

Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela MH.22-PP.07

Holcer, Maks

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:934398>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA
MH.22-PP.07**

Rijeka, ožujak 2023.

Maks Holcer

0069080199

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA
MH.22-PP.07**

Mentor: izv.prof.dr.sc. Dario Iljkić

Rijeka, ožujak 2023.

Maks Holcer

0069080199

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Rijeka, 16. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za materijale**
Predmet: **Materijali II**
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Maks Holcer (0069080199)**
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela MH.22-PP.07 / Estimation of hardening depth of workpiece MH.22-PP.07**

Opis zadatka:

Potrebno je procijeniti dubinu prokaljivanja strojnog dijela MH.22-PP.07 nakon kaljenja. Potrebno je teorijski obraditi i opisati pojam prokaljivosti, a zatim opisati i usporediti postojeće metode za procjenu prokaljivosti.

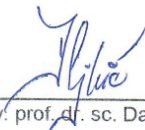
Tvrdoću i dubinu prokaljenog sloja strojnog dijela MH.22-PP.07 potrebno je procijeniti primjenom Jominyjevog pokusa, na osnovi eksperimentalno utvrđene Jominyjeve krivulje. Potrebno je proanalizirati rezultate Jominyjevog pokusa i donijeti odgovarajuće zaključke. Također, potrebno je opisati postrojenje za izvođenje Jominyjevog pokusa.

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



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Dario Iljkić

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA

Ovim putem izjavljujem da sam samostalno napravio završni rad pod nazivom “Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela MH.22-PP.07”, primjenjujući znanje koje sam stekao tijekom studiranja na preddiplomskom sveučilišnom studiju strojarstava i koristeći navedenu stručnu literaturu.

Maks Holcer

ZAHVALA

Najviše se želim zahvaliti svojoj obitelji, koja mi je uvijek pružala podršku tijekom studiranja.

Također se zahvaljujem svojem mentoru izv.prof.dr.sc. Dariu Iljkiću na savjetima koje mi je pružio za izradu ovog rada.

Zahvaljujem se i svojim prijateljima koji su mi uvijek bili spremni pomoći.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TOPLINSKA OBRADA METALA	2
2.1. Vrste toplinske obrade metala	3
3. FAZNE PRETVORBE U ČELIKU	7
3.1. Tvorba austenita	8
3.2. Pretvorba pothlađenog austenita	11
3.3. Pretvorba austenita u perlit	12
3.4. Pretvorba austenita u martenzit	14
3.5. Pretvorba austenita u bainit	18
4. RAZMATRANJE TTT-DIJAGRAMA	21
5. KALJIVOST ČELIKA	24
5.1. Prokaljivost	24
5.2. Zakaljivost	25
6. METODE ZA PROCJENU PROKALJIVOSTI	28
6.1. Metoda totalne prokaljenosti	28
6.2. Justova metoda utvrđivanja stupnja zakaljenosti	28
6.3. Grossmanova metoda	30
6.3.1. Način provođenja ispitivanja.....	32

6.4. Jominyeva metoda.....	35
6.4.1 Crafts-Lamontovi dijagrami.....	38
7. PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA MH.22-PP.07.....	41
7.1. Karakteristike čelika 41Cr4.....	42
7.2. Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela MH.22-PP.07.....	43
8. ZAKLJUČAK.....	45
LITERATURA.....	47
POPIS SLIKA.....	48
POPIS TABLICA.....	50
SAŽETAK.....	51
SUMMARY.....	52

1. UVOD

Svrha ovog završnog rada je procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela MH.22-PP.07 pomoću Jominyevog pokusa, odnosno procjena tvrdoće i dubine navedenog strojnog dijela na osnovi Jominyeve krivulje.

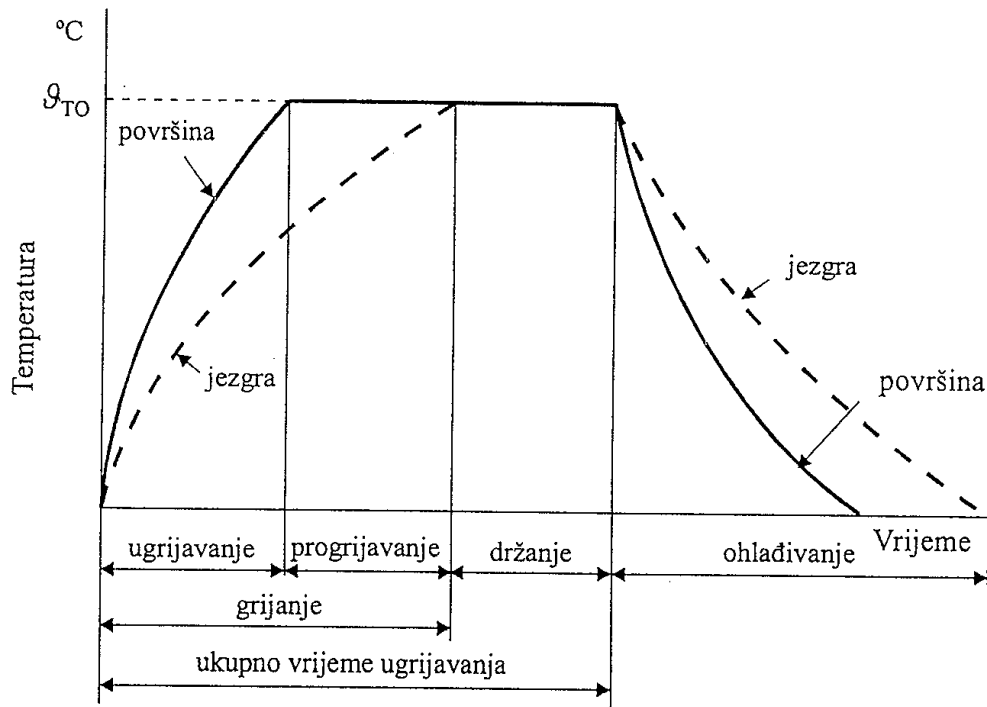
U teorijskom dijelu završnog rada objašnjena je toplinska obrada metala i vrste toplinske obrade, fazne pretvorbe u čeliku zajedno sa opisom svake pretvorbe. Ključno je dobro razumjeti TTT-dijagram za pravilno izvođenje toplinske obrade zbog čega je detaljno razmotren u jednom od poglavlja. Nakon toga prelazimo na pojam kaljivosti koji opisuje sposobnost čelika da postigne veću tvrdoću na površini i jednolikiju tvrdoću na površini, a mikrostruktura koja se postiže kaljenjem ovisi o zakaljivosti i prokaljivosti koje su također obrađene u radu. Četiri glavne metode za procjenu prokaljivosti su detaljno razrađene i opisane, a najviše pažnje se daje posljednjoj, odnosno Jominyevoj metodi iz razloga što ju koristimo u praktičnom dijelu zadatka. Na kraju teorijskog dijela opisane su i metode za mjerenje tvrdoće koje se često koriste zbog svoje jednostavnosti i brzine provođenja.

Na kraju, u praktičnom dijelu rada izvršena je procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela MH.22-PP.07 pomoću Jominyevog pokusa te je opisan način izvođenja zadatka i pojašnjeni su rezultati dobivenog pokusa.

2. TOPLINSKA OBRADA METALA

Toplinska obrada je proces u kojem se predmet ciljano izlaže temperaturno-vremenskim ciklusima kako bi se dobila željena mikrostruktura i željena mehanička, fizikalna i kemijska svojstva[1].

Osnovni parametri postupaka toplinske obrade su temperatura T (K) i ϑ ($^{\circ}\text{C}$) i trajanje t (s, min, h) prema definiciji. Suprotno pretpostavci napravljenoj prilikom snimanja ravnotežnih dijagrama Fe-Fe₃C, gdje se pretpostavljalo da je brzina hlađenja bila izuzetno spora i da su karakteristike materijala izvedene iz njegove mikrostrukture, trajanje nije beskonačno. Čelične mikrostrukture proizvedene toplinskom obradom razlikovat će se od onih proizvedenih u ravnotežnim uvjetima jer razdoblje hlađenja nije beskonačno dugo, što rezultira dijagramom Fe-Fe₃C. Nadalje, budući da je primarni cilj lijevanja, kovanja, valjanja i zavarivanja promjena oblika, a ne mikrostrukture, možemo zaključiti da ti procesi nisu toplinske obrade. Potpuna difuzija atoma željeza i ugljika moguća je u legurama Fe-C ako je vrijeme hlađenja beskonačno. Ako se period hlađenja stalno skraćuje, tj. difuzija postaje sve manje potpuna, može čak potpuno prestati kako se povećava brzina hlađenja. Difuzija je fizički proces, tj. migracija atoma ovisi o temperaturi i vremenu. Neki će strukturni oblici imati niži stupanj stabilnosti od metastabilnog stupnja kao rezultat smanjenja količine dostupnog vremena procesa. Svaki postupak toplinske obrade može se grafički prikazati pomoću osnovnih parametara toplinske obrade temperature i vremena (T ili ϑ i t) i izvedenog parametra (v), kao što je prikazano na slici 2.1. [1].



Slika 2.1. Dijagram postupka toplinske obrade [1]

2.1. Vrste toplinske obrade metala

Toplinskom obradom slitina se može približiti stabilnom stanju ili udaljiti od njega. Ako se temperatura mijenja polako ili se slitina drži na konstantnoj temperaturi, u pravilu će se približiti stabilnom stanju. Ako se temperatura naglo mijenja, osobito ako se naglo hladi, u pravilu će se udaljiti od stabilnog stanja. Ovisno o promjenama u mikrostrukturi i svojstvima slitina, mogu se navesti različite vrste toplinske obrade koje su sljedeće [2]:

1) Žarenja bez prekrystalizacije - slitina zagrijava ispod kritične temperature fazne pretvorbe, odnosno temperature na kojoj nastaje nova faza ili se značajno mijenjaju količinski udjeli postojećih faza. Na ovaj način, slitina se obrađuje tako da se približi stabilnom stanju sustava. Osnovne vrste žarenja bez prekrystalizacije su sljedeće [2]:

Rekristalizacijsko žarenje - Tijekom procesa povećane hladne deformacije, kristalna zrna se deformiraju u smjeru najveće plastične deformacije. Rekristalizacijskim žarenjem se ova deformacija može popraviti, pri čemu se deformirana zrna, koja su prije svega izdužena nakon hladne deformacije, ponovno preobražavaju u poligonalni oblik [2,4].

Žarenje za smanjenje vlastitih zaostalih naprezanja u slitini - U strojnom dijelu, tijekom obrade ili primjene, mogu se nakupiti vlastita naprezanja. Međutim, ova naprezanja se mogu smanjiti na nekoliko načina. Jedan način je dugotrajno držanje dijelova na sobnoj temperaturi, drugi način je primjena elastičnih vibracija, dok se treći način sastoji u zagrijavanju dijelova kako bi se smanjila njihova napetost [2,3,4].

Stabilizacijsko žarenje - postupak kojim se ubrzavaju spontani procesi u slitini, čime se smanjuju eventualne promjene dimenzija ili oblika strojnog dijela nakon obrade. Cilj stabilizacijskog žarenja je dovesti slitinu u ravnotežno stanje kako bi se spriječile daljnje promjene dimenzija i oblika tijekom korištenja dijela. Nakon stabilizacijskog žarenja, slitina se smatra stabiliziranom i ne bi trebalo biti daljnjih promjena u dimenzijama ili obliku dijela tijekom njegove primjene [2].

2) Žarenje s prekristalizacijom je postupak koji se sastoji od zagrijavanja slitine iznad kritične temperature fazne pretvorbe, tj. iznad temperature na kojoj nastaje nova faza ili se bitno mijenjaju količinski udjeli postojećih faza. Nakon zagrijavanja, slitina se hladi na način koji ne smije bitno udaljiti slitinu od stabilnog stanja. Ovim postupkom slitina se približava stabilnom stanju. Postoje dvije osnovne vrste žarenja s prekristalizacijom [2]:

Normalizacijsko žarenje - postupak toplinske obrade koji se koristi za ujednačavanje mikrostrukture slitine, odnosno za ujednačavanje oblika i veličine kristalnih zrna. Ovaj postupak se provodi zagrijavanjem slitine do temperature iznad gornje kritične temperature, a zatim se brzo ohladi na zrak na sobnu temperaturu. Normalizacijsko žarenje se obično primjenjuje nakon grubog kovanja ili lijevanja, kako bi se smanjile napetosti koje su nastale tijekom procesa oblikovanja i kako bi se poboljšala obradivost materijala. Ovim postupkom se također poboljšavaju mehanička svojstva materijala, kao što su čvrstoća i otpornost na udarce [2,4].

Homogenizacijsko žarenje - obrada koja se koristi za ujednačavanje raspodjele elemenata u slitini. To se postiže zagrijavanjem slitine na visoku temperaturu, čime se omogućuje da se elementi rasporede ravnomjerno. Homogenizacijsko žarenje koristi se uglavnom kod slitina s više komponenti kako bi se postigla ravnomjerna raspodjela elemenata i tako osigurala ujednačena svojstva u cijeloj slitini [2,4].

3) Gašenje je proces brzog hlađenja slitina kako bi se spriječile ravnotežne pretvorbe tijekom hlađenja. Ova metoda obrade uzrokuje da slitina bude udaljena od stabilnog stanja. Dvije su osnovne vrste gašenja [2]:

Kaljenje - proces toplinske obrade kojom se postiže transformacija visokotemperaturne faze ili mikrostrukture u novu neravnotežnu fazu ili mikrostrukturu [2,3].

Gašenje bez faznih pretvorbi - podrazumijeva brzo ohlađivanje slitine tako da se visokotemperaturna faza ili mikrostruktura sačuva i fiksira na nižim temperaturama, a da pri tome ne dođe do faznih pretvorbi [2].

4) Ugrijavanje nakon gašenja se obično provodi kako bi se postiglo stabilnije stanje materijala nakon brzog ohlađivanja. Ovo se postiže zagrijavanjem materijala na određenu temperaturu, održavanjem na toj temperaturi neko vrijeme, a zatim postupnim hlađenjem na sobnu temperaturu. Vrste ugrijavanja nakon gašenja su [2]:

Popuštanje - proces termičke obrade koji se koristi za djelomičnu ili potpunu promjenu mikrostrukture slitina nakon kaljenja. Ovaj proces se sastoji od ugrijavanja slitine na temperaturama nižim od temperature fazne pretvorbe u visokotemperaturnu fazu, što omogućuje relaksaciju naprežanja i smanjenje krhkosti slitine, a time i povećanje njezine žilavosti [2,4].

Precipitacijsko žarenje i starenje - Precipitacijom se postiže izdvajanje odnosno taloženje faze u obliku nakupina ili precipitata iz pothlađene prezasićene visokotemperaturne faze. Starenjem se postiže daljnje taloženje i rast precipitata, što dovodi do povećanja tvrdoće i čvrstoće legure [2].

5) Toplinsko-kemijska obrada je proces koji uključuje zagrijavanje slitine u sredstvu koje sadrži visoku koncentraciju elemenata koji se mogu difundirati u materijal. Kroz proces difuzije, atomi iz okoline ulaze u slitinu, a sustav se približava stabilnom stanju. Ovom obradom se može promijeniti kemijski sastav i mikrostruktura površinskog sloja strojnog dijela [2].

