

Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela NV.22-DP.82

Vukotić, Natali

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:190:644161>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-04**



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

NV.22-DP.82

Rijeka, rujan 2022.

Natali Vukotić

0069079908

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA

NV.22-DP.82

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

Rijeka, rujan 2022.

Natali Vukotić

0069079908

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 16. ožujka 2022.

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

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Natali Vukotić (0069079908)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**
Modul: **Inženjerstvo materijala**

Zadatak: **Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela NV.22-DP.82 / Estimation of hardening depth of workpiece NV.22-DP.82**

Opis zadatka:

Potrebno je procijeniti dubinu prokaljivanja strojnog dijela NV.22-DP.82 nakon kaljenja. Potrebno je teorijski obraditi i opisati pojam prokaljivosti, a zatim opisati i usporediti postojeće metode za procjenu prokaljivosti.

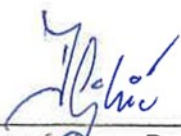
Tvrdoću i dubinu prokaljenog sloja strojnog dijela NV.22-DP.82 potrebno je procijeniti primjenom Jominyjevog pokusa, na osnovi eksperimentalno utvrđene Jominyjeve krivulje. Potrebno je proanalizirati rezultate Jominyjevog pokusa i donijeti odgovarajuće zaključke. Također, potrebno je opisati postrojenje za izvođenje Jominyjevog pokusa i svu korištenu opremu.

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

Natali Vukotić

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Dario Ijkić

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA

Sukladno članku 11. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad.

Diplomski rad naziva „Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela NV.22-DP.82“ izradila sam samostalno primjenjujući znanje i iskustvo stečeno tijekom diplomskog studija na Tehničkom fakultetu u Rijeci te koristeći stručnu literaturu uz vodstvo i savjetovanje mentora izv. prof. dr. sc. Daria Iljkića.

Natali Vukotić

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojem mentoru izv. prof. dr. sc. Dariu Ilkiću na prenesenom znanju tijekom studija i na uloženom trudu i stručnom vodstvu tijekom izrade diplomskog rada. Posebno hvala asistentu Lovru Liveriću na uloženom vremenu i stručnoj pomoći prilikom izvođenja praktičnog dijela diplomskog rada.

Iskreno se zahvaljujem svim bližnjima na neiscrpoj podršci i razumijevanju tijekom studiranja i kolegama na savjetovanju i potpori tokom pisanja ovog rada.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. MIKROSTRUKTURNA PRETVORBA U ČELIKU	2
2.1. Martenzitna pretvorba u čeliku	7
2.2. TTT-dijagrami.....	12
3. KALJENJE ČELIKA.....	18
3.1. Zakaljivost i prokaljivost čelika	21
3.2. Učinak legiranja na zakaljivost i prokaljivost čelika	24
4. POSTUPCI ISPITIVANJA PROKALJIVOSTI.....	29
4.1. Grossmannov postupak ispitivanja prokaljivosti.....	29
4.2. Jominyjev postupak ispitivanja prokaljivosti.....	31
4.3. Crafts-Lamont dijagrami.....	37
5. PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA NV.22-DP.82.....	40
6. ZAKLJUČAK	53
LITERATURA	54
POPIS TABLICA.....	56
POPIS SLIKA.....	57
SAŽETAK.....	59
SUMMARY.....	60

1. UVOD

Čelik je definiran kao slitina, odnosno legura, željeza s maksimalnim udjelom ugljika do 2,03% uz moguću prisutnost ostalih legirajućih elemenata (mangan, silicij, sumpor, fosfor itd.). [1]

Smatra se jednim od najvažnijih konstrukcijskih i alatnih materijala u strojarstvu te je jedan od najčešće korištenih materijala u građevinskoj industriji. Tu titulu ima zahvaljujući svojim svojstvima koja se mogu mijenjati u širokom rasponu legiranjem, toplinskom obradom ili oblikovanjem deformiranjem. Glavni utjecaj na svojstva obradivosti i kvalitete čelika je udio ugljika koji se kreće približno od 0,002% do 2,03% u odnosu na ukupni maseni sastav.

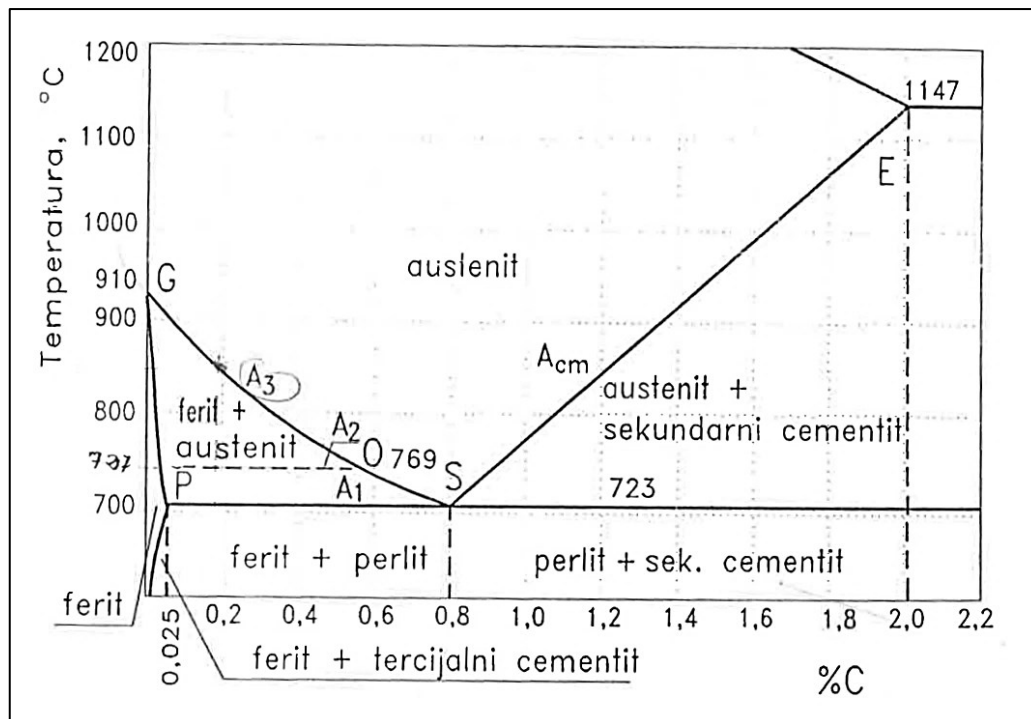
Mikrostruktura čelika zajedno sa ostalim utjecajnim čimbenicima (veličina kristalnog zrna, utjecaj legiranja, itd.) izravno određuje njegova mehanička svojstva. Toplinska obrada je proces gdje se predmet podvrgava temperaturno-vremenskim ciklusima radi izmjene njegove mikrostrukture. Izmjenom mikrostrukture materijala mijenjaju se i njegova svojstva koja osim mehanička mogu biti fizička ili kemijska. Različitim režimima ohlađivanja postiže se različita mikrostruktura čelika i samim time i različita svojstva čelika. [2, 3]

Najrašireniji postupci toplinske obrade za čelik su kaljenje, popuštanje, poboljšavanje i žarenje. Za potrebe ovog diplomskog rada fokus će biti na kaljenju čelika koje će se detaljnije definirati u narednim poglavljima.

2. MIKROSTRUKTURNA PRETVORBA U ČELIKU

Metastabilni dijagram stanja Fe-Fe₃C predstavlja polazišnu točku kod toplinske obrade čelika za izbor toplinskih i drugih parametara. Fazni dijagram nastaje toplinskom analizom krivulja zagrijavanja te se s obzirom na brzinu ohlađivanja razlikuju stabilni i metastabilni fazni dijagrami. Stabilni dijagram (Fe-C) nastaje polaganim ohlađivanjem taljevine do temperature okoline uslijed čega dolazi do izlučivanja ugljika u obliku grafita. Metastabilni dijagram (Fe-Fe₃C) nastaje bržim ohlađivanjem taljevine i time se ugljik izlučuje u obliku cementita odnosno željeznog karbida (Fe₃C). Oba dijagrama su idealizirani slučajevi koje u praksi nije moguće ostvariti jer se legure nikad ne sastoje isključivo od željeza i ugljika. Prisutnost raznih uključaka i nečistoća utječe na oblik koji će grafit poprimiti prilikom hlađenja i kristalizacije. Tvari koje pospješuju nastajanje grafita nazivamo grafitizatori i pod njih spadaju aluminij (Al), nikal (Ni), silicij (Si) i ugljik (C). Tvari koje pospješuju stvaranje cementita zovu se cementatori, a neki od poznatijih su krom (Cr) i Mangan (Mn).

Na slici 2.1. vidljiva su karakteristična mikrostrukturna područja i kritične temperature kristalizacije koje vrijede za dovoljno sporo ohlađivanje ili ugrijavanje kod čelika.

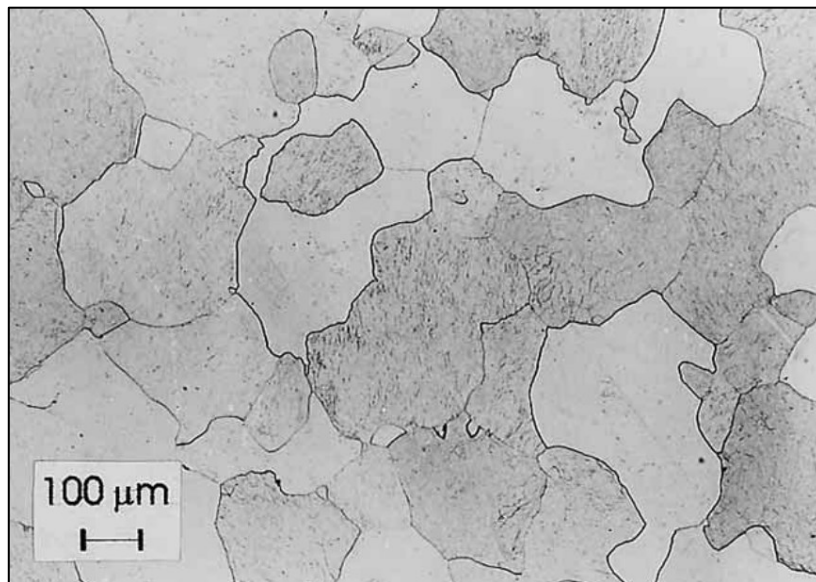


Slika 2.1. Metastabilni fazni dijagram Fe-Fe₃C za čelik [2]

Kritične temperature faznih pretvorbi označavamo slovom „A“ koje se dodatno poprate s indeksima ovisno o tome radi li se o zagrijavanju ili ohlađivanju. Zagrijavanje označavamo indeksom „c“, a ohlađivanje indeksom „r“. Tako na primjer oznaka A_1 označava ravnotežnu temperaturu između perlitne i austenitne faze, A_{c1} označava temperaturu pretvorbe perlitne u austenitnu fazu, a A_{r1} je temperatura pretvorbe austenitne u perlitnu fazu.

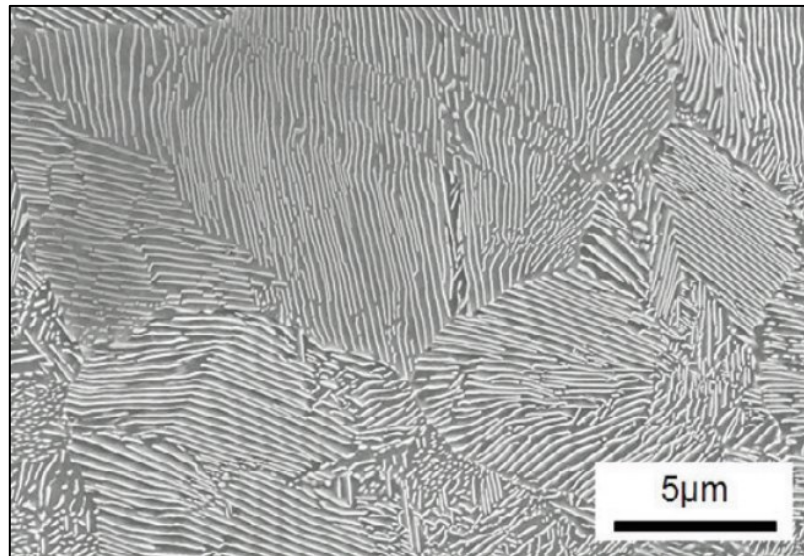
Faze koje se pojavljuju u čeliku prema metastabilnom Fe-Fe₃C dijagramu stanja su:

- ferit (α -faza)-uključinski kristal mješanac ugljika i α -željeza s najviše 0,025% C i s prostorno centriranom kubičnom rešetkom (BCC)



Slika 2.2. Metalografski prikaz feritne strukture [4]

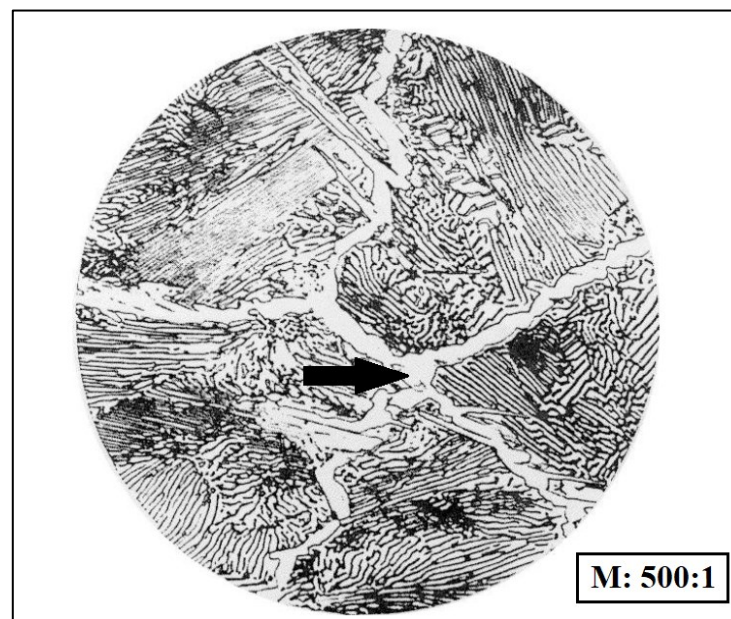
- perlit-eutektoid (sadrži 0,8% C), smjesa lamela ferita i cementita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), pseudofaza



Slika 2.3. Metalografski prikaz perlitne strukture [5]

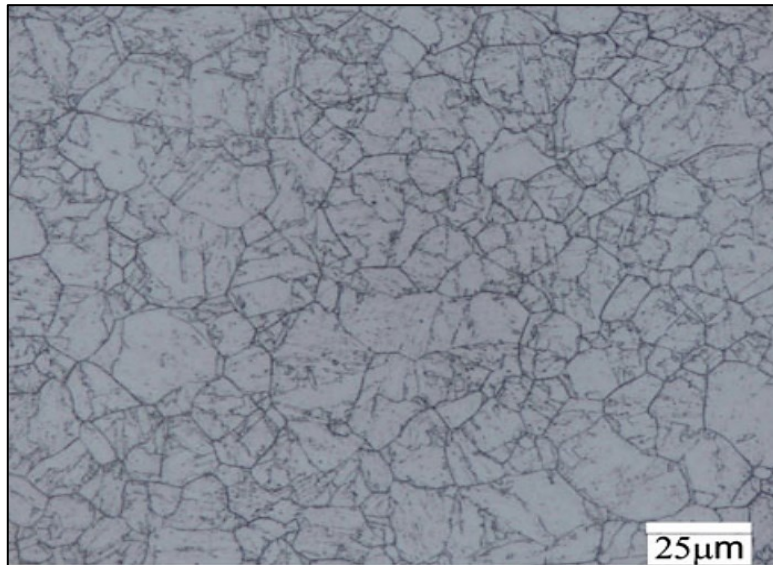
Čelik koji sadrži 0,8% C ugljika naziva se eutektoidnim čelikom. Sukladno tomu čelik koji sadrži manje od 0,8% C zove se podeutektoidnim čelikom, a čelik koji sadrži postotak ugljika između 0,8-2,03% C nazivamo nadeutektoidnim čelikom.

- sekundarni cementit-željezni karbid (Fe_3C), intermetalni spoj ugljika i željeza, kristalna rešetka u obliku romba, izlučuje se po granicama kristalnih zrna



Slika 2.4. Metalografski prikaz cementitne strukture [6]

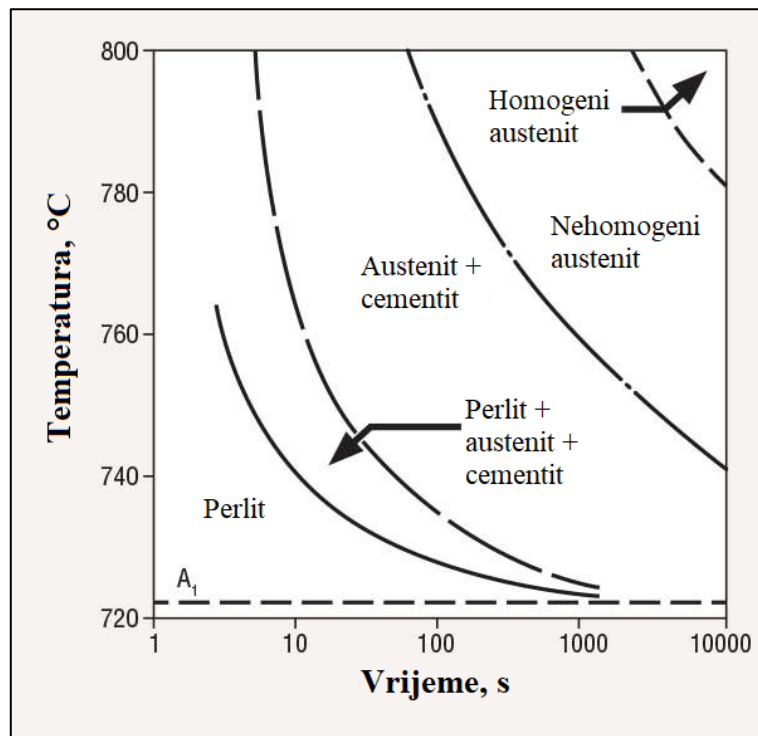
- austenit (γ -faza)-uključinski kristal mješanac ugljika i γ -željeza s plošno centriranom kubičnom rešetkom (FCC) koji se formira iznad kritične temperature A_1



Slika 2.5. Metalografski prikaz austenitne strukture [7]

Austenita mikrostruktura nastaje difuzijskim mehanizmima u pretvorbi dvije različite faze (ferita i cementita) u treću fazu-austenit. Minimalna i maksimalna koncentracija ugljika u austenitu mogu se iščitati iz faznog dijagrama u kojem su označene linijama GS (minimalna) i SE (maksimalna). Linija GS predstavlja ravnotežnu temperaturu A_3 koja vrijedi za podeutektoidne čelike nakon koje se prisutni ferit pretvara austenit. Linija SE označava ravnotežnu temperaturu A_{cm} pri kojoj se kod nadeutektoidnih čelika sav prisutni cementit u potpunosti transformira u austenit. Za eutektoidne čelike, ravnotežna temperatura koja označava pretvorbu perlita u austenit je označena sa A_1 .

Austenit će nastati pri zagrijavanju onda kada je slobodna energija austenita dovoljno niža od slobodne energije feritno-karbidne smjese i ako ima dovoljno vremena za difuzijski mehanizam. Brzina austenitne pretvorbe ovisi o brzini difuzije ugljika u novonastaloj fazi. Difuzija atoma i razlika slobodnih energija povećavaju se povišenjem temperature iznad ravnotežne temperature A_1 . Pretvorba perlita u austenit nastaje zbog alotropskih promjena kristalne rešetke α -željeza (BCC) u γ -željezo (FCC), razlaganja cementita i difuzije atoma ugljika. [2,8]



Slika 2.6. Dijagram tvorbe perlita u austenit [9]

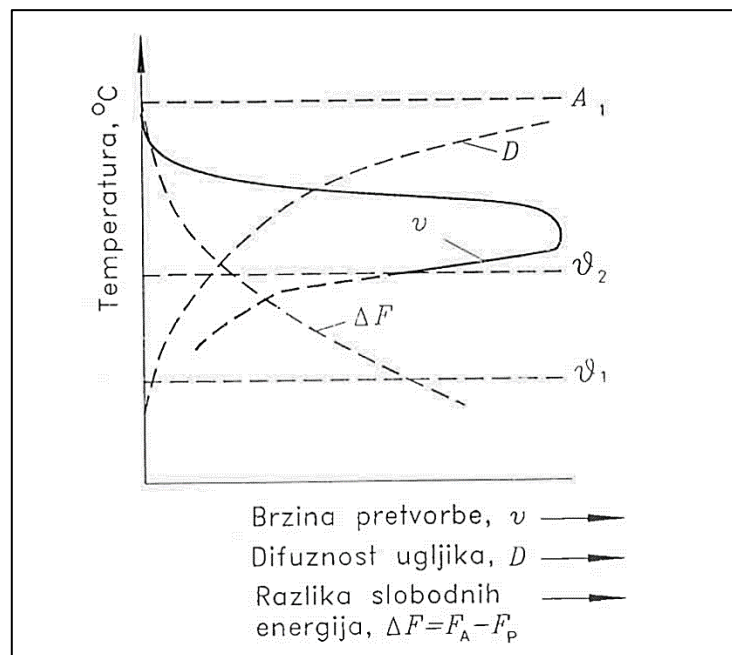
Tvorba austenita može se podijeliti na više etapa. Započinje s pretvorbom perlita u austenit, potom slijedi otapanje karbida nakon kojeg se dobiva nehomogeni austenit. Potrebno je dodatno vrijeme za homogenizaciju austenitnih zrna nakon čega dobivamo konačni homogeni austenit.

