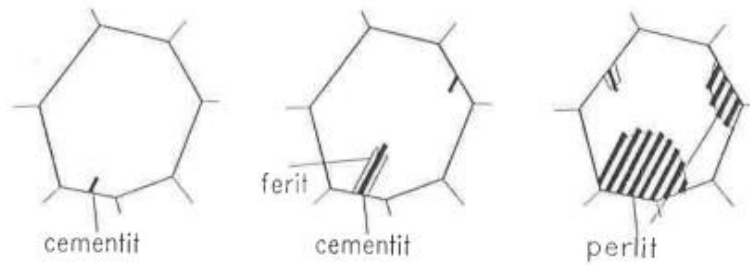
Držanjem čelika na dovoljno visokim temperaturama za nastajanje austenita ima nuspojavu neželjenog rasta kristalnog zrna austenita. Povećanje kristalnog zrna austenita je spontani proces koji je popraćen smanjenjem slobodne energije. Prema sklonosti rastu kristalnog zrna austenita i njegovoj veličini čelici se dijele na krupnozrnate čelike prikazane krivuljom 1 na slici 4.3. i sitnozrnate čelike prikazane krivuljom 2 na slici 4.3. Veličina kristalnog zrna je važna jer čelici sa finom sitnozrnatom mikrostrukturom imaju bolja mehanička svojstva od čelika sa grubom, krupnozrnatom mikrostrukturom. [4]



Slika 4.3. Promjena veličine kristalnog zrna austenita ovisno o temperaturi [4]

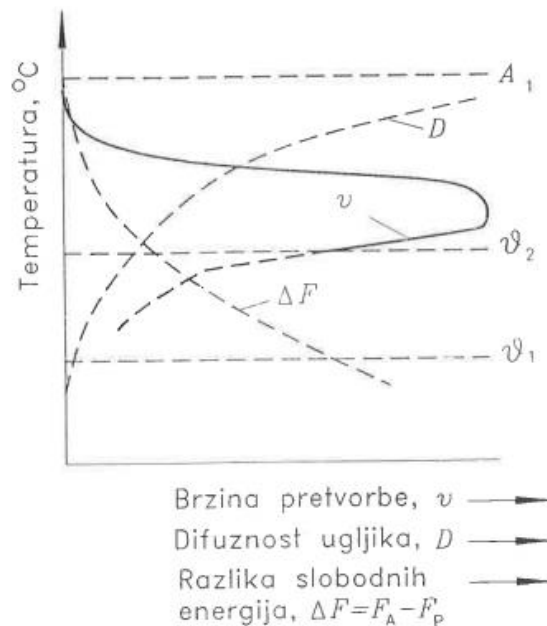
## 4.2. PRETVORBA AUSTENITA U PERLIT

Kod pretvorbe faze austenita u fazu perlita, austenit se raspada na smjesu ferita i cementita, a taj proces se naziva perlitna pretvorba. Pretvorba austenita nastaje kada postoji dovoljna energetska nestabilnost odnosno dovoljna razlika između slobodne energije početne faze austenita i slobodne energije faze perlita te dovoljna difuzija atoma ugljika i atoma željeza. Tvorba perlita počinje pojavom klice cementita u pravilu na granicama austenitnog zrna i raste prema unutrašnjosti austenitnog zrna, tokom rasta oko novonastalog cementita nastaje područje siromašno ugljikom koje se pretvara u ferit kako je prikazano na slici 4.4. [4]



Slika 4.4. Shematski prikaz perlitne pretvorbe [4]

Brzina kojom će se tvoriti perlit ovisiti će o stabilnosti austenita, brzini nicanja i rasta cementita i ferita, a sama mogućnost perlitne pretvorbe ovisi o temperaturi kako je shematski prikazano na slici 4.5.



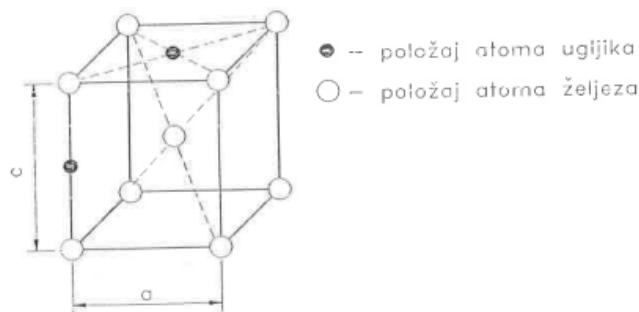
Slika 4.5. Utjecaj temperature na brzinu perlitne pretvorbe [4]

Na temperaturama većim od temperature  $A_1$ , slobodna energija faze austenita i faze perlita je jednaka stoga nije moguća perlitna pretvorba. Na temperaturama manjim od temperature  $\psi_1$  (približno oko 200 °C) nema neophodne difuzije ugljika stoga na njima nije moguća perlitna pretvorba dok na temperaturama između temperature  $\psi_2$  i temperature  $\psi_1$

moгуća je samo bainitna pretvorba. Kako se mođe vidjeti iz slike 16. brzina perlitne pretvorbe raste sa snižavanjem temperature ispod temperature  $A_1$ , pri određenoj temperaturi dosiđe svoj maksimum, nakon toga se brzina smanjuje. Temperatura na kojoj se vrši perlitna pretvorba utječe na veličinu kristalnog zrna nakon završetka pretvorbe, na višim temperaturama stvara se meki grubolamelarni perlit, a na nižim temperaturama stvara se tvrđi finolamelarni perlit. [4]

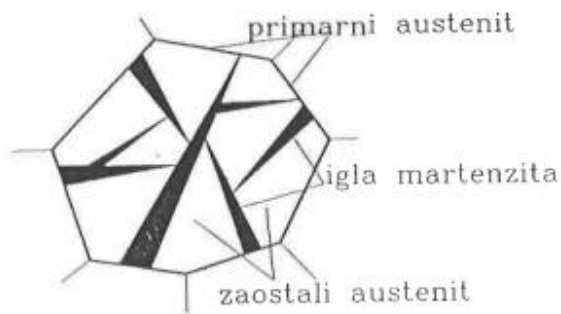
### 4.3. PRETVORBA AUSTENITA U MARTENZIT

Kod tvorbe martenzita bezdifuzijskim mehanizmom (gotovo trenutnom promjenom kristalne rešetke) se gama željezo s plošno centriranom kubičnom kristalnom rešetkom transformira u alfa željezo s prostorno centriranom tetragonalnom kristalnom rešetkom koja je prikazana na slici 4.6. Mehanizam bezdifuzijske transformacije naziva se martenzitnom pretvorbom, a sastoji se od procesa smicanja atoma uzduž karakterističnih pravaca unutar rešetke uz zadržavanje svojih susjednih atoma. [4, 5]



*Slika 4.6. Shema martenzitne kristalne rešetke [4]*

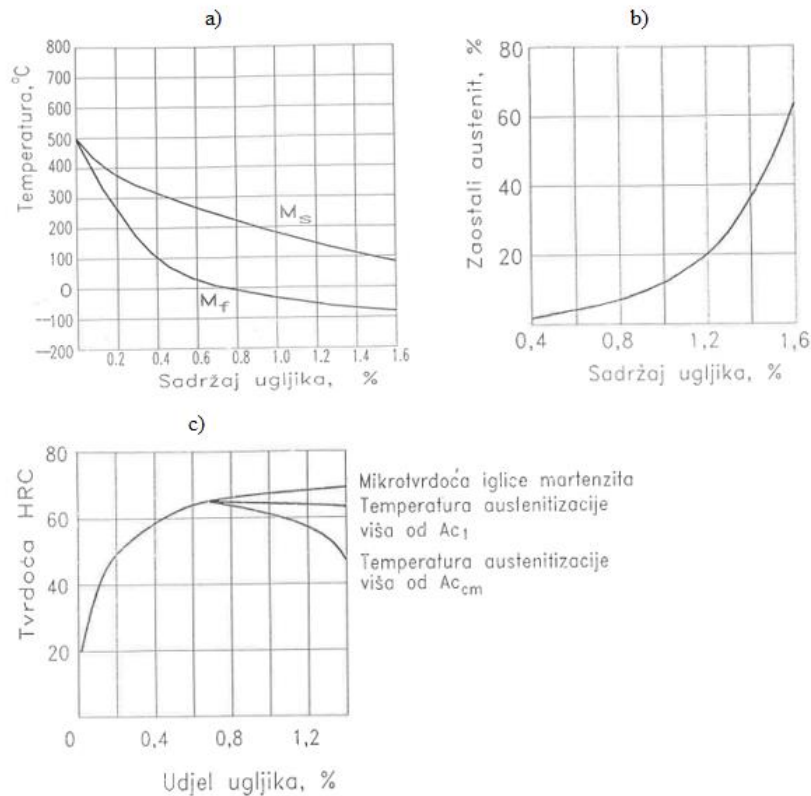
Mikrostruktura dobivena martenzitnom pretvorbom ima karakterističan igličasti izgled prikazan na slici 4.7. Kristalno zrna martenzita je u obliku pločica (igle) koji rast sa ruba matičnih kristalnih zrna austenita, a u području između martenzita nalazi se nepretvoreni odnosno zaostali austenit.



Slika 4.7. Shema martenzitne strukture [4]

Martenzitna pretvorba u čeliku je anizotermička, pretvorba austenita u martenzit počinje na određenoj temperaturi koja se zove početna temperatura  $M_s$  i završava na konačnoj temperaturi  $M_f$ . Početna i konačna temperatura pretvorbe austenita u martenzit ne ovise o brzini ohlađenja čelika nego ovise o udjelu ugljika i legirajućih elemenata otopljenih u primarnom austenitu. Mangan, krom, nikal, vanadij i molibden snizuju temperature martenzitne pretvorbe čime povećavaju udio zaostalog austenita dok kobalt i aluminij povisuju temperaturu martenzitne pretvorbe i smanjuju udio zaostalog austenita. Utjecaj udjela ugljika na temperature martenzitne pretvorbe, količinu zaostalog austenita u mikrostrukturi te tvrdoću i žilavost čelika nakon martenzitne pretvorbe prikazan je na slici 4.8. [4, 5]

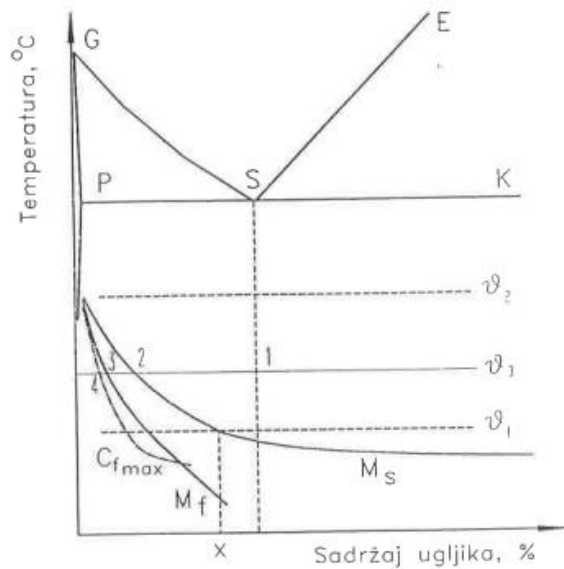




Slika 4.8. Utjecaj udjela ugljika u austenitu na: a) temperaturu martenzitne pretvorbe ugljičnih čelika; b) količinu zaostalog austenita u martenzitnoj strukturi; c) tvrdoću ugljičnog čelika i martenzitne mikrostrukture [4]