3. FAZNE PRETVORBE U ČELIKU

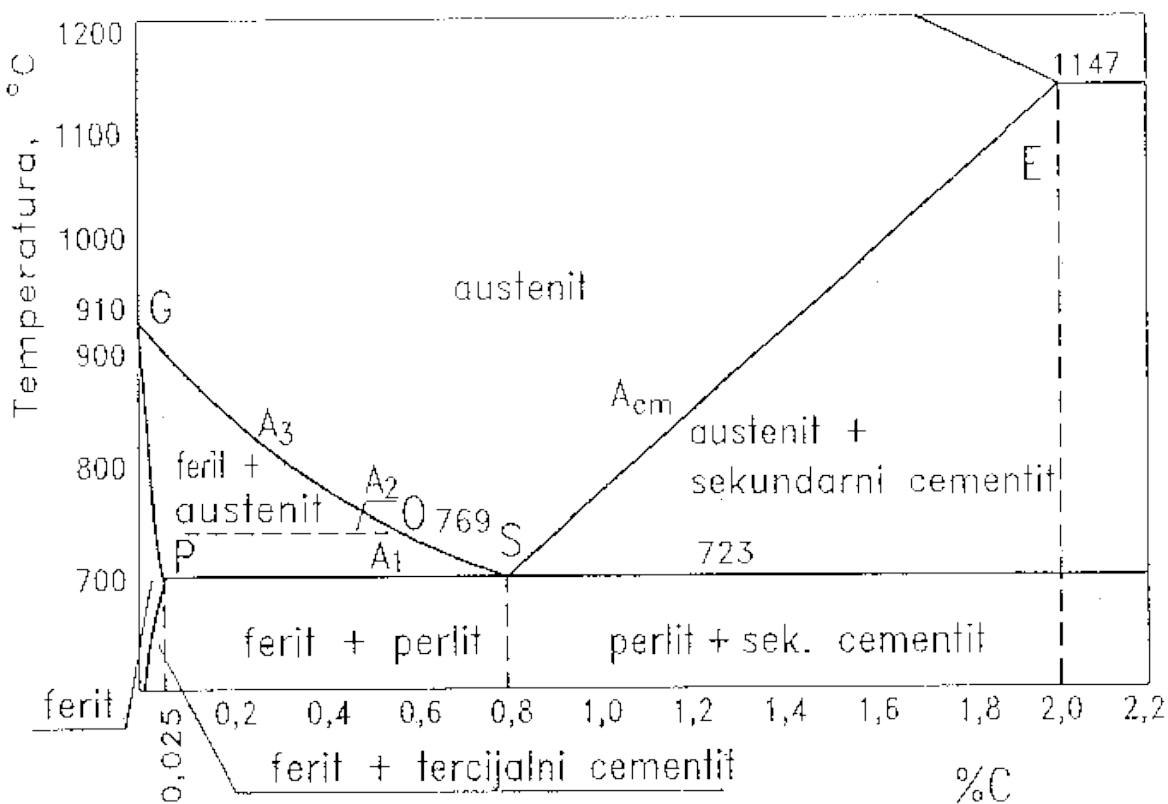
Temelj za analizu toplinske obrade čelika je Fe-Fe₃C dijagram stanja, prikazan na slici 3.1. Na tom dijagramu su prikazana karakteristična područja faza, kritične temperature prekrystalizacije u uvjetima ravnoteže koje odgovaraju sporom zagrijavanju ili hlađenju čelika. Mikrostrukturni sastojci čelika koji se odnose na ravnotežni dijagram Fe-Fe₃C su ferit, perlit, sekundarni cementit, te austenit iznad kritične temperature A₁ [2].

1) Ferit je kristalna faza koja se sastoji od mješavine željeza i ugljika s prostorno-centriranom kubičnom rešetkom, ili drugim riječima, krute otopine ugljika u α -željezu s najviše 0,025% ugljika.

2) Sekundarni cementit je kemijski spoj željeza i ugljika, točnije željezni karbid Fe₃C koji sadrži 6,67% ugljika.

3) Perlit je eutektoidna mikrostruktura koja se sastoji od eutektoidnih kristalnih zrna ferita i cementita, koji su raspoređeni u slojevima.

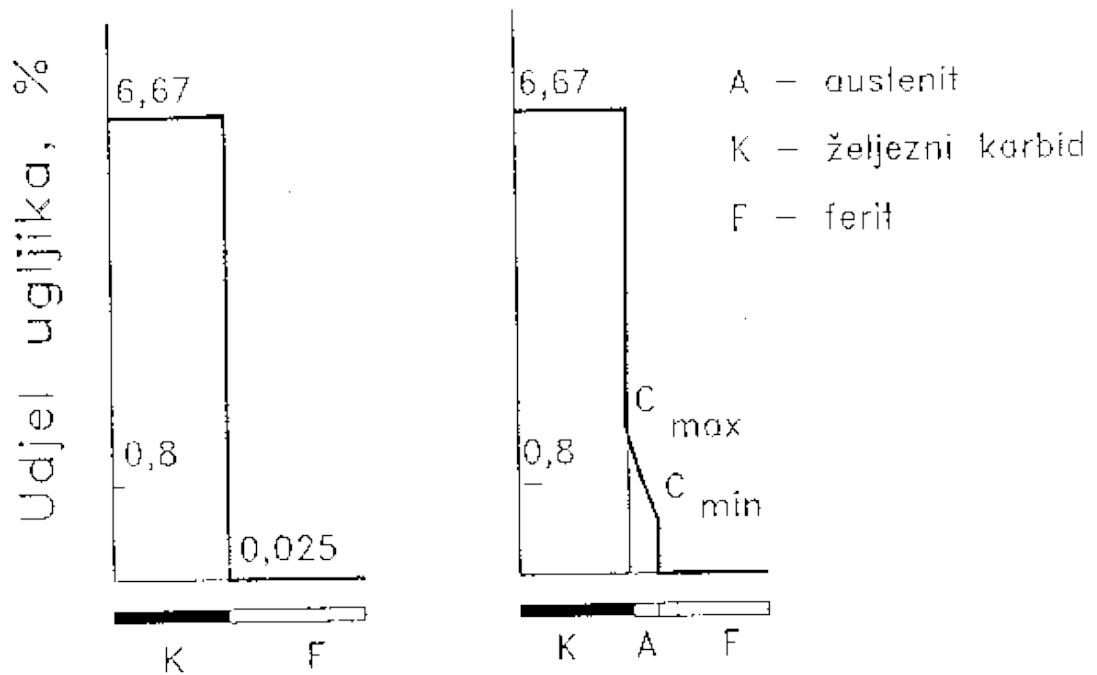
4) Austenit je kristalna faza koja se sastoji od mješavine željeza i ugljika s plošno-centriranom kubičnom rešetkom, tj. krute otopine ugljika u γ -željezu s najviše 2,03% ugljika [2].



Slika 3.1. Dio faznog Fe-Fe₃C dijagrama [2]

3.1. Tvorba austenita

Tijekom procesa formiranja austenita, dvije faze koje imaju različite kemijske sastave - ferit i cementit - se putem difuzijskog mehanizma pretvaraju u treću fazu, austenit. Ovaj prijelaz nastaje kada se postignu termodinamički i kinetički uvjeti za tvorbu austenita, odnosno kada je slobodna energija austenita dovoljno niska u odnosu na slobodnu energiju feritno-karbidne smjese, te postoji dovoljno vremena za difuzijski mehanizam koji stvara austenit. Najčešće mjesto nastanka austenita je na granici feritne i cementitne faze, gdje se pojavljuju mjesta s minimalnom slobodnom energijom za određenu temperaturu i kemijski sastav u području kritične veličine austenita. Nakon toga, daljnji rast austenitne faze nastavlja se putem difuzije ugljika u novonastaloj fazi [2].

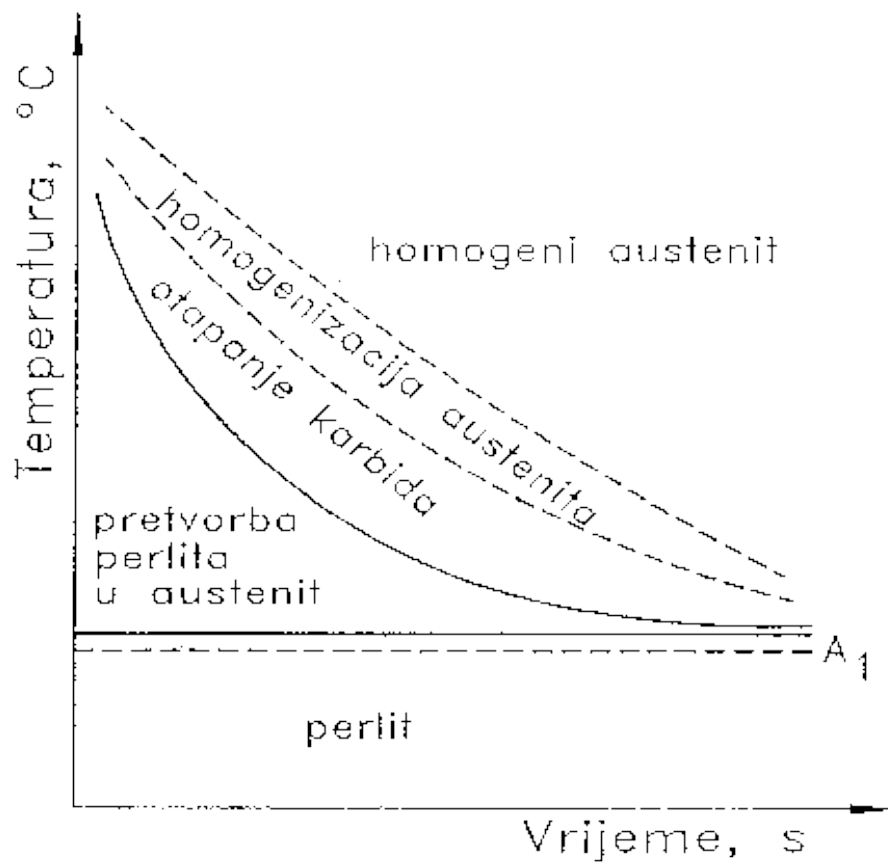


Slika 3.2. Raspodjela ugljika u procesu tvorbe austenita [2]

Granica između austenitne i karbidne faze predstavlja mjesto na kojem se može pronaći maksimalna koncentracija ugljika u austenitu (C_{max}), dok se granica između austenitne i feritne faze koristi za pronalaženje minimalne koncentracije ugljika u austenitu (C_{min}) (slika 3.2). Ove vrijednosti se mogu prikazati na dijagramu stanja Fe-Fe₃C kao crta SE za C_{max} i crta GS za C_{min} , kako je prikazano na slici 3.1. [2].

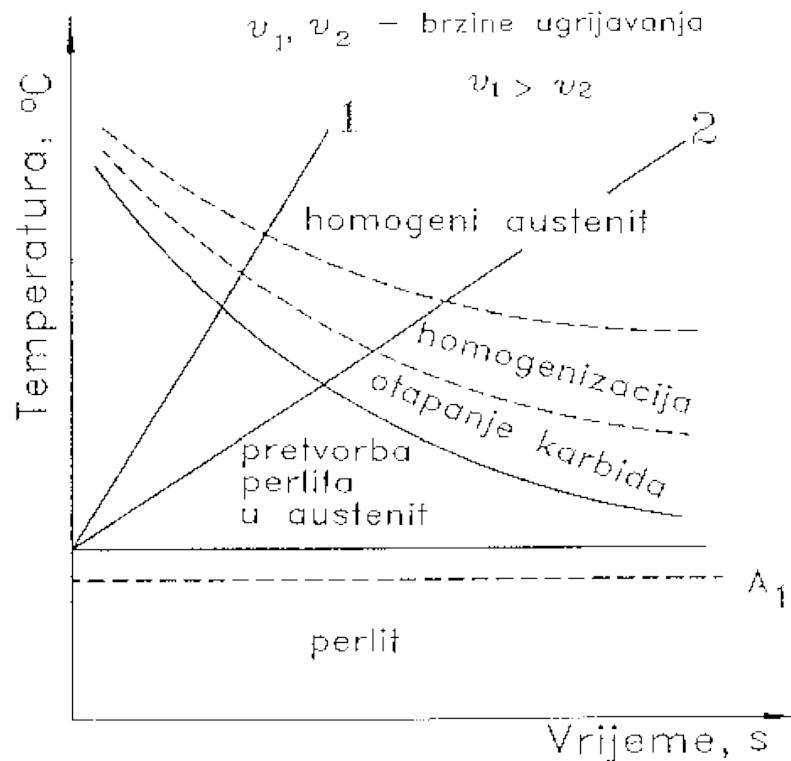
Istraživanja su pokazala da je brzina tvorbe austenita direktno proporcionalna brzini difuzije ugljika u novonastaloj fazi. Iako se u toplinskoj obradi čelika često naglasak stavlja na brzinu procesa pri hlađenju, postoje situacije u kojima je brzina formiranja austenita od posebnog interesa. Kada se temperatura podigne iznad ravnotežne, povećava se difuzija atoma i razlika u slobodnoj energiji između stabilne i trenutne strukture. Svako povećanje temperature iznad ravnotežne temperature ubrzava proces pretvorbe perlitne strukture u austenit [2].

Na slici 3.3. se može vidjeti da se trajanje tvorbe austenita smanjuje kako se temperatura povećava. Proces formiranja homogenog austenita sastoji se od tri faze: pretvorbe perlita u austenit, otapanja karbida i homogenizacije austenita [2].



Slika 3.3. Shematski prikaz dijagrama izotermičke tvorbe austenita [2]

Na slici 3.4. su prikazane dvije linije ugrijavanja (1 i 2) za dva različita režima ugrijavanja. Linija 1 predstavlja veću brzinu ugrijavanja. Iz slike se može zaključiti da se s povećanjem brzine ugrijavanja postižu više temperature u kraćem vremenu, što dovodi do skraćivanja vremena pretvorbe. Također, primjetno je da se karakteristične temperature tvorbe austenita pomiču prema višim temperaturama kada se koristi veća brzina ugrijavanja [2].



Slika 3.4. Dijagram tvorbe austenita pri kontinuiranim uvjetima ugrijavanja [2]

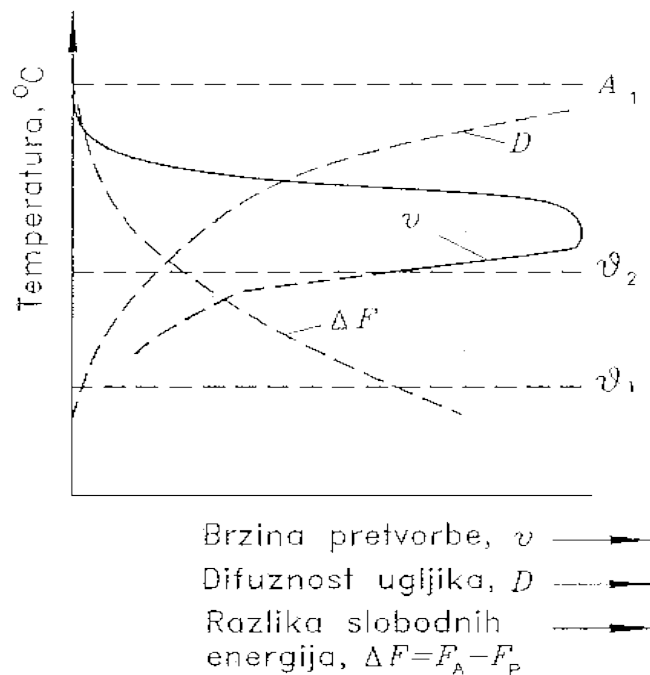
Držanje čelika na povišenim temperaturama dovodi do povećanja kristalnog zrna austenita. Ovaj proces rasta austenitnog zrna je spontan i prati smanjenje slobodne energije. Postoje dvije vrste čelika prema sklonosti rasta austenitnog zrna: krupnozrnati i sitnozrnati čelici. Vrsta čelika prema veličini austenitnog zrna određuje se ocjenom nakon osam sati držanja na 930°C . Veličina austenitnog zrna može se utvrditi pomoću prijeloma ili metalografske analize prema ASTM standardima. Prema ASTM-u, veličina kristalnog zrna određuje se pomoću tzv. "broja veličine zrna", koji se određuje brojanjem broja kristalnih zrna na površini od 645 mm^2 u povećanju od 100:1 [2].

3.2. Pretvorba pothladenog austenita

Kada se čelik ohladi ispod temperature A_1 (slika 3.4.), austenit postaje nestabilan i sklon je pretvaranju u niskotemperaturne faze. Način na koji se austenit raspada u ove faze ovisi o brzini hlađenja, pri čemu se pothlađeni austenit može raspasti kroz različite mehanizme [2].

3.3. Pretvorba austenita u perlit

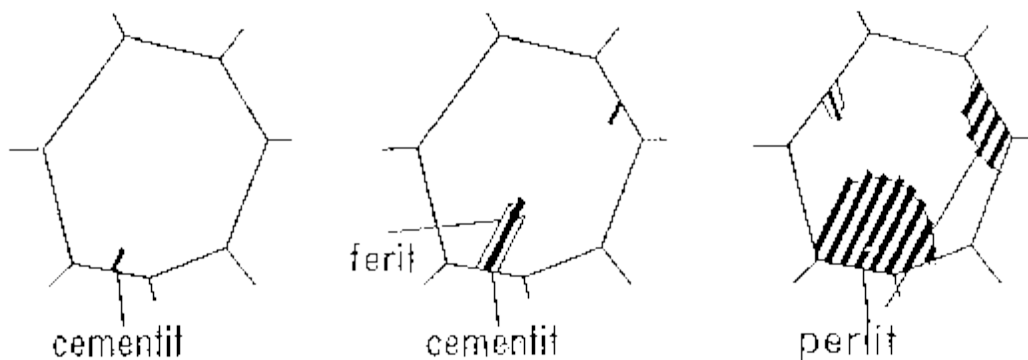
Austenit se raspadne na perlit kada se ohladi sporije. Tijekom formiranja perlitne strukture, austenit se dijeli na ferit i željezni karbid. Ferit sadrži vrlo malo ugljika, manje od 0,0025%, dok cementit sadrži 6,67% ugljika. Za stvaranje perlita potrebna je potpuna difuzija metalnih i nemetalnih atoma, što znači da kod nelegiranog čelika perlit nastaje kada se atomi ugljika i željeza potpuno difundiraju. Postoje dva uvjeta za perlitnu pretvorbu: 1) dovoljna energetska nestabilnost te 2) dovoljna difuzija atoma [2].



