

# Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela HT.22-DP.68

---

**Taletović, Haris**

**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:190:894432>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-25**



*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**  
**HT.22-DP.68**

Rijeka, srpanj 2022.

Haris Taletović

0069065867

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA**

**HT.22-DP.68**

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

Rijeka, srpanj 2022.

Haris Taletović

0069065867

Rijeka, 16. ožujka 2022.

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

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: Haris Taletović (0069065867)  
Studij: Diplomski sveučilišni studij strojarstva  
Modul: Inženjerstvo materijala

Zadatak: Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela HT.22-DP.68 / Estimation of hardening depth of workpiece HT.22-DP.68

### Opis zadatka:

Potrebno je procijeniti dubinu prokaljivanja strojnog dijela HT.22-DP.68 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 HT.22-DP.68 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.

*Haris Taletović*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Dario Ilić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## IZJAVA

kojom ja, Haris Taletović, izjavljujem da sam zadatak za diplomski rad pod nazivom teme „Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela HT.22-DP.68 / Estimation of hardening depth of workpiece HT.22-DP.68“ napisao samostalno pod vodstvom mentora prof. dr.sc. Daria Iljkića sukladno članku 8. „Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija“ Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci.

Pri izradi navedenog diplomskog rada koristio sam stečena znanja, eksperimentalne dobivene podatke te stručnu literaturu koja je navedena pri kraju rada.

Rijeka, srpanj 2022.

---

Haris Taletović

0069065867

## **ZAHVALNICA**

Ovim putem zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Dariju Ilkiću na svim savjetima, informacijama te utrošenom vremenu i trudu.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci na razumijevanju, vremenu te moralnoj podršci koju su mi pružali tijekom studiranja.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. KARAKTERIZACIJA ČELIKA .....	2
2.1. Klasificiranje čelika po grupama .....	3
2.2. Utjecaj primjesa u čeliku .....	3
2.3. Utjecaj nemetalnih uključaka .....	5
2.4. Utjecaj, podjela i svojstva legirajućih elemenata .....	6
3. TOPLINSKA OBRADA ČELIKA .....	13
4. FAZNE PRETVORBE PRI TOPLINSKOJ OBRADI ČELIKA.....	16
4.1. Tvorba austenita uslijed ugrijavanja.....	21
4.2. Pretvorbe pothlađenog austenita.....	25
4.3. Perlitna pretvorba ( $A \rightarrow P$ ).....	25
4.4. Bainitna pretvorba ( $A \rightarrow B$ ) .....	29
4.5. Martenzitna pretvorba ( $A \rightarrow M$ ) .....	32
5. PROKALJIVOST I ZAKALJIVOST .....	35
5.1. Kaljenje čelika .....	35
5.2. Zakaljivost .....	40
5.3. Prokaljivost.....	40
5.4. Ispitivanje prokaljivosti .....	42
5.5. Utvrđivanje stupnja zakaljivosti Justovom metodom.....	43
5.6. Ispitivanje prokaljivosti prema Grossmannu .....	44
5.7. Ispitivanje prokaljivosti Jominy metodom .....	46
5.8. Određivanje toka tvrdoće pomoću Crafts-Lamontovih dijagrama .....	52
6. PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA HT.22-DP.68.....	56
6.1. Strojni dio HT.22-DP.68 .....	56
6.2. Značajke čelika 42CrMo4 .....	57
6.3. Provedba Jominyevog pokusa .....	58
6.4. Rezultati Jominyevog pokusa.....	63
6.5. Procjena prokaljivosti strojnog dijela HT.22-DP.68 .....	65
7. ZAKLJUČAK .....	68
POPIS LITERATURE .....	69

POPIS SLIKA .....	70
POPIS TABLICA.....	73
SAŽETAK.....	74
SUMMARY .....	75



# 1. UVOD

Glavni cilj ovog diplomskog rada jest procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela HT.22-DP.68. Procjenu dubine prokaljivanja potrebno je odrediti Jominy metodom na temelju norme HRN EN ISO 642. Procjena se provodi na standardnom Jominyjevom uzorku dimenzija  $\phi 25 \times 100$  mm koji je izrađen od čelika 42CrMo4. Po završetku pokusa slijedi ispitivanje tvrdoće te se na osnovu dobivenih rezultata konstruira Jominy krivulja. Zatim, uz pomoć Crafts-Lamontovih dijagrama i konstruirane Jominy krivulje konstruira se U-krivulja, odnosno, tok tvrdoće po presjeku strojnog dijela. U-krivulja se konstruira za slučaj gašenja u vodi bez pokretanja. Navedena metoda je pouzdan pokazatelj prokaljivosti u teorijskom i praktičnom dijelu.

U prvom dijelu ovog diplomskog rada dan je osvrt na teorijski dio o čeliku u kojem se navodi njegova klasifikacija po grupama te utjecaj primjesa, nemetalnih uključaka i legirajućih elemenata na isti.

Zatim, središnji dio odnosi se na teorijski dio za zadanu temu kako bi bilo čim lakše razumijevanje, izvođenje te proanaliziranje eksperimentalnog dijela rada. U ovom dijelu definiran je postupak toplinske obrade te pojmovi zakaljivost i prokaljivost. Također se opisuju i fazne pretvorbe u čeliku uslijed toplinske obrade. Iduće poglavlje opisuje metode procjene prokaljivosti pri čemu je naglasak na Jominy metodu.

Posljednji dio odnosi se na sami eksperiment i zadani zadatak. U ovom dijelu detaljno se prikazuje izvođenje Jominyjevog pokusa. Također je opisano postrojenje za izvođenje Jominyjevog pokusa i sva korištena oprema. Na kraju ovog diplomskog rada, na temelju dobivenih rezultata, konstruira se U-krivulja pomoću koje se određuje procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela HT.22-DP.68.

## 2. KARAKTERIZACIJA ČELIKA

Čelik se u najvećoj mjeri karakterizira sa svojstvima kao što su: visoka čvrstoća, žilavost, tvrdoća, visoka i nisko temperaturna otpornost, otpornost na atmosferlije, magnetičnost, električna i toplinska vodljivost te mnoga druga. Razlog zašto se čelik ističe od ostalih materijala jest u tome što čelik pruža mogućnost mijenjanja njegovih svojstava različitim postupcima, a neki od njih su: toplinska obrada, legiranje, površinska obrada, oblikovanje deformiranjem, nanošenje prevlaka ili čak u kombinaciji jedan s drugim. Oblikovanje čelika moguće je izvoditi u toplom i hladnom stanju, a to su postupci: valjanje, kovanje, prešanje, rezanje, utiskivanje, hladno sabijanje i slično. Također, potrebno je naglasiti i spajanje čelika. Čelik se može spajati i s drugim materijalima postupcima tipa: zavarivanje, lemljenje, lijepljenje. Posjeduje i dobru obradivost te mogućnost zaštite od korozije.

Iako na svijetu ne postoji idealan materijal, čelik u vrlo dobroj mjeri zadovoljava inženjersku primjenu u svakom pogledu, što mu daje dostatnu kvalitetu uz aksetabilne troškove. Opća klasifikacija čelika prikazana je na slici 1.



Slika 1. Opća klasifikacija čelika [1]

## **2.1. Klasificiranje čelika po grupama**

Klasificiranje čelika po grupama koje su srodne izvodi se na više načina poput: načinu proizvodnje, kemijskom sastavu, kvaliteti, namjeni i mikrostrukтури. Čelici, prema načinu proizvodnje, mogu se podijeliti na sljedeće: Bessemerov čelik, Thomasov čelik, Siemens-Martinov čelik, Elektro čelik, čelik iz kisikovih konvertera (LD, LDAC, OBM, LWS i drugi), čelik koji je proizveden sekundarnom metalurškom obradom (npr. vakuumiranje, AOD, CLU i sl.), kontroliranom metalurgijom, prema načinu dezoksidacije i lijevanja: neumireni, poluumireni te umireni čelik.

Od prethodno navedenih vrsti čelika, Bessemerov i Thomasov čelik se više ne upotrebljavaju zbog ekoloških razloga te su zamijenjeni sa Siemens-Martinovim čelikom koji se proizvodi u postojećim agregatima. Zbog sirovinskih i energetske uvjeta, Siemens-Martinov čelik zamjenjuje se elektro čelikom ili pak čelikom iz kisikovih konvertera.

Čelici se prema kemijskom sastavu mogu podijeliti na: legirane i nelegirane. Prema kvaliteti mogu se podijeliti na: osnovne, kvalitetne te plemenite. Prema mikrostrukтури mogu se podijeliti na: podeutektoidne, nadeutektoidne, perlitne, odnosno eutektoidne, ledeburit, ferit, austenit, austenitno-feritne, martenzitne te bainitne čelike.

Prema namjeni mogu se podijeliti na: konstrukcijske, alatne čelike, čelike s posebnim svojstvima (vatrostalni, antikorozijski, brzorezni, opružni čelici, čelici za kotrljajuće ležaje, teške otkivke, čelici s posebnim fizičkim svojstvima i mnogi drugi).

## **2.2. Utjecaj primjesa u čeliku**

Primjese u čeliku utječu na svojstva čelika te na taj način određuju njegovu kvalitetu. Primjese koje su prisutne u svakom čeliku jesu: kisik, dušik, vodik, fosfor, sumpor, nemetalni uključci sulfidnog, oksidnog ili silikatnog tipa. Masene udjele svih navedenih primjesa potrebno je svesti na minimum.

## **Kisik (O)**

Vrlo često se kod niskougličnih čelika pronalazi povišeni udio kisika koji ima za posljedicu pojavu oksida željeza FeO, koji uzrokuje tzv. crveni lom. Kako bi se spriječila pojava crvenog loma, kisik se eliminira iz taljevine dezoksidacijom čelika. Pri čemu dolazi do nastanka spojeva oksida  $Al_2O_3$  te  $SiO_2$  koji su tvrdi i kuglastog oblika. Također, još neki od nedostataka prisutnosti kisika u čeliku dovodi do problema s obradivosti te čelicima povisuje krhkost.

## **Dušik (N)**

Naglim hlađenjem čelika, dušik ostaje zarobljen u rešetki čelika. Izvlačenje dušika iz rešetke, zbog netopivosti u rešetki, provodi se dodavanjem elemenata poput: aluminijska, titanijska, niobijeva. Navedeni elementi imaju veću sklonost vezanja atoma dušika od željeza te se na taj način tvore nitridi. Ako se izvlačenje dušika ne provede, u tom slučaju dolazi do pojave starenja što rezultira povišenom čvrstoćom čelika a smanjenoj žilavošću.

Maseni udio dušika iznosi od 0,01% do 0,03% te povećava granicu razvlačenja i čvrstoću dok se s druge strane smanjuju deformabilnost te udarni rad loma. Upravo je maseni udio dušika mjerilo za kvalitetu čelika.

## **Vodik (H)**

Brzina difuzije vodika u željezu veća je i od brzine difuzije ugljika. Razlog tomu je taj što je vodik element s najmanjim promjerom atoma. Vodik je vrlo nepoželjan element u željezu zbog svojih negativnih utjecaja poput smanjenja žilavosti bez da se pri tome povećava čvrstoća kao ni granica razvlačenja. Pojavu vodika u mikrostrukturi se teško dokazuje. Vodikova krhkost (prelazak vodika iz atomarnog stanja u molekularni u obliku mjehurića) uzrokuje razugličavanje površine te razara stabilne karbide kao i metalne veze među kristalnim zrnima.

## **Fosfor (P)**

Također još jedna od nepovoljnih primjesa u čeliku je fosfor, čiji maseni udio treba biti čim manji (< 0,06%). Spojevi sa željezom u čeliku tvore tzv. kristal mješanicu koji, tijekom skrućivanja i male brzine difuzije, uzrokuje primarne segregacije. One se definiraju kao štetne nehomogenosti strukture. Nakon što interval skrućivanja završi, primarni dendritni kristali su siromašni fosforom kao i legirajućim elementima, pri čemu ostatak taljevine sadržava fosfor te znatni dio nemetalnih

uključaka. Toplo oblikovanje uzrokuje trakasto izduženje dendritne lijevane strukture te se vrlo teško otklanja.

Veći maseni udio fosfora uzrokuje krhkost u hladnom stanju, što se može vidjeti u tablici 1. Ukoliko je sadržaj ugljika veći i veća temperatura austenitizacije, izraženija je krhkost.

Kod korozijski postojanih čelika, povećanje masenog udjela fosfora pogoduje kako bi se povećala granica razvlačenja efektom percipacije. Dok povećanje masenog udjela fosfora kod čelika za obradu na automatima poboljšava rezljivost.

*Tablica 1. Utjecaj masenog udjela fosfora na neka mehanička svojstva [1]*

Sadržaj fosfora, %	Granica razvlačenja, N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	Tvrdoća, HB	Kontrakcija, %	Žilavost, J/cm <sup>2</sup>
0	280	340	1000	30	340
0,2	360	410	1250	30	200
0,4	440	480	1550	25	0

### **Sumpor (S)**

Maseni udio sumpora u čeliku je od 0,05% do 0,06% te nastaje kao produkt izgaranja (SiO<sub>2</sub>) iz rude. U kemijskom spoju sa željezom stvara sulfid (FeS) koji uzrokuje pojavu crvenog i bijelog loma, stoga je odgovoran za segregaciju. Pojava crvenog loma manifestira se na temperaturama većim od 1000 °C zbog toga što se sulfid (FeS) rastavlja na temperaturi od 985 °C što dovodi do smanjenja žilavosti. Upravo iz toga razloga, čelici koji imaju povišeni sadržaj sumpora, ne deformiraju se u toplom stanju. Kako bi se izbjegao štetan utjecaj dodaje se mangan koji tvori sulfid MnS koji povisuje temperaturu taljenja oko 1610 °C.

Kod čelika koji su namijenjeni obradi odvajanjem čestica, sumpor se dodaje s namjerom (do 0,3%) zbog toga što smanjuje trenje između alata i izratka te na taj način pospješuje obradu.

### **2.3. Utjecaj nemetalnih uključaka**

Nemetalnim uključcima definiraju se svojstva čelik poput oblikovljivosti i otpornosti na lom. Vrste nemetalnih uključaka su: oksidne, sulfidne ili silikatne vrste te se uglavnom radi o kristal mješancima, odnosno, eutekticima. U manjoj mjeri pojavljuju se kao čisti kemijski spojevi (MnO,

MnS, SiO<sub>2</sub>). Također, mogu se podijeliti i prema obliku na: okrugle, tvrde ili poligonalne. Poligonalne su tvrde dok su izdužene lakše oblikovljive.

Vrsta, raspodjela te koncentracija nemetalnih uključaka u čeliku direktno utječe na tvrdoću i krhkost, dovode do smanjenja žilavosti kao i anizotropnosti svojstava čvrstoće. Ukoliko se javlja vanjsko opterećenje blizu nemetalnih uključaka, dolazi do povećanja koncentracije naprezanja te se u tom slučaju fazne granice matice odvajaju od uključaka. Uključci se mogu ukloniti na način da se čeliku dodaju elementi: cirkonij, cerij ili titanij.

## 2.4. Utjecaj, podjela i svojstva legirajućih elemenata

Legirajući elementi imaju vrlo velik utjecaj na svojstva čelika. Korištenjem različitih elemenata mogu se dobiti različiti materijali koji imaju različita svojstva. Neki od najčešće korištenih legirajućih elemenata su: mangan, krom, volfram, silicij, nikal, molibden, vanadij. Dok se u nekim specifičnim slučajevima koriste i: titanij, kobalt, aluminij, niobij i ostali.

Legirajući elementi unutar čelika javljaju se kao:

- otopljeni u  $\alpha$  ili  $\gamma$ -željezu
- spojevi intermetalnih spojeva i karbida
- nemetalni uključci poput: nitrida, sulfida, oksida.

Čelici, za razliku od ostalih skupina materijala, imaju najveći spektar sposobnosti promjene svojstava. Željena svojstva čelika postižu se namjernim dodavanjem i kombiniranjem različitih vrsta legirajućih elemenata. Dodavanje legirajućih elemenata pogoduje sljedećem:

- povećanje vlačne čvrstoće bez znatnog smanjenja duktilnosti,
- povećanje čvrstoće i tvrdoće,
- održavanje čvrstoće pri višim temperaturama,
- poboljšavanje postojanosti na koroziju,
- pospješuje otpornost na trošenje,
- postizanje tražene veličine zrna.

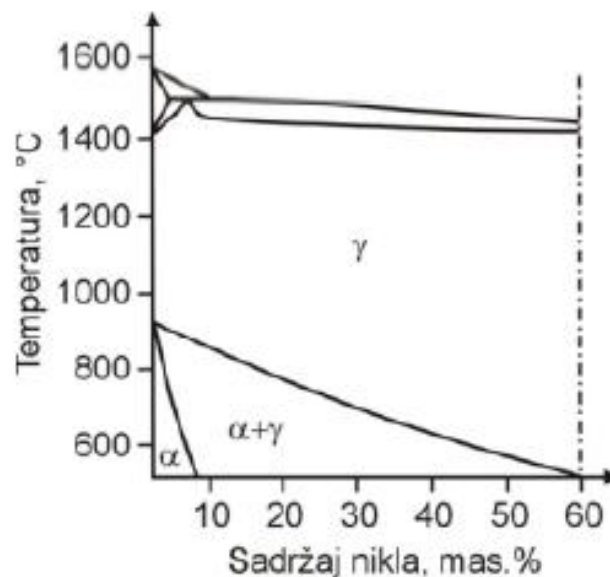
Prema učinku na matricu, legirajući elementi mogu se podijeliti u dvije kategorije:

1. Legirajući elementi koji proširuju  $\gamma$ -područja i potiču stvaranje austenita kao što su: nikel, kobalt, mangan, bakar, ugljik i dušik. Navedeni elementi još se nazivaju i austenitni stabilizatori.
2. Legirajući elementi koji skupljaju  $\gamma$ -područja i potiču stvaranje ferita kao što su: silicij, krom, volfram, molibden, cirkonij, niobij, bor, sumpor, fosfor i ostali. Navedeni elementi još se nazivaju i feritni stabilizatori.

Legirajući elementi mogu se podijeliti u dvije kategorije prema interakciji s ugljikom u čeliku, a to su:

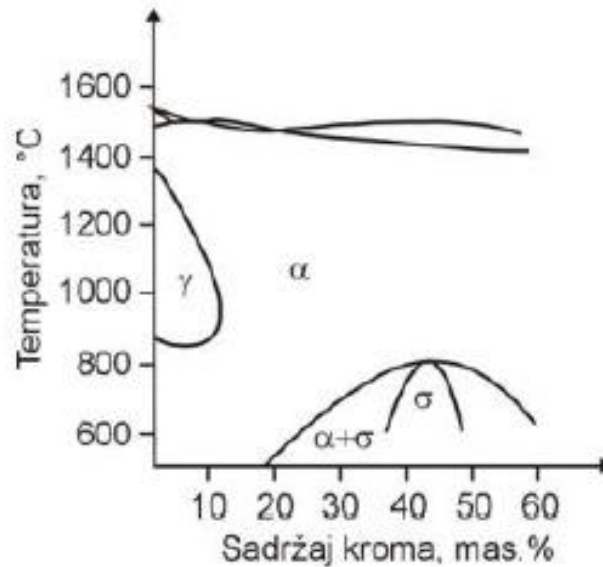
1. Karbidotvorci, kao što su: mangan, krom, molibden, volfram, vanadij, niobij, titanij i cirkonij. Pri niskim koncentracijama prelaze u čvrstu otopinu u cementitu. Pri višim koncentracijama tvore stabilnije legirane karbide, iako se mangan otapa samo u cementitu.
2. Nekarbidotvorci, kao što su: nikel, kobalt, bakar, silicij, fosfor i aluminij. Ne sadrže karbide u čelicima i obično se nalaze u matrici.

Elementi koji u najvećoj mjeri proširuju austenitno područje su kobalt, nikel i mangan. Slitine, čiji maseni udio iznosi više od 10 % nikla, nisu u potpunosti zakaljive zbog toga što pretvorbe austenita u ferit nisu potpune, time ne ispunjavaju jedan od zahtjeva zakaljivosti što se može vidjeti na slici 2. Isto tako, slitine koje imaju maseni udio nikla više od 60 %, na sobnoj temperaturi ili ispod nje ostaju austenitne te nemaju mogućnost zakaljivanja.



Slika 2. Dijagram stanja željezo-nikal [2]

Kao što je već prethodno navedeno, legirajući elementi koji proširuju feritno području su: volfram, krom, vanadij i molibden. Slika 3. prikazuje dijagram stanja željezo-krom te njegovom analizom moguće je zaključiti da transformacija iz austenita u ferit postoji samo u slitinama čiji maseni udio kroma je manji od 10 %, time je zadovoljen jedan od zahtjeva zakaljivosti.

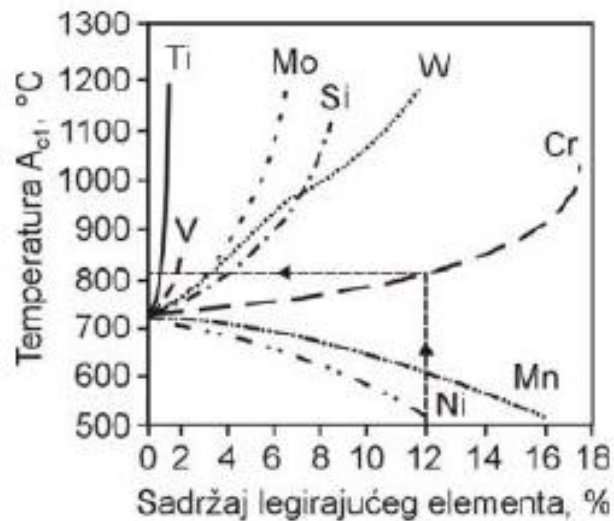


Slika 3. Dijagram stanja željezo-krom [2]

Bitno je naglasiti da kod oba dijagrama, koji su prikazani na slikama 2. i 3., nije uzet u obzir maseni udio ugljika, dok je ugljik jedan od glavnih čimbenika kada se radi o zakaljivosti. Ukoliko se uzme u obzir djelovanje ugljika, u tom slučaju binarni dijagram stanja željezo-legirajući element prelazi u ternarni dijagram stanja željezo-ugljik-legirajući element.

Na slici 4. prikazuje se utjecaj legirajućih elemenata na temperaturu transformacije  $A_{c1}$  i maksimalna zasićenost austenita s ugljikom. Legirajući elementi koji su karbidotvorci uzrokuju povišenje temperature  $A_{c1}$ , zato što su toplinski postojani.





Slika 4. Učinak masenih udjela legirajućih elemenata na temperaturu pretvorbe ferita u austenit [2]

### Ugljik (C)

S obzirom da ugljik nema mogućnost fazne transformacije, tako ni povećanje čvrstoće povećanjem masenog udjela ugljika neće doći do izražaja u austenitnim i feritno-austenitnim čelicima. Također se povećanjem masenog udjela ugljika smanjuje žilavost. Ugljik u čeliku omogućuje zakaljivost legiranih i nelegiranih čelika. Minimalna količina masenog udjela ugljika u čelika koja zadovoljava uvjet zakaljivosti nelegiranih čelika iznosi 0,35 %. Legirani čelici koji su jako prokaljivi imaju mogućnost zakaljivanja na većim dubinama, premda za ugljični čelik to predstavlja manje vrijednosti.

### Krom (Cr)

Jedan od najbitnijih legirajućih elemenata koji lako tvori karbide, koriste se pri izradi reznih alata te čelicima daje odličnu postojanost na koroziju. Maseni udio kroma u nehrđajućih čelika iznosi 10,5 % te naknadnim povećanjem masenog udjela kroma povećava se i postojanost na koroziju. Karbidi kroma povećavaju otpornost na habanje, a time se povećava izdržljivost i trajnost rezne oštrice alata. Također, krom poboljšava otpornost na oksidaciju čelika pri visokim temperaturama te povećava prokaljivost. Nedostatak čelika koji su legirani kromom je sklonost lomu te taj nedostatak je moguće ukloniti dodavanjem molibdena.

## **Aluminij (Al)**

Aluminij posjeduje jak afinitet prema kisiku i dušiku te ima dezoksidacijska svojstva u čeliku. Aluminij zbog svojih dezoksidacijskih svojstava omogućuje čeliku manju osjetljivost na starenje te pomaže u nastajanju sitnog zrna. Posjeduje sposobnost stvaranja nitrida što ga čini vrlo važnim legirajućim elementom. Također, tvori i intermetalne spojeve u reakciji s titanom i niklom. Iako smanjuje austenitno područje ne potpomaže povećanju mehaničkih svojstava.