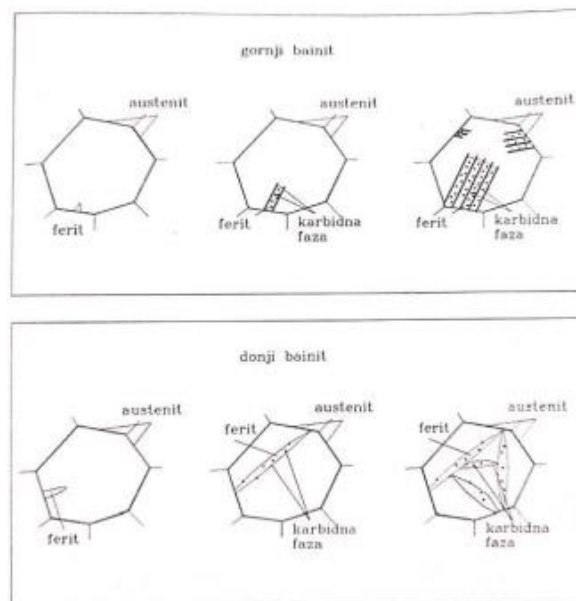
#### 4.4. PRETVORBA AUSTENITA U BAINIT

Kod tvorbe bainita austenit se dijelom bezdifuzijski, a dijelom difuzijski transformira u fino dispergiranu mješavinu prezasićenog ferita i karbida, a taj proces se naziva bainitna pretvorba. Pretvorba austenita u bainit nastaje kada postoji dovoljno pothlađivanje osiromašenog austenita da bi došlo do smične pretvorbe austenita u martenzit uz dovoljnu difuziju ugljika. Temperaturno područje bainitne pretvorbe kreće se između područja pretvorbe austenita u perlit i pretvorbe austenita u martenzit, odnosno od temperature  $\vartheta_1$  do temperature  $\vartheta_2$  kako je prikazano na slici 4.9. [4]



Slika 4.9. Shematski prikaz područja bainitne pretvorbe [4]

Tvorba bainita odnosno njen mehanizam se ne mijenja bitno s promjenom temperature. Na višim temperaturama intenzivniji su difuzijski procesi koji rezultiraju mikrostrukturom naziva gornji bainit, a pri nižim temperaturama intenzivniji su bezdifuzijski mehanizmi koji rezultiraju mikrostrukturom naziva donji bainit. Gornji i donji bainit su prikazani na slici 4.10. [4, 5]

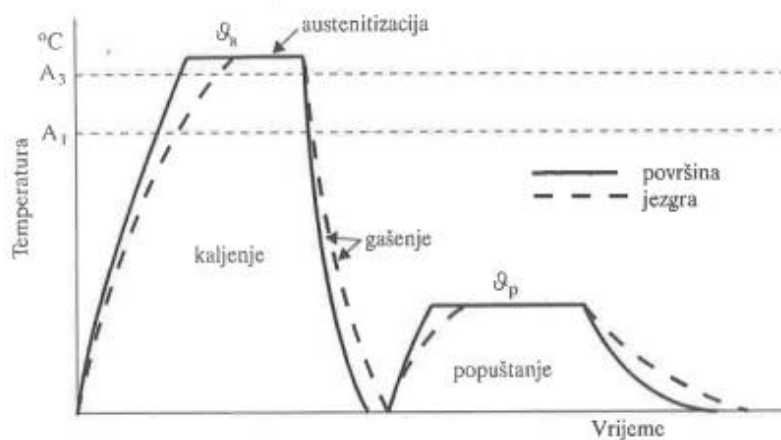


Slika 4.10. Shematski prikaz pretvorbe austenita u bainit [4]

Pothlađivanjem čelika na neku temperaturu između temperature  $\vartheta_1$  i temperature  $\vartheta_2$  dolazi do preraspodijele ugljika u nestabilnoj fazi austenita i time se stvaraju područja s nižim udjelom i s višim udjelom ugljika. U području niskog udjela ugljika stvaraju se uvjeti za martenzitnu pretvorbu. Martenzitna pretvorba dovodi do promjene kristalne rešetke iz gama rešetke u alfa rešetku koja omogućuje znatno veću difuziju ugljika koja onda stvara čestice karbida u prezasićenom feritu sve dok udio ugljika opadne na razinu maksimalne topivosti ugljika u feritu. Udjeli feritne i karbidne faze u bainitu ovisiti će o udjelu ugljika u čeliku, kod čelika s malim udjelom ugljika većina procesa će biti stvaranje feritne faze (moguće je izlučivanje izdvojenog ferita), a kod čelika s visokim udjelom ugljika većina procesa biti će izdvajanje karbidne faze (moguće je izlučivanje izdvojenog cementita). [4]

## 5. KALJENJE ČELIKA

Kaljenje je postupak toplinske obrade kaljivih čelika u svrhu postizanja maksimalne moguće postizive tvrdoće (teoretska tvrdoća ovisi o udjelu ugljika u čeliku) i što ujednačenije tvrdoće po dubini strojnoga dijela. Proces toplinske obrade kaljenja sastoji se od jednolikog zagrijavanja strojnoga dijela do temperature austenitne pretvorbe tzv. temperature austenitizacije, držanja na temperaturi austenitizacije određeno vremensko razdoblje i hlađenja odnosno gašenja u propisanom mediju kritičnom brzinom ohlađivanja. Pri brzom ohlađivanju pojavljuju se razlike u temperaturi kroz poprečni presjek strojnoga dijela što izaziva zaostala naprezanja, stoga se kaljeni čelici nakon kaljenja podvrgavaju procesu toplinske obrade popuštanjem. Proces toplinske obrade popuštanja sastoji se od žarenja i sporoga ohlađivanja. Postupak toplinske obrade koji se sastoji kaljenja i popuštanja naziva se toplinskom obradom poboljšanja i on je prikazan na slici 5.1. [1,5,11,12]

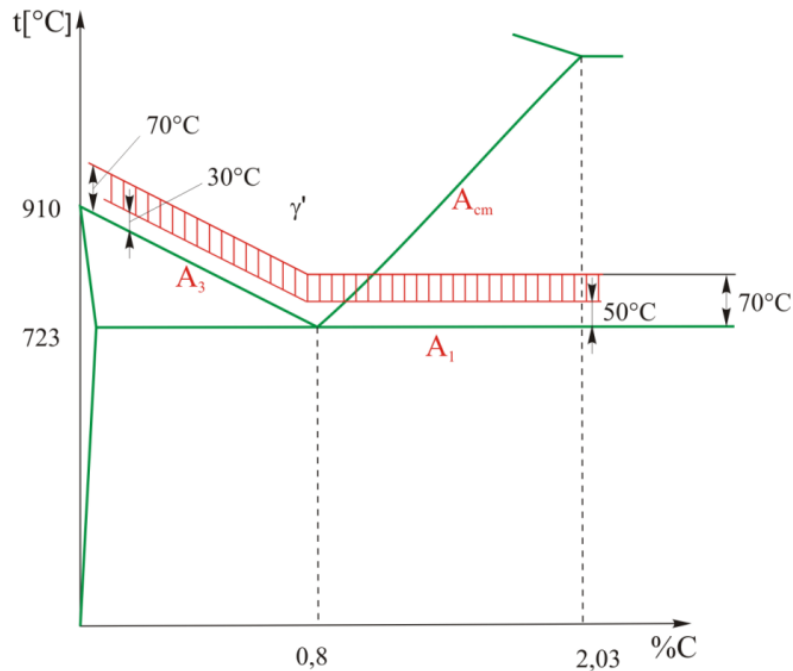


Slika 5.1. Dijagram postupka kaljenja i popuštanja za neki podeutektoidni čelik [5]

### 5.1. IZBOR PARAMETARA TOPLINSKE OBRADE KALJENJA

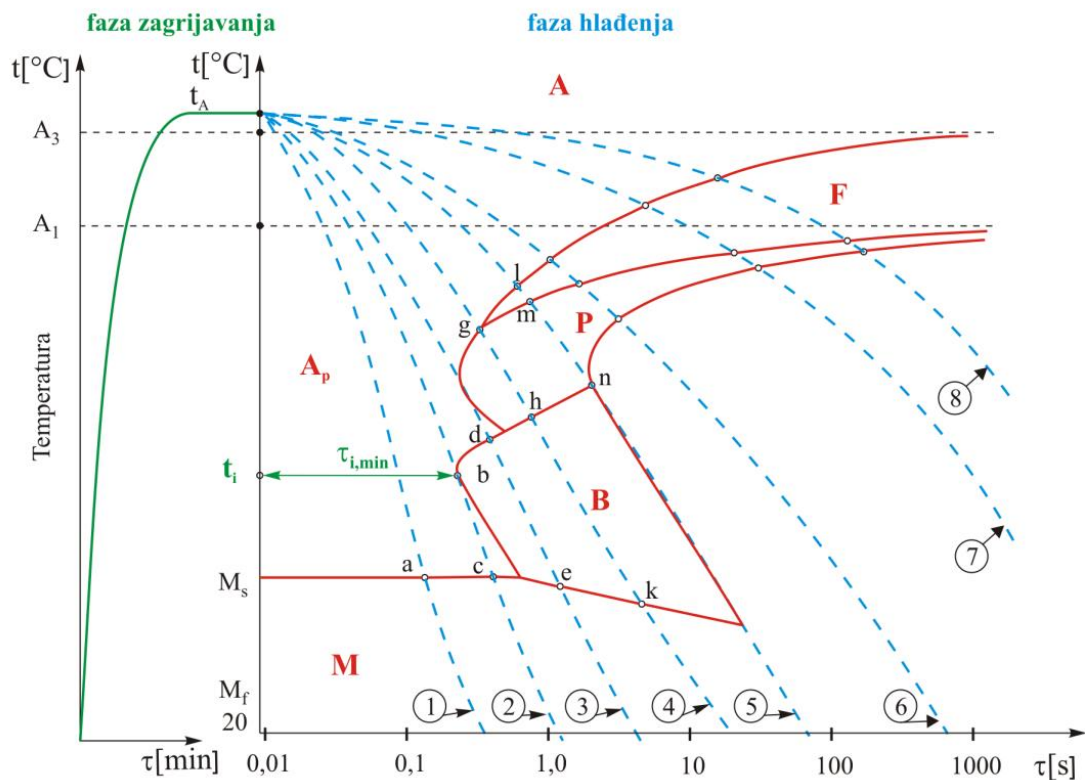
Izbor temperature austenitizacije radi se na osnovi dijagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C prikazanog na slici 5.2. Temperatura austenitizacije za podeutektoidne čelike je za 30 °C do 70 °C viša od temperature A<sub>3</sub>, a za nadeutektoidne čelika ona ponekad od 30 °C, a često od 50 °C do 70 °C

viša od temperature  $A_1$ . Odabir više temperature od onih preporučenih izazivaju niz negativnih pojava kao što su veća naprezanja, rast kristalnog zrna, oksidacija i razugljičenje površine. [1]



Slika 5.2. Područje optimalnih temperatura austenitizacije za kaljenje ugljičnih čelika [12]

Osim izbora temperature austenitizacije, brzina ohlađivanja je drugi važni parametar pravilno izvedenog postupaka kaljenja. Brzina ohlađivanja se kod čelika određuje teoretski na osnovi TTT dijagrama koji prikazuje izotermički i anizotermički raspad austenita čiji je primjer prikazan na slici 5.3. [1]



Slika 5.3. Prikaz kontinuiranog ohlađivanja jednog austenitiziranog podeutektoidnog ugljičnog čelika u pripadnom TTT-dijagramu [12]

Krivulje ohlađivanja označene su u dijagramu na slici 5.3. brojevima od 1 do 8 i prikazuju sljedeće fazne promjene od raspada austenita: [1,12]

Krivulja 1 predstavlja vrlo intenzivno gašenje ugrijanog čelika. U točki  $a$  započinje pretvorba austenita u martenzit i takvim se gašenjem dobiva 100% martenzitna struktura, a time i maksimalna moguća tvrdoća za promatrani čelika.

Krivulja 2 predstavlja najmanje intenzivno gašenje promatranog čelika koje će rezultirati 100% martenzitnom strukturom i naziva se gornjom kritičnom krivuljom ohlađivanja. Iz gornje kritične krivulje ohlađivanja može se približno izračunati gornja kritična brzina ohlađivanja kao omjer razlike austenitne temperature  $t_A$  i temperature najkraćeg trajanja inkubacije pothlađenog austenita  $t_i$  (točka  $b$  u kojoj krivulja gašenja tangira krivulju početka pretvorbe) i minimalnog trajanja inkubacije pothlađenog austenita  $\tau_{i,min}$ .