Slika 3.5. Utjecaj temperature na brzinu perlitne pretvorbe [2]

Na temperaturi A_1 (slika 3.5.), razlika u slobodnoj energiji između austenita i perlita je nula. Difuzija ugljika za raspad austenita nije moguća ispod temperature od 200°C (A_1), a difuzija željeza prestaje na višim temperaturama, približno 450°C . Zbog toga je difuzijski raspad austenita moguć ispod temperature A_1 i iznad temperature A_2 . Kako temperatura pada ispod temperature A_1 , razlika u slobodnoj energiji raste, a difuzija se smanjuje. Ove dvije veličine utječu na brzinu perlitne pretvorbe, koja u početku raste s povećanjem pothlađenja, doseže maksimum pri određenoj pothlađenosti, a zatim se smanjuje. Ispod temperature A_1 , samo je bezdifuzijska pretvorba moguća.

Za većinu čelika između temperature ϑ_1 i ϑ_2 , perlitna pretvorba predaje mjesto drugoj pretvorbi za koju su na tim temperaturama uvjeti povoljniji. Na temperaturama pretvorbe između temperature A_1 i ϑ_2 , pretvorba započinje pojavom klica cementita, obično na granicama austenitnih zrna, slika 3.6. [2].



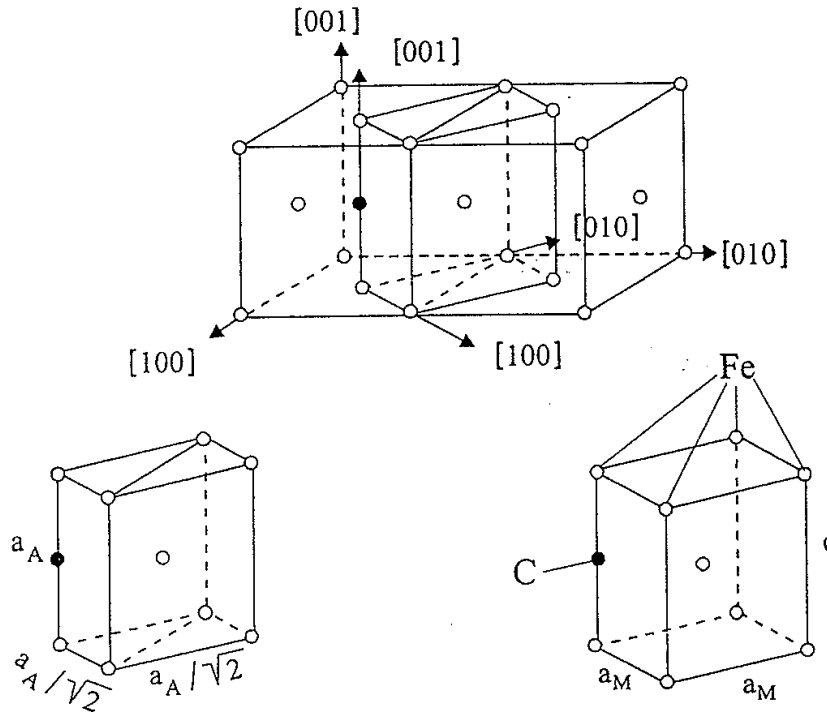
Slika 3.6. Prikaz perlitne pretvorbe [2]

Klice se razvijaju prema unutrašnjim slojevima austenitne strukture, dok se područje oko cementita osiromašuje ugljikom i postaje ferit. Kako ravnotežna topljivost ugljika u feritu nije jednaka trenutnoj, višak ugljika se iz ferita izbacuje u susjedna austenitna područja, što čini da postanu prezasićena ugljikom, a dijelom i da se pretvore u cementit. Perlitna zrna rastu jednako u sve tri dimenzije, a brzina njihove formacije ovisi o stabilnosti austenita, brzini stvaranja novih faza i brzini rasta novih faza. Dakle, brzina perlitne pretvorbe na određenoj temperaturi ovisi o kemijskom sastavu austenita, veličini austenitnog zrna i njegovoj homogenosti, te količini neotopljenih čestica karbida [2].

Dimenzija lamela u perlitu izravno ovisi o difuziji ugljika u austenitu. Kako se pothlađenje povećava, razlika u slobodnoj energiji se povećava, što povećava broj potencijalnih klica novih faza. Istodobno, difuzija ugljika u austenitu se smanjuje, pa nakon pretvorbe na nižim temperaturama perlit postaje finije strukture. Na višim temperaturama stvara se mekši perlit s grubljim lamelama, a na nižim temperaturama stvara se tvrdi i čvršći perlit s finijim lamelama [2].

3.4. Pretvorba austenita u martenzit

Formiranje martenzita moguće je samo iz austenita, a veličinu usklađenog zrna, udio i raspored ugljika koji se rastvara u austenitu značajno utječe na veličinu zrna i mehanička svojstva martenzita [5].

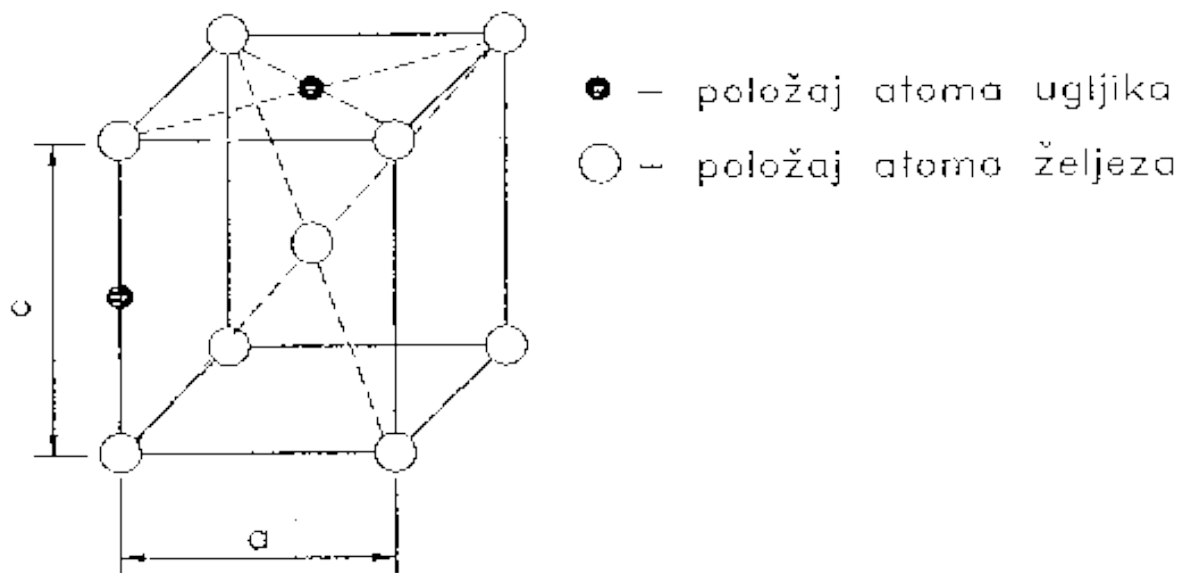


Slika 3.7. Nastanak martenzita od austenita [1]

Kada se čisto željezo dovoljno brzo ohladi na temperature od otprilike 500°C, γ -željezo s kubičnom plošno-centriranom kristalnom rešetkom transformira se u α -željezo s kubičnom prostorno-centriranom kristalnom rešetkom. Martenzitna pretvorba sadrži procese smicanja, gdje se atomi u kristalnoj rešetki γ -željeza pomiču prema karakterističnim pravcima, zauzimajući položaje u kristalnoj rešetki α -željeza. Kod martenzitne pretvorbe, atomi zadržavaju svoje susjede, a pomak atoma je manji od polovice dijagonale austenitne kristalne rešetke. U slitinama željeza i ugljika, otapanjem ugljika u austenitu stabilizira se γ -područje. Nakon brzog hlađenja čelika iz austenitnog područja, dio austenita na niskim temperaturama martenzitnom pretvorbom smičnim

mehanizmom transformira se u martenzit, dok se drugi dio austenita zadržava u mikrostrukturi. Zbog toga postoji određeni dio zaostalog austenita na sobnoj temperaturi, što rezultira mikrostrukturama koje su formirane od martenzita i zaostalog austenita [2].

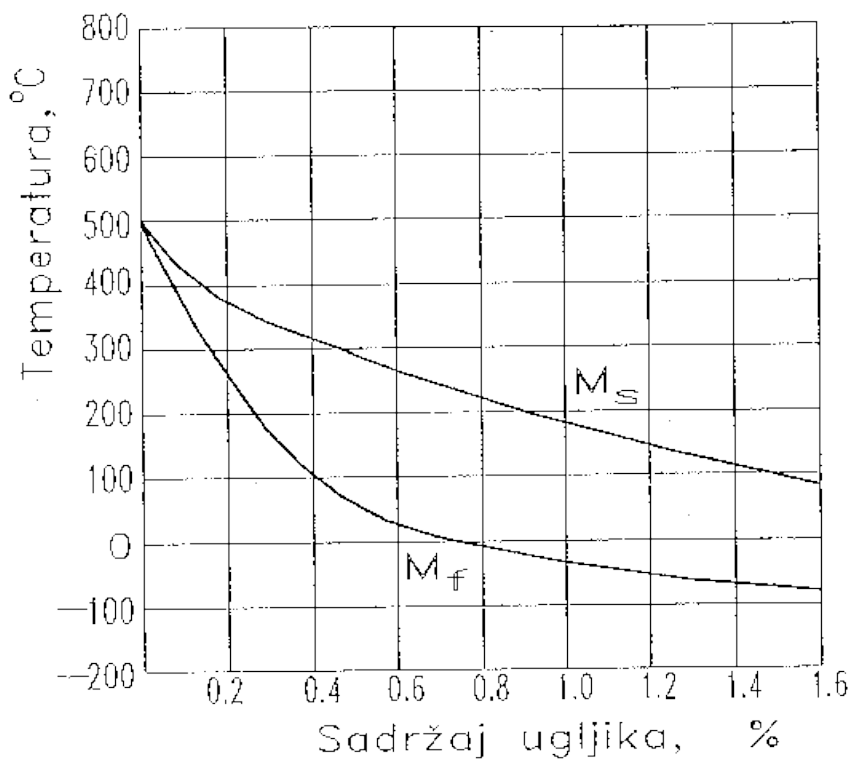
Martenzit je tvrda legura koja se sastoji od otopine ugljika u α -željezu s najviše 2,03%C. Koncentracija ugljika u martenzitu jednaka je koncentraciji ugljika u prethodnom austenitu. Kristalna rešetka martenzita nije kubična kao kod ferita, već je tetragonalna. Na slici 3.8. prikazani su mogući položaji atoma ugljika u martenzitnoj kristalnoj rešetki. U stvarnosti, broj atoma ugljika u martenzitu je mnogo manji nego na slici [2].



Slika 3.8. Prikaz martenzitne kristalne rešetke [2]

Martenzit ne može nastati izravno iz smjese ferita i karbida zbog svoje veće slobodne energije. Za dobivanje martenzitne strukture, potreban je postupak zagrijavanja čelika koji uključuje pretvaranje smjese ferita i karbida u austenit zagrijavanjem do austenitnog područja te nakon toga naglo gašenje čelika kako bi se austenit pretvorio u martenzit. Drugim riječima, procesu gašenja prethodi proces austenitizacije čelika. Postupak zagrijavanja čelika do austenitnog područja i naknadnog gašenja u svrhu dobivanja martenzitne strukture naziva se kaljenjem čelika [2].

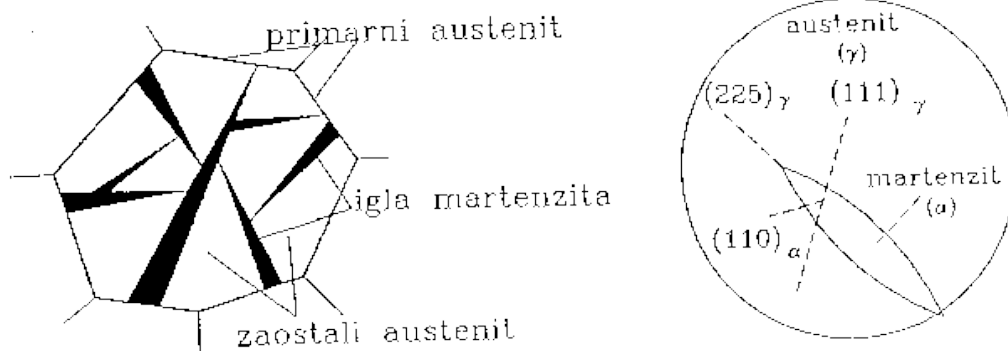
Tijekom martenzitne pretvorbe dolazi do trenutne promjene rešetke. Brzina rasta kristala martenzita je izuzetno visoka u usporedbi s drugim procesima pretvorbe u čeliku. Pretvorba austenita u martenzit započinje na početnoj temperaturi M_s i završava na konačnoj temperaturi M_f . Temperature M_s i M_f ne ovise o brzini hlađenja, već ovise o koncentraciji ugljika i legirajućih elemenata u primarnom austenitu. Legirajući elementi utječu na temperature martenzitne pretvorbe samo ako su otopljeni u austenitu. Povećanje koncentracije kobalta i aluminija povećava temperature martenzitne pretvorbe i smanjuje količinu zaostalog austenita. Slika 3.9. prikazuje utjecaj koncentracije ugljika u primarnom austenitu na temperature martenzitne pretvorbe [2].



Slika 3.9. Utjecaj koncentracije ugljika u primarnom austenitu na temperature martenzitne pretvorbe [2]

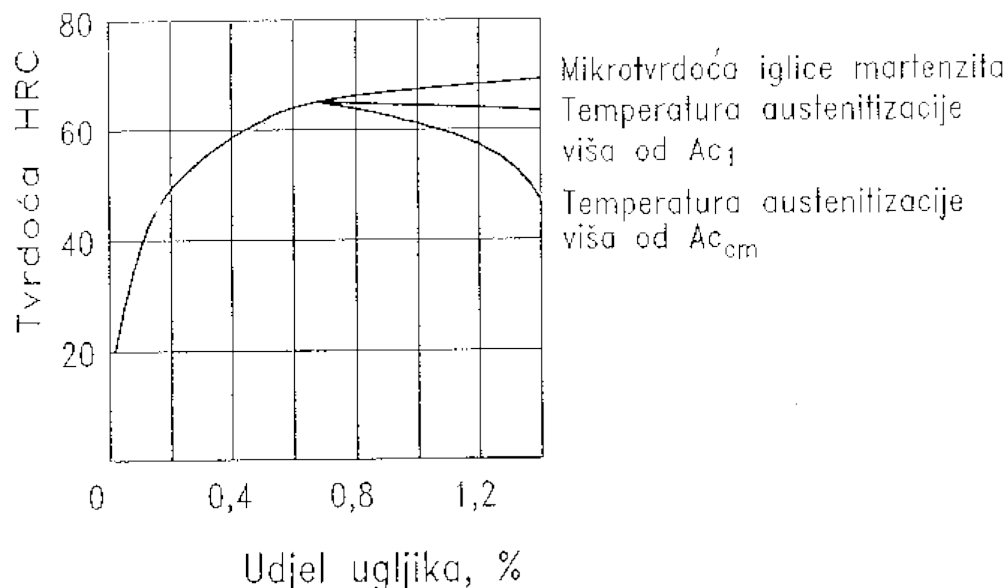
Martenzitna struktura je prepoznatljiva po svojem igličastom izgledu, kako se vidi na slici 3.10. Kristalna zrna martenzita obično su pločastog oblika, a postoji orijentacijska ovisnost između matičnih kristalnih zrna austenita i martenzita koja se manifestira u pravilnom položaju martenzitnih pločica. Ravnina austenita 111 je identična ravnini 110 martenzita, a pločice

martenzita rastu duž ravnina 225 ili 259. Nakon martenzitne pretvorbe, među iglicama martenzita ostaje određena količina zaostalog austenita. Veća količina zaostalog austenita nije poželjna, a posebno je nepoželjno kad je izdvojen kao zasebna faza. Količina zaostalog austenita u mikrostrukturi nakon martenzitne pretvorbe raste s povećanjem koncentracije ugljika u primarnom austenitu [2].