## **Molibden (Mo)**

Svrha molibdena kao legirajućeg elementa jest povećanje prokaljivosti i čvrstoće čelika. Uglavnom se nalazi u kombinaciji s drugim legirajućim elementima u čeliku. Preventira pojavu popuštanja i visokotemperaturne krhkosti. Ima pogodan utjecaj na smanjenje zrna i otpornosti na habanje te pripada u skupinu karbidotvoraca. Ukoliko se koristi u kombinaciji Mo-Cr, služi za povećanje otpornosti čelika ka općoj i jamičastoj koroziji.

## **Bakar (Cu)**

Bakar nosi epitet štetnog legirajućeg elementa u čelika, zbog toga što uzrokuje crveni lom koji je opasan. Sadržaj bakra u čeliku se s godinama povećava zbog toga što teže oksidira od željeza pa se teško uklanja iz čelika pomoću klasičnih postupaka proizvodnje čelika. Bakar povećava  $\gamma$ -područje, no ograničena mu je topljivost u čeliku. U austenitnim čelicima (Cr-Ni-MO) povećava otpornost na koroziju prema fosfornoj i sumpornoj kiselini te se u nekim slučajevima dodaje i do 2 %. Negativna posljedica toga jeste smanjenje sposobnosti zavarivanja, što je uočljivo zbog pojavljivanja pukotina bilo to pri zavarivanju tankih limova s WIG postupkom ili pri višeslojnom zavarivanju debelih presjeka. Prilikom dodavanja bakra, korisno je ograničiti maseni udio ugljika na  $\leq 0,02$  % time se ostvaruje dobra sigurnost ka interkristalnoj koroziji.

## **Mangan (Mn)**

Pri proizvodnji čelika mangan uglavnom služi za dezoksidaciju i desulfurizaciju. Zbog svojeg afiniteta prema sumporu, tvori manganov sulfid te na taj način onemogućuje negativan učinak sulfida željeza na svojstva čelika. Mangan pospješuje prokaljivost čelika, dok kod nezakaljenih čelika povećava čvrstoću i žilavost. Kod konstrukcijskih čelika, granica razvlačenja

raste za nekih  $100 \text{ N/mm}^2$  pri povećanju udjela mangana svakih 1 %. Ako je maseni udio mangana u čeliku 12 % ili više, bez obzira o sadržaju ugljika, čelici poprimaju austenitnu strukturu.

### **Kobalt (Co)**

Onemogućuje rast zrna pri visokim temperaturama iako ne potiče stvaranje karbida. Dodaje se čelicima za rad na visokim temperaturama (alatni, brzorezni i konstrukcijski čelici) zbog postojanosti na popuštanje pri povišenim temperaturama. Negativna strana je stvaranje radioaktivnog izotopa Co-60 te se iz tog razloga ne upotrebljava pri proizvodnji čelika za potrebe nuklearnih elektrana.

### **Bor (B)**

Pospješuje precipitacijsko očvršnuće kod austenitnih čelika otpornih na koroziju na takav način da povećava granicu vlačne čvrstoće kao i granicu razvlačenja. Povećava prokaljivost ukoliko se nalazi u srednje ugljičnim i nisko ugljičnim čelicima, dok s druge strane, pruža manju otpornost prema koroziji te smanjuje zavarljivost.

### **Nikal (Ni)**

Ne tvori karbide te ima slabi afinitet ka ugljiku. Gamageni je element koji proširuje austenitno područje. Osim što povećava postojanost na koroziju povećava i žilavost konstrukcijskih čelika (uz min. 12 %Cr). Omogućuje tvorbu intermetalnih spojeva ( $\text{Ni}_3\text{Al}$  i  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ) kod precipitacijski očvršnutih čelika. S obzirom na svoju visoku cijenu, uvijek se legira u kombinaciji s drugim legirajućim elementima.

### **Titan (Ti)**

U smislu nastajanja ferita, titan djeluje zatvarajući  $\gamma$ -područje. Zbog svojeg visokog afiniteta prema kisiku, ugljiku, dušiku i sumporu djeluje dezoksidirajuće, denitrirajuće, tvoreći sulfide i karbide. Kombiniranjem titana s niobijem i tantalom, služi za stabilizaciju čelika koji su otporni na koroziju. Stvara intermetalne spojeve te na taj način pospješuje precipitacijsko očvršnuće. Pri proizvodnji ugljičnih čelika, uz minimalan dodatak titana pozitivno se utječe na smanjenje zrna, omjera ferit/perlit i snižava završnu temperaturu taljenja, što ima pozitivan utjecaj na čvrstoću.

### **Niobij (Nb) i tantal (Ta)**

Ova dva elementa, zbog svojih sličnih djelovanja, najčešće se koriste u kombinaciji jedan s drugim. Izuzetni su tvorci karbida, zbog čega se koriste za stabilizaciju čelika koji su otporni na kiseline. Također, niobij tvori nitride i karbonitride, što pospješuje tvorbi sitnog zrna te omogućava lakše precipitacijsko očvršćivanje. U nekim slučajevima dodaje se, kombinaciji ili ne s vanadijom, sitnozrnatim zavarljivim čelicima povećane čvrstoće i granice razvlačenja, odnosno HSLA ili ultra čvrsti čelici.

### **Vanadij (V)**

Prilikom procesa legiranja, dodatak vanadija pospješuje usitnjenje primarnog austenitnog zrna. Vanadij je jak tvorac karbida i nitrida. Ukoliko je maseni udio vanadija veći od 0,4 % stvaraju se stabilni karbidi VC i V<sub>4</sub>C<sub>3</sub> kojima se povećava otpornost na habanje. Zbog stvaranja karbida uglavnom se koristi pri proizvodnji čelika za rad na visokim temperaturama (alatni, brzorezni i konstrukcijski čelici).

### **Volfram (W)**

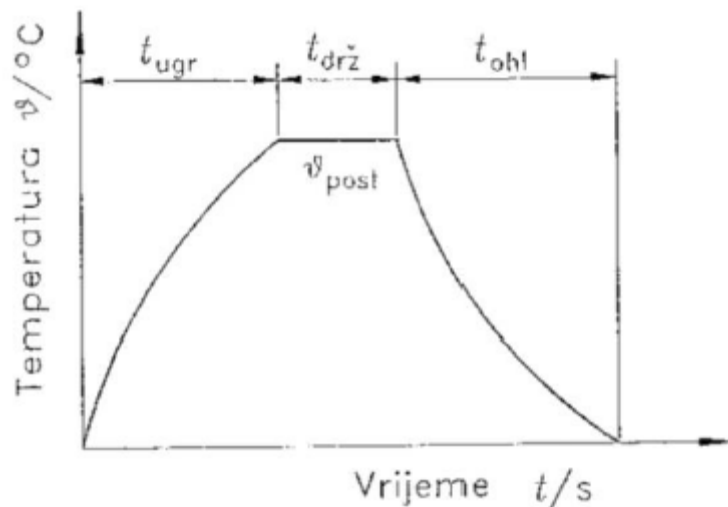
Još jedan tvorac karbida koji su vrlo otporni na habanje. Smanjuje rast zrna i povećava žilavost čelika. Neizostavan element pri proizvodnji brzoreznih alatnih čelika.

### 3. TOPLINSKA OBRADA ČELIKA

Pod pojmom toplinske obrade čelika podrazumijeva se proces zagrijavanja legure ili slitine do neke određene temperature koja je karakteristična za tražena svojstva slitine, držanje na određenim temperaturama određeni period, zatim se različitim brzinama ohlađivanja ostvaruju približno zahtjevana svojstva od slitine za konkretni strojni dio.

Pored toplinske obrade važno je naglasiti da se promjena svojstava slitina može postići i s različitim metodama poput legiranjem ili deformacijom, odnosno, suzbijanjem na visokim temperaturama ili deformacijom u hladnom stanju. Ponajprije, legiranjem dolazi do promjene sastava mikrokonstituenata strukture, utječe na veličinu zrna kao i pokretljivost mikronepravilnosti u strukturi. Dok deformacijom dolazi do promjene oblika kristalnog zrna, dispergiranosti i oblika uključaka te gustoće dislokacija. Na pokretljivost dislokacija utječe promjena gustoće dislokacije što ima za posljedicu mijenjanje mehaničkih svojstava slitine.

Prilikom procesa toplinske obrade dolazi do promjene temperature strojnog dijela, pri čemu se to može definirati primjenom dijagrama toplinske obrade koji je prikazan na slici 5.



Slika 5. Shematski prikaz dijagrama toplinske obrade [3]

Svaki dijagram toplinske obrade definiran je pomoću četiri osnovna parametra a to su:

$\vartheta_{\text{post}}$  - maksimalna temperatura ugrijavanja, odnosno, temperatura toplinske obrade,

$t_{\text{ugr}}$  - vrijeme ugrijavanja,

$t_{\text{drž}}$  - vrijeme trajanja žarenja, odnosno, držanja na maksimalnoj temperaturi,

$t_{\text{ohl}}$  - vrijeme (brzina) ohlađivanja, gašenje.

Dijagram toplinske obrade, koji se definira samo s pomoću četiri navedena parametra, u konačnosti se koristi samo kada bi ugrijavanje i gašenje bilo linearno. S obzirom da uglavnom nije riječ o linearnom ugrijavanju i hlađenju, u tom slučaju potrebno je odrediti promjenu temperature u vremenu za točnije definiranje krivulje ugrijavanja i gašenja.

Ukoliko su tijekom procesa toplinske obrade slitine spore promjene temperature, odnosno, držanjem na stalnim temperaturama, slitina se u tom slučaju približava stabilnom stanju. A ukoliko su nagle promjene temperature iliti naglo hlađenje, slitina se udaljava od stabilnog stanja. Tipovi toplinske obrade koje se mogu izdvojiti na osnovi strukturnih promjena su:

- 1) Žarenje bez kristalizacije (odžarivanje).
- 2) Žarenje s prekrizacijom.
- 3) Gašenje.
- 4) Ugrijavanje gašene strukture.
- 5) Toplinsko-kemijska obrada.

### **Žarenje bez kristalizacije**

Prilikom žarenja bez prekrizacije, slitina se zagrijava do ispod temperature prekrizacije, drugim riječima, ispod temperature pri kojoj se stvara bitna transformacija topivosti ili alotropska pretvorba. Ovakvom obradom, slitina se približava stabilnom stanju. Osnovne vrste navedenog žarenja su:

- rekristalizacijsko žarenje - promjena oblika kristalnog zrna,
- žarenje za smanjenje zaostalih naprežanja,
- stabilizacijsko žarenje - stabilizacija dimenzija izratka.

### **Žarenje s prekrizacijom**

Provodi se na način da se slitina zagrijava iznad temperature pri kojoj se stvara bitna promjena topivosti ili alotropska pretvorba. Potrebno je naglasiti da se hlađenjem slitina ne smije značajno udaljiti od stabilnog stanja. Također se i ovom obradom slitina približava stabilnom stanju. Osnovni tipovi žarenja s prekrizacijom su:

- normalizacijsko žarenje - ujednačavanje veličine i oblika kristalnih zrna te ujednačavanje raspodjele mikrokonstituenata,
- homogenizacijsko žarenje - izjednačavanje raspodjele elemenata u strukturi.

## **Gašenje**

Gašenje je naglo ohlađivanje slitine s temperature veće od temperature pretvorbi, te se na taj način sprječava ravnotežna pretvorba u procesu hlađenja. Ovakvom obradom slitina se udaljava od stabilnog stanja. Dvije su vrste gašenja:

- kaljenje - transformacija visokotemperaturne strukture u novu neuravnoteženu strukturu,
- fiksiranje visokotemperaturne strukture.

## **Ugrijavanje gašene strukture**

Nakon naglog ohlađivanja, odnosno gašenja, zagrijavanjem naglo ohlađene strukture ostvaruje se stabilnije stanje. Dvije vrste ugrijavanja gašene strukture su:

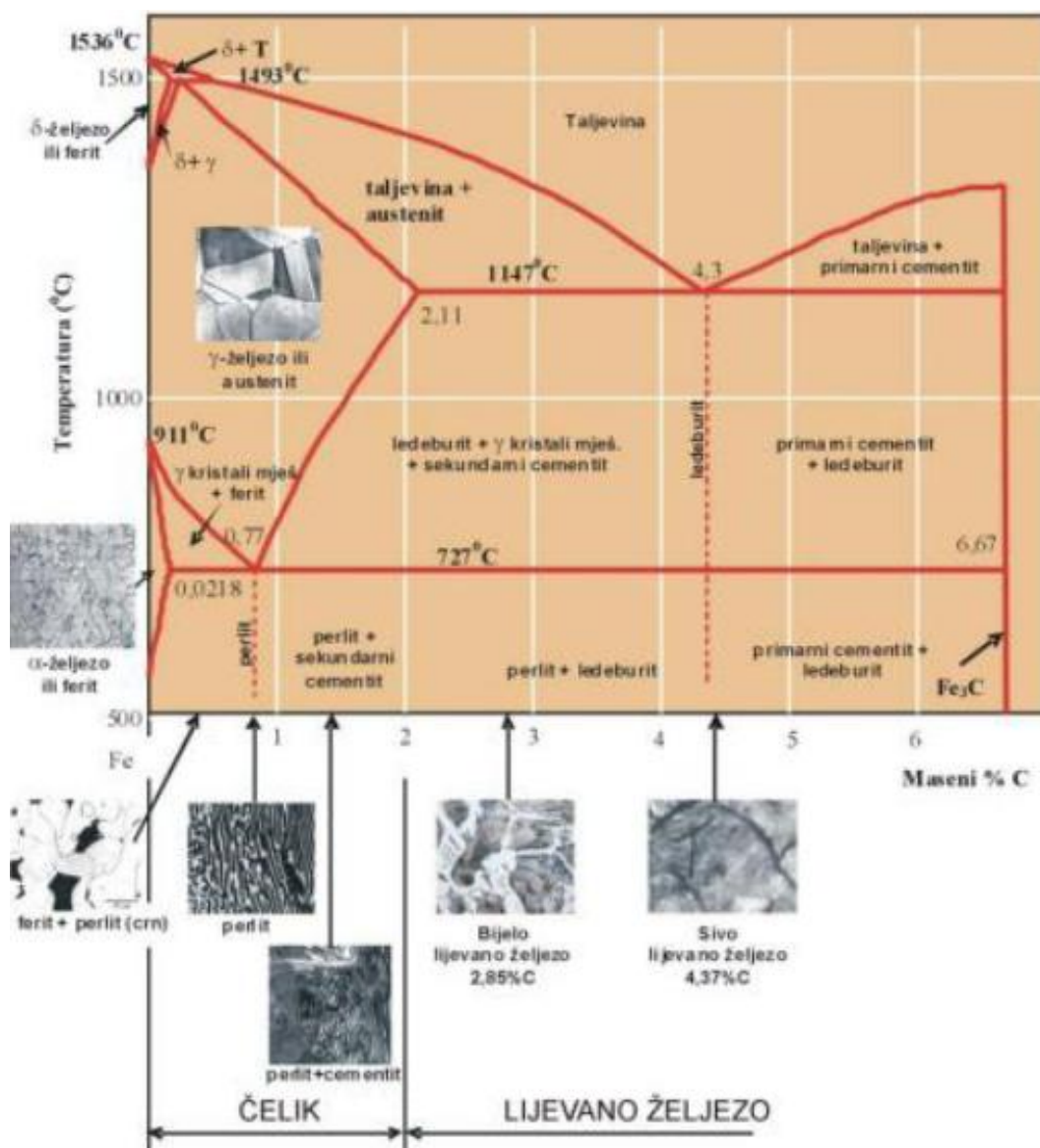
- popuštanje zakaljene strukture - potpuni ili djelomični raspad zakaljene strukture,
- precipitacijsko žarenje (starenje) - odvajanje izlučevina iz pothlađene prezasićene visokotemperaturne faze.

## **Toplinsko-kemijska obrada**

Sastoji se od zagrijavanja slitine u sredinama s povišenim potencijalom difundirajućih elemenata. Ovakvom obradom slitina se približava stabilnom stanju. Toplinsko-kemijska obrada uzrokuje promjenu kemijskog sastava površinskog sloja izratka.

## 4. FAZNE PRETVORBE PRI TOPLINSKOJ OBRADI ČELIKA

Na slici 6. prikazan je dijagram stanja Fe-C te je jedan od najbitnijih dijagrama u tehničkoj praksi toplinske obrade koji se sastoji od eutektičnog i eutektoidnog područja. Stabilna kristalizacija, čistih Fe-C legura, postiže se jedino ukoliko bi ohlađivanje bilo beskonačno sporo. Željeznu rešetku ispunjavaju atomi ugljika te ovisno o temperaturi i sastavu formiraju intersticijske kristal mješance ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ) ili kristale grafita. Mikrostrukture koje se pojavljuju u obliku konstituenata su: perlit, ferit, ledeburit, cementit, austenit, martenzit te bainit.



Slika 6. Dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C [1]



Opis konstituenata mikrostrukture:

### **Austenit**

Kruta otopina ugljika i legirajućih elemenata u  $\gamma$ -željezu. Maksimalna topivost ugljika u austenitu pri temperaturi oko 1147 °C iznosi 2,06 %. Pri sobnoj temperaturi je nestabilan, međutim u odgovarajućim uvjetima postoji mogućnost postizanja istog. Tvrdoća austenita iznosi od 170 do 220 HB te je izuzetno žilav. Ima najmanji specifični volumen u usporedbi s drugim mikrostrukturnim fazama. Austenit se označava s  $\gamma$ -Fe.

### **$\delta$ -ferit**

Kruta otopina ugljika koja se nalazi u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci. Pri temperaturi od 1456 °C topivost ugljika, u  $\delta$ -feritu, iznosi maksimalnih 0,09 %. Nema svojstvo magnetičnosti te se tvori odmah poslije svršetka skrućivanja. Skraćeno se označava ( $\delta$ +Fe).

### **$\alpha$ -ferit**

Nalazi se u centriranoj kubičnoj rešetci te je kruta otopina ugljika. Na temperaturi od 723 °C topivost ugljika iznosi 0,025 % u  $\alpha$ -feritu, dok pri sobnoj temperaturi topivost iznosi 0,008 %. Prikazuje najmekšu fazu Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagrama stanja, dok mu tvrdoća iznosi aproksimativno 60 HB. Skraćeni zapis ( $\alpha$ -Fe).

### **Cementit**

Opisuje se kao metastabilni intersticijski spoj koji sadrži maseni udio ugljika 6,67 %. Željezni je karbid koji pozitivno odražava rast tvrdoće čelika. Poprilično je krhak, a tvrdoća iznosi oko 800 HV.

### **Perlit**

Mješavina ferita i cementita s masenim udjelom ugljika približno 0,8 %. Tvori se prilikom laganog hlađenja pri temperaturi od 723 °C. Ima lamelarnu strukturu koja je načinjena od cementita u obliku karbida i feritne matrice (osnova bijele boje). Veći dio ovakve mješavine čini matrica.

## **Ledeburit**

Eutektička smjesa cementita i austenita s masenim udjelom ugljika oko 4,3 % te nastaje na temperaturi od 1147 °C.

## **Bainit**

Nastaje pri hlađenju čelika među kritičnim brzinama hlađenja (donje i gornje). Bainit je struktura koja se sastoji od ferita i cementita, ali je drukčija od strukture perlita. Mala brzina difuzije pri nižim temperaturama atoma uzrokuje nemogućnost pomicanja atoma ugljika na velike udaljenosti kako bi došlo do tvorbe lamela cementita. Ovim načinom se stvaraju samo lamele ferita te na njihovim granicama dolazi do izlučivanja cementita u vidu sitnih i okruglih čestica umjesto lamelarnih pločica.

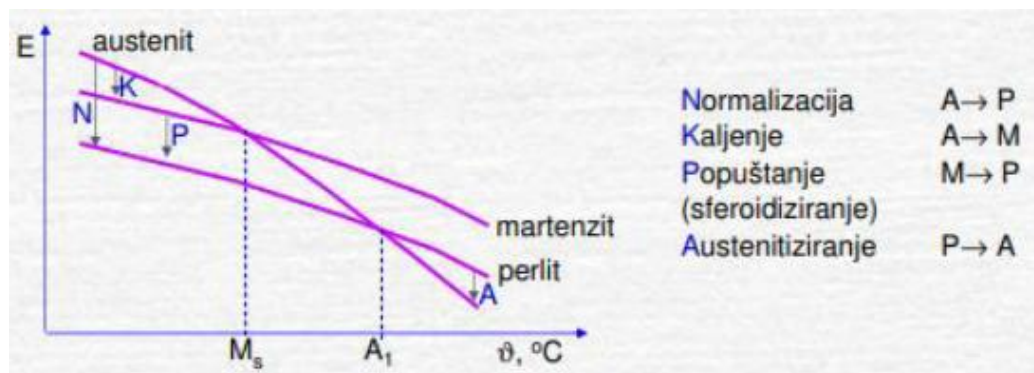
## **Martenzit**

Prezasićena i kruta otopina ugljika. Nalazi se u volumno centriranoj tetragonalnoj rešetci. Martenzit nastaje pri ohlađivanju austenita donjom kritičnom brzinom na prethodno određenu, nisku temperaturu. Mikrostruktura je sastavljena od kristala koji imaju igličasti oblik te se presijecaju pod različitim kutovima. Pretvorba se odvija bez prisustva difuzije što u pravilu znači da ovisi o temperaturi a ne o vremenu (atermička reakcija). Tvrdoća iznosi oko 728 HB te je nestabilan i krhak. Odgovoran je za visoku tvrdoću čelika nakon kaljenja. U usporedbi s austenitom, martenzit ima najveći specifični volumen.

Pretvorba austenita pri različitim brzinama hlađenja označava najbitnije reakcije promatrajući čelik. Ukoliko se hlađenje odvija u peći (vrlo sporo hlađenje), tada se mogu procijeniti nastale mikrostrukture iz faznog dijagrama. Ukoliko se hlađenje odvija većom brzinom, u tom slučaju Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram stanja nije mjerodavan za opaske o faznim pretvorbama i novonastalim mikrostrukturama.

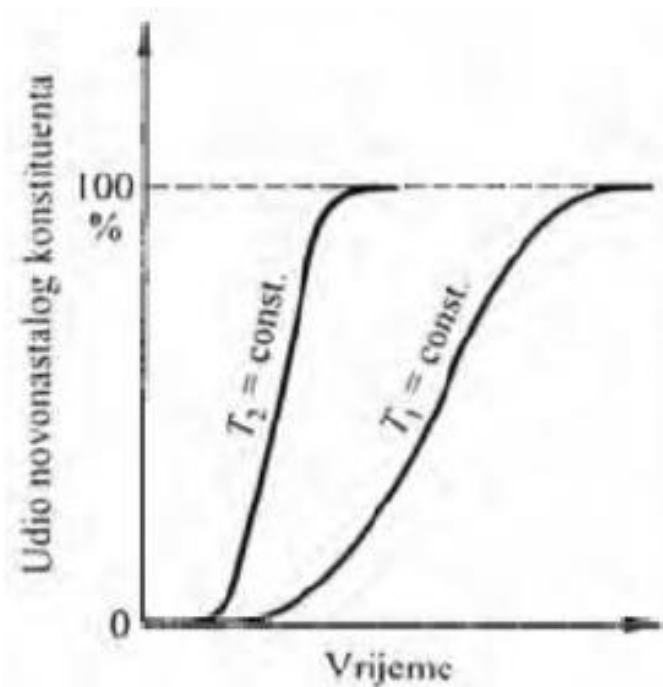
Fazne pretvorbe kod fazno promjenjivih slitina u čvrstom stanju nastaju zbog svoje prirodne težnje takvog stanja ka razini niže slobodne energije što se može vidjeti na slici 7. Fazne pretvorbe koje se odvijaju, uslijed različitih temperatura, unutar predstavnika faznih promjenjivih slitina (eutektoidnom čeliku) su:  $A \rightarrow P$  (žarenje odnosno normalizacija),  $A \rightarrow M$  (kaljenje odnosno

bezdifuzijska pretvorba),  $M \rightarrow P$  (niskotemperaturno popuštanje),  $M \rightarrow A$  (austenitizacija martenzita),  $P \rightarrow A$  (austenitizacija perlita).