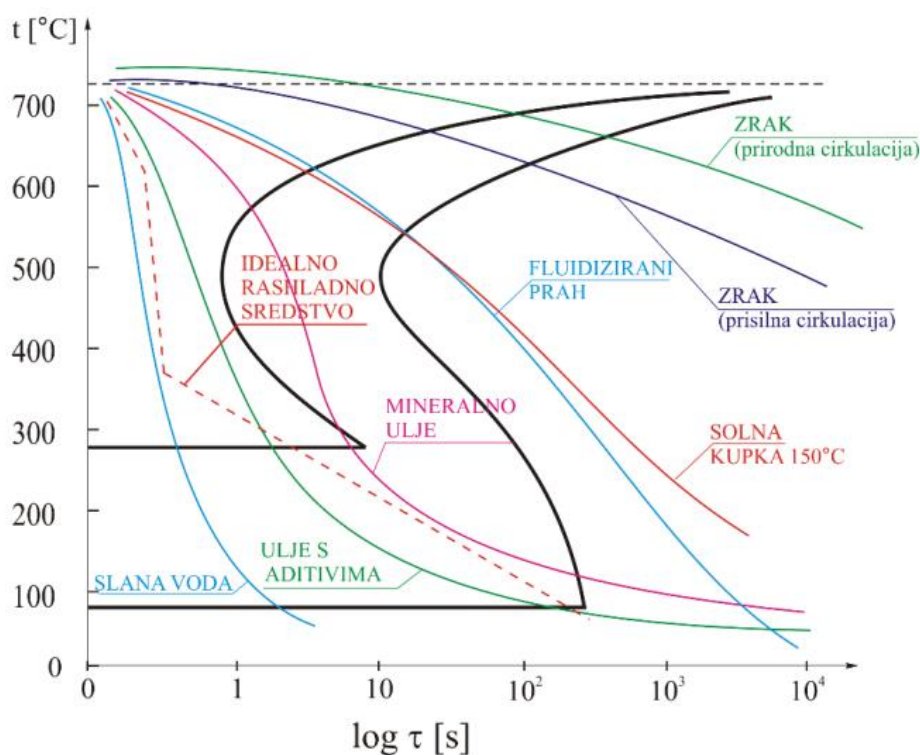
Krivulja 3 predstavlja gašenje promatranog čelika koje će rezultirati pretvorbom pothlađenog austenita u bainit između točaka  $d$  i  $e$  nakon koje slijedi pretvorba ostalog pothlađenog austenita u martenzit.

Krivulja 4 predstavlja gašenje promatranog čelika koje će rezultirati pretvorbom pothlađenog austenita u perlit između točaka  $g$  i  $h$ , nakon kojeg počinje pretvorba pothlađenog austenita u bainit do točke  $k$  nakon koje se preostali pothlađeni austenit pretvara u martenzit

Krivulja 5 predstavlja najmanje intenzivno gašenje promatranog čelika koje rezultira najmanjim udjelom martenzit u strukturi i naziva se donjom kritičnom krivuljom gašenja. Iz donje kritične krivulje gašenja može se na analogni način kao za slučaj gornje krivulje gašenja dobiti donja kritična brzina gašenja.

Krivulje 6, 7 i 8 predstavljaju krivulje koje se nazivaju potkritične krivulje ohlađivanja. Gašenjem promatranog čelika po ovim krivuljama iz austenitiziranog čelika postiče mikrostrukture smjese ferita i perlita.

U praksi nije moguće precizno praćenje krivulje ohlađivanja zbog ograničenog izbora sredstva za gašenje. Sredstva za gašenje, poredana od sredstva sa najvećim intenzitetom ohlađivanja do najmanjeg, su voda (meka i slana voda), ulja (rjeđe i gušće ulje), rastaljeni metali (olovo i cink), rastaljene soli i zrak (pod pritiskom ili mirujuć), a krivulje ohlađenja za neka sredstva za gašenje prikazana su na slici 5.4. [1,12]

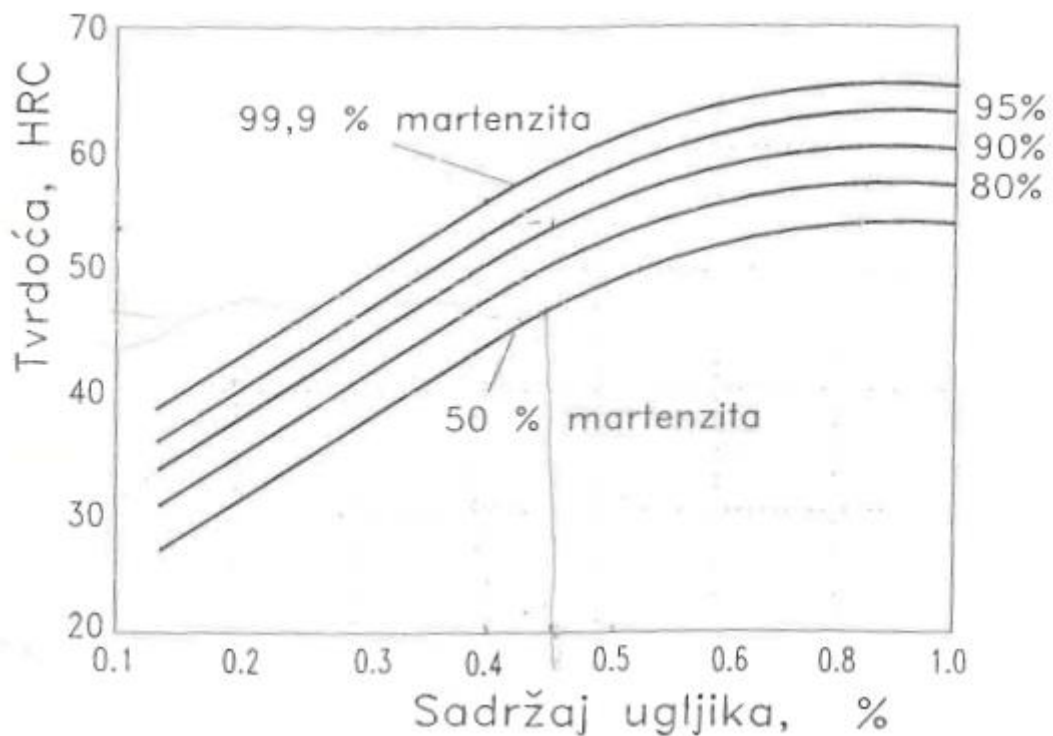


Slika 5.4. Načelni izgled krivulje hlađenja za neka različita sredstva za hlađenje [12]

Koja će se mikrostruktura postići postupkom kaljenja ovisi osim već opisane brzine ohlađivanja odnosno sredstvu za gašenje i o dvama svojstvima čelika prokaljivosti i zakaljivosti.

## 5.2. ZAKALJIVOST

Zakaljivost je svojstvo čelika koje omogućava da čelik pri postupku toplinske obrade kaljenja postigne tvrdi, pretežito martenzitnu strukturu po površini strojnog dijela. Uvjeti zakaljivosti čelika su postojanje mogućnosti transformacije ferita u austenit i dovoljno visoki sadržaj ugljika kako bi potrebna količina željeznih kristalnih rešetki primila atom ugljika (više od 0,35% ugljika). Nakon postupka kaljenja tvrdoća prokaljenog sloja ovisiti će o masenom udjelu martenzita u strukturi, a maksimalna postiziva tvrdoća martenzitne strukture izravno će ovisiti o masenom udjelu ugljika u čeliku prije početka postupka kaljenja što se može očitati iz Burnsova dijagrama koji je prikazan na slici 5.5. [4, 5]

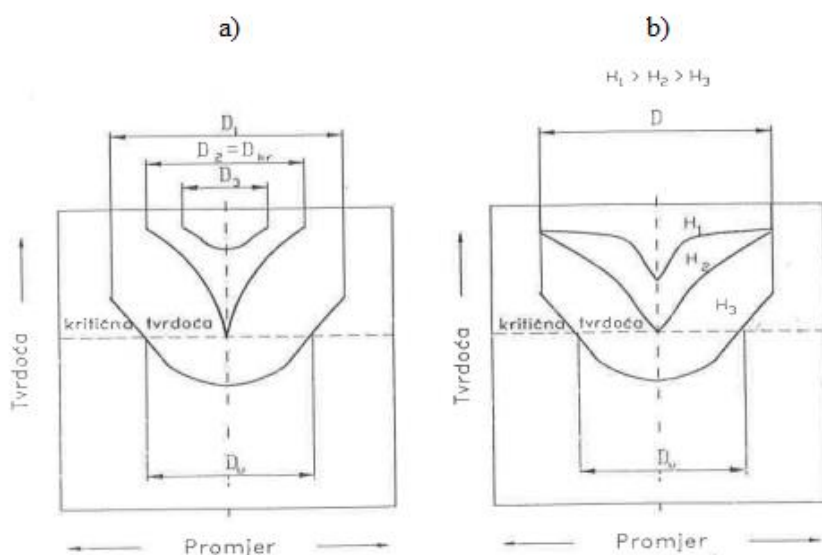


Slika 5.5. Burnsov dijagram [4]



### 5.3. PROKALJIVOST

Prokaljivost se definira kao svojstvo čelika koje omogućava da se pri gašenju čelika u dubljim slojevima obrađivanog strojnog dijela formira martenzitna struktura s masenim udjelom većim od 50% martenzita. Prokaljivost direktno ovisi o gornjoj kritičnoj brzini gašenja i brzini pretvorbe austenita u perlit. Raspodjela tvrdoće ovisi o svojstvu prokaljivosti promatranog čelika, ali ovisi i o dimenzijama strojnoga dijela (intenzivnost hlađenja pada od površinskog sloja prema jezgri) kao što je prikazano na slici 5.6. i o sredstvu u kojem se strojni dio gasio u postupku kaljenja. [4, 5]



Slika 5.6. Primjeri raspodjele tvrdoće nakon gašenja čela a) uzoraka različitih promjera; b) različitim sredstvima za gašenje [4]

Na slici 5.6. prikazana je veličina koja se naziva kritičnom tvrdoćom. Kritična tvrdoća predstavlja minimalnu tvrdoću prokaljenog sloja odnosno ona odgovara tvrdoći čelika s 50% martenzita. Kritična tvrdoća se može približno procijeniti pomoću Burnsovog dijagrama prikazanog na slici 5.5. Kritični promjer je najveći mogući promjer strojnog dijela za koji će doći do potpunog prokaljivanja u nekome sredstvu za gašenje. Tvrdoća u jezgri strojnog dijela s dimenzijama kritičnog promjera (na slici 5.6.a) označen oznakom  $D_2$ ) ima vrijednost kritične

čvrstoće. Strojni dio promjera  $D_1$  bio bi nedovoljno prokaljen, a strojni dio promjera  $D_3$  bio bi gašen prevelikom brzinom gašenja. Kako je već bilo napomenuto u prethodnim poglavljima moramo uzeti u obzir i sredstvo kojim će strojni dio biti gašen. Intenzivnost gašenja je definirana prema M. A. Grossmannu kao sposobnost sredstva da u procesu kaljenja djelotvorno odvodi toplinu iz ugrijanog strojnog dijela i označava se s oznakom  $H$ . Intenzivnost gašenja ovisi o vrsti sredstva, njegovoj temperaturi i brzini strujanja. Na slici 5.6.b) prikazan je tok tvrdoće kroz strojni dio koji je gašen u trima različitim sredstvima sa različitim intenzitetom gašenja ( $H_1 > H_2 > H_3$ ). Ukoliko se zahtjeva potpuno prokaljivanje strojnog dijela promjera  $D$ , bio bi nepotrebno gašen prevelikim brzinama gašenja u sredstvu s intenzitetom gašenja  $H_1$ , a u sredstvu s intenzitetom  $H_3$  bio bi nedovoljno prokaljen. [4]