Dodatnim držanjem čelika na povišenim temperaturama započinje rast kristalnog zrna austenita. Prema sklonosti rastu austenitnog zrna može razlikovati dvije vrste čelika: krupnozrnati i sitnozrnati čelik. Čelici sa finom sitnozrnatom mikrostrukturom u pravilu ima povoljnija mehanička svojstva. [2]

2.1. Martenzitna pretvorba u čeliku

Ohlađivanjem čelika ispod ravnotežne temperature A_1 (A_3 , A_{cm}) austenit postaje nestabilan i počinje težiti raspadu na niskotemperaturne faze. Ovisno o brzini ohlađivanja razlikuju se mehanizmi raspadanja na faze, a samim time i same faze koje nastaju. [2]

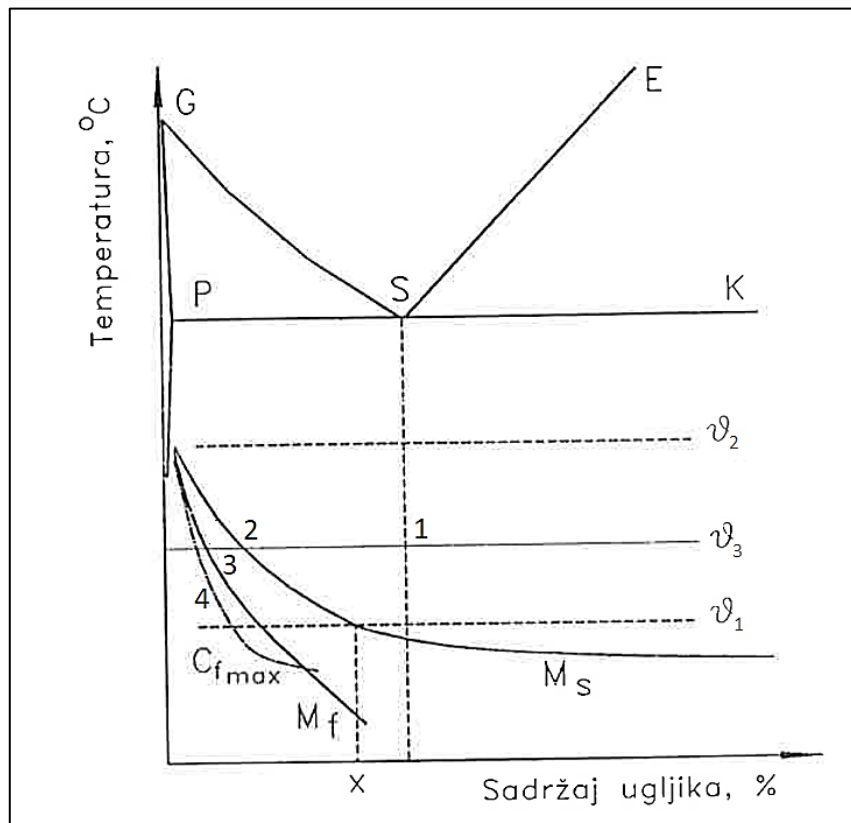
Austenit se pri sporijim ohlađivanjima ispod ravnotežne temperature pomoću mehanizama difuzije raspada na perlit. Za perlitnu pretvorbu mora biti zadovoljen uvjet energetske nestabilnosti između slobodnih energija početne austenitne faze i konačne perlitne faze i mora biti zadovoljna dovoljna difuzija atoma. Za potrebe oba uvjeta temperatura se mora nalaziti ispod temperature A_1 i iznad temperature ϑ_1 koja predstavlja temperaturu ispod koje nema difuzije ugljika i iznosi $200\text{ }^\circ\text{C}$.



Slika 2.1.1. Odnos temperature i brzine perlitne pretvorbe [2]

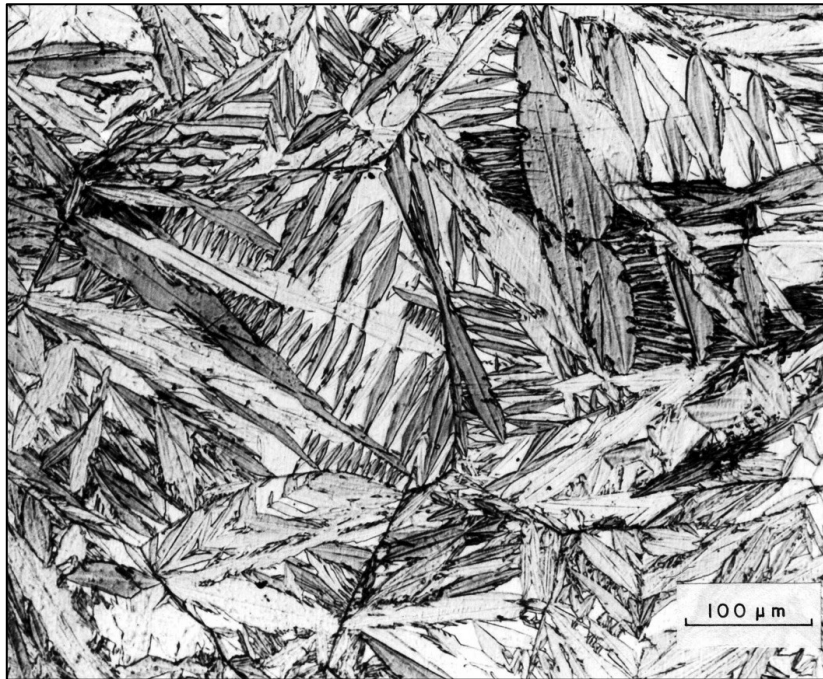
Ako se austenit dijelom raspada bezdifuzijski, a dijelom difuzijskim mehanizmima onda se govori o bainitnoj pretvorbi. Bainit je fino raspršena mješavina igličaste mikrostrukture koja se sastoji od prezasićenog ferita i karbida i naziva se međustupnjem jer se proteže između perlitne i martenzitne pretvorbe (između ϑ_1 i ϑ_2). Mijenjanjem temperature pretvorbe mijenja se omjer difuzijskih i bezdifuzijskih procesa u bainitnoj pretvorbi i samim time i mikrostrukturu bainita koji nastaje.

Razlikuju se dvije vrste bainita prema mikrostrukтури, a to su gornji i donji bainit. Za potrebe bainitne pretvorbe moraju biti zadovoljena dva uvjeta od kojih je prvi dovoljno pothlađivanje osiromašenog austenita za smičnu pretvorbu u martenzit (ispod koncentracije 2, odnosno 3 na slici 2.1.2.), a drugi dovoljna difuzija ugljika.



Slika 2.1.2. Grafički prikaz područja bainitne pretvorbe [2]

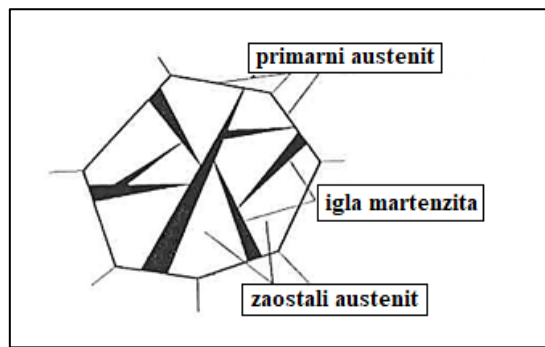
Pri dovoljno brzom hlađenju (gašenju) pomoću bezdifuzijskog mehanizma koji se sastoji od procesa smicanja događa se transformacija γ -željeza s FCC kristalnom rešetkom u α -željezo s BCC kristalnom rešetkom. Spomenuti proces naziva se martenzitna pretvorba, odnosno pretvorba austenita u martenzit i anizotermički je proces. Martenzit je kruta otopina ugljika u α -željezu s najviše 2,03% C. Koncentracija ugljika u martenzitu jednaka je koncentraciji ugljika u prethodnom austenitu. Martenzitna kristalna rešetka nije kubična kao u slučaju ferita, već je prostorno centrirana tetragonalna rešetka, BCT. [2]



Slika 2.1.3. Metalografski prikaz martenzitne mikrostrukture [10]

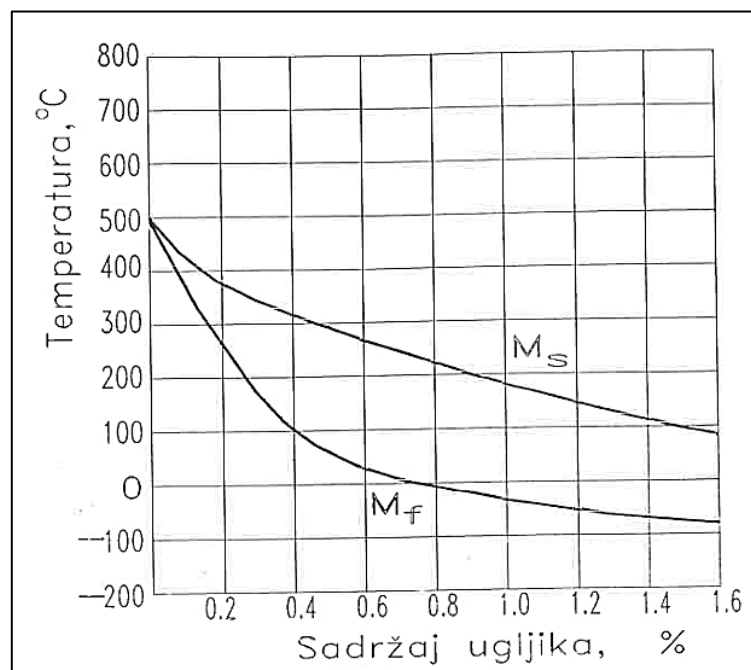
Martenzit ima uvijek veću slobodnu energiju od feritno-karbidne smjese, stoga nije moguće direktno iz nje dobiti martenzit. Kako bi se postigla martenzitna struktura prvo se mora ugrijati čelik do austenitnog područja gdje feritno-karbidna smjesa prelazi u austenit, a nakon toga gašenjem austenita će se dobiti martenzitna mikrostruktura. Opisani proces koji prethodi gašenju čelika naziva se austenitizacija čelika. Postupak toplinske obrade koji kombinira austenitizaciju čelika i njegovo naknadno gašenje u svrhu dobivanja martenzitne mikrostrukture zove se kaljenje čelika, a čelik koji se nalazi u martenzitnoj strukturi je zakaljen čelik.

Nakon gašenja čelika iz austenitnog područja jedan dio austenita na niskim temperaturama martenzitnom pretvorbom se transformira u martenzit, a drugi dio austenita se ustaljuje u mikrostrukuri. Veća količina zaostalog austenita u martenzitnoj strukturi je nepoželjna, pogotovo ako se zaostali austenit izdvoji kao zasebna faza. Martenzitna pretvorba započinje na početnoj temperaturu M_s („*Martensite Start*“) i završava na konačnoj temperaturi M_f („*Martensite Finish*“). Početna i konačna temperatura ne ovise o brzini ohlađivanja, već na njih utječe koncentracija ugljika i legirajućih elemenata u prethodnoj austenitnoj fazi. Austenit koji je postojan između temperature A_1 (A_3 , A_{cm}) i temperature M_s naziva se pothlađenim austenitom i označava se kao A_p .

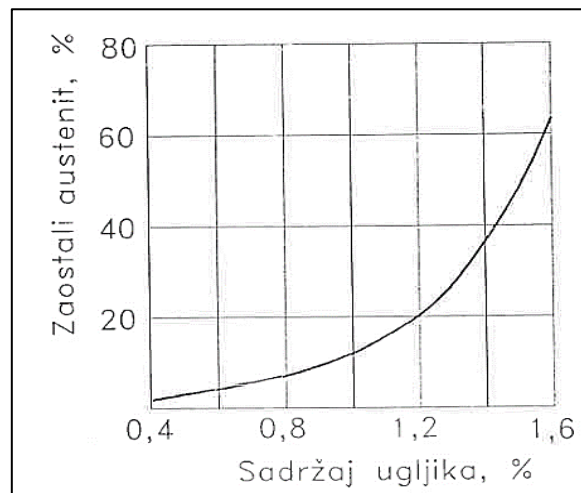


Slika 2.1.4. Formiranje martenzitne strukture [2]

Povećanjem koncentracije ugljika u primarnom austenitu raste i količina zaostalog austenita u mikrostrukturi nakon martenzitne pretvorbe, a smanjuju se početna i konačna temperatura martenzitne pretvorbe. Legirajući elementi utječu na temperaturu martenzitne pretvorbe samo ako su već bili otopljeni u primarnom austenitu. Povećanjem koncentracije mangana (Mn), kroma (Cr), nikla (Ni), vanadija (V) i molibdena (Mo) snižavaju se temperature martenzitne pretvorbe i povećava količina zaostalog austenita. S povećanjem koncentracije kobalta (Co) i aluminija (Al) povisuju se temperature martenzitne pretvorbe, a smanjuje se količina zaostalog austenita.

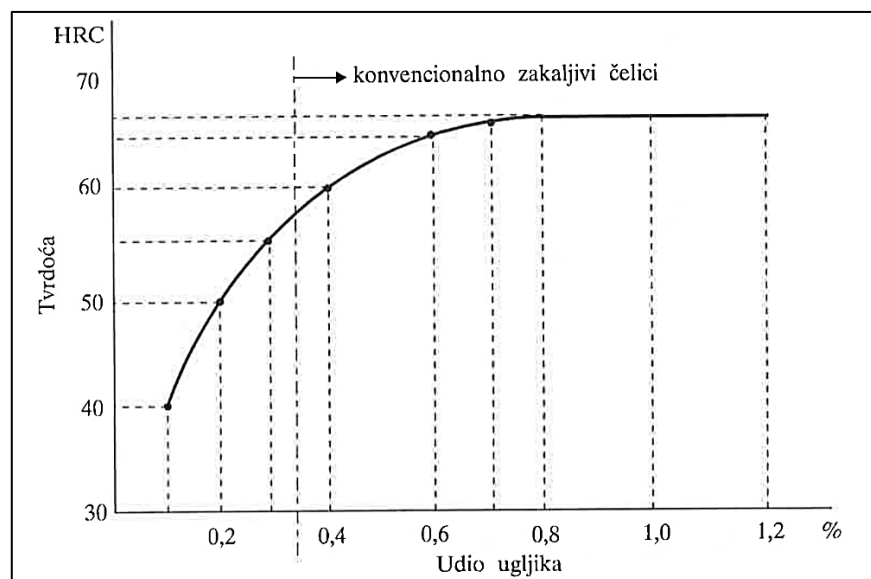


Slika 2.1.5. Utjecaj udjela ugljika u austenitu na temperature martenzitne pretvorbe [2]



Slika 2.1.6. Utjecaj udjela ugljika u primarnom austenitu na količinu zaostalog austenita [2]

Sadržaj ugljika ima jednu od važnijih uloga u određivanju tvrdoće martenzitne strukture. Povećanjem koncentracije ugljika paralelno se povećava i tvrdoća i smanjuje žilavost martenzita. Odlike martenzita sa visokim sadržajem ugljika su izrazita tvrdoća i krhkost. Tvrdoća u odnosu na koncentraciju ugljika vidljiva je u Burnsovom dijagramu na slici 2.1.7.

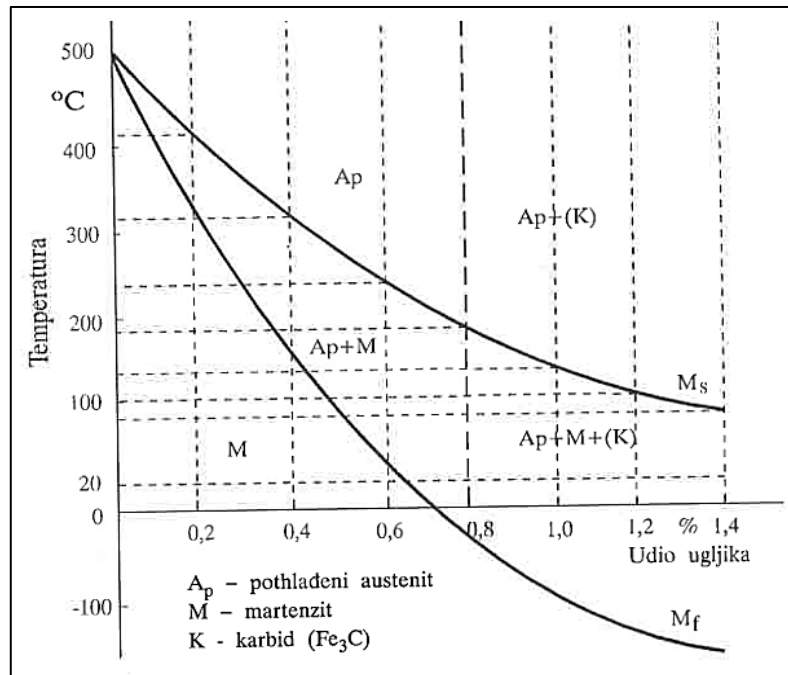


Slika 2.1.7. Burnsov dijagram [3]

Drugi utjecajni faktor na tvrdoću martenzita je udio zaostalog austenita i karbida, gdje pri većoj količini zaostalog austenita dolazi do njegovog izlučenja u obliku izdvojene faze i ukupna tvrdoća nakon pretvorbe opada. Količina zaostalog austenita može se smanjiti dubokim hlađenjem do temperatura od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ zbog postignuća 100%-tnog martenzita.

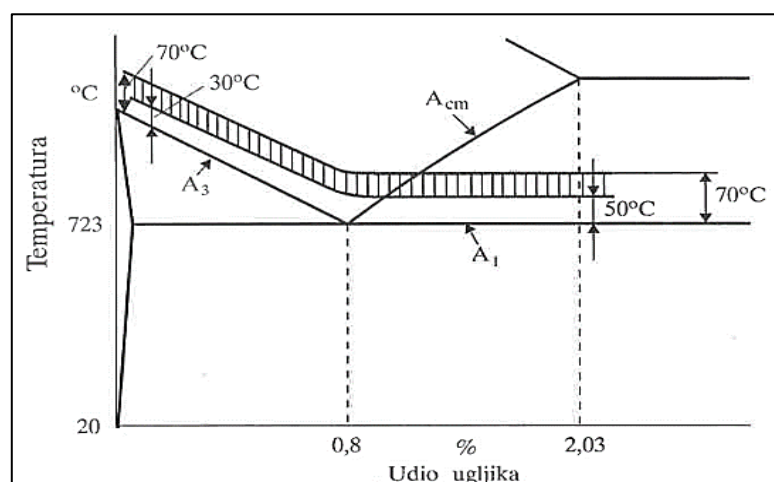
2.2. TTT-dijagrami

Dijagram početka i završetka martenzitne pretvorbe zove se Uptonov dijagram. On vrijedi samo za vrlo brzo ohlađivanje što se kod čelika bez legirajućih dodataka ostvaruje gašenjem u vodi.