Slika 3.10. Prikaz martenzitne strukture [2]

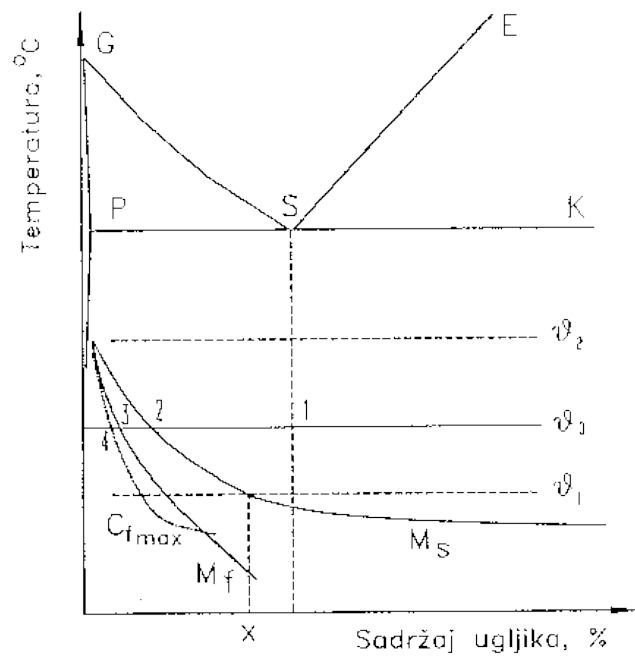
Najvažniji faktor koji utječe na tvrdoću martenzita je količina ugljika u njemu. Povećanjem udjela ugljika, tvrdoća martenzita se povećava, ali njegova žilavost se smanjuje. Martenzit s visokim udjelom ugljika je iznimno tvrd i lako se lomi. Tvrdoća kaljenog čelika ovisi i o prisutnosti drugih faza u njegovoj mikrostrukturi. Ako ima puno zaostalog austenita, austenit se može izlučiti kao posebna faza, što dovodi do smanjenja tvrdoće kaljenog čelika [2].



Slika 3.11. Ovisnost tvrdoće nelegirana čelika i martenzita o sadržaju ugljika [2]

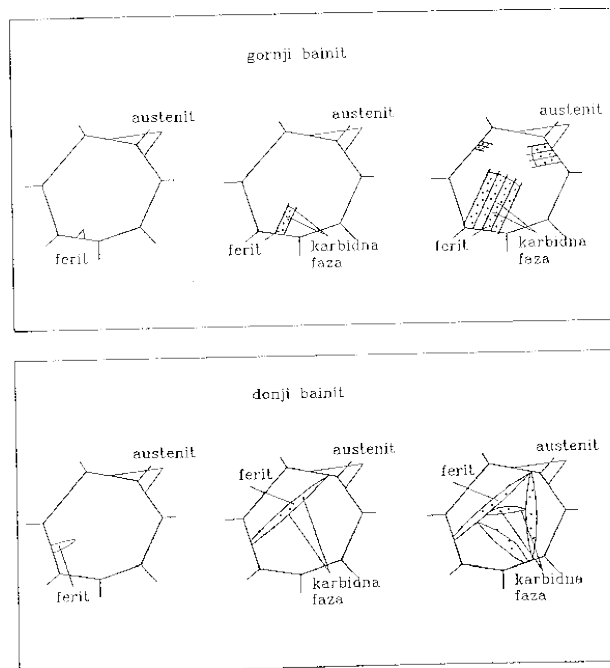
3.5. Pretvorba austenita u bainit

Bainit je struktura koja se sastoji od fine mješavine prezasićenog ferita i karbida. Temperaturno područje u kojem se događa bainitna pretvorba proteže se između perlitne i martenzitne pretvorbe, odnosno između temperatura ϑ_1 i ϑ_2 , kako je prikazano na slici 3.12. Zbog toga se bainit naziva i međustupanj. Bainitna pretvorba dijelom se odvija bez difuzije, a dijelom se odvija difuzijskim mehanizmom. Kod hlađenja eutektoidnog čelika do temperature ϑ_3 dolazi do difuzijske preraspodjele ugljika u nestabilnom austenitu, stvarajući područja s niskom i visokom koncentracijom ugljika. Smanjenjem udjela ugljika u osiromašenom dijelu austenita ispod određene koncentracije, kao što je koncentracija 2 tj. 3, stvaraju se uvjeti za stvaranje martenzitne pločice bez difuzije, putem koordiniranog pomaka atoma. Područje bainitne pretvorbe prikazano je na slici 3.12. [2].



Slika 3.12. Prikaz područja bainitne pretvorbe [2]

Difuzija ugljika u rešetki α je puno veća od difuzije u rešetki γ , što dovodi do izdvajanja ugljika i formiranja čestica karbida u feritu koji je prezasićen (slika 3.13). Koncentracija ugljika u feritu se smanjuje sve do metastabilne koncentracije C_{fmax} (slika 3.12), koja predstavlja maksimalnu topljivost ugljika u feritu koja se postiže martenzitnom pretvorbom [2].



Slika 3.13. Prikaz pretvorbe austenita u bainit [2]

Porast feritne faze djelomično se ostvaruje difuzijom ugljika u austenitu. Na granici austenita i ferita formira se sloj koji je bogat ugljikom, pogodan za formiranje karbidne pločice, i time se zaustavlja daljnji rast feritne pločice. Karbidna pločica raste difuzijom ugljika iz ferita i iz susjednih slojeva austenita. Slojevi austenita u blizini karbidne pločice postaju mjesta za formiranje nove feritne faze i proces bainitne pretvorbe se ponavlja. Mehanizam bainitne pretvorbe se ne mijenja bitno s promjenom temperature pretvorbe, ali se difuzijski procesi intenziviraju pri višim temperaturama, a bezdifuzijski procesi intenziviraju pri nižim temperaturama. Mikrostrukture gornjeg i donjeg bainita međusobno se razlikuju, što se može vidjeti na slici 3.13. [2].

Bainitna pretvorba u čeliku može imati različite rezultate ovisno o sadržaju ugljika u čeliku. Kod čelika s malo ugljika, prevladava stvaranje feritne faze, dok kod čelika s više ugljika prevladava stvaranje karbidne faze. Ako čelik ima vrlo malo ugljika, uz bainit će se izlučiti i ferit, a ako ima puno ugljika, izlučit će se i cementit. Za uspješnu bainitnu pretvorbu potrebna su dva uvjeta:

- 1) Dovoljno pothlađivanje osiromašenog austenita za smičnu pretvorbu u martenzit
- 2) Dovoljna difuzija ugljika [2]

Bainitna pretvorba se može odgoditi ako se navedeni uvjeti ne ispune u potpunosti, što može dovesti do pojave zaostalog austenita u mikrostrukтури zajedno s bainitom [2].

4. RAZMATRANJE TTT-DIJAGRAMA

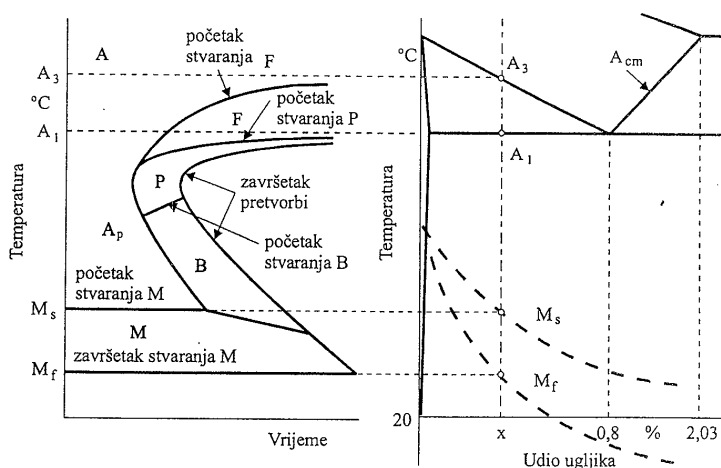
Da bi se pravilno obavila toplinska obrada čelika, ključno je temeljito razumjeti metastabilni Fe-Fe₃C dijagram. To nije dovoljno iz sljedećih razloga:

1) Fe-Fe₃C dijagram opisuje idealan, metastabilni slučaj skrućivanja i hlađenja, kada su prisutne samo dvije komponente, željezo i ugljik. Međutim, u praksi se često koriste legirani čelici s više komponenti, pa je potrebno uzeti u obzir njihove specifičnosti prilikom provođenja toplinske obrade.

2) Iako metastabilni Fe-Fe₃C dijagrami opisuju ravnotežnu pretvorbu, za svrhe toplinske obrade čelika, izvanravnotežna stanja su važnija.

3) Metastabilni Fe-Fe₃C dijagram ne opisuje kinetiku pretvorbe faza, jer ne uzima u obzir vrijeme kao varijablu [5].

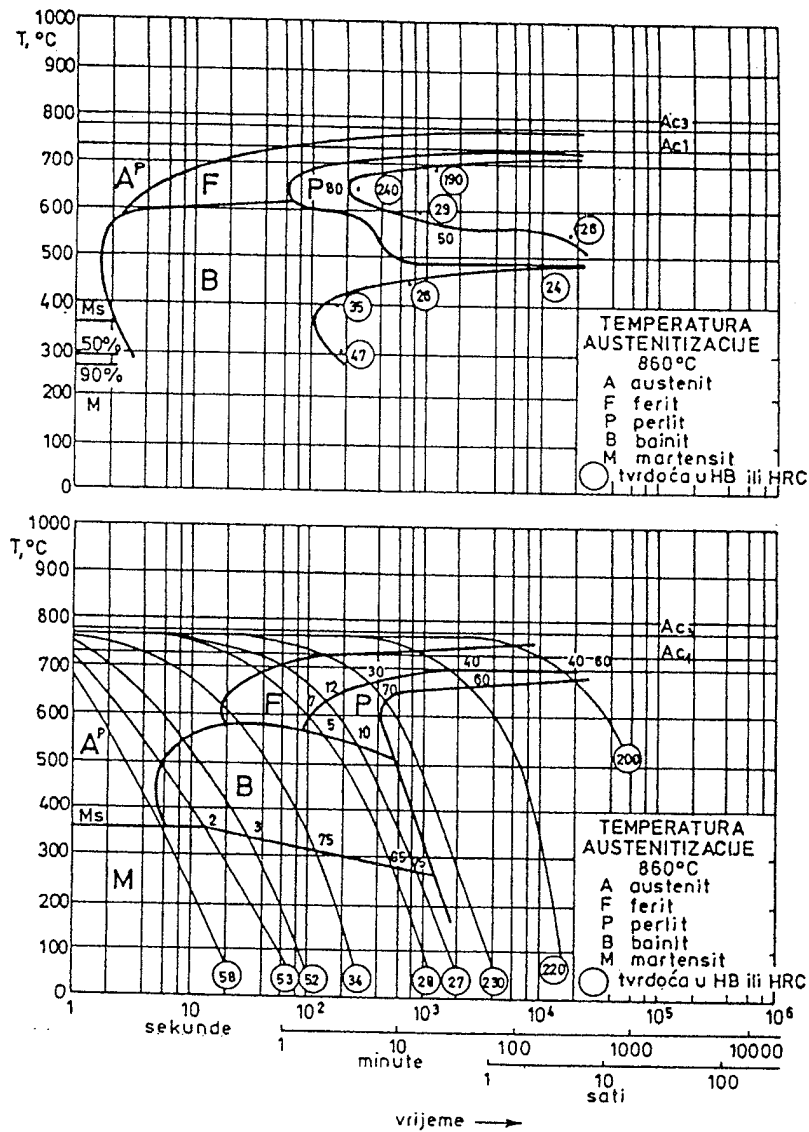
Iako metastabilni Fe-Fe₃C dijagram ne pruža informacije o kinetici fazne pretvorbe, koriste se podaci iz tog dijagrama za formiranje TTT-dijagrama za svaku koncentraciju ugljika. Fazne pretvorbe su difuzijske, što znači da ovise o temperaturi i trajanju pretvorbe. Ako je vrijeme za difuziju prekratko, pretvorba može biti djelomična ili u potpunosti izostati, što je važno za proces toplinske obrade. TTT-dijagrami se koriste za proučavanje ovisnosti fazne pretvorbe austenita o temperaturi i vremenu [5].



Slika 4.1. Konstrukcija TTT-dijagrama [1]

Postoje dvije vrste TTT-dijagrama (slika 4.2.) zbog načina provođenja faznih promjena koje nastaju bržim hlađenjem austenita u čeliku i one su sljedeće:

- 1) Kontinuirani (anizotermički)
- 2) Izotermički (diskontinuirani) [5]



Slika 4.2. Prikaz izotermičkog i kontinuiranog TTT-dijagrama [1]

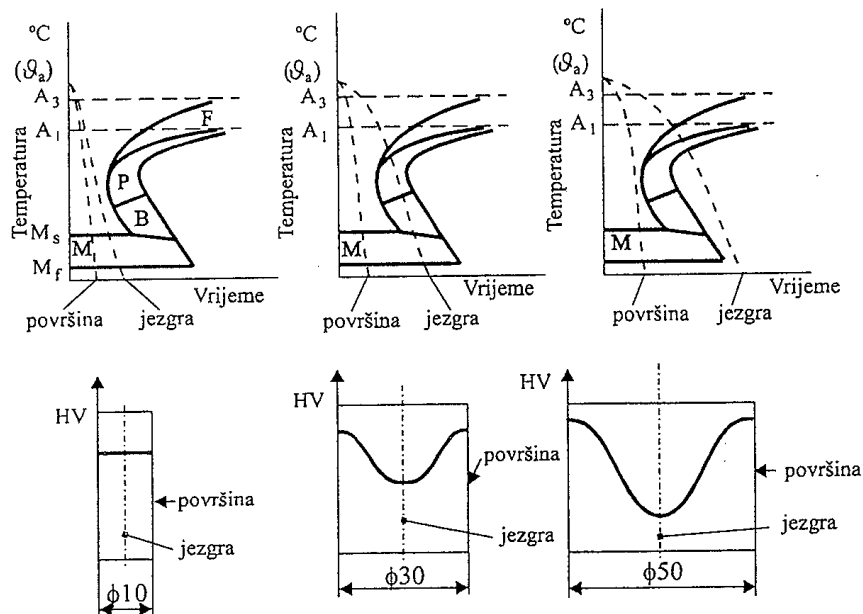
Osnovna razlika između njih je u tome što se izotermičkom putem može postići jednoliki strukturni oblik po cijelom presjeku predmeta, dok se anizotermičkom putem postiže monofazna struktura martenzita uz uvjet da je gašenje nadkritično i u rubnim slojevima i u jezgri [5].

5. KALJIVOST ČELIKA

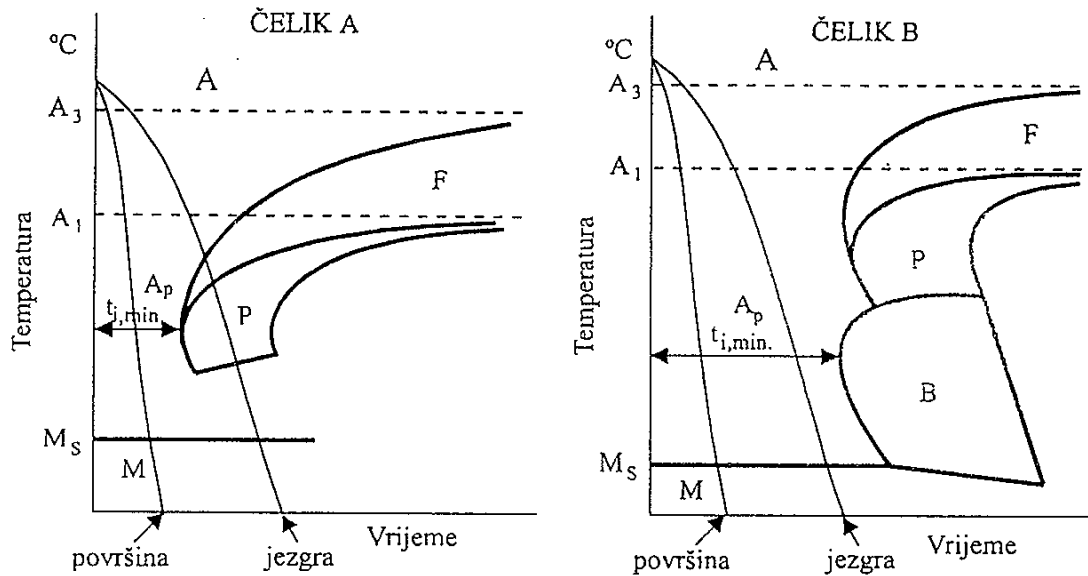
Kaljivost čelika označava sposobnost čelika da se postigne veća tvrdoća na površini i jednolikija tvrdoća na poprečnom presjeku putem gašenja iz temperature austenitizacije. Mikrostruktura koja se postiže kaljenjem ovisi o prokaljivosti i zakaljivosti čelika. Ukoliko su ostali uvjeti jednaki, čelik veće prokaljivosti će lakše u dubljim slojevima formirati martenzit u odnosu na čelik manje prokaljivosti. Nakon kaljenja, čelik veće zakaljivosti će biti tvrdi [1,2].