## 6. ISPITIVANJE PROKALJIVOSTI

### 6.1. JOMINYEVA METODOM ISPITIVANJA PROKALJIVOSTI

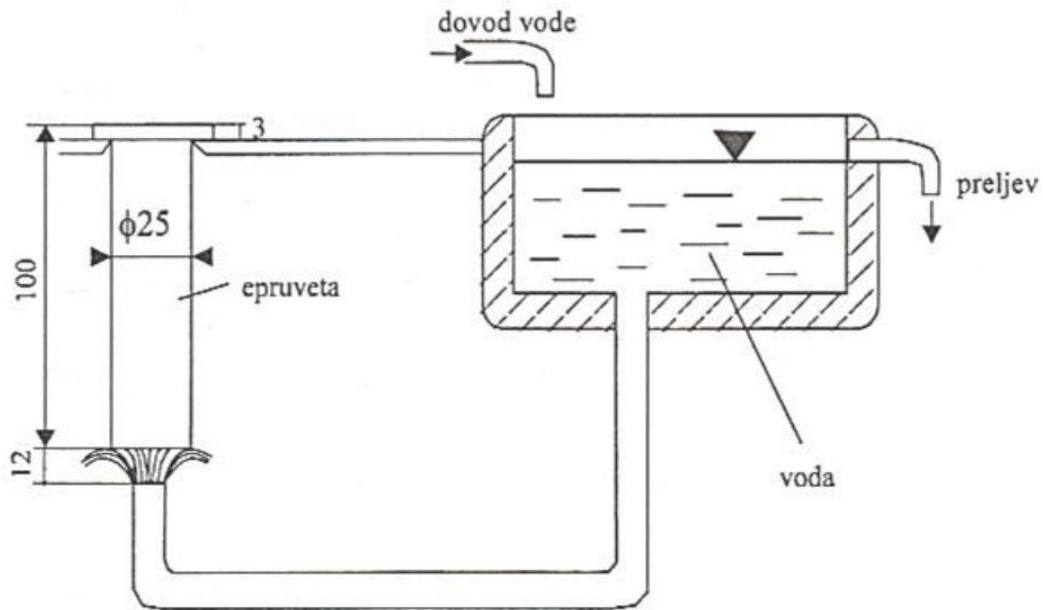
Jominy metoda je najčešće korištena od svih eksperimentalnih metoda za ispitivanje svojstva prokaljivosti nekog čelika. Ovu metodu moguće je pronaći pod oznakom hrvatske nacionalne norme HRN EN ISO 642. Za potrebe izvođenja Jominyjevog pokusa potrebna je samo jedna epruveta ili uzorak. Jominyjev pokus se provodi sljedećim koracima:

- epruveta se zagrijava i drži na temperaturu austenitizacije čelika od koje je napravljen,
- čelono gašenje epruvete vodom u napravi izrađenoj za Jominyjev pokus,
- brušenje epruvete,
- ispitivanje tvrdoće na određenim udaljenostima od gašenog čela epruvete i
- konstruiranja Jominyjeve krivulje. [4]

Norma za provođenje Jominyjevog pokusa definira sljedeće parametre pokusa:

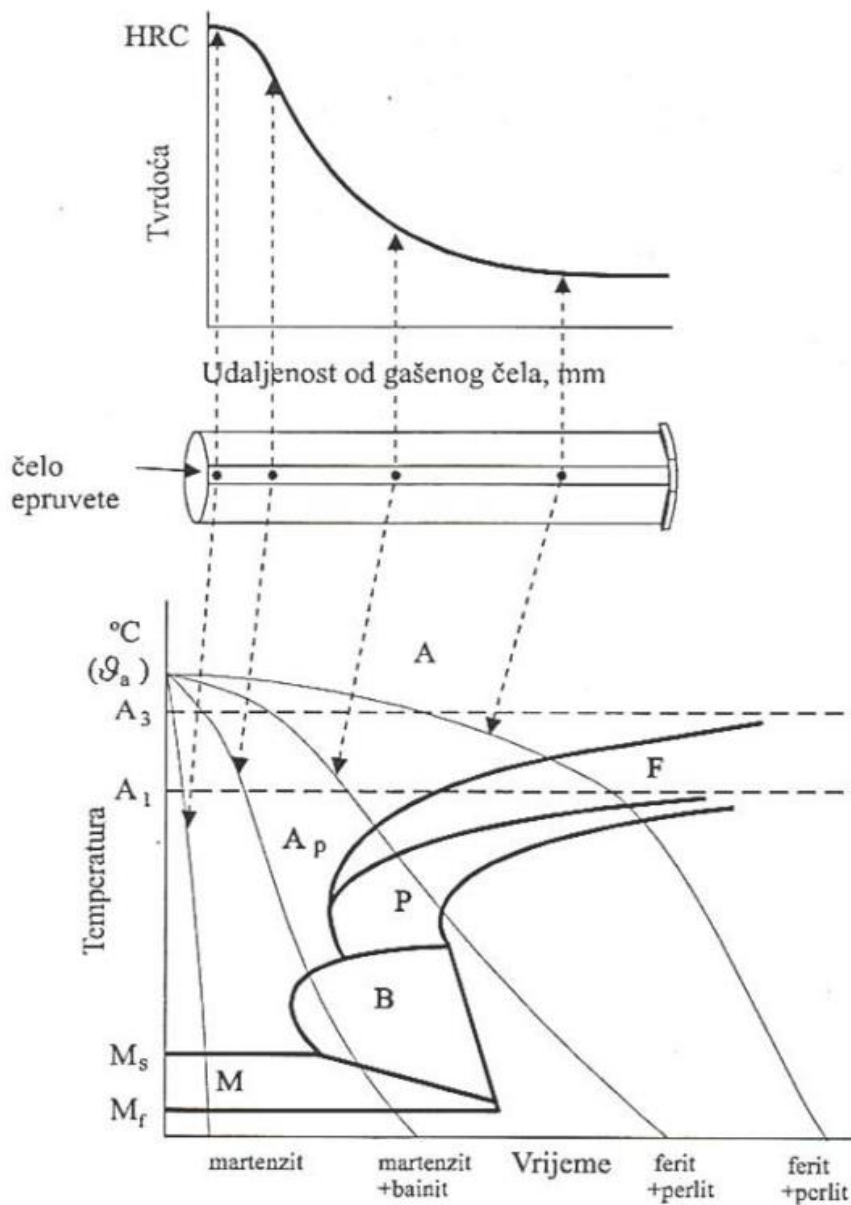
- dimenzije i oblik uzorka,
- uvjeti ugrijavanja i ohlađivanja te
- metoda i pozicija ispitivanja tvrdoće. [4]

Uzorci za provođenje Jominyjevog pokusa su napravljene u obliku valjka promjera 25 mm i visine 100 mm. Uzorak se drži u peći za toplinsku obradu na temperaturi austenitizacije u trajanju od minimalno 30 minuta. Vađenje uzorka iz peći za toplinsku obradu i postavljanje u napravu za gašenje, koja je shematski prikazana na slici 6.1., mora biti odrađen u što kraćem vremenu (manje od 5 sekundi). Promjer cijevi, a time i mlaza vode kojim se čelono gasi uzorak mora biti približno 12,5 mm, a udaljenost između otvora cijevi i čela epruvete iznosi približno 12,5 mm. Brzina mlaza vode određena je stupcem vode koji daje visinu slobodnog istjecanja mlaza vode oko 65 mm. Potrebna temperatura vode za gašenje je približno sobnoj temperaturi, a iznosi oko 20 °C ( $\pm 5$  °C). [13]



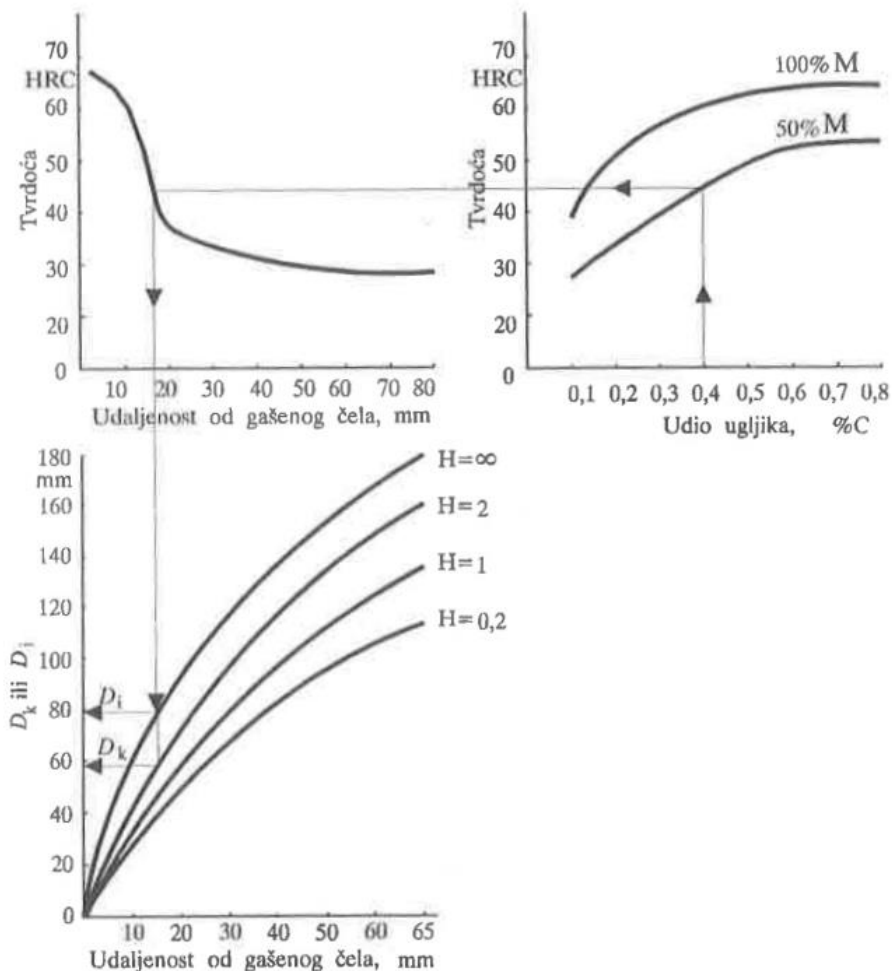
Slika 6.1. Shema naprave za ohlađivanje epruvete po Jominyju [5]

Po završetku gašenja uzorka, potrebno je pobrusiti epruvetu uzdužno po valjkastoj površini s dvije nasuprotne strane, na dubinu brušenog sloja od 0,4 do 0,5 mm. Nakon brušenja slijedi ispitivanje tvrdoće Rockwellovom C metodom. Na temelju izmjerenih vrijednosti tvrdoće konstruira se Jominyjeva krivulja. Jominyjeva krivulja prikazuje raspodjelu tvrdoće čelika u ovisnosti o udaljenosti od površine strojnog dijela. Jominyjeva krivulja ili linija prokaljivosti prikazana je na slici 6.2. Najveći udio martenzitne mikrostrukture s najvećom mogućom tvrdoćom za promatran čelik postiže se na čelu uzorka, a udaljavanjem od čela uzorka dolazi do smanjenja udjela martenzita u mikrostrukтури, a time i tvrdoće čelika kako je prikazano na slici 6.2. [13]



Slika 6.2. Prikaz krivulja ohlađivanja Jominyjeve epruvete u TTT-dijagramu i tijekom postignutih tvrdoća [5]

Na temelju konstruirane Jominyjeve krivulje (slika 6.3. gore lijevo) i Burnsovog dijagrama (slika 6.3. gore desno) grafički se utvrđuje pripadajući idealni kritični promjer  $D_i$  i kritični promjer  $D_k$  (slika 6.3. dolje) za promatrani čelik od kojeg je strojni dio napravljen.



Slika 6.3. Primjer načina utvrđivanja idealnog kritičnog promjera  $D_i$  i kritičnog promjera  $D_k$  iz rezultata Jominyjeva pokusa [5]