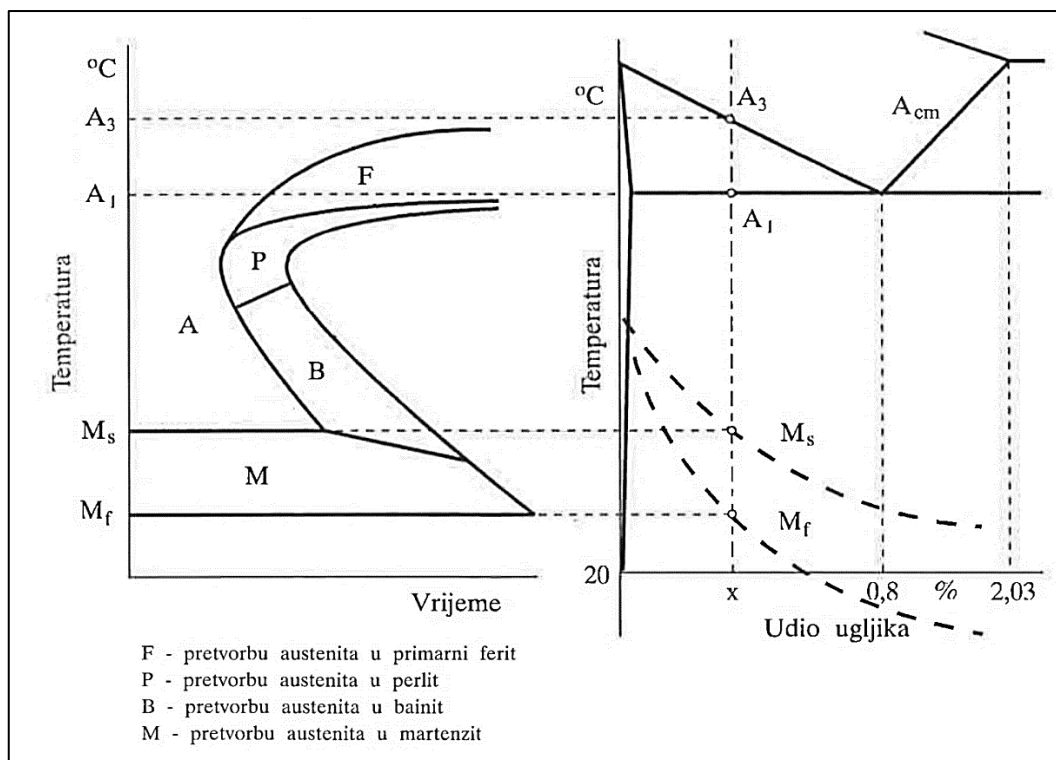
Slika 2.2.1. Uptonov dijagram [3]

Uptonov dijagram s podacima za gašenje, u kombinaciji sa temperaturama austenitizacije očitanih iz Fe-Fe₃C dijagrama, služi u praksi za izvođenje postupaka toplinske obrade čelika.



Slika 2.2.2. Raspon optimalnih temperatura austenitizacije kod kaljenja čelika [3]

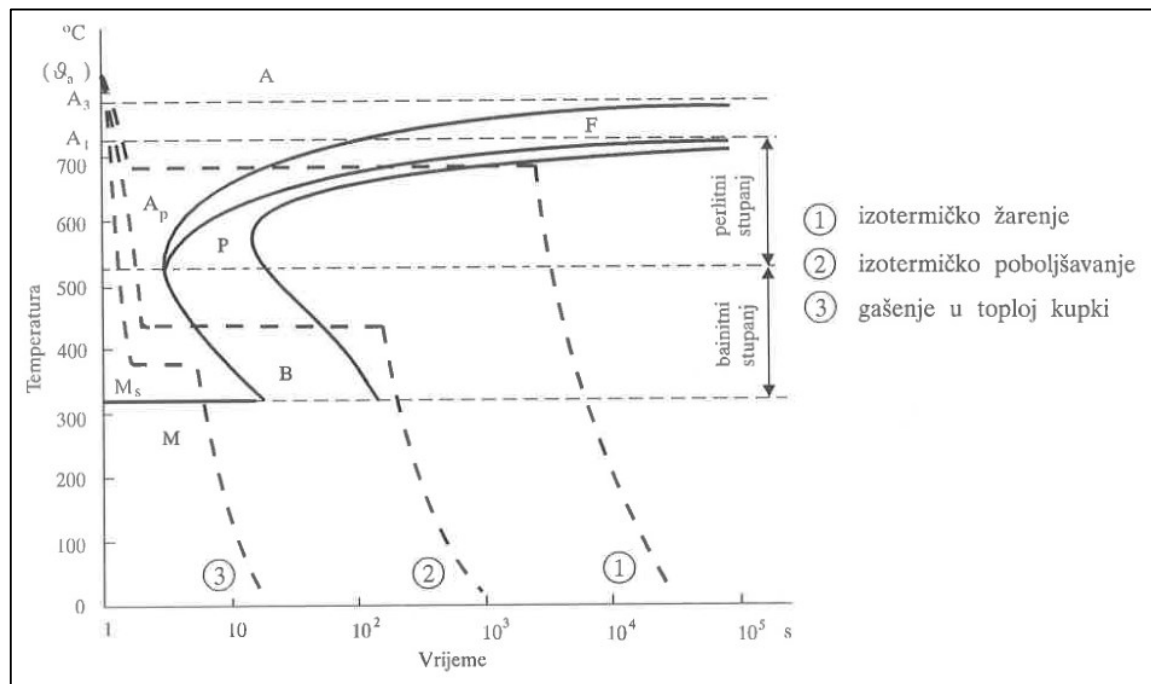
Kombinacijom dijagrama Fe-Fe₃C i Uptonovog dijagrama u jednom dijagramu sa dijagramom temperatura-vrijeme (ϑ .t) dobiva se TTT-dijagram (*Time, Temperature, Transformation*; vrijeme, temperatura, pretvorba). TTT-dijagram prikazuje dinamiku faznih pretvorbi pri ohlađivanju iz područja austenita za jedan zadani čelik. Svaki TTT-dijagram izrađuje se eksperimentalnim ispitivanjima čelika točno određenog kemijskog sastava i vrijedi za odabranu temperaturu austenitizacije.



Slika 2.2.3. Konstrukcija TTT-dijagrama [3]

Raspada austenita se može ostvariti pri izotermičkim uvjetima kod kojih je vrijeme pretvorbe austenita u sekundarne faze konstantna, i pri kontinuiranim uvjetima ohlađivanja, kod kojih temperatura kontinuirano opada za vrijeme pretvorbe. Ovisno o načinu raspada austenita razlikuju se dvije vrste TTT-dijagrama: izotermički TTT-dijagrami i TTT-dijagrami za kontinuirano ohlađivanje. Izotermički TTT-dijagrami čitaju se samo duž izoterme, a TTT-dijagrami za kontinuirano ohlađivanje samo duž krivulja ohlađivanja.

Pomoću izotermičkih TTT-dijagrama moguće je za određenu temperaturu odrediti vrijeme početka i kraja pretvorbe i procijeniti mikrostrukturu i tvrdoću obrađenog čelika. Od raznih izotermičkih obrada gašenje u toploj kupki („*martempering*“) se ističe kao posebni postupak toplinske obrade čelika koji daje martenzitnu strukturu. Čelik se ohladi s temperature austenitizacije na temperaturu izotermičke pretvorbe ϑ_{iz} koja je malo iznad početne temperature martenzitne pretvorbe M_s i drži se na njoj do početka bainitne transformacije. Potom se, dok je još u stanju pothlađenog austenita, vadi iz tople kupke i ohlađuje na zraku čime se ostvaruje martenzitna pretvorba kontinuiranim ohlađivanjem.

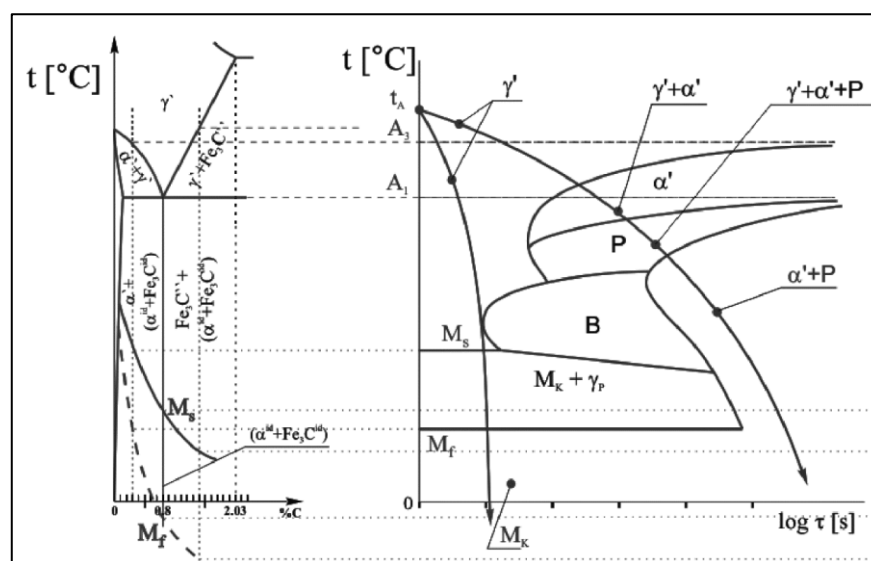


Slika 2.2.4. Izotermički TTT-dijagram za podeutektoidni čelik [3]

Osim podataka koji se ucrtavaju u izotermičke TTT-dijagrame, u TTT-dijagrame za kontinuirano ohlađivanje ucrtavaju se i krivulje ohlađivanja. Pomoću njih može se za određenu brzinu ohlađivanja odrediti vrijeme početka i kraja fazne pretvorbe i odrediti osnovna svojstva slitine nakon ohlađivanja. Također pri kraju svake krivulje je brojčani iznos tvrdoće čelika koji je hlađen po toj krivulji. Zbog potrebe prikazivanja mikrostrukturnih pretvorbi u vrlo kratkim i vrlo dugim trajanjima mjerilo apscise TTT-dijagrama za kontinuirano ohlađivanje je logaritamsko.

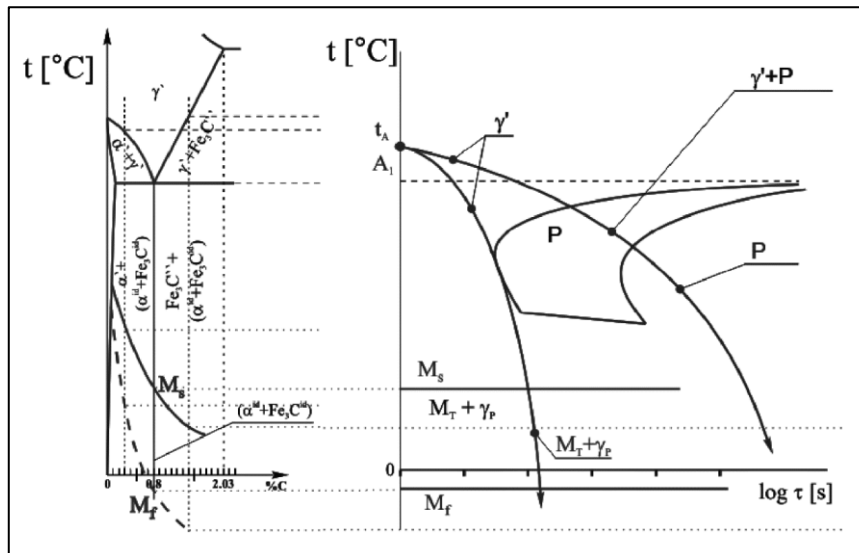
Za razumijevanje ponašanja čelika pri gašenju važno je poznavanje minimalne brzine ohlađivanja pri kojoj se kompletan austenit transformira u martenzit. Nju se naziva gornjom kritičnom brzinom gašenja, ali treba napomenut kako je taj izraz praktične prirode jer u procesu gašenja obradak se ne hladi konstantnom brzinom. Gornja kritična brzina gašenja ovisi o brzini perlitne pretvorbe, što je veća brzina perlitne pretvorbe to je veća kritična brzina. Svi utjecajni čimbenici na perlitnu pretvorbu stoga direktno utječu i na iznos kritične brzine gašenja. Na TTT-dijagramu za kontinuirano ohlađivanje gornja kritična brzina gašenja definirana je gornjom kritičnom krivuljom ohlađivanja čelika koja tangira krivulje početka pretvorbe u perlitni ili bainitni stupanj.

Na slikama 2.2.5., 2.2.6. i 2.2.7. prikazani su TTT-dijagrami za kontinuirano ohlađivanje za podeutektoidni, eutektoidni i nadeutektoidni čelik kao i dio dijagrama stanja Fe-Fe₃C s Uptonovim dijagramom. Svaki dijagram sadrži po dvije krivulje hlađenja, prva krivulja označava hlađenje gornjom kritičnom brzinom, a druga krivulja je za sporo hlađenje. [11]



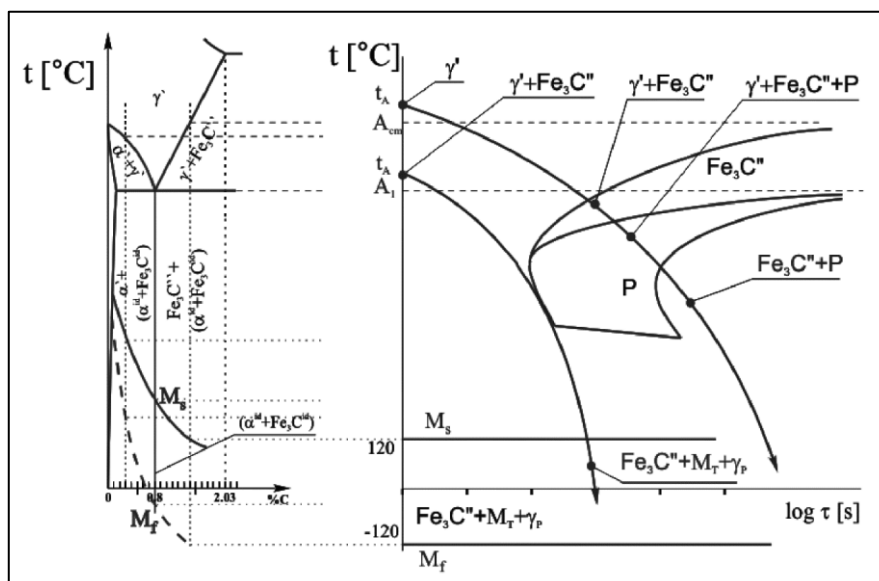
Slika 2.2.5. TTT-dijagram za kontinuirano ohlađivanje za podeutektoidni čelik [11]

TTT-dijagram za podeutektoidne čelike u visokotemperaturnom području ima područje feritne i perlitne pretvorbe. Mikrostruktura nakon gašenja po gornjoj kritičnoj krivulji gašenja kod podeutektoidnih čelika sastoji se od čistog martenzita.



Slika 2.2.6. TTT-dijagram za kontinuirano ohlađivanje za eutektoidni čelik [11]

TTT-dijagrami eutektoidnog sastava na višim temperaturama imaju samo područje perlitne pretvorbe. Mikrostruktura nakon gašenja po gornjoj kritičnoj krivulji gašenja je sastavljena od martenzita i zaostalog austenita.



Slika 2.2.7. TTT-dijagram za kontinuirano ohlađivanje za nadeutektoidni čelik [11]

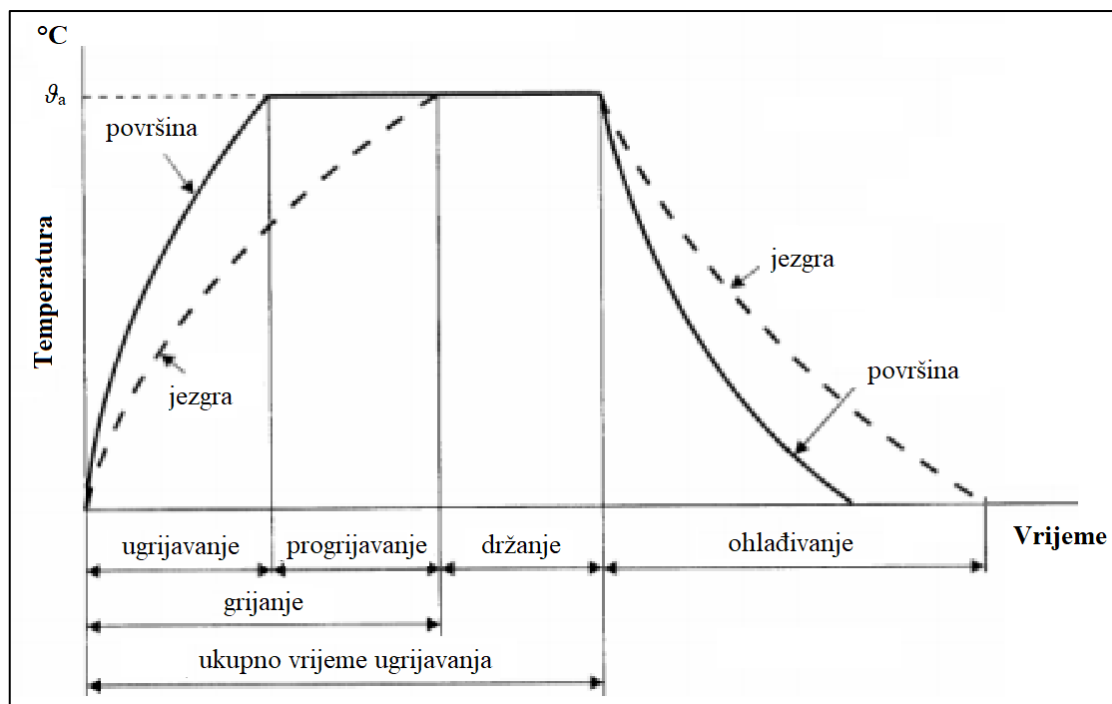
TTT-dijagrami nadeutektoidnih čelika imaju područje pretvorbe austenita u sekundarni cementit i područje perlitne pretvorbe. Mikrostruktura nakon gašenja po gornjoj kritičnoj krivulji gašenja sastavljena je od martenzita, zaostalog austenita i sekundarnog cementita.

U slučajevima natkritičnog ili gornjeg kritičnog gašenja postiže se tvrdoća kaljenja u skladu s Burnsovim dijagramom. Svaka manje intenzivna gašenja daju tvrdoće koje su tim niže što je ohlađivanje manje intenzivno.

Promjenom kemijskog sastava čelika mijenja se difuznost ugljika i ostalih elemenata u čeliku, a time se u TTT-dijagramima mijenjaju i položaj i veličina pojedinih mikrostrukturnih područja. Legirajući elementi u pravilu usporavaju difuzijske mehanizme koji su osnovni uvjet za perlitnu pretvorbu. Većina legirajućih elemenata zajedno s ugljikom pomiču krivulje difuzijskih pretvorbi u TTT-dijagramima u desno, a temperature martenzitne pretvorbe M_s i M_f pomiču prema dolje.

3. KALJENJE ČELIKA

Postupak kaljenja čelika spada pod postupke toplinske obrade udaljavanjem od ravnotežnog stanja. Kaljenje podrazumijeva zagrijavanje čelika na temperaturu austenitizacije, zadržavanja na toj temperaturi kroz određeni period vremena i zatim naglog ohlađivanja obratka u cilju postizanja martenzitne strukture u čeliku. Zakaljeni čelik odlikuju svojstva izvrsne tvrdoće i čvrstoće, no i velika krhkost. Zato nakon kaljenja čelika slijedi toplinska obrada popuštanja čelika za povećanje žilavosti i dimenzijske stabilnosti obratka, kao i eliminacije zaostalih vlastitih napreznja.



Slika 3.1. Dijagram postupka kaljenja čelika [12]

Obradak je potrebno zadržati na temperaturi austenitizacije sve dok se ne izjednače temperature jezgre i površine i dok se ne izjednači koncentracija ugljika u svim dijelovima austenita, no predugim vremenom ugrijavanja potiče se rast austenitnog zrna. Jedino obradak koji je zadržan dovoljno pri temperaturi austenitizacije može nakon kaljenja postići očekivanu tvrdoću prema Burnsovom dijagramu koja ovisi o sadržaju ugljika u čeliku.

Uspješnost postizanja martenzitne strukture kao i njena pravilna rasprostranjenost po cijelom poprečnom presjeku obratka ovisi o:

- temperaturi austenitizacije-ovisna o udjelu ugljika u čeliku
- vremenu ugrijavanja
- okolini u kojoj se odvija ugrijavanje
- brzini ohlađivanja
- prokaljivosti čelika

Uvjeti zakaljivanja čelika mogu se podijeliti na četiri stavke:

1. Mogućnost pretvorbe ferita u austenit
2. Dovoljno visoka koncentracija ugljika-konvencionalno zakaljivi čelici sadrže $\geq 0,35\%$ C
3. Postizanje austenita pri ugrijavanju jer martenzit može nastati samo iz austenita
4. Austenitizirani čelik potrebno je dovoljno brzo hladiti zbog zadržavanja atoma ugljika u novonastaloj martenzitnoj rešetci

Klasični postupci kaljenja izvode se kontinuiranim hlađenjem do sobne temperature u jednom rashladnom sredstvu (izravno kaljenje) ili u dva različita rashladna sredstva (slomljeno kaljenje). Osim klasičnih postupaka, postoje i izotermički postupci kaljenja koji se izvode izotermičkim hlađenjem pri određenoj temperaturi izoterme. Hlađenje se izvodi naglo sa temperature austenitizacije do temperature izoterme, a potom se obradak neko vrijeme zadržava na toj temperaturi uz naknadno proizvoljno hlađenje do sobne temperature.