5.1. Prokaljivost

Prokaljivost čelika se odnosi na njegovu sposobnost da pri gašenju u dubljim slojevima formira martenzitnu strukturu, koja može sadržavati više od 50% martenzita. Ovo svojstvo je izravno povezano s gornjom kritičnom brzinom gašenja, a ovisi i o brzini perlitne pretvorbe u čeliku. Čimbenici koji usporavaju perlitnu pretvorbu povećavaju prokaljivost čelika. Prokaljenost čelika će biti bolja što je kaljeni predmeti manjih dimenzija i ako se primjenjuje intenzivnije gašenje (slika 5.1.) [1,2].



Ako se usporede dva različita čelika istog promjera, njihovi TTT dijagrami pokazat će da će čelik koji ima dulje vrijeme inkubacije pothlađenog austenita imati bolju prokaljivost (slika 5.2.) [1].



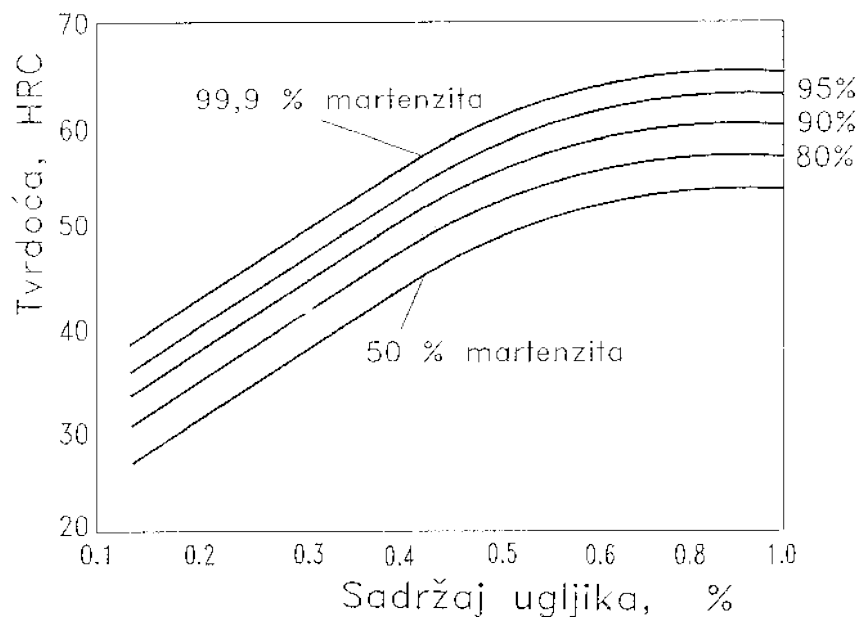
Slika 5.2. TTT-dijagrami za kontinuirano hlađenje dva različita čelika [1]

Prokaljivost čelika se može eksperimentalno odrediti kaljenjem valjkastih uzoraka različitih promjera s različitim sredstvima za gašenje, koja imaju određenu jačinu hlađenja. Nakon kaljenja, uzorci se režu uz intenzivno hlađenje kako bi se dobili poprečni presjeci uzoraka na kojima se ispituje tvrdoća. Iz dobivenih vrijednosti tvrdoće na poprečnom presjeku se izrađuju dijagrami tijekom tvrdoće, koji pokazuju da je tvrdoća najviša uz rub uzorka i da opada prema središtu valjka (slika 5.1.). Obično se kao kriterij za prokaljivost uzima tvrdoća čelika s određenim udjelom ugljika kod kojeg se postiže 50% martenzita u mikrostrukturi [1].

5.2. Zakaljivost

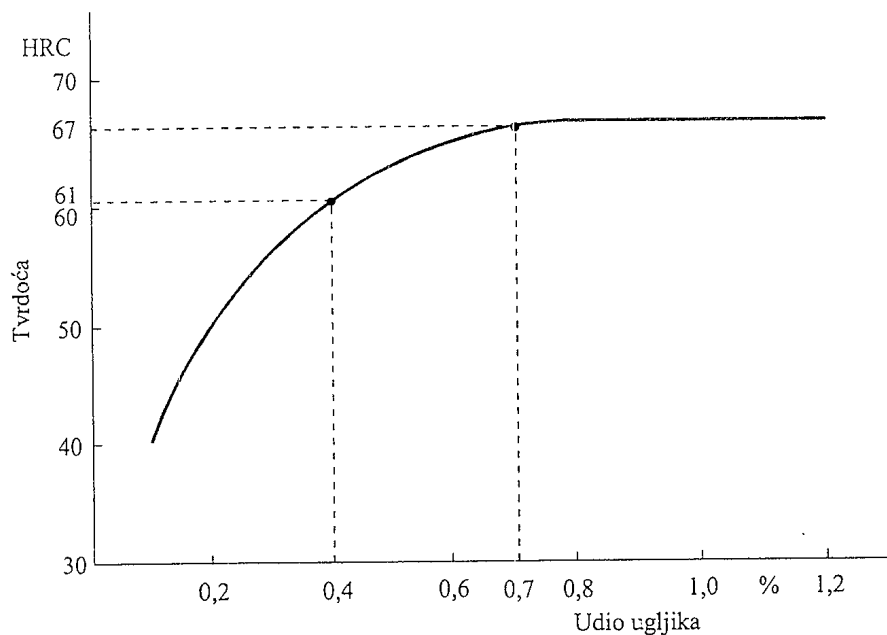
Zakaljivost se odnosi na sposobnost čelika da se pri kaljenju postigne tvrda i pretežno martenzitna struktura. Tvrdoća sloja koji je prokaljen kod nisko i srednje legiranih čelika ovisi o tvrdoći

martenzita i udjelu martenzita u strukturi. Osim toga, tvrdoća martenzita izravno ovisi o količini ugljika u čeliku, kako je prikazano na slici 5.3.



Slika 5.3. Vrijednosti tvrdoće čelika u odnosu na koncentraciju ugljika u martenzitu i udjelu martenzita u mikrostrukturi čelika [2].

Što je veći udio otopljenog ugljika u austenitu tijekom procesa zakaljivanja čelika, to će čelik imati bolju zakaljivost, odnosno bit će sposoban postići tvrdu i pretežno martenzitnu strukturu. Ovo se može vidjeti na Burnsovom dijagramu (slika 5.4.). Karbidni ugljik ne sudjeluje u procesu zakaljivanja i ne utječe na zakaljivost, čak može smanjiti prokaljivost [1].



Slika 5.4. Burnsov dijagram maksimalno postizive tvrdoće zakaljenih čelika ovisno o %C [1]

Slika 5.4. prikazuje da čelik s višim udjelom ugljika koji sudjeluje u procesu zakaljivanja ima veću zakaljivost od čelika s nižim udjelom ugljika, što znači da se može postići veća tvrdoća nakon procesa zakaljivanja. Stoga, možemo zaključiti da postoji izravna povezanost između udjela ugljika u čeliku i njegove zakaljivosti [1].

6. METODE ZA PROCJENU PROKALJIVOSTI

U strojarstvu se koriste različite metode za procjenu prokaljivosti čelika, a to su [6]:

- 1) Metoda totalne prokaljenosti
- 2) Justova metoda utvrđivanja stupnja zakaljenosti
- 3) Grossmanova metoda
- 4) Jominyeva metoda

6.1. Metoda totalne prokaljenosti

Moguće je reći da metoda totalne prokaljenosti čelika označava čelik koji je zakaljen do najvišeg stupnja mogućeg u svakoj točki svog presjeka, što znači da u svakoj točki ima 100% martenzita. Međutim, postizanje totalne prokaljenosti kod velikih strojnih dijelova zahtijeva velika financijska ulaganja i više legiranja čelika, što dovodi do povećanja troškova proizvodnje, cijene čelika i asortimana sastava. Zbog toga se ova metoda rijetko primjenjuje u praksi, a umjesto nje, koristi se parcijalna prokaljenost koja ima manje od 100% martenzita u jezgri i manji stupanj zakaljenja. Potrebno je imati na umu da se nejednoličnost svojstava po presjeku smanjuje pri postupku popuštanja čelika nakon gašenja, što je veća temperatura popuštanja i veći stupanj zakaljenja. Minimalni postotak martenzita u samoj jezgri nije definiran jer ovisi o radnom opterećenju izrade strojnog dijela [6].

6.2. Justova metoda utvrđivanja stupnja zakaljenosti

Kako vlačna čvrstoća popuštanja R_{mp} nije pouzdan pokazatelj kvalitete toplinski obrađenog obratka, potrebno je odrediti minimalni stupanj zakaljenosti R_{min} . Za tu svrhu koristi se

preporučeni stupanj zakaljenosti prema Justovoj metodi, što je prikazano na slici 6.1. Minimalni stupanj zakaljenosti izražava se u postotcima martenzita (%M) i može se izračunati pomoću Justove formule [6]:

$$R_{min} = \frac{HRC_g}{20+60\sqrt{C}} = \frac{1}{1+8e^{-\frac{HRC_p}{8}}} \quad (6.1.)$$

Pri čemu je:

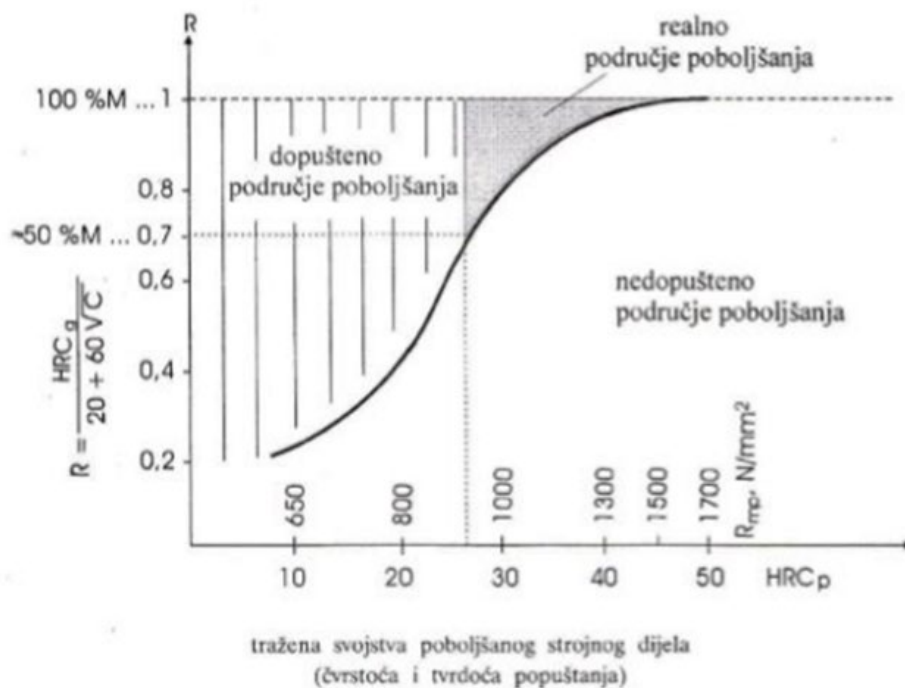
R_{min} – minimalni stupanj zakaljenosti

HRC_g – tvrdoća u gašenom stanju

HRC_p – tvrdoća u popuštenom stanju

C – sadržaj ugljika

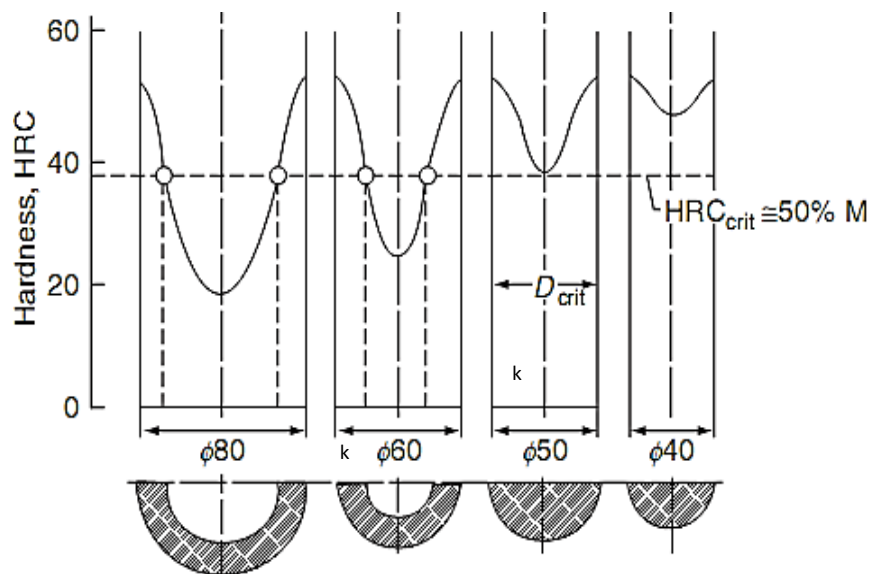
Justova metoda grafički je prikazana na slici 6.1.



Slika 6.1. Justov dijagram preporučene zakaljenosti za realna područja poboljšanja [6]

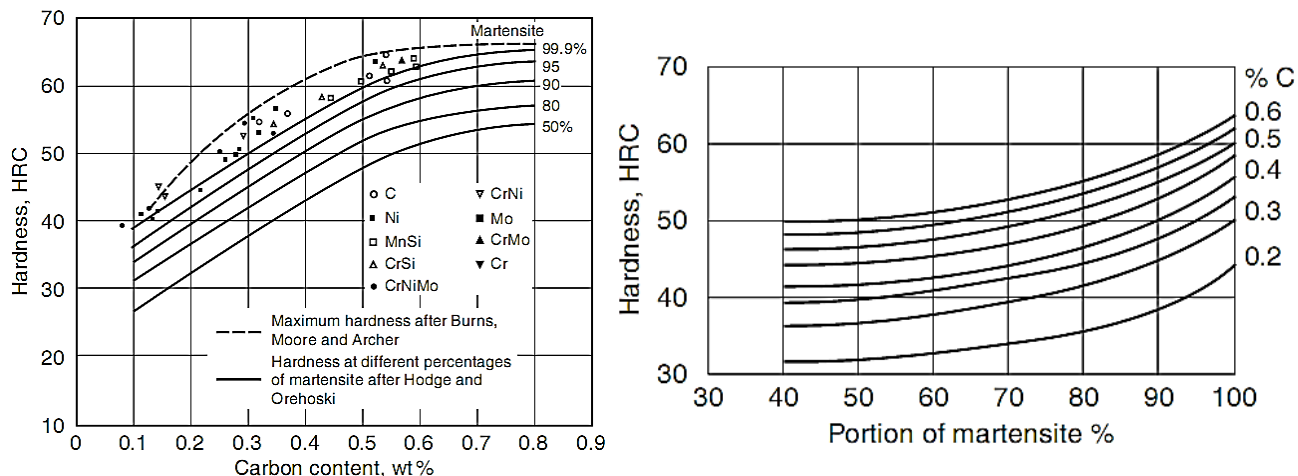
6.3. Grossmanova metoda

Grossmanova metoda za ispitivanje prokaljivosti koristi čelične uzorke u obliku epruveta okruglog presjeka različitog promjera, koji se potom stavljaju u rashladni medij za kaljenje. Ova metoda služi za utvrđivanje dubine do koje se neki čelik može zakaliti. Prema ovoj metodi, struktura s 50% martenzita se smatra osnovnom, a njen karakterističan znak je infleksija na krivuljama promjene tvrdoće u poprečnom presjeku, koja se najviše izražava za 50% sadržaja martenzita (slika 6.2.) [5].