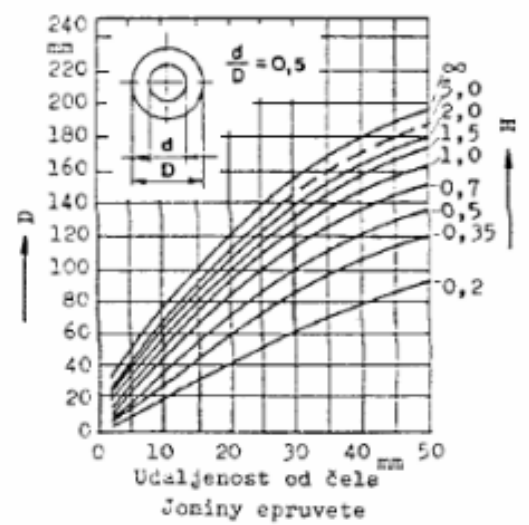
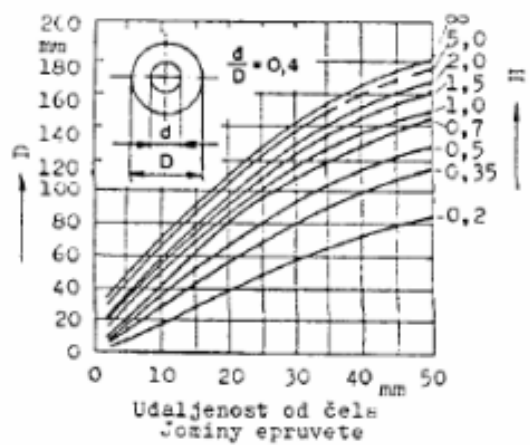
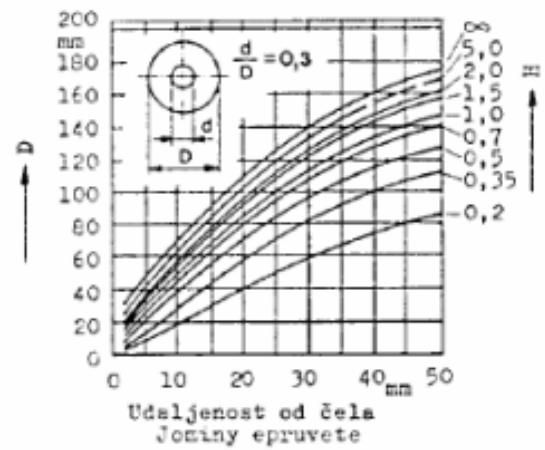
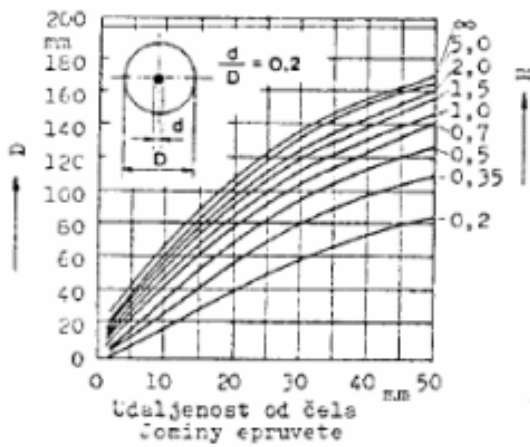
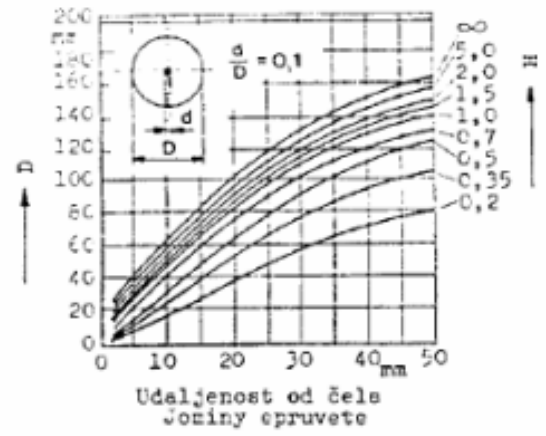
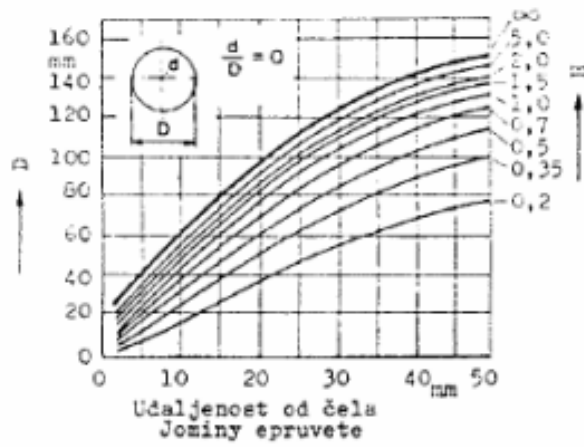
Za ispitivanje tvrdoće uzorka može se koristiti ili Vickersovom ili Rockwellovom metodom. Najčešće se za ispitivanje tvrdoće Jominyjevog uzorka koristi Rockwellova metoda. Rockwellovom metodom iznos tvrdoće se definira dubinom prodiranja utiskivača, gdje je dubina prodiranja u obrnuto proporcionalnom odnosu sa tvrdoćom. Vrijednost tvrdoća se očitava na mjernoj skali uređaja za mjerenje koji se naziva tvrdomjer. Kao utiskivač za Rockwellovu metodu koristi se dijamantni stožac ili kuglica od kaljenog čelika. Vršni kut stošca iznosi  $120^\circ$  te ima radijus zaobljenja na vrhu od 0,2 mm, dok promjer kuglice iznosi 1,5875 mm. Ispitivanje koje se izvodi dijamantnim stošcem nazivamo Rockwellovom C metodom (HRC) i koristi se za toplinski obrađene materijale, dok se ispitivanje izvedeno kaljenom kuglicom naziva Rockwellovom B metodom (HRB) i koristi se kod srednje tvrdih i mekih materijala. [1]

Postupak mjerenja tvrdoće Rockwellovom C metodom sastoji se od dva opterećenja. Prvo opterećenje se koristi kako bi se izbjegao utjecaj neravnina na brušenoj površini epruvete na rezultate mjerene tvrdoće. Utiskivač se opterećuje s predopterećenjem koje iznosi 98 N u trajanju od 3 sekunde da bi se dobila početna točka mjerenja. Zatim slijedi drugo odnosno glavno opterećenje dodavanjem opterećenja u vrijednosti od 1373 N u trajanju od oko 5 sekundi. Kada se kazaljka smiri uklonimo sva opterećenja te očitamo vrijednost tvrdoće na skali mjernog instrumenta. [1, 13]

Glavna prednost Rockwellove metode u odnosu na druge metode ispitivanja tvrdoće je velika brzina postupka mjerenja i dobivanja iznosa tvrdoće koji se očitava neposredno na mjernoj skali tvrdomjera. Glavni nedostatak Rockwellove metode je manja preciznost mjerenja ( $\pm 2$  HRC) u odnosu na druge metode ispitivanja tvrdoće. Drugi nedostatak je manje mjerno područje u stvarnosti nego što je u teoriji (minimalna vrijednost tvrdoće u teoriji je 0 HRC dok je u stvarnosti iznosi 20 HRC, a maksimalna vrijednost tvrdoće u teoriji je 100 HRC dok je u stvarnosti 70 HRC). Rockwellova metoda ispitivanja tvrdoće propisana je normom HRN EN ISO 6508-1:1999. [1, 13]

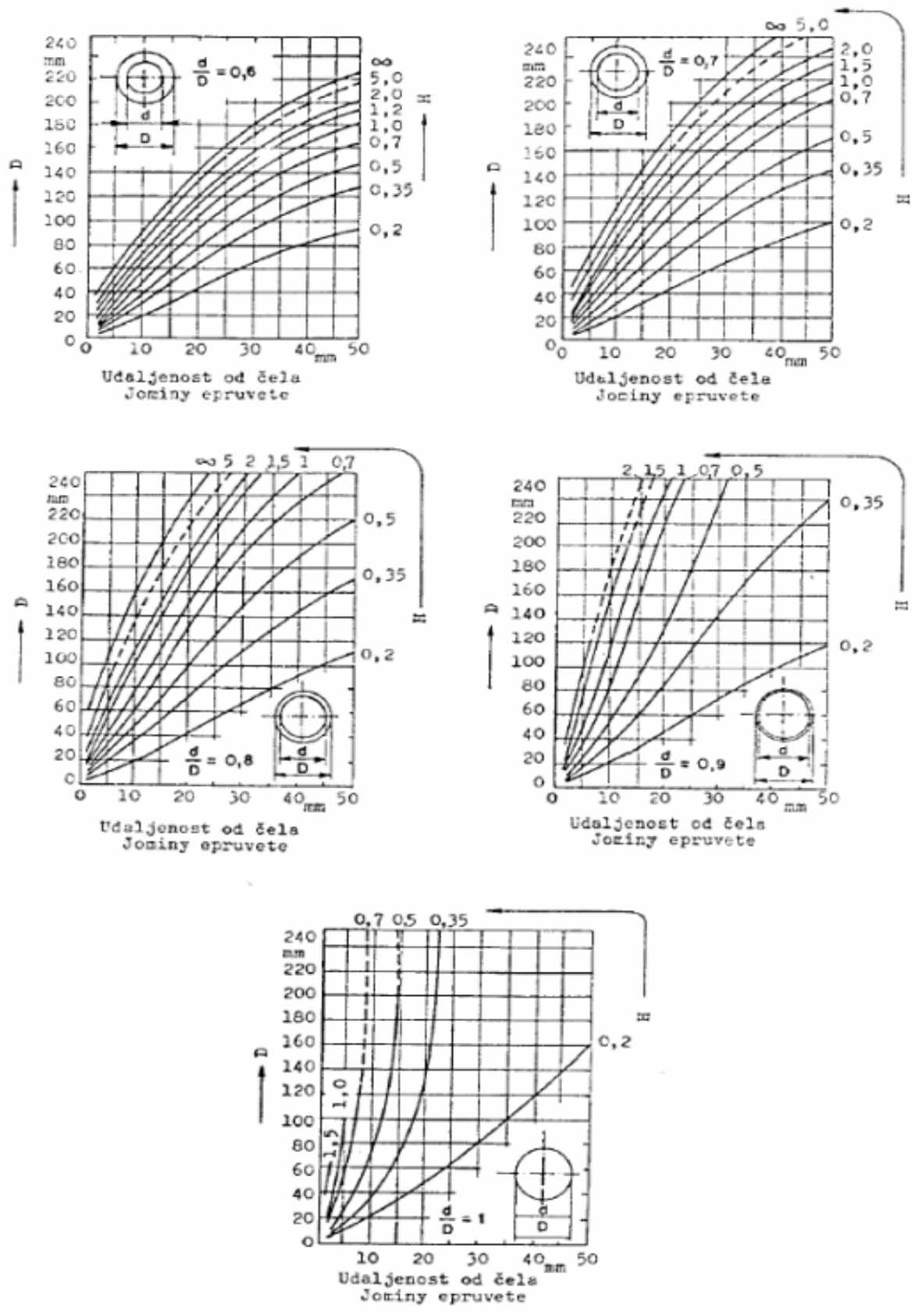
## **6.2. ODREĐIVANJE TOKA TVRDOĆE POMOĆU CRAFTS-LAMONTOVIH DIJAGRAMA**

Vrijednost tvrdoće kroz strojni dio može se prikazati takozvanom U-krivuljom. U-krivulja se ucrtava u nacrt strojnoga dijela korištenje Crafts-Lamontovih dijagrama koji su prikazani na slici 6.4. i slici 6.5. te Jominyjeve krivulje za zadani čelik. Crafts-Lamontovi dijagrami povezuju promjer okrugle kaljene šipke, intenzitet gašenja i udaljenost od čela Jominyjevog uzorka za određene udaljenosti od površine šipke. Udaljenost od površine šipke iskazana je omjerom promjera koncentrične kružnice na mjestu na kojem se određuje tvrdoća i promjera kaljene šipke odnosno strojnog dijela. Prema navedenom vrijednost omjera nula predstavlja uvjet ohlađivanja u jezgri strojnoga dijela, a vrijednost omjera jedan predstavlja uvjet ohlađivanja na površini strojnoga dijela. [14]



Slika 6.4. Crafts-Lamontovi dijagrami [15]





Slika 6.5. Crafts-Lamontovi dijagrami nastavak [15]

## **7. PROKALJIVOSTI STROJNOG DIJELA NT.23-DP.77**

Prokaljivost strojnog dijela NT.23-DP.77 procijenjena je na temelju eksperimentalno dobivenih rezultata Jominyjevog pokusa i korištenjem Crafts-Lamontovih dijagrama. Jominyjev pokus i ispitivanje tvrdoće Rockwellovom metodom izvedeni su u Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci na Zavodu za materijale. Pokus je izveden na temelju hrvatske norme HRN EN ISO 642.