Stepeničasto-martenzitno kaljenje je vrsta izotermičkog kaljenja. Postupak se izvodi hlađenjem s temperature austenitizacije u toploj kupki (solnoj, uljnoj, metalnoj) do izjednačavanja temperature površine i jezgre, a potom se izradak hladi na zraku. Zbog skoro istovremenog nastajanja martenzita na površini i u jezgri toplinska naprezanja su minimalna. [13]

Površinsko kaljenja je posebna vrsta toplinske obrade kaljenja čelika kod koje se zagrijava samo površinski sloj iznad kritične temperature, a potom se hladi natkritičnom brzinom s ciljem dobivanja martenzita u površinskom sloju. Cilj površinskog kaljenja je očuvanje početne mikrostrukture u jezgri i transformacija površinskog sloja u martenzit. Kako bi se izbjeglo zagrijavanje jezgre, izvori topline moraju biti iznimno jaki (plinskih plamenici, inducirana električna energija). Površinski sloj time ima poboljšana svojstva tvrdoće i čvrstoće kao i otpornosti na trošenje i koroziju.

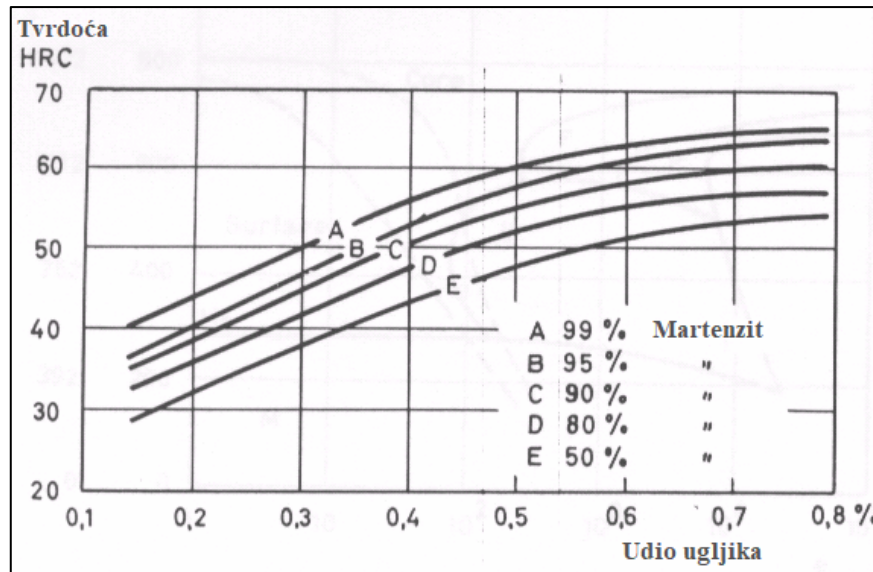
Brzina ohlađivanja čelika s temperature austenitizacije ima veliki utjecaj u postizanju željene mikrostrukture čelika. Regulira se izborom sredstva za ohlađivanje i ono treba omogućiti postizanje gornje kritične brzine hlađenja. Također pravilni izbor sredstva za hlađenje mora osigurati ciljanu mikrostrukturu po cijelom poprečnom presjeku obratka bez pojava većih unutarnjih naprezanja i deformacija. Kod odabira sredstva uzima se u obzir i dimenzija obratka jer bi u idealnom slučaju trebalo postići kritičnu brzinu ohlađivanja i samoj jezgri.

Za potrebe opisivanja sposobnosti gašenja određenog sredstva M. A. Grossmann uvodi pojam intenzivnosti gašenja H . Intenzivnost gašenja je numerički pokazatelj odnosa srednjih brzina gašenja valjkastog uzorka promjera 12,7 mm od ugljičnog čelika s 0,45% ugljika u intervalu temperatura od 700-300 °C u promatranom sredstvu. [2] Iznos intenzivnosti gašenja ovisi o sredstvu, o brzini strujanja sredstva i temperaturi sredstva. Aproximirane vrijednosti intenzivnosti gašenja pri sobnoj temperaturi su: $H = 1$ za vodu, $H = 0,3$ za ulje, $H = 0,025$ za zrak. Za hlađenje ugljičnih i niskolegiranih čelika najčešće korišteno rashladno sredstvo je (slana) voda. Za hlađenje legiranih čelika često se upotrebljavaju mineralna ulja.

Prema standardu ISO 6743-14:1994 sredstva za hlađenje koja se koriste u postupku kaljenja su:

- A-voda i emulzije
- F-fluidizirane kupke
- G-plinovi (zrak)
- H-ulja
- K-ostala sredstva za gašenje
- S-rastaljene soli

Pomoću TTT-dijagrama moguće je procijeniti tvrdoću na površini obratka nakon kaljenja. Za procjenu tvrdoće jezgre moramo poznavati krivulje ohlađivanja za pojedine slojeve izratka. Krivulje hlađenja po slojevima za cilindrične uzorke različitih promjera mogu se pronaći u stručnim literaturama i pomoću njih može se očitati orijentacijski optimalni odabir rashladnog sredstva. Za provjeru uspješnosti kaljenja obratka uspoređuje se postignuta tvrdoća sa postizivom koju odredimo iz Burnsovog dijagrama.



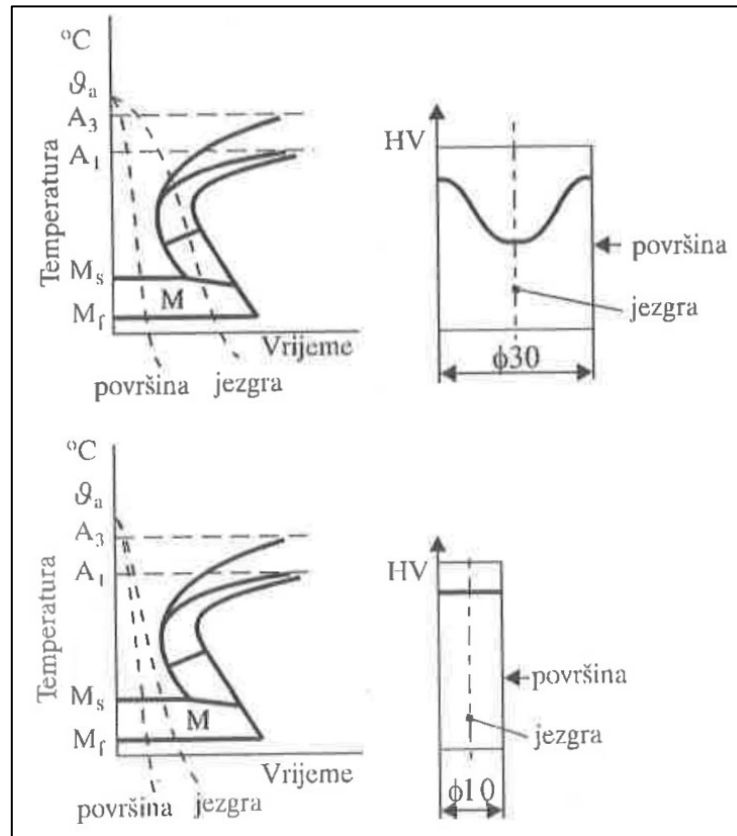
Slika 3.2. Odnos koncentracije ugljika, tvrdoće i udjela martenzita [14]

3.1. Zakaljivost i prokaljivost čelika

Kaljivost je svojstvo čelika da se naglim ohlađivanjem s temperature austenitizacije zakali (postigne što višu tvrdoću na površini) i prokali (postigne što jednoličniju tvrdoću na poprečnom presjeku). [3] Koja mikrostruktura će se postići kaljenjem dakle ovisi i o svojstvima čelika: zakaljivosti i prokaljivosti.

Prokaljivost je svojstvo čelika koje govori o mogućnosti formiranja martenzitne strukture u dubljim slojevima obratka pri gašenju. Donja prihvatljiva granica udjela martenzitne strukture u jezgri zakaljenog čelika je 50%. Prokaljivost je u direktnoj povezanosti s gornjom kritičnom brzinom gašenja pa i ona ovisi o brzini perlitne pretvorbe u čeliku. Usporavanjem perlitne pretvorbe povećava se svojstvo prokaljivosti.

Pri kaljenju obradaka u istim uvjetima, čelik veće prokaljivosti će lakše u dubljim slojevima formirati martenzit od obratka manje prokaljivosti. Prokaljenost zadanog čelika biti će bolja ako je predmet manjih dimenzija i ako se intenzivnije gasi.



Slika 3.1.1. Utjecaj dimenzije obratka na njegovu prokaljivost [3]

Pri kaljenju dva obratka istih dimenzija veću prokaljivost će imati onaj koji ima dulje trajanje inkubacije pothlađenog austenita koje se očita iz TTT-dijagrama. Sažeto, prokaljivost čelika ovisi o kemijskom sastavu čelika, veličini austenitnog zrna, dimenzijama obratka i intenzivnosti gašenja.

Zakaljivost je svojstvo čelika koje omogućava čeliku pri kaljenja da postigne tvrdu martenzitnu strukturu. Zakaljivost je usko povezana sa sadržajem ugljika koji je otopljen u austenitnoj mikrostrukturi. Udio ugljika koji se nalazi u spoju sa karbidima nije otopljen stoga kao karbid ne utječe na svojstvo zakaljivosti, a svojstvo prokaljivosti snižava. Odnos koncentracije ugljika i tvrdoće prikazan je već spomenutim Burnsovim dijagramom na slici 2.1.7. Burnsov dijagram pokazuje maksimalno ostvarive tvrdoće zakaljenih čelika u ovisnosti o koncentraciji ugljika.

Potencijalno prisustvo legirajućih elemenata ne utječe na zakaljivost čelika. Ukratko, na svojstvo zakaljivosti utječe sadržaj ugljika koji je na temperaturi austenitizacije otopljen u primarnom austenitu i intenzivnost gašenja koja bi trebala biti natkritična kako bi se postigla maksimalno ostvariva tvrdoća. [3]

Kod postupka kaljenja valja još istaknuti i pojam kritične tvrdoće. Kritična tvrdoća je minimalna tvrdoća prokaljenog sloja čelika. Kako je prethodno rečeno, granica prokaljivosti određena je s 50% udjela martenzita u mikrostrukturi jezgre, prema tomu kritična tvrdoća odgovara tvrdoći čelika s 50% udjela martenzitne strukture. Za procjenu kritične tvrdoće može se koristiti dijagram prikazan na slici 3.2. Uz pojam kritične tvrdoće veže se i pojam kritičnog promjera koji predstavlja maksimalni promjer čeličnog obratka koji se potpuno prokali u određenom rashladnom sredstvu. Tvrdoća u jezgri čeličnog obratka s kritičnim promjerom jednaka je kritičnoj tvrdoći. [2]

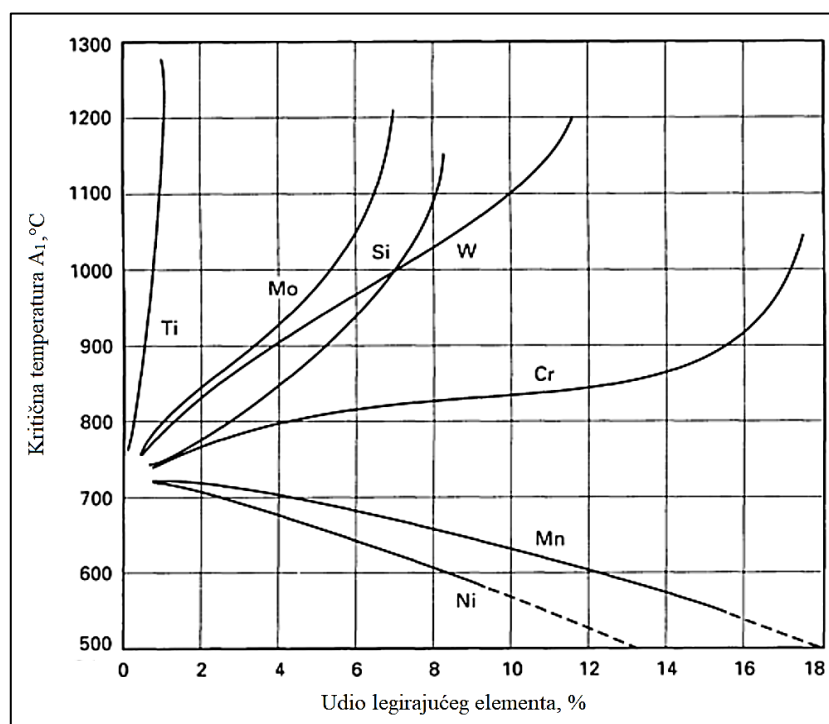
3.2. Učinak legiranja na zakaljivost i prokaljivost čelika

Svrha legiranja ugljičnih čelika (Fe-C legura) je zbog unaprjeđenja njihovih svojstava za veće mogućnosti proizvodnje ili bolje karakteristike u eksploataciji. Legirani čelici su čelici koji osim željeza i ugljika sadrže određene udjele nekih od legirajućih elemenata. Većina legirajućih elemenata su metali, a prema zavodu za normiranje neki od tih elemenata su: silicij (Si), mangan (Mn), krom (Cr), nikal (Ni), volfram (W), vanadij (V), kobalt (Co), bakar (Cu) i aluminij (Al).

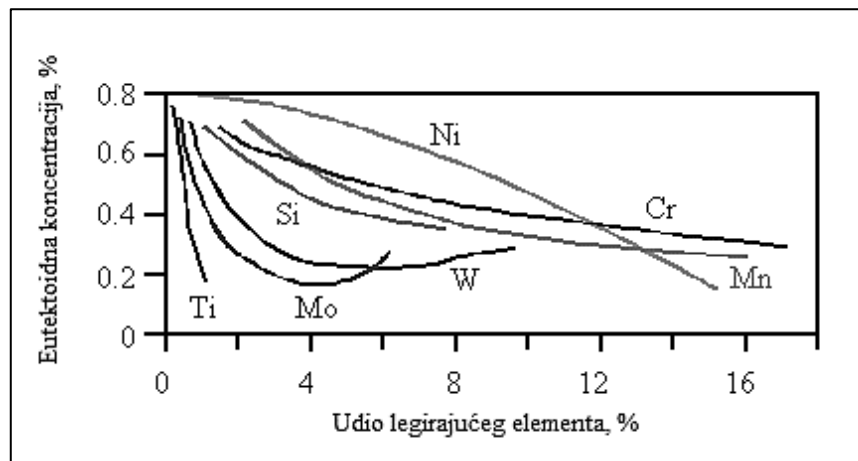
Podjela čelika prema udjelu legirajućih elemenata:

- ugljični čelici-nelegirani $\rightarrow \sum \text{legirajućih elemenata} = 0$
- niskolegirani čelici $\rightarrow \sum \text{legirajućih elemenata} \leq 5\%$
- visokolegirani čelici $\rightarrow \sum \text{legirajućih elemenata} > 5\%$

Svi legirajući elementi utječu na kritične temperature faznih pretvorbi u čeliku (A_1 , A_3 , A_{cm}) i na topivost ugljika u svim fazama, a većina njih snižava eutektoidnu koncentraciju u čeliku. Iako utječu na kritične temperature ili na trajanje faznih pretvorbi, osnovni mehanizam faznih pretvorbi ostaje isti.

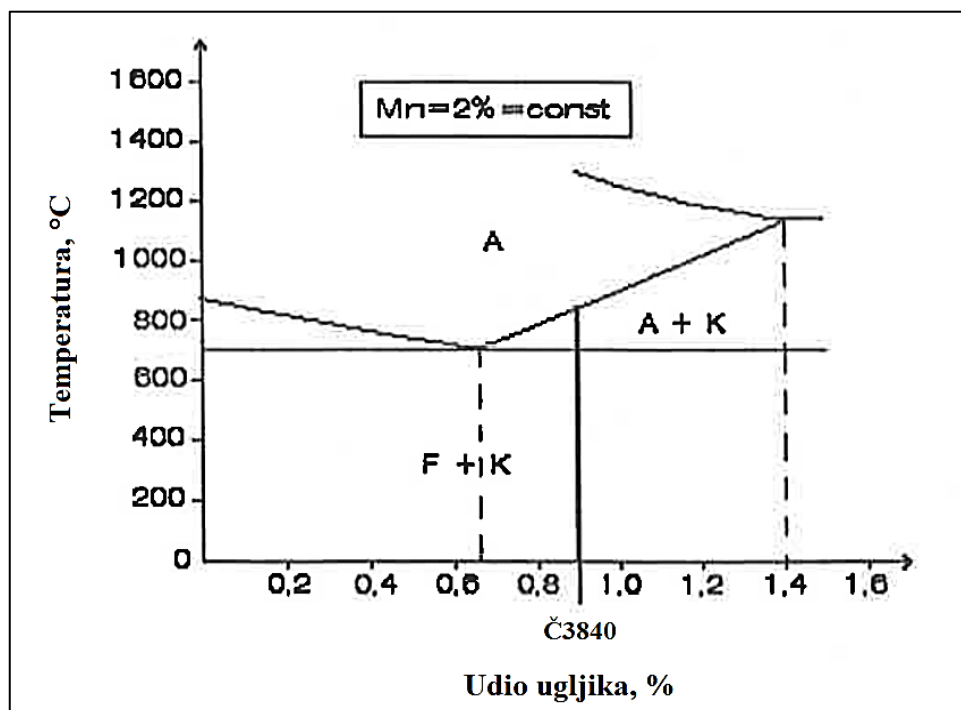


Slika 3.2.1. Utjecaj legirajućih elemenata na kritičnu temperaturu A_1 [15]



Slika 3.2.2. Utjecaj legirajućih elemenata na eutektoidnu koncentraciju ugljika [16]

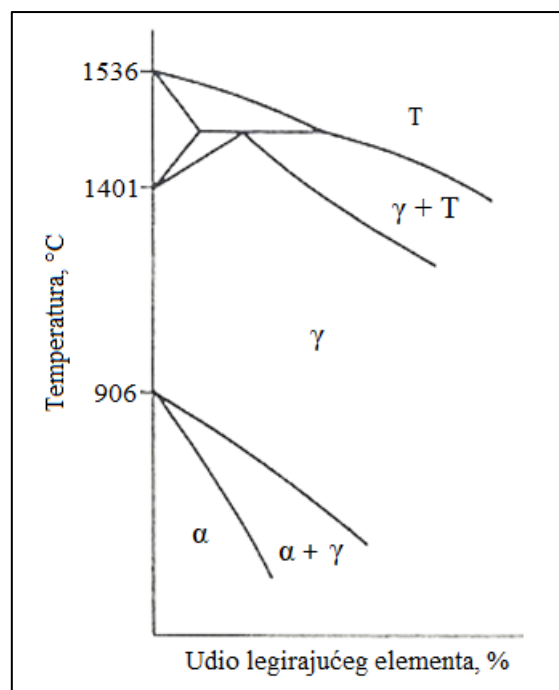
Na temelju dva dijagrama prikazana na slikama 3.2.1. i 3.2.2. konstruiraju se pseudobinarni Fe-Fe₃C dijagrami. To su metastabilni dijagrami stanja s promjenjivom koncentracijom ugljika i konstantnim sadržajem određenog legirajućeg elementa.



Slika 3.2.3. Pseudobinarni dijagram Fe-C-Mn za 2% mangana [17]

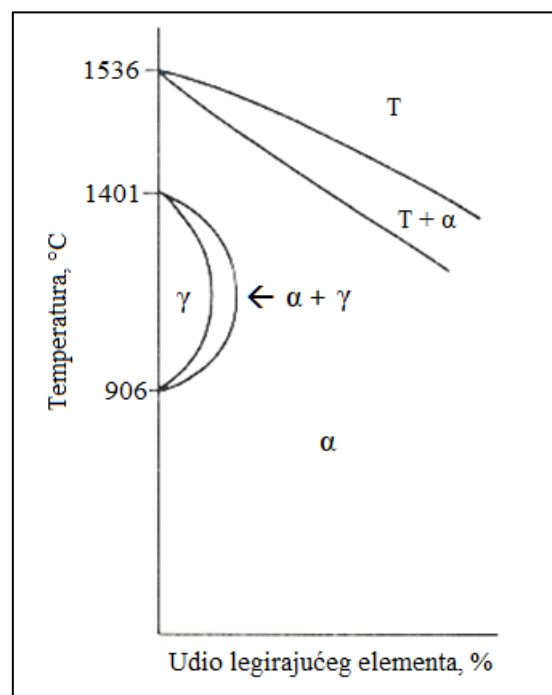
Prema promjeni Fe-Fe₃C dijagrama postoje sljedeće skupine:

1. skupina legirajućih elemenata svojim porastom udjela u čeliku proširuje austenitno područje, odnosno snižava kritične temperature pretvorbe austenita u ferit. U ovu skupinu, koja se još naziva γ -geni elementi, spadaju mangan (Mn), nikal (Ni), kobalt (Co) i bakar (Cu). Ako je koncentracija γ -genih elemenata dovoljno visoka, temperatura raspada austenita A₃ može biti niža od sobne temperature. Takvi čelici zovu se austenitnim čelicima i potpuno su nezakaljivi zbog izostanka pretvorbe ferita u austenit i obratno.