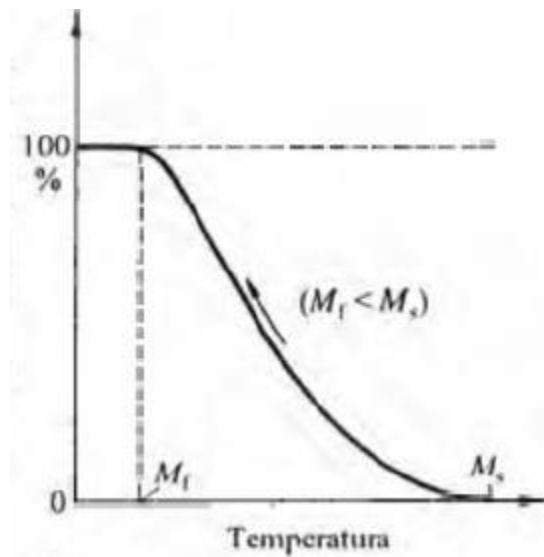


Slika 7. Fazne pretvorbe eutektoidnog čelika [14]

Intenzitet faznih pretvorbi zavisi od temperature, pri čemu se prikazuje kinetičkim krivuljama, odnosno pomoću ovisnosti udjela novonastale faze o vremenu i danoj izotermi za difuzijske pretvorbe prikazano na slici 8., tj. ovisno o temperaturi za bezdifuzijske pretvorbe, što je prikazano na slici 9.

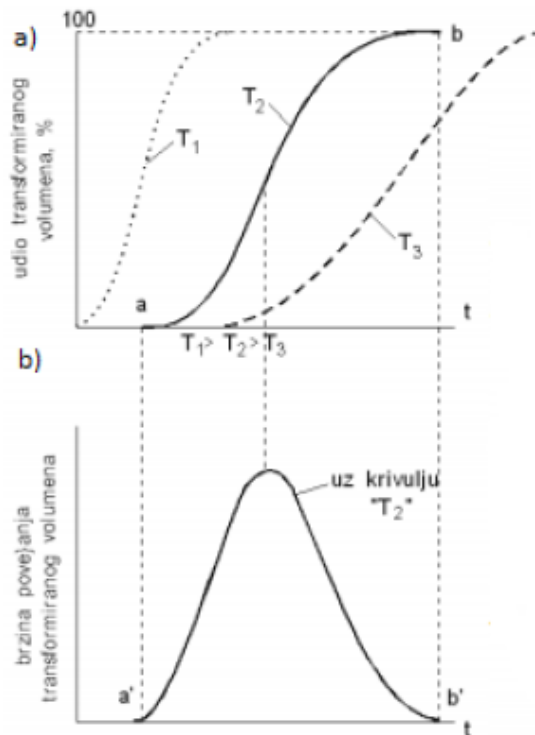


Slika 8. Kinetička krivulja difuzijskih pretvorbi [4]



Slika 9. Kinetička krivulja bezdifuzijskih pretvorbi [4]

Kinematike transformacije prilikom ugrijavanja prikazane su na slici 10. Točka „a“ prikazuje usporeno realiziranje pretvorbe (broj klica je mali -  $N$ ), a točka „b“ prikazuje usporeno realiziranje pretvorbe prilikom suzbijanja novonastalih zrna s već postojećim susjednim zrnima. Oblik kinetičke energije razlikuje se u ovisnosti o temperaturi.



Slika 10. a) Dijagram kinetike transformacije; b) Promjena brzine transformacije prilikom ugrijavanja [4]

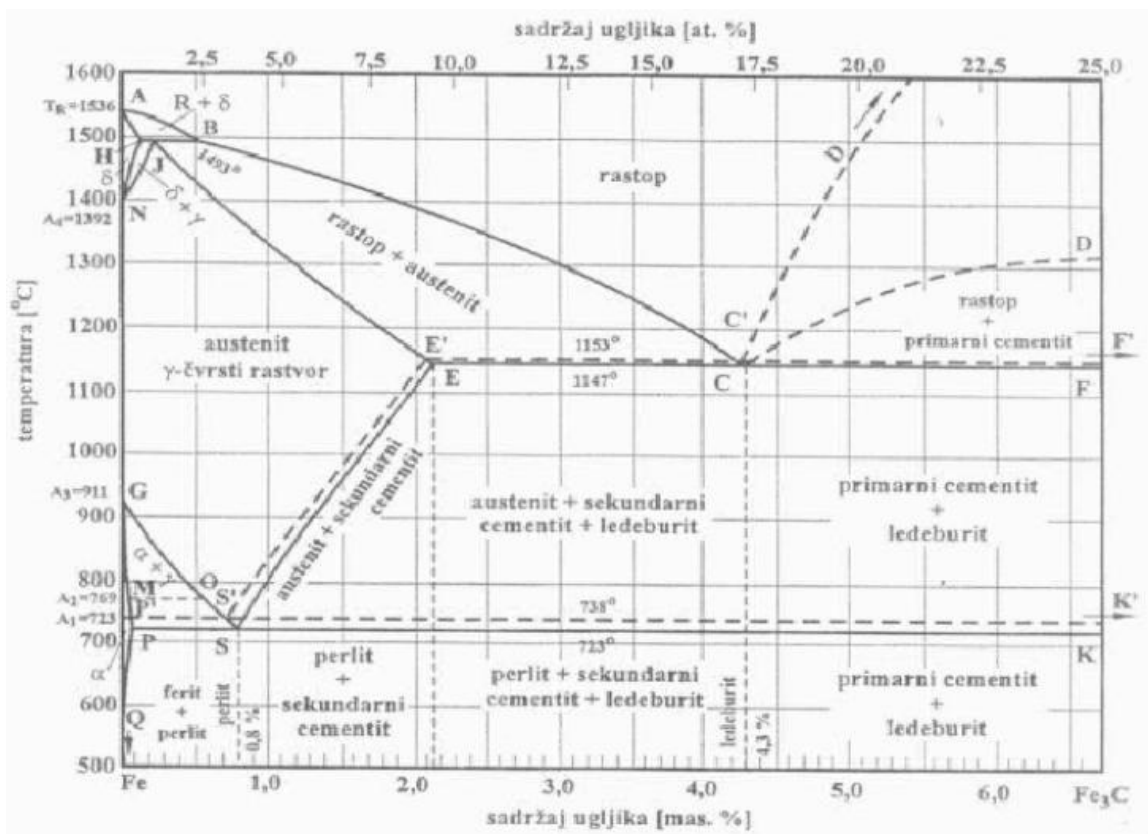
Elementarne razlike pri kinetici pretvorbe su:

- intenzitet difuzije raste s ugrijavanjem,
- intenzitet difuzije se smanjuje s ohlađivanjem, odnosno, dolazi do pojave preklopnih pretvorbi.

#### 4.1. Tvorba austenita uslijed ugrijavanja

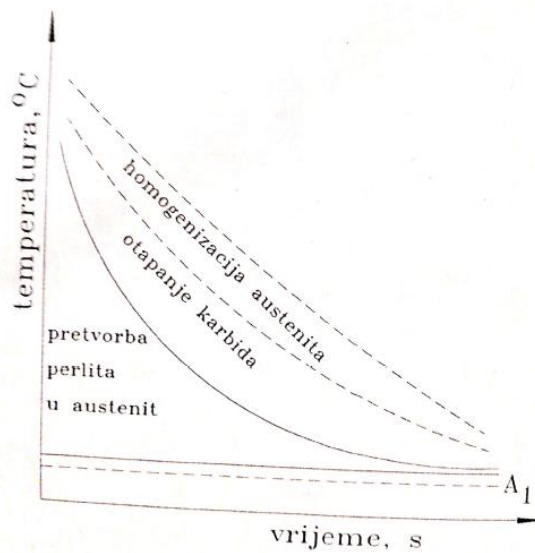
Prilikom pretvorbe austenita, dvije faze različitih sastava mehanizmom difuzije prelaze u treću fazu, što je vidljivo na slici 11. Austenit nastaje iz pretvorbe feritno-karbidne smjese kad se ostvare termodinamički i kinetički uvjeti uslijed povišenja temperature, drugim riječima, nastaje u tom trenutku kada je slobodna energija austenita značajno manja od slobodne energije feritno-karbidne smjese te ima toliko vremena da se mehanizmom difuzije stvori austenit. Tvorba austenita najlakša je na granici cementitine i feritne faze. Po tim granicama se najlakše javljaju mjesta gdje pri određenoj temperaturi i kemijskom sastavu, u području kritične veličine, slobodna energija austenita je minimalna. Ponajprije, daljnji rast austenitne faze uzorkovan je difuzijom ugljika u austenitu (novonastala faza).

Po granicama austenita s karbidnom fazom nalazi se maksimalna koncentracija ugljika u austenitu  $C_{\max}$ , dok se minimalna koncentracija ugljika  $C_{\min}$ , nalazi na granici s feritnom fazom. Na dijagramu stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C (slika 11.) krivulja SE odgovara maksimalnoj koncentraciji ugljika u austenitu  $C_{\max}$ , dok krivulja GS odgovara minimalnoj koncentraciji ugljika u austenitu  $C_{\min}$ .



Slika 11. Dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C s maksimalnom i minimalnom koncentracijom ugljika u austenitu [4]

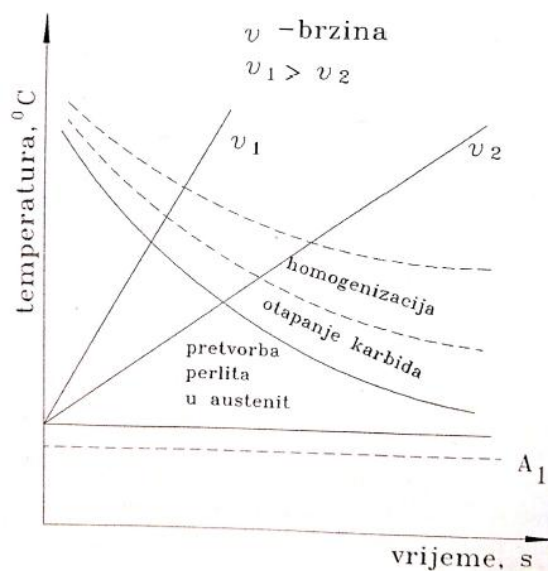
Unutar novonastale faza, eksperimentalno je ustanovljeno da je brzina austenitne pretvorbe ovisna o brzini difuzije. Premda je brzina ohlađivanja čelika vrlo važan proces u toplinskoj obradi, potrebno je poznavati, u nekim procesima, i brzinu pretvorbe austenita. Povećanjem temperature, preko ravnotežne temperature, povećava se difuzija atoma te razlika slobodnih energija stabilne i trenutne strukture. Svako takvo povećanje temperature iznad ravnotežne temperature uzrokuje ubrzavanje procesa austenitne pretvorbe, što je prikazano na dijagramu izotermičke tvorbe austenita (slika 12.)



Slika 12. Izotermička pretvorba austenita [3]

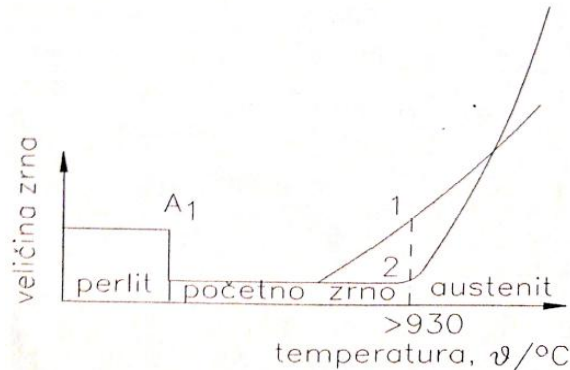
Na dijagramu koji je prikazan slikom 12. uočljivo je da se povećanjem temperature smanjuje potrebno trajanje pretvorbe austenita. Homogeni austenit sastoji se od: austenitne pretvorbe, otapanja karbida te homogenizacije austenita.

Dijagram tvorbe austenita u kontroliranim uvjetima ugrijavanja prakazan je na slici 13. Iz dijagrama (slika 13.) je vidljivo da uslijed povećanja brzine ugrijavanja dolazi brže do većih temperatura i time se smanjuje vrijeme pretvorbe. Također je vidljivo da se uslijed većih brzina ugrijavanja, temperature pretvorbe pomiču ka višim temperaturama. Posebice to se odnosi na temperaturu  $A_{c3}$ .



Slika 13. Pretvorba austenita u kontinuiranim uvjetima ugrijavanja [3]

Držanje čelika na povišenim temperaturama uzrokuje rast kristalnog zrna austenita što se može vidjeti na slici 14. To je spontani proces koji je popraćen smanjenjem slobodne energije. Postoje dvije vrste čelika prema sklonosti rastu austenitnog zrna, a to su po porijeklu: sitnozrnati i krupnozrnati čelici.



Slika 14. Rast austenitnog zrna u ovisnosti u temperaturi [3]

Na osnovi veličine austenitnog zrna, po završetku osmosatnog zagrijavanja na temperaturi od 930 °C, dobiva se ocjena nasljednosti zrna. Veličina austenitnog zrna temelji se na prijelomu ili metalografskom analizom prema ASTM. Veličinu kristalnog zrna, prema ASTM-u, moguće je odrediti prema broju veličine kristalnog zrna  $N$ , koji je u relaciji s brojem kristalnih zrna po jednom kvadratnom inču uslijed povećanja od 100:1 ( $n$ ), prema izrazu (4.1):

$$N = 2^{n-1} \quad (4.1)$$

Pri čemu je:

$N$  broj veličine kristalnog zrna,

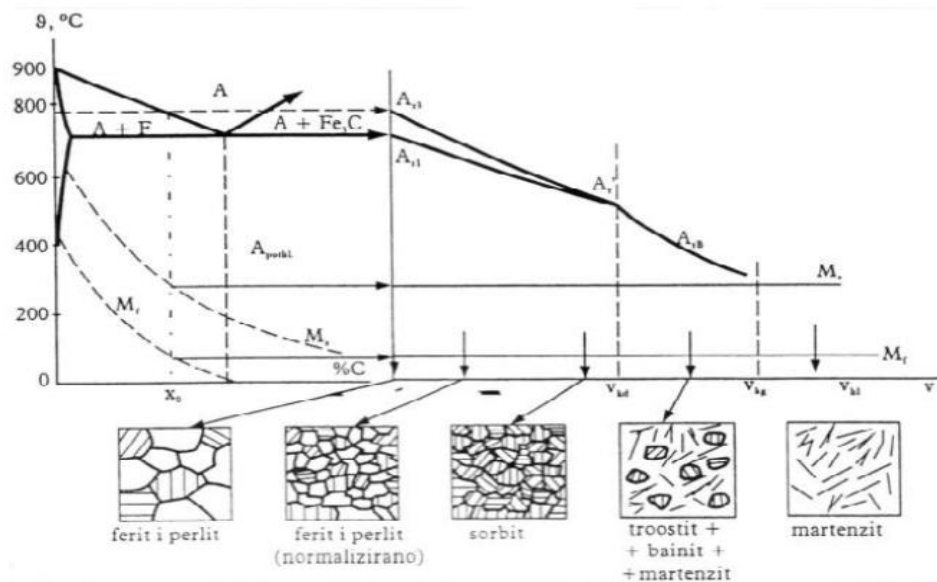
$n$  broj kristalnih zrna po jednom kvadratnom inču uslijed povećanja od 100:1

U trenutku kada dođe do prestanka djelovanja prepreka koje su onemogućavale rast zrna započinje nagli rast austenitnog zrna. Sitnozrnati austenit je osnova kod dobivanja fine strukture čelika pri sobnoj temperaturi. U pravilu, finija struktura čelika pruža bolja mehanička svojstva.



## 4.2. Pretvorbe pothlađenog austenita

Budući da snižavanje temperature uzrokuje snižavanje pokretljivosti željeznih, ugljičnih kao i, u nekim slučajevima, legirajućih atoma (slika 15.). Stoga se, nakon pretvorbe, strukture razlikuju po obliku, rasporedu i veličinu što rezultira različita svojstva.



Slika 15. Utjecaj brzine ohlađivanja austenita na temperaturu pretvorbe [14]

Na slici 15. prikazuje se utjecaj brzine ohlađivanja ( $v_{ohl}$ ) austenita na temperaturu transformacije  $\gamma \rightarrow \alpha$  podutektoidnog nelegiranog čelika. Perlit, sorbit i troostit su pravi strukturni oblici željezno-karbidnih eutektoida te je za njihovo stvaranje mjerodavna difuzija atoma ugljika i željeza. Pod nepravi strukturni oblik eutektoida ubraja se bainit te pri njegovu nastanku ograničena je difuzija atoma ugljika te je u cijelosti ograničena difuzija atoma željeza. Za razliku od navedenih strukturnih oblika, martenzit nastaje preklopnim mehanizmom, točnije rečeno, potpunim izostankom difuzije atoma ugljika i željeza.

## 4.3. Perlitna pretvorba (A $\rightarrow$ P)

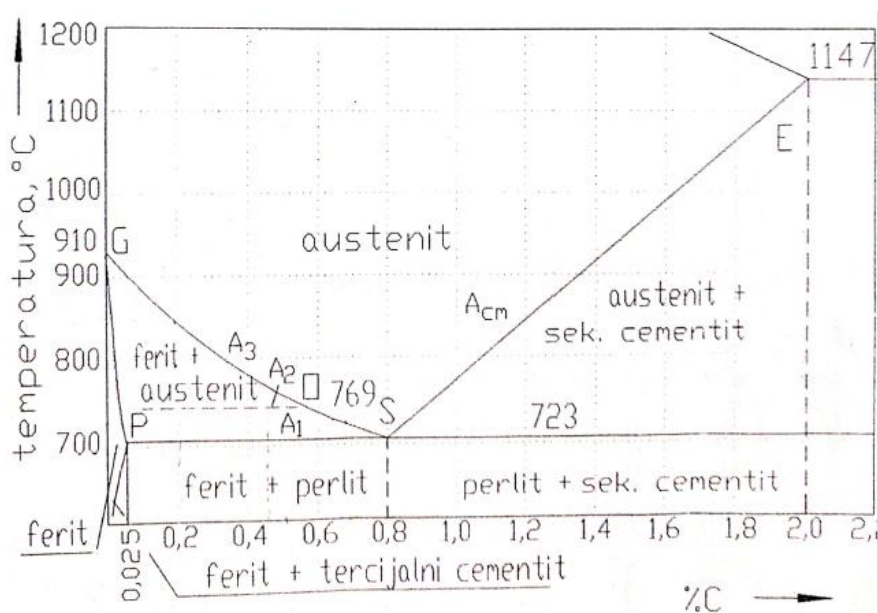
Pretvorbu austenita u perlit karakterizira difuzija i stvaranje klica. Veće pothlađivanje uzrokuje jednoličan raspored ugljika u željezu, u tom slučaju, lamele cementita su duže dok je razmak među njima manji što je vidljivo u tablici 2.

Tablica 2. Karakteristike strukturnih oblika perlita [14]

Naziv oblika	Pothlađenje $\Delta T$ , K	Širina $Fe_3C$ lamela, $\mu m$	Razmak $Fe_3C$ lamela, $\mu m$	Tvrdoća HV
Perlit	Do 50	= 0,4	0,6 - 0,7	= 200
Sorbit	= 150	0,25 - 0,35	= 0,25	250 - 300
Troostit	= 220	0,1 - 0,2	= 0,1	= 400

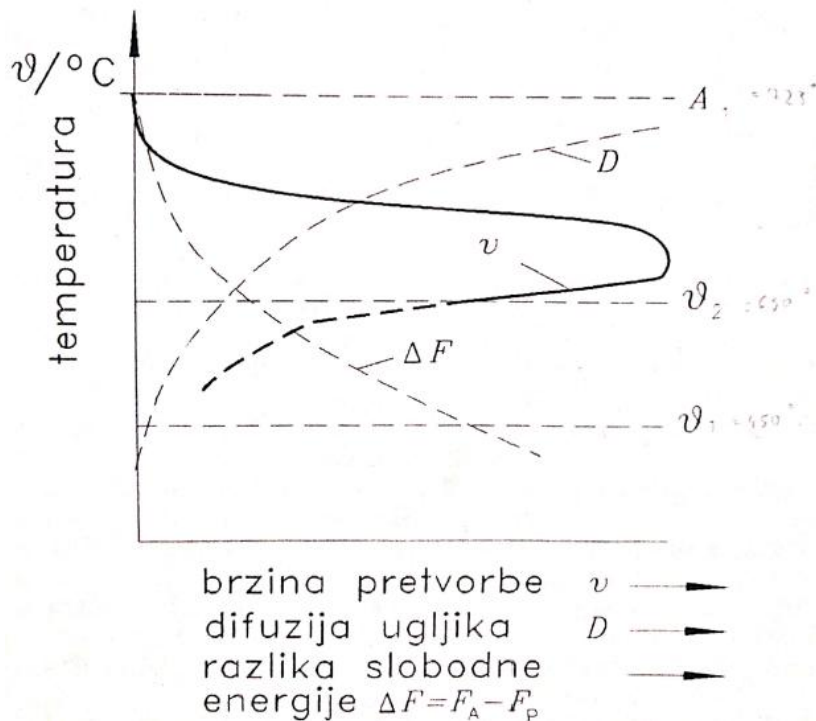
Na slici 16. prikazan je dio dijagrama stanja Fe- $Fe_3C$  na kojem se može vidjeti temperatura  $A_1$  ( $A_3$  ili  $A_{cm}$ ) ispod koje austenit postaje nestabilan te teži raspadu na niskotemperaturne faze. Prilikom pretvorbe perlita, austenit se rasipa na dvije nove faze, a to su: ferit i cementit (karbid željeza). Ferit sadrži vrlo mali maseni udio ugljika (<0,0025 %), dok cementiti sadrži oko 6,67 %C. Uslijed potpune difuzije nemetalnih i metalnih atoma (potpuna difuzija atoma ugljika i atoma željeza u nelegiranom čeliku) nastaje perlit. Stoga moraju biti zadovoljena dva uvjeta za perlitnu pretvorbu, a to su:

1. Dovoljna energetska nestabilnost te dovoljna razlika između slobodnih energija početnog austenita i konačnog perlita ( $\Delta F = F_A - F_P$ ).
2. Dovoljna difuzija atoma.



Slika 16. Dio dijagrama Fe- $Fe_3C$  [3]

Ovisnost brzine pretvorbe perlita o temperaturi nelegiranog čelika eutektoidnog sadržaja ugljika shematski je prikazano na slici 17.

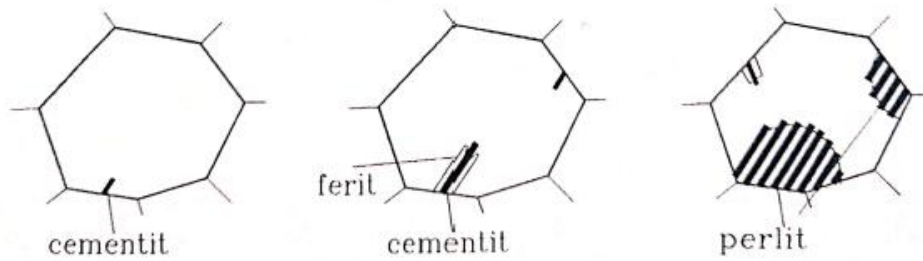


Slika 17. Ovisnost brzine perlitne pretvorbe o temperaturi [3]

Iz dijagrama prikazanog na slici 17. pri temperaturi  $A_1$ , razlika slobodnih energija austenita i perlita iznosi nula. Ukoliko se nalazi ispod  $\vartheta_1$  (približno oko 200 °C), u tom slučaju nema potrebne difuzije za raspad austenita, odnosno, difuzija atoma željeza prestaje na višim temperaturama oko 450 °C. Zbog toga je difuzijski raspad austenita moguć samo ispod temperature  $A_1$  i iznad  $\vartheta_1$ . Smanjenjem temperature ispod  $A_1$ , odnosno, povećanjem pothlađivanja raste razlika slobodnih energija što uzrokuje smanjenje difuzije. Pri povećanju pothlađenja brzina perlitne pretvorbe raste te pri određenom pothlađenju ostvaruje svoj maksimum, nakon čega se smanjuje.

Bezdifuzijska pretvorba moguća je samo ispod  $\vartheta_1$ . Područje između  $\vartheta_1$  i  $\vartheta_2$  kod većine čelika perlitna pretvorba prepušta mjesto novoj pretvorbi, tj. pretvorbi u međustupanj, za koju postoje povoljniji uvjeti na tim temperaturama.

Između  $A_1$  i  $\vartheta_2$ , perlitna pretvorba započinje pojavom klica cementita po granicama austenitnih zrna što je vidljivo na slici 18.