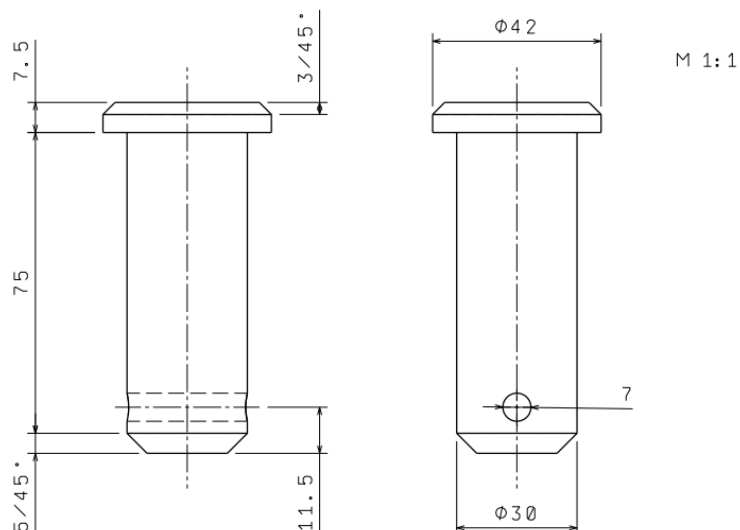
### **7.1. STROJNI DIO NT.23-DP.77**

Strojni dio NT.23-DP.77 je svornjak prikazan na nacrtu na slici 7.1. Svornjaci su elementi koji služe za stvaranje pokretljivog spoja odnosno oko svornjaka se mogu djelomično zakretati ili potpuno okretati dijelovi u spoju. Zbog pokretljivosti spoja mora se osigurati protiv pomaka ili ispadanja svornjaka kroz konstruiranje čvrstog dosjeda između svornjaka i dijela, oslanjanjem čela svornjaka na drugi dio konstrukcije ili korištenjem rascjepka, matica ili prstenastim uskočnikom. [16]

Svornjaci se dijele prema obliku na:

- svornjake bez glave,
- svornjake s malom glavom
- svornjake s velikom glavom,
- svornjake s upuštenom glavom i
- svornjake s navojem. [16]

Svornjaci se koriste u općem strojarstvu, u stapnim mehanizmima, vozilima i slično. Svornjaci se izrađuju od konstrukcijskih čelika (JUS Č0545, Č0645), čelika za cementiranje (JUS Č4120, Č4320, Č4321) i čelika za poboljšanje. [16]



Slika 7.1. Nacrt strojnog dijela NT.23-DP.77

## 7.2. SVOJSTVA ČELIKA 16MnCr5

Strojni dio NT.23-DP.77 izrađen je od čelika oznake po europskoj normi 16MnCr5 (bivša oznaka po JUS Č4320) koji pripada skupini čelika za cementiranje.

Radi se o niskougljičnim (manje od 0,25% udjela ugljika), nelegiranim ili niskolegiranim čelicima garantiranog kemijskog sastava, a prema masenom udjelu nečistoća spadaju u kvalitetne i plemenite čelike. Plemeniti čelici sadrže manji maseni udio sumpora i fosfora (manje od 0,035% udjela) od kvalitetnih čelika (manje od 0,045% udjela), veću kvalitetu površine i manji broj nemetalnih uključaka u mikrostrukturi. U tablici 7.1. prikazan je propisani kemijski sastav čelika 16MnCr5. [2, 3]

Tablica 7.1. Propisani kemijski sastav čelika 16MnCr5 [11]

Kemijski element	C	Mn	Cr	Si	P	S
Udio pojedinoga elementa (%)	0,16	1,15	0,95	0,15 – 0,35	max 0,035	max 0,035

Ovi se čelici podvrgavaju postupku toplinske obrade cementiranja koja se sastoji od pougljičavanja površinskih slojeva, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Pougljičavanjem u granulatu, plinu ili solnoj kupki pri temperaturi austenitiziranja, povećava se udio ugljika u površinskim slojevima na oko 0,8 do 0,9% udjela ugljika u čeliku, čime se povećava maksimalno postiziva tvrdoću koja iznosi u praksi oko 61 do 64 HRC. [2, 3]

Nakon postupka toplinske obrade cementiranja površinski slojevi strojnog dijela su tvrdi (visokougljični martenzit) što im daje povećanu otpornost na trošenje dok jezgra strojnog dijela ostaje feritno-perlitna kod nepotpunog kaljenja ili niskougljična-martenzitna kod potpunog prokaljivanja presjeka koja je otporna na dinamička i udarna opterećenja odnosno jezgra je žilava. [2, 3]

Cilj legiranja je dobiti što bolje prokaljivanje čime se osigurava visoka čvrstoća, dinamička izdržljivost i žilavost jezgre strojnog dijela.

Normirane vrste čelika za cementiranje su nelegirani čelici, krom čelici, mangan-krom čelici, krom-molibden čelici i nikal-krom čelici.

### **7.3. PROVEDBA JOMINYEVOG POKUSA**

Za izvođenje Jominyjevog pokusa izrađen je Jominyjev uzorak prikazan na slici 7.2. Jominyjev uzorak napravljen je od čelika za cementiranje 16MnCr5.



*Slika 7.2. Jominyjeva uzorak [13]*

Jominyjev uzorak postavlja se u peć za toplinsku obradu tvrtke „OVER industrijska elektronika“ prikazan na slici 7.3.a). Peć se zagrijava na temperaturu austenitizacije čelika 16MnCr5, a ona iznosi 850 °C. Uzorak se stavlja u peć za toplinsku obradu korištenjem opreme prikazane na slici 7.3.b).



*Slika 7.3. a) Peć za toplinsku obradu;; b) Oprema*

Nakon stavljanja Jominyjevog uzorka u peć za toplinsku obradu, uzorak provodi najmanje 30 min na temperaturi austenitizacije kako bi se dobio valjani uzorak. Po završetku austenitizacije Jominyjev uzorak se brzo uz pomoć hvataljke premješta u napravu za Jominyjev pokus koja je prikazana na slici 7.4.a). Prebacivanje uzorka iz peći za toplinsku obradu u napravu za Jominyjev pokus mora trajati kraće od 5 sekundi, početni period gašenja je najvažniji jer je potrebno postići što točnije prokaljivanje uzorka (slika 7.4.b)).



*Slika 7.4. a) Naprava za Jominyjev pokus; b) Trenutak stavljanja uzorka u napravu*

Jominyjev uzorak se u napravi gasi čeono u vodi kako je prikazano na slici 7.5. Temperatura vode za gašenje uzorka mora biti oko sobne temperature što iznosi oko 24 °C. Mlaz vode prije postavljanja Jominyjevog uzorka mora postići visinu u iznosu  $65 \pm 10$  mm, a nakon postavljanja uzorka mora postići visinu u iznosu  $12,5 \pm 0,5$  mm (slika 37.).



*Slika 7.5. Čeono gašenje uzorka na početku pokusa*

Čeono gašenje Jominyjevog uzorka u napravi provodi se u trajanju od minimalno 10 minuta. Nakon toga uzorak se gasi potpunim uranjanjem u hladnu vodu. Na sljedećim slikama (slika 7.6. i slika 7.7.) prikazano je gašenje uzorka u nekoliko vremenskih razdoblja.

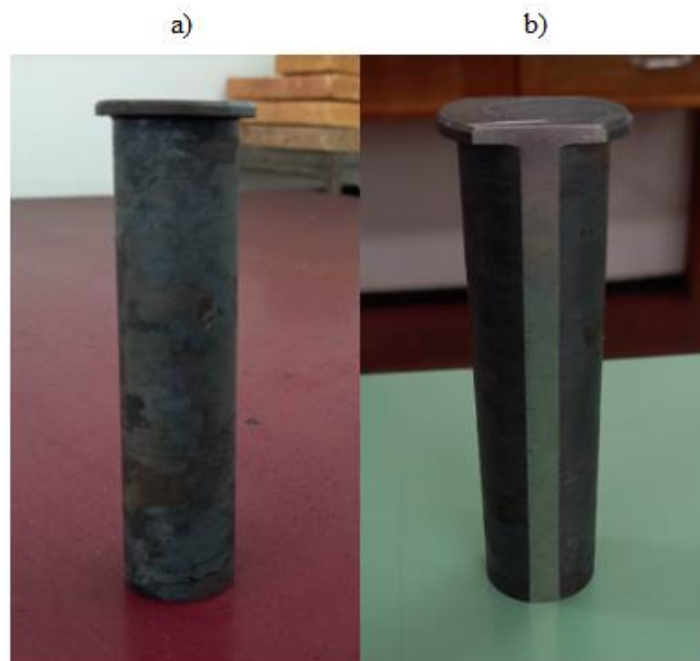


*Slika 7.6. Stanje uzorka nakon 1 minute i 2 minute gašenja*



*Slika 7.7. Stanje uzorka nakon 3 minute i 4 minute gašenja*

Po završetku gašenja Jominyjevog uzorka, valjkastu plohu sada kaljenog uzorka prikazanog na slici 7.8.a) potrebno je pobrusiti kako bi se dobila zahtijevana kvaliteta površine za izvedbu Rockwellove metode ispitivanja tvrdoće. Uzorak se brusi dva puta na brusilici kako bi se dobile dvije ravne plohe koje su međusobno paralelne. Debljina brušenog sloja mora biti u iznosu od 0,4 mm. Izbrušeni Jominyjev uzorak prikazan je na slici 7.8.b).



*Slika 7.8. a) Jominyjev uzorak nakon kaljenja; b) Jominyjev uzorak nakon brušenja*

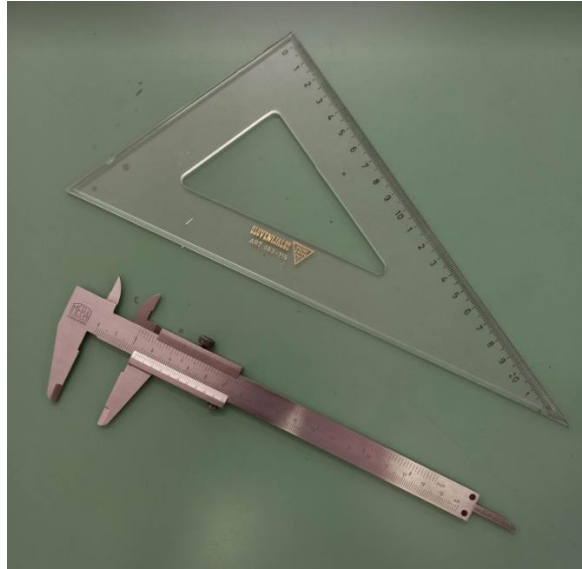


Kako je već napisano, nakon brušenja na Jominyjevom uzorku se ispituje tvrdoća pobrušenih ploha. Tvrdoća uzorka ispitati će se prema Rockwellovoj C metodi korištenjem tvrdomjera prikazanog na slici 7.9.

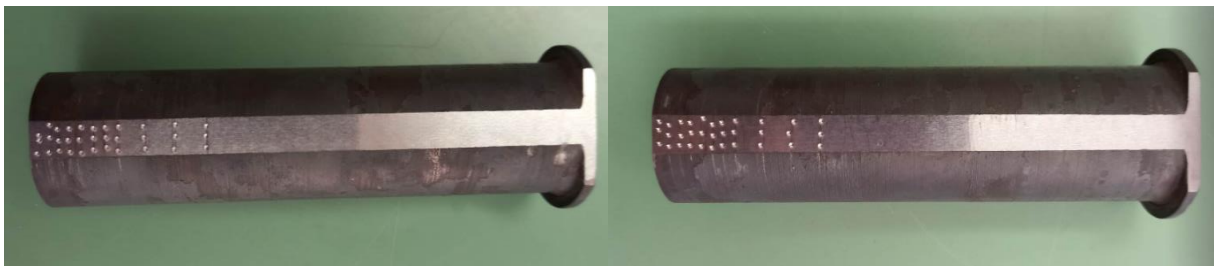


*Slika 7.9. Tvrdomjer za ispitivanje tvrdoće Rockwellovom metodom*

Ispitivanje tvrdoće vrši se na obje izbrušene plohe u svrhu dobivanja što točnijih rezultata ispitivanja. Prvi korak je korištenjem pomičnog mjerila i ravnala prikazanih na slici 7.10. označiti udaljenost mjernog mjesta od gašenog čela prema normi. Ispitivanje tvrdoće vršiti će se na sljedećim udaljenostima od čela uzorka, 1,5, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 20, 25, 30 mm. Na svakoj navedenoj udaljenosti ispitivanje tvrdoće se vrši tri puta kako bi smanjili utjecaj grešaka u mikrostrukturi uzorka i grešaka prilikom pozicioniranja utiskivača tvrdomjera na rezultate tvrdoće. Na slici 7.11. prikazan je uzorak nakon zadnjeg mjerenja prve i druge strane, gdje se jasno mogu vidjeti otisci koje je ostavio utiskivač prilikom mjerenja.