Slika 3.2.4. Učinak γ -genih elemenata na dijagram stanja [18]

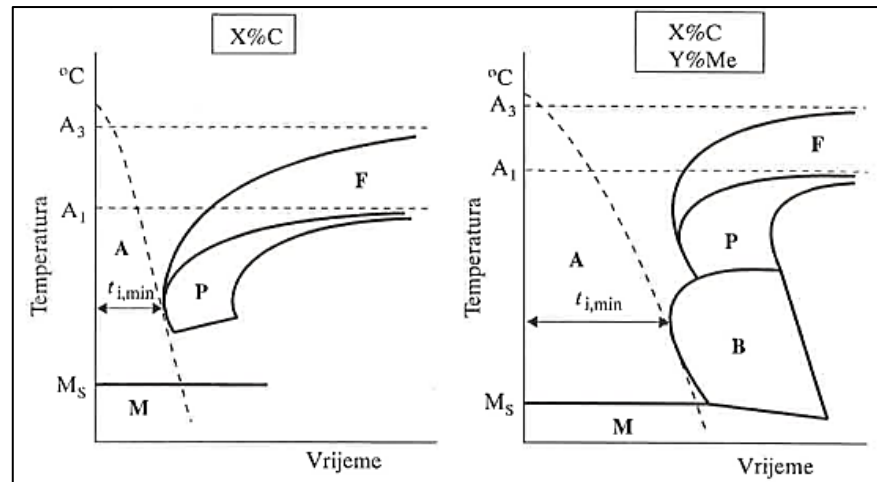
2. skupina legirajućih elemenata svojim porastom udjela u sastavu čelika sužava austenitno područje. Ova skupina još se naziva α -geni elementi i njoj pripadaju sljedeći elementi: silicij (Si), krom (Cr), volfram (W), molibden (Mo), vanadij (V), titanij (Ti), niobij (Nb), tantal (Ta), cirkonij (Zr) i bor (B). Kritične temperature raspada austenita povisuju se s porastom udjela α -genih elemenata. Krom i vanadij ne tvore intermetalne faze sa željezom pa se α -područje kod njihovih legura proteže do 100% tih elemenata. Čelici sa otvorenim feritnim područjem zovu se feritni čelici i također su potpuno nekaljivi poput austenitnih čelika. α -geni elementi najviše utječu na maksimalnu topivost ugljika u austenitu i to na način da ju snižavaju.



Slika 3.2.5. Utjecaj α -genih elemenata na dijagram stanja [18]

Legirajući elementi u čeliku mogu se pojaviti kao spoj s ugljikom u karbid ili spoj sa željezom u intermetalni spoj ili kao supstitucija u feritnoj, austenitnoj ili martenzitnoj kristalnoj rešetci. Karbidotvorni elementi su elementi koji pri relativnoj maloj količini ulaze u kristalnu rešetku cementita i tvore legirani cementit. Neki od njih su titan (Ti), niobij (Nb), vanadij (V), volfram (W), molibden (Mo), krom (Cr) i mangan (Mn). Nekarbidotvorni elementi su nikal (Ni), kobalt (Co) i bakar (Cu). Pri većim koncentracijama karbidotvornih elemenata tvore se posebni karbidi poput karbid kroma (Cr_7C_3) ili karbid vanadija (V_4C_3). Posebni karbidi su teško taljivi i izrazito tvrdi i iznimno otporni na abrazijsko trošenje. Otapanjem karbida oslobađa se ugljik iz karbidnog spoja koji se potom rastvara u austenitu i povećava tvrdoću martenzita nakon kaljenja.

Ako je legirajući element u obliku supstitucije on svojim djelovanjem deformira kristalnu rešetku i otežava gibanje dislokacija i difuziju ugljika iz austenitne rešetke pri hlađenju. Uslijed otežavanja difuzijske pretvorbe austenita u ferit, perlit i bainit paralelno se olakšava pretvorba pothlađenog austenita u martenzit. Otežavanje spomenutih pretvorbi vidljivo je u TTT-dijagramima kao dulja trajanja vremena inkubacije i same fazne pretvorbe. Produljenjem trajanja vremena inkubacije povisuje se i prokaljivost čelika.



Slika 3.2.6. Usporedba TTT-dijagrama sa i bez prisustva legirajućeg elementa [3]

4. POSTUPCI ISPITIVANJA PROKALJIVOSTI

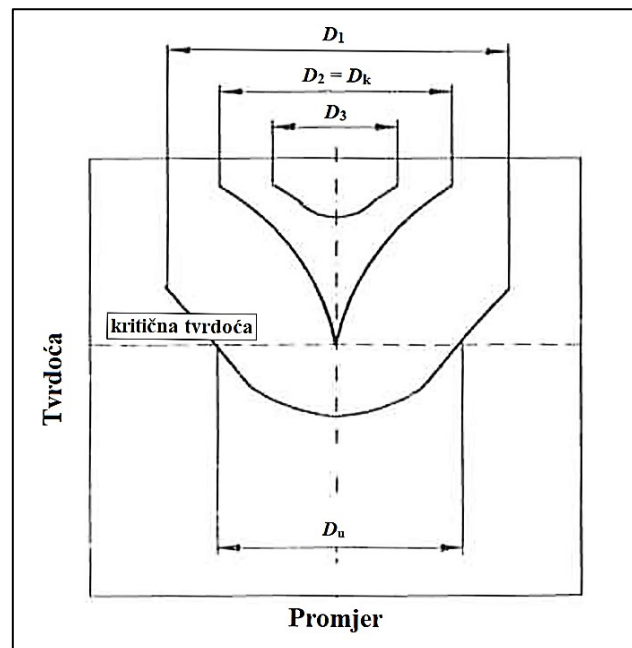
Prokaljivost se eksperimentalno određuje pokusima kaljenja cilindričnih uzoraka različitih promjera u različitim sredstvima hlađenja. Za ispitivanje prokaljivosti čelika u strojarstvu se koriste brojne standardizirane metode od kojih su najpoznatije Grossmannova metoda i Jominyjeva metoda.

4.1. Grossmannov postupak ispitivanja prokaljivosti

Ispitivanje prokaljivosti po Grossmannu bazira se na pojmu kritičnog promjera D_k . Kritični promjer, već spomenut u prethodnom poglavlju, je promjer pri kojem se u središtu poprečnog presjeka cilindričnog uzorka dobije 50% martenzitna struktura pri kaljenju, odnosno postigne kritična tvrdoća.

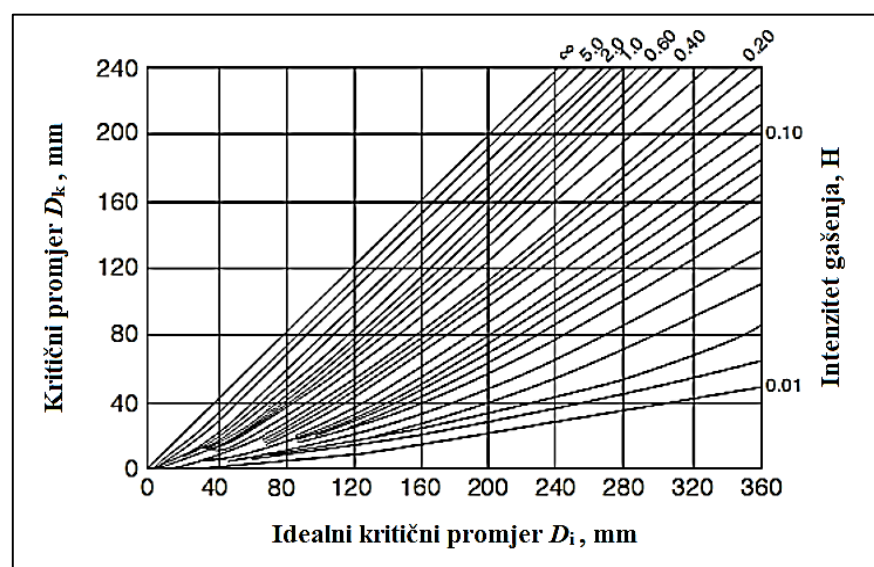
Postupak ispitivanja po Grossmannu sastoji se od kaljenja niza cilindričnih uzoraka različitih promjera u zadanom rashladnom sredstvu za kaljenje. Uobičajeno je ispitivanje na deset uzoraka promjera u rasponu od 10-100 mm s visinom četiri puta većom od promjera. Potom zakaljeni uzorci se prerežu na metalografskoj rezalici dok se istovremeno hlade kako nebi unosom dodatne topline promijenili unutarnju strukturu materijala. Prepolovljenim uzorcima mjeri se tvrdoća po presjeku na različitim udaljenostima od ruba prema središtu uzorka.

Dobiveni rezultati grafički se prikazuju za svaki uzorak u obliku U-krivulje. Sjecište kritične tvrdoće s U-krivuljom omeđuje nezakaljeni dio poprečnog presjeka uzorka. Krivulja V-oblika na slici 4.1.1. odgovara uzorku kritičnog promjera.



Slika 4.1.1. Raspodjela tvrdoće u uzorku nakon gašenja [2]

Ispitivanje po Grossmannu je dugotrajan i skup proces jer ne vrijedi univerzalno, već se provodi za svaki čelik zasebno. Također, nedostatak ove metode je iznimno veliki utjecaj uvjeta ohlađivanja na dobivene rezultate. Spomenuto se kompenziralo sa uvođenjem teoretskog pojma idealnog kritičnog promjera D_i . Idealni kritični promjer je točno određeni promjer za koji se u jezgri uzorka dobije struktura s 50% martenzitna u idealnom rashladnom sredstvu ($H = \infty$) pri gašenju. On je pokazatelj prokaljivosti čelika koji je neovisan o rashladnom sredstvu i pomoću kojeg određujemo kritični promjer D_k za određeno rashladno sredstvo. [19]

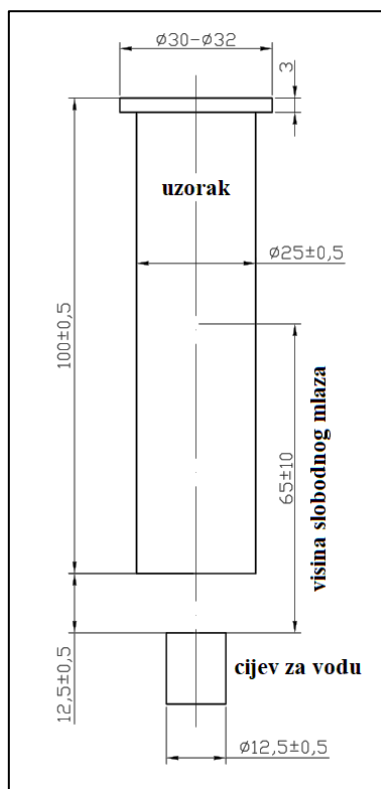


Slika 4.1.2. Dijagram za određivanje kritičnog promjera D_k [19]

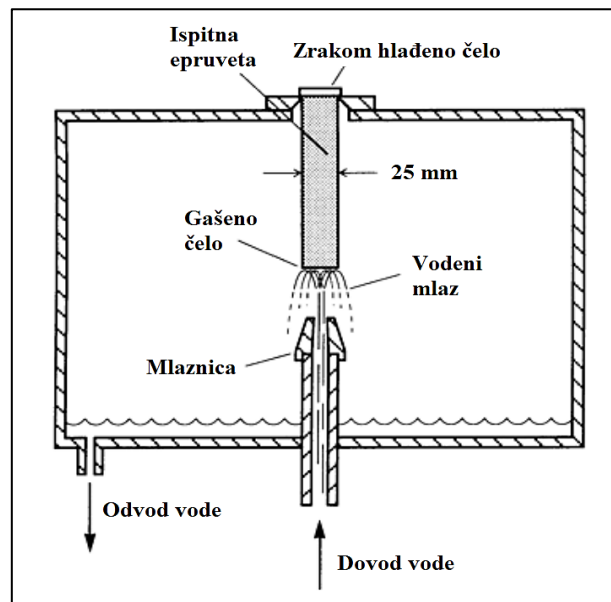
4.2. Jominyjev postupak ispitivanja prokaljivosti

Jominyjeva metoda jedna je od najraširenijih metoda ispitivanja prokaljivosti zbog svoje jednostavnosti i relativno niskog troška izvedbe. Postupak je standardiziran u cilju postizanja što veće mjerodavnosti i što manjeg rasipanja dobivenih vrijednosti tvrdoće. Normirani oblik i dimenzija uzorka, mjesto i postupak izvedbe ispitivanja kao i uvjeti zagrijavanja i ohlađivanja definirani su normom HRN EN ISO 642 (A 255-02). Za potrebe postupka ispitivanja koristi se standardizirana ispitna epruveta za Jominyjev postupak je promjera od 25 mm i duljine od 100 mm. [2, 19, 20]

Uređaj za gašenje postavi se u posudu koja je spojena na dovod i odvod vode. Istaknuti dijelovi uređaja za gašenje su nosač uzorka i mlaznica vode promjera $12,5 \pm 1$ mm. Uzorak mora biti centriran u odnosu na mlaznicu, odnosno moraju biti na istoj vertikalnoj osi, i moraju biti razmaknuti na udaljenosti jednakoj promjeru mlaznice. Visina slobodnog mlaza vode mora iznositi 65 ± 5 mm, koja se postiže hidrostatski tlakom, koja se kontrolira pomoću ugrađenog gornjeg i donjeg kontrolnika visine mlaza. [19, 20]



Slika 4.2.1. Shema položaja ispitnog uzorka [20]

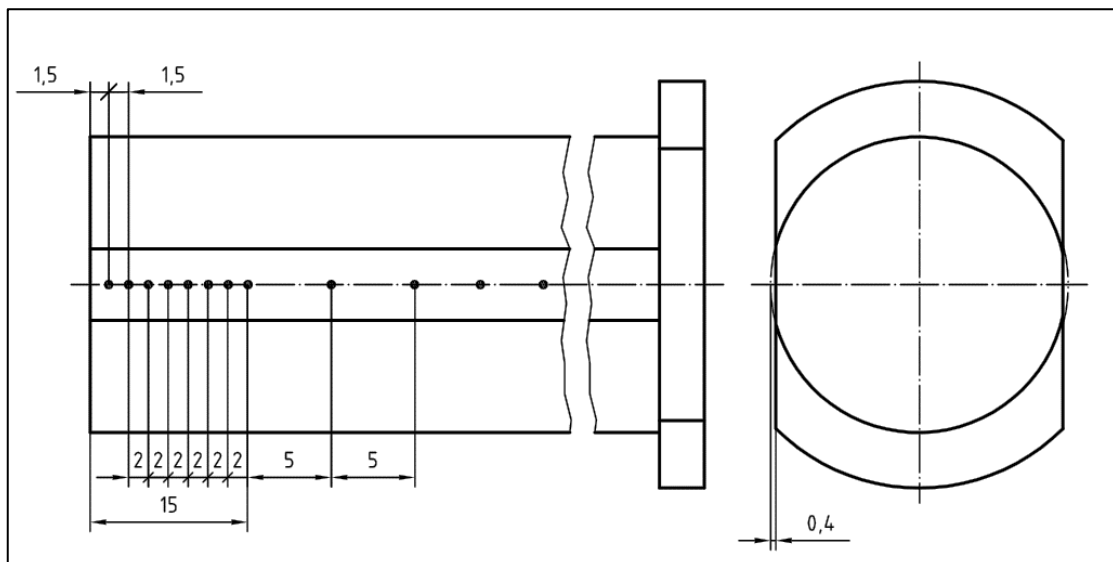


Slika 4.2.2. Shema postupka ispitivanja prokaljivosti po Jominyu [15]

Odabrana peć za zagrijavanje uzorka mora moći zagrijati uzorak na temperaturu austenitizacije u periodu od 40 minuta i imat mogućnost podešavanja temperature u granicama točnosti od ± 5 °C. U slučaju da je peć već ugrijana na temperaturu austenitizacije prije stavljanja uzorka, grijanje uzorka u peći treba trajati oko 30 minuta. [19, 20]

U periodu od 5 sekundi potrebno je izvaditi uzorak iz peći i postaviti ga iznad mlaza vode. Gašenje čela uzorka mlazom vode, koji je temperature između 5-30 °C, treba trajati najmanje 10 minuta. Po završetku kaljenja potrebno je uzorak uzdužno izbrusiti po cilindričnoj plohi plašta s dvije paralelne strane. Debljina brušenog sloja mora iznositi 0,4 mm. Na zakaljenom i izbrušenom uzorku mjeri se tvrdoća u točkama određenih udaljenosti po središnjici izbrušene površine.

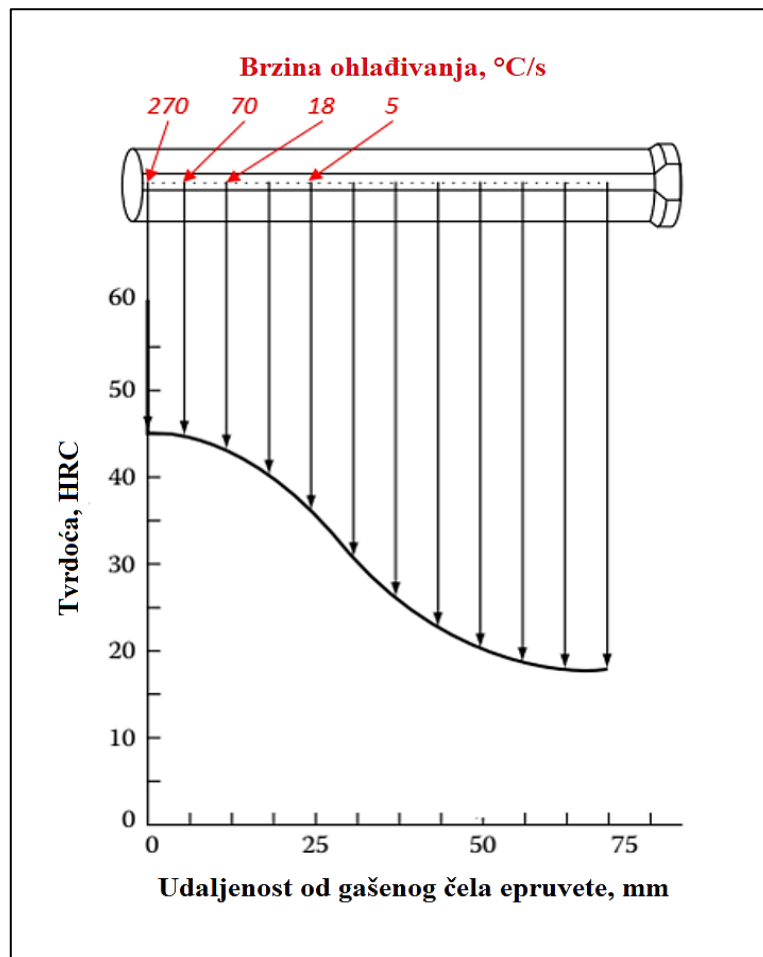
Tvrdoća se ispituje do udaljenosti 30 mm od čela uzorka. Početna točka nalazi se na 1,5 mm udaljenosti od gašenog čela epruvete i sljedeća točka je udaljena od početne za točno 1,5 mm. Nakon prve dvije točke, razmak između točaka povećava se na 2 mm sve do udaljenosti od 15 mm. Od 15 mm do 30 mm mjeri se u razmacima od 5 mm. [20]



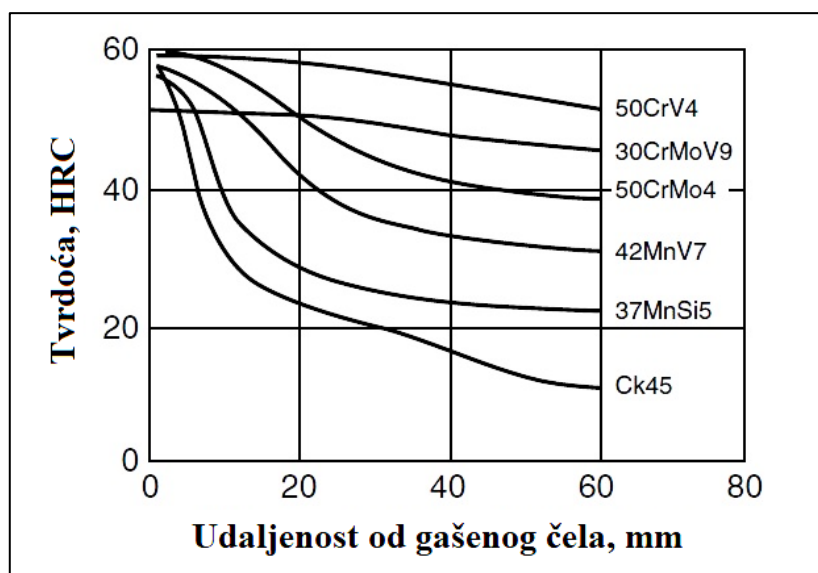
Slika 4.2.3. Grafički prikaz rasporeda mjerenja tvrdoće na Jominyjevom uzorku [20]

Jedno od važnijih mehaničkih svojstava vezanih uz toplinsku obradu kaljenja je tvrdoća. Tvrdoća predstavlja otpornost materijala prema prodiranju nekog stranog znatno tvrđeg tijela u njegovu strukturu ili površinu. Vrijednost tvrdoće je rezultat definiranog postupka mjerenja. Postupak mjerenja tvrdoće uzorka najčešće je po Rockwellu (HRC) ili po Vickersu (HV). [3, 19]

Prokaljivost čelika određuje se iz očitane ovisnosti tvrdoće o udaljenosti od čela uzorka, grafički prikazan tijek tvrdoće u ovisnosti o udaljenosti od gašenog čela epruvete naziva se Jominyjeva krivulja. [2]



Slika 4.2.4. Izrada Jominyjeve krivulje [19]



Slika 4.2.5. Jominyjeve krivulje za različite vrste čelika [21]

Razlikuju se tri načina označavanja indeksa prokaljivosti čelika kod Jominyjeve metode [19]:

1. $J_H = d$ npr. $J_{50} = 35$

Broj 50 označava traženu tvrdoću po Rockwellu, a broj 35 je udaljenost u mm od čela uzorka gdje se zahtijeva tražena tvrdoća.