Slika 18. Pojava klica cementita uslijed perlitne pretvorbe [3]

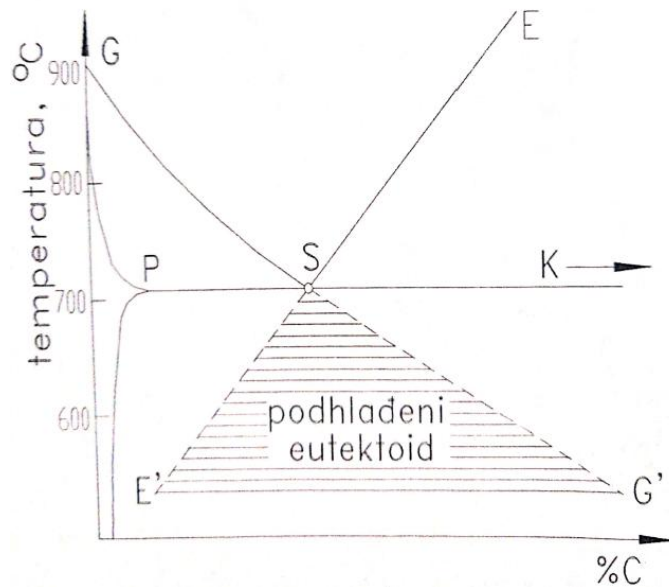
Rast klica usmjeren je ka unutarnjim slojevima austenitnih zrna. Okolina cementita se osiromašuje ugljikom te se pretvara u ferit sukladno slici 18. S obzirom na malu topivost ugljika u feritu, ugljik, koji se još uvijek nalazio u feritu izlučuje u susjedna područja austenita pri čemu postaju prezasićena ugljikom i pretvaraju se u cementit. Na taj način se perlit podjednako povećava u tri dimenzije. Međusobni razmak lamela ovisi o difuziji ugljika u austenitu.

Povećanje pothlađenja uzrokuje:

- povećanje razlika slobodnih elektrona,
- povećanje broja potencijalnih klica novih faza
- smanjenje difuzije ugljika u austenitu (veće pothlađenje daje finiju strukturu nakon pretvorbe)

Uslijed ubrzanog hlađenja, temperatura  $A_3$  i  $A_{cm}$  pothlađuju se više od  $A_1$ . Raspadom pothlađenog austenita smanjuje se količina ferita u podeutektoidnom čeliku, dok se u nadeutektoidnom čeliku smanjuje količina sekundarnog cementita.

Uslijed pothlađivanja austenita, pri koncentracijama različitim od eutektoidne koncentracije za ravnotežne uvjete pretvorbe može nastati eutektoidni raspad, odnosno, pojava kvazieutektoidnog intervala prikazno na slici 19. Granice eutektoidnog raspada označene su linijama E'-S i G'-S.



Slika 19. Eutektoidni sastav u ovisnosti o pothlađenju [3]

Brzina perlitne pretvorbe ovisi o:

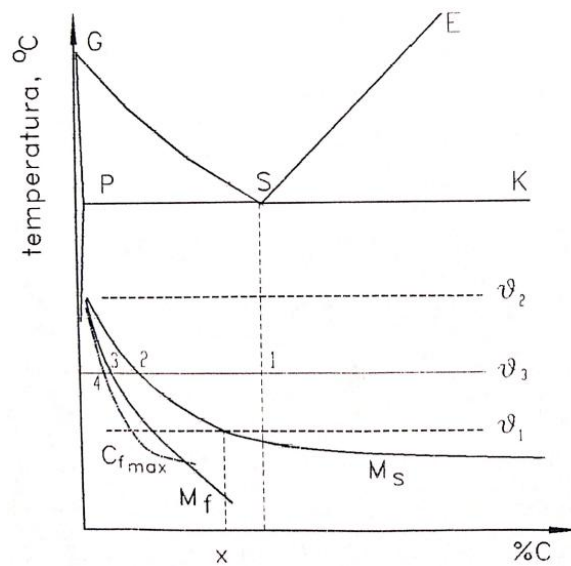
- stabilnosti austenita,
- brzini nastanka novih faza i,
- brzini rasta novih faza.

Brzina perlitne pretvorbe na određenoj temperaturi ovisi o:

- kemijskom sadržaju austenita,
- veličini austenitnog zrna,
- homogenosti austenita,
- sadržaju neotopljenih čestica (karbida).

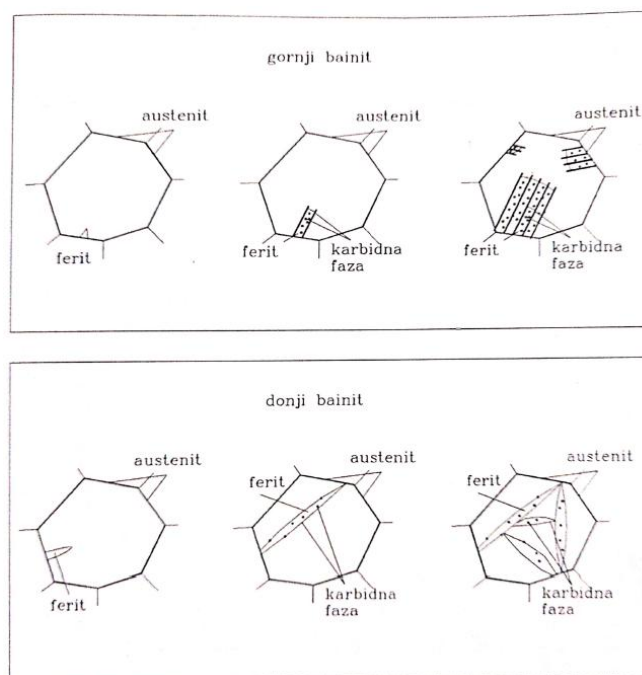
#### 4.4. Baitna pretvorba (A → B)

Bait je fino dispergirana mješavina karbida i prezasićenog ferita. Između temperatura  $\vartheta_1$  i  $\vartheta_2$  koje su prikazane shemom na slici 20. određeno je temperaturno područje baitne pretvorbe koje se proteže između perlitne i martenzitne pretvorbe. Sukladno tome, bait se još naziva i međustupanj.



Slika 20. Shema bainitne pretvorbe [3]

Bainitna pretvorba odvija se u dva dijela. Jednim dijelom odvija se bezdifuzijskim, a dijelom difuzijskim mehanizmom. Primjerice, pothlađivanjem eutektoidnog čelika do temperature  $\vartheta_3$ , difuzijskom preraspodjelom ugljika u nestabilnom austenitu stvaraju se područja s visokom i niskom koncentracijom ugljika. Ukoliko se ugljik smanjuje u osiromašenom dijelu austenita ispod koncentracije 2, tj. koncentracije 3, ostvaruju se uvjeti za pretvorbu martenzitne pločice bezdifuzijskim, koordiniranim pomakom atoma, što je vidljivo na slici 20. Shematski prikaz tvorbe bainita prikazan je slikom 21.



Slika 21. Shema bainitne pretvorbe [3]

Zbog znatno veće difuzije ugljika u  $\alpha$ -rešetki od difuzije u  $\gamma$ -rešetki dolazi do izdvajanja ugljika i stvaranja čestica karbida u prezasićenom feritu. Koncentracija ugljika u feritu opada sve do metastabilne koncentracije  $C_{fmax}$ , odnosno maksimalne topivosti ugljika u feritu dobivenog pomoću bezdifuzijske pretvorbe austenita u martenzit.

Rast feritne faze može se djelomično ostvariti difuzijom ugljika u susjedni austenit. Po granicama austenita i ferita formira se sloj koji je bogat ugljikom, pogodan za tvorbu pločica karbida pri čemu se prekida rast pločice ferita. Pomoću difuzija ugljika iz ferita i ugljika iz susjednih slojeva austenita raste pločica karbida. Slojevi austenita koji su u susjedstvu karbidne pločice postaju mjesta za inicijaciju formiranja nove feritne faze te se cijeli proces bainitne pretvorbe ponavlja.

Promjena temperature pretvorbe ne utječe na mehanizam bainitne pretvorbe. Naime, uslijed povišenih temperatura difuzijski procesi intenziviraju, dok pri nižim temperaturama intenzivniji su bezdifuzijski procesi. Strukture gornjeg i donjeg bainita međusobno se razlikuju, te su prikazane na slici 21.

Pri bainitnoj pretvorbi kod čelika s niskim udjelom ugljika prevladavaju procesi formiranja feritne faze, dok kod čelika s većim udjelom ugljika izraženiji su procesi izdvajanja karbidne faze. Kod čelika s izrazito niskim udjelom ugljika izlučuje se probainitni ferit, dok kod čelika s visokim udjelom ugljika formira se probainitni cementit.

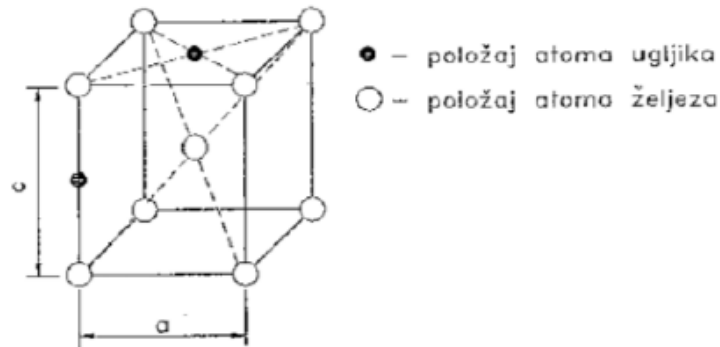
Dva uvjeta za bainitnu pretvorbu koja moraju biti zadovoljena su:

1. Dovoljno pothlađivanje osiromašenog austenita za smičnu pretvorbu u martenzit.
2. Dovoljna difuzija ugljika.

S obzirom da navedeni uvjeti nisu uvijek u potpunosti ispunjeni, bainitna pretvorba se može odgoditi, te osim bainita, u strukturi se može pojaviti i zaostali austenit koji je nepoželjan. Primjerice, pothlađivanjem čelika iznad temperature  $M_s$  a ispod temperature  $\mathcal{G}_1$  (slika 5.15.) austenit u potpunosti ostaje sačuvan.

#### 4.5. Martenzitna pretvorba (A → M)

Martenzit predstavlja krutu otopinu ugljika u  $\alpha$ -čeliku s masenim udjelom ugljika od 2,03 %C. Udio ugljika u martenzitu jednak je udjelu ugljika u prethodnom austenitu. Martenzit ima tetragonalnu kristalnu rešetku za razliku od ferita koji ima kubnu rešetku (slika 22.)



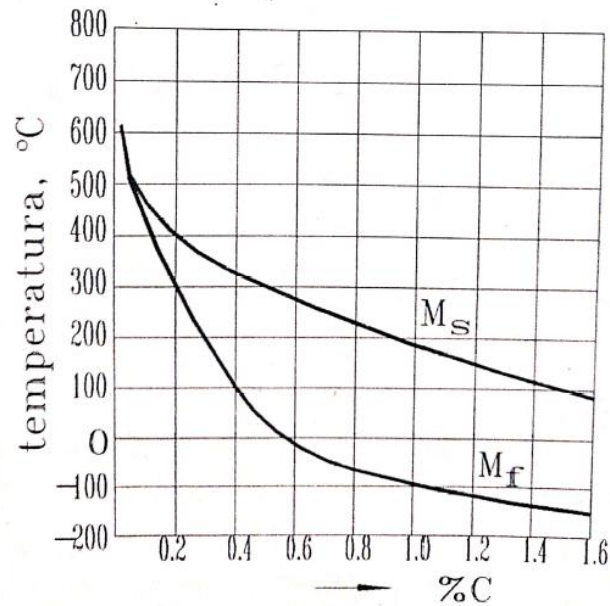
Slika 22. Tetragonalna kristalna rešetka martenzita [4]

Sukladno slici 22. u martenzitnoj rešetki prikazana su moguća mjesta ugljika. Broj atoma ugljika u stvarnosti je puno manji. Primjerice, to bi značilo sljedeće: pri 2 %C u martenzitu dolazi jedan atom ugljika na četiri elementarne kristalne rešetke.

Slobodna energija martenzita uvijek je veća od slobodne energije karbida i ferita, stoga, nemoguće je dobiti martenzit iz tih faza. Zagrijavanjem čelika do austenitnog područja te naglim gašenjem austenita nastaje martenzitna struktura. Dakle, ukoliko se želi postići martenzitna struktura, neizbježan je proces austenitizacije. Takav proces se još naziva i kaljenje.

Martenzitna pretvorba okarakterizirana je trenutnom promjenom rešetke. U usporedbi s ostalim strukturnim pretvorbama, najveća je brzina rasta kristala martenzita koja iznosi oko 5000 m/s. Na temperaturi  $M_s$ , prikazana na slici 23., započinje pretvorba austenita u martenzit, a završava na temperaturi  $M_f$ . S obzirom da temperature  $M_s$  i  $M_f$  nisu ovisne o brzini hlađenja, stoga se martenzitna pretvorba ne može pothladiti. Navedene temperature ovisne su o masenom udjelu ugljika i legirajućih elemenata. Utjecaj masenog udjela ugljika u austenitu na temperature martenzitne pretvorbe prikazano je na slici 23.





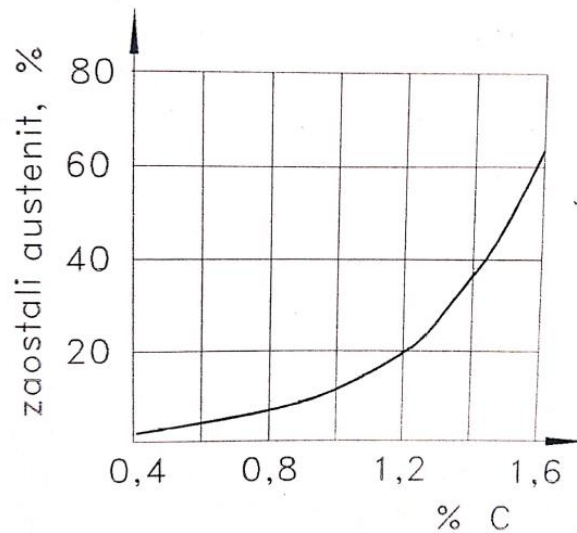
Slika 23. Utjecaj masenog udjela ugljika na temperature martenzitne pretvorbe [3]

Legirajući elementi, na temperaturu martenzitne pretvorbe, utječu samo ukoliko su otopljeni u austenitu. Legirajući elementi poput mangana, kroma, nikla, molibdena i vanadija snižavaju temperaturu martenzitne pretvorbe te povećavaju količinu zaostalog austenita. Legirajući elementi poput kobalta i aluminijsa povećavaju temperature martenzitne pretvorbe kao i količinu zaostalog austenita poslije kaljenja.

Struktura martenzita je igličasta, što je vidljivo na slici 24. Kristal martenzit ima oblik iglice (pločice). Nije poželjna velika količina zaostalog martenzita u mikrostrukturi martenzita, posebice ako je izdvojen kao zasebna faza. Veća koncentracija ugljika u primarnom austenitu uzrokuje veću količinu zaostalog austenita u mikrostrukturi nakon martenzitne transformacije (slika 25.).

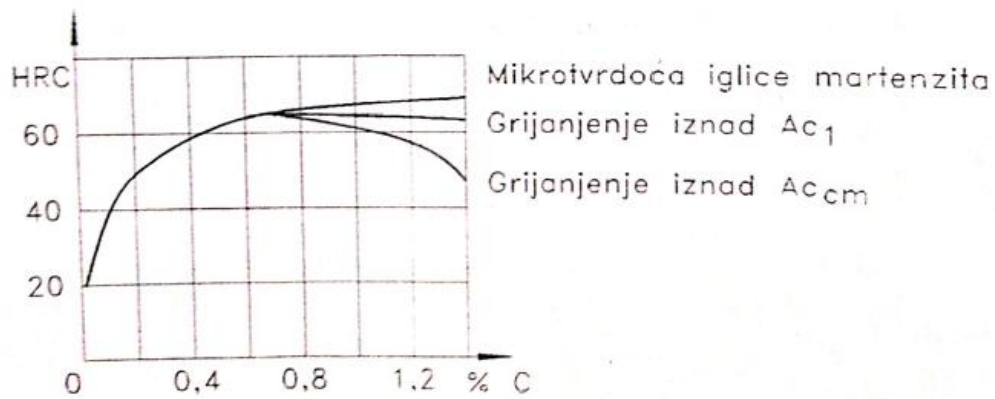


Slika 24. Igličasta mikrostruktura martenzita [3]



Slika 25. Ovisnost količine zaostalog austenita u martenzitnoj mikrostrukturi o masenom udjelu ugljika u primarnom austenitu [3]

Tvrdoća martenzita, prije svega, ovisi o masenom udjelu ugljika što je vidljivo na 26. Povećanje masenog udjela ugljika utječe na povećanje tvrdoća ali i smanjenje žilavosti. Visok maseni udio ugljika čini martenzit izrazito tvrdim i krhkim.



Slika 26. Ovisnost tvrdoće martenzita o masenom udjelu ugljika [3]

## 5. PROKALJIVOST I ZAKALJIVOST

100 %-tna martenzitna struktura se rijetko pokušava dobiti po cjelokupnom poprečnom presjeku uzorka. Iako se kao donja granica prihvaća 50 %-tna martenzitna struktura koja je dovoljno visoke tvrdoće, uobičajeno je da zahtjeve za tvrdoćom, i sastavom strukture postavlja konstruktor.

Maseni udio ugljika u čeliku i sastav mikrostrukture imaju enormni utjecaj na tvrdoću čelika. Dok maseni udio ugljika ima izravan utjecaj na tvrdoću.

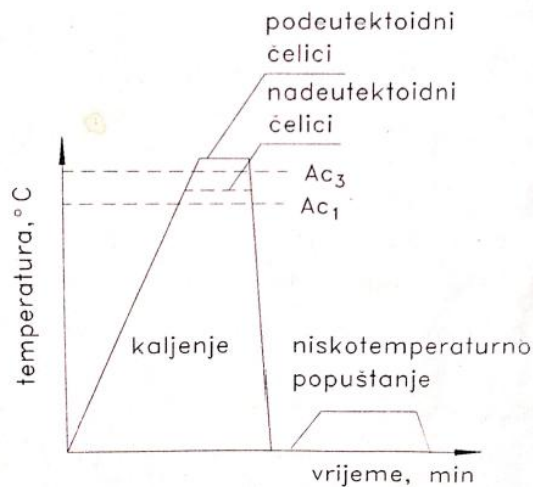
Prilikom gašenja, uzorak se gasi različitim brzinama promatrajuć od površine ka jezgri što rezultira različitim svojstvima po slojevima pri čemu dobivene mikrostrukture odgovaraju određenim brzinama ohlađivanja.

Definicija kaljivosti nije precizno definirana normama. Prema Europskoj normi definira se kao sposobnost pretvorbe austenita u martenzit. Ukoliko je pojam kaljivosti rastavi na zakaljivost i prokaljivost može se dobiti mnogo preciznija definicija. Pored ostalih, o ta dva svojstva ovisi mikrostruktura kaljenog uzorka.

Usporedbom kaljenja dva slična čelika, pri jednakim uvjetima, dobiva se iduća opaska. Uzorak izrađen od čelika koji ima veću prokaljivost u dubljim slojevima će se lakše formirati martenzit i s većim masenim udjelom od čelika manje prokaljivosti. Navedeni izraz govori da čelik bolje zakaljivosti ima tvrdu površinu.

### 5.1. Kaljenje čelika

Kaljenje je postupak toplinske obrade kojom se postiže tvrda, uglavnom martenzitna struktura. Proces kaljenja izvodi se na sljedeći način: zagrijavanje uzorka do temperature austenitizacije, progrijavanje, držanje na temperaturi austenitizacije neko vrijeme te gašenje uzorka u mediju s propisanim brzinama pri čemu nastaje željena tvrdoća. Nakon procesa kaljenja, u uzorku ostaju mnogobrojna zaostala naprezanja koja se otklanjaju niskotemperaturnim popuštanjem kao što se može vidjeti na slici 21.



Slika 27. Dijagram kaljenja te niskotemperaturnog popuštanja [3]

Temperatura austenitizacije podeutektoidnih čelika je viša za 30 do 70 °C od temperature  $A_{c3}$ . S obzirom da je tvrdoća cementita oko 850 HV, za nadeutektoidne čelike temperatura austenitizacije je viša za 30 do 70 °C od  $A_{c1}$ . Tijekom procesa progrijavanja, odnosno držanja na temperaturi austenitizacije, temperatura površine i jezgre uzorka se izjednačuje te dolazi do otapanja neotopljenih karbida.

Kojom brzinom će uzorak biti ugrijan zavisi o stanju čelika, geometriji i dimenziji strojnog dijela kao i o legirnom sastavu čelika. Odabir brzine ugrijavanja treba biti takav da se ne izazovu pukotine ili pak prevelike deformacije i naprezanja u materijalu. Brzina i sredstvo za gašenje se određuje na temelju provedene analize prokaljivanja čelika i njegovih dimenzija.

Vezano uz dinamiku sređivanja strukture te relaksacije naprezanja pri procesu popuštanja, vrijeme držanja uzorka na maksimalnoj temperaturi popuštanja ovisi o temperaturi popuštanja, primjerice: ukoliko je temperatura popuštanja od 180 do 220 °C, vrijeme držanja uzorka iznosi od 1,5 do 2 h, dok na temperaturi od 100 do 120 °C vrijeme držanja uzorka iznosi od 10 do 15 h.

Kaljenje se temelji na:

- sposobnosti da rešetka  $\gamma$ -željeza otopi udjele ugljika koji su veći od rešetke  $\alpha$ -željeza te na taj način nastane austenit (u teoriji 2,03 %C na 1147 °C),
- sposobnosti držanju ugljika u čvrstoj otopini do temperatura koje su znatno niže od temperature  $A_1$  (pothlađivanje austenita), odnosno, temperature pretvorbe u martenzit  $M_s$ .

U čeliku martenzit nastaje ponajprije iz austenitne faze. Maseni udio ugljika kao i raspored ugljika otopljenog u austenitu te veličina austenitnog zrna osjetno utječu na veličinu zrna, a samim time i na svojstva martenzita, odnosno, tvrdoću, čvrstoću i žilavost. Austenitizacija je difuzijski proces te se odvija iznad temperature  $A_1$ . Važno je pripaziti da uslijed zagrijavanja čelika na temperaturi austenitizacije, vrijeme držanja ne bude predugo te da temperatura ne bude previsoka.

Dobivanje austenita se zahtjeva od svake toplinske obrade. Austenitizacija se može opisati kao homogeni austenit koji se dobiva ugrijavanjem čelika do neke određene temperature.