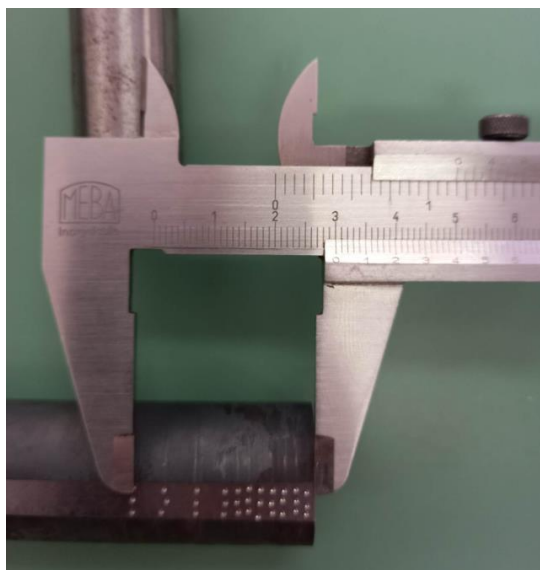


*Slika 7.10. Ravnalo i pomično mjerilo kojim se mjeri udaljenost od čela uzorka*



*Slika 7.11. Izgled površina Jominyjevog uzorka po završetku ispitivanja tvrdoće*

Nakon zadnjeg mjerenja tvrdoće korištenjem pomičnog mjerila još jednom provjeravamo udaljenosti otisaka od gašenoga čela kako je prikazano na slici 7.12. Udaljenosti otisaka od čela i vrijednosti tvrdoće koje smo dobili na tvrdomjeru potrebni su za konstruiranje Jominyjeve krivulje.



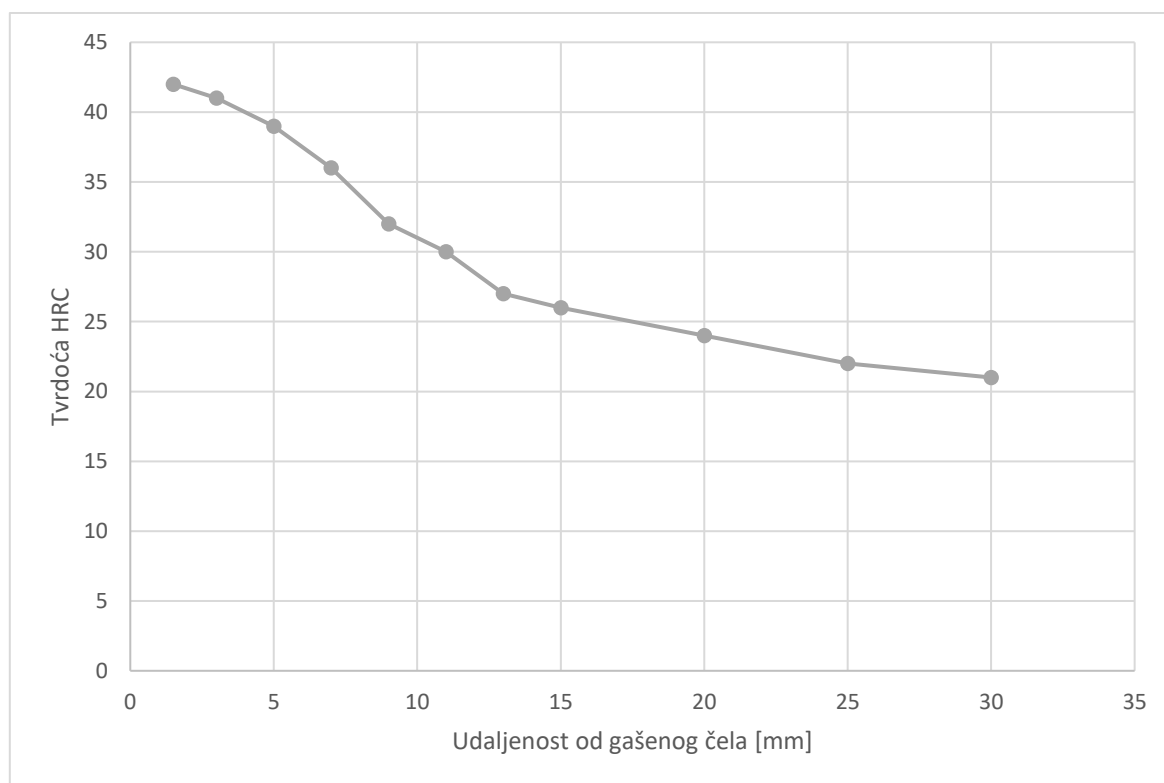
*Slika 7.12. Provjera udaljenosti od gašenog čela Jominyjevog uzorka*

#### **7.4. REZULTATI JOMINYJEVOG POKUSA**

Na temelju očitanih vrijednosti tvrdoće sa tvrdomjera, nakon provedbe ispitivanja tvrdoće Rockwellovom C metodom, koji su prikazani u tablici 7.2. i očitanih iznosa udaljenosti otisaka od gašenog čela uzorka konstruirana je Jominyjeva krivulja prikazana na slici 7.13.

Tablica 7.2. Eksperimentalno dobivene vrijednosti tvrdoće

Udaljenost od gašenog čela (mm)	Tvrdoća HRC
1,5	42
3	41
5	39
7	36
9	32
11	30
13	27
15	26
20	24
25	22
30	21



Slika 7.13. Jominyjeve krivulje za čelik 16MnCr5

## 7.5. PROCJENA PROKALJIVOSTI STROJNOG DIJELA NT.23-DP.77

Na temelju Jominyjeve krivulje prikazane na slici 7.13. i Crafts-Lamontovih dijagrama prikazanih na slici 6.4. i slici 6.5. određene su vrijednosti Jominyjevih udaljenosti i tvrdoće za različite omjere promjera  $d/D$  koji su prikazani u tablicama 7.3. i 7.4. Omjer promjera  $d/D$  vrijednosti jedan predstavlja površinu strojnoga dijela, a omjer promjera  $d/D$  vrijednosti nula predstavlja jezgru strojnoga dijela. Tok tvrdoće kroz strojni dio odrediti će se za slučaj gašenja u ulju čiji intenzitet rashladnog sredstva iznosi  $H = 0,3$  i za slučaj gašenja u vodi čiji intenzitet rashladnog sredstva iznosi  $H = 1$ .

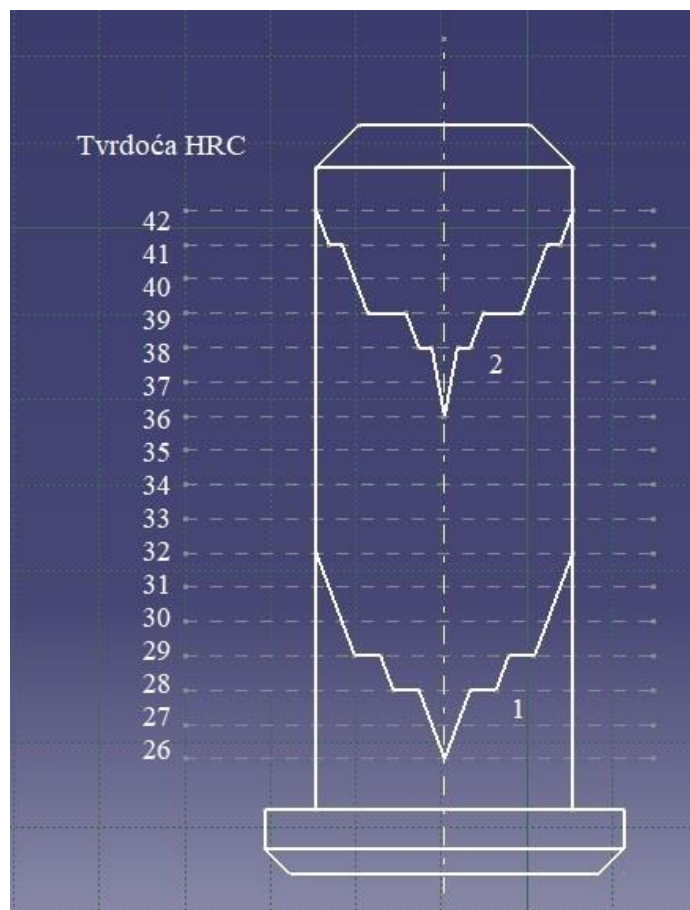
Tablica 7.3. Očitane vrijednosti tvrdoće za  $H = 0,3$

$d/D$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Jominyjeva udaljenost (mm)	14,5	13	12,5	12,5	12,5	11,5	11,5	11,5	10,5	10	9
Tvrdoća HRC	26	27	28	28	28	29	29	29	30	31	32

Tablica 7.4. Očitane vrijednosti tvrdoće za  $H = 1$

$d/D$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Jominyjeva udaljenost (mm)	7	6	6	5	5	5	5	4	3	3	2
Tvrdoća HRC	36	38	38	39	39	39	39	40	41	41	42

Na temelju podataka iz tablice 7.3. i 7.4. ucrtavaju se U-krivulje po presjeku strojnog dijela kako je prikazano na slici 7.14.



Slika 7.14. U-krivulje po presjeku strojnoga dijela NT.23-DP.77

Tok tvrdoće prikazan krivuljom 1 (slika 7.14.) dobivamo gašenjem strojnog dijela u ulju s intenzitetom gašenja  $H = 0,3$ . Iznos tvrdoće po presjeku strojnoga dijela kreće se u vrijednostima od 32 HRC na površini do 26 HRC u jezgri strojnog dijela. Tvrdoća tog čelika za 50% martenzita iz Burnsova dijagrama (slika 5.5.) iznosi 28 HRC. Prema tome strojni dio ohlađivanjem u ulju nije prokaljen. Gašenjem u vodi s intenzitetom gašenja  $H = 1$  dobivamo tok tvrdoće prikazan krivuljom 2 (slika 7.14.) u vrijednostima od 42 HRC na površini do 36 HRC u jezgri strojnog dijela. Vrijednost tvrdoća jezgre strojnog dijela je veća od 28 HRC što znači da je strojni dio u potpunosti prokaljen.

## ZAKLJUČAK

Iz prvog dijela ovoga diplomskog rada zaključujemo da je čelik slitina željeza koja u sebi sadrži udio ugljika do 2,06 %. Prilikom procesa proizvodnje čelika iz sirovine i atmosfere u čelik ulaze razni prateći elementi među kojima su najvažniji sumpor, vodik, dušik, kisik, fosfor, mangan, silicij i aluminij. Niti jedna druga skupina materijala ne može legiranjem u tako širokom opsegu mijenjati mehanička, fizička i kemijska svojstva kao čelik što uz svoja početna odlična fizikalna i mehanička svojstva osigurava da se koristi u praktično svim područjima primjene što ga pak čini najvažnijim tehnološko-konstruktivskim materijalom.

Iz središnjeg djela ovoga diplomskog rada može se zaključiti da se čelik toplinski obrađuje kako bismo dobili željena mehanička, fizička i kemijska svojstva koja se ne mogu postići drugim postupcima ili metodama poput deformiranjem ili legiranjem. Promjene mehaničkih svojstava slitine tokom toplinske obrade ostvaruju se promjenom vrste, veličine i oblika mikrostrukturnih sastojaka slitine te promjenom gustoće i pokretljivosti mikronepravilnosti u strukturi slitine. Da bi se čelik mogao toplinski obrađivati mora prilikom zagrijavanja i ohlađivanja doći do fazne pretvorbe. Najvažnije fazne pretvorbe su tvorba austenita prilikom zagrijavanja i pretvorba toga austenita u perlit, martenzit ili bainit tokom gašenja. Zaključili smo da na dobivanje određene mikrostrukture najviše utječe udio ugljika u čeliku, prateći i legirajući elementi te brzina ohlađivanja. Čelici se često podvrgavaju toplinskoj obradi kaljenja u svrhu postizanja maksimalne moguće postizive i jednoličnije rasprostranjene tvrdoće. Proces toplinske obrade kaljenja sastoji se od jednolikog zagrijavanja strojnoga dijela do temperature austenitizacije, držanja na temperaturi austenitizacije određeno vremensko razdoblje i hlađenja odnosno gašenja u propisanom mediju kritičnom brzinom ohlađivanja kako bi se dobila martenzitna mikrostruktura u čeliku. Udio martenzitne strukture i njena dubina u čeliku odnosno strojnome dijelu ovisi o svojstvima zakaljivosti i prokaljivosti. Na zakaljivosti utječe samo čelikova mogućnost tvorbe austenita i udio ugljika u čeliku, a na prokaljivost još utječu legirajući elementi, dimenzije strojnoga dijela i prateći elementi u čeliku. Prokaljivost čelika se može dobiti eksperimentalno Jominyjevim pokusom koji se sastoji od kaljenja testnog uzorka čelika i ispitivanja tvrdoće uzorka Rockwellovom metodom.