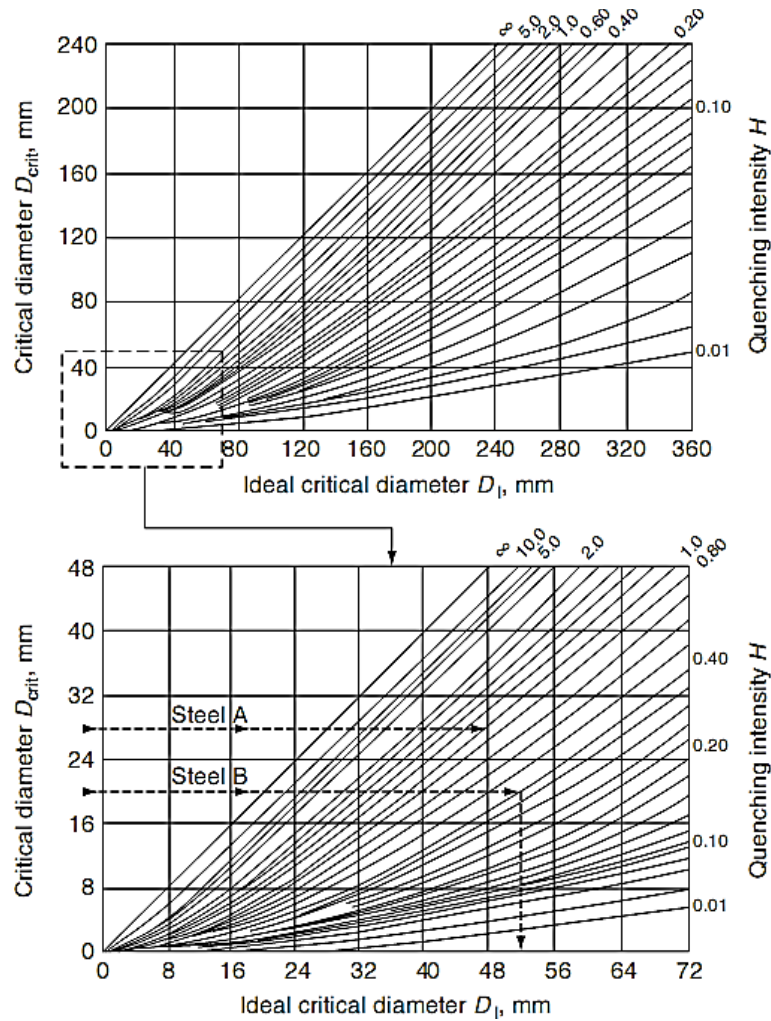
Slika 6.2. Određivanje kritičnog promjera D_k Grossmanovom metodom [5]

Hodge-Orehovski dijagram se koristi za određivanje tvrdoće materijala s 50% sadržaja martenzita za čelike različitog sadržaja ugljika (slika 6.3.). Kritična tvrdoća HRC_k je tvrdoća koja odgovara strukturi s 50% martenzita za određeni čelik koji se ispituje. Mjerilo prokaljivosti prema ovoj metodi jest kritični promjer D_k , koji predstavlja najveći promjer za određenu brzinu hlađenja, a koji nakon kaljenja neće imati nezakaljenu jezgru (strukturu s manje od 50% martenzita) u središtu zakaljene epruvete [5].



Slika 6.3. Korelacija tvrdoća – sadržaj ugljika – udio martenzita u strukturi prema Hodge Orehovskom [5]

Nedostatak Grossmanove metode za ispitivanje prokaljivosti je njena velika ovisnost o uvjetima hlađenja. Kako bi se definirao kritični promjer neovisno o intenzitetu rashladnog sredstva, uveden je teoretski pojam idealnog kritičnog promjera D_i . Idealni kritični promjer D_i predstavlja određeni promjer koji se dobije u središtu nakon kaljenja u idealnom rashladnom sredstvu, a koji odgovara strukturi s 50% martenzita. Idealno rashladno sredstvo karakterizira faktor intenziteta hlađenja $H = \infty$, što znači da vrijeme nužno za smanjenje površinske temperature austenitiziranog čelika na temperaturu rashladnog medija iznosi nula. Idealni kritični promjer D_i , koji odgovara strukturi s 50% martenzita, predstavlja pokazatelj prokaljivosti čelika neovisan o rashladnom sredstvu. Korištenjem dijagrama na slici 6.4., moguće je odrediti kritični promjer D_k za bilo koje realno rashladno sredstvo, odnosno intenzitet rashladnog sredstva H [5].



Slika 6.4. Dijagram za određivanje idealnog kritičnog promjera D_i iz poznatog intenziteta rashladnog sredstva H i kritičnog promjera D_k [5]

6.3.1. Način provođenja ispitivanja

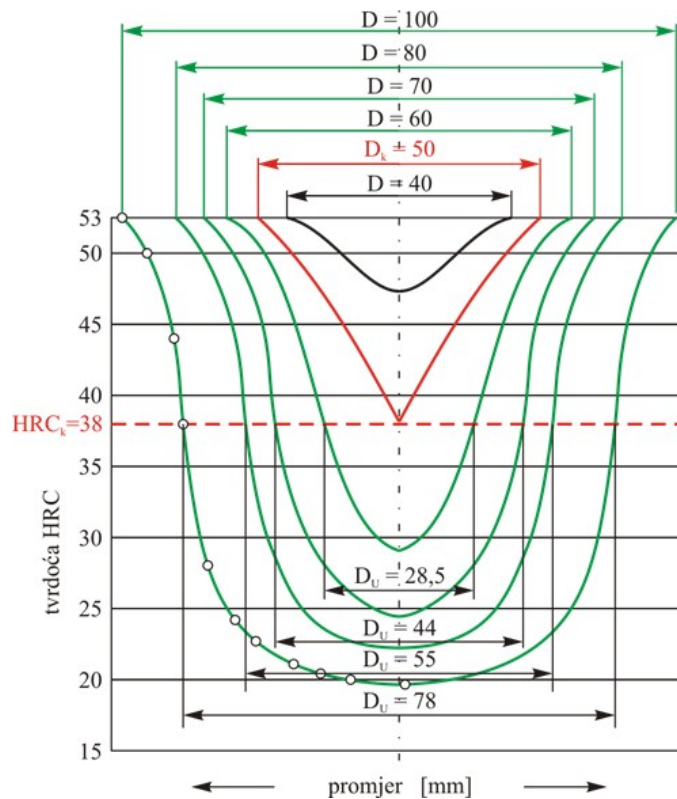
1. Priprema epruveta

Nakon procesa austenitizacije i kaljenja, nekoliko epruveta različitih promjera okruglog presjeka poprečno se prereže kako bi se utvrdila njihova prokaljivost. Važno je odabrati promjer epruveta koji će u presjeku imati zakaljeni dio s više od 50% martenzita i nezakaljeni dio s manje od 50%

martenzita. Prilikom rezanja, mora se paziti da unos topline ne utječe na strukturu. Epruveta kritičnog promjera D_k ima točno 50% martenzita u središtu presjeka. Epruvete manjeg promjera od D_k imaju više od 50% martenzita i veću tvrdoću, dok one većeg promjera od D_k sadrže strukturu s više od 50% martenzita samo u površinskom dijelu [5].

2. Snimanje "U krivulja"

Nakon što su epruvete poprečno prerezane i obrađene, mjeri se tvrdoća duž izvodnice poprečnog presjeka, a zatim se dobiju "U krivulje", kao što je prikazano na slici 6.5. Ove krivulje odnose se na epruvete od čelika s 0,3% ugljika. Kritična tvrdoća za ovaj čelik prema Hodge-Orehovskom dijagramu (slika 6.3.) je $HRC_k = 38$. Sjecište ove tvrdoće s "U krivuljama" daje promjere D_u koji odgovaraju strukturi s manje od 50% martenzita za eprvetu odgovarajućeg promjera D [5].



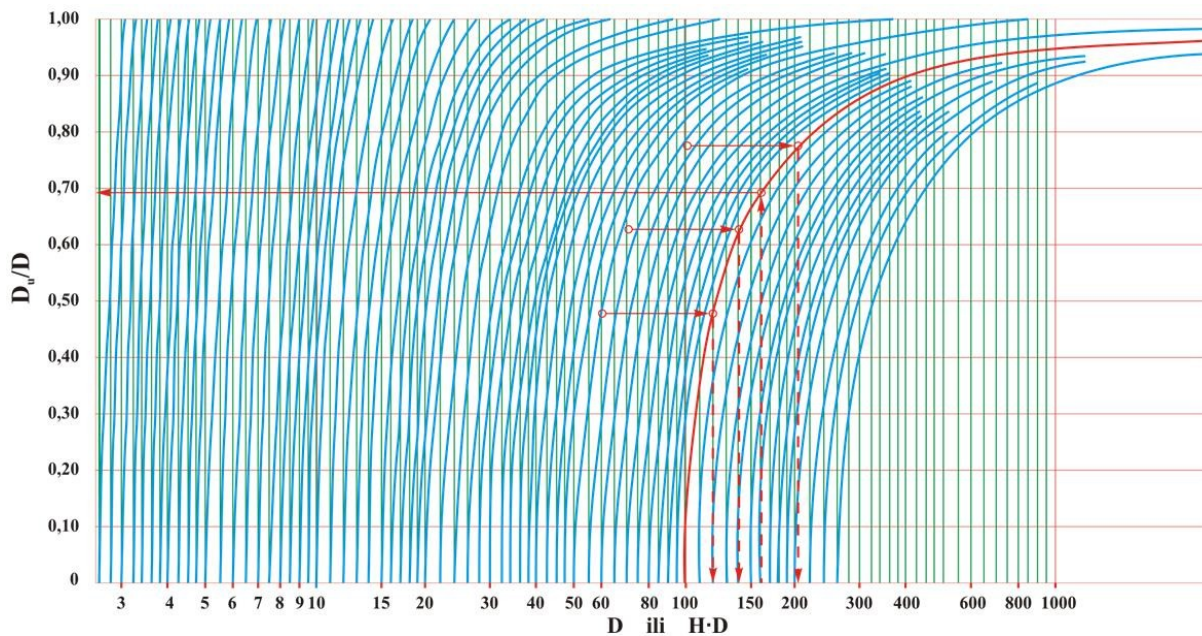
Slika 6.5. "U krivulje" za čelik s 0,3%C i 3%Ni [5]

3. Određivanje intenziteta rashladnog sredstva H

Nakon snimanja "U krivulja", dobiveni podaci prikazuju se u tablici 6.1. Zatim, na prozirnoj foliji ucrtavaju se točke s vrijednostima D i D_u/D prema dijagramu na slici 6.6. Pomakom folije lijevo ili desno pronalazi se krivulja na kojoj se sve ucrtane točke preklapaju. Projekcije tih točaka na osi apscise predstavljaju umnoške $H \cdot D$. Dijeljenjem vrijednosti $H \cdot D$ s odgovarajućim promjerom D dobiva se vrijednost intenziteta rashladnog sredstva $H = 2$ za sve promjere epruveta, kako je prikazano u tablici 6.1. [5].

Tablica 6.1. Podaci dobiveni snimanje "U krivulja" [5]

Podaci iz „U krivulja“ na slici 6.5.			Uz pomoć dijagrama na slici 6.6.	
D	D_u	D_u/D	($H \cdot D$)	H
100	78	0,78	200	2
70	44	0,63	140	2
60	28,5	0,475	120	2



Slika 6.6. Dijagram za određivanje intenziteta rashladnog sredstva H i kritičnog promjera D_k [5]

4. Određivanje kritinog promjera D_k

Kritični promjer D_k određuje se pomoću dijagrama na slici 6.6. Prema definiciji, kritični promjer je onaj kod kojeg je struktura u središtu točno 50% martenzita, odnosno kada je vrijednost D_u jednaka nuli. Krivulja koju smo dobili iz podataka s "U krivulja" siječe os apscisu na vrijednosti $H \cdot D_k = 100$. S obzirom na poznatu vrijednost intenziteta rashladnog sredstva $H = 2$, možemo zaključiti da je kritični promjer D_k jednak 50 mm [5].

5. Određivanje idealnog kritičnog promjera D_i

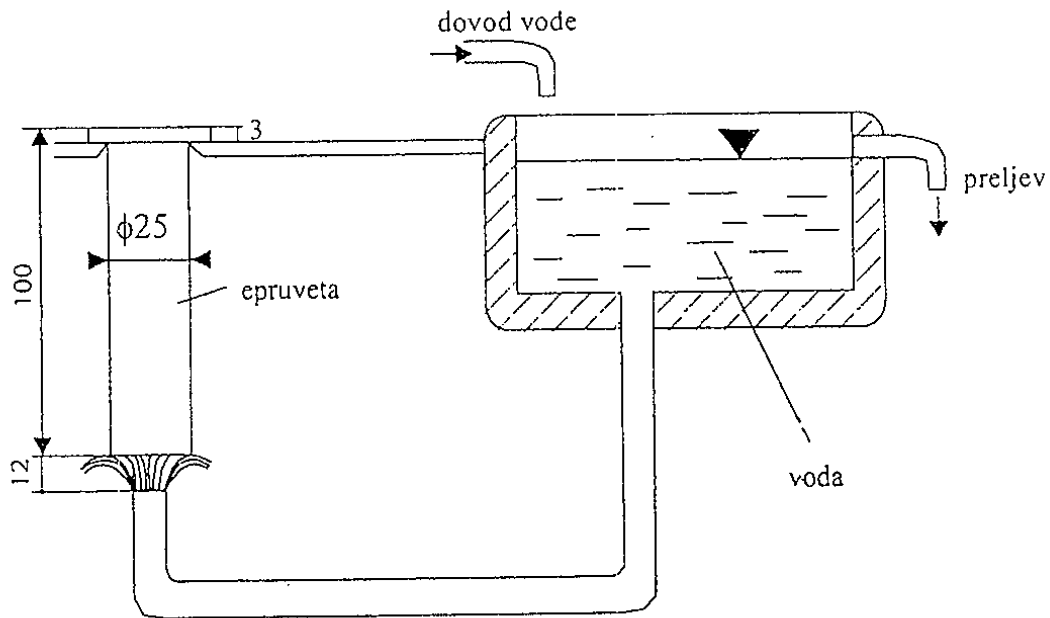
Idealni kritični promjer se izračunava na temelju dijagrama na slici 6.4. uz poznavanje vrijednosti kritičnog promjera D_k i intenziteta rashladnog sredstva H . U ovom slučaju, za kritični promjer $D_k = 50$ mm i intenzitet rashladnog sredstva $H = 2$, idealni kritični promjer se iznosi 60 mm [5].

6. Određivanje kritičnog promjera D_k i D_i uz poznati intenzitet rashladnog sredstva H

Ako znamo intenzitet rashladnog sredstva, dovoljno je kaliti samo jednu epruvetu, ali njezin promjer mora biti dovoljno velik da nakon kaljenja ima i dio nekaljene jezgre. Nakon kaljenja i mjerenja tvrdoće, određuje se promjer D_u pomoću "U krivulje" na slici 6.5. Zatim se koristi dijagram (slika 6.5.) s D_u/D vrijednosti od 0,69 i poznatim H vrijednosti od 2 za izračunavanje $H \cdot D_k = 100$. To znači da je kritični promjer $D_k = 50$ mm. Konačno, prema dijagramu (6.4.), idealni kritični promjer se određuje uz poznate vrijednosti D_k i H , a dobiva se da je idealni kritični promjer $D_i = 60$ mm [5].