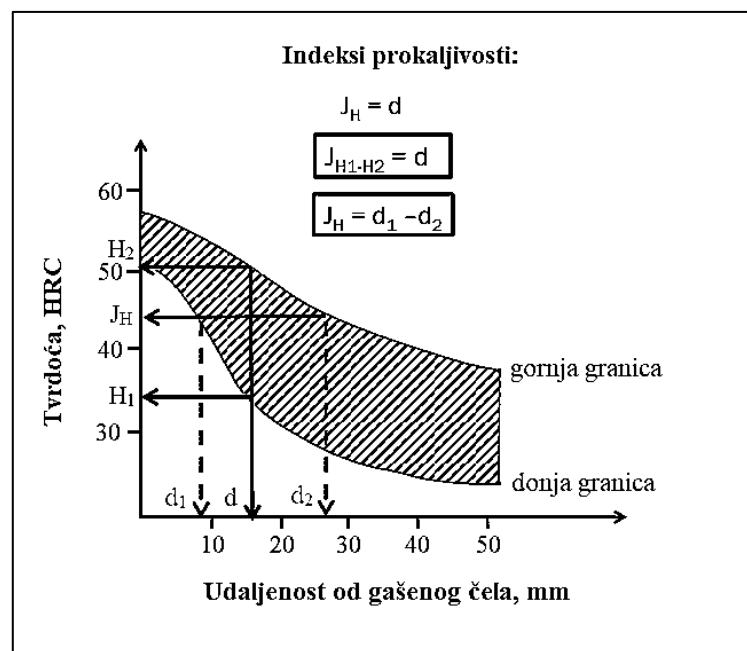
2. $J_{H1-H2} = d$ npr. $J_{35-45} = 35$

Raspon od 35-45 predstavlja raspon tražene tvrdoće po Rockwellu, a broj 35 označava udaljenost u mm od čela uzorka gdje se zahtijeva tražena tvrdoća.

3. $J_H = d_1-d_2$ npr. $J_{45} = 25-45$

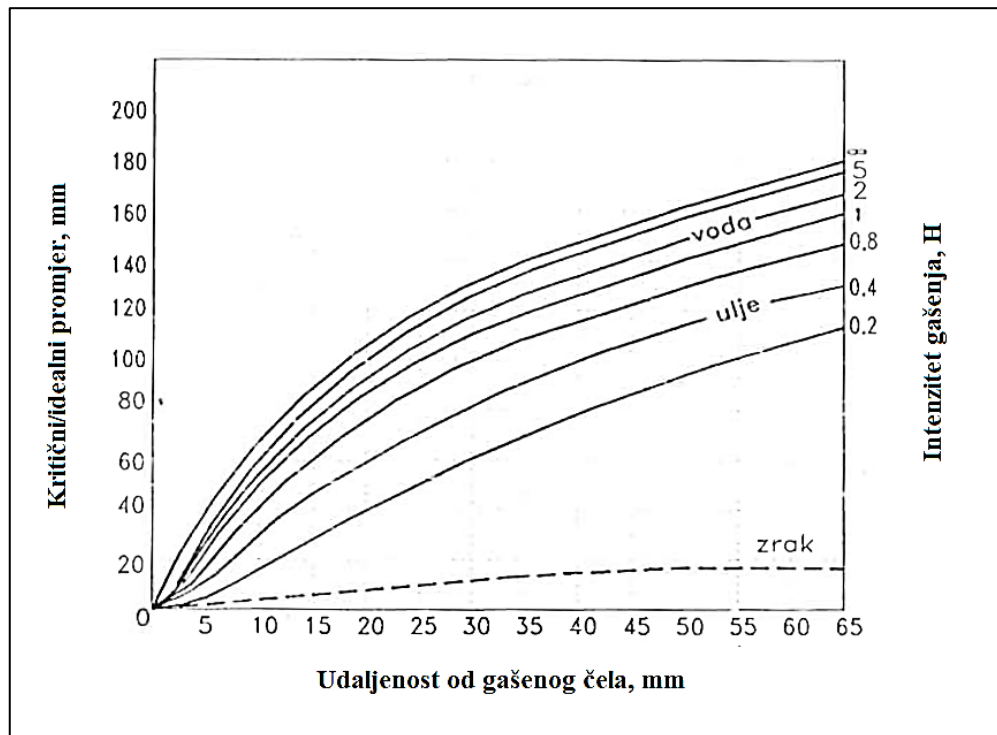
Tražena tvrdoća iskazana je brojem 45 po Rockwellu i to na udaljenosti u rasponu od 25 do 45 mm od čela uzorka.

S obzirom na problem nepostojanja jedinstvenih kritičnih niti idealnih kritičnih promjera za sve nominalne čelike, a samim time ni jedinstvene Jominyjeve krivulje, uvodi se pojam pojasa prokaljivosti. Jominyjev pojas prokaljivosti je grafički prikaz odnosa tvrdoće i udaljenosti od gašenog čela, ali tvrdoća je prikazan kao raspon prihvatljivih iznosa tvrdoće za određenu udaljenost od čela uzorka. Jominyjeve pojase prokaljivosti može se pronaći u nacionalnim normama.



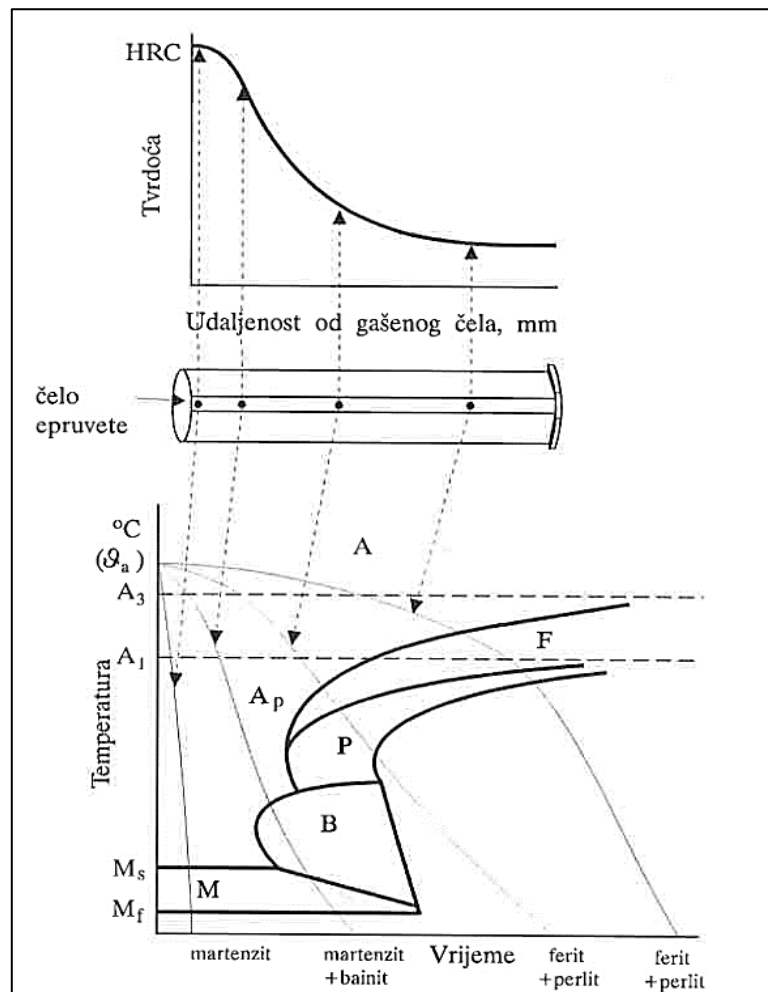
Slika 4.2.6. Jominyjev pojas prokaljivosti [22]

Pomoću prethodno spomenutog kritičnog promjera (ili idealnog) moguće je okvirno procijeniti u kojem rashladnom sredstvu će se obradak zadanog promjera u potpunosti prokaliti.



Slika 4.2.7. Odabir rashladnog sredstva uz pomoć kritičnog promjera D_k [2]

Čelo uzorka prvo se počinje ohlađivati i to brzinom većom od kritične brzine stoga se u tom području postiže martenzitna struktura s najvećom tvrdoćom. Kako se udaljavamo od čela uzroka slojevi se hlade sve sporije i mijenja se fazni sastav koji sadrži sve manje martenzita. Mikrostrukturni sastav čelika pri ohlađivanju očitavamo iz pripadnog TTT-dijagrama.



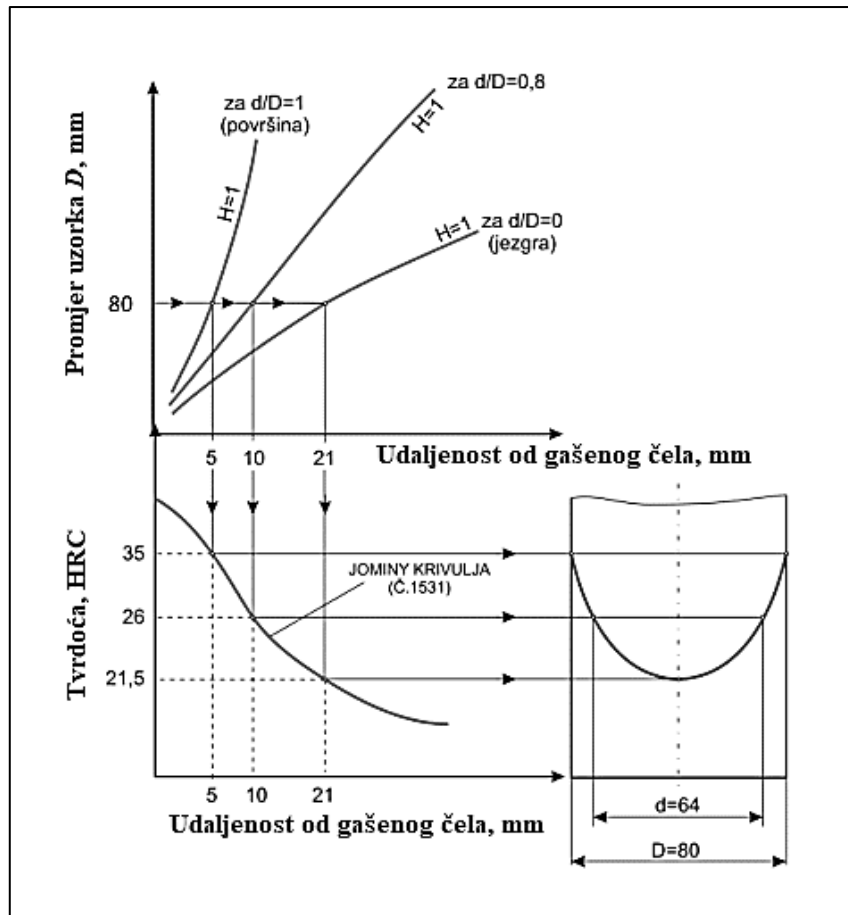
Slika 4.2.8. Ohlađivanje epruvete prikazano u TTT-dijagramu [3]

4.3. Crafts-Lamont dijagrami

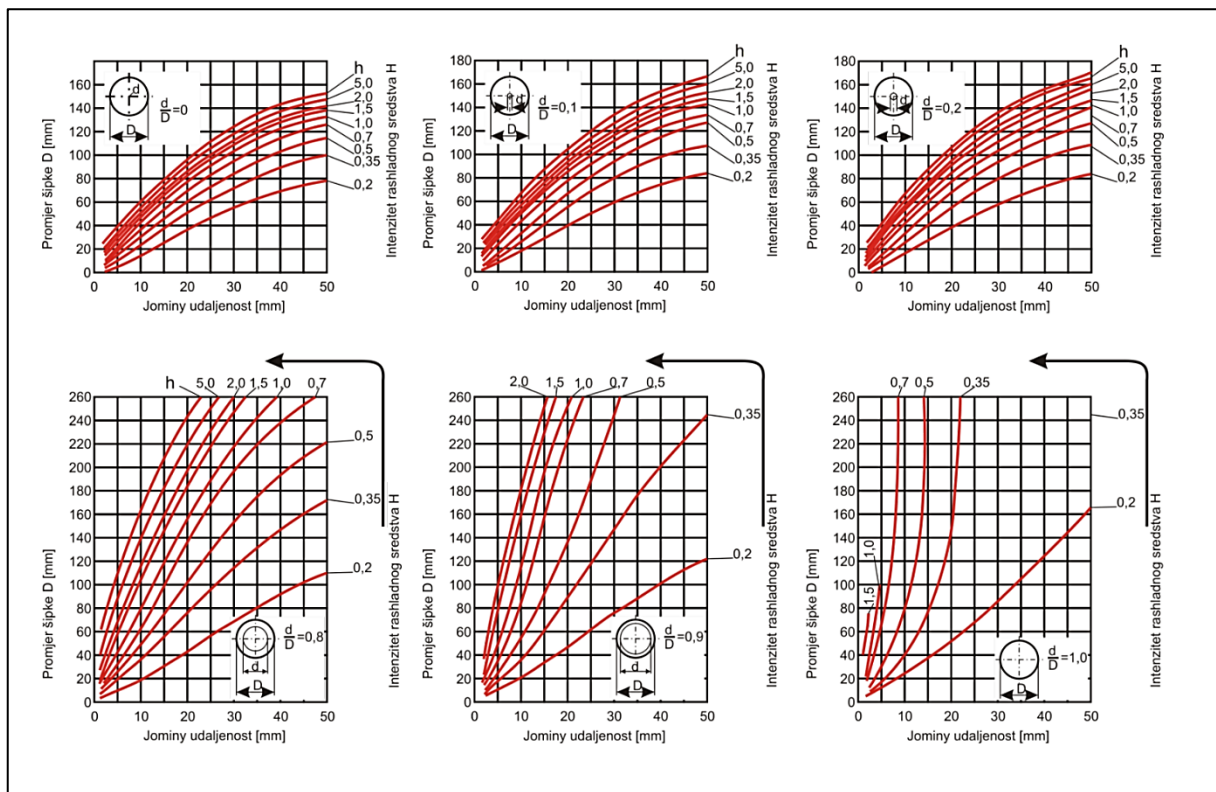
Primjenom različitih grafičkih i numeričkih metoda rezultati Jominyjeve metode mogu se iskoristiti za predviđanje prokaljenosti cilindričnih obradaka za klasično gašenje u sredstvima s različitim intenzivnostima gašenja. Jedna od grafičkih metoda je metoda pomoću Crafts-Lamont dijagrama.

Kombinacijom Crafts-Lamont dijagrama i Jominyjeve krivulje dobiva se tok tvrdoće, odnosno, U-krivulja koju ucrtavamo u nacrt obratka. Crafts-Lamont dijagrami povezuju promjer cilindričnih uzoraka, intenzitet gašenja rashladnog sredstva i udaljenost od gašenog čela.

Pokazatelj prokaljivosti određenog čelika, koji je kaljen u određenom zadanom rashladnom sredstvu, je raspodjela tvrdoća po poprečnom presjeku uzorka. Grafički prikazana raspodjela vrijedi za gašenje u različitim sredstvima, ali samo za jednu udaljenost od čela uzorka koja je iskazana vrijednošću omjera promjera na kojem želimo mjeriti tvrdoću i vanjskog promjera uzorka (d/D). Vrijednost $d/D = 0$ vrijedi za određivanje tvrdoće u središtu poprečnog presjeka uzorka, a $d/D = 1$ vrijedi za određivanje tvrdoće na površini uzorka. [19]



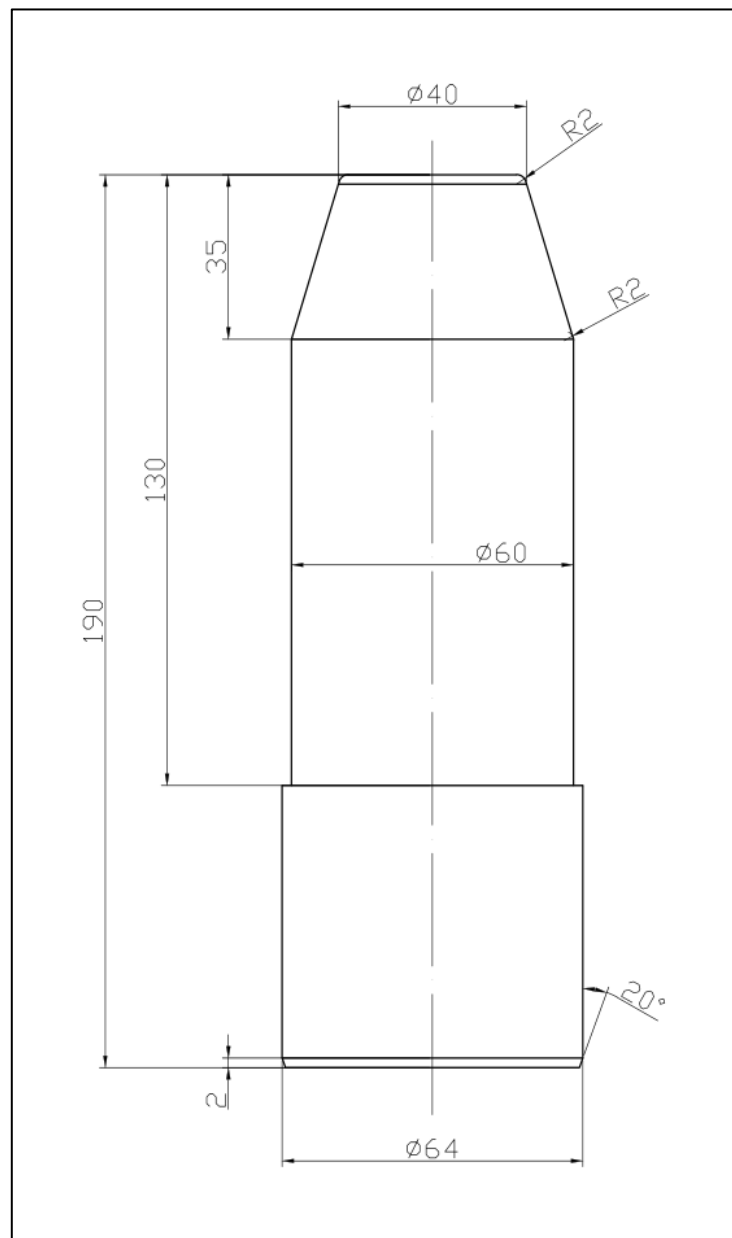
Slika 4.3.1. Crtanje U-krivulje pomoću Jominyjeve krivulje i Crafts-Lamont dijagrama [19]



Slika 4.3.2. Crafts-Lamont dijagrami za različite omjere d/D [19]

5. PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA NV.22-DP.82

Praktični dio ovog diplomskog rada odnosi se na ispitivanje dubine prokaljivosti strojnog dijela NV.22-DP.82 pomoću Jominyjeve metode. Materijal strojnog dijela NV.22-DP.82 je čelik za opruge 51CrV4, a na slici 5.1. prikazane su dimenzije strojnog dijela. Jominyjev pokus izvest će se na standardnoj epruveti od istog materijala, a potom će se na temelju rezultata pokusa konstruirati Jominyjeva krivulja i pomoću nje U-krivulja. Rezultati će biti prikazani za različite intenzitete ohlađivanja ($H=0,35$, $H=0,2$).