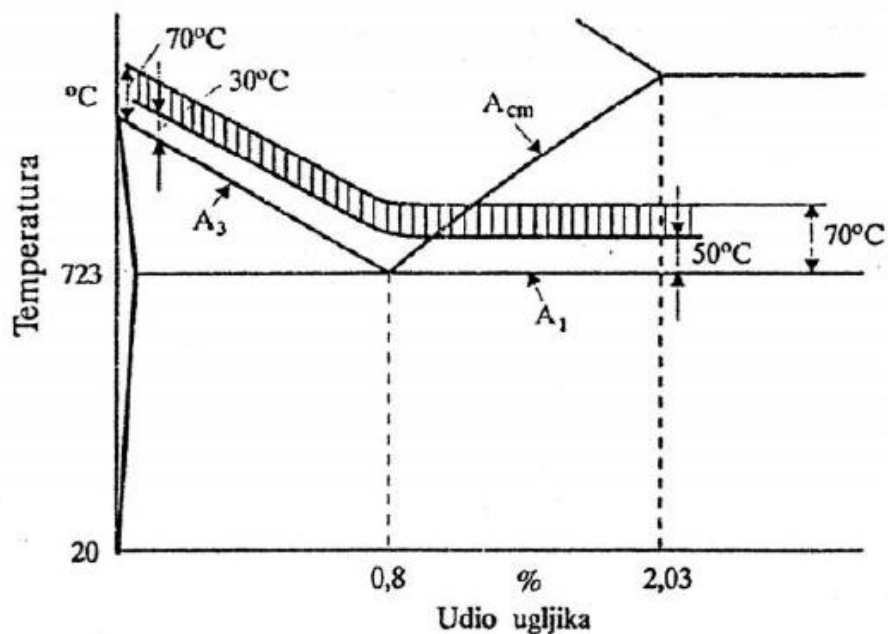
Optimalne temperature za austenitizaciju podeutektoidnih i nadeutektoidnih čelika (slika 28.) izračunavaju se prema sljedećim izrazima izrazima 5.1. i 5.2. :

- podeutektoidni čelici (%C < 0,8)

$$\vartheta_a = A_3 + (30 \dots 70 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (5.1.)$$

- nadeutektoidni čelici (0,8 < %C < 2,03)

$$\vartheta_a = A_1 + (50 \dots 70 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (5.2.)$$

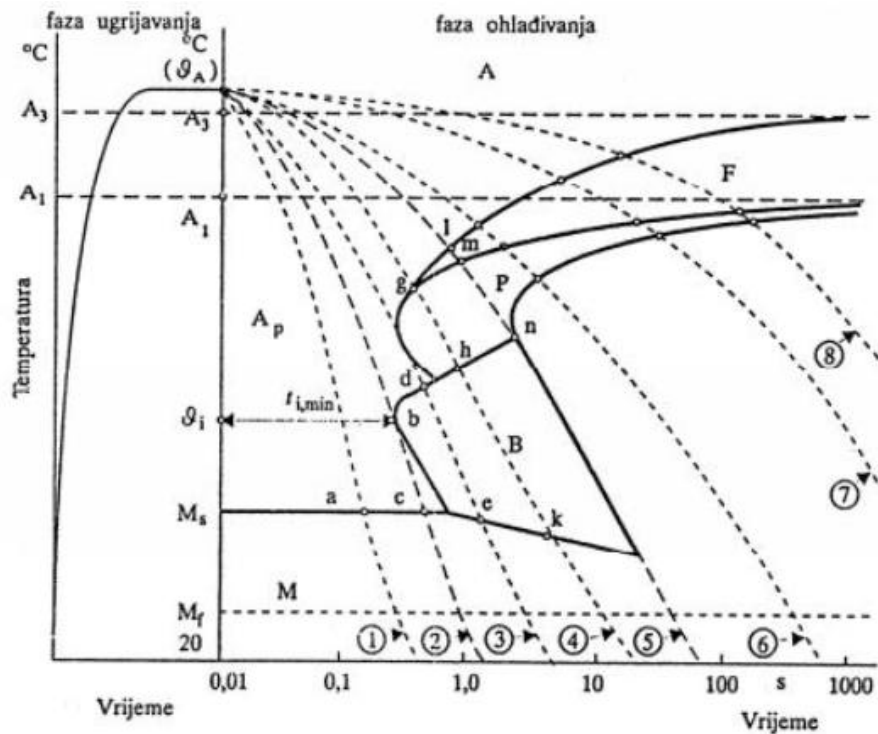


Slika 28. Dijagram optimalnih temperaturnih područja austenitizacije [2]

Temeljem navedenih činjenica, postavljaju se osnovni uvjeti:

- mikrostrukturna transformacija ferita u austenit i obrnuto (ukoliko čelik ne posjeduje navedenu transformacije nije ih moguće zakaliti, to su primjerice, visokolegirani feritni čelik ili austenitni nehrđajući čelik)
- minimalni maseni udio ugljika u čeliku treba iznositi 0,35% kako bi dovoljan broj kristalnih rešetki  $\gamma$ -željeza otopio atom ugljika
- čelik se mora ugrijavati do optimalne temperature austenitizacije, odnosno, austenitnog područja
- brzina ohlađivanja ugrijanog čelika s temperature austenitizacija mora biti dovoljno brza kako bi se onemogućila difuzija ugljikovih atoma iz austenitne rešetke te ostvarilo prisilno zadržavanje atoma ugljika u novonastaloj martenzitnoj rešetki.

TTT dijagram kontinuiranog ohlađivanja s različitim krivuljama pothlađivanja za neki podeutektoidni čelik prikazan je na slici 29. Na dijagramu su prikazane krivulje ohlađivanja iz područja monofaznog austenita do sobne temperature.



Slika 29. TTT dijagram nekog podeutektoidnog čelika [2]

Navedene krivulje ohlađivanja označene su brojevima od 1 do 8 i stvaraju sljedeće promjene:

- Krivulja 1 - predstavlja najintenzivnije hlađenje ugrijanog čelika na temperaturi austenitizacije  $\vartheta_a$ . U točki „a“ započinje pretvorba pothlađenog austenita  $A_p$  u martenzit M. Temperatura  $M_f$  označava kraj navedene pretvorbe. Mikrostruktura čelika nakon gašenja se sastoji od 100 %-tnog martenzita te ima najveću moguću tvrdoću. Ovakvo gašenje još se naziva i nadkrično gašenje.
- Krivulja 2 - pretvorba pothlađenog austenita  $A_p$  u martenzit M započinje u točki „c“ gašenjem s temperature austenitizacije  $\vartheta_a$ . Također i ova pretvorba završava na temperaturi  $M_f$ . Novonastala mikrostruktura i tvrdoća podjednaka je kao i kod krivulje 1. Ova krivulja služi za izračun gornje kritične brzine gašenja te predstavlja gornju kritičnu krivulju. Gornja kritična brzina gašenja definira se kao najmanja brzina ohlađivanja koja omogućuje 100 %-tnu pretvorbu austenita u martenzit.
- Krivulja 3 - Gašenjem ugrijanog čelika s temperature austenitizacije  $\vartheta_a$  u točki „d“ započinje pretvorba pothlađenog austenita  $A_p$  u bainit B. Pretvorba se odvija do točke „e“ pri čemu se pothlađeni austenit  $A_p$  još uvijek pretvara u martenzit M. Temperatura  $M_f$  označava kraj pretvorbe. Ovakvim kaljenjem ne može se postići 100 %-tna bainitna mikrostruktura te se zbog toga rijetko primjenjuje.
- Krivulja 4 - Gašenjem ugrijanog čelika s temperature  $\vartheta_a$ , u točki „g“ počinje pretvorba pothlađenog austenita  $A_p$  u perlit P. Trajanje pretvorbe odvija se sve do točke „h“ u kojoj se još ostali pothlađeni austenit  $A_p$  počinje pretvarati u bainit B. U konačnici, preostali pothlađeni austenit  $A_p$  započinje pretvorbu u martenzit M u točki „k“ te završava na temperaturi  $M_f$ .
- Krivulja 5 - Gašenjem ugrijanog čelika s temperature  $\vartheta_a$ , u točki „l“ počinje izlučivanje primarnog ferita F iz pothlađenog austenita  $A_p$  koje traje sve do točke „m“ te se iz preostalog pothlađenog austenita  $A_p$  započinje stvarati perlit P sve do točke „n“. Sva pothlađena masa austenita se pretvara u ferit i perlit (F+P) te zbog toga nema više nastanka martenzita. Ova krivulja predstavlja donju kritičnu brzinu gašenja te omogućuje izračun donje kritične brzine gašenja  $v_{kd}$ .
- Krivulje 6, 7, 8 - Mikrostrukture koje nastaju gašenjem s temperature austenitizacije po ovim krivuljama imaju smjesu ferita i perlita (F+P) te predstavljaju podkrične krivulje ohlađivanja.

## 5.2. Zakaljivost

Pojam zakaljivosti definira se kao svojstvo čelika da uslijed kaljenja postigne tvrdu i martenzitnu mikrostrukturu po površini uzorka. Nakon kaljenja tvrdoća ovisi o masenom udjelu martenzita, što je u izravnom odnosu s masenim udjelom ugljika prije početka postupka. Veći maseni udio ugljika (više od 0,35 %C) rezultira većom zakaljivosti. Ona količina ugljika koja ostane zarobljena u karbidima, ne otapa se te ne utječe na zakaljivost ali ima za posljedicu smanjenje prokaljivosti. Iz navedenog može se zaključiti da tvrdoća, potpuno zakaljenog čelika, ovisi o masenom udjelu ugljika koji se na temperaturi austenitizacije otapa u primarni austenit te ovisi i o intenzitetu gašenja.

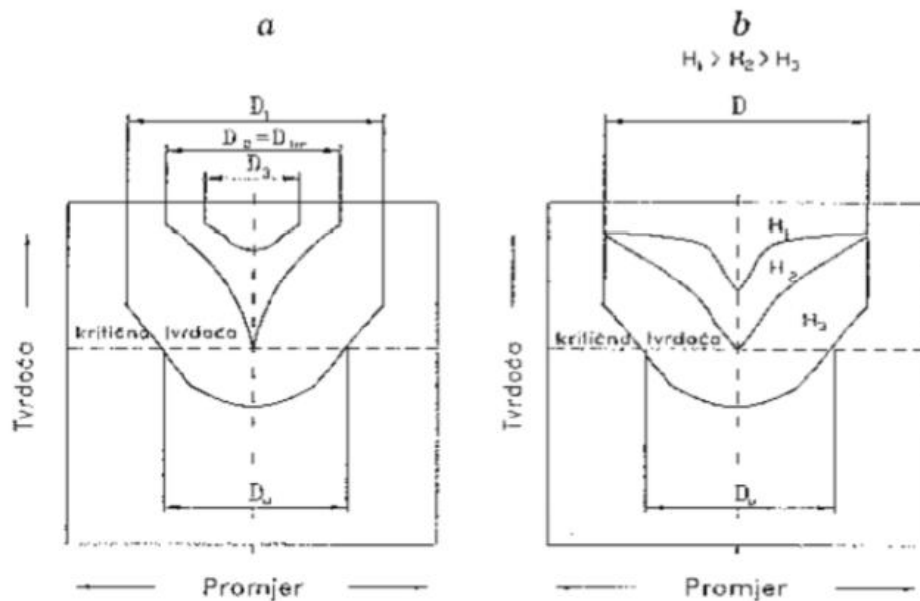
Oznaka  $R$  predstavlja stupanj zakaljenosti te se njome označava mjera zakaljivosti čelika. U idealnom slučaju tvrdoća bi bila jednolična u svakoj točki presjeka, čime bi stupanj zakaljenosti iznosio  $R = 1$ . Stupanj zakaljenosti  $R$  definira se kao omjer stvarne tvrdoće gašenja i najveće tvrdoće koja se može postići kaljenjem za neki određeni maseni udio ugljika u čeliku koji je izražen u postotcima.

## 5.3. Prokaljivost

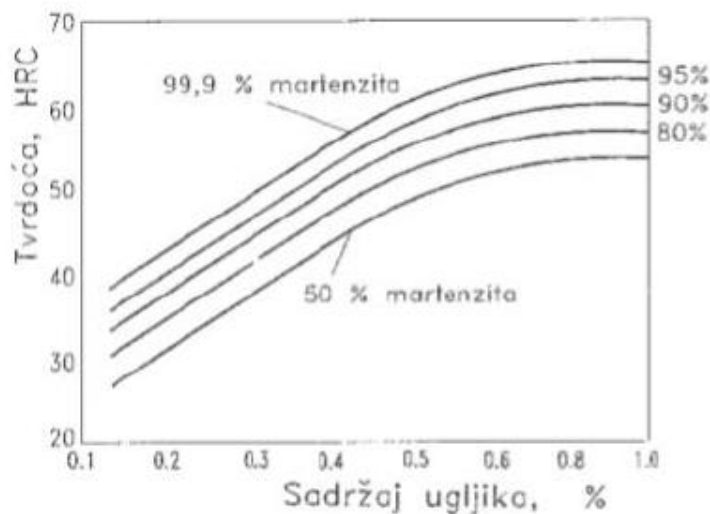
U ovisnosti o prokaljivosti, sredstvu za gašenje te dimenzijama dobiva se raspodjela tvrdoće po presjeku zakaljenih dijelova. Shematski prikaz raspodjele tvrdoće po presjeku dijelova valjkastog oblika, različitih promjera zakaljenih u istom mediju za gašenje prikazan je na slici 30.

Kritična tvrdoća, koja je vidljiva na slici 30.a, predstavlja minimalnu tvrdoću prokaljenog sloja. Uzimajući u obzir maseni udio ugljika u čeliku, 50 %-tni maseni udio martenzita u mikrostrukturi odgovara kritičnoj tvrdoći. Na slici 31. prikazan je Burnsov dijagram pomoću kojeg se približno točno procijeni kritična tvrdoća. Kritični promjer jeste onaj promjer koji bi se u cijelosti prokalio u nekom mediju za gašenje. Sa slike 30.a, obradak promjera  $D_1$  nije dovoljno prokaljen, dok je obradak promjera  $D_3$  bespotrebno gašen prevelikom brzinom.





Slika 30. Shematski prikaz raspodjele tvrdoće po presjeku nakon gašenja [4]



Slika 31. Burnsov dijagram [4]

Kao što je već spomenuto, potrebno je uzeti u obzir i sredstvo u kojem će se obradak gasiti. Grossmann je uveo veličinu koja se naziva „intenzitet gašenja“  $H$  ili  $I$ . Navedena veličina predstavlja sposobnost sredstva za gašenje da djelotvorno preuzima toplinu od ugrijanog obratka pri procesu kaljenja. Ovisi o brzini strujanja, vrsti sredstva te temperaturi sredstva za gašenje.

Na slici 30.b prikazana je raspodjela toka tvrdoće u uzorku koji je zakaljen u tri različita sredstva s različitim intenzitetom gašenja ( $H_1 > H_2 > H_3$ ). Uzorak promjera  $D$ , gašen u sredstvu

intenziteta  $H_1$  predstavlja bespotrebno gašenje velikim brzinama, dok sredstvo intenziteta gašenja  $H_3$  predstavlja nedovoljan intenzitet gašenja koji je potreban za potpuno prokaljivanje.

U potpunosti prokaljen čelik, smatra se onaj čelik koje je maksimalno zakaljen po svim točkama poprečnog presjeka, odnosno, ukoliko se pojedina točka po poprečnom presjeku gasi nadkritičnom brzinom gašenja. Ovim načinom se postiže mikrostruktura s najvećim mogućim masenim udjelom martenzita u svakoj točki poprečnog presjeka.

Prokaljivost, za neki kemijski sastav čelika, također ovisi i o brzini hlađenja te dimenzijama obratka. Legirani čelici su bolje prokaljivi zbog legirajućih elemenata koji imaju pozitivan utjecaj na prokaljivost, osim kobalta i aluminijska. Karbidi, nitridi, veličina kristalnog zrna te neotopljene nečistoće također utječu na prokaljivost čelika. Iz navedenog se može zaključiti da se prokaljivost ne može precizno odrediti s obzirom na veliki broj utjecajnih čimbenika.

#### 5.4. Ispitivanje prokaljivosti

Potpuna prokaljivost strojnih dijelova koji su većih dimenzija je skupa te zahtjeva veći maseni udio legirajućih elemenata u čeliku što rezultira povećanju troškova proizvodnje, a samim time i tržišna vrijednost čelika raste. Stoga se gotovo nikad ne pribjegava 100 %-tnoj martenzitnoj strukturi. Za potrebe praktične primjene djelomična prokaljivost je sasvim zadovoljavajuća, odnosno, maseni udio martenzita u mikrostrukturi je manji od 100 % ili  $R < 1$ .

Bitno je naglasiti da se uslijed postupka popuštanja nejednoličnost svojstava u poprečnom presjeku nakon gašenja smanjuje. Smanjenje nejednoličnosti će biti veće što je veća temperatura popuštanja i što je veći stupanj zakaljenosti  $R$ .

Općenito se minimalni dopušteni maseni udio martenzita u jezgri ne može odrediti, s obzirom da minimalni potrebni maseni udio martenzita ( $R_{\min}$ ) uglavnom ovisi o opterećenju i namjeni strojnog dijela.

Metode za procjenu prokaljivosti su:

- utvrđivanje stupnja zakaljenosti Justovom metodom,
- ispitivanje prokaljivosti prema Grossmannu,
- ispitivanje prokaljivosti Jominy metodom,

- određivanje toka tvrdoće pomoću Crafts-lamontovih dijagrama.

### 5.5. Utvrđivanje stupnja zakaljivosti Justovom metodom

S obzirom da vlačna čvrstoća popuštanja  $R_{mp}$  nije mjerodavna za procjenu kvalitete toplinski obrađenog obratka, u tom slučaju potrebno je procijeniti minimalni stupanj zakaljenosti  $R_{min}$ , što se može vidjeti na slici 32.

Proračun minimalnog stupnja zakaljenosti računa se pomoću Justove formule prema izrazu 5.3.

$$R_{min} = \frac{HRC_g}{20+60\sqrt{C}} = \frac{1}{1+8e^{\frac{HRC_p}{8}}} \quad (5.3.)$$

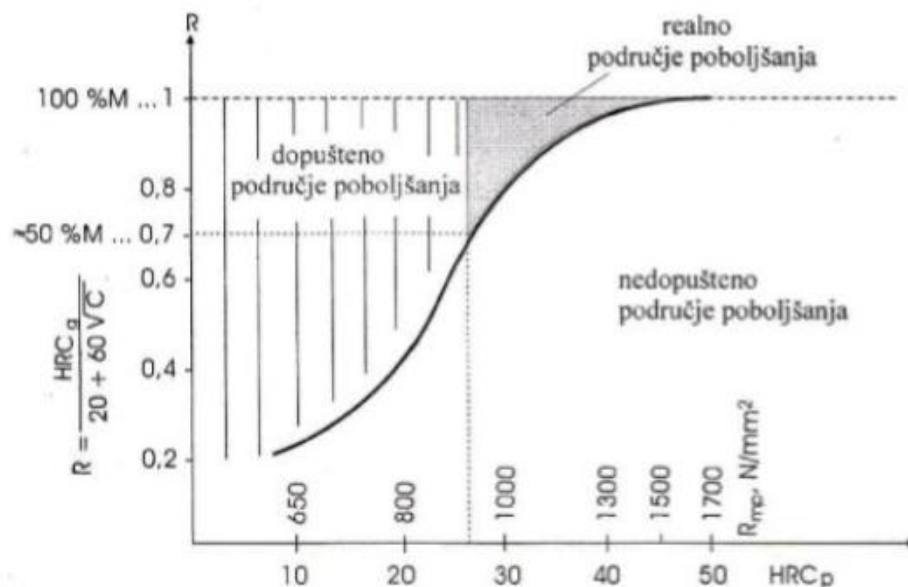
gdje je:

$R_{min}$  minimalni stupanj zakaljenosti,

$HRC_g$  tvrdoća u gašenom stanju,

$HRC_p$  tvrdoća nakon popuštanja,

$C$  maseni udio ugljika.



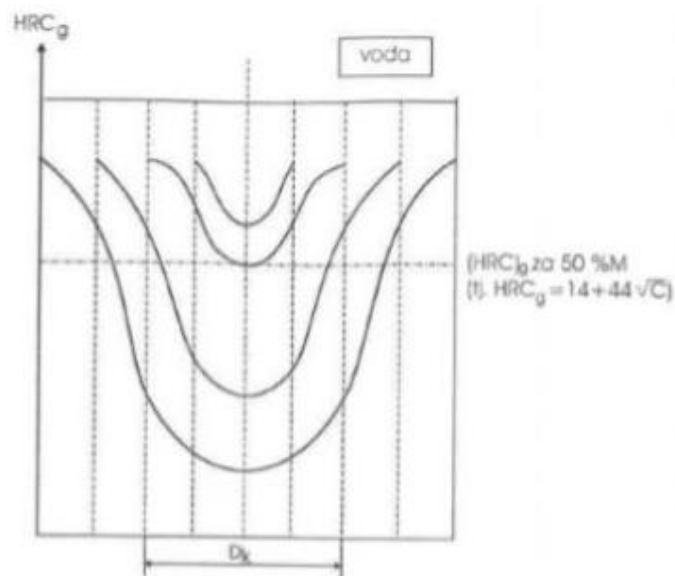
Slika 32. Justov dijagram preporučenog stupnja zakaljivosti [5]

## 5.6. Ispitivanje prokaljivosti prema Grossmannu

Ispitivanje prokaljivosti prema Grossmannu sastoji se od:

- gašenja 10 valjaka (promjera između 10 i 100 mm) u određenom sredstvu,
- rezanje valjaka okomito na os,
- mikrografskog ocjenjivanja strukture u jezgri,
- mjerenja  $HRC_g$  uzduž poprečnih presjeka svih valjaka.

Tok tvrdoće poslije gašenja (za valjke različitih promjera) prikazan je na slici 33.



Slika 33. Tok tvrdoće poslije gašenja na poprečnim presjecima valjaka [5]

Na slici 33. oznaka  $D_k$  predstavlja kritični promjer. To je promjer kod kojeg se, u zadanom sredstvu, u jezgri postiže 50 %-ta martenzitna struktura gdje je, prema izrazu 5.4.:

$$HRC_g = 14 + 44\sqrt{C} \quad (5.4.)$$

Prema izrazu 5.5. slijedi:

$$D_k = f(\text{sredstvo za gašenje, sastav čelika}) \quad (5.5.)$$

U ovisnosti o sredstvu za gašenje, za isti čelik vrijedi izraz 5.6.:

$$D_{k \text{ voda}} > D_{k \text{ ulje}} > D_{k \text{ zrak}} \quad (5.6.)$$

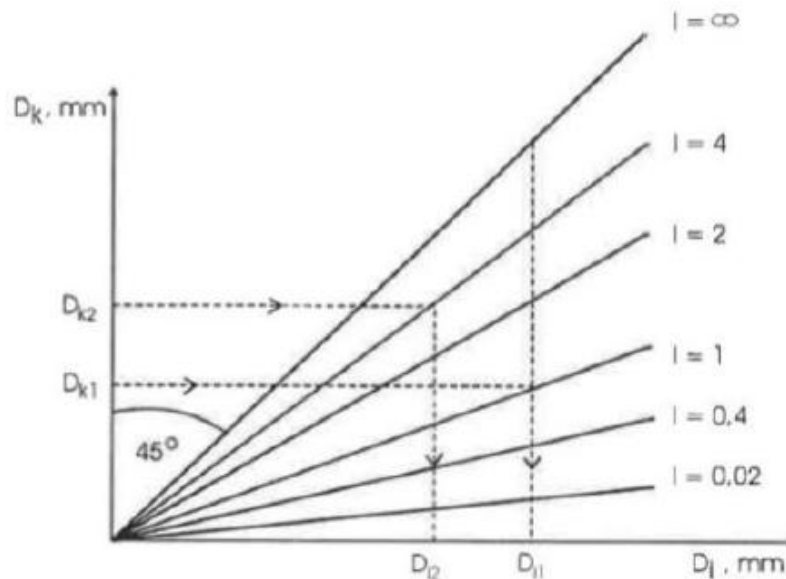
Slijedom navedenog, kritični promjer  $D_k$  može biti jedino veličina za usporedbu prokaljivosti različitih čelika koji su gašeni u istom sredstvu.

Kako bi bilo moguće izmjeriti prokaljivost koja je neovisna o sredstvu za hlađenje, uvodi se pojam idealnog kritičnog gašenja  $D_i$ . Navedena veličina definira onaj promjer čelika, kod kojeg bi se postigla 50 %-tna martenzitna struktura u jezgri uz intenzitet gašenja od  $I = \infty$ . Iz navedenog proizlaze izrazi 5.7. i 5.8.:

$$D_i = D_k \text{ za } I = \infty \quad (5.7.)$$

$$D_i > D_k \text{ za } I = \infty \quad (5.8.)$$

uz grafički prikaz na slici 34.