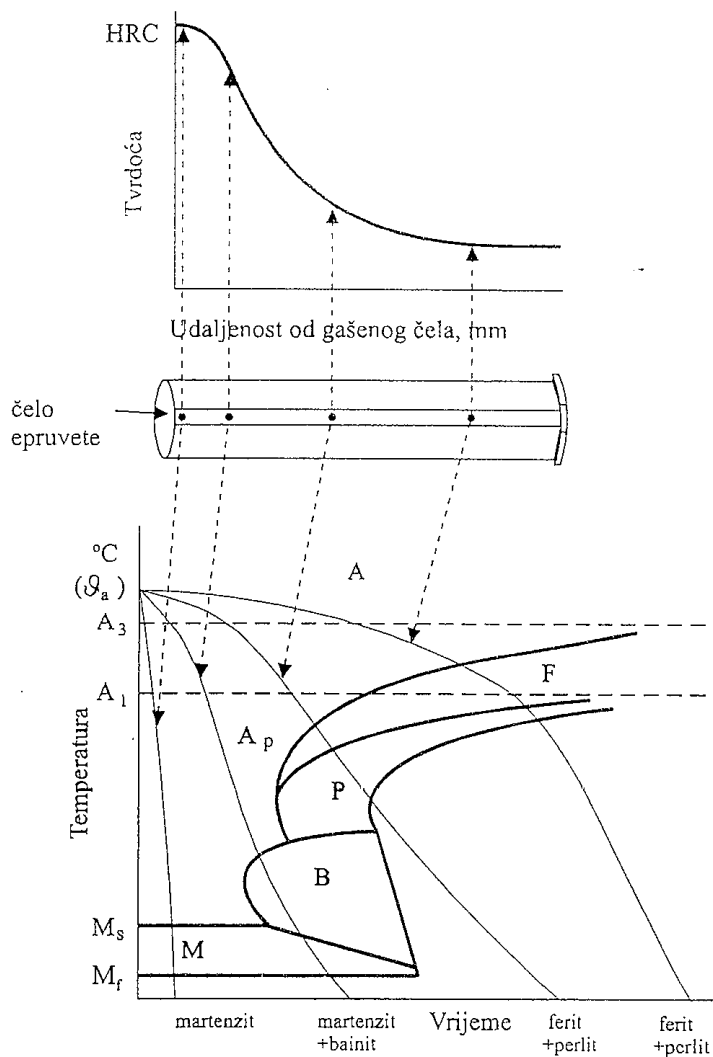
6.4. Jominyeva metoda

Jominyeva metoda se temelji na eksperimentu s jednom epruvetom. Epruveta ima točno određeni oblik i dimenzije, a nakon zagrijavanja na visoku temperaturu, brzo se hladi samo na jednom kraju. Uvjeti hlađenja propisani su u normi, a postupak se provodi u posebnom uređaju (slika 6.7).



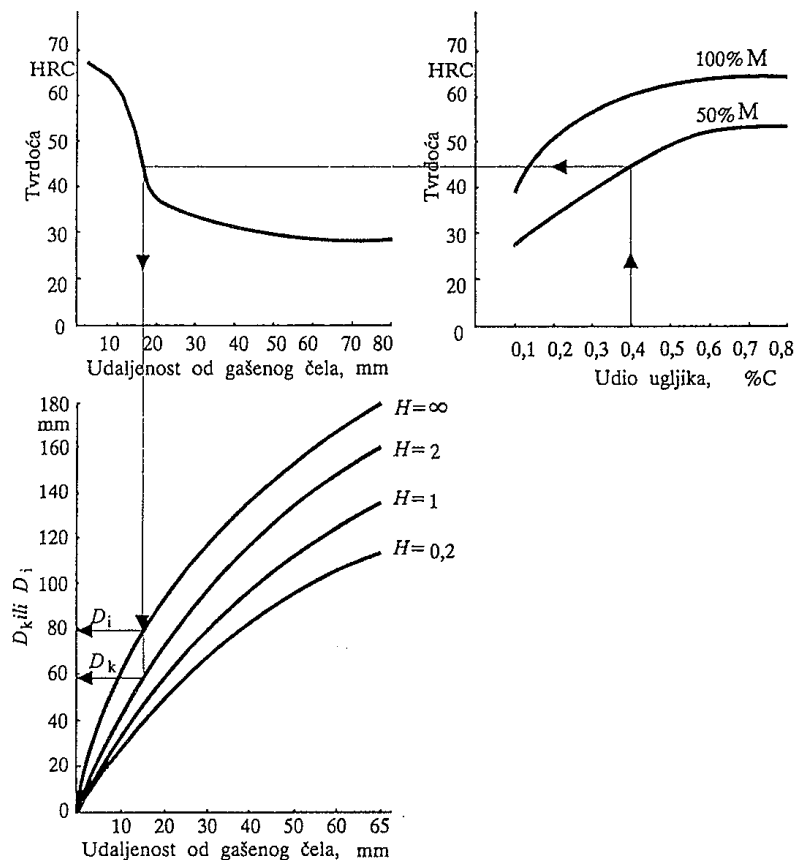
Slika 6.7. Prikaz uređaja za ohlađivanje epruvete po Jominyu [1]

Jominyeva metoda omogućuje dobivanje različitih brzina hlađenja jedne epruvete ovisno o udaljenosti od hlađenog čela, što dovodi do različitih mikrostruktura i tvrdoća čelika. Nakon hlađenja, tvrdoća se ispituje na različitim udaljenostima od hlađenog čela, a dobivene vrijednosti se koriste za konstrukciju Jominy-krivulje koja prikazuje promjenu tvrdoće ovisno o udaljenosti od hlađenog čela (slika 6.8.). Najveća brzina hlađenja je na hlađenom čelu Jominy epruvete, što dovodi do najveće tvrdoće i mikrostrukture martenzita. Kako se udaljenost od hlađenog čela povećava, brzina hlađenja se smanjuje, a smanjuje se i količina martenzita u mikrostrukтури te se tvrdoća smanjuje [1].



Slika 6.8. Prikaz krivulja ohlađivanja Jominyeve epruvete u TTT-dijagramu i tok tvrdoća [1]

Pomoću različitih matematičkih i grafičkih metoda mogu se koristiti rezultati Jominyevog pokusa za predviđanje tvrdoće čelika nakon klasičnog gašenja u različitim sredstvima s različitim intenzitetom gašenja. Na taj se način može odrediti idealni kritični promjer D_i , koji predstavlja najveći promjer valjkastog predmeta čelika u središtu kojeg će se, u uvjetima beskonačno intenzivnog ohlađivanja površine, postići 50% martenzita u jezgri i kritična tvrdoća (prikazano na slici 6.9) [1].



Slika 6.9. Način utvrđivanja idealnog kritičnog promjera i kritičnog promjera iz rezultata Jominyevog pokusa [1]

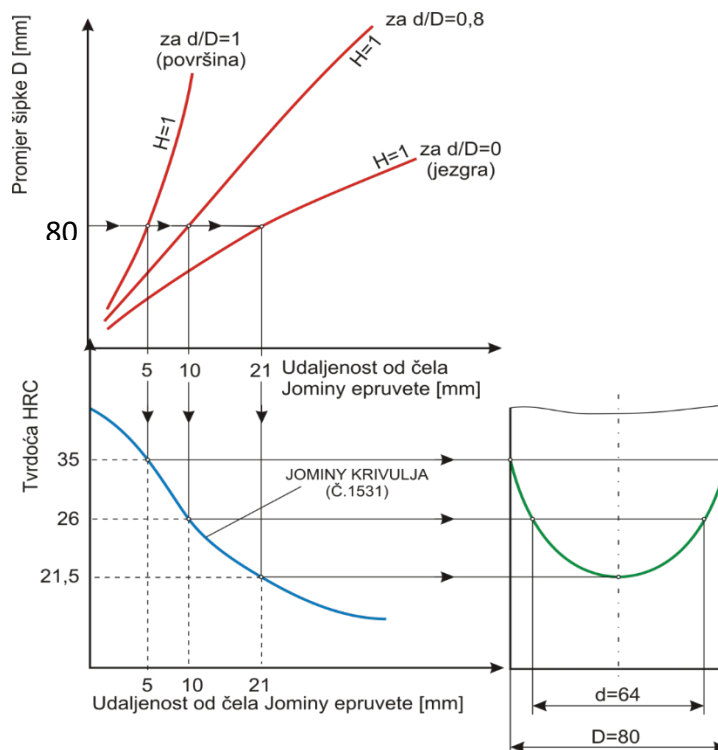
6.4.1. Crafts-Lamont dijagrami

Pokazatelj prokaljivosti čelika određuje se prema raspodjeli tvrdoća po presjeku nakon kaljenja u određenom rashladnom sredstvu H. Dijagrami se primjenjuju za različita rashladna sredstva i samo za jednu udaljenost od površine šipke, a to se iskazuje omjerom promjera d/D . Vrijednost $d/D = 0$ odnosi se na središnji presjek šipke, a $d/D = 1$ na površinu. U tablici 6.2. nalaze se intenziteti rashladnog sredstva H za različita sredstva i načine hlađenja [5].

Tablica 6.2. Intenziteti ohlađivanja H za različita sredstva i načine ohlađivanja [5]

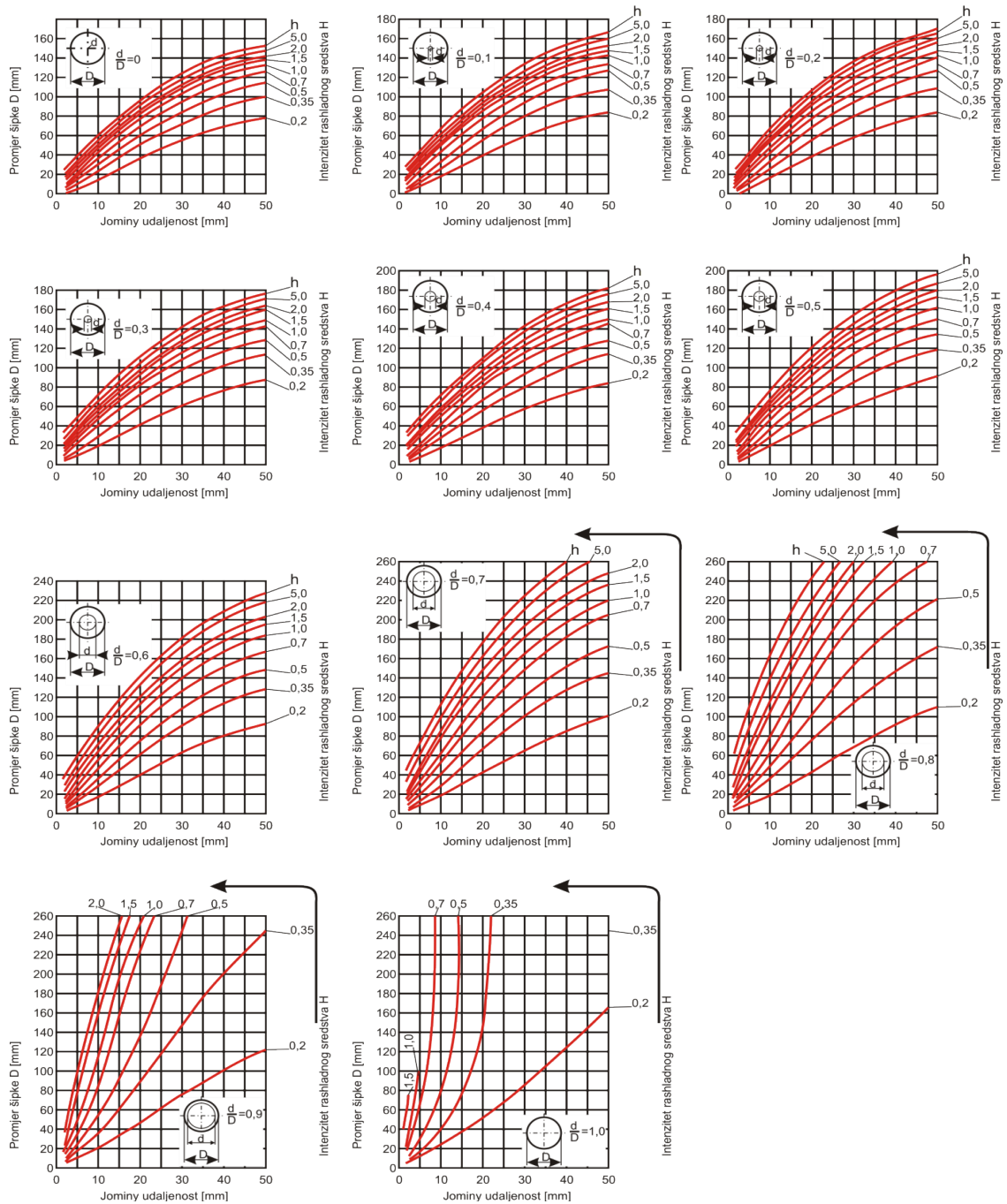
Gibanje izratka u rashladnom sredstvu	Ulje	Voda	Slana voda
Bez gibanja	0,25-0,3	0,9 – 1	2
Slabo gibanje	0,3-0,35	1,1 – 1	2 – 2,2
Srednje gibanje	0,35-0,4	1,2 – 1,3	-
Jače gibanje	0,4-0,5	1,4 – 1,5	-
Intenzivno gibanje	0,5-0,8	1,5 – 2	-
Jako intenzivno gibanje	0,8-1,1	2 - 6	2 - 8

Slika 6.10. prikazuje shematski princip korištenja Craft Lamont dijagrama za određivanje U-krivulja.



Slika 6.10. Shematski prikaz korištenja Crafts-Lamont dijagrama za određivanje U-krivulja [5]

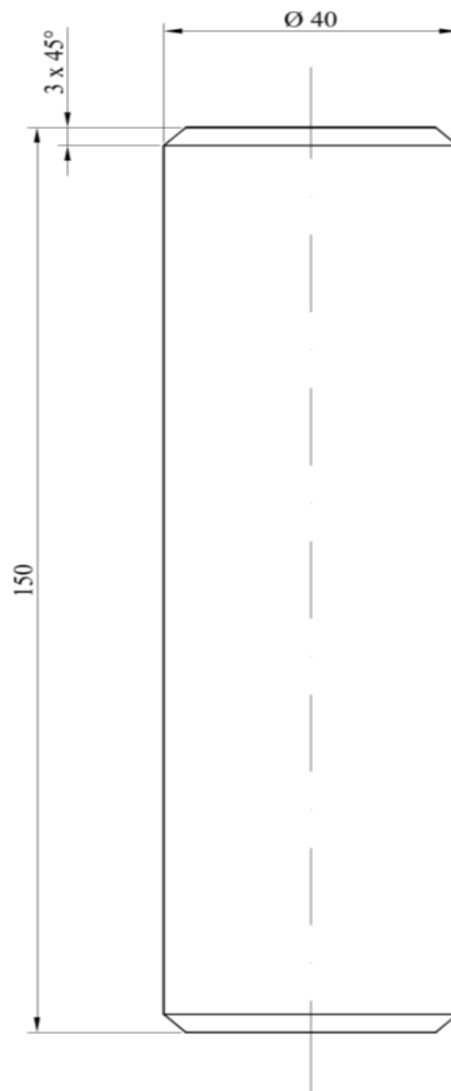
U primjeru koji se opisuje je šipka promjera 80 mm koja je gašena nakon austenitizacije u mirnoj vodi ($H=1$). Utvrđene su tvrdoće površine ($d/D=1$), jezgre ($d/D=0$) i na mjestu udaljenom 8 mm od površine ($d/D=0.8$). Kako bi se odredila U-krivulja, postupak mjerenja se ponavlja za sve dostupne dijagrame prikazane na slici 6.11. [5].



Slika 6.11. Crafts-Lamont dijagrami [5]

7. PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA MH.22-PP.07

U praktičnom dijelu zadatka potrebno je procijeniti dubinu prokaljivanja strojnog dijela MH.22-PP.07 nakon kaljenja. Potrebno je procijeniti tvrdoću i dubinu prokaljenog sloja spomenutog strojnog dijela primjenom Jominyevog pokusa, na temelju eksperimentalne Jominyeve krivulje. Strojni dio MH.22-PP.07 je duljine 150 mm i promjera 40 mm, a napravljen je od čelika 41Cr4 (slika 7.1.).