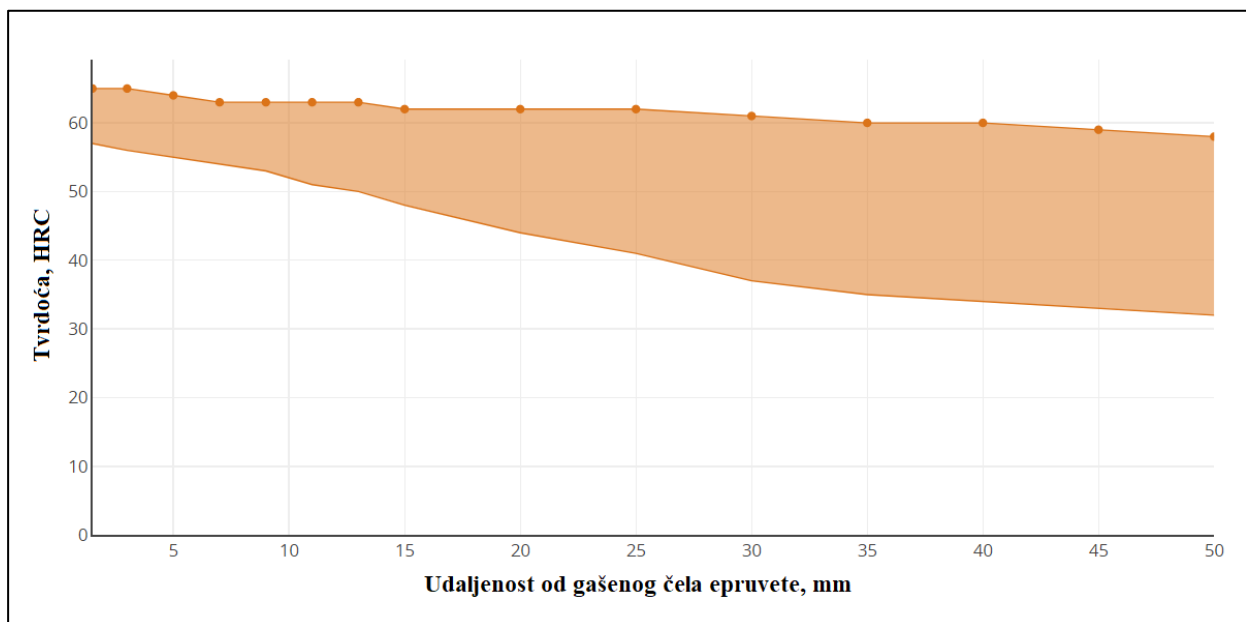
Slika 5.1. Strojni dio NV.22-DP.82

Propisani kemijski sastav 51CrV4 čelika prikazan je u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Kemijski sastav 51CrV4 [23]

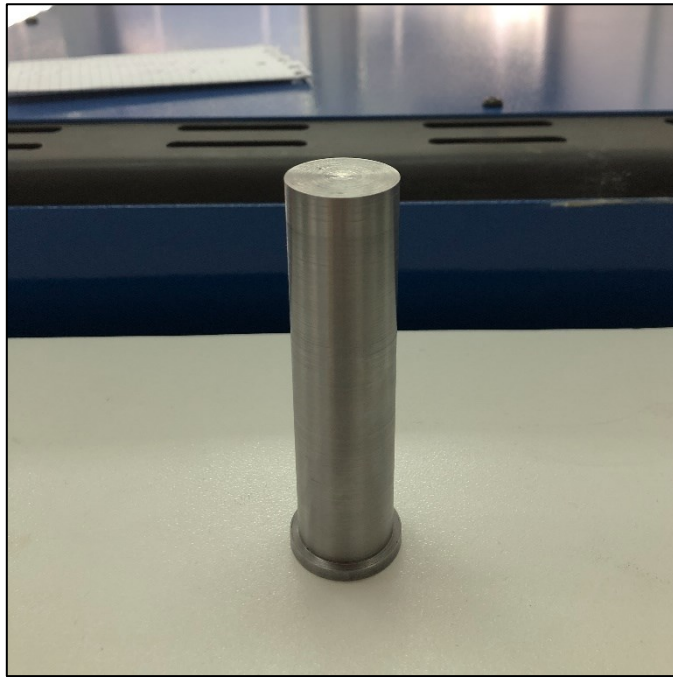
Kemijski sastav										
Varijanta		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	V %
51CrV4 EN10089:2002	Min	0.47	-	0.70	-	-	0.90	-	-	0.100
	Max	0.55	0.40	1.10	0.025	0.025	1.20	-	-	0.250

Za potrebe određivanja kritične tvrdoće uzet će se koncentracija ugljika od 0,51%. Prema dijagramu prikazanom na slici 3.2. za udio ugljika od 0,51% i za minimalni udio martenzita od 50% kritična tvrdoća iznosi 47 HRC. Strojni dio će se smatrati prokaljenim ako je u jezgri postignuta tvrdoća od barem 47 HRC. Propisani Jominyjev pojas prokaljivosti za čelik 51CrV4 prikazan je na slici 5.2. i rezultati ispitivanja očekuju se unutar propisanog raspona.



Slika 5.2. Jominyjev pojas prokaljivosti [23]

Postupak započinje pripremom ispitne epruvete prema normi HRN EN ISO 642. Dimenzije ispitne epruvete prikazane su na slici 4.2.1. Pripremljena epruveta za potrebe ovog diplomskog rada prikazana je na slici 5.3.



Slika 5.3. Ispitna epruveta za Jominyjev pokus

Pripremljenu ispitnu epruvetu potom se zagrijava na temperaturu austenitizacije od 840 °C u OVER komornoj peći za žarenje, kaljenje i pougljičavanje snage 12 KW koja sadrži tri grijača od 380 V i može postići temperature do 1250 °C. [24]



Slika 5.4. Komorna peć za žarenje, kaljenje i pougljičavanje

Peć je prethodno zagrijana na potrebnu temperaturu prije stavljanja epruvete u nju. Nakon postizanja zahtijevane temperature ispitnu epruvetu postavlja se u peć i pušta da se grije na 30 minuta.



Slika 5.5. Ispitna epruveta u komornoj peći

Naprava za gašenje pomoću koje će se provesti Jominyjev pokus prikazana je na slici 5.6.



Slika 5.6. Naprava za gašenje Jominyjevog uzorka

Nakon isteka 30 minuta, uzorak se vadi iz peći i u roku od 5 sekundi postavlja na zadanu poziciju u napravi za gašenje i započinje se gašenje vodenim mlazom.



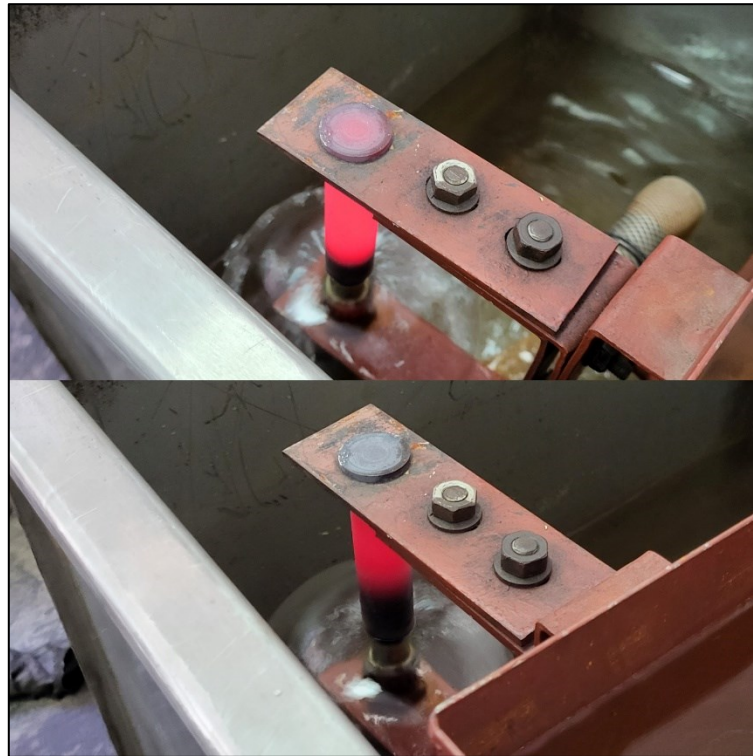
Slika 5.7. Vađenje ispitne epruvete iz komorne peći

Hlađenje započinje direktnim mlazom vode na čelo epruvete i traje najmanje 10 minuta.

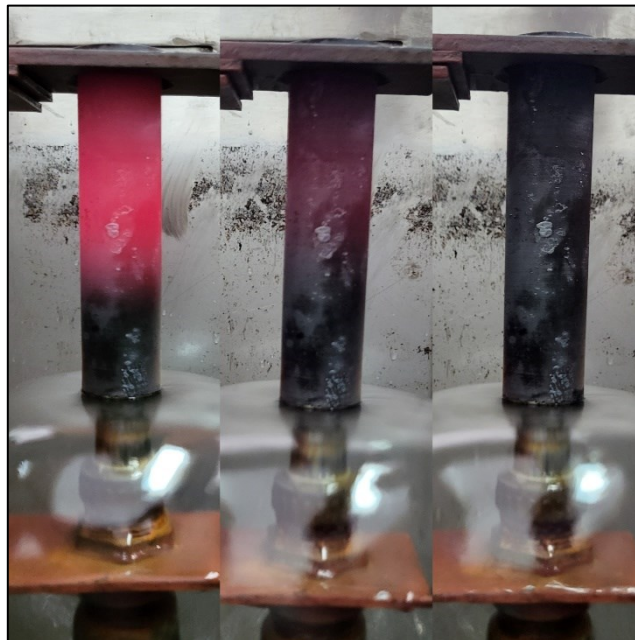


Slika 5.8. Početak gašenja ispitnog uzorka

Tijekom perioda gašenja vidljivo se mijenja boja kako se uzorak ohlađuje od čela uzorka prema negašenom kraju.



Slika 5.9. Ohlađivanje Jominyjeve epruvete



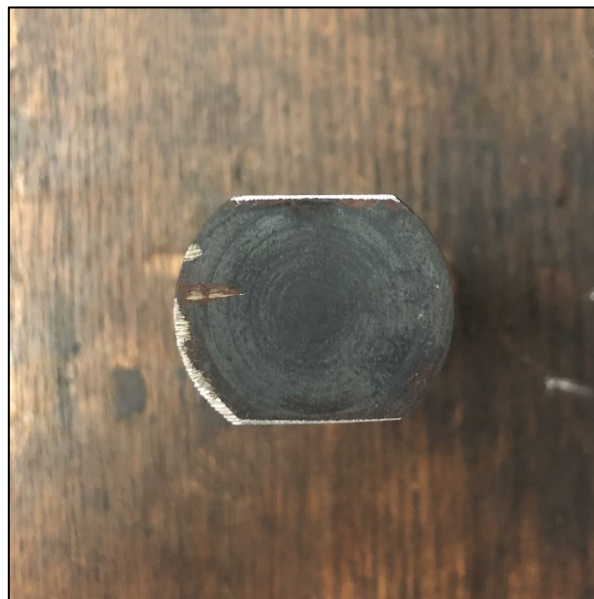
Slika 5.20. Prikaz različitih brzina ohlađivanja prilikom gašenja uzorka

Nakon propisanog vremena gašenja epruveta se uklanja sa držača naprave za gašenje i dodatno zaranja u vodu kako bi se ohladila na temperaturu za sigurno rukovanje. Uzorak se zatim brusi na magnetnoj brusilici prema propisanom standardu.

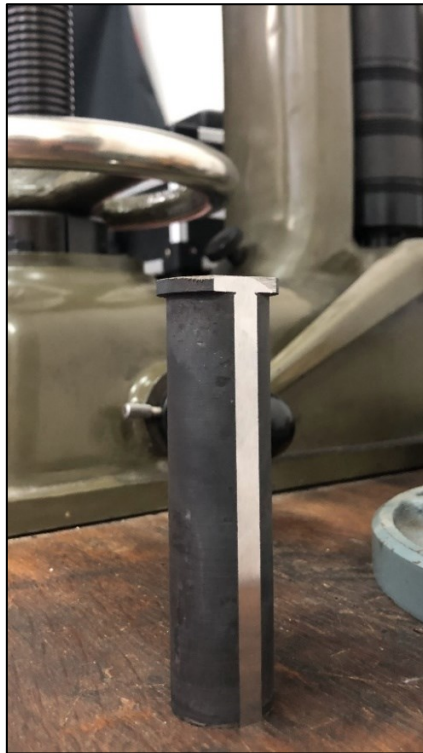


Slika 5.11. Jominyjev uzorak nakon gašenja

Uzorku skidamo sloj od 0,4 mm na valjkastoj plohi plašta s dvije paralelne strane.



Slika 5.12. Prikaz brušenih strana Jominyjeve epruvete



Slika 5.13. Brušena strana Jominyjevog uzorka

Na izbrušenim stranama Jominyjevog uzorka označavamo propisane udaljenosti na kojima se ispituje tvrdoća u cilju ispitivanja prokaljivosti. Udaljenosti su propisane prema normi HRN EN ISO 642 i prikazane su na slici 4.2.3. Na uzorku se označavaju pomoću korištenja pomoćnog mjerila i grafitne olovke. Epruvetu sa tako pripremljenim izbrušenim površinama i označenim odgovarajućim udaljenostima postavlja se na tvrdomjer i može se započeti ispitivanje tvrdoće.



Slika 5.14. Postupak označavanja točaka ispitivanja po Jominyu

Ispitivanje tvrdoće izvodi se na tvrdomjeru po Rockwellovoj HRC metodi. Tvrdomjer korišten za ispitivanje prikazan je na slici 5.15.



Slika 5.15. Tvrdomjer

Prilikom ispitivanja tvrdoće potrebno je pratiti označene udaljenosti i ispitivati ih po središnjici brušene površine.



Slika 5.16. Ispitivanje tvrdoće na tvrdomjeru

Na slici 5.17. prikazana je ispitana površina Jominyjeve epruvete.



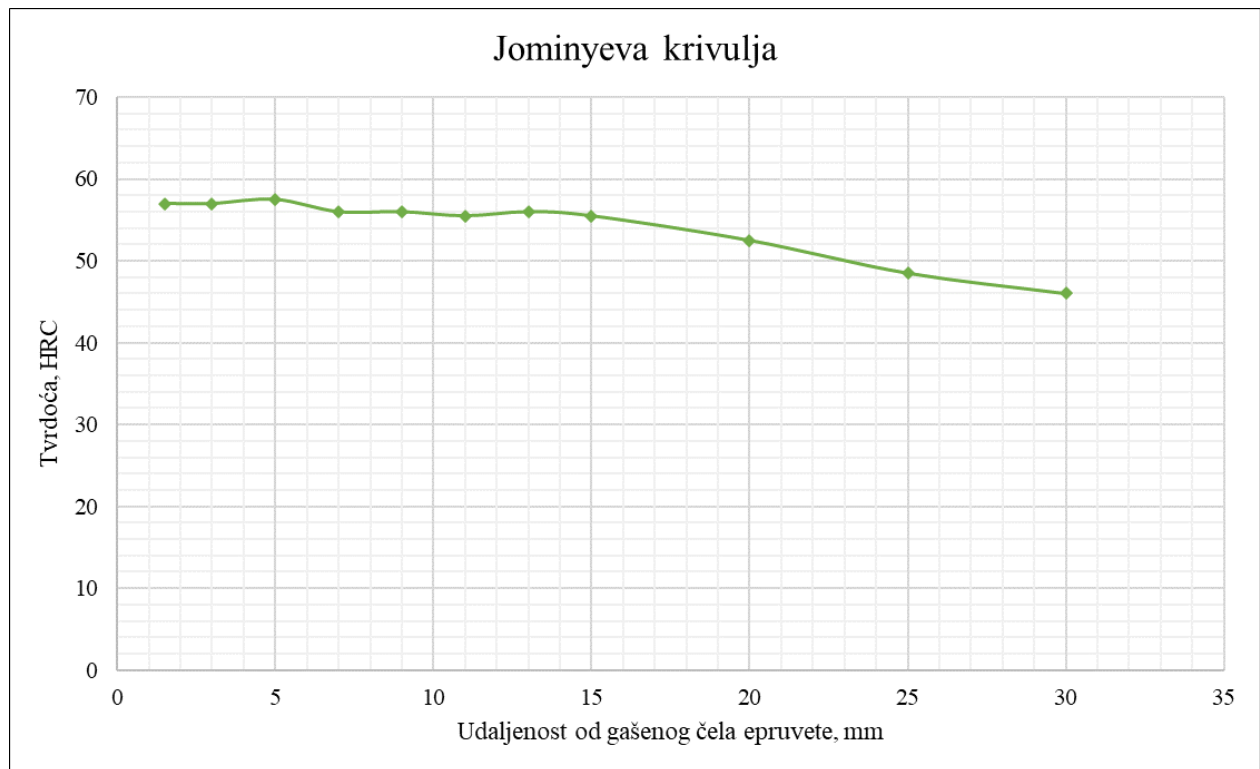
Slika 5.17. Ispitana Jominyjeva epruveta

Vrijednosti tvrdoće dobivene ispitivanjem na propisanim udaljenostima za pripadajuću epruvetu materijala 51CrV4 brojčano su prikazane u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Rezultati ispitivanja tvrdoće zadanog Jominyjevog uzorka

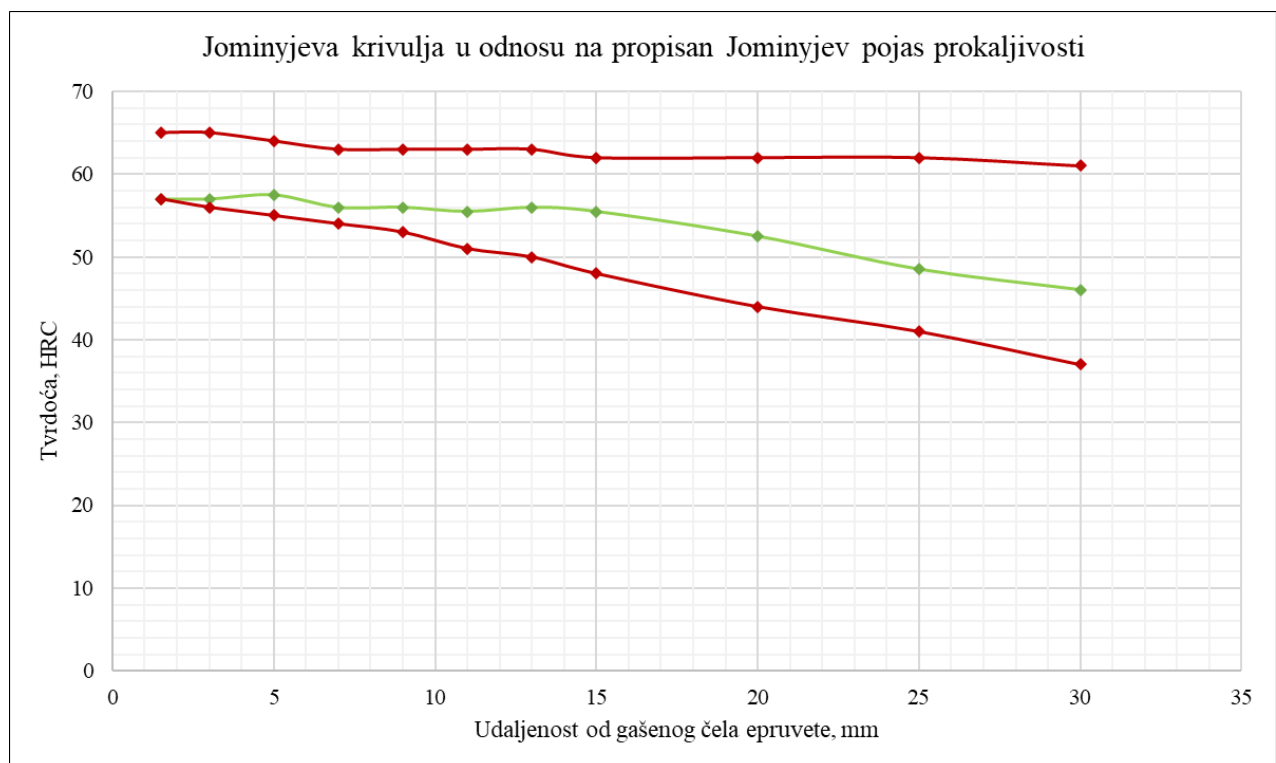
Udaljenosti	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30
1. strana	57	57	58	55	55	55	56	55	52	47	45
2. strana	57	57	57	57	56	56	56	56	53	50	47
Prosjek	57	57	57,5	56	56	55,5	56	55,5	52,5	48,5	46

Rezultati dobiveni ispitivanjem po Jominyu prikazani su grafički na slici 5.18.