U posljednjem dijelu diplomskog rada eksperimentalnim putem korištenjem Jominyjeve metode procijenjena je dubina prokaljivanja strojnoga dijela NT.23-DP.77 koji je izrađen od čelika za cementiranje 16MnCr5. Na osnovi provedenog pokusa izrađuje se U-krivulja koja

predstavlja tok tvrdoće kroz strojni dio i zaključuje se da nakon gašenja u ulju poprima na površini maksimalnu vrijednost u iznosu od 32 HRC, a u jezgri minimalnu vrijednost 26 HRC, a nakon gašenja u vodi poprima na površini maksimalnu vrijednost od 42 HRC, a u jezgri minimalnu vrijednost 36 HRC. Uvrštavanjem minimalnih vrijednost tvrdoće u Burnsov dijagram očitavamo da je tvrdoća jezgre manja od tvrdoće 50% martenzitne strukture čime zaključujemo da će strojni dio neće biti u potpunosti prokaljen ako se za sredstvo za gašenje koristi ulje dok je tvrdoća jezgre veća od tvrdoće 50% martenzitne strukture čime zaključujemo da će strojni dio biti u potpunosti prokaljen ako se za sredstvo za gašenje koristi voda. Svornjaci zahtijevaju vrijednost tvrdoće površine više od 60 HRC koja se ne može postići gašenjem u ulju ili vodi, što znači da se strojnom dijelu prije kaljenja mora povećati udio ugljika u površini odnosno strojni dio mora prije kaljenja proći postupak toplinske obrane cementiranja.



## LITERATURA

- [1] Toufar, F.: „Tehnički materijali 1“, Školska knjiga, Zagreb, 2007.
- [2] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: „Svojstva i primjena materijala“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [3] Kožuh, S.: „Specijalni čelici-skripta“, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [4] Smoljan, B.: „Toplinska obradba čelika, sivog i nodularnog lijeva“, Hrvatsko društvo za toplinsku obradbu i inženjerstvo površina, Zagreb, 1999.
- [5] Stupnišek, M.; Cajner, F.: „Osnove toplinske obrade metala“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001., s Interneta, <https://toaz.info/doc-view-2>, 26.05.2023.
- [6] „Čelik“, s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Celik>, 05.06.2023.
- [7] „Ferit“, s Interneta, [https://www.researchgate.net/figure/Optical-micrograph-of-a-full-ferrite-microstructure-FERR1-steel\\_fig1\\_257942902](https://www.researchgate.net/figure/Optical-micrograph-of-a-full-ferrite-microstructure-FERR1-steel_fig1_257942902), 05.06.2023.
- [8] „Perlit, austenit, cementit“, s Interneta, <https://www.fagteori.dk/materialelaere/varmebehandling-af-staal/jern-kulstofdiagrammet/perlit.aspx>, <https://www.fagteori.dk/materialelaere/varmebehandling-af-staal/jern-kulstofdiagrammet/austenit.aspx>, <https://www.fagteori.dk/materialelaere/varmebehandling-af-staal/jern-kulstofdiagrammet/cementit.aspx>, 05.06.2023.
- [9] „Ledeburit“, s Interneta, <http://gallery.thurnherr.net/picture.php?/606>, 05.06.2023.
- [10] „Martenzit“, s Interneta, <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/VDj-TO.pdf>, 05.06.2023.
- [11] Kraut, B.: „Strojarski priručnik“, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.
- [12] Gabrić, I.; Šitić, S.: „Materijali II“ Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2015.
- [13] „Čelik – Ispitivanje prokaljivosti čeonim gašenjem (ispitivanje prema Jominyju) (ISO 642:1999; EN ISO 642:1999)“, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2008.

- [14] Gabrić, I.: „Materijali II - 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), 15.06.2023.
- [15] Landek, D.: „Izbor čelika na temelju prokaljivosti“, s Interneta, <https://dokumen.tips/documents/v4-izbor-celika-na-temelju-prokaljivosti.html>, 15.06.2023.
- [16] Hercigonja, E.: „Strojni elementi 1“, Školska knjiga, Zagreb, 2005.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. a) Utjecaj $\gamma$ -genih elemenata na sustav željezo-metal; b) Utjecaj $\alpha$ -genih elemenata na sustav željezo-metal [4] .....	7
Slika 2.2. Utjecaj udjela legirajućih elemenata na temperaturu austenitizacije $A_1$ [5] .....	8
Slika 3.1. Stabilni dijagram stanja Fe-Fe <sub>3</sub> C [6].....	15
Slika 3.2. Mikrostruktura ferita [7] .....	16
Slika 3.3. Mikrostruktura austenita [8].....	16
Slika 3.4. Mikrostruktura cementita [8] .....	17
Slika 3.5. Mikrostruktura perlita [8].....	17
Slika 3.6. Mikrostruktura ledeburita [9].....	18
Slika 3.7. a) Mikrostruktura gornjeg bainita; b) Mikrostruktura donjeg bainita [10] .....	18
Slika 3.8. a) Mikrostruktura paketastog martenzita; b) Mikrostruktura igličastog martenzita [10] .....	19
Slika 4.1. Raspodjela ugljika u mikrostrukturnim fazama pri tvorbi austenita [4] .....	21
Slika 4.2. Dijagram tvorbe austenita pri kontinuiranim uvjetima ugrijavanja [4] .....	21
Slika 4.3. Promjena veličine kristalnog zrna austenita ovisno o temperaturi [4].....	22
Slika 4.4. Shematski prikaz perlitne pretvorbe [4].....	23
Slika 4.5. Utjecaj temperature na brzinu perlitne pretvorbe [4].....	23
Slika 4.6. Shema martenzitne kristalne rešetke [4] .....	24
Slika 4.7. Shema martenzitne strukture [4] .....	25
Slika 4.8. Utjecaj udjela ugljika u austenitu na: a) temperaturu martenzitne pretvorbe ugljičnih čelika; b) količinu zaostalog austenita u martenzitnoj strukturi; c) tvrdoću ugljičnog čelika i martenzitne mikrostrukture [4].....	26
Slika 4.9. Shematski prikaz područja bainitne pretvorbe [4] .....	27
Slika 4.10. Shematski prikaz pretvorbe austenita u bainit [4].....	27
Slika 5.1. Dijagram postupka kaljenja i popuštanja za neki podeutektoidni čelik [5] .....	29
Slika 5.2. Područje optimalnih temperatura austenitizacije za kaljenje ugljičnih čelika [12]..	30
Slika 5.3. Prikaz kontinuiranog ohlađivanja jednog austenitiziranog podeutektoidnog ugljičnog čelika u pripadnom TTT-dijagramu [12] .....	31
Slika 5.4. Načelni izgled krivulje hlađenja za neka različita sredstva za hlađenje [12].....	32
Slika 5.5. Burnsov dijagram [4] .....	33

Slika 5.6. Primjeri raspodjele tvrdoće nakon gašenja čela a) uzoraka različitih promjera; b) različitim sredstvima za gašenje [4] .....	34
Slika 6.1. Shema naprave za ohlađivanje epruvete po Jominyju [5].....	37
Slika 6.2. Prikaz krivulja ohlađivanja Jominyjeve epruvete u TTT-dijagramu i tijekom postignutih tvrdoća [5] .....	38
Slika 6.3. Primjer načina utvrđivanja idealnog kritičnog promjera $D_i$ i kritičnog promjera $D_k$ iz rezultata Jominyjeva pokusa [5].....	39
Slika 6.4. Crafts-Lamontovi dijagrami [15] .....	41
Slika 6.5. Crafts-Lamontovi dijagrami nastavak [15] .....	42
Slika 7.1. Nacrt strojnog dijela NT.23-DP.77 .....	44
Slika 7.2. Jominyjeva uzorak [13].....	46
Slika 7.3. a) Peć za toplinsku obradu;; b) Oprema .....	47
Slika 7.4. a) Naprava za Jominyjev pokus; b) Trenutak stavljanja uzorka u napravu .....	47
Slika 7.5. Čeono gašenje uzorka na početku pokusa.....	48
Slika 7.6. Stanje uzorka nakon 1 minute i 2 minute gašenja.....	48
Slika 7.7. Stanje uzorka nakon 3 minute i 4 minute gašenja.....	49
Slika 7.8. a) Jominyjev uzorak nakon kaljenja; b) Jominyjev uzorak nakon brušenja .....	49
Slika 7.9. Tvrdomjer za ispitivanje tvrdoće Rockwellovom metodom.....	50
Slika 7.10. Ravnalo i pomično mjerilo kojim se mjeri udaljenost od čela uzorka.....	51
Slika 7.11. Izgled površina Jominyjevog uzorka po završetku ispitivanja tvrdoće .....	51
Slika 7.12. Provjera udaljenosti od gašenog čela Jominyjevog uzorka.....	52
Slika 7.13. Jominyjeve krivulje za čelik 16MnCr5 .....	53
Slika 7.14. U-krivulje po presjeku strojnoga dijela NT.23-DP.77 .....	55

## POPIS TABLICA

Tablica 7.1. Propisani kemijski sastav čelika 16MnCr5 [11] .....	44
Tablica 7.2. Eksperimentalno dobivene vrijednosti tvrdoće .....	53
Tablica 7.3. Očitane vrijednosti tvrdoće za $H = 0,3$ .....	54
Tablica 7.4. Očitane vrijednosti tvrdoće za $H = 1$ .....	54

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu je procijenjena dubina prokaljivanja strojnoga dijela NT.23-DP.77 nakon toplinske obrade kaljenja.

U prvome dijelu ovoga diplomskog rada obrađen je teorijski dio o čeliku, čelikova osnovna svojstva, njegovu karakterizaciju po raznim kriterijima te utjecaju raznih pratećih elemenata, nemetalnih uključaka i legirajućih elemenata na svojstva čelika.

U središnjem dijelu rada obrađen je teorijski dio o toplinskoj obradi čelika, opisan je postupak toplinske obrade čelika i fazne pretvorbe čelika uslijed toplinske obrade. Također detaljnije je opisan postupak toplinske obrade kaljenja, svojstva prokaljivosti i zakaljivosti čelika te je opisana Jominyjeva metoda procjene prokaljivosti čelika.

U posljednjem dijelu rada detaljno se prikazuju svi koraci izvođenja Jominyjevog pokusa i ispitivanja tvrdoće uz svu korištenu opremu i naprave. Na kraju diplomskog rada na temelju eksperimentom dobivenih rezultata i Crafts-Lamontovih dijagrama konstruira se U-krivulja za slučajeve gašenja u ulju i gašenja u vodi. U-krivulja prikazuje procijenjenu dubinu prokaljivanja strojnog dijela NT.23-DP.77. Iz dobivenih vrijednosti zaključujemo da u oba slučaja strojni dio neće biti u potpunosti prokaljen i da nema potrebnu vrijednost tvrdoće površine za svornjake te da se strojni dio mora cementirati prije kaljenja.

**Ključne riječi:** čelik, čelici za cementiranje, 16MnCr5, toplinska obrada čelika, fazne pretvorbe, kaljenje, prokaljivost, zakaljivost, Jominy metoda, Crafts-Lamontovi dijagrami

## SUMMERY

In this masters's thesis, the estimation of hardening depth of the machine part NT.23-DP.77 after the heat treatment of hardening was approximated.

In the first part of the thesis, the steel is explained through its basic properties and characterization according to various criteria also the influence of various accompanying elements, non-metallic inclusions and alloying elements on the properties of steel are explained.

In the central part of the thesis, the theory of heat treatment of steel is covered, the process of heat treatment of steel and phase transformation of steel due to heat treatment is discussed. Also the process of heat treatment of hardening, properties of hardening and hardenability of steel is described in more detail and Jominy method of assessing the hardenability of steel is explained.

In the last part of the thesis, all the steps of performing Jominy experiment and hardness testing are explained in detail, along with all the equipment and tools used. At the end of the thesis, based on the results from experiment and Crafts-Lamont diagrams, a U-curve is constructed for the cases of quenching in oil and quenching in water. The U-curve shows the estimated of hardening depth of the machine part NT.23-DP.77. Base on the results, we can conclude that in both cases the machine part will not be fully hardened and that it does not have the required surface hardness value for the use as a material for bolts and that the machine part must go through heat treatment process of carburisation before hardening.

**Keywords:** steel, steel for carburisation, 16MnCr5, steel heat treatmant, phase transformations, hardening, hardness, hardening depth, Jominy method, Crafts-Lamont diagrams