Slika 34. Dijagram  $D_k = f(D_i, I)$  [5]

Nedostaci Grossmannove grafičke metode procjene prokaljivosti očituju se kao:

- skupi i dugi eksperimenti,
- priprema mikroizbrusaka,
- povezivanje većih promjera,
- izrada manjih promjera skupa (sve valjke je potrebno izraditi od slične šipke, tj. zajedničkog promjera koji iznosi 100 mm),
- nejednoznačnost procjene udjela 50 % martenzita kod različitih čelika

## 5.7. Ispitivanje prokaljivosti Jominy metodom

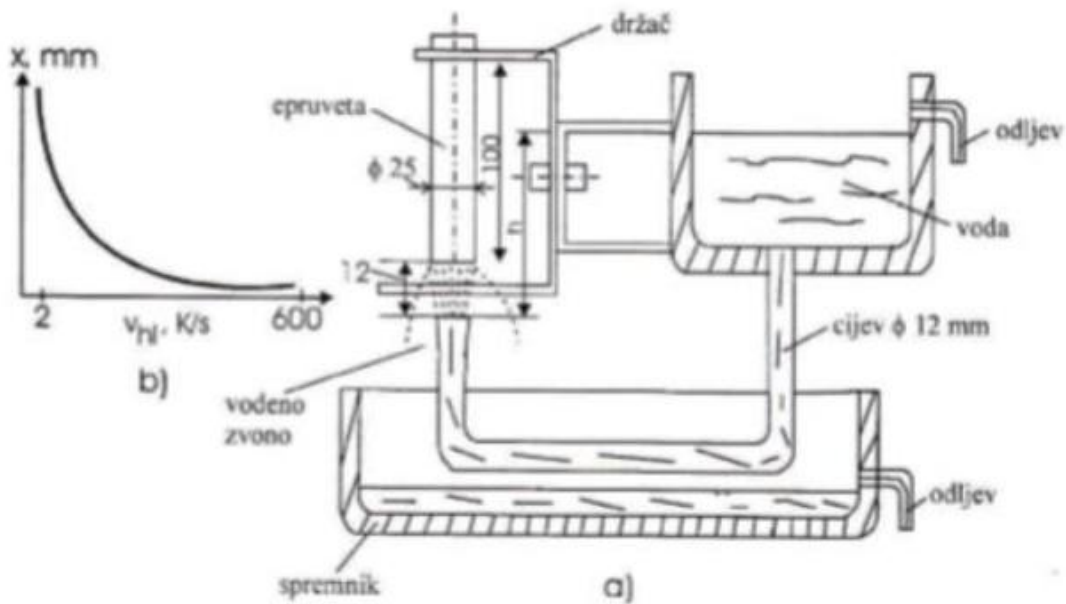
Ova metoda spada u jednu od najčešćih eksperimentalnih metoda koja se koristi za ispitivanje prokaljivosti čelika te je njen autor Walter Edwin Jominy. Ovu metodu moguće je pronaći pod raznim nacionalnim normama poput: DIN 50191, ASTM A255, HRN C .A2.051/1959 i ISO 642:1999.

Jominyjev pokus izvodi se samo na jednom uzorku. Uzorak se najprije zagrije na temperaturu austenitizacije koja je određena. Nakon čega slijedi čeonog gašenje uzorka mlazom vode u napravi posebno izrađenoj za Jominyjev pokus. Zatim, gašeni uzorak brusi se uzdužno po valjkastoj plohi plašta s dvije suprotne strane, gdje brušeni sloj iznosi 0,4 mm. Potom je potrebno ispitati tvrdoću na određenim udaljenostima od gašenog čela. Ispitivanje tvrdoće se najčešće provodi Rockwellovom C metodom.

Norma za izvođenje Jominyjeve metode definira sljedeće.

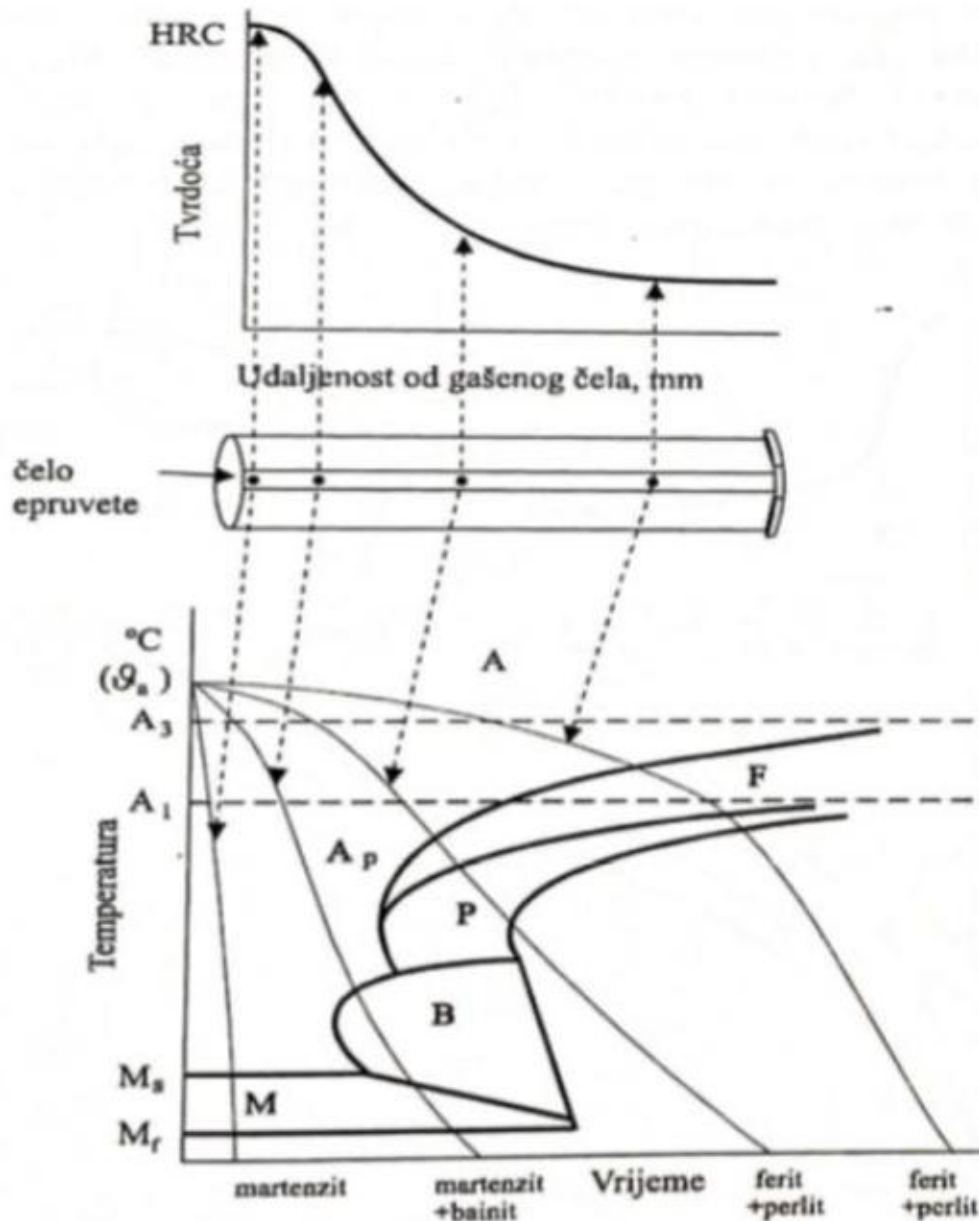
- dimenzije i oblik uzorka,
- uvjeti ugrijavanja i ohlađivanja,
- metoda i pozicija ispitivanja tvrdoće.

Standardne epruvete za izvođenje Jominyjevog pokusa su dimenzija  $\phi 25 \times 100$  mm. Uzorak mora provesti minimalno 30 minuta na temperaturi austenitizacije. Premještanje uzorka iz peći za kaljenje u napravu za gašenje mora biti vremenski čim kraći ( $< 5$  sekundi). Promjer cijevi iz kojeg istječe mlaz vode za čeonog hlađenje uzorka iznosi 12,7 mm, dok udaljenost između otvora cijevi i čela uzorka, također iznosi 12,7 mm. Brzina mlaza vode definirana je stupcem vode, dok je visina slobodnog istjecanja mlaza vode, bez epruvete, 65 mm. Temperatura vode za hlađenje je oko  $24$  °C ( $\pm 2,5$  °C). Po završetku hlađenja uzorka, potrebno je pobrusiti valjkaste plohe nakon čega slijedi ispitivanje tvrdoće. Shematski prikaz čeonog gašenja Jominyjevom metodom prikazan je na slici 35.



Slika 35. Shematski prikaz čeonog gašenja Jominyjevom metodom (a) te ostvarene brzine ohlađivanja uzduž izvodnice (b) [5]

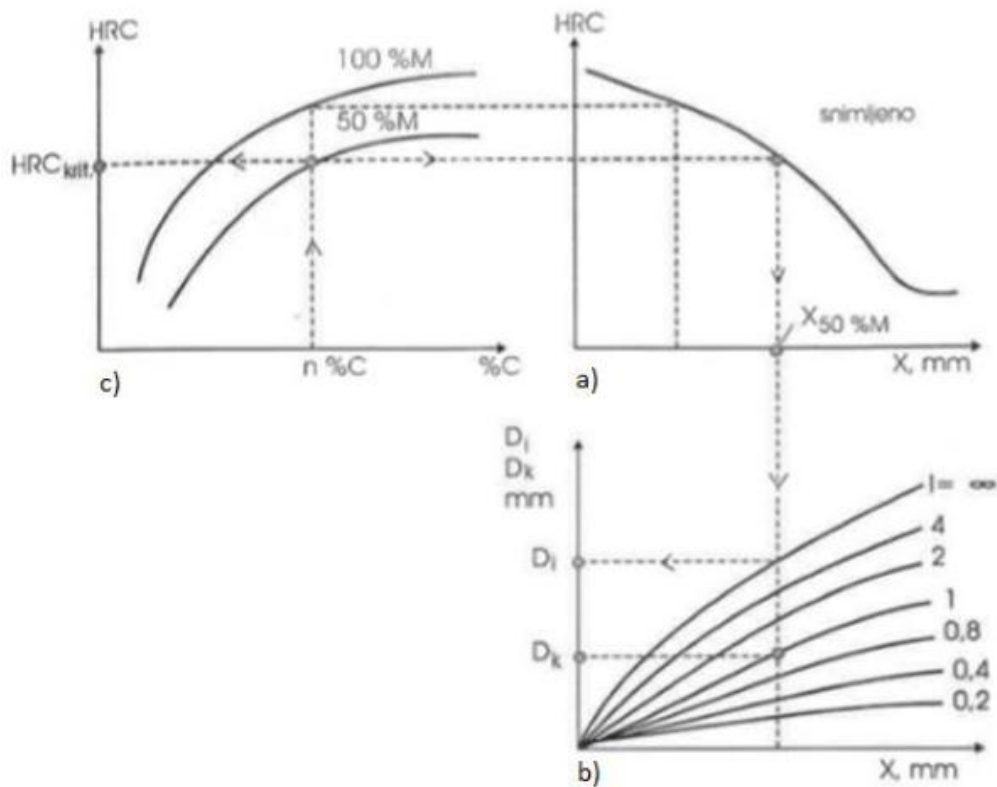
Pomoću izmjerenih vrijednosti tvrdoće, konstruira se Jominyjeva krivulja. Navedena krivulja služi za prikazivanje raspodjele tvrdoće u ovisnosti o udaljenosti od gašenog čela, odnosno, linija prokaljivosti koja je prikazana na slici 36. Kako je brzina ohlađivanja na samom čelu epruvete najveća, sukladno tome tu se postiže martenzitna mikrostruktura s najvećom tvrdoćom. Daljnjim povećanjem udaljenosti od gašenog čela, brzina ohlađivanja se smanjuje te samim time udio martenzita u mikrostrukturi i tvrdoća.



Slika 36. Shematski prikaz krivulja ohlađivanja Jominyjevog uzorka u TTT dijagramu [5]

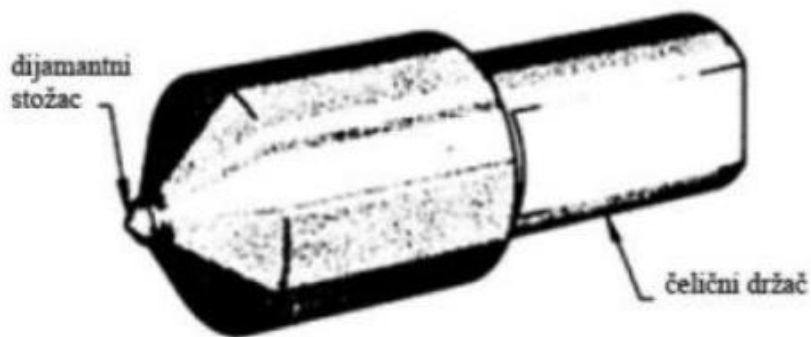
Ispitivanje prokaljivosti kao i određivanje pripadajućih  $D_k$  i  $D_i$  veličina pomoću dijagrama vidljivo je na slici 37. Grafičko utvrđivanje idealnog kritičnog i kritičnog promjera ostvaruje se pomoću konstruirane Jominyjeve krivulje (a), nomograma (b) i Burnsovog dijagrama (c).





Slika 37. Grafičko određivanje idealnog kritičnog promjera  $D_i$  i kritičnog promjera  $D_k$  [5]

Ispitivanje tvrdoće može se odrediti Vickersovom ili Rockwellovom metodom. Uglavnom se ispitivanje tvrdoće određuje Rockwellovom metodom. Kod Rockwellove metode mjeri se dubina koju čini utiskivač. Tvrdoća se očitava na mjernoj skali uređaja za mjerenje (tvrdomjer) nakon rasterećenja. Utiskivači za Rockwellovu metodu su dijamanтни stožac ili kuglica od kaljenog čelika. Vršni kut stošca iznosi  $120^\circ$  te ima radijus zaobljenja na vrhu od 0,2 mm što je vidljivo na slici 38., dok promjer kuglice iznosi  $1/16''$  (1,5875 mm) iil  $1/8''$  (3,175 mm).



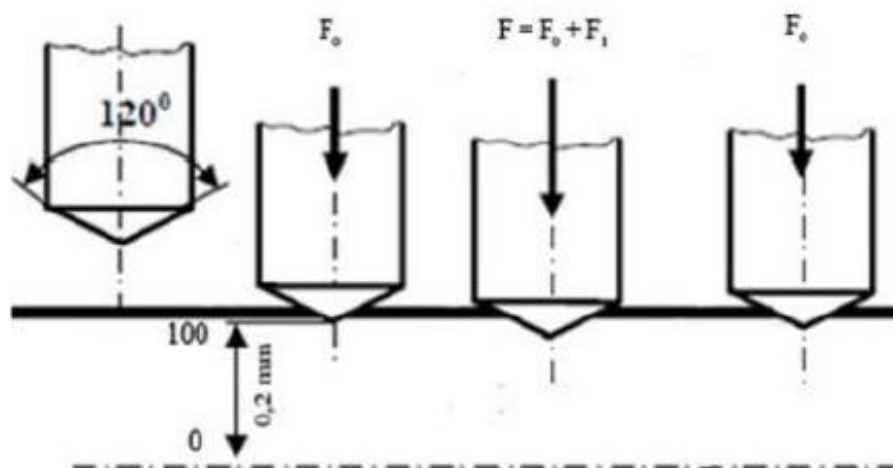
Slika 38. Utiskivač namjenjen za Rockwellovu metodu [9]

Ispitivanje Rockwellovom C metodom (HRC) uglavnom se koristi za toplinski obrađene materijale, dok se HRB koristi kod srednje tvrdih i mekih materijala. Različite Rockwellove metode te odgovarajući materijali na koje se odnose prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Rockwellove tvrdoće s obzirom na ispitivanje materijala [9]

OZNAKA METODE	Materijali
HRA	Tvrđi metali, tanki i kaljeni čelici
HRB	Cu-legure, Al-legure, meki čelici, kovani čelik
HRC	Čelik, tvrdi ljevovi, materijali tvrdi od 100 HRB
HRD	Tanki čelici, srednje kaljeni čelici, kovani čelik, čelik perlitne strukture
HRE	Željezni ljev, Al i Mg-legure, ležajni materijali
HRF	Žarene Cu-legure, tanke metalne folije
HRG	P i Be-bronca, kovani čelik
HRH	Al, Zn, Pb
HRK	Mekani ležajni materijali, polimeri i drugi vrlo mekani materijali
HRL	
HRN	
HRT	

Utiskivač za HRC metodu, u obliku je dijamantnog stošca te se opterećuje s predopterećenjem koje iznosi  $F_0 = 98,07 \text{ N}$  u trajanju od 3 sekunde. Na taj način dobiva se početna točka od koje se mjeri dubina prodiranja. Nakon čega slijedi ukupno opterećenja  $F$ , dodavanjem glavnog opterećenja  $F_1 = 1373 \text{ N}$  u trajanju od 2 do 6 sekundi. Iznos tvrdoće definira se dubinom prodiranja utiskivača  $h_R$  nakon uklanjanja glavnog opterećenja  $F_1$ . Ako je dubina prodiranja utiskivača manja to rezultira većom tvrdoćom i obrnuto. Postupak mjerenja HRC metode prikazan je na slici 39.



Slika 39. Postupak mjerenja HRC metode [9]

HRB potupak je identičan kao HRC, no razliku je se po tome što su dijamanti stožac zamjenjuje s čeličnom kuglicom. Čelična kuglica utiskuje se s predopterećenjem od  $F_0 = 98,07 \text{ N}$  i glavnim opterećenjem od  $F_1 = 882,6 \text{ N}$  pri čemu je iznos ukupnog opterećenja jednak  $F = 980,7 \text{ N}$ .

Za HRC metodu, debljina uzorka kojeg se ispituje treba biti oko  $10 h_R$ , dok za HRB metodu oko  $15 h_R$ .

Iznosi tvrdoća koji se dobiju mjerenjem Rockwellovom metode nije moguće izravno preračunavati u Brinellove ili Vickersove vrijednosti tvrdoća, također vrijedi i za obrnuti postupak. Iz tablice 4. očitavaju se karakteristike za postupak mjerenja.

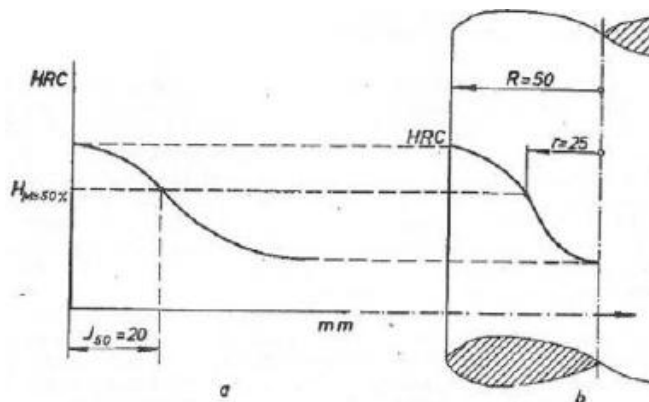
*Tablica 4. Karakteriske za postupak mjerenja Rockwellovom metodom [9]*

Oznaka metode	Vrsta indentora	Pred-opterećenje [kg]	Glavno Opterećenje [kg]	Ukupno Opterećenje [kg]	Maksimalna Dubina prodiranja
A (HRA)	Dijamantni stožac s kutom od $120^\circ$	10	50	60	0,200
B (HRB)	Čelična kuglica $d=1,587 \text{ mm}$	10	90	100	0,260
C (HRC)	Dijamantni stožac s kutom od $120^\circ$	10	140	150	0,200
D (HRD)	Dijamantni stožac s kutom od $120^\circ$	10	90	100	0,200
E (HRE)	Čelična kuglica $d=3,175 \text{ mm}$	10	90	100	0,260
F (HRF)	Čelična kuglica $d=1,587 \text{ mm}$	10	50	60	0,260
G (HRG)	Čelična kuglica $d=1,587 \text{ mm}$	10	140	150	0,260
H (HRH)	Čelična kuglica $d=3,175 \text{ mm}$	10	50	60	0,260
K (HRK)	Čelična kuglica $d=3,175 \text{ mm}$	10	140	150	0,260
N (HRN)	Dijamantni stožac s kutom od $120^\circ$	3	12	15	0,260
T (HRT)	Čelična kuglica $d=1,587 \text{ mm}$	3	12	15	0,260

Glavna prednost HRC metode u odnosu na Brinellovu i Vickersovu očituje se u relativno velikoj brzini mjerenja s time da se iznos tvrdoće očitava neposredno na mjernoj skali tvrdomjera. Prije mjerenja, površinu uzorka potrebno je odmastiti i očistiti tako da bude bez stranih čestica. Jedan od glavnih nedostatak očituje se manjom preciznošću mjerenja ( $\pm 2$  HRC). U teoriji, mjerno područje HRC metode kreće se od 0 do 100 HRC, dok u praksi to iznosi još manje te se kreće od 20 do 70 HRC. Prema tome, metoda HRC primjenjiva je samo u pogonskim uvjetima, a posebice za toplinski obrađenim dijelovima. Rockwellova metoda ispitivanja tvrdoće propisana je normom HRN EN ISO 6508-1:1999.

### 5.8. Određivanje toka tvrdoće pomoću Crafts-Lamontovih dijagrama

Tok tvrdoće predstavlja takozvanu U-krivulju koja se ucrtava u nacrt strojnog dijela (slika 40.) uz pomoć 11 Craft-Lamontovih dijagrama koji su prikazani na slici 41. i 42.



Slika 40. Odnos između linije prokaljivosti i rasporeda tvrdoće: a) linija prokaljivosti; b) linija rasporeda tvrdoće [6]

Na slikama 41. i 42. prikazuju se Crafts-Lamontovi dijagrami koji se odnose na dinamiku hlađenja na određenoj udaljenosti od površine obratka, što se izražava omjerom  $d/D$ ,

gdje je:

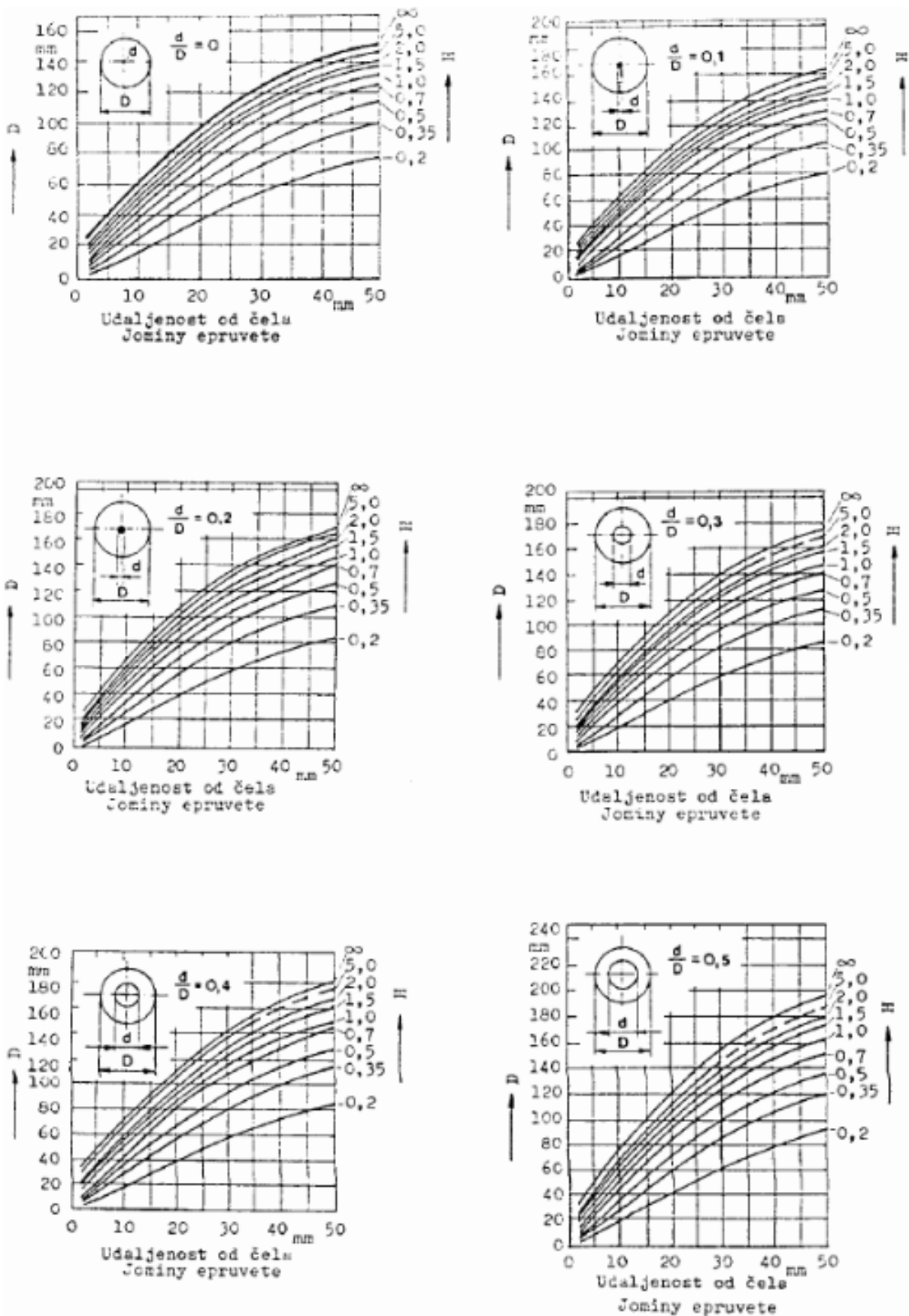
$D$  promjer kaljenog uzorka,

$d$  promjer koncentrične kružnice u valjku gdje se određuje tvrdoća.

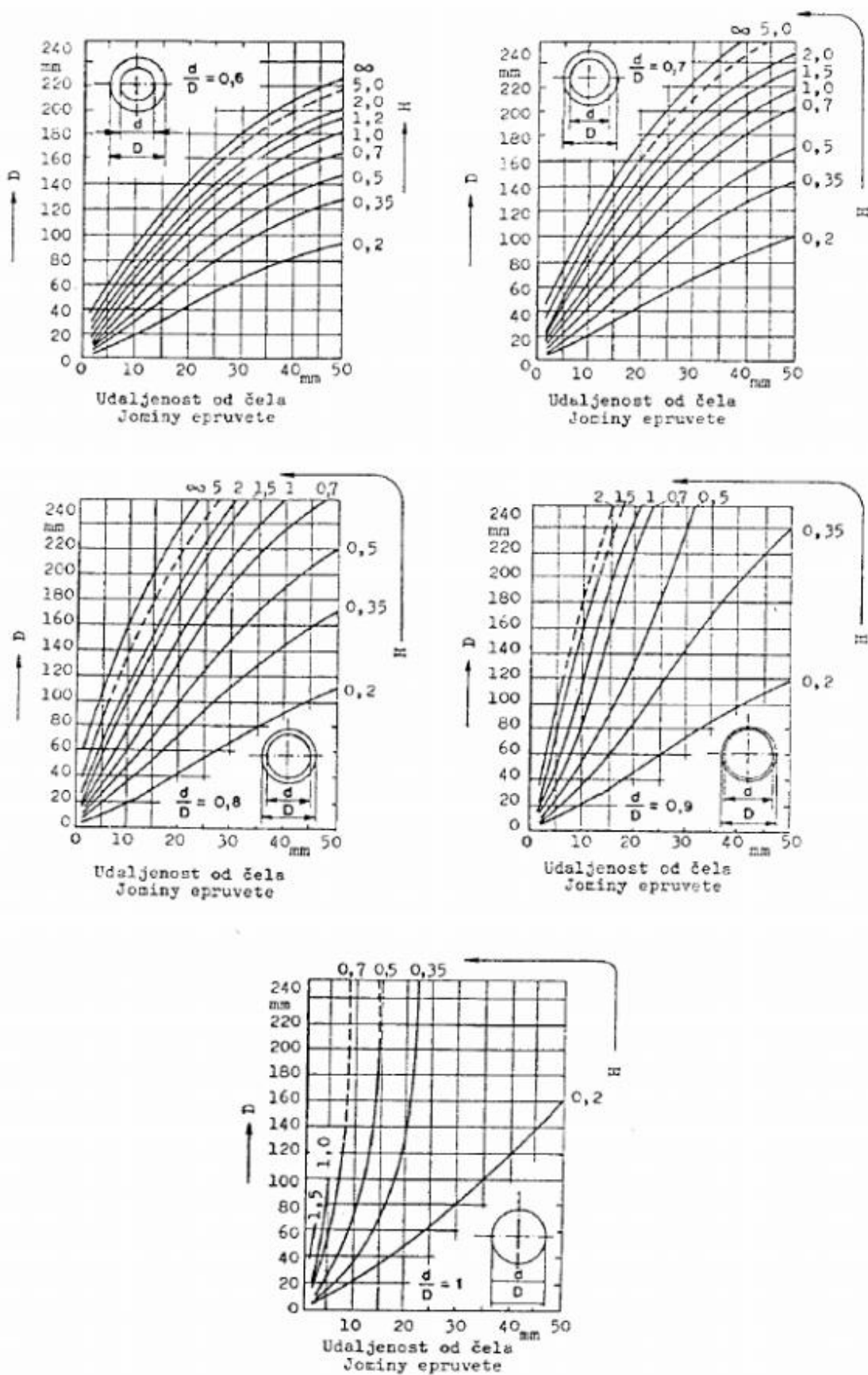
Prema navedenom proizlazi sljedeće:

$d/D = 0$  predstavlja uvjet ohlađivanja u jezgri uzorka,

$d/D = 1$  predstavlja uvjete ohlađivanja na površini uzorka .

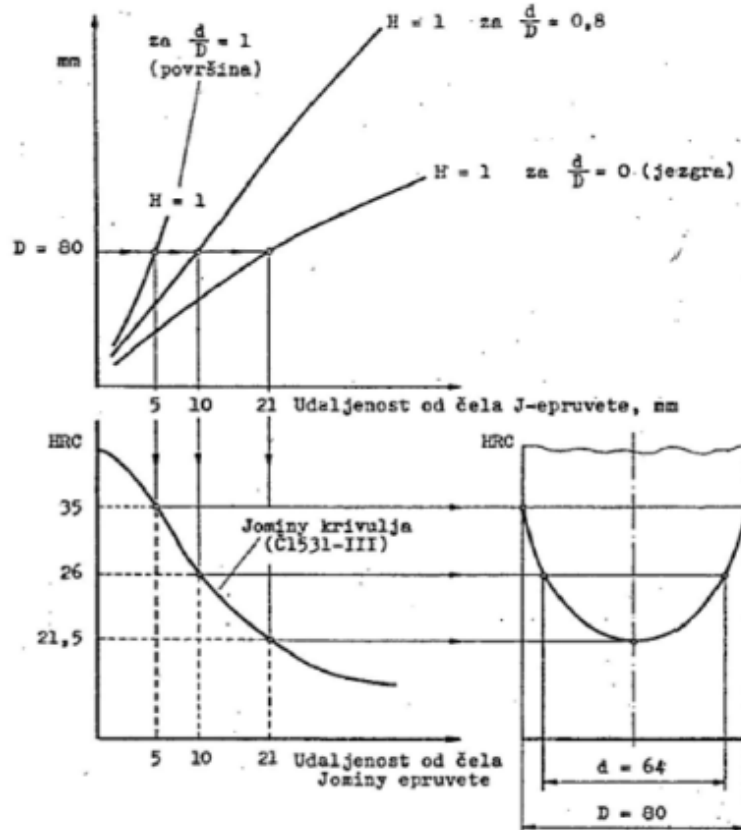


Slika 41. Crafts - Lamontovi dijagrami [13]



Slika 42. Crafts-Lamontovi dijagrami - nastavak [13]

Na slici 43. prikazan je primjer konstruiranja krivulje toka tvrdoće, odnosno, U-krivulje za valjak čiji promjer iznosi  $D = 80$  mm te intenzitet gašenja  $H = 1$  za jezgru valjka ( $d/D = 0$ ), za  $D = 64$  mm ( $d/D = 0,8$ ) i za površinu ( $d/D = 1$ ). Tablica 5. prikazuje intenzitet gašenja za različita sredstva.



Slika 43. Prikaz konstruiranja toka tvrdoće, odnosno, U-krivulje [7]

Tablica 5. Intenziteti gašenja za različita sredstva ohlađivanja [7]

Pokretanje sredstva za ohlađivanje	Ulje	Voda	Slana voda
Bez pokretanja	0,25 - 0,3	0,9 - 1	2
Slabo pokretanje	0,3 - 0,35	1,1 - 1	2 - 2,2
Srednje pokretanje	0,35 - 0,4	1,2 - 1,3	-
Jače pokretanje	0,4 - 0,5	1,4 - 1,5	-
Jako pokretanje	0,5 - 0,8	1,5 - 2	-
Vrlo jako pokretanje	0,8 - 1,1	2 - 6	5 - 8

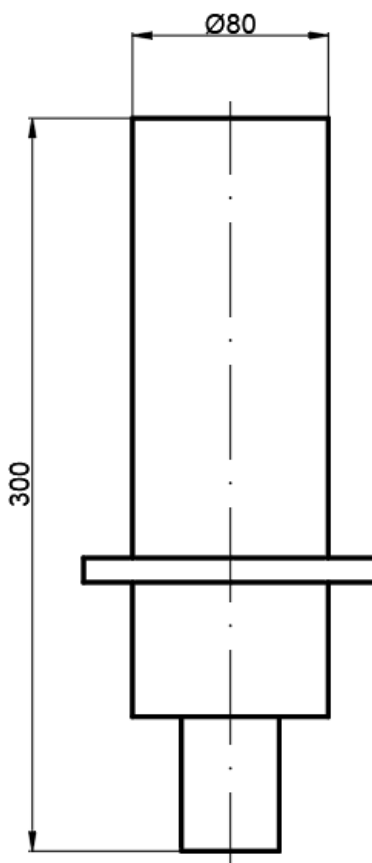
Za sve omjere  $d/D$  za koje postoje dijagrami, postupak se ponavlja, te se dobivaju određene vrijednosti tvrdoća na pojedinim mjestima poprečnog presjeka. Postupak se može provesti i za neki drugi promjer ili intenzitet gašenja.

## 6. PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA HT.22-DP.68

Dubina prokaljivanja strojnog dijela HT.22-DP.68 procijenjena je pomoću Crafts-Lamontovih dijagrama (slike 41. i 42.) i rezultata Jominyjevog pokusa. Jominyjev pokus je izveden u laboratoriju za toplinsku obradu i inženjerstvo površina na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci na Zavodu za materijale. Pokus je izveden na temelju Hrvatske norme HRN EN ISO 642.

### 6.1. Strojni dio HT.22-DP.68

Strojni dio HT.22-DP.68 izrađen je od čelika 42CrMo4. Sa slici 44. prikazan je na nacrt strojnog dijela HT.22-DP.68.



Slika 44. Nacrt strojnog dijela HT.22-DP.68

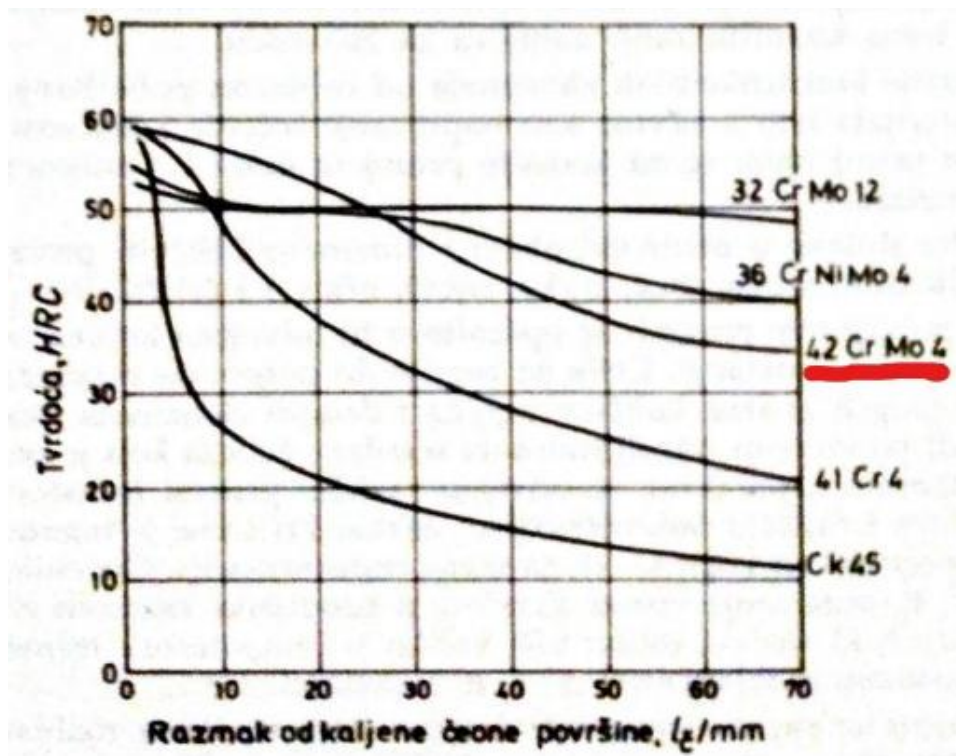


## 6.2. Značajke čelika 42CrMo4

Čelik 42CrMo4 ubraja se u konstrukcijske čelike za poboljšavanje te je predstavnik skupine niskolegiranih čelika s visokom čvrstoćom. Takva skupina čelika namijenjena je, na temelju kemijskog sastava a posebice ugljika, za kaljenje te nakon popuštanja u poboljšanom stanju pokazuju visoku žilavost uz povećano naprezanje tečenja. Uglavnom se koristi pri izradi visokoopterećenih strojnih dijelova kao što su ležajevi, zupčanici te vratila i osovine. Tablicom 6. prikazan je propisan kemijski sastav čelika 42CrMo4. Komparacija Jominyjevih rezultata 42CrMo4 čelika s identičnim čelicima za poboljšavanje vidljivo je na slici 45. Crvenom bojom je označen čelik za koji se procjenjivala prokaljivost.

Tablica 6. Kemijski sastav 42CrMo4 čelika [11]

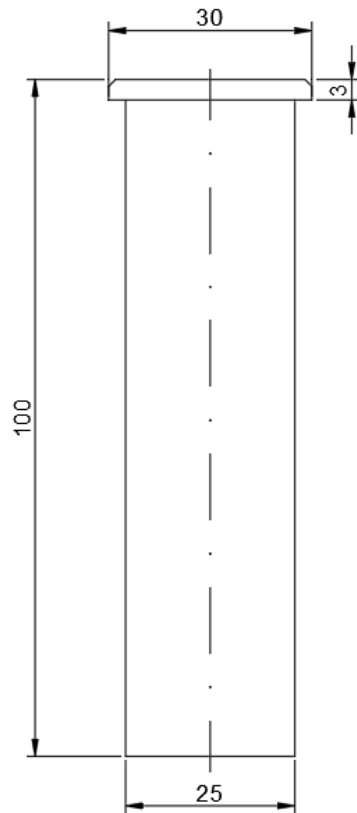
Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Udio pojedinog elementa (%)	0,38-0,45	0,4	0,60 - 0,90	max 0,025	max 0,035	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30



Slika 45. Komparacija Jominy rezultata 42CrMo4 čelika s identičnim čelicima za poboljšavanje [2]

### 6.3. Provedba Jominyevog pokusa

Za provedbu Jominyjevog pokusa izrađen je Jominyjev uzorak (slika 46. a.). Jominyjev uzorak izrađen je od čelika 42CrMo4 (Slika 46. b)).



a)



b)

Slika 46. a) nacrt Jominyjevog uzorka; b) tokareni Jominyjev uzorak

Jominyjev uzorak postavlja se u peć za kaljenje (slika 47.) koja je prethodno zagrijana na temperaturu od 850 °C radi austenitizacije. Jominyjev uzorak se postavlja u peć za kaljenje pomoću zaštitne opreme (rukavice, hvataljke, zaštitne naočale) koja je prikazana na slici 48.



*Slika 47. Peć za kaljenje*



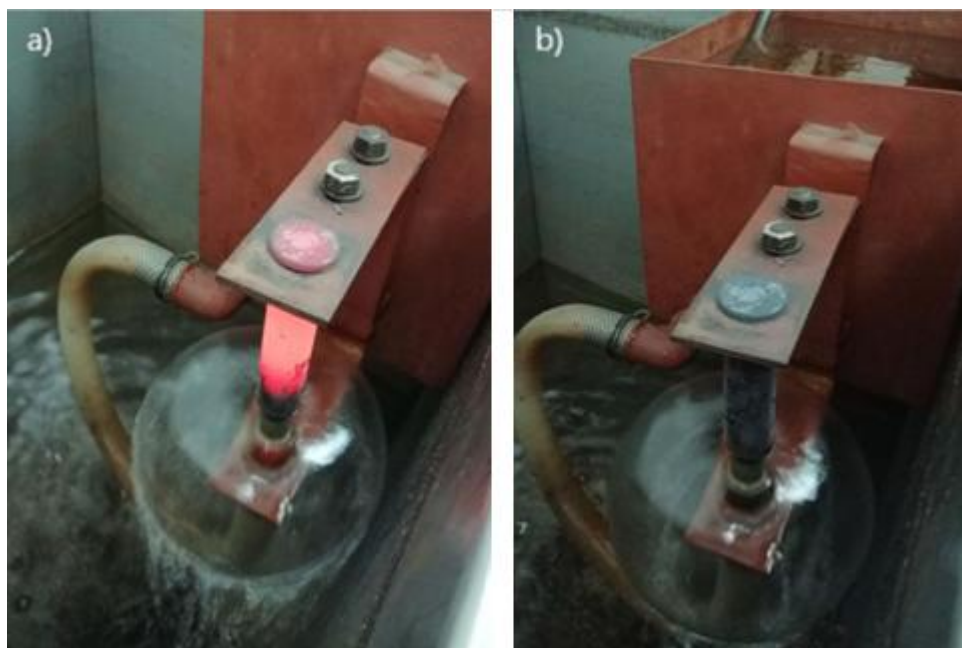
*Slika 48. Zaštitna oprema: a) rukavice; b) naočale; c) hvataljke*

Nakon postavljanja uzorka u peć za kaljenje, vrijeme koje uzorak mora provesti u peći za kaljenje, kako bi postigao temperaturu austenitizacije, je  $30^{+5}_0$  min. Po završetku austenitizacije u peći, uz pomoć zaštitne opreme uzorak se premješta iz peći u napravu za Jominyjev pokus koja je prikazana na slici 49.

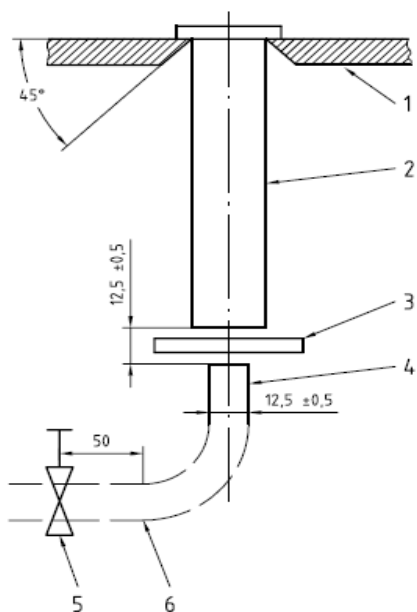


*Slika 49. Naprava za Jominyjev pokus*

Premještanje uzorka iz peći ne smije trajati dulje od 5 sekundi, kako bi se postigla čim točnija svojstva nakon kaljenja. Uzorak se čeono gasi u vodi (slika 50. a)). Temperatura vode za gašenje mora biti oko  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , a unutarnji promjer vertikalne cijevi za dovod vode iznosi  $12,5 \pm 0,5 \text{ mm}$  (slika 51.). Visina mlaza vode prije postavljanja uzorka iznosi  $65 \pm 10 \text{ mm}$ , a nakon postavljanja uzorka, visina mlaza vode iznosi  $12,5 \pm 0,5 \text{ mm}$  (slika 51.). Čeono gašenje uzorka provodi se u trajanju minimalno  $30^{+5}_0$  minuta. Na slici 50. b) prikazano je gašenje uzorka nakon cca. 30 minuta.



*Slika 50. a) Čeono gašenje uzorka na početku; b) Gašenje uzorka pri kraju*



Slika 51. Shema uređaja za gašenje

Po završetku gašenja, valjkastu plohu kaljenog uzorka (slika 52. a)) potrebno je pobrusiti. Brušenje se provodi u svrhu zahtijevane kvalitete uoči mjerenja tvrdoće. Uzorak se brusi sa dvije strane tako da se dobiju dvije ravne plohe koje su pod kutom od  $180^\circ$ . Debljina brušenog sloja iznosi 0,4 mm. Jominyjev uzorak nakon brušenja prikazan je slikom 52. b).



a)

b)

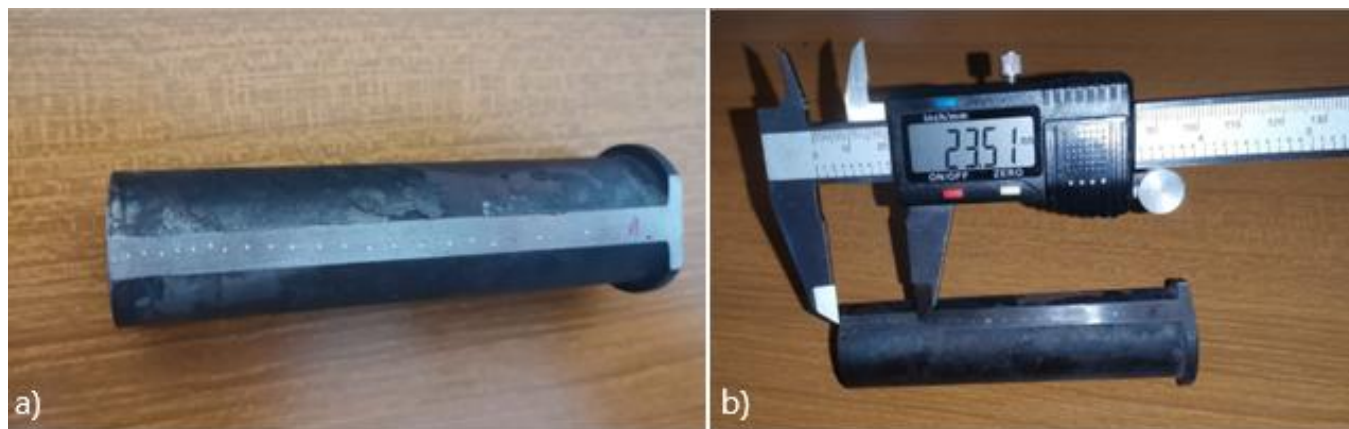
Slika 52. a) Jominyjev uzorak nakon kaljenja; b) Kaljeni Jominyjev uzorak nakon brušenja



Brušeni uzorak služi za ispitivanje tvrdoće. Tvrdoća se ispituje Rockwellovom C metodom na tvrdomjeru koji je prikazan na slici 53. a). Ispitivanje tvrdoće vrši se s obje strane kako bi se dobili točniji rezultati. Početna pozicija mjerenja prikazan je na slici 53. b), a slikom 54. a) prikazan je izgled uzorka po završetku mjerenja.



*Slika 53. a) Tvrdomjer za ispitivanje tvrdoće Rockwellovom metodom; b) Početna pozicija ispitivanja tvrdoće uzorka*



*Slika 54. a) Izgled Jominyjevog uzorka po završetku mjerenja; b) Mjerenje udaljenosti od gašenog čela*

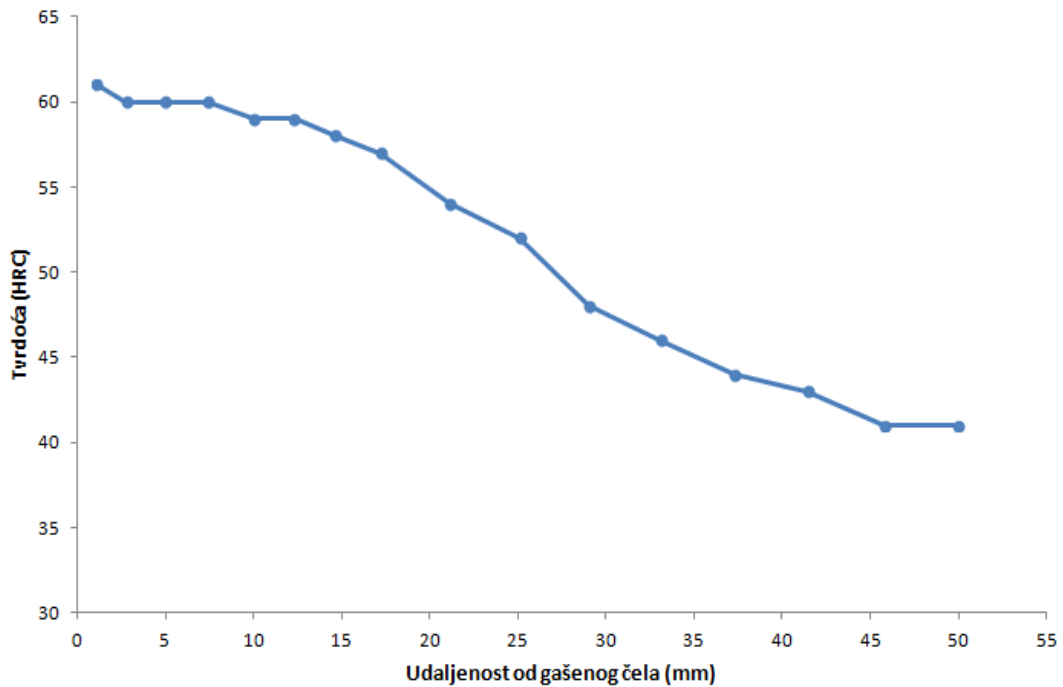
Nakon završetka mjerenja tvrdoće, na Jominyjevom uzorku vidljivi su utisci koje je ostavio utiskivač prilikom mjerenja. Pomoću pomičnog mjerila potrebno je izmjeriti udaljenosti otiska od gašenog čela (slika 54. b)) koje su potrebne pri konstruiranju Jominyjeve krivulje.

#### 6.4. Rezultati Jominyjevog pokusa

Na temelju dobivenih podataka nakon ispitivanja tvrdoće na tvrdomjeru koji su prikazani u tablici 7. te vrijednosti udaljenosti od gašenog čela konstruirana je Jominyjeva krivulja (slika 55.). Prilikom mjerenja tvrdoće u obzir su uzete prosječne vrijednosti tvrdoće i udaljenosti od gašenog čela za obje ispitane strane.

*Tablica 7. Dobivene vrijednosti tvrdoće od gašenog čela*

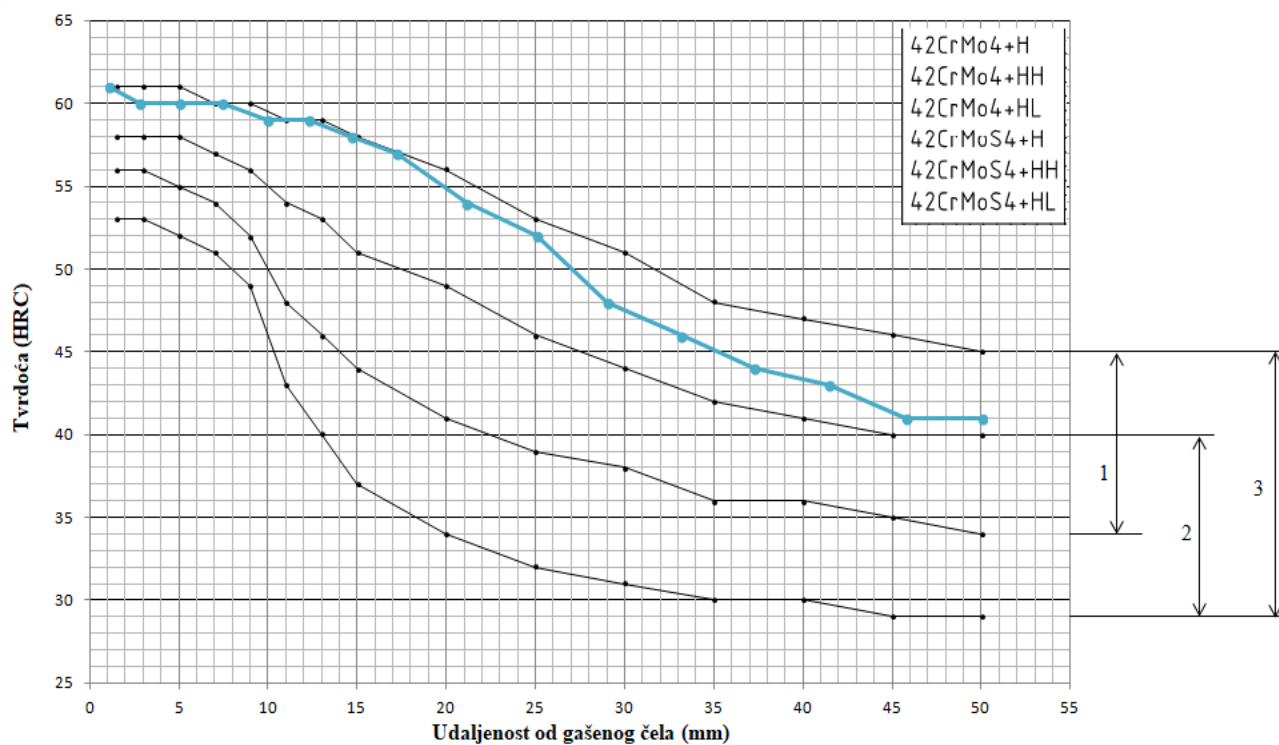
Tvrdoća (HRC)	Udaljenost od gašenog čela (mm)	Tvrdoća (HRC)	Udaljenost od gašenog čela (mm)
61	1,09	54	21,13
60	2,78	52	25,08
60	5,0	48	29,03
60	7,43	46	33,13
59	9,98	44	37,24
59	12,29	43	41,47
58	14,65	41	45,78
57	17,18	41	50



*Slika 55. Jominyjeva krivulja za čelik 42CrMo4*

Slika 56. prikazuje usporedbu dobivene Jominyjeve krivulje (svijetlo plava boja) s propisanim maksimalnim i minimalnim vrijednostima. Oznaka (+H) predstavlja vrijednosti tvrdoće po Rockwellovoj C skali za specijalne razrede čelika s normalnim zahtjevima za kaljenje. Oznake (+HH, +HL) predstavljaju specijalne razrede čelika s ograničenim zahtjevima za kaljenje. Iz dijagrama se zaključuje da je dobivena Jominy krivulja u skladu s propisanim vrijednostima te spada pod razred čelika s oznakom +HH.





Slika 56. Usporedba dobivene Jominy krivulje s propisanim Jominy krivuljama

gdje je:

- 1 HH - razred
- 2 HL - razred
- 3 H - razred

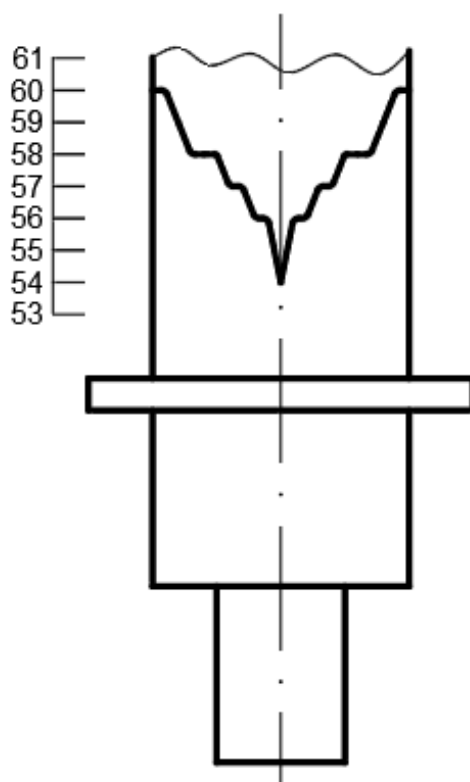
### 6.5. Procjena prokaljivosti strojnog dijela HT.22-DP.68

Pomoću dobivene Jominyjeve krivulje (slika 55.) i Crafts-Lamontovih dijagrama (slike 41. i 42.) očitane su vrijednosti Jominyjevih udaljenosti i tvrdoće na različitim omjerima  $d/D$  koji su prikazani tablicom 8. Omjer  $d/D = 1$  predstavlja površinu, a  $d/D = 0$  predstavlja jezgru strojnog dijela HT.22-DP.68. Procjena toka tvrdoće provodi se za slučaj gašenja u vodi uz intenzitet rashladnog sredstva od  $H = 1$ .

Na temelju očitanih podataka, po presjeku strojnog dijela HT.22-DP.68 ucrtava se U-krivulja, prikazana na slici 57., koja prikazuje prokaljivost navedenog strojnog dijela.

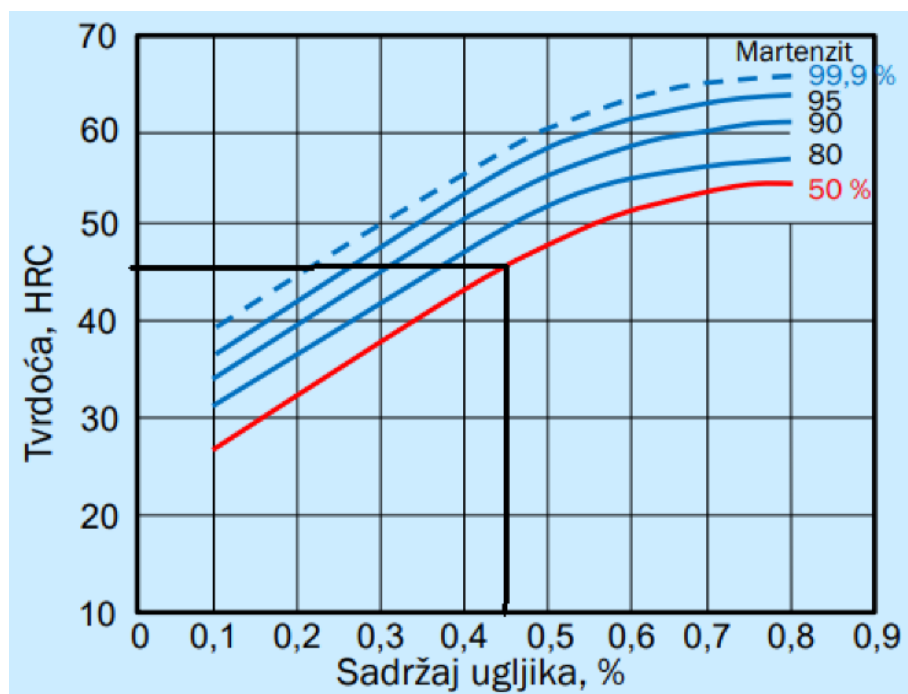
Tablica 8. Očitane vrijednosti prokaljivosti za  $H=1$

$d/D$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
<b>Jominyjeva udlajenost (mm)</b>	22	19	19	18	18	16	15	14	11	8	5
<b>Tvrdoća (HRC)</b>	54	56	56	57	57	58	58	58	59	60	60



Slika 57. U-krivulja po presjeku strojnog dijela HT.22-DP.68

Dobivena U-krivulja (slika 57.) predstavlja tok tvrdoće po presjeku strojnog dijela HT.22-DP.68 koji je gašen u vodi s intenzitetom gašenja  $H = 1$  (bez gibanja). Iz očitanih vrijednosti (tablica 8.) vidljivo je da se tvrdoća po presjeku kreće od 54 do 60 HRC. Minimalna vrijednost tvrdoće od 54 HRC koja se javlja u jezgri strojnog dijela odgovara udjelu martenzita od 90 % što znači da je uzorak potpuno prokaljen jer ima više od 50 % martenzita. Povezanost tvrdoće nakon kaljenja i udjela martenzita određuje se pomoću Burnsovog dijagrama (slika 58.).



Slika 58. Burnsov dijagram [11]

## 7. ZAKLJUČAK

U prvome se dijelu rada može zaključiti da je čelik slitina željeza koja u sebi sadrži maseni udio ugljika do 2,06 %. Osim ugljika, prilikom procesa proizvodnje, u čeliku se također nalaze i primjese mangana, silicija, fosfora i sumpora. S obzirom na svoja odlična fizikalna i mehanička svojstva, čelik je neizostavan materijal u praktički svim područjima primjene što ga čini najvažnijim tehnološko-konstruktivskim materijalom. Čelik se podvrgava toplinskoj obradi radi postizanja još boljih mehaničkih svojstava (vlačna čvrstoća, tvrdoća, žilavosti i drugi). Čimbenik koji najviše utječe na obradivost i kvalitetu čelika jeste ugljik. Na porast kvalitete čelika značajan utjecaj imaju legirajući elementi koji povoljno utječu na isti.

U središnjem se dijelu rada može zaključiti da se čelik podvrgava toplinskoj obradi kaljenja zbog poboljšanja svojstava. To je postupak uslijed kojeg se povećava tvrdoća čelika te se sastoji od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije, držanja na toj temperaturi i gašenja iz područja austenitizacije. Na taj se način ostvaruje tvrda, pretežito martenzitna mikrostruktura. Martenzit je kruta otopina ugljika u  $\alpha$ -željezu. Bolje prokaljenim čelikom smatra se čelik koji u svojoj jezgri izratka lakše formira martenzitnu mikrostrukturu. Međutim, više martenzita u mikrostrukturi rezultira povećanjem tvrdoće, ali i povećanjem krhkosti obratka. Najznačajniji utjecaj na prokaljivost čelika imaju: maseni udio ugljika, dimenzije izratka, stupanj legiranosti, veličina austenitnog zrna, neotopljene nečistoće. Ispitivanje tvrdoće određuje se Rockwellovom C metodom.

Naposljetku, može se zaključiti da je korištenjem Jominyjeve metode određena procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela HT.22-DP.68 koji je izrađen od čelika 42CrMo4. Na osnovu provedenog pokusa zaključuje se da jezgra ima najmanju tvrdoću upravo zbog najmanje brzine ohlađivanja, dok površina ima najveću tvrdoću. Raspodjela toka tvrdoće po presjeku prikazana je U-krivuljom za slučaj gašenja u vodi bez pokretanja. Minimalna tvrdoća koja mora biti postignuta u jezgri određena je Burnsovom dijagramom te iznosi 45,5 HRC. S obzirom da je dobivena vrijednost tvrdoće u jezgri 54 HRC, zaključuje se da je uzorak u potpunosti prokaljen.

## POPIS LITERATURE

- [1] Kožuh, S., *Specijalni čelici-skripta*. Sisak, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2010.
- [2] Gabrić, I., Šitić, S., *Materijali II*. Split, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, 2015.
- [3] Smoljan, B., *Osnove toplinske obrade čelika*. Rijeka, Sveučilište u Rijeci, Pedagoški fakultet Rijeka, 1997.
- [4] Smoljan, B., *Toplinska obrada čelika, sivog i nodularnog lijeva*. Zagreb, Hrvatsko društvo za toplinsku obradu i inženjerstvo površine, 1999.
- [5] Krumes, D., *Toplinsk aobrada metala*. Slavonski Brod, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, 2000.
- [6] Pantelić, I., *Tehnologija termičke obrade čelika: Opšte termičke obrade*. 1. knjiga. Novi Sad, Radnički univerzitet "Radivoj Ćirpanov", 1974.
- [7] Liščić, B., Stupnišek, M., Cajner, F., Filetin, T., *Toplinska obrada praktikum*. Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1992.
- [8] Pirš, J., *Toplinska obrada metala*. Rijeka, Sveučilište u rijeci, Tehnički fakultet Rijeka, 1992.
- [9] Državni zavod za mjeriteljstvo: Metalni materijali, Ispitivanje tvrdoće prema Rockwellu, Narodne novine, Zagreb, 2000.
- [10] Kraut, B., *Strojarski priručnik*. Zagreb, Sajema, 2009.
- [11] Matijević, B., *Nastavni materijali: TII I PT - Toplinska obrada*. 2015.
- [12] <https://dokumen.tips/documents/fazne-pretvorbe-u-oevrstom-rastvoru-sfsbunioshr-ikladarsismfazne-pretvorbe.html?page=7>
- [13] <https://dokumen.tips/documents/v4-izbor-celika-na-temelju-prokaljivosti.html>

## POPIS SLIKA

<i>Slika 1. Opća klasifikacija čelika [1] .....</i>	<i>2</i>
<i>Slika 2. Dijagram stanja željezo-nikal [2] .....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 3. Dijagram stanja željezo-krom [2] .....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 4. Učinak masenih udjela legirajućih elemenata na temperaturu pretvorbe ferita u austenit [2] .....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 5. Shematski prikaz dijagrama toplinske obrade [3] .....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 6. Dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C [1].....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 7. Fazne pretvorbe eutektoidnog čelika [14] .....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 8. Kinetička krivulja difuzijskih pretvorbi [4].....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 9. Kinetička krivulja bezdifuzijskih pretvorbi [4] .....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 10. a) Dijagram kinetike transformacije; b) Promjena brzine transformacije prilikom ugrijavanja [4] .....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 11. Dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C s maksimalnom i minimalnom koncentracijom ugljika u austenitu [4] .....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 12. Izotermička pretvorba austenita [3] .....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 13. Pretvorba austenita u kontinuiranim uvjetima ugrijavanja [3].....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 14. Rast austenitnog zrna u ovisnosti u temperaturi [3].....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 15. Utjecaj brzine ohlađivanja austenita na temperaturu pretvorbe [14] .....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 16. Dio dijagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C [3] .....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 17. Ovisnost brzine perlitne pretvorbe o temperaturi [3] .....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 18. Pojava klica cementita uslijed perlitne pretvorbe [3] .....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 19. Eutektoidni sastav u ovisnosti o pothlađenju [3] .....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 20. Shema bainitne pretvorbe [3] .....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 21. Shema bainitne pretvorbe [3] .....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 22. Tetragonalna kristalna rešetka martenzita [4] .....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 23. Utjecaj masenog udjela ugljika na temperature martenzitne pretvorbe [3].....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 24. Igličasta mikrostruktura martenzita [3].....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 25. Ovisnost količine zaostalog austenita u martenzitnoj mikrostrukturi o masenom udjelu ugljika u primarnom austenitu [3] .....</i>	<i>34</i>
<i>Slika 26. Ovisnost tvrdoće martenzita o masenom udjelu ugljika [3] .....</i>	<i>34</i>

<i>Slika 27. Dijagram kaljenja te niskotemperaturnog popuštanja [3] .....</i>	<i>36</i>
<i>Slika 28. Dijagram optimalnih temperaturnih područja austenitizacije [2] .....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 29. TTT dijagram nekog podeutektoidnog čelika [2] .....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 30. Shematski prikaz raspodjele tvrdoće po presjeku nakon gašenja [4] .....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 31. Burnsov dijagram [4] .....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 32. Justov dijagram preporučenog stupnja zakaljenosti [5] .....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 33. Tok tvrdoće poslije gašenja na poprečnim presjecima valjaka [5] .....</i>	<i>44</i>
<i>Slika 34. Dijagram <math>D_k = f(D_i, I)</math> [5] .....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 35. Shematski prikaz čeonog gašenja Jominyjevom metodom (a) te ostvarene brzine ohlađivanja uzduž izvodnice (b) [5] .....</i>	<i>47</i>
<i>Slika 36. Shematski prikaz krivulja ohlađivanja Jominyjevog uzorka u TTT dijagramu [5] .....</i>	<i>48</i>
<i>Slika 37. Grafičko određivanje idealnog kritičnog promjera <math>D_i</math> i kritičnog promjera <math>D_k</math> [5] .....</i>	<i>49</i>
<i>Slika 38. Utiskivač namjenjen za Rockwellovu metodu [9] .....</i>	<i>49</i>
<i>Slika 39. Postupak mjerenja HRC metode [9] .....</i>	<i>50</i>
<i>Slika 40. Odnos između linije prokaljivosti i rasporeda tvrdoće: a) linija prokaljivosti; b) linija rasporeda tvrdoće [6] .....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 41. Crafts - Lamontovi dijagrami [13] .....</i>	<i>53</i>
<i>Slika 42. Crafts-Lamontovi dijagrami - nastavak [13] .....</i>	<i>54</i>
<i>Slika 43. Prikaz konstruiranja toka tvrdoće, odnosno, U-krivulje [7] .....</i>	<i>55</i>
<i>Slika 44. Nacrt strojnog dijela HT.22-DP.68. ....</i>	<i>56</i>
<i>Slika 45. Komparacija Jominy rezultata 42CrMo4 čelika s identičnim čelicima za poboljšavanje [2] .....</i>	<i>57</i>
<i>Slika 46. a) nacrt Jominyjevog uzorka; b) tokareni Jominyjev uzorak .....</i>	<i>58</i>
<i>Slika 47. Peć za kaljenje .....</i>	<i>59</i>
<i>Slika 48. Zaštitna oprema: a) rukavice; b) naočale; c) hvataljke .....</i>	<i>59</i>
<i>Slika 49. Naprava za Jominyjev pokus .....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 50. a) Čeono gašenje uzorka na početku; b) Gašenje uzorka pri kraju .....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 51. Shema uređaja za gašenje .....</i>	<i>61</i>
<i>Slika 52. a) Jominyjev uzorak nakon kaljenja; b) Kaljeni Jominyjev uzorak nakon brušenja .....</i>	<i>61</i>
<i>Slika 53. a) Tvrdomjer za ispitivanje tvrdoće Rockwellovom metodom; b) Početna pozicija ispitivanja tvrdoće uzorka .....</i>	<i>62</i>

<i>Slika 54. a) Izgled Jominyjevog uzorka po završetku mjerenja; b) Mjerenje udaljenosti od gašenog čela .....</i>	<i>62</i>
<i>Slika 55. Jominyjeva krivulja za čelik 42CrMo4.....</i>	<i>64</i>
<i>Slika 56. Usporedba dobivene Jominy krivulje s propisanim Jominy krivuljama .....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 57. U-krivulja po presjeku strojnog dijela HT.22-DP.68 .....</i>	<i>66</i>
<i>Slika 58. Burnsov dijagram [11].....</i>	<i>67</i>



## POPIS TABLICA

<i>Tablica 1. Utjecaj masenog udjela fosfora na neka mehanička svojstva [1] .....</i>	<i>5</i>
<i>Tablica 2. Karakteristike strukturnih oblika perlita [14] .....</i>	<i>26</i>
<i>Tablica 3. Rockwellove tvrdoće s obzirom na ispitivanje materijala [9] .....</i>	<i>50</i>
<i>Tablica 4. Karakteriske za postupak mjerenja Rockwellovom metodom [9].....</i>	<i>51</i>
<i>Tablica 5. Intenziteti gašenja za različita sredstva ohlađivanja [7] .....</i>	<i>55</i>
<i>Tablica 6. Kemijski sastav 42CrMo4 čelika [11] .....</i>	<i>57</i>
<i>Tablica 7. Dobivene vrijednosti tvrdoće od gašenog čela .....</i>	<i>63</i>
<i>Tablica 8. Očitane vrijednosti prokaljivosti za <math>H=1</math> .....</i>	<i>66</i>

## SAŽETAK

U ovome radu procijenjena je dubina prokaljivanja strojnog dijela HT.22-DP.68 nakon kaljenja.

U prvom dijelu obrađen je pojam čelika te je objašnjen utjecaj primjesa, nemetalnih uključaka i legirajućih elemenata.

U središnjem dijelu rada objašnjena je toplinska obrada čelika, fazne pretvorbe u čeliku uslijed toplinske obrade čelika te pojmovi zakaljivost i prokaljivost koji pridonose razumijevanju eksperimentalnoga dijela. Zatim, navedene su metode procjene prokaljivosti (Jominy metoda, Justova metoda, Grossmannova metoda). Najzastupljenija metoda procjene prokaljivosti jest upravo Jominy metoda na temelju koje je i proveden eksperimentalni dio rada. Jominy metoda temeljena je na kaljenju i ispitivanju tvrdoće uzorka.

Završni se dio odnosi na ispitivanje tvrdoće i procjene dubine prokaljenog sloja strojnog dijela HT.22-DP.68 primjenom Jominyjevog pokusa. Osim toga, opisano je i postrojenje za izvođenje Jominyjevog pokusa kao i sva korištena oprema prilikom izvođenja istog. Na temelju dobivenih rezultata konstruirana je Jominyjeva krivulja. Nadalje, primjenom navedene krivulje i Crafts-Lamontovih dijagrama očitane su vrijednosti prokaljivosti strojnog dijela HT.22-DP.68 za slučaj gašenja u vodi ( $H = 1$ ). Na temelju očitanih vrijednosti ucrtana je U-krivulja koja predstavlja tok tvrdoće po presjeku navedenog strojnog dijela. Iz svega navedenog zaključuje se da je navedeni strojni dio potpuno prokaljen.

**Ključne riječi:** čelik, toplinska obrada čelika, kaljenje, tvrdoća, Jominy metoda, dubina prokaljivanja

## SUMMARY

In this master's thesis the estimation of hardening depth of workpiece HT.22-DP.68 was approximated.

In the first part, the concept of steel is discussed and the influence of application of impurities, non-metallic inclusions and alloying elements are explained.

In the middle part of this thesis, the theory of steel heat treatment, phase transformation of steel due to steel treatment as well as quenching, hardening and hardenability are explained which contribute to better understanding of experimental part. Afterwards, methods of estimation of hardening depth (Jominy method, Just method, Grossmann method) were listed. The most common method of the estimation of hardening depth is Jominy method on which is experimental part based. The Jominy method is based on a quenching and hardness testing of the sample.

The final part refers to the hardness testing and estimation of hardening depth of workpiece HT.22-DP.68 by application of the Jominy experiment. In addition, the plant of performing the Jominy experiment is described, as well as all the all necessary equipment used in performing the same. Based on a measured results, a Jominy curve was constructed. Furthermore, using the resulting curve and Craft-Lamonts graph, the hardenability values of the workpiece HT.22-DP.68 for the quenching in water ( $H = 1$ ) were obtained. Based on the obtained values, the U-curve was draw which represents flow of hardness in the cross section of the workpiece HT.22-DP.68. From everything quoted it can be concluded that the workpiece HT.22-DP.68 is completely hardened.

**Keywords:** steel, steel heat treatment, hardening, hardness, Jominy method, hardening depth