Slika 5.18. Jominyjeva krivulja za ispitni uzorak materijala 51CrV4

Rezultati u odnosu na poznati Jominyjev pojas prokaljivosti sa slike 5.3. prikazani su na slici 5.19.



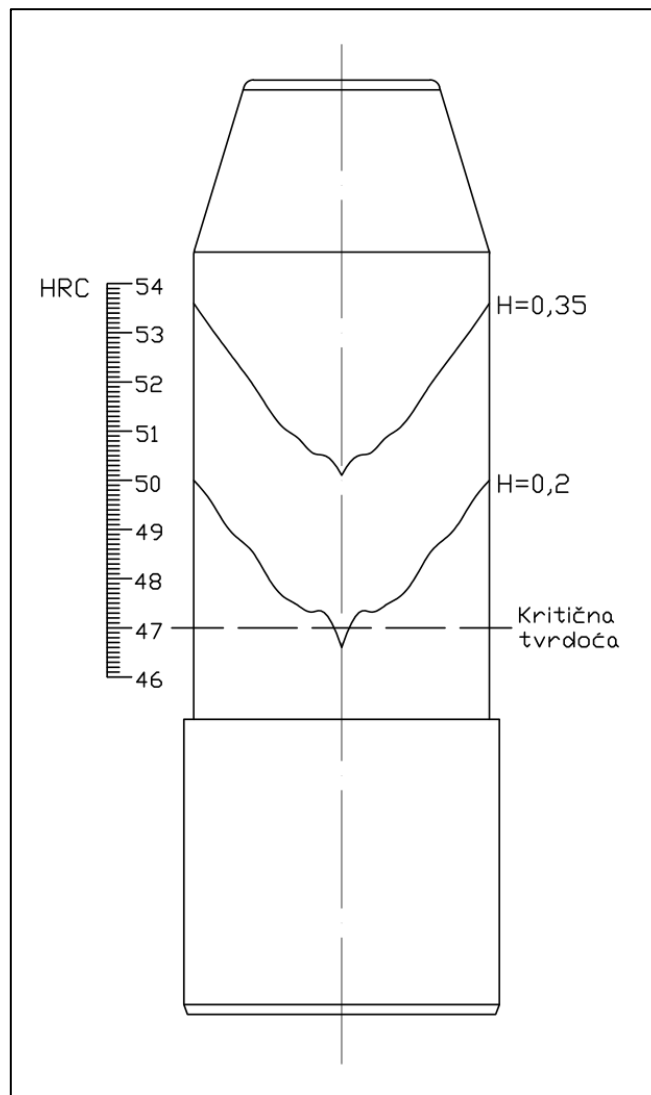
Slika 5.19. Jominyjeva krivulja u odnosu na propisan Jominyjev pojas prokaljivosti

Pomoću Crafts-Lamont dijagrama za zadani promjer strojnog dijela od 60 mm, dva različita faktora intenziteta gašenja i dobivene Jominyjeve krivulje konstruira se U-krivulja za zadani strojni dio koja predstavlja raspodjelu tvrdoće po presjeku strojnog dijela. Postupak je grafički prikazan na slici 4.3.1.

Očitane vrijednosti udaljenosti od gašenog čela Jominyjeve epruvete iz Crafts-Lamont dijagrama dane su u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Očitane vrijednosti iz Crafts-Lamont dijagrama

$D = 60 \text{ mm}$		
d/D	$H = 0,35$	$H = 0,2$
0,0	23,7 mm	32,5 mm
0,1	22,3 mm	30,2 mm
0,2	22,7 mm	31,2 mm
0,3	21,6 mm	30,3 mm
0,4	21,3 mm	29,9 mm
0,5	20,2 mm	29,0 mm
0,6	19,0 mm	27,5 mm
0,7	17,8 mm	26,9 mm
0,8	16,8 mm	26,1 mm
0,9	15,9 mm	24,7 mm
1,0	14,6 mm	23,8 mm



Slika 5.20. Tokovi tvrdoće za gašenje u mirnom ulju i u ulju uz slabo gibanje

Za isto rashladno sredstvo, ali druge vrijednosti strujanja rashladnog sredstva dobiju se različite vrijednosti tvrdoće po presjeku. Gašenjem u ulju uz slabo strujanje ($H = 0,35$) postiže se prokaljenost po cijelom poprečnom presjeku strojnog dijela. Ako uzorak miruje prilikom gašenja u ulju ($H = 0,2$) strojni dio neće se u potpunosti prokaliti jer neće postići zahtijevanu vrijednost tvrdoće u jezgri.

Gašenjem u ulju uz blago strujanje ($H = 0,35$) u jezgri se postiže tvrdoća iznosa 50 HRC koja je iznad kritične tvrdoće. Tvrdoća koja se postiže u jezgri strojnog dijela za faktor intenziteta gašenja $H = 0,2$ iznosi manje od 47 HRC što je niže od kritične tvrdoće. Za oba slučaja tok tvrdoće neće biti jednolik, već će kako se približava jezgri strojnog dijela naglo opadati. Niti jedna vrijednost H faktora ne postiže 100% martenzitnu strukturu na površini obratka, odnosno za koncentraciju ugljika od 0,51% tvrdoću od 61 HRC.

6. ZAKLJUČAK

Čelik je jedan od najčešće korištenih materijala u proizvodnoj industriji. Tu titulu ima zbog svoje izvanredne obradivosti i gotovo beskonačno mnogo kombinacija mehaničkih svojstava koje može poprimiti. Postupcima toplinske obrade mijenjamo mehanička svojstva čelika i na taj način povećavamo njegovu kvalitetu.

Najveći čimbenik kod kvalitete čelika i njegove toplinske obrade je udio ugljika. Udio ugljika izravno utječe na tvrdoću čelika i na mogućnost povećanja tvrdoće postupkom toplinske obrade. Toplinska obrada gdje se čelik zagrijava na temperaturu austenitizacije i potom ubrzano ohlađuje u cilju postizanja veće tvrdoće čelika naziva se kaljenje. Osim ugljika, na kaljivost čelika utječu i razni legirajući elementi koji mogu povoljno utjecati na svojstva prokaljivosti čelika. Svojstvo prokaljivosti je sposobnost čelika da postigne jednoliki tok tvrdoće po cijelom poprečnom presjeku čeličnog obratka.

Ispitivanje prokaljivosti može se provesti raznim metodama od kojih su najpoznatije Grossmannova i Jominyjeva metoda. Jominyjeva metoda je najraširenija zbog svoje jednostavnosti i niskih troškova izvedbe. Ispitivanje prokaljivosti po Jominyu vrši se pomoću ispitivanja tvrdoće po Rockwellovoj metodi na zadanim udaljenostima od gašenog čela ispitne epruvete. Eksperimentalno dobiveni rezultati prikazuju se kao Jominyjeva krivulja. Uz pomoć Jominyjeve krivulje i Crafts-Lamont dijagrama određuje se tok tvrdoće za odabrano rashladno sredstvo kod gašenja.

Na temelju provedenog eksperimentalnog ispitivanja prokaljivosti po Jominyu donesen je zaključak o dubini prokaljivanja strojnog dijela NV.22-DP.82 izrađenog od čelika 51CrV4. Prikazana su dva toka tvrdoće za gašenje u ulju uz različite vrijednosti strujanja rashladnog sredstva. Na temelju prikazanih krivulja toka tvrdoće donesen je zaključak kako će se strojni dio NV.22-DP.82 u cijelosti prokaliti po cijelom poprečnom presjeku u slučaju gašenja u ulju uz slabo gibanje. Također, zaključeno je kako se strojni dio NV.22-DP.82 neće u cijelosti prokaliti pri gašenju u mirnom ulju jer bi dobiveni iznos tvrdoće u jezgri strojnog dijela u tom slučaju bio manji od iznosa kritične tvrdoće.

LITERATURA

- [1] Kostadin, T.: „Čelici i željezni ljevovi“, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2017.
- [2] Smoljan, B.: „Toplinska obrada čelika, sivog i nodularnog lijeva“, Hrvatsko društvo za toplinsku obradbu i inženjerstvo površina, Zagreb, 1999.
- [3] Stupnišek, M., Cajner, F.: „Osnove toplinske obrade metala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [4] Caballero, F.G., Capdevila, C., De Andrés, C.G.: „Modelling of kinetics of austenite formation in steels with different initial microstructures“, ISIJ International, Vol. 41, No. 10, pp. 1093-1102, 2011.
- [5] Hamada, S. i dr.: „Fatigue limit evaluation considering crack initiation for lamellar pearlitic steel“, Procedia Engineering 10, pp. 1467-1472, 2011.
- [6] Iljkić, D.: „Materijali II“, materijali s predavanja, Merlin, 2017.
- [7] Banerjee, K. i dr.: „Non-isothermal austenite grain growth kinetics in a microalloyed X80 linepipe steel“, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol 41., pp. 3161-3172, 2010.
- [8] Pomenić, L.: „Toplinska obrada čelika“, s Interneta, <https://bit.ly/3QE8uKq>, 2017.
- [9] Brooks, C. E.: „Principles of the austenization of steels“, Elsevier Applied Science, 1992.
- [10] Guimarães, J., Rios, P.: „Microstructural path analysis of martensite dimensions in FeNiC and FeC alloys“, Materials Research, Vol. 18, pp. 596-601, 2015.
- [11] Gabrić, I., Šitić, S.: „Materijali II“, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [12] Kučić-Mirković, S.: „Tehnički materijali“, Tehnička škola Rijeka, Rijeka, 2016.
- [13] Pomenić, L.: „Postupci toplinske obrade“, s Interneta, <https://bit.ly/3qswYvA>, 2017.
- [14] Zhang, L. i dr.: „Microstructure and property predictions by using a heat-treatment planning system, CHT-q/t“, ASM International-24th Heat Treating Society Conference, 2007.
- [15] ASM International: „ASM Handbook-Volume 4-Heat Treatment“, Materials Park Ohio, ASM International, 1991.
- [16] Föll, H.: „Iron, Steel and Swords script“, s Interneta, https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/ammat/iss/kap_9/illustr/s9_2_1.html#!De-Long, 2021.

- [17] Novosel, M., Cajner, F., Krumes, D.: „Alatni materijali“, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1996.
- [18] Total Materia: „The effects of alloying elements on iron-carbon alloys“, s Interneta, <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=151>, 2005.
- [19] Gabrić, I.: „Praktikum za laboratorijske vježbe-Materijali 2“, Sveučilište u Splitu, Split, 2018.
- [20] Norma: HRN EN ISO 642, 2008.
- [21] Steel Data: „Jominy end-quench hardenability test“, s Interneta, <https://steeldata.info/hard/demo/help/jominy.html>, 2017.
- [22] Matijević, B.: „TII i PT-toplinska obrada“, materijali s predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [23] Ovako: „Material data sheet-Steel grade-51CrV4“, s Interneta, <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/51crv4-en100892002/?&variantIDs=59>, 2022.
- [24] Over: „OVER industrijska elektronika“, s Interneta, <https://www.over.hr/index.php>, 2022.
- [25] Norma: A 255-02, 2002.
- [26] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: „Svojstva i primjena materijala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [27] Novosel, M., Krumes, D., Kladarić, I.: „Željezni materijali-konstruktivski čelici“, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2013.

POPIS TABLICA

<i>Tablica 5.1. Kemijski sastav 51CrV4 [23]</i>	<i>41</i>
<i>Tablica 5.2. Rezultati ispitivanja tvrdoće zadanog Jominyjevog uzorka</i>	<i>49</i>
<i>Tablica 5.3. Očitane vrijednosti iz Crafts-Lamont dijagrama</i>	<i>51</i>

POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1. Metastabilni fazni dijagram Fe-Fe₃C za čelik [2]</i>	2
<i>Slika 2.2. Metalografski prikaz feritne strukture [4]</i>	3
<i>Slika 2.3. Metalografski prikaz perlitne strukture [5]</i>	4
<i>Slika 2.4. Metalografski prikaz cementitne strukture [6]</i>	4
<i>Slika 2.5. Metalografski prikaz austenitne strukture [7]</i>	5
<i>Slika 2.6. Dijagram tvorbe perlita u austenit [9]</i>	6
<i>Slika 2.1.1. Odnos temperature i brzine perlitne pretvorbe [2]</i>	7
<i>Slika 2.1.2. Grafički prikaz područja bainitne pretvorbe [2]</i>	8
<i>Slika 2.1.3. Metalografski prikaz martenzitne mikrostrukture [10]</i>	9
<i>Slika 2.1.4. Formiranje martenzitne strukture [2]</i>	10
<i>Slika 2.1.5. Utjecaj udjela ugljika u austenitu na temperature martenzitne pretvorbe [2]</i>	10
<i>Slika 2.1.6. Utjecaj udjela ugljika u primarnom austenitu na količinu zaostalog austenita [2]</i> ..	11
<i>Slika 2.1.7. Burnsov dijagram [3]</i>	11
<i>Slika 2.2.1. Uptonov dijagram [3]</i>	12
<i>Slika 2.2.2. Raspon optimalnih temperatura austenitizacije kod kaljenja čelika [3]</i>	12
<i>Slika 2.2.3. Konstrukcija TTT-dijagrama [3]</i>	13
<i>Slika 2.2.4. Izotermički TTT-dijagram za podeutektoidni čelik [3]</i>	14
<i>Slika 2.2.5. TTT-dijagram za kontinuirano ohlađivanje za podeutektoidni čelik [11]</i>	15
<i>Slika 2.2.6. TTT-dijagram za kontinuirano ohlađivanje za eutektoidni čelik [11]</i>	16
<i>Slika 2.2.7. TTT-dijagram za kontinuirano ohlađivanje za nadeutektoidni čelik [11]</i>	16
<i>Slika 3.1. Dijagram postupka kaljenja čelika [12]</i>	18
<i>Slika 3.2. Odnos koncentracije ugljika, tvrdoće i udjela martenzita [14]</i>	21
<i>Slika 3.1.1. Utjecaj dimenzije obratka na njegovu prokaljivost [3]</i>	22
<i>Slika 3.2.1. Utjecaj legirajućih elemenata na kritičnu temperaturu A₁ [15]</i>	24
<i>Slika 3.2.2. Utjecaj legirajućih elemenata na eutektoidnu koncentraciju ugljika [16]</i>	25
<i>Slika 3.2.3. Pseudobinarni dijagram Fe-C-Mn za 2% mangana [17]</i>	25
<i>Slika 3.2.4. Učinak γ-genih elemenata na dijagram stanja [18]</i>	26
<i>Slika 3.2.5. Utjecaj α-genih elemenata na dijagram stanja [18]</i>	27
<i>Slika 3.2.6. Usporedba TTT-dijagrama sa i bez prisustva legirajućeg elementa [3]</i>	28
<i>Slika 4.1.1. Raspodjela tvrdoće u uzorku nakon gašenja [2]</i>	30
<i>Slika 4.1.2. Dijagram za određivanje kritičnog promjera D_k [19]</i>	30
<i>Slika 4.2.1. Shema položaja ispitnog uzorka [20]</i>	31

<i>Slika 4.2.2. Shema postupka ispitivanja prokaljivosti po Jominyu [15]</i>	32
<i>Slika 4.2.3. Grafički prikaz rasporeda mjerenja tvrdoće na Jominyjevom uzorku [20]</i>	33
<i>Slika 4.2.4. Izrada Jominyjeve krivulje [19]</i>	34
<i>Slika 4.2.5. Jominyjeve krivulje za različite vrste čelika [21]</i>	34
<i>Slika 4.2.6. Jominyjev pojas prokaljivosti [22]</i>	35
<i>Slika 4.2.7. Odabir rashladnog sredstva uz pomoć kritičnog promjera D_k [2]</i>	36
<i>Slika 4.2.8. Ohlađivanje epruvete prikazano u TTT-dijagramu [3]</i>	37
<i>Slika 4.3.1. Crtanje U-krivulje pomoću Jominyjeve krivulje i Crafts-Lamont dijagrama [19]</i>	38
<i>Slika 4.3.2. Crafts-Lamont dijagrami za različite omjere d/D [19]</i>	39
<i>Slika 5.1. Strojni dio NV.22-DP.82</i>	40
<i>Slika 5.2. Jominyjev pojas prokaljivosti [23]</i>	41
<i>Slika 5.3. Ispitna epruveta za Jominyjev pokus</i>	42
<i>Slika 5.4. Komorna peć za žarenje, kaljenje i pougljičavanje</i>	42
<i>Slika 5.5. Ispitna epruveta u komornoj peći</i>	43
<i>Slika 5.6. Naprava za gašenje Jominyjevog uzorka</i>	43
<i>Slika 5.7. Vađenje ispitne epruvete iz komorne peći</i>	44
<i>Slika 5.8. Početak gašenja ispitnog uzorka</i>	44
<i>Slika 5.9. Ohlađivanje Jominyjeve epruvete</i>	45
<i>Slika 5.20. Prikaz različitih brzina ohlađivanja prilikom gašenja uzorka</i>	45
<i>Slika 5.11. Jominyjev uzorak nakon gašenja</i>	46
<i>Slika 5.12. Prikaz brušenih strana Jominyjeve epruvete</i>	46
<i>Slika 5.13. Brušena strana Jominyjevog uzorka</i>	47
<i>Slika 5.14. Postupak označavanja točaka ispitivanja po Jominyu</i>	47
<i>Slika 5.15. Tvrdomjer</i>	48
<i>Slika 5.16. Ispitivanje tvrdoće na tvrdomjeru</i>	48
<i>Slika 5.17. Ispitana Jominyjeva epruveta</i>	49
<i>Slika 5.18. Jominyjeva krivulja za ispitni uzorak materijala 51CrV4</i>	50
<i>Slika 5.19. Jominyjeva krivulja u odnosu na propisan Jominyjev pojas prokaljivosti</i>	50
<i>Slika 5.20. Tokovi tvrdoće za gašenje u mirnom ulju i u ulju uz slabo gibanje</i>	52

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu obrađena je tema ispitivanja prokaljivosti strojnog dijela NV.22-DP.82 i sve teme usko povezane uz prokaljivost. Objasñjeni su procesi faznih pretvorbi koje je potrebno razumjeti kako bi se shvatio proces toplinske obrade kaljenja čelika. Definiran je postupak kaljenja čelika i terminologija koja dolazi uz njega. Spomenula su se svojstva zakaljivosti i prokaljivosti čelika i načini ispitivanja prokaljivosti čelika. Od nekoliko metoda ispitivanja prokaljivosti istaknute su dvije najčešće korištene metode: Grossmannova i Jominyjeva metoda. Za potrebe ovog rada detaljno je objašnjena Jominyjeva metoda ispitivanja u svrhu boljeg razumijevanja praktičnog dijela rada.

U praktičnom dijelu diplomskog rada primijenjeno je teorijsko znanje ispitivanja prokaljivosti po Jominyu. Prikazan je cijeli standardizirani postupak ispitivanja od dobivanja same ispitne epruvete do konačnih grafičkih prikaza raspodjele tvrdoće na zadanoj epruveti. Pomoću dobivenih rezultata konstruirala se Jominyjeva krivulja koja se kombinirala sa Crafts-Lamont dijagramima kako bi se dobio tok tvrdoće po presjeku strojnog dijela NV.22-DP.82. Prikazana su dva toka tvrdoće za gašenje u ulju uz različito stanje gibanja. Na temelju dobivenih U-krivulja donesena je odluka o učinkovitosti rashladnog sredstva s obzirom na postignutu tvrdoću u strojnom dijelu.

Ključne riječi: čelik, martenzitna pretvorba, tvrdoća, kaljenje, prokaljivost, Jominyjeva metoda

SUMMARY

In this master thesis, the estimation of hardening depth of workpiece NV.22-DP.82 and all closely related topics with hardenability were discussed. The phase transformation mechanisms that are necessary in order to understand hardening were explained. Steel hardening procedure and the terminology that comes with it were defined. Hardenability as a term was clarified, as were the test methods for determining hardenability of the steel. Out of several methods for testing hardenability, the two most commonly used methods stood out: Grossmann's and Jominy's methods. For purposes of this thesis, Jominy's test method was explained into detail for the needs of the practical part of the thesis.

In practical part of the thesis, theoretical knowledge of Jominy hardenability testing was applied. The entire standardized test procedure is presented, from making the test specimen itself to the final graphical representations of the hardness distribution of the given test specimen. Using the results from the previously conducted test, a Jominy curve was constructed which was then combined with the Crafts-Lamont diagrams for the purpose of obtaining the hardness distribution across the cross-section of the workpiece NV.22-DP.82. Two hardness curves for oil quenching with different agitation state were shown and based on these curves a conclusion was made about the effectiveness of the quenching medium regarding the hardness achieved in the workpiece.

Key words: steel, martensitic transformation, hardness, hardening, hardenability, Jominy's method