Slika 7.1. Strojni dio MH.22-PP.07

7.1. Karakteristike čelika 41Cr4

Tablica 7.1. prikazuje kemijski sastav čelika 41Cr4 [7]

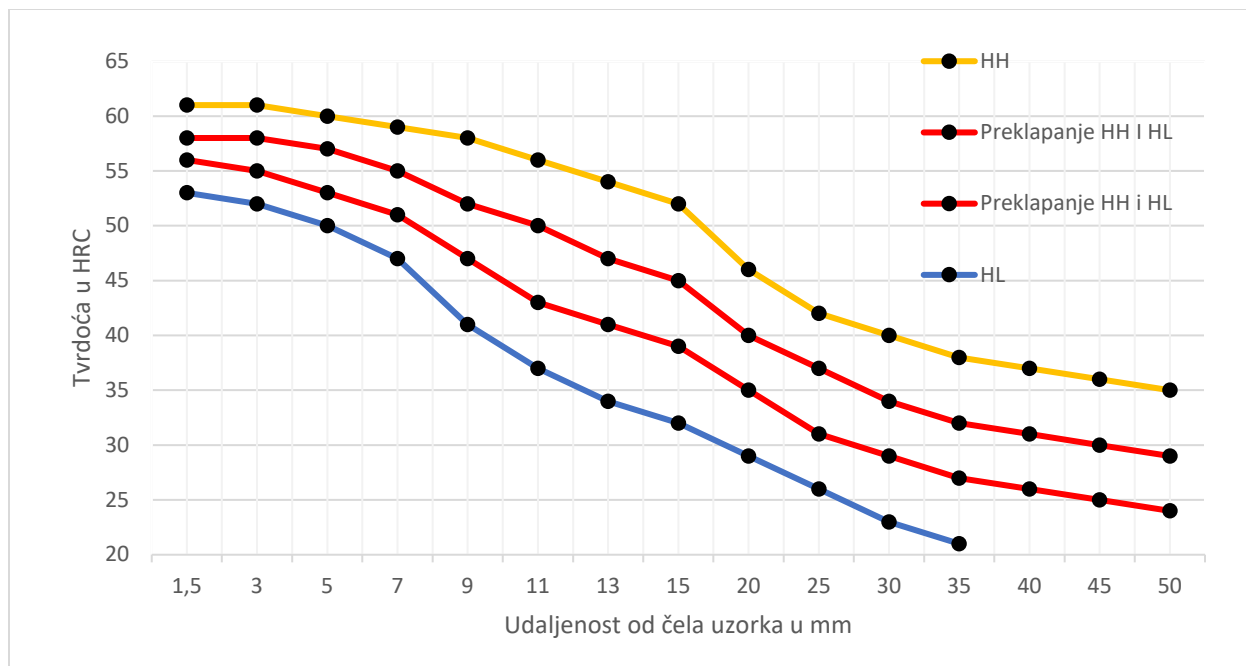
41Cr4	C	Si max.	Mn	P max.	S	Cr
	0,38-0,45	0,40	0,60-0,90	0,025	Max. 0,035	0,90-1,20

Pomoću Hodge-Orehovski dijagrama (slika 6.3.) određujemo kritičnu tvrdoću zadanog čelika. Kritična tvrdoća čelika za 0,40%C iznosi 43. Iz tablice 7.2. možemo izvući vrijednosti maksimalne i minimalne tvrdoće u HRC s obzirom na udaljenost od gašenog čela uzorka.

Tablica 7.2. Tvrdoća na raznim udaljenostima od gašenog čela uzorka [7]

Udaljenost		1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50
+H	Max.	61	61	60	59	58	56	54	52	46	42	40	38	37	36	35
	Min.	53	52	50	47	41	37	34	32	29	26	23	21	-	-	-
+HH	Max.	61	61	60	59	58	56	54	52	46	42	40	38	37	36	35
	Min.	56	55	53	51	47	43	41	39	35	31	29	27	26	25	24
+HL	Max.	58	58	57	55	52	50	47	45	40	37	34	32	31	30	29
	Min.	53	52	50	47	41	37	34	32	29	26	23	21	-	-	-

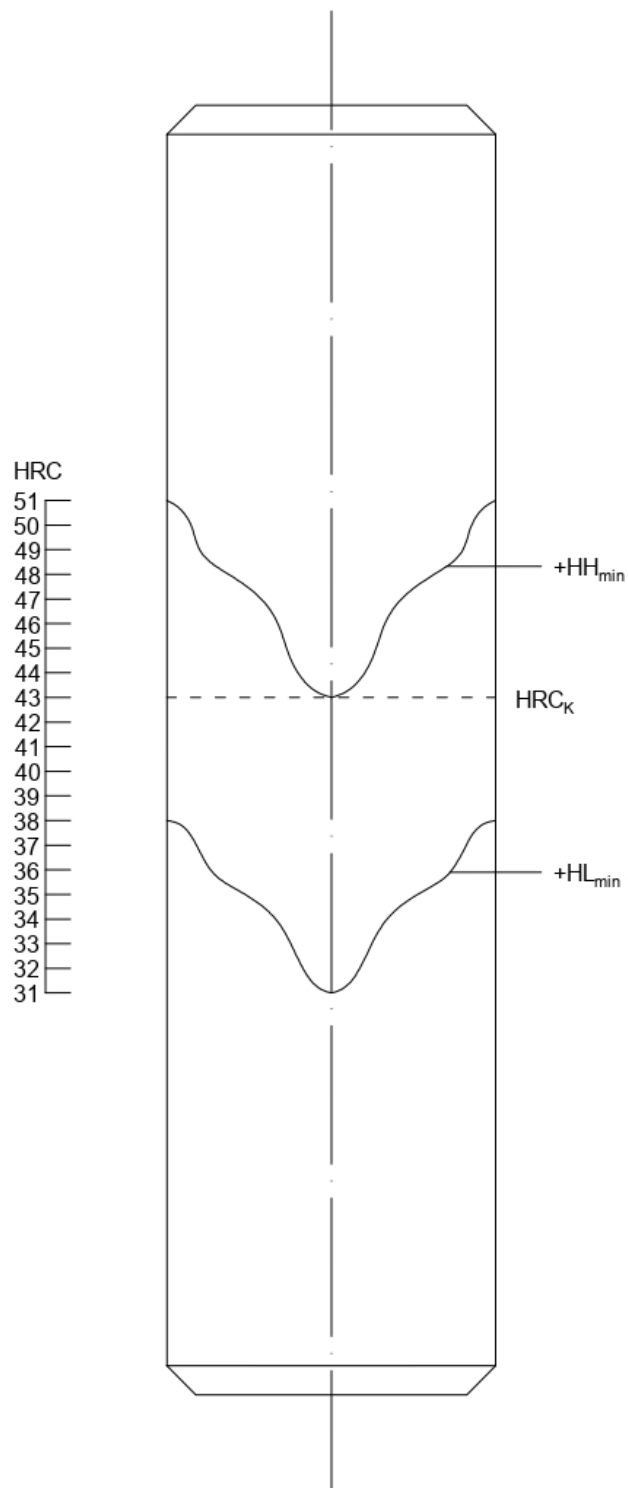
Na temelju tablice 7.2. izrađen je dijagram prokaljivosti (slika 7.2.), koji prikazuje udaljenosti od gašenog čela uzorka u milimetrima na apscisi te tvrdoće u HRC na ordinati. Žuta linija označava maksimalne vrijednosti tvrdoće, a plava linija minimalne vrijednosti tvrdoće od gašenog čela uzorka. Prostor između žute i crvene linije je područje visoke prokaljivosti, prostor između dvije crvene linije je područje srednje prokaljivosti i prostor između crvene i plave linije je područje niske prokaljivosti za čelik 41Cr4.



Slika 7.2. Dijagram prokaljivosti

8.2. Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela MH.22-PP.07

Korištenjem Crafts-Lamontovog dijagrama (slika 6.11.), pomoću promjera i intenziteta ohlađivanja u ulju $H = 0,35$, dobivena je udaljenost gašenog čela uzorka. Nakon toga udaljenost gašenog čela uzorka unosimo u dijagram prokaljivosti (slika 7.2.) na kojem očitavamo vrijednosti tvrdoće. Za $+HH_{\min}$ krivulju, koja predstavlja tok tvrdoće za minimalne vrijednosti tvrdoće legure čelika $+HH$, vrijednosti tvrdoće variraju od 43 do 51 HRC, a za $+HL_{\min}$ krivulju, koja predstavlja minimalne vrijednosti tvrdoće legure čelika $+HL$, vrijednosti tvrdoće variraju od 31 do 38 HRC (slika 7.3.). Za 0,4%C u čeliku i kritičnu vrijednost čelika $HRC_k = 43$, možemo zaključiti da će čelik 41Cr4 prokaliti u potpunosti kod krivulje $+HH_{\min}$, a kod krivulje $+HL_{\min}$ neće prokaliti.



Slika 7.3. Prikaz toka tvrdoće po presjeku strojnog dijela MH.22-PP.07 uz intenzitet ohlađivanja
 $H = 0,35$

8. ZAKLJUČAK

Toplinska obrada metala je proces zagrijavanja metala na određenu temperaturu i zadržavanje na toj temperaturi neko vrijeme, nakon čega slijedi postupak hlađenja. Ova obrada metala ima za cilj promijeniti svojstva metala kako bi se postigla željena svojstva za određenu primjenu.

Fazne pretvorbe u čeliku su procesi promjene strukture kristalne rešetke čelika pod utjecajem temperature. Postoji nekoliko faza u faznoj transformaciji čelika. Fazne pretvorbe u čeliku mogu se kontrolirati pomoću procesa toplinske obrade kako bi se postigle željene mehaničke osobine čelika za određenu primjenu. TTT-dijagram je dijagram koji opisuje fazne pretvorbe u čeliku kao funkciju temperature i vremena. TTT-dijagram pokazuje kako se čelik pretvara iz austenitne faze u druge faze, kao što su perlitna, martenzitna ili bainitna faza, kada se hladi različitim brzinama.

Kaljivost čelika je njegova sposobnost da se nakon zagrijavanja do određene temperature i brzog hlađenja (kaljenja) pretvori u martenzitnu fazu, koja ima visoku tvrdoću i čvrstoću. Kaljivost čelika ovisi o njegovom kemijskom sastavu, strukturi i brzini hlađenja. Čelici s većim udjelom ugljika, kao što su legirani čelici, imaju veću kaljivost, dok čelici s manjim udjelom ugljika imaju manju kaljivost. Postoje četiri poznate metode za procjenu prokaljivosti čelika, a Jominy metoda je najčešće korištena zbog svoje jednostavnosti i ekonomičnosti.

Ispitivanje tvrdoće čelika je važan postupak u otkrivanju mehaničkih osobina čelika. Postoje različite metode ispitivanja tvrdoće čelika, ali neke od najčešće korištenih su Brinellova, Vickersova i Rockwellova metoda. Svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke, ali mogu se koristiti u kombinaciji s drugim tehnikama za dobivanje točnijih podataka o tvrdoći čelika.

Jominyevom metodom odrađen je praktični dio zadatka u kojem je procijenjena dubina prokaljivanja strojnog dijela MH.22-PP.07 te je uz pomoć Crafts-Lamontovih dijagrama

zaključeno da će čelik 41Cr4 prokaliti kod krivulje +HH_{min}, a neće prokaliti kod krivulje +HL_{min} uz intenzitet ohlađivanja $H = 0,35$.

LITERATURA

- [1] Stupnišek, M.; Cajner, F.: „Osnove toplinske obradbe metala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [2] Smoljan, B.: „Toplinska obradba čelika, sivog i nodularnog lijeva“, Hrvatsko društvo za toplinsku obradbu i inženjerstvo površina, Zagreb, 1999.
- [3] Kraut, B.: “Krautov strojarski priručnik”, AXIOM d.o.o., Zagreb, 1997.
- [4] Landek, D.: “Proizvodni postupci - toplinska obrada”, s interneta, <https://pdfcoffee.com/toplinska-obrada-fsb-pdf-free.html>, 19.02.2023.
- [5] 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, 18.02.2023.
- [6] Krumes, D.: “Toplinska obradba”, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu, Slavonski brod, 2000.
- [7] “Steels for quenching and tempering – Part 3: Technical delivery conditions for alloy steels English version of DIN EN 10083-3:2007-01” ,DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2007.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Dijagram postupka toplinske obrade [1]

Slika 3.1. Dio faznog Fe-Fe₃C dijagrama [2]

Slika 3.2. Raspodjela ugljika u procesu tvorbe austenita [2]

Slika 3.3. Shematski prikaz dijagrama izotermičke tvorbe austenita [2]

Slika 3.4. Dijagram tvorbe austenita pri kontinuiranim uvjetima ugrijavanja [2]

Slika 3.5. Utjecaj temperature na brzinu perlitne pretvorbe [2]

Slika 3.6. Prikaz perlitne pretvorbe [2]

Slika 3.7. Nastanak martenzita od austenita [1]

Slika 3.8. Prikaz martenzitne kristalne rešetke [2]

Slika 3.9. Utjecaj koncentracije ugljika u primarno austenitu na temperature martenzitne pretvorbe [2]

Slika 3.10. Prikaz martenzitne strukture [2]

Slika 3.11. Ovisnost tvrdoće nelegirana čelika I martenzita o sadržaju ugljika [2]

Slika 3.12. Prikaz područja bainitne pretvorbe [2]

Slika 3.13. Prikaz pretvorbe austenita u bainit [2]

Slika 4.1. Konstrukcija TTT-dijagrama [1]

Slika 4.2. Prikaz izotermičkog i kontinuiranog TTT-dijagrama [1]

Slika 5.1. Utjecaj dimenzija predmeta na njegovu prokaljivost [1]

Slika 5.2. TTT-dijagrami za kontinuirano hlađenje dva različita čelika [1]

Slika 5.3. Vrijednosti tvrdoće čelika u odnosu na koncentraciju ugljika u martenzitu i udjelu martenzita u mikrostrukturi čelika [2]

Slika 5.4. Burnsov dijagram maksimalno postizive tvrdoće zakaljenih čelika ovisno o %C [1]

Slika 6.1. Justov dijagram preporučenog stupnja zakaljenosti za realna područja poboljšanja [6]

Slika 6.2. Određivanje kritičnog promjera D_k Grossmanovom metodom [5]

Slika 6.3. Korelacija tvrdoća – sadržaj ugljika – udio martenzita u strukturi prema Hodge Orehovskom [5]

Slika 6.4. Dijagram za određivanje idealnog kritičnog promjera D_i iz poznatog intenziteta rashladnog sredstva H i kritičnog promjera D_k [5]

Slika 6.5. “U krivulje” za čelik s 0,3%C i 3%Ni [5]

Slika 6.6. Dijagram za određivanje intenziteta rashladnog sredstva H i kritičnog promjera D_k [5]

Slika 6.7. Prikaz uređaja za ohlađivanje epruvete po Jominyu [1]

Slika 6.8. Prikaz krivulja ohlađivanja Jominyeve epruvete u TTT-dijagramu i tok tvrdoća [1]

Slika 6.9. Način utvrđivanja idealnog kritičnog promjera i kritičnog promjera iz rezultata Jominyevog pokusa [1]

Slika 6.10. Shematski prikaz korištenja Crafts-Lamont dijagrama za određivanje U-krivulja [5]

Slika 6.11. Crafts-Lamont dijagrami [5]

Slika 7.1. Strojni dio MH.22-PP.07

Slika 7.2. Dijagram prokaljivosti

Slika 7.3. Prikaz toka tvrdoće po presjeku strojnog dijela MH.22-PP.07 uz intenzitet ohlađivanja $H = 0,35$

POPIS TABLICA

Tablica 6.1. Podaci dobiveni snimanje “U krivulja” [5]

Tablica 6.2. Intenziteti ohlađivanja H za različita sredstva i načine ohlađivanja [5]

Tablica 7.1. Prikazuje kemijski sastav čelika 41Cr4

Tablica 7.2. Tvrdoća na raznim udaljenostima od gašenog čela uzorka

SAŽETAK

Ovaj završni rad sadržava teorijski i praktični dio, koji su podijeljeni u više poglavlja. Teorijski dio podrazumijeva prvih sedam poglavlja, kroz koje su objašnjene teme toplinske obrade metala i vrste toplinske obrade, fazne pretvorbe u čeliku, zatim je u svrhu objašnjenja toplinske obrade objašnjen i TTT-dijagram. Opisan je i pojam kaljivosti, nakon čega su detaljno razrađene metode za procjenu prokaljivosti i metode za mjerenje tvrdoće. Kraj rada zaključen je sa praktičnim dijelom u kojem je procijenjena dubina prokaljivanja strojnog dijela MH.22-PP.07. Materijal u pitanju je čelik 41Cr4, a tvrdoća i dubina sloja strojnog dijela utvrđena je na temelju eksperimentalno utvrđene Jominyeve krivulje.

Ključne riječi: toplinska obrada, čelik, fazne pretvorbe, kaljivost, Jominyeva metoda, tvrdoća, gašenje, prokaljivanje

SUMMARY

This thesis contains a theoretical and practical part, which are divided into several chapters. The theoretical part encompasses the first seven chapters, which explain the topics of heat treatment of metals and types of heat treatment, phase transformations in steel, and to explain the heat treatment, the TTT-diagram is also explained. The concept of hardenability is described, after which methods for assessing hardenability and methods for measuring hardness are elaborated in detail. The end of the thesis concludes with the practical part in which the hardening depth of the workpiece MH.22-PP.07 was estimated. The material in question is steel 41Cr4, and the hardness and depth of the layer of the workpiece were determined based on the experimentally determined Jominy curve.

Key words: heat treatment, phase transformations, hardenability, Jominy method, hardness, quenching, hardening