

Postupak toplinske obrade strojnog dijela LD.22-ST.50

Dabović, Leopold

Undergraduate thesis / Završni 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:190:262989>

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

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



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA

LD.22-ST.50

Rijeka, rujan 2022.

Leopold Dabović

0069066154

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA

LD.22-ST.50

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

Komentor: doc. dr. sc. Matej Fonović

Rijeka, rujan 2022.

Leopold Dabović

0069066154

Rijeka, 16. ožujka 2022.

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

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Leopold Dabović (0069066154)**
Studij: **Preddiplomski stručni studij strojarstva**

Zadatak: **Postupak toplinske obrade strojnog dijela LD.22-ST.50 / Heat treating process of workpiece LD.22-ST.50**

Opis zadatka:

Potrebno je definirati proces toplinske obrade te opisati postrojenje za toplinsku obradu strojnog dijela LD.22-ST.50. Potrebno je proanalizirati rezultate toplinske obrade i donijeti odgovarajuće zaključke.

Nadalje, potrebno je proanalizirati proces toplinske obrade strojnog dijela LD.22-ST.50. Potrebno je teorijski opisati postupak i sve promjene u mikrostrukturi koje nastaju pri odabranom postupku toplinske obrade. Potrebno je opisati metode određivanja parametara toplinske obrade te pretkazivanja rezultata toplinske obrade.

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


Leopold Dabović

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:


Izv. prof. dr. sc. Dario Ilić


Prof. dr. sc. Robert Basan


Doc. dr. sc. Matej Fonović (komentor)

IZJAVA

Izjavljujem ja, Leopold Dabović, sukladno članku 8. Pravilnik o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskog stručnog studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci da sam samostalno uz nadzor i savjete mentora izv. prof. dr. sc. Darija Iljkicia napravio i izradio završni rad.

Zadatak je zadan 16. ožujka 2022.

U Rijeci, rujan 2022.

Leopold Dabović
0069066154

ZAHVALA

Od srca se zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Dariju Iljkiću što me prihvatio kao mentor za završni rad i što sam ga pod njegovom kontrolom uspješno izradio.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na pruženoj podršci tijekom studiranja.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TOPLINSKA OBRADA I FAZNE PRETVORBE ČELIKA.....	2
2.1. Toplinska obrada	2
2.2. Fazne pretvorbe čelika	3
2.2.1. Nastajanje austenita.....	4
2.2.2. Pretvorba austenita u perlit.....	5
2.2.3. Pretvorba austenita u ledeburit	6
2.2.4. Pretvorba austenita u martenzit	6
2.2.5. Pretvorba austenita u bainit	7
2.2.6. Pretvorba austenita u ferit	8
3. TTT (TIME, TEMPERATURE, TRANSFORMATION) DIJAGRAMI	9
3.1. Kontinuirani TTT dijagrami.....	9
3.2. Izotermički TTT dijagrami.....	10
3.3. Konstrukcija TTT dijagrama	11
4. POBOLJŠAVANJE ČELIKA.....	13
4.1. Kaljenje čelika.....	14
4.2. Popuštanje čelika.....	15
4.3. Kaljivost čelika.....	17
4.3.1. Zakaljivost.....	17
4.3.2. Prokaljivost čelika	19
4.4. Izotermno poboljšavanje čelika.....	23
4.5. Gašenje	25
5. ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE	29
6. OPREMA ZA TOPLINSKU OBRADU	31
6.1. Peći u obliku kutije.....	31
6.2. Integrirane peći sa košarom za gašenje	32
6.3. Cirkulacijske peći	32

6.4. Peći sa pomičnim dnom	33
6.5. Peći za kontinuiranu obradu	34
7. POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA LD.22-ST.50.....	35
7.1. Strojni dio LD.22-ST.50.....	35
7.2. Parametri toplinske obrade.....	35
7.3. Operacijski listovi	46
7.4. Probno poboljšavanje	48
8. ZAKLJUČAK	51
LITERATURA.....	52
PRILOZI.....	54
POPIS OZNAKA	56
POPIS SLIKA	57
POPIS TABLICA.....	59
SAŽETAK.....	60
SUMMARY	61

1. UVOD

U povijesti i razvoju civilizacije možemo vidjeti tko je imao bolji čelik, kao i princip njegove obrade duže je vladao i u tom vremenskom periodu bio je na vrhuncu moći. Toplinska obrada čelika također je zastupljena u vojnoj industriji, samim time se razvila i razgranala u druge grane industrije kao npr. autoindustriji, medicini i dr. Najzahtjevnija je zadaća pritom proizvesti što jeftinije, a što kvalitetnije. U radu ćemo opisati mijenjanje kemijskih sastava, površinskih slojeva čeličnih izradaka, spomenut ćemo peći i postupke kako se dolazi do željene obrade. Upotreba čelika nam je masovna u današnjem svijetu. Upotrebljava se od najobičnije šivaće igle, pa sve do lokomotive.

Tema završnog rada je Postupak toplinske obrade strojnog dijela LD.22-ST.50 i određivanje parametara za toplinsku obradu. Opisat ćemo postupak kaljenja, kao i postupak visokotemperaturnog popuštanja. Pošto se ovi postupci uvrštavaju u postupke toplinske obrade, tada ćemo u radu detaljnije objasniti promjene mikrostrukture čelika. Svojstva koja želimo dobiti su povećanje žilavosti, duktilnosti, očvršćivanje metala. Za početak trebamo odrediti temperature i vrijeme kaljenja, kao i medij hlađenja. Kada ohladimo naš predmet obrade onda izmjerimo njegovu tvrdoću. Nakon izmjerene tvrdoće, započinjemo s postupkom određivanja parametara za visokotemperaturno popuštanje temperature i vrijeme, kao i medij hlađenja. Nakon hlađenja ćemo ponovno izmjeriti tvrdoću predmeta obrade, ako bude zadovoljavao predmet obrade željenu tvrdoću, posao je završen. Ako ne bude zadovoljavao željenu tvrdoću ponavljamo toplinsku obradu sve dok ne dobijemo zadovoljavajuću tvrdoću. U radu ćemo također opisati postupke mjerenja tvrdoće.

Današnji život bio bi nam potpuno nezamisliv bez postupka toplinske obrade, tj. kada metali ne bi mogli mijenjati svoja svojstva.

2. TOPLINSKA OBRADA I FAZNE PRETVORBE ČELIKA

2.1. Toplinska obrada

Toplinskom obradom smatramo zagrijavanje slitine na visoke temperature i poslije toga hlađenje, tako bismo dobili odgovarajuća svojstva materijala, a samim time i promijenili njegovu mikrostrukturu. Osim toplinske obrade mogli bismo navesti još deformiranje i legiranje kao jedne od načina promjene svojstva slitine. Osim što možemo čelik obraditi, također se može toplinska obrada primijeniti i na ostale materijale, kao što su staklo, keramika i dr. materijali. Najvažniji razlozi za toplinskom obradom čelika su:

- vlačna čvrstoća,
- duktilnost,
- očvršćivanje,
- žilavost.

Osnovna karakteristika svake toplinske obrade je temperatura (T) i vrijeme (t). Ove karakteristike su izvedene iz: brzine zagrijavanja, vremena pregrijavanja, držanja na određenoj temperaturi, brzine hlađenja.

Toplinska obrada se može podijeliti na sljedeće postupke, kao što su:

- popuštanje,
- žarenje,
- normalizacija,
- kaljenje.

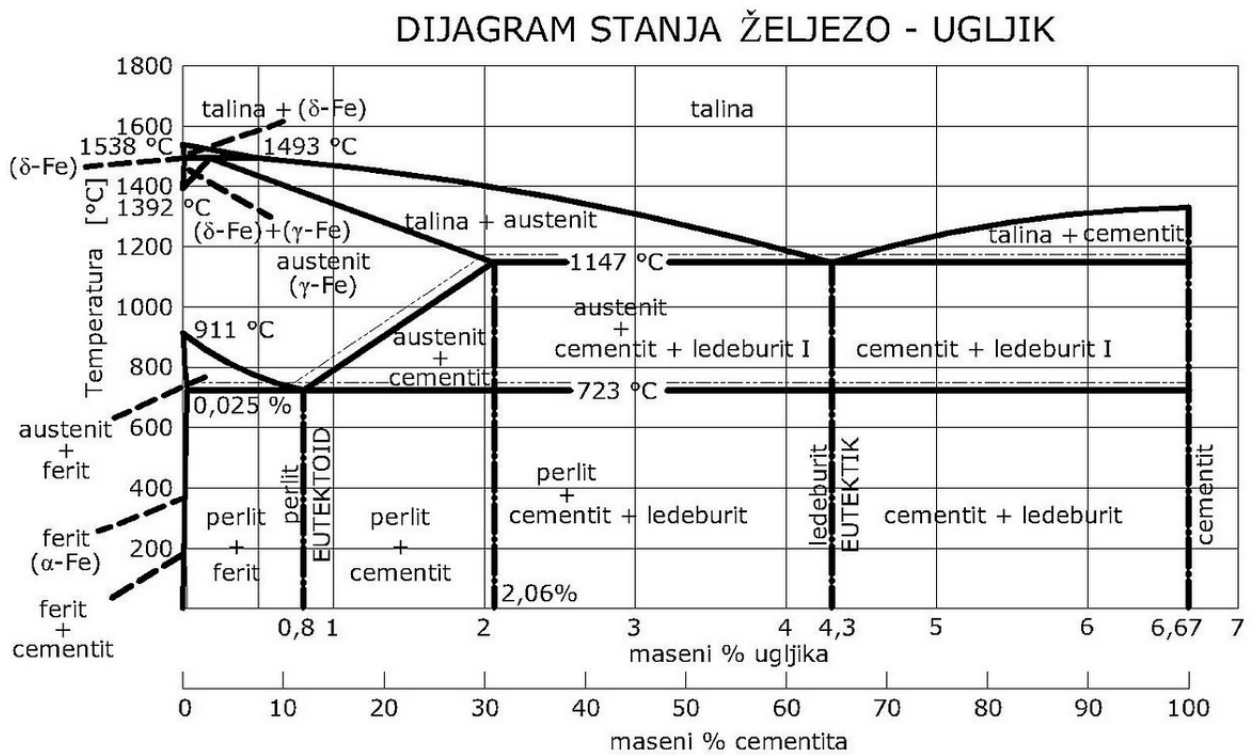
Na slici 2.1. prikazan je kaljeni čelik nakon popuštanja. Na lijevoj strani je prikazana temperatura 204 °C, a na desnoj temperatura od 337 °C zagrijavanja.



Slika 2.1. Prikaz površine kaljenog čelika nakon popuštanja [1]

2.2. Fazne pretvorbe čelika

Na slici 2.1. prikazan je dijagram Fe-Fe₃C iz kojeg možemo vidjeti tipične temperature prekrystalizacije postignutim sporim hlađenjem čelika ili sporim ugrijavanjem čelika, kao što možemo vidjeti i karakteristična fazna područja.



Slika 2.2. Stabilni dijagram stanja Fe-Fe₃C [2]

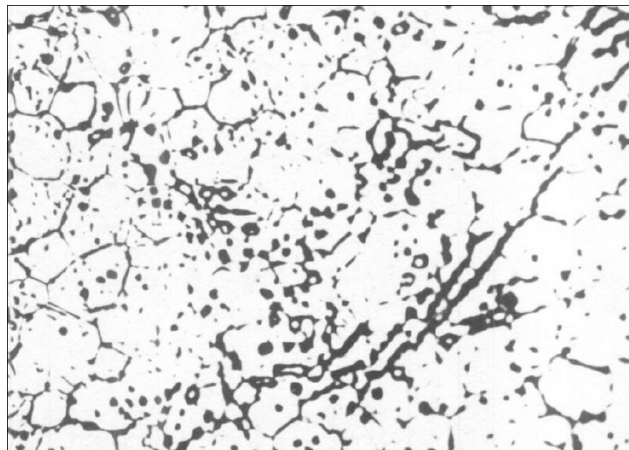
2.2.1. Nastajanje austenita

Za naziv možemo zahvaliti engleskom metalurgu Williamu Chandler Roberts-Austen. Austenit najlakše nastaje na granici feritne i cementitne faze na kojoj se najlakše pojavljuju mjesta u kojima za određenu temperature i kemijski sastav u području kritične veličine austenite ima minimalnu slobodnu energiju. Daljnji rast austenitne faze ostvaruje se, prije svega, difuzijom ugljika u novonastaloj fazi (austenitu).

Iz austenita dobijemo strukture:

- martenzit,
- perlit,
- bainit.

Na slici 2.3. prikazana je mikrostruktura austenita i cementita. Mikrostruktura austenita prikazana je bijelom površinom, a mikrostruktura cementita crnom površinom.



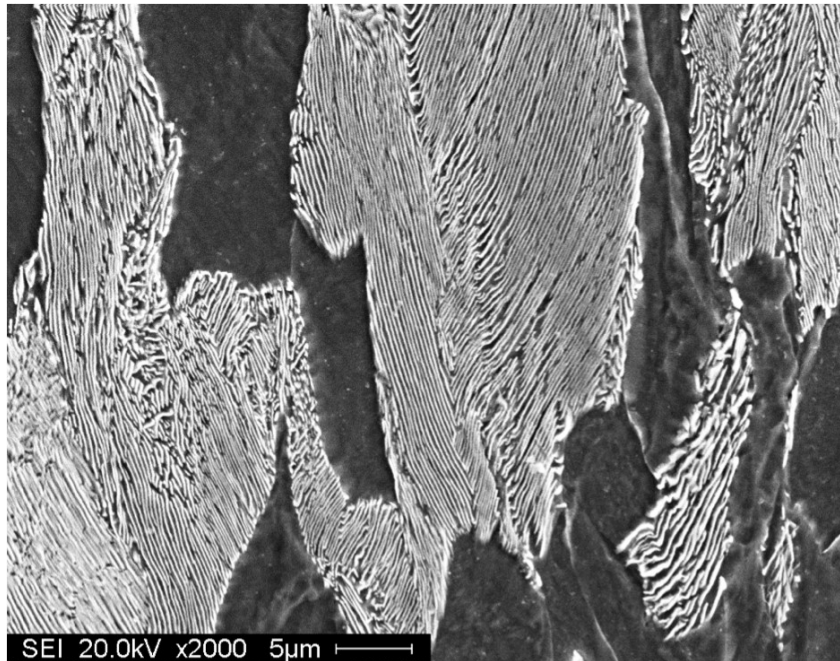
Slika 2.3. Mikrostruktura austenita i cementita [3]

Svojstva austenitnih čelika [4]:

- nemagnetični su zbog austenitne strukture
- otporni su na organske i anorganske kiseline, lužine i soli,
- u određenim uvjetima su podložni interkristalnoj koroziji.

2.2.2. Pretvorba austenita u perlit

Kada imamo jako sporija hlađenja austenit se raspada u perlit. Svojtvo perlita (slika 2.4.) je velika mekanost i duktilnost, ali ako imamo ugljik koji je veći od 0,8%, karbidne pločice mogu biti jako velike, te ako nam se nalaze na nepoželjnim mjestima, mogu otežavati strojnu obradu.



Slika 2.4. Prikaz izbrušenog perlita pod povećanjem od 2000 puta [5]

Brzina pretvorbe perlita ovisi o:

- brzini stvaranja jezgara transformacije,
- stabilnosti austenita.

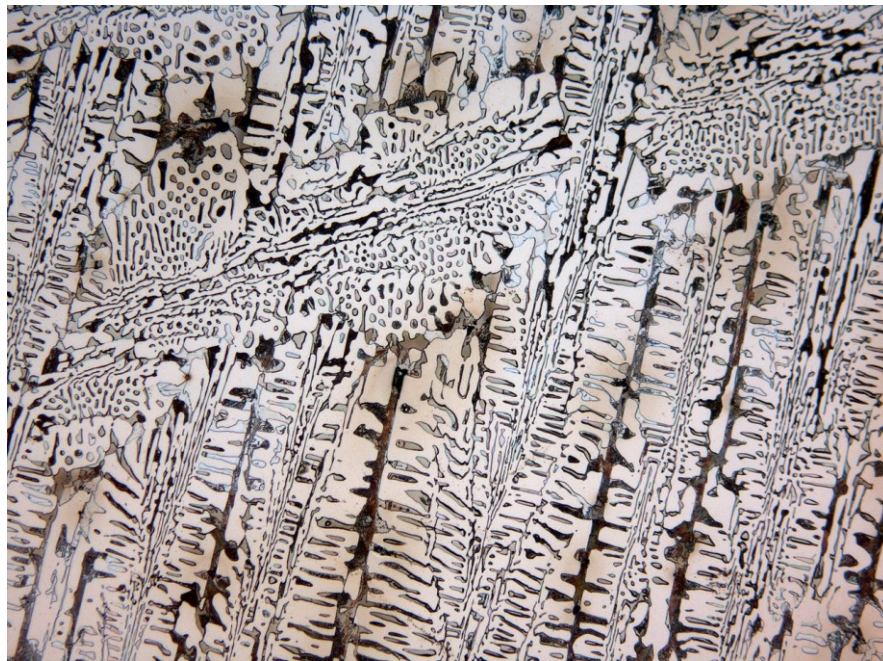
Kada imamo niže temperature pretvorbe, tada nam je razmak između lamela manji. Kod mehaničkih svojstava pri njihovom određivanju bitan je razmak lamela ferita i cementita. Ako su nam lamele manje to je tvrdoća veća, zbog toga će nam žilavost i perlitna plastičnost opadati. Imamo tri mikrostrukture, ako gledamo gustoću i veličinu slaganja lamela cementita i ferita:

- trastit,
- perlit,
- sorbit.

2.2.3. Pretvorba austenita u ledeburit

Ledeburit je glavni sastojak lijevanog željeza. Za ledeburit možemo reći da je eutektična mješavina cementita i austenita. Nastaje uz 4,3% ugljika i temperature oko 1147 °C. Maseni udio je dobio naziv po metalurgu Karl Hindrich Adolf Ledeburg, a otkrio ga je 1882. godine.

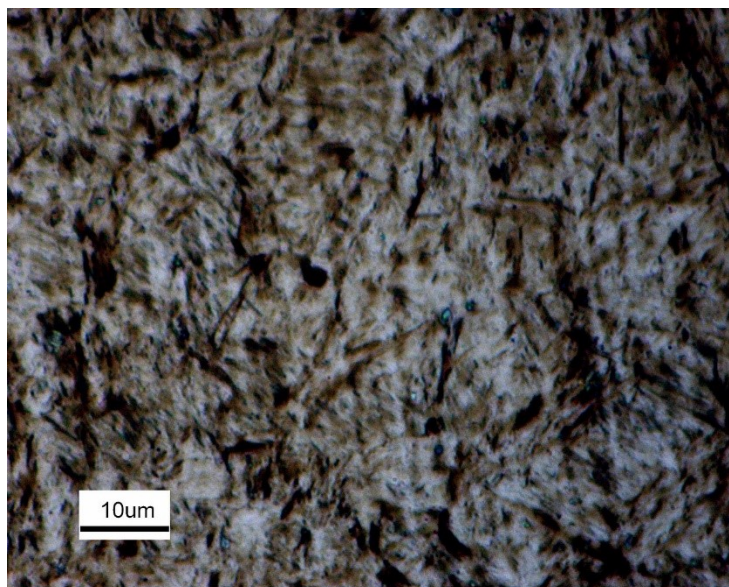
Za dobivanje ledeburita moramo imati između 2,06% i 6,67% sadržaja ugljika u željezu. Mikrostruktura ledeburita prikazana je na slici 2.5.



Slika 2.5. Mikrostruktura ledeburita [6]

2.2.4. Pretvorba austenita u martenzit

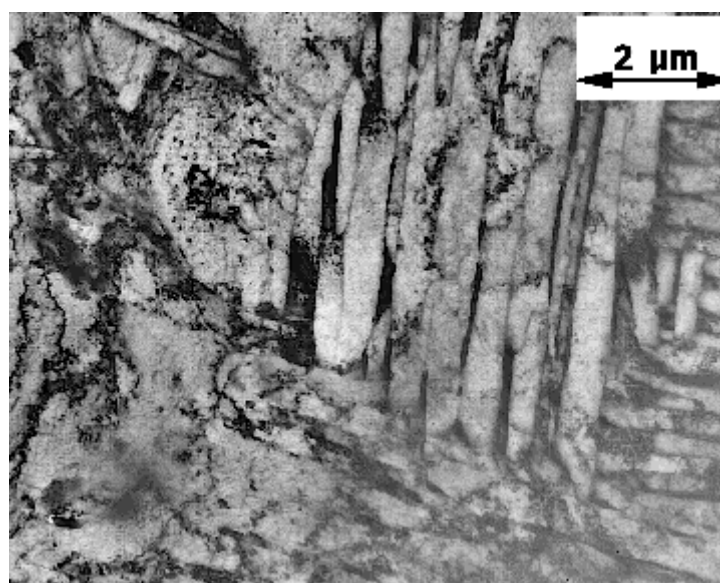
Martenzit možemo smatrati krutom otopinom ugljika u volumno centriranoj tetragonalnoj kristalnoj rešetki željeza. Kod kaljenja u mikrostrukturi u obliku igličastih kristala se javlja martenzit. Martenzit se naziva po njemačkom metalurgu Adolfu Martensu. Martenzit možemo iskoristiti kao odličnu pomoć za podizanje čvrstoće čelika jer je tvrd (oko 728 HB-tvrdoća po brinellu). Na slici 2.6. prikazana je mikrostruktura martenzita kod niskolegiranoog čelika.



Slika 2.6. Prikaz martenzita kod niskolegiranog čelika 42CrMo4 (AISI 4140) [7]

2.2.5. Pretvorba austenita u bainit

Bainit (slika 2.7.) se dobija na nižim temperaturama kada austenit ima između donje i gornje kritične brzine hlađenja, tada se napravi struktura sastavljena od cementita i ferita, ali je različita od perlita. Bainit možemo smatrati vrlo sličnim perlitu, ali je razlika u brzini hlađenja, jer mu je potrebna veća brzina hlađenja od brzine potrebne da bi se perlit formirao. Bainit se naziva po američkom metalurgu Edgaru Bainu.



Slika 2.7. Prikaz bainita kod smirenog (dezoksidiranog) čelika [8]

2.2.6. Pretvorba austenita u ferit

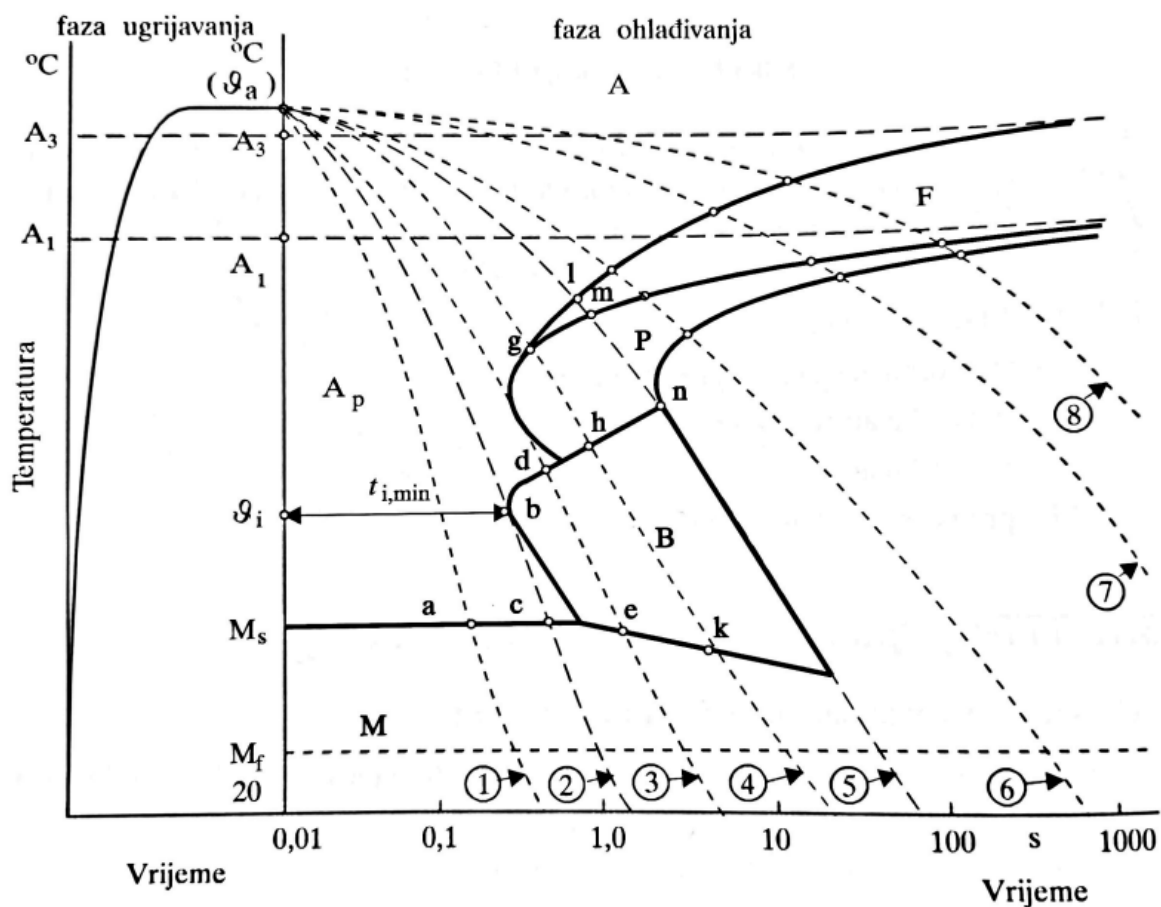
Ferit (alfa-željezo), možemo ga smatrati nemagnetičnim, ako je do 768 °C do tada je stabilan. Magnetičan postaje ispod te temperature. Vlačna čvrstoća mu je otprilike 270 N/mm², a tvrdoća mu je otprilike 78 HB.

3. TTT (TIME, TEMPERATURE, TRANSFORMATION) DIJAGRAMI

TTT dijagrami koji u svom nazivu označavaju vrijeme, temperaturu, transformaciju (Time, Temperature, Transformation), prikazuju nam temperaturu čelika određenog sastava u logaritmu vremena. TTT dijagrami vrijede samo za praćenje pojava pri ohlađivanju. Ovisno o načinu ohlađivanja mogu biti kontinuirani (neprekidni) i izotermički TTT dijagrami.

3.1. Kontinuirani TTT dijagrami

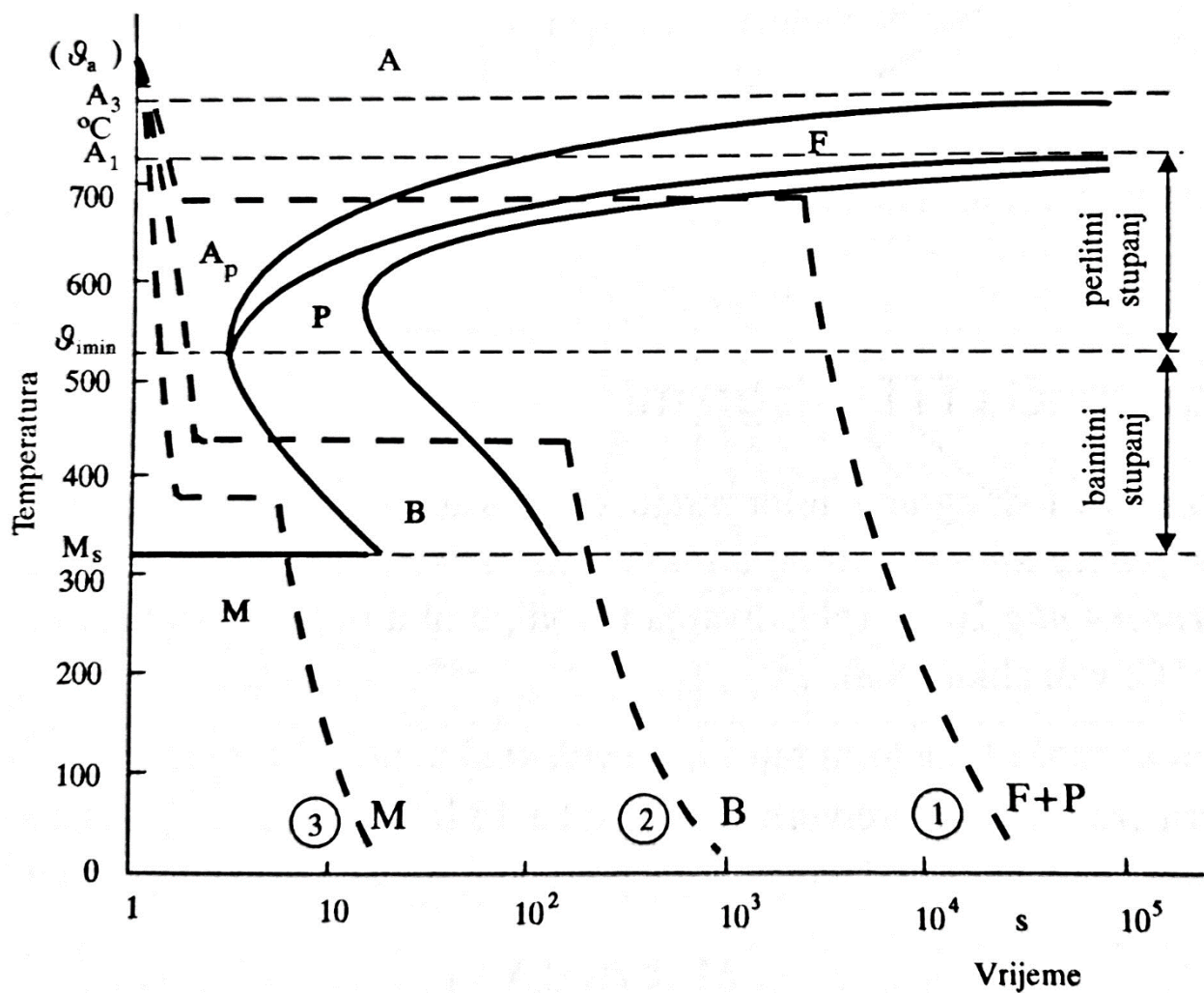
Kontinuirani TTT dijagrami služe za praćenje promjena mikrostrukture pri neprekidnom (kontinuiranom) ohlađivanju čelika s temperature austenitizacije na temperaturu oko 20 °C (ohlađivanje u vodi, u ulju ili na zraku). Na slici 3.1. prikazan je TTT dijagram jednog austenitiziranog podutektoidnog ugljičnog čelika sa fazama ugrijavanja i kontinuiranog ohlađivanja.



Slika 3.1. Kontinuirani TTT dijagram austenitiziranog podutektoidnog čelika [9]

3.2. Izotermički TTT dijagrami

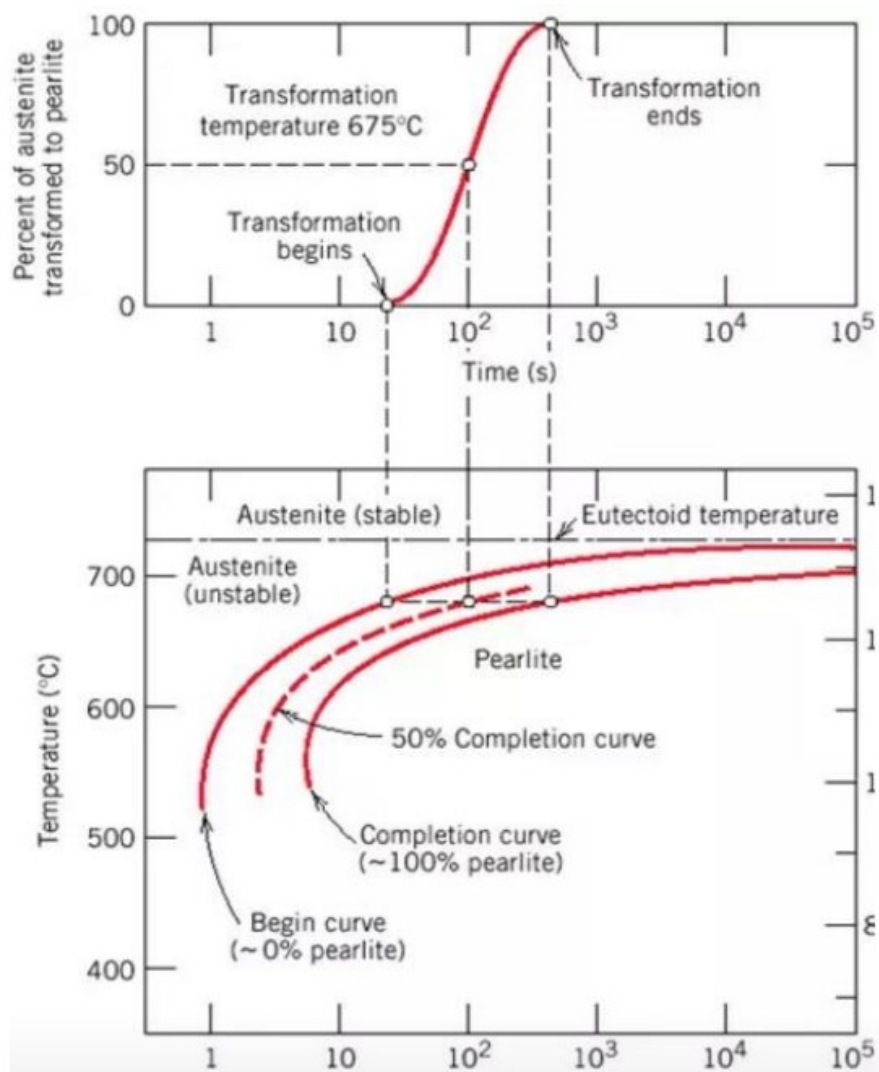
Izotermički TTT dijagrami prikazuju promjenu mikrostrukture čelika kod izotermičke transformacije pothlađenog austenita do koje dolazi ako se austenit što brže pothladi na neku temperaturu izotermičke pretvorbe te ako je trajanje držanja na toj temperaturi dovoljno dugo. Razlikuju se od kontinuiranih TTT dijagrama po načinu očitavanja pretvorbi mikrostrukture i postignutih tvrdoća, te po kvantitativnim podacima trajanja i temperatura pretvorbi. Na slici 3.2. prikazan je izotermički TTT dijagram podeutektoidnog ugljičnog čelika.



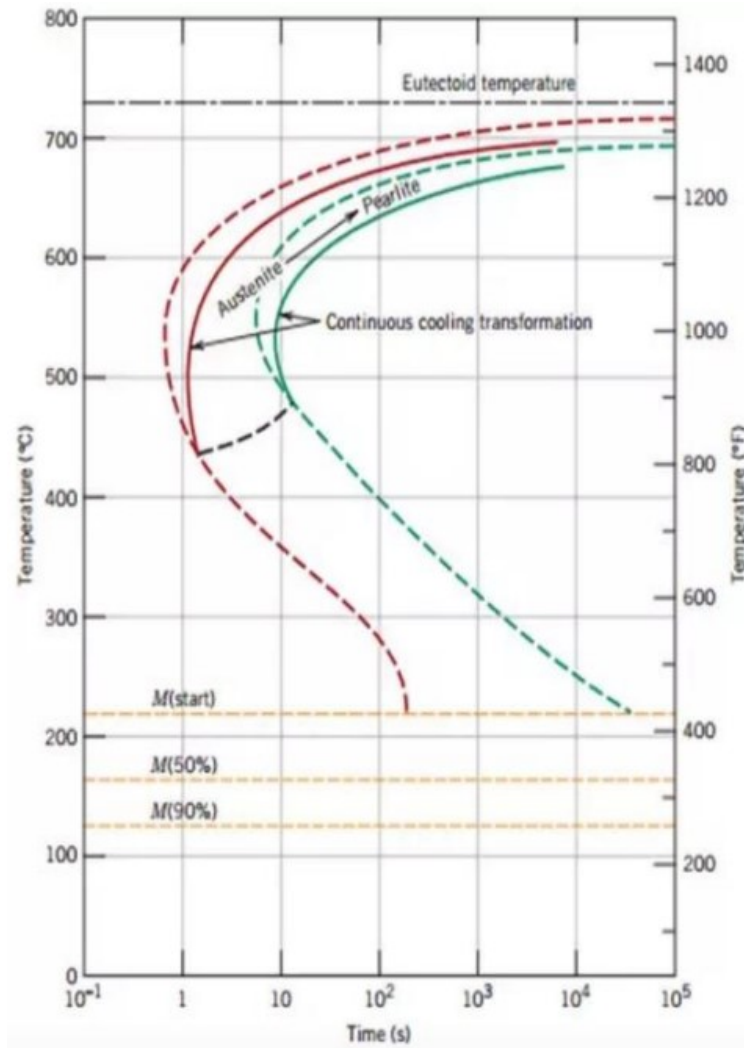
Slika 3.2. Izotermički TTT dijagram podeutektoidnog ugljičnog čelika (s oko 0,5% C) [9]

3.3. Konstrukcija TTT dijagrama

Kako bismo uspješno napravili TTT dijagram za to nam je potreban jako veliki broj laboratorijskih pokusa. Jako puno materijala od istog sastava se prvo austenitizira pa se hladi i poslije toga zadržava na određenoj temperaturi u različitim vremenima. TTT dijagram dobijemo kada zabilježimo vrijeme kada bi nam završila i započela transformacija austenita, nakon toga imamo točku završetka i početka transformacije ucrtane za različite temperature. Dijagram TTT dobijemo kada spojimo te točke. U sljedećim dijagramima (slika 3.3., slika 3.4.) imamo prikazanu konstrukciju TTT dijagrama.



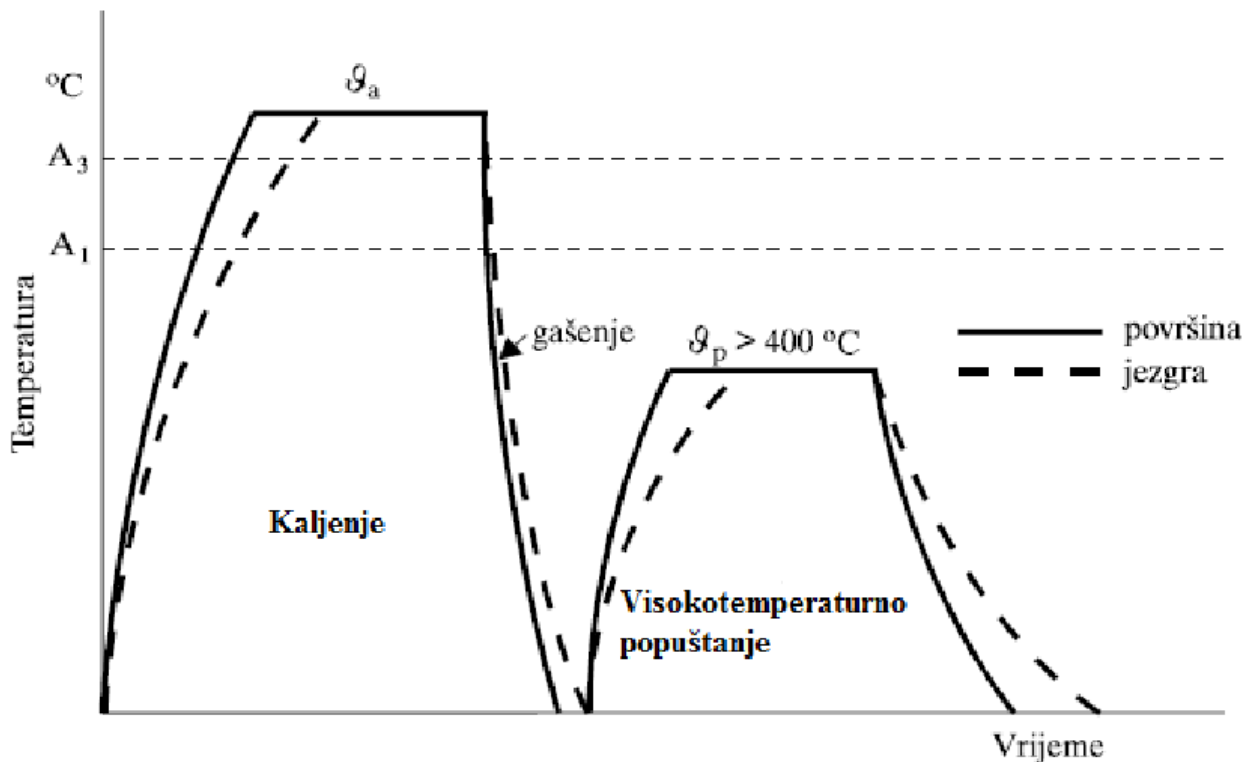
Slika 3.3. Konstrukcija TTT dijagrama [10]



Slika 3.4. Uprtavanje TTT krivulje [10]

4. POBOLJŠAVANJE ČELIKA

Poboljšavanje čelika, sastoji se od kaljenja i visoko temperaturnog popuštanja. U praksi poboljšavanje čelika možemo nazvati i oplemenjivanje. To je jedan od najbitnijih i najtežih toplinskih obrada čelika. Čelici moraju imati sastav ugljika 0,25% do 0,6% (kao i manji udio od navedenog postotka, ali to vrijedi samo za određenu vrstu čelika), kako bi se mogli podvrgnuti postupku poboljšavanja. Postupak poboljšavanja čelika prikazan je na dijagramu na slici 4.1.



Slika 4.1. Dijagram poboljšavanja čelika [9]

Najosnovnija zadaća ovih postupaka je dobiti kombinaciju:

- tvrdoće,
- žilavosti,
- čvrstoće.

Poboljšavanje čelika možemo podijeliti na dva postupka:

1. izotermno poboljšavanje,
2. klasično poboljšavanje.

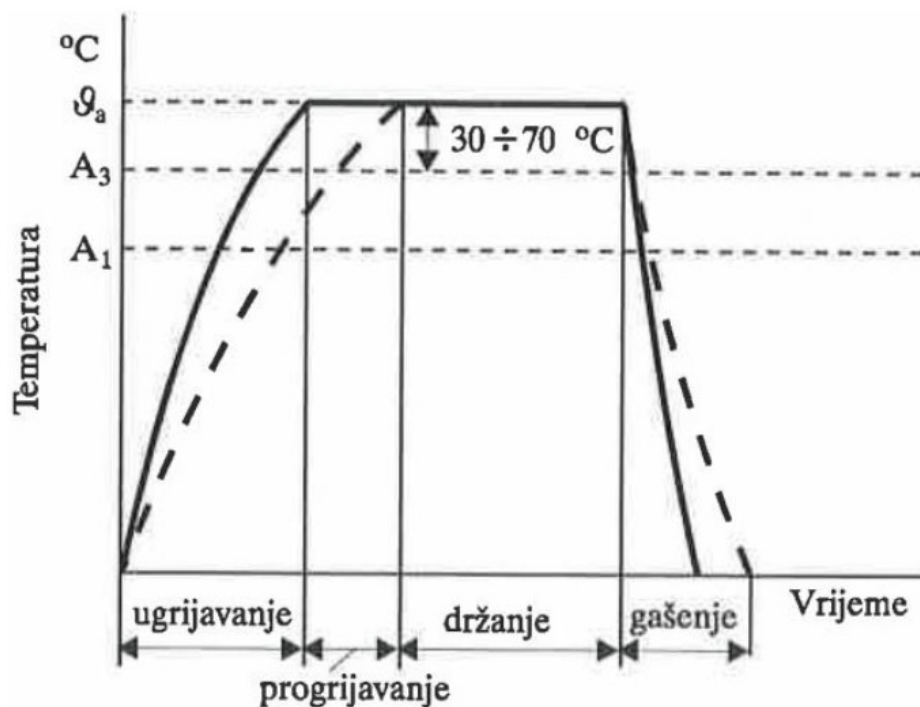
4.1. Kaljenje čelika

Temeljna svrha kaljenja čelika:

- postizanje što jednoličnijeg prokaljivanja (tj. što jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku),
- postizanje maksimalno moguće tvrdoće ovisno o udjelu C u čeliku (Bursnov dijagram).

Postupak kaljenja sastoji se od (slika 4.2.):

- ugrijavanja na temperaturi austenitizacije i progrijavanja,
- držanja pri temperaturi austenitizacije (u svrhu otapanja ugljika i i legirajućih elemenata u austenitu),
- gašenja (u svrhu postizanja martenzitne mikrostrukture).

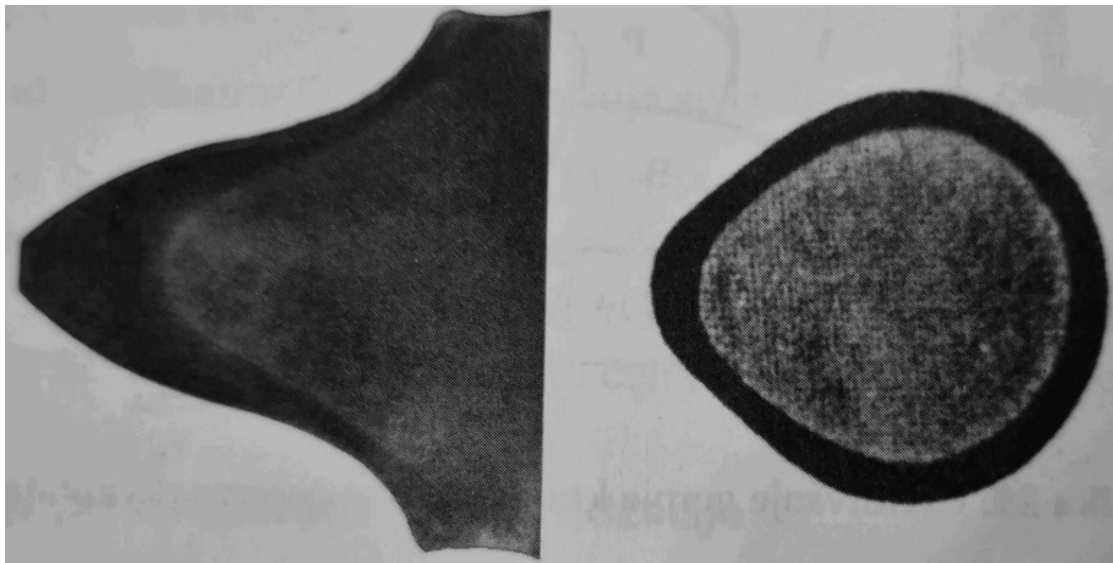


Slika 4.2. Dijagram postupka kaljenja nekog podeutektoidnog čelika [9]

Osim kaljenja mase strojnog dijela u praksi se primjenjuju i postupci lokalnog (površinskog) kaljenja. Pri tim se postupcima ugrijavaju samo neki dijelovi volumena proizvoda koje treba kaljenjem otvrdnuti. Primjenjuju se izvori topline velike gustoće energije:

- snop elektrona ,
- plinski plamenici,
- laserski snop,
- inducirana električna energija.

Na slici 4.3. prikazani su presjeci površinski zakaljenih čeličnih dijelova.



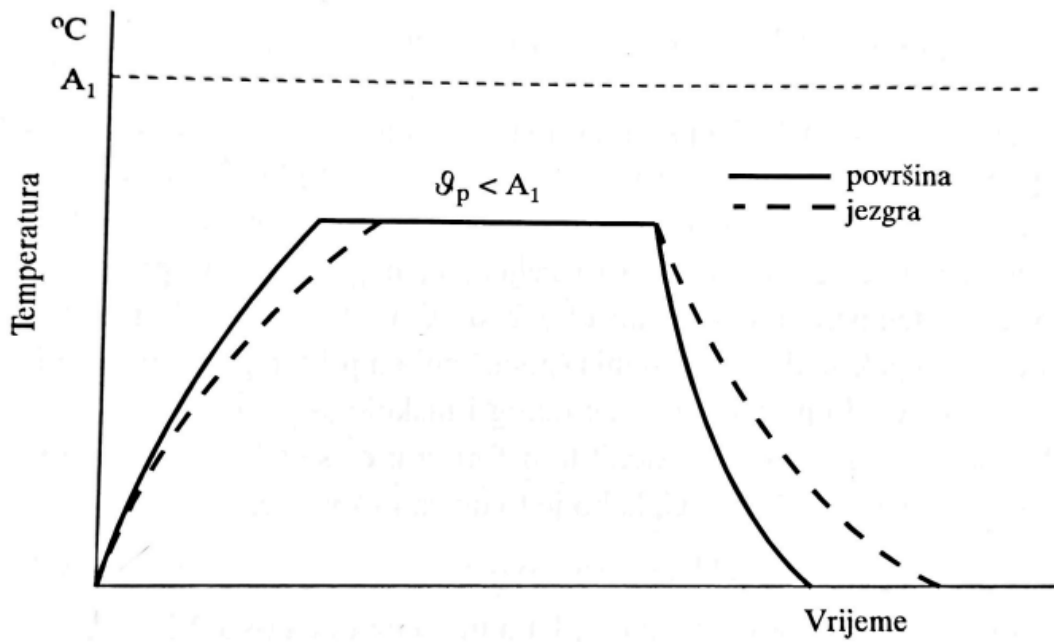
Slika 4.3. Presjek površinski zakaljenih čeličnih dijelova [9]

4.2. Popuštanje čelika

Popuštanje je postupak ugrijavaanja kaljenog čelika na neku temperaturu ispod temperature A_1 u svrhu (slika 4.4.):

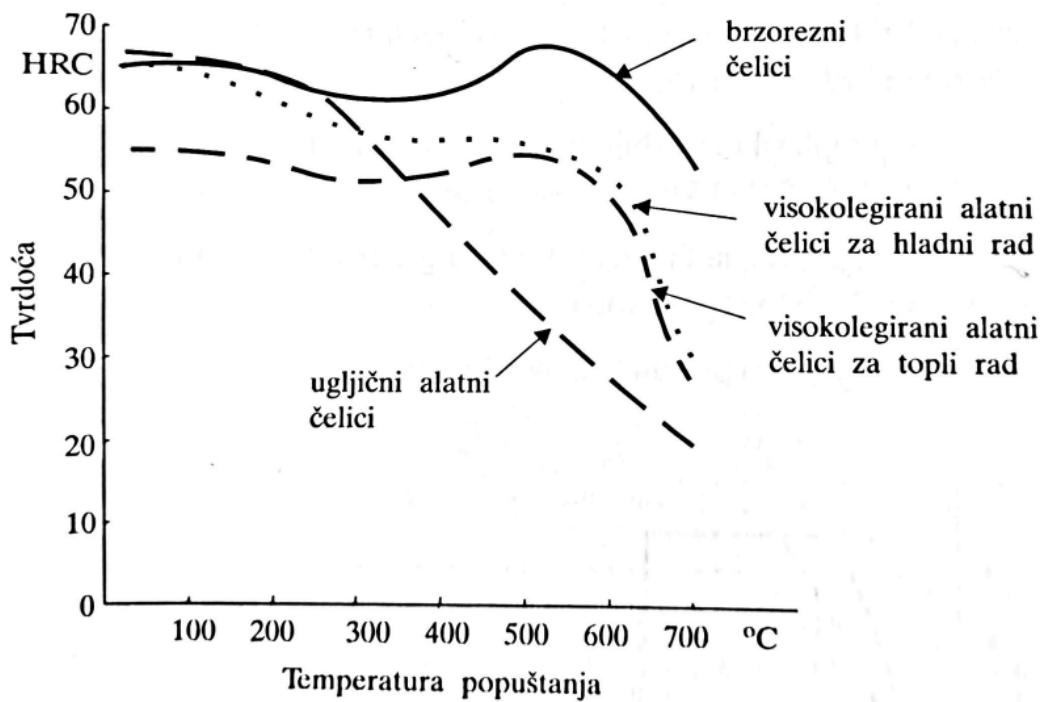
- sniženja (redukcije vlastitih zaostalih naprezanja (napetosti) martenzita,
- postizanje dimenzijske postojanosti (kod visokolegiranih alatnih čelika pretvorbom zaostalog austenita u martenzit i karbid popuštanja),
- povišenja žilavosti martenzita postignutog kaljenjem.

Popuštanjem se redovno snižuje tvrdoća postignuta kaljenjem, no to sniženje nikako nije cilj, nego samo nužna posljedica popuštanja.



Slika 4.4. Dijagram popuštanja čelika [9]

Na slici 4.5. prikazan je dijagram popuštanja za različite vrste čelika.



Slika 4.5. Dijagrami popuštanja različitih čelika [9]

Prema visini temperature postupci popuštanja dijele se na:

- niskotemperaturno popuštanje (manje od 220 °C),
- srednjetemperaturno popuštanje (od 220 °C do 400 °C),
- visokotemperaturno popuštanje (više od 400 °C).

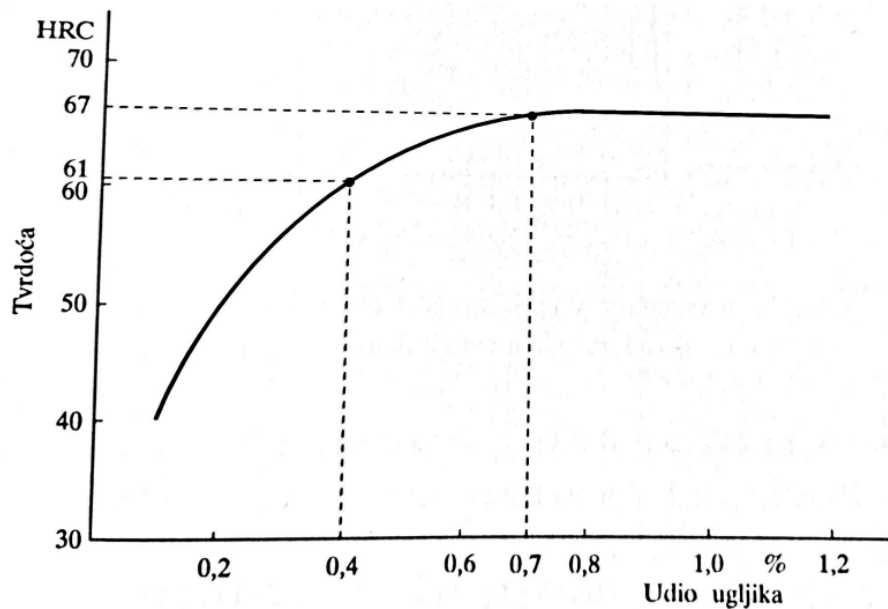
4.3. Kaljivost čelika

Kaljivost čelika možemo smatrati kao svojstvo čelika s temperature austenitizacije:

- zakaljivost (postigne što višu tvrdoću na površini),
- prokaljivost (postane što jednoličnija tvrdoća na poprečnom presjeku).

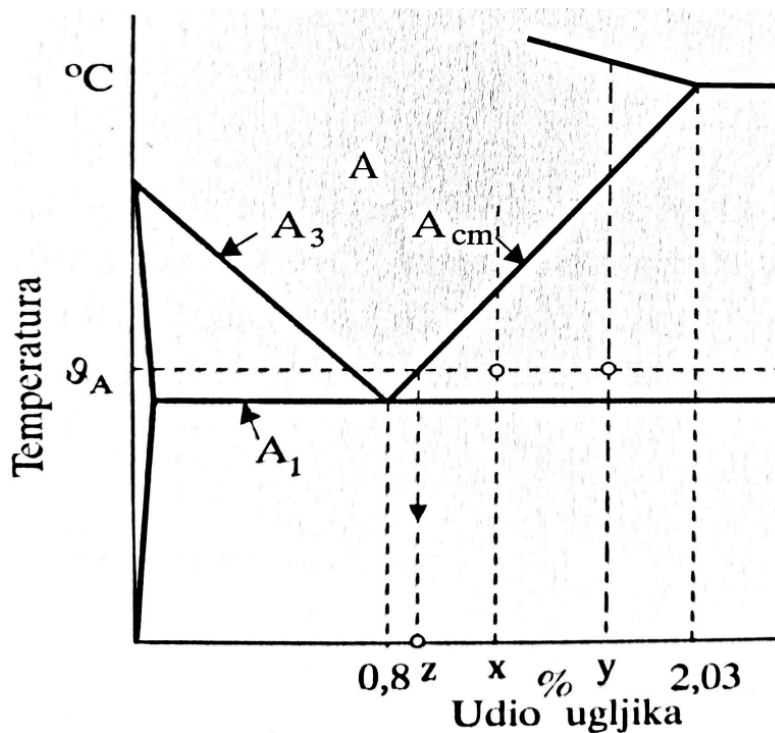
4.3.1. Zakaljivost

Bolja je zakaljivost, ako imamo više sadržaja ugljika u procesu. To možemo vidjeti iz Burnsovog dijagrama (slika 4.6.) u kojem je prikazana maksimalno postiziva tvrdoća zakaljenih čelika u ovisnosti o udjelu ugljika.



Slika 4.6. Burnsov dijagram [9]

Odnosno, zakaljivost ovisi o udjelu ugljika u čeliku. Čelik koji ima 0,7% C bolje je zakaljiv od čelika sa 0,4% C, zato što je postiziva tvrdoća veća nego postiziva tvrdoća čelika s nižim udjelom ugljika (slika 4.7.).



Slika 4.7. Koncentracija ugljika u austenitu nakon austenitiziranja nadeutektoidnih čelika različitih udjela ugljika (x i y) [9]

Tvrdoća potpuno zakaljenog čelika ovisi o:

1. sadržaju ugljika,
2. intezivnosti gašenja.

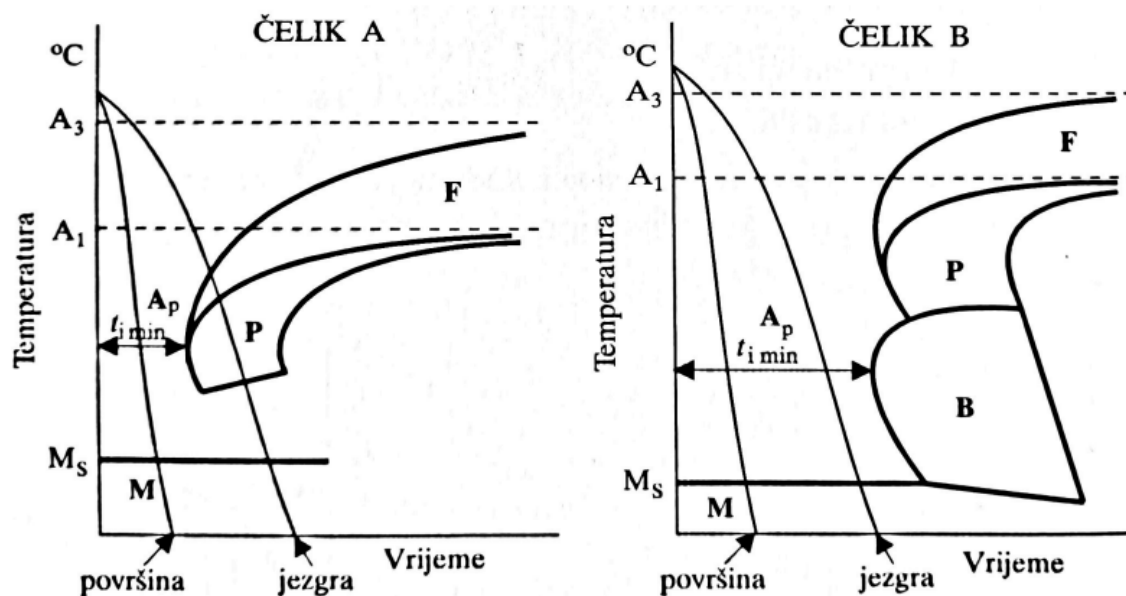
4.3.2. Prokaljivost čelika

Prokaljivost čelika nam je jako bitna za poboljšavanje. Pri gašenju čelika intezitet hlađenja ovisi u kojem sredstvu se hladi. To se snižava sljedećim redoslijedom:

- slana voda,
- obična voda 20 °C,
- topla voda,
- ulje,
- komprimirani zrak,
- mirni zrak.

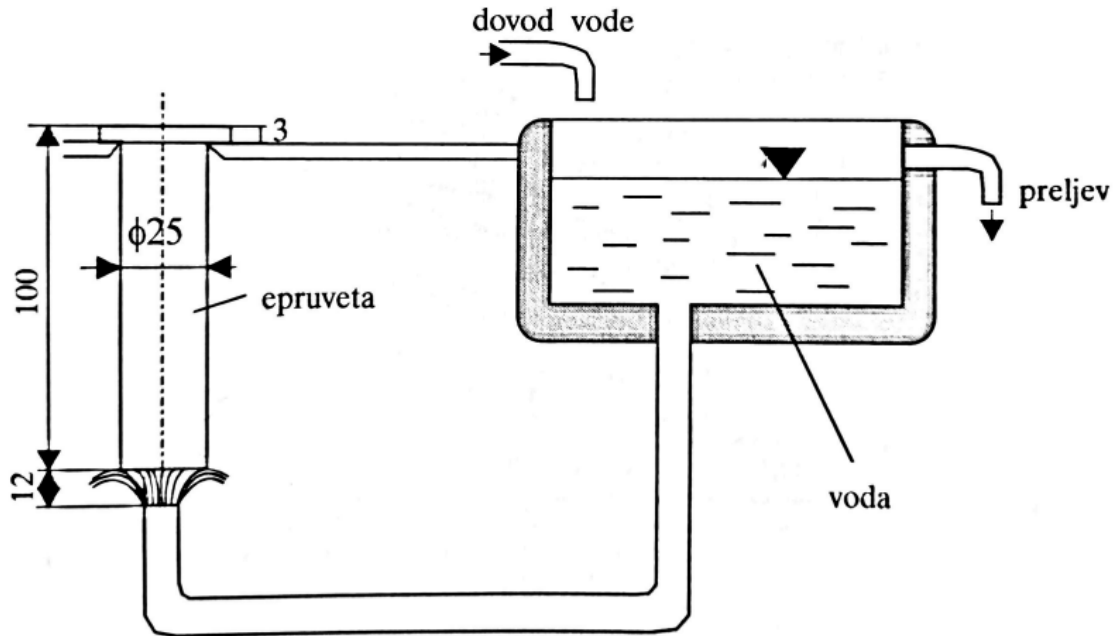
Ako želimo dobiti što bolju prokaljivost zadanog čelika onda nam predmet koji se kali treba biti što manji.

Usporedit ćemo dva čelika koja su različita jednakih promjera. Na slici 4.8. vidimo da će bolje biti prokaljiv onaj čelik koji ima dulje trajanje inkubacije pothlađenog austenita.



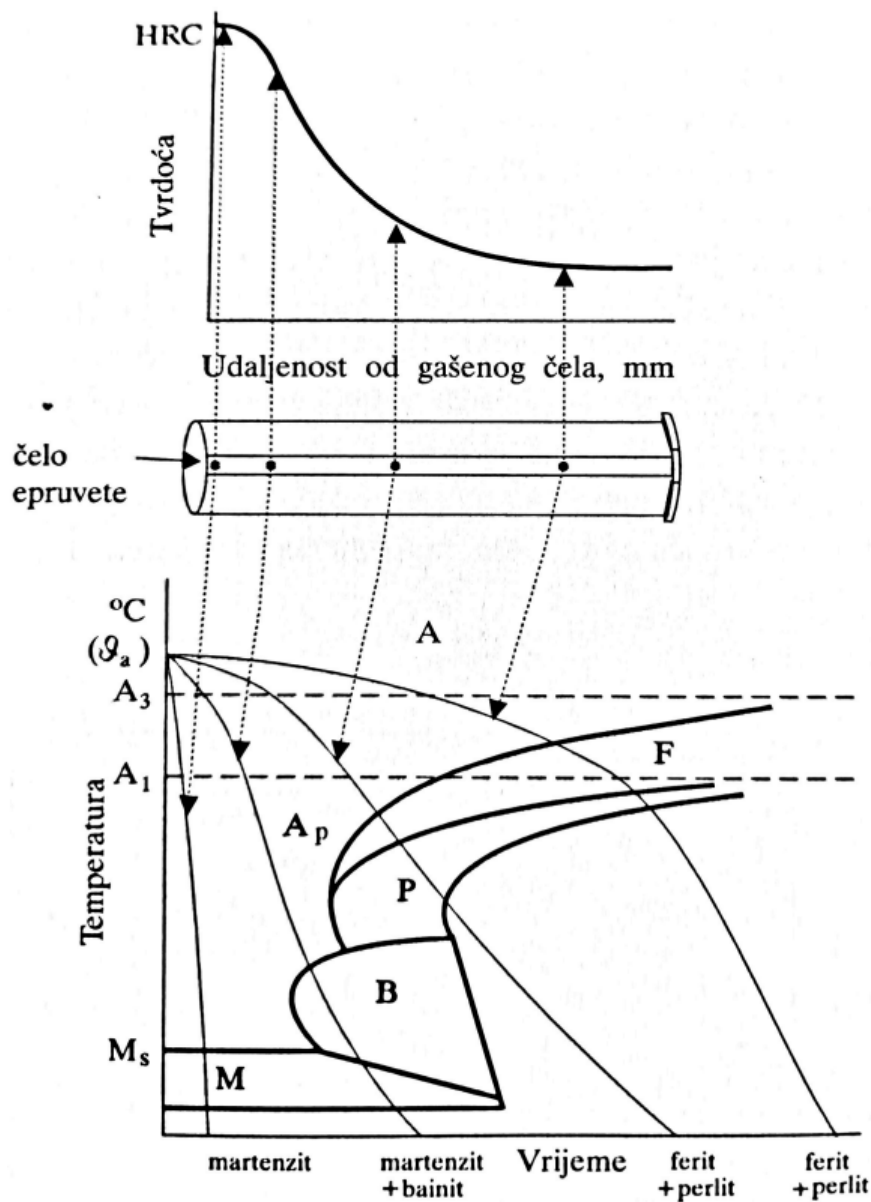
Slika 4.8. TTT-dijagrami kontinuiranog ohlađivanja dvaju različitih čelika [9]

Za ispitivanje prokaljivosti imamo metodu Jominy. Imamo epruvetu propisanog oblika i dimenzija, koja se nakon austenitizacije intenzivno hladi (samo čelo) u posebnom uređaju, koja je prikazana na slici 4.9.



Slika 4.9. Shema uređaja za ohlađivanje epruvete Jominy metodom [9]

Ovako smo na jednom probnom uzorku postigli niz različitih brzina ohlađivanja, tvrdoće na propisanim udaljenostima od gašenja čela epruvete (slika 4.10.).



Slika 4.10. TTT- dijagram s krivuljama ohlađivanja Jominyjeve epruvete i tijekom postignutih tvrdoća [9]

Tvrdoća kaljenog strojnog dijela je najveća na površini i smanjuje se prema njegovoj jezgri. Kako bi se neka prokaljivost smatrala uspješnom potrebno je postići zadovoljavajuću tvrdoću u jezgri strojnog dijela. Postotak martenzita u jezgri mora biti minimalno 50% kako bi se postigla tzv. „kritična tvrdoća“ koja se uzima kao kriterij prokaljivosti za neki čelik.

Promjer probnog uzorka (npr. valjka) kod kojeg se postiže „kritična tvrdoća“ u jezgri naziva se „kritični promjer“ ispitivanog čelika za zadanu intenzivnost ohlađivanja primijenjenog sredstva za gašenje.

Kako bi se mogla uspoređivati prokaljivost za različite čelike, koristi se pojam tzv. „idealnog kritičnog promjera“ - D_I . Idealni kritični promjer je kritični promjer za idealno gašenje u kojem bi površina čeličnog obratka trenutno poprimila temperaturu sredstva stavljanjem tog obratka u sredstvo pri čemu bi ta temperatura površine ostala konstantna. U tom bi slučaju intenzivnost gašenja bila beskonačno velika.

Orijentacijska vrijednost idealnog kritičnog promjera moguće je procijeniti različitim metodama. Jedan od načina određivanja je na temelju kemijskog sastava i veličine austenitnog zrna. Kao uobičajena veličina austenitnog zrna uzima se vrijednost $N = 7$ (prema ASTM-u). Za određivanje idealnog kritičnog promjera koristi se sljedeći izraz [10]:

$$D_I = DI_{Jominy} \cdot f_{Mn} \cdot f_{Si} \cdot f_{Ni} \cdot f_{Cr} \cdot f_{Mo} \cdot f_V \cdot f_{Cu} \cdot f_n \quad [\text{in}] \quad (4.1.)$$

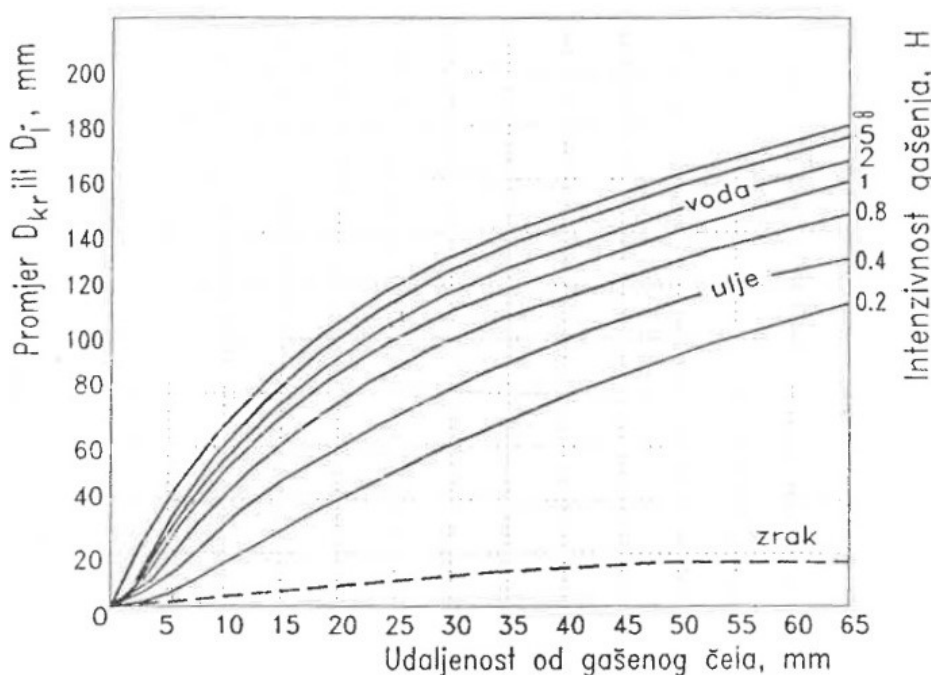
Gdje je:

D_I – idealni kritični promjer, [in], [mm]

DI_{Jominy} – faktor promjera

f – faktor legirajućeg elementa

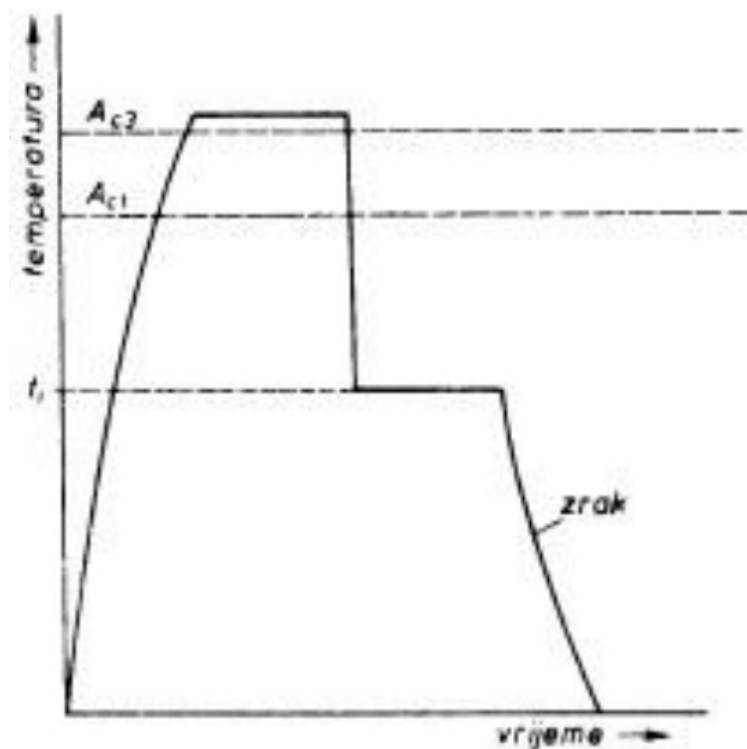
Pomoću dijagrama na slici 4.11. moguće je za željenu kritičnu tvrdoću orijentacijski odrediti u kojem će se mediju za gašenje obradak zadanog promjera potpuno prokaliti.



Slika 4.11. Odnos kritičnih promjera i udaljenosti od gašenog čela Jominyjeva pokusa [11]

4.4. Izotermno poboljšavanje čelika

Izotermno poboljšavanje čelika radimo na način kada predmet obrade koji ima temperaturu austenizacije hladi u ugrijanoj kovinskoj ili sobnoj kupki, te se zadrži temperatura dok se pretvorba ne završi. Ovim načinom smo spriječili austenitnu pretvorbu u perlit i ferit, a da se austenit raspadne u bainit (slika 4.12.).



Slika 4.12. Dijagram izoternog poboljšavanja čelika [12]

Izotermno kaljenje se dijeli na dva načina. Produkt poboljšavanja se razlikuje u ta dva načina. Prvi način imamo smjesa martenzita i bainita, ta smjesa ima veću tvrdoću. Ako bismo predmet obrade izvadili ranije iz kupke i ohladili na zraku.

Drugi imamo samo bainit. Žilavost mu je dobra, a tvrdoća manja.

Izotermno poboljšavanje ima prednosti i nedostatke.

- Prednost:
 - -austenitna pretvorba se odvija pri konstantnoj temperaturi u svim slojevima,
 - -minimalna toplinska naprezanja,
 - -deformacija i napukline će biti manje,
 - -kraći je postupak od klasičnog.
- Nedostatci:
 - -manja čvrstoća kada bismo ga usporedili sa zakaljenim čelikom.

Tablicom 4.1. dana je usporedba mehaničkih svojstava čelika nakon izotermičkog poboljšavanja te čelika nakon klasičnog poboljšavanja.

Tablica 4.1. Usporedba mehaničkih svojstava nakon izotermičkog i klasičnog poboljšavanja [12]

Svojstvo	Izotermički poboljšano	Klasično poboljšano
Vlačna čvrstoća, N/mm ²	1770	1770
Istezljivost, %	46	26
Udarna radnja loma, J	63	24
Maksimalni kut savijanja, °	150	45

Na slikama 4.13. i 4.14. prikazane su mikrostrukture čelika s 0,98% ugljika na početku te nakon pretvorbe iz austenita u bainit.



Slika 4.13. Mikrostruktura čelika (0,98% ugljika) na početku pretvorbe iz austenita u bainit [12]



Slika 4.14. Mikrostruktura čelika (0,98% ugljika) poslije pretvorbe u bainit [12]

4.5. Gašenje

Čelici se hlade sa temperaturom austenitizacije koja iznosi inače između 815 °C do 870 °C. Zbog visoke količine martenzita unutar mikrostrukture skoro svi čelici se gase, jedino nehrđajuće čelike, kao i visokolegirane gasimo iz razloga kako bismo smanjili prisutnost karbida na granicama zrna ili za feritno poboljšavanje.

Prednosti koje želimo dobiti gašenjem su:

- duktilnost,
- tvrdoća,
- čvrstoća,
- željena mikrostruktura.

Gašenjem želimo smanjiti :

- pojave pukotina,
- zaostala naprezanja,
- deformacije.

Možemo reći, učinkovitost gašenja ovisna je o:

- načinu korištenja medija ,
- vrsti medija,
- sastavu čelika.

Kada biramo medije za gašenje tada moramo obratiti pozornost na brzinu gašenja, dimenzije i oblik obratka. Mediji za gašenje su plinovi i tekućine.

Plinovi:

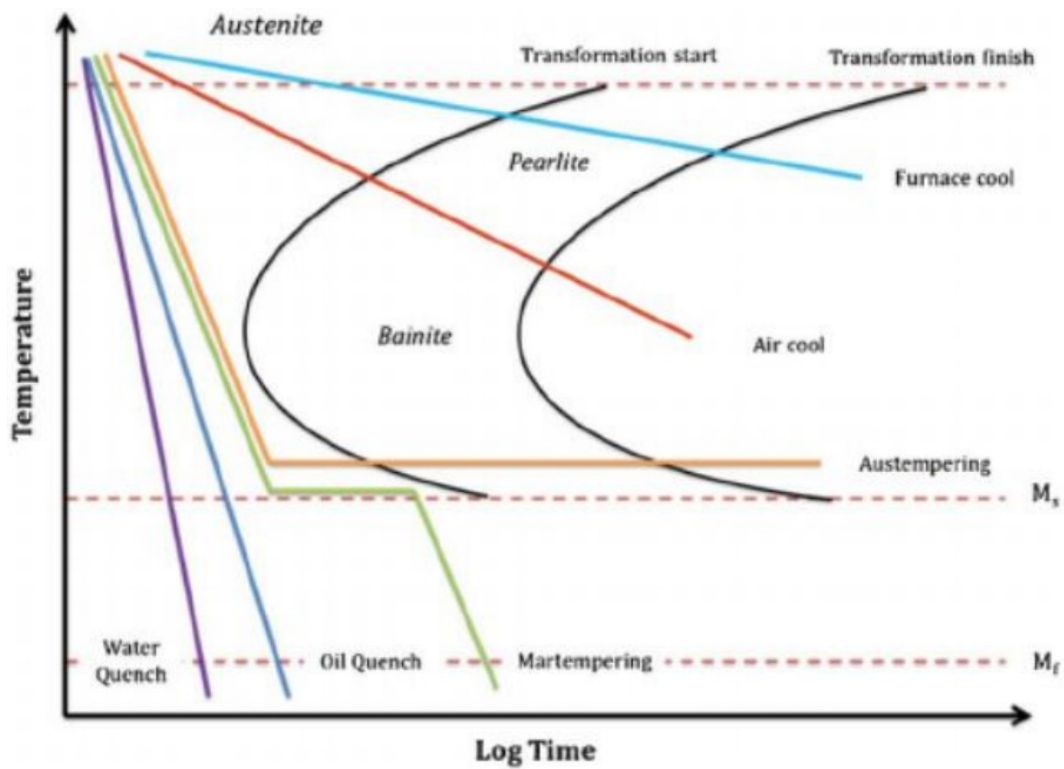
- dušik,
- argon,
- zrak,
- helij.

Tekućine:

- voda,
- voda koja sadrži razne aditive,
- polimerne otopine,
- ulja koja mogu sadržavati razne aditive.

Duž obratka na nekom mjestu možemo imati iznenadan prijelaz, tj. veliku razliku u površini poprečnog presjeka. Budući da se hlađenje obratka odvija konstantnom brzinom, može doći do neravnomjernog skupljanja materijala. Dio obratka sa manjim poprečnim presjekom skupi se prije dijela obratka sa većim poprečnim presjekom. Kako bi se izbjegla pojava pukotina na obratku do kojih dolazi uslijed neravnomjernog skupljanja materijala, koristimo medij sa najmanjom brzinom gašenja (npr. ulje).

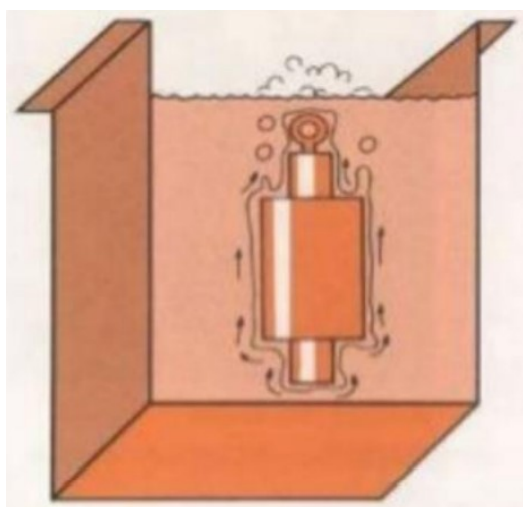
Na slici 4.15. dan je prikaz utjecaja različitih medija za gašenje.



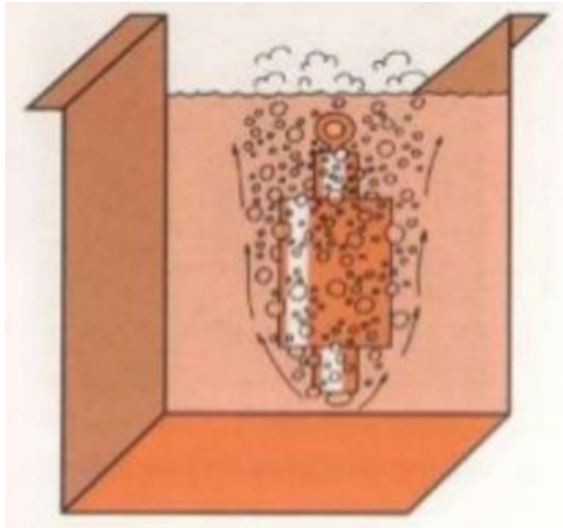
Slika 4.15. TTT dijagram s prikazom utjecaja različitih medija za gašenje [10]

Kod gašenja imamo tri osnovne faze:

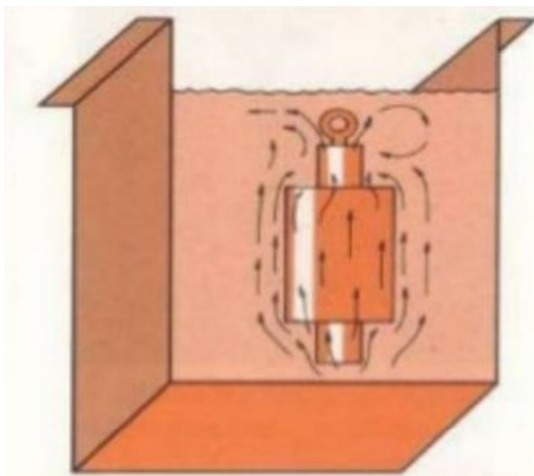
- faza parnog omotača (slika 4.16.),
- faza vrenja (slika 4.17.),
- faza konvekcijskog ohlađivanja (slika 4.18.).



Slika 4.16. Faza parnog omotača [10]



Slika 4.17. Faza vrenja [10]



Slika 4.18. Faza konvekcijskog hlađenja [10]

5. ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE

Čelici za poboljšavanje sadrže 0,2...0,6% C. Prema svom kemijskom sastavu pripadaju kvalitetnim i plemenitim čelicima. Tolerancije sastava su određene, a maseni udio nečistoća je (P i S) nizak za plemenite $< 0.035\%$. Mikrostruktura se odlikuje homogenošću i vrlo niskim udjelima nemetalnih uključaka.

Kao što im ime govori, čelici se podvrgavaju postupku poboljšavanja (kaljenje i visokotemperaturno popuštanje) u cilju postizanja visoke granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, uz visoku žilavost i dinamičku izdržljivost. Radi toga primjenjuje se za mehanički, naročito dinamički visoko opterećene dijelove strojeva i uređaja kao što su npr. osovine, vratila, zupčanici, poluge, vijci, zatici i sl., koji nisu izvrgnuti jačem trošenju.

Kaljenjem se teži postizanju što potpunije martenzitne mikrostrukture po presjeku, kako bi se naknadnim popuštanjem ostvarila što veća žilavost. Najveću žilavost iskazuje visokopopušteni martenzit. Na slici 5.1. prikazana je mikrostruktura poboljšanog čelika, odnosno visokopopušenog martenzita.

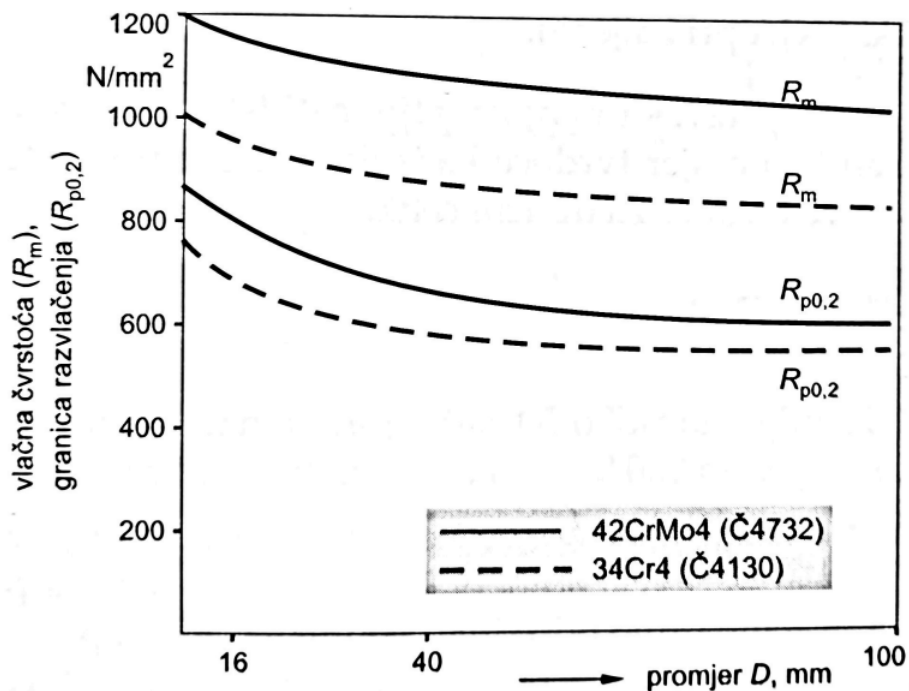


Slika 5.1. Visokopopušteni martenzit [4]

Na dubinu prokaljivanja – prokaljenost utječu tri skupine faktora:

- prokaljivost primjenjene vrste čelika,
- dimenzije dijela,
- uvjeti gašenja pri kaljenju.

Što su veće dimenzije i blaži uvjeti hlađenja za jedan te isti čelik, to možemo očekivati slabiju prokaljenost. Radi toga za velike dimenzije treba birati više legirane čelike čija je prokaljivost bolja (krivulje pretvorbi u TTT dijagramu pomaknute su u desno) kako bi se mogla postići što jednoličnija svojstva po presjeku dijela. Na slici 5.2. prikazana je ovisnost mehaničkih svojstava o dimenzijama za dva čelika.



Slika 5.2. Ovisnost mehaničkih svojstava čelika 42CrMo4 (Č4732) i 34Cr4 (Č4130) o dimenzijama [4]

Vrste čelika za poboljšavanje dane su u prilogu A.

6. OPREMA ZA TOPLINSKU OBRADU

Najvažnija odluka kada se radi toplinska obrada je odabir pomoćne opreme za korištenje, kao i odabir peći. Pri tome najviše moramo razmišljati o izvoru energije najčešće to bude plinsko ili električno, što nam je ključno, kako bi nam toplinska obrada bila i ostala profitabilna. Također možemo odabrati i način kako ćemo obratke prenositi iz peći u peć, hoće li biti pojedinačno jedna za drugim ili pak skupno. Ovim izborima utječemo na cijenu samih gotovih alata i strojnih dijelova.

Veličine peći i dizajn je jako raznolik, imamo ih male veličine kutija za cipele, njih koristimo za izradu instrumenata ili nekih malih dijelova, ali imamo i jako velike peći koje mogu da prime u sebe jako mnogo tona materijala čak par stotina i to samo u jednom ciklusu. Peći se mogu grijati:

- indirektno,
- otvorenim plamenom.

6.1. Peći u obliku kutije

Peći u obliku kutije su najjednostavnije izvedbe peći za toplinsku obradu. Koristimo ih za žarenje, kaljenje i popuštanje, a najviše se koriste pri rasponu od 100 °C do 1100 °C. Na slici 6.1. prikazana je peć u obliku kutije.



Slika 6.1. Peć u obliku kutije (eng. Box Furnace) [13]

6.2. Integrirane peći sa košarom za gašenje

Integrirane peći sa košarom za gašenje najčešće koristimo u industriji. Prednost bi im bila fleksibilnost kod obrade malih dijelova. Za razliku od peći u obliku kutije imamo dodatak posude za gašenje, koja se nalazi na kraju peći. Nedostatak je ograničena veličina obratka. Koristimo ih za otvrđivanje, kao i za normalizaciju i popuštanje unutarnjih dijelova. Na slici 6.2. prikazana je integrirana peć sa košarom za gašenje.



Slika 6.2. Integrirana peć sa košarom za gašenje (eng. Integral Quench Furnace) [14]

6.3. Cirkulacijske peći

Cirkulacijska peć (slika 6.3.) može biti montirana na tlu ili na otvoru u tlu. Njih koristimo za žarenje, cementiranje, normalizaciju i popuštanje. Glavna prednost bi im bila bolja preraspodjela temperature.



Slika 6.3. Cirkulacijska peć (eng. Pit Furnace) [15]

6.4. Peći sa pomičnim dnom

Peći sa pomičnim dnom (slika 6.4.) koristimo za toplinsku obradu dijelova velikih dimenzija kao što bi bili zupčanici. Njih koristimo kod cementiranja, žarenja, otvrđivanja, normalizacije i popuštanja. Ove peći su specifične što im je dno prilagođeno jer se pomiče po tračnicama, kako bi se mogli dopremiti veliki dijelovi za obradu.



Slika 6.4. Peć sa pomičnim dnom (eng. Car Bottom Furnace) [16]

6.5. Peći za kontinuiranu obradu

Peći za kontinuiranu obradu (slika 6.5.) njih koristimo kada želimo toplinski obradimo jednake dijelove. Dijelove na rezne načine transportiramo kroz peć pomoću manipulatora, te mogu biti podvrgnuti sa jednom ili više vrsta toplinske obrade.



Slika 6.5. Peć za kontinuiranu obradu (eng. Continuous Furnace) [17]

7. POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA LD.22-ST.50

7.1. Strojni dio LD.22-ST.50

Strojni dio LD.22-ST.50 za koji je potrebno definirati proces toplinske obrade prikazan je u prilogu B. Materijal strojnog dijela je 42CrMo4. Kemijski sastav tog čelika prikazan je u tablici u prilogu A.

7.2. Parametri toplinske obrade

U tablici iz priloga A dane su temperature kaljenja (u vodi i u ulju) i popuštanja za postupak poboljšavanja. Raspon temperature kaljenja u vodi za čelik 42CrMo4 (Č4732) je 820 °C – 850 °C.

Idealan kritični promjer

Iz tablice u prilogu A za čelik 42CrMo4 očitani su sljedeći kemijski sastav:

0,4% C; 0,3% Si; 0,65% Mn; 1,0% Cr; 0,2% Mo.

Za udio ugljika 0,4% C i prethodno usvojenu veličinu austenitnog zrna $N = 7$ iz tablice 7.1. očitani su faktori: $DI_{Jominy} = 0,2130$. Za prethodno navedene udjele legirajućih elemenata određeni su za svaki element pripadajući faktori: $f_{Mn} = 3,167$; $f_{Si} = 1,210$; $f_{Cr} = 3,160$; $f_{Mo} = 1,600$.

Tablica 7.1. Faktori za proračunavanje idealnog kritičnog promjera D_I [10]

% C	Base ideal diameter (DI Jominy) for ASTM grain size No. shown			Alloy factor (fx): x = element				
	No. 6	No. 7	No. 8	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
0.05	0.0814	0.0750	0.0697	1.167	1.035	1.018	1.108	1.150
0.10	0.1153	0.1065	0.0995	1.333	1.070	1.036	1.216	1.300
0.15	0.1413	0.1315	0.1212	1.500	1.105	1.055	1.324	1.450
0.20	0.1623	0.1509	0.1400	1.667	1.140	1.073	1.432	1.600
0.25	0.1820	0.1678	0.1560	1.833	1.175	1.091	1.540	1.750
0.30	0.1991	0.1849	0.1700	2.000	1.210	1.109	1.648	1.900
0.35	0.2154	0.2000	0.1842	2.167	1.245	1.128	1.756	2.050
0.40	0.2300	0.2130	0.1976	2.333	1.280	1.146	1.840	2.200
0.45	0.2440	0.2259	0.2090	2.500	1.315	1.164	1.972	2.350
0.50	0.2580	0.2380	0.2200	2.667	1.350	1.182	2.080	2.500
0.55	0.2730	0.2510	0.2310	2.833	1.385	1.201	2.188	2.650
0.60	0.2840	0.2620	0.2410	3.000	1.420	1.219	2.296	2.800
0.65	0.2950	0.2730	0.2551	3.167	1.455	1.237	2.404	2.950
0.70	0.3060	0.2830	0.2600	3.333	1.490	1.255	2.512	3.100
0.75	0.3160	0.2930	0.2700	3.500	1.525	1.273	2.620	3.250
0.80	0.3260	0.3030	0.2780	3.667	1.560	1.291	2.728	3.400
0.85	0.3360	0.3120	0.2870	3.833	1.595	1.309	2.836	3.550
0.90	0.3460	0.3210	0.2960	4.000	1.630	1.321	2.944	3.700
0.95	-	-	-	4.167	1.665	1.345	3.052	-
1.00	-	-	-	4.333	1.700	1.364	3.160	-

Uvrštavanjem prethodno očitanih vrijednosti faktora u izraz 4.1. dobije se:

$$D_I = 0,2130 \cdot 3,167 \cdot 1,210 \cdot 3,160 \cdot 1,600 = 4,127 \text{ in} = 4,127 \cdot 25,4 \text{ mm} = 104,82 \text{ mm}$$

Iz dobivenog rezultata se može zaključiti da obradak neće biti zadovoljavajuće prokaljen sa minimalnim udjelom martenzita od 50% unutar jezgre ako je promjer obratka veći od 104,82 mm.

Budući da je promjer strojnog dijela LD.22-ST.50 (prilog B):

$$D = 12 \text{ mm} < D_I = 104,82 \text{ mm}$$

Uvjet prokaljivosti je zadovoljen.

Određivanje sredstva za gašenje i udio martenzita

Ucrtavanjem dobivene vrijednosti za idealni kritični promjer ($D_I = 104,82$ mm) u dijagram prethodno prikazan na slici 4.11. odabire se sredstvo za gašenje (slika 7.1.). Iz slike 7.1. očitana je vrijednost idealnog kritičnog promjera za gašenje „vodom“:

$$D_{I_VODA} = 85 \text{ mm}$$

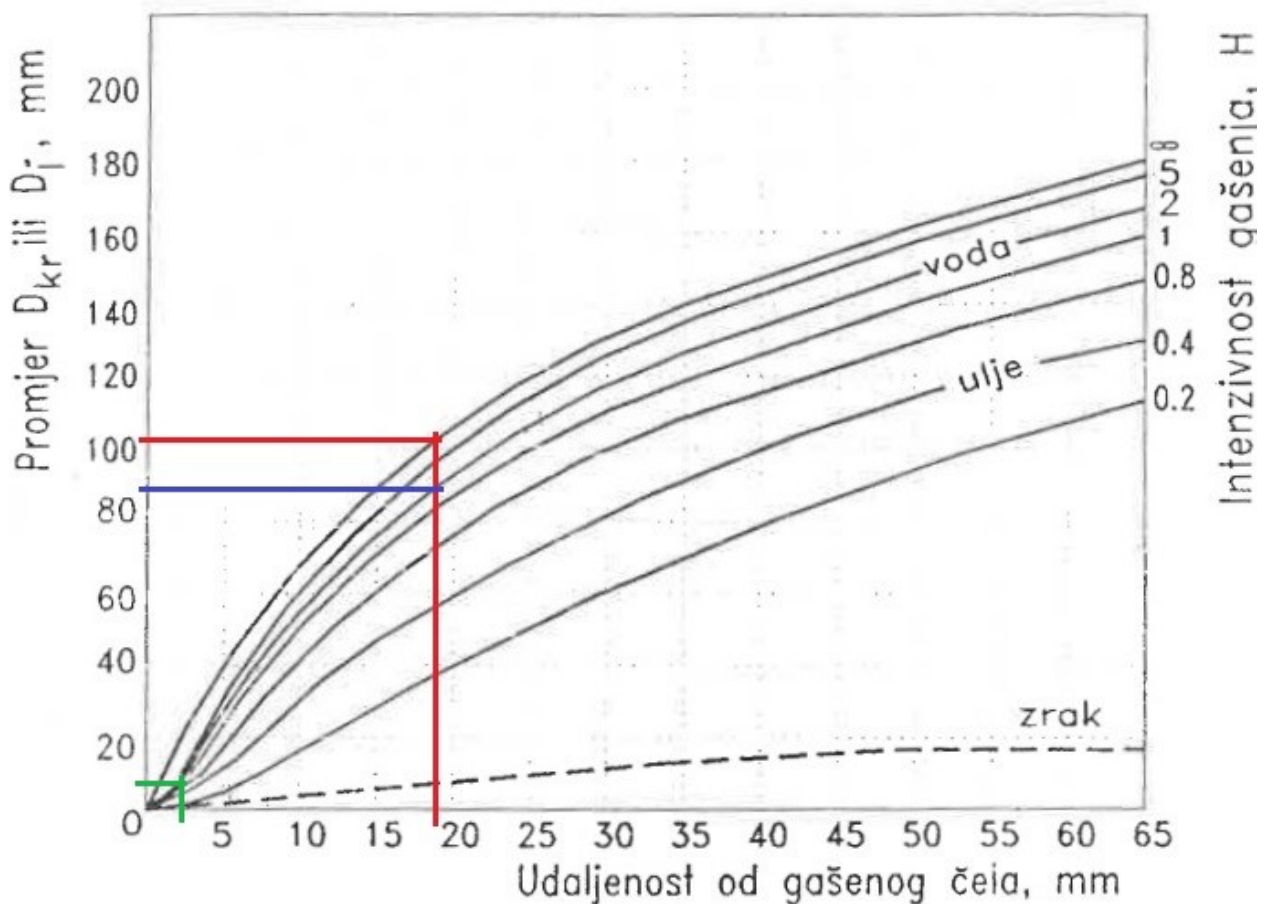
Budući da je promjer strojnog dijela LD.22-ST.50 (prilog B):

$$D = 12 \text{ mm} < D_{I_VODA} = 85 \text{ mm}$$

Uvjet je zadovoljen te se kao sredstvo za gašenje odabire „voda“.

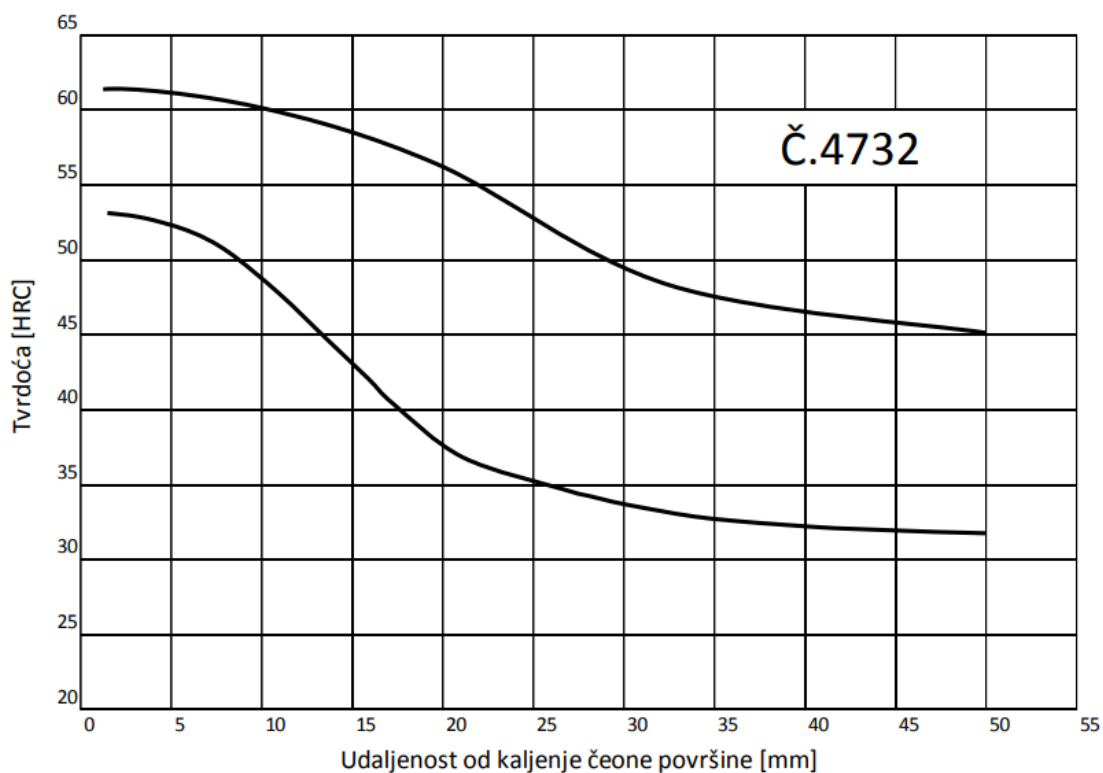
Pomoću vrijednosti promjera strojnog dijela LD.22-ST.50 (prilog B) ($D = 12$ mm) iz dijagrama prikazanog na slici 7.1., te uz prethodni odabir „vode“ kao sredstva za gašenje, očitava se udaljenost od gašenog čela za navedeni promjer po „Jominyjevoj metodi“:

$$l_D = 3 \text{ mm}$$



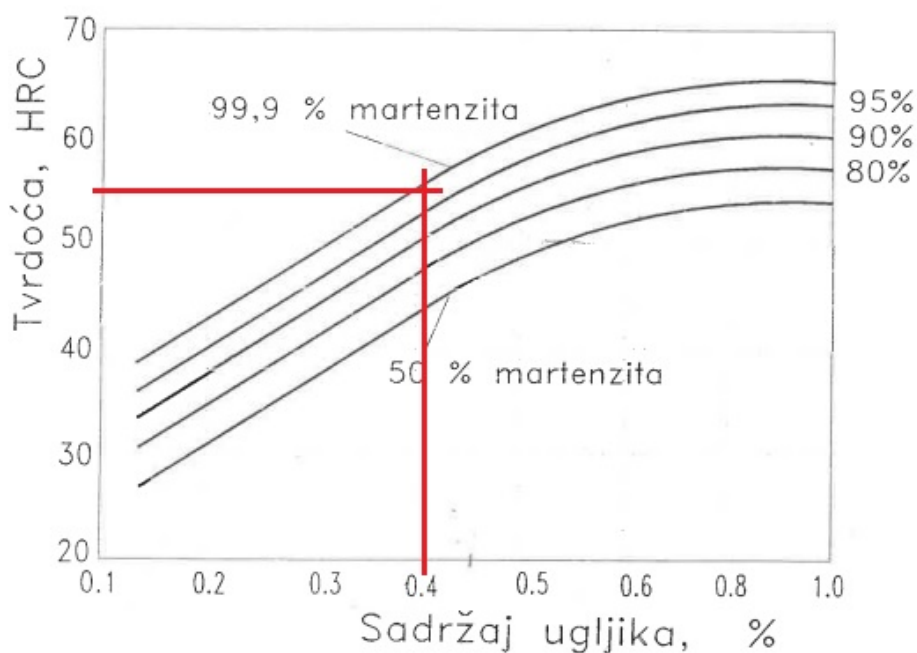
Slika 7.1. Određivanje sredstva za gašenje [11]

Za prethodno očitavu vrijednost $l_D = 3$ mm u dijagramu prikazanom na slici 7.2., za čelik 42CrMo4 (Č4732) očitava se tvrdoća: 57 HRC.



Slika 7.2. Pojas garantirane prokaljivosti čelika [18]

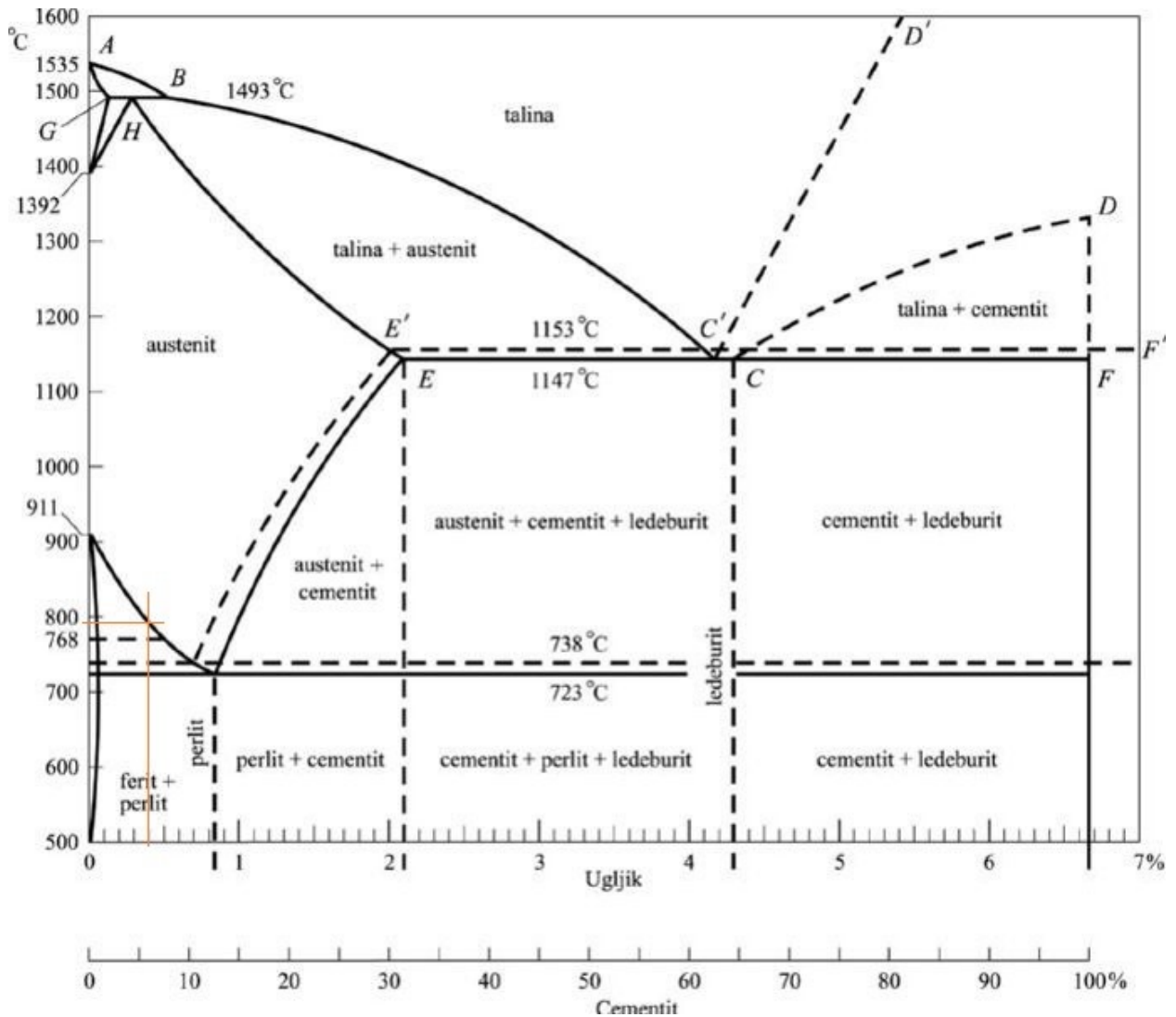
Za prethodno određeni udio ugljika (prilog A - čelik 42CrMo4) 0,4% C i očitavu tvrdoću 57 HRC, iz dijagrama na slici 7.3. očitava se udio martenzita u mikrostrukturi čelika od 98%.



Slika 7.3. Orijehtacijske vrijednosti tvrdoće čelika u ovisnosti o koncentraciji ugljika u martenzitu i udjelu martenzita u mikrostrukturi čelika [11]

Temperatura austenitizacije

Iz tablice u prilogu A dan je za čelik 42CrMo4 sastav ugljika u rasponu 0,38% C - 0,45% C. Za potrebe očitavanja temperature odabran je sastav ugljika 0,4% C. Iz Fe – Fe₃C za čelik 42CrMo4 i sastav ugljika 0,4% C određena je temperature A_{c3} koja iznosi 790 °C (slika 7.4.).



Slika 7.4. Fe-Fe₃C dijagram stanja [19]

Budući da je čelik 42CrMo4 podeutektoidni čelik, optimalna temperatura austenitizacije dana je sljedećim izrazom [9]:

$$\vartheta_A = A_{c3} + (30 \text{ °C} \dots 70 \text{ °C}) \text{ [°C]} \quad (7.1.)$$

$$\vartheta_A = 790 \text{ °C} + 50 \text{ °C} = 840 \text{ °C}$$

Gdje je:

ϑ_A – temperatura austenitizacije, [°C]

A_{c3} – temperatura austenitizacije jezgre, [°C]

Vrijeme trajanja austenitizacije

Na slici 7.5. prikazana su pojedina vremena u postupku austenitizacije.

Gdje su:

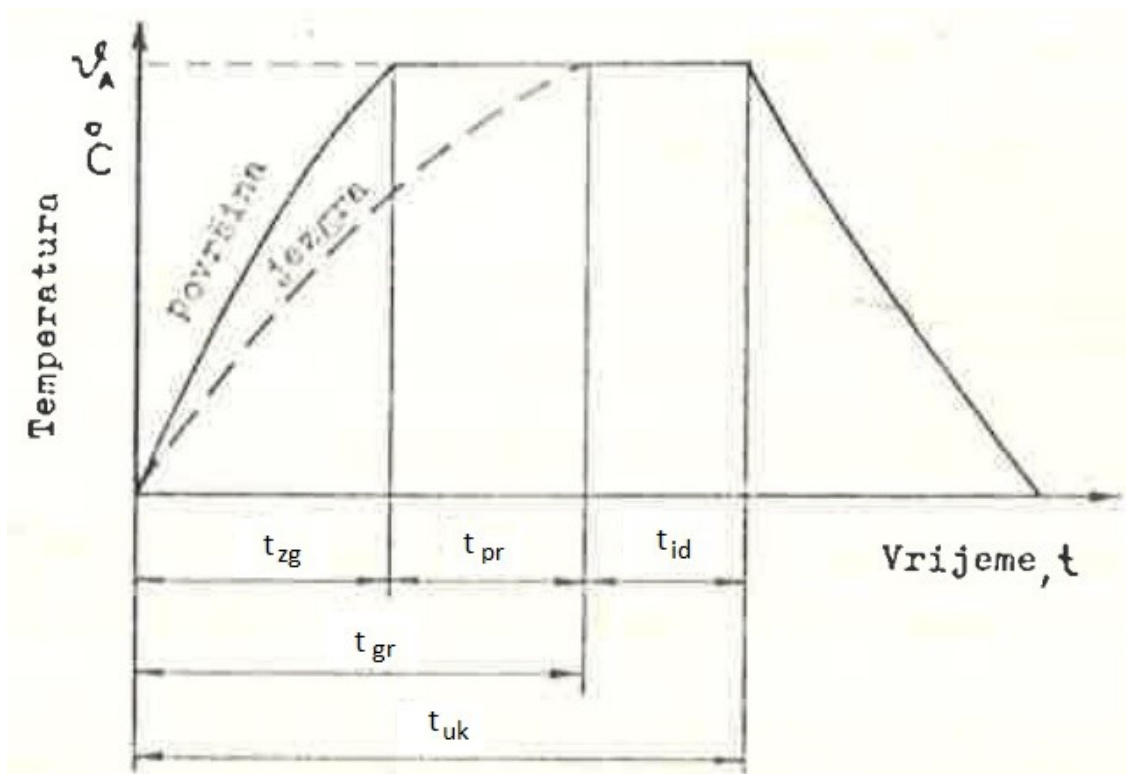
t_{zg} – vrijeme zagrijavanja,

t_{pr} – vrijeme progrijavanja,

t_{gr} – vrijeme grijanja,

t_{id} – vrijeme izotermičkog držanja,

t_{uk} – ukupno vrijeme ugrijavanja.



Slika 7.5. Nazivi vremena pri austenitizaciji [19]

Na vrijeme ugrijavanja utječe veliki broj čimbenika [20]:

- čimbenici zavisni od obratka: dimenzije, masa oblik, površina koeficijent toplinske vodljivosti (toplinska provodnost),
- tehnološki parametri: temperatura, broj obradaka, raspored obradaka,
- samo postrojenje: vrsta, veličina, način ugrijavanja, raspored temperature, temperatura, prijelaz topline, medij.

Za određivanje vremena ugrijavanja postoji niz metoda koje se međusobno razlikuju prema čimbenicima koji se uzimaju u obzir, te po dobivenim vremenima kao rezultatima tih metoda.

Neke od metoda su:

- metoda Ordinanz,
- metoda Smoljnikov,
- metoda Newton.

Za određivanje vremena ugrijavanja u ovom radu će se koristiti „metoda Ordinanz“. Riječ je o metodi koja kod određivanja vremena uzima u obzir kemijski sastav čelika, oblik i dimenzije obratka, te medij u kojem se izvodi ugrijavanje.

Oblik obratka se izražava preko veličina:

k – koeficijent oblika, riječ je o iskustvenom koeficijentu koji se određuje iz tablice 7.2.

s – karakteristična dimenzija obratka (tablica 7.2.), predstavlja ona mjesta presjeka koja su mjerodavna za rezultat toplinske obrade, dimenzija na obratku u čijem se smjeru prilikom ugrijavanja ili ohlađivanja odvodi najveća količina topline

Iz tablice 7.2. za oblik i dimenzije strojnog dijela LD.22-ST.50 koji su dani u prilogu B usvojene su sljedeće vrijednosti:

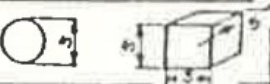
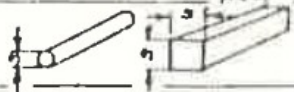




- karakteristična dimenzija:

$$s = 12 \text{ mm}$$

- koeficijent oblika:

$$k = 1,0.$$

Tablica 7.2. Karakteristična dimenzija „s“ i koeficijent oblika „k“ za neke obratke [20]

Oblik izratka	Koeficijent oblika „k“
	0,70
	1,0
	1,5
	1,5
	2,0
	2 za kratke nezatvorene cijevi 4 za duge na kraju zatvorene cijevi

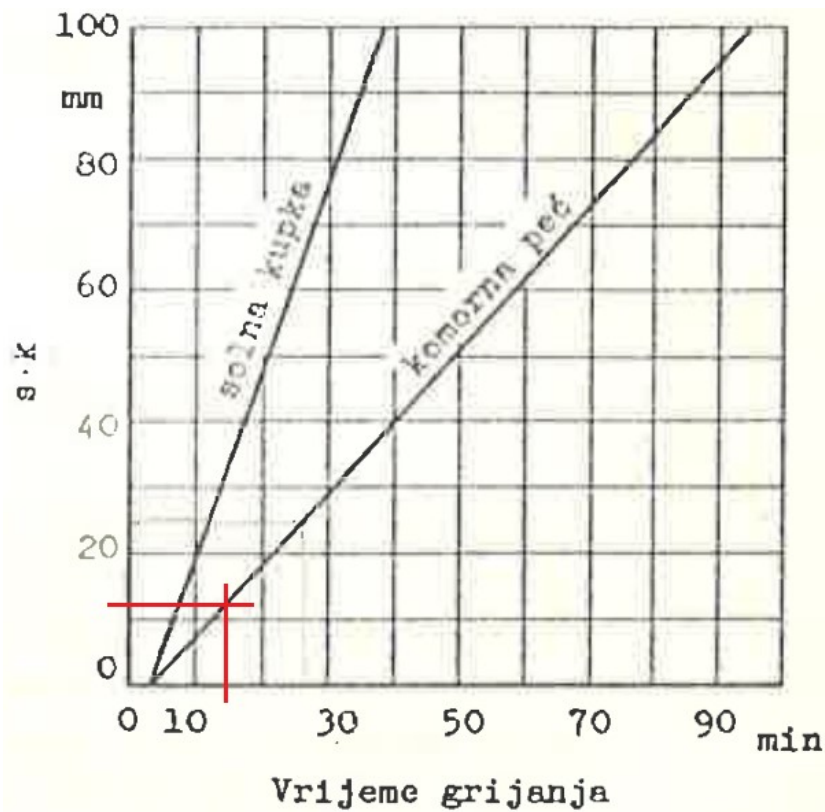
Za određivanje vremena ugrijavanja koristi se kao veličina umnožak „s · k“ [20]:

$$s \cdot k = 12 \cdot 1,0$$

$$s \cdot k = 12 \text{ mm}$$

Za dobivenu vrijednost veličine „s · k“ iz dijagrama na slici 7.6. se očitava vrijeme grijanja obradka u komornoj peći koje iznosi:

$$t_{gr} = 15 \text{ min.}$$



Slika 7.6. Vrijeme grijanja u zavisnosti od „s · k“ [20]

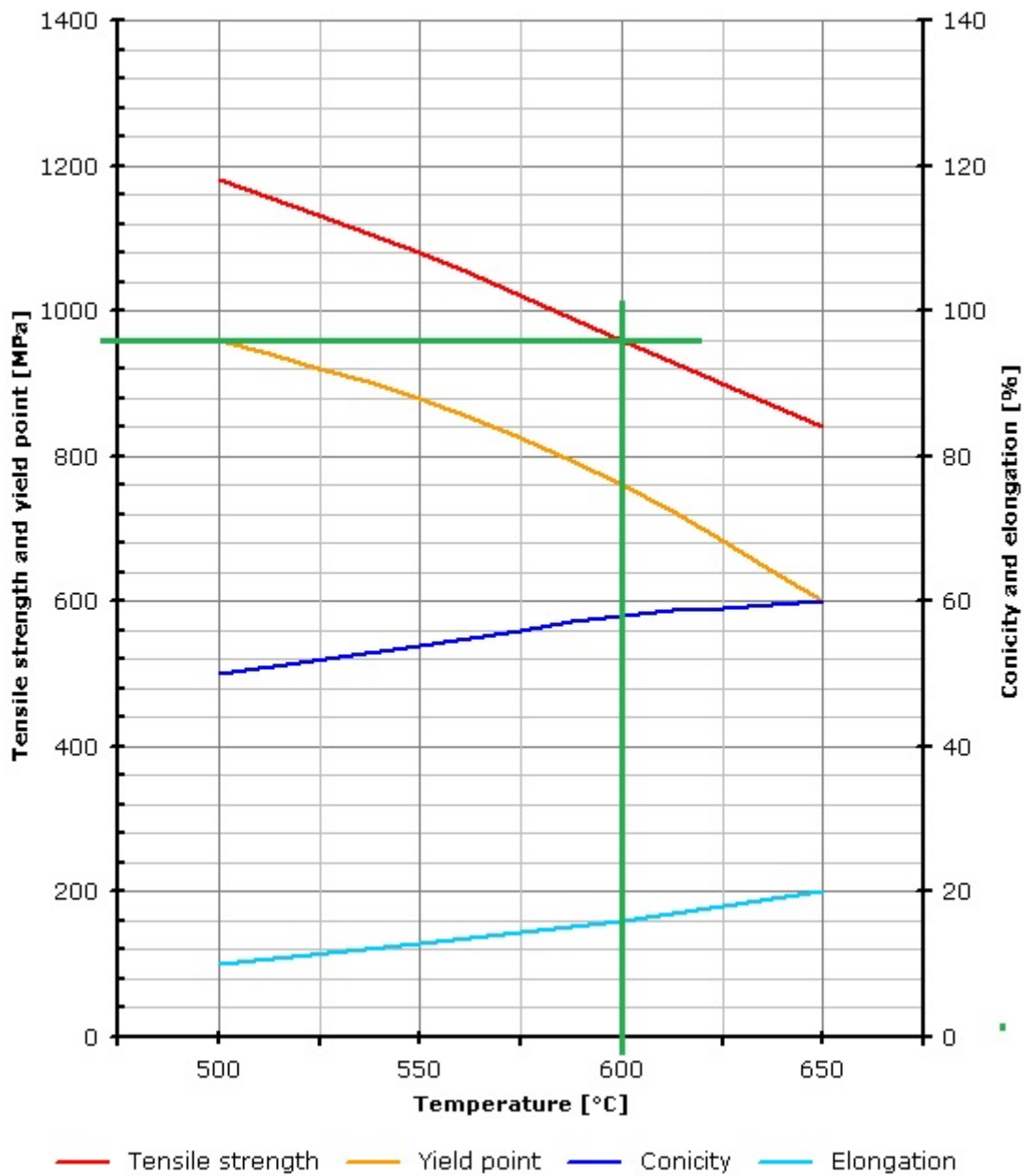
Temperatura popuštanja

Za tvrdoću čelika od $27^{\pm 1}$ HRC iz tablice 7.3. usvojena je približna čvrstoća čelika „ R_m “ od 960 N/mm², tj. 960 MPa.

Tablica 7.3. Odnos različitih mjera tvrdoće i čvrstoće čelika [21]

Tvrdoća po Rockwellu HRC	Čvrstoća čelika R_m [N/mm ²]
29	1000
28	970
26	940
25	920

Za prethodno usvojenu čvrstoću čelika „ R_m “ od 960 MPa iz dijagrama na slici 7.7. za čelik 42CrMo4, očitana je temperatura popuštanja od 600 °C.

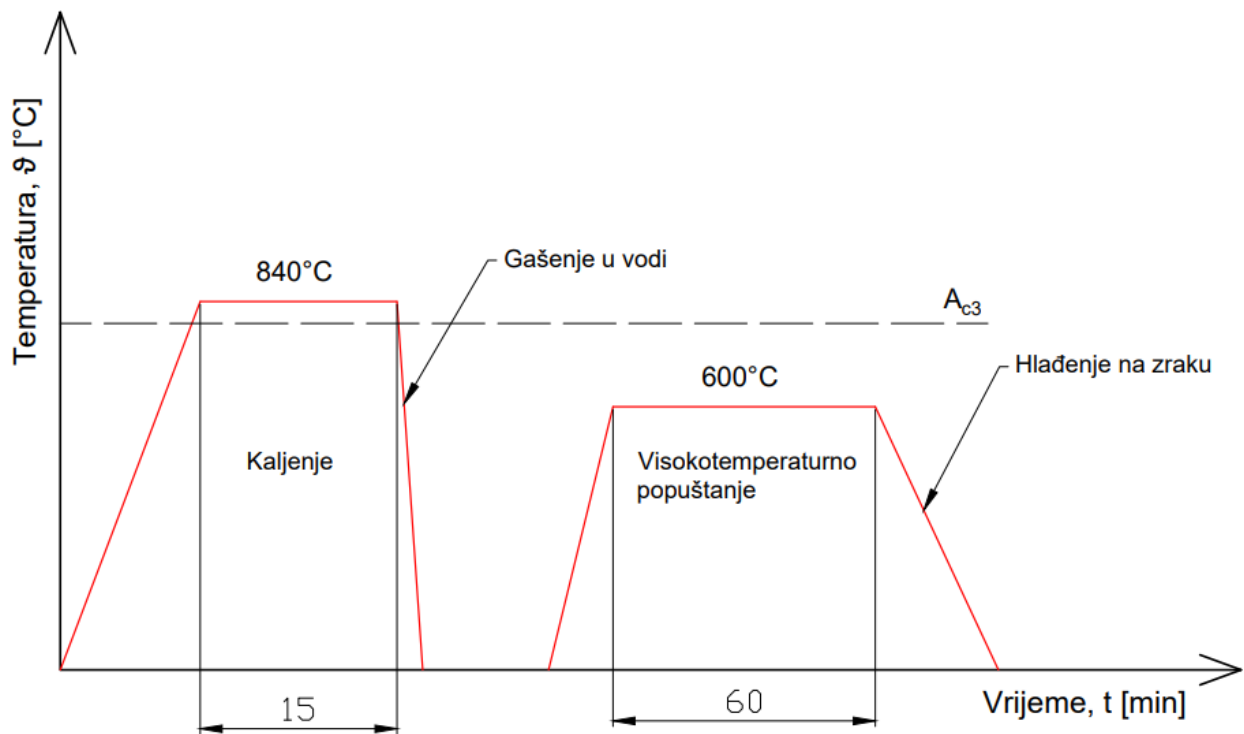


Slika 7.7. Dijagram ovisnosti mehaničkih svojstava o temperaturi popuštanja za čelik 42CrMo4 [22]

Vrijeme trajanja popuštanja

Preporučeno držanje obratka na temperaturi popuštanja je od 1 do 2 sata. Odabrano je vrijeme popuštanja od 1 sata.

Na slici 7.8. prikazana su temperature i vremena trajanja kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja.

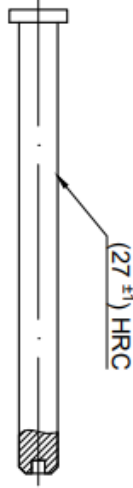


Slika 7.8. Dijagram postupka poboljšavanja strojnog dijela LD.22-ST.50

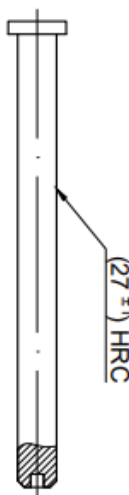
7.3. Operacijski listovi

Tehnološku dokumentaciju čine operacijski list kaljenja (tablica 7.4.) i operacijski list popuštanja (tablica 7.5.).

Tablica 7.4. Operacijski list kaljenja

Poduzeće: Tehnički fakultet		Naziv dijela: LD.22-ST.50		Materijal: 24CrMo4		Radno mjesto:		List:1
				Kvaliteta:		Naziv: Elektro peć "OVER" i kada za gašenje		Listova:2
Operacijski list: Toplinska obrada		Oznaka:		Oblik: LD.22-ST.50		Oznaka:		Operacija broj: 1
		Naziv operacije: Kaljenje		Masa/Dim. Ø12 x 144		Radionica: Laboratorij za toplinsku obradu		
Zahv. Br.	Opis zahvata	Kol.	Proizv. sredstvo	T (°C)	Vrijeme (min)	Minuta		
		Kom.	Proiz. materijal			t _s	t _r	
1	Stavljanje u peć	1	Ručno	-	1	-	1	
2	Ugrijavanje	1	Peć	840	15	15	-	
3	Gašenje u vodi	1	Kada	-	2	-	2	
Izradio:		Datum:		Kontrola:		Σts	Σtr	
Leopold Dabović		23.06.2022.		Leopold Dabović		15	3	

Tablica 7.5. Operacijski list popuštanja

Poduzeće: Tehnički fakultet		Naziv dijela: LD.22-ST.50		Materijal: 24CrMo4		Radno mjesto:		List: 2		
				Kvaliteta:		Naziv: Elektro peć "Estherm" i kada za hlađenje		Listova:2		
Operacijski list: Toplinska obrada		Oznaka:		Oblik: LD.22-ST.50		Oznaka:		Operacija broj: 2		
		Naziv operacije: Popuštanje		Masa/Dim. Ø12 x 144		Radionica: Laboratorij za toplinsku obradu				
Zahv. Br.	Opis zahvata	Kol.	Proizv. sredstvo	T (°C)	Vrijeme (min)	Minuta				
		Kom.	Proiz. materijal			t _s	t _r			
1	Stavljanje u peć	1	Ručno	-	1	-	1			
2	Ugrijavanje	1	Peć	600	60	60	-			
3	Hlađenje na zraku	1	Zrak	-	30	-	30			
Izradio:		Datum:		Kontrola:		Σt _s	Σt _r			
Leopold Dabović		23.06.2022.		Leopold Dabović		60	31			

7.4. Probno poboljšavanje

Nakon što smo odredili sve parametre i režime obrade, prešli smo u laboratorijske prostorije za toplinsku obradu. Započeli smo obradu strojnog dijela LD.22-ST.50 tako što smo peć (model „OVER“) (slika 7.9.) zagrijavali 90 minuta na željenu temperature austenitizacije od 840 °C. Nakon toga je strojni dio LD.22-ST.50 stavljen u peć na 15 minuta pri temperaturi od 840 °C. Odmah nakon tih 15 minuta uslijedilo je njegovo vađenje te hlađenje gašenjem u vodi (slika 7.10.). Postupak je opisan operacijskim listom u tablici 7.4.



Slika 7.9. Strojni dio unutar elektro peći (tip „OVER“)



Slika 7.10. Spremnik sa vodom za gašenje

Nakon što smo prošli proces kaljenja izmjerili smo tvrdoću i onda smo započeli s visokotemperaturnim popuštanjem. Na slici 7.11. prikazana je peć marke „Estherm“ koju smo 90 minuta zagrijavali na 600 °C, a poslije toga smo stavili u nju strojni dio LD.22-ST.50 i držali 60 minuta. Nakon postupka popuštanja, strojni dio je izvađen i ohlađen na zraku prije mjerenja tvrdoće (tablica 7.5.).



Slika 7.11. Elektro peći (tip „Estherm“)

Mjerenje tvrdoće

Da bismo provjerili rezultat tvrdoće mjerit ćemo Rockwellovom metodom na uređaju za mjerenje tvrdoće (slika 7.12.).

Rezultati mjerenja su:

- Tvrdoća poslije kaljenja: 55 HRC,
- Tvrdoća poslije visokotemperaturnog popuštanja: 27 HRC.



Slika 7.12. Uređaj za mjerenje tvrdoće

Pošto je zadani zahtjev 27^{+1} HRC, možemo donijeti zaključak da je zahtjev zadovoljen.

8. ZAKLJUČAK

Mikrostrukturu čelika se mijenja toplinskom obradom čime se postižu željena svojstva čelika. Promjenom mikrostrukture mijenjaju se vlačna čvrstoća, duktilnost, tvrdoća i žilavost. Ovisno o željenoj primjeni, strojni element se podvrgava različitim temperaturno-vremenskim ciklusima, odnosno postupcima toplinske obrade. Time se dobiva potrebna mikrostruktura kojom se ostvaruju zahtijevana mehanička, fizička i kemijska svojstva materijala.

Postupak poboljšavanja je postupak toplinske obrade koji se sastoji od kaljenja i visoko temperaturnog popuštanja. Ovim postupkom povećavaju se žilavost i čvrstoća materijala. Kaljenjem se postiže povećanje tvrdoće ovisno o udjelu ugljika u čeliku, a teži se što jednoličnijoj prokaljivosti, tj. što jednoličnijoj tvrdoći po poprečnom presjeku. Kako bi se postigla povećana žilavost, čelik se podvrgava postupku poboljšavanja.

Kod postupka poboljšavanja koriste se ugljični niskolegirani čelici za poboljšavanje. Riječ je o podeutektoidnim čelicima s udjelom ugljika od 0,2% do 0,6%. Ovi čelici svoju primjenu pronalaze u uvjetima visokih mehaničkih i dinamičkih opterećenja. Koriste se za izradu osovina, vratila, zupčanika, poluga, vijaka i sl.

Utvrđivanjem parametara toplinske obrade, pomoću već poznatih iskustvenih podataka, postiže se uspješna provedba postupka toplinske obrade. Određeni su temperatura i vrijeme trajanja austenitizacije, sredstvo za gašenje, temperatura i vrijeme trajanja popuštanja.

U praktičnom dijelu rada definiran je postupak toplinske obrade za strojni dio LD.22-ST.50. Definirani postupak verificiran je probnim poboljšavanjem. Probnim poboljšavanjem poboljšan je probni komad strojnog dijela LD.22-ST.50, te je utvrđeno da se definiranim parametrima toplinske obrade mogu ispuniti zahtjevi koji su definirani u nacrtu strojnog dijela.

LITERATURA

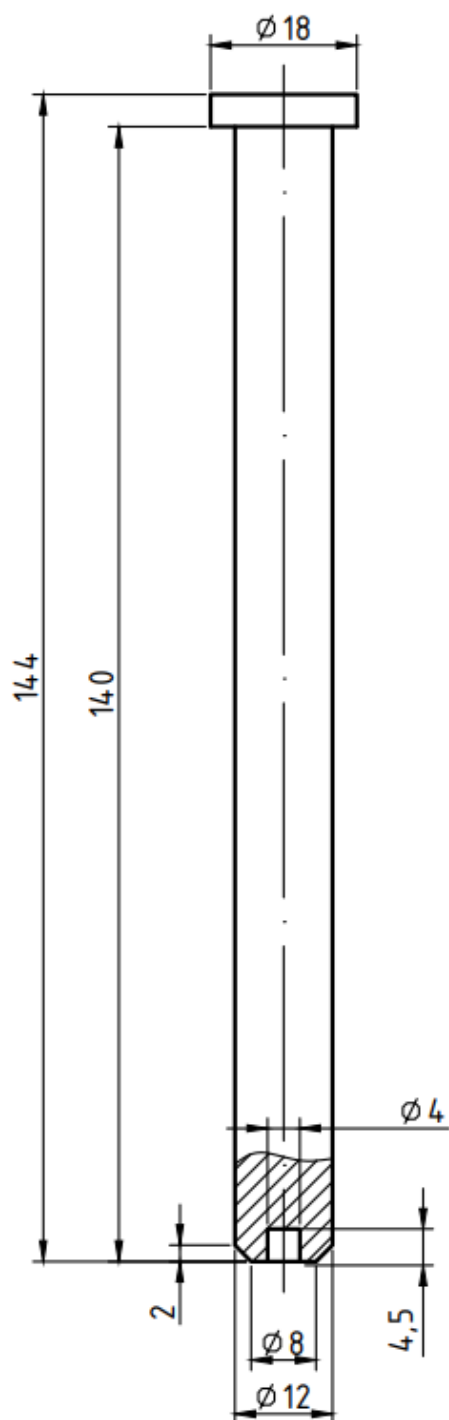
- [1] „Toplinska obrada“, s Interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska_obrada, 09.04.2022.
- [2] „Cementit“, s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Cementit>, 09.04.2022.
- [3] „Austenit i cementit“, s Interneta, <https://bs.wikipedia.org/wiki/Austenit>, 09.04.2022.
- [4] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: „Svojstva i primjena materijala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [5] „Perlit“, s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Perlit><https://bs.wikipedia.org/wiki/Austenit>, 09.04.2022.
- [6] „Ledeburite“, s Interneta, <https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Ledeburite>, 09.04.2022.
- [7] „Martenzit“, s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Martenzit>, 09.04.2022.
- [8] „Bainit“, s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Bainit>, 09.04.2022.
- [9] Stupnišek, M.; Cajner, F.: „Osnove toplinske obradbe metala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [10] Ratković, D.: „Postupak toplinske obrade strojnog dijela DR.17-ST.47“, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2021., s Interneta, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:883038>
- [11] Smoljan, B.: „Toplinska obradba čelika, sivog i nodularnog lijeva“, Hrvatsko društvo za toplinsku obradbu i inženjerstvo površina, Zagreb, 1999.
- [12] Grbčić, T.: „Postupak toplinske obrade strojnog dijela TG.21-PT.29“, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2017., s Interneta, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:712952>
- [13] „Box Furnaces“, International Thermal Systems, s Interneta, <https://www.internationalthermalsystems.com/industrial-furnaces/box-furnace/>, 04.06.2022.
- [14] „Integral Quench Furnace System“ Lindbergh/MPH, s Interneta, <https://www.lindbergmph.com/heat-treat-furnaces/integral-quench-furnaces/lindberg-pacemaker-integral-quench-furnace>, 04.06.2022.
- [15] „Pit Furnaces“, J.R. Furnace and Ovens (P) Ltd, s Interneta, s Interneta, <https://www.jrfurnace.net/pit-furnaces/#>, 05.06.2022.

- [16] „Car Bottom Furnace“, International Thermal Systems, s Interneta,
<https://www.internationalthermalsystems.com/industrial-furnaces/car-bottom-furnace/>, 05.06.2022.
- [17] „Continuous Industrial Furnaces“, MWS Cool Furnaces, s Interneta,
<https://mwsforni.it/en/furnaces/continuous-furnaces/>, 05.06.2022.
- [18] Liščić, B.: „Čelični materijali – 2“, Metalbiro, Zagreb, 1981.
- [19] „Željezo“, Hrvatska enciklopedija, s Interneta,
<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=67686>, 14.07.2022.
- [20] Liščić, B.; Stupnišek, M.; Cajner, F., Filetin, T.: „Toplinska obrada - Praktikum“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [21] Kraut, B.: „Krautov Strojarski priručnik“, Sajema d.o.o., Zagreb, 2009.
- [22] „Tempering Diagrams of Steels - 42CrMo4 Steel“, s Interneta,
<https://www.steeldata.info/tempering/demo/data/22.html>, 10.07.2022.

PRILOZI

Prilog A: Čelici za poboljšavanje - kem. sastav i parametri toplinske obrade (DIN 17200) [4]

Oznaka čelika EN (stara HRN)	Kemijski sastav, maseni %										Kovanje °C	Meko žarenje °C	Normalizacija °C	Poboljšavanje		
	C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	V %	P % maks	S %	Kalijenje u vodi				Popuštanje °C		
															u ulju	
C22 (Č1330)	0,18-0,25	0,15-0,35	0,30-0,60					0,045	maks 0,045		1100-900	650-700	880-910	860-890	870-900	
C45 (Č1530)	0,42-0,50	0,15-0,35	0,50-0,80					0,045	maks 0,045		1100-850	650-700	840-870	820-850	830-860	
C60 (Č1730)	0,57-0,65	0,15-0,35	0,60-0,90					0,045	maks 0,045		1050-850	650-700	820-850	800-830	810-840	550 do 660
C22E (Č1331)	0,18-0,25	0,15-0,35	0,30-0,60					0,035	maks 0,035		1100-900	650-700	880-910	860-890	870-900	
C60E (Č1731)	0,57-0,65	0,15-0,35	0,60-0,90					0,035	maks 0,035		1050-850	650-700	820-850	800-830	810-840	
40Mn4 (Č3130)	0,36-0,44	0,25-0,50	0,80-1,10					0,035	maks 0,035		1100-850	650-700	850-880	820-850	830-860	
34Cr4 (Č4130)	0,30-0,37	0,15-0,40	0,60-0,90	0,90-1,20				0,035	maks 0,035		1050-850	680-720	850-890	830-860	840-870	
25CrMo4 (Č4730)	0,22-0,29	0,15-0,40	0,50-0,80	0,90-1,20	0,15-0,30			0,035	maks 0,035		1050-850	680-720	860-900	840-870	850-880	
42CrMo4 (Č4732)	0,38-0,45	0,15-0,40	0,50-0,80	0,90-1,20	0,15-0,30			0,035	maks 0,035		1050-850	680-720	840-880	820-850	830-860	
50CrMo4 (Č4733)	0,46-0,54	0,15-0,40	0,50-0,80	0,90-1,20	0,15-0,30			0,035	maks 0,035		1050-850	680-720	840-880	820-850	830-860	540 do 680
30CrMoV9 (Č4734)	0,26-0,34	0,15-0,40	0,40-0,70	2,30-2,70	0,15-0,25	0,10-0,20		0,035	maks 0,035		1050-850	680-720	860-900	840-870	850-880	
50CrV4 (Č4830)	0,47-0,55	0,15-0,40	0,70-1,11	0,90-1,20		0,10-0,20		0,035	maks 0,035		1050-850	680-720	840-880	820-850	830-860	
36CrNiMo4 (Č5430)	0,32-0,40	0,15-0,40	0,50-0,80	0,90-1,20	0,90-1,20	0,15-0,30		0,035	maks 0,035		1050-850	650-700	850-880	820-850	830-860	
30CrNiMo8 (Č5432)	0,26-0,33	0,15-0,40	0,30-0,60	1,80-2,20	1,80-2,20	0,30-0,50		0,035	maks 0,035		1050-850	650-700	850-880	-	830-860	



Pokoljšati

($27^{\pm 1}$) HRC

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
t	°C	temperatura
A_1	°C	temperatura eutektoidne pretvorbe
ϑ_p	°C	temperatura popuštanja
ϑ_A	°C	temperatura austenitizacije
A_{cl}	°C	temperatura austenitizacije površinskog sloja
A_{cl}	°C	temperatura austenitizacije jezgre
A_1	°C	temperatura podeutektoidne pretvorbe
D	mm	promjer
D_I	mm	idealni kritični promjer
D_I Jominy		faktor promjera
f		faktor legirajućeg elementa
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm ²	konvencionalna granica tečenja
HB		tvrdoća po Brinellu
HR		tvrdoća po Rockwellu
l_D	mm	udaljenost od gašenog čela
t_{zg}	min	vrijeme zagrijavanja
t_{pr}	min	vrijeme progrijavanja
t_{gr}	min	vrijeme grijanja
t_{id}	min	vrijeme izotermičkog držanja
t_{uk}	min	ukupno vrijeme ugrijavanja
s	mm	karakteristična dimenzija
k		koeficijent oblika

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Prikaz površine kaljenog čelika nakon popuštanja [1].....	2
Slika 2.2. Stabilni dijagram stanja Fe-Fe ₃ C [2].....	3
Slika 2.3. Mikrostruktura austenita i cementita [3].....	4
Slika 2.4. Prikaz izbrušenog perlita pod povećanjem od 2000 puta [5].....	5
Slika 2.5. Mikrostruktura ledeburita [6].....	6
Slika 2.6. Prikaz martenzita kod niskolegiranog čelika 42CrMo4 (AISI 4140) [7].....	7
Slika 2.7. Prikaz bainita kod smirenog (dezoksidiranog) čelika [8]	7
Slika 3.1. Kontinuirani TTT dijagram austenitiziranog podeutektoidnog čelika [9].....	9
Slika 3.2. Izotermički TTT dijagram podeutektoidnog ugljičnog čelika (s oko 0,5% C) [9]	10
Slika 3.3. Konstrukcija TTT dijagrama [10]	11
Slika 3.4. Ucertavanje TTT krivulje [10].....	12
Slika 4.1. Dijagram poboljšavanja čelika [9]	13
Slika 4.2. Dijagram postupka kaljenja nekog podeutektoidnog čelika [9].....	14
Slika 4.3. Presjek površinski zakaljenih čeličnih dijelova [9].....	15
Slika 4.4. Dijagram popuštanja čelika [9]	16
Slika 4.5. Dijagrami popuštanja različitih čelika [9].....	16
Slika 4.6. Burnsov dijagram [9]	17
Slika 4.7. Koncentracija ugljika u austenitu nakon austenitiziranja nadeutektoidnih čelika različitih udjela ugljika (x i y) [9].....	18
Slika 4.8. TTT-dijagrami kontinuiranog ohlađivanja dvaju različitih čelika [9]	19
Slika 4.9. Shema uređaja za ohlađivanje epruvete Jominy metodom [9]	20
Slika 4.10. TTT- dijagram s krivuljama ohlađivanja Jominyjeve epruvete i tijekom postignutih tvrdoća [9]	21
Slika 4.11. Odnos kritičnih promjera i udaljenosti od gašena čela Jominyjeva pokusa [11].....	22
Slika 4.12. Dijagram izoternog poboljšavanja čelika [12].....	23
Slika 4.13. Mikrostruktura čelika (0,98% ugljika) na početku pretvorbe iz austenita u bainit [12]	24
Slika 4.14. Mikrostruktura čelika (0,98% ugljika) poslije pretvorbe u bainit [12]	25
Slika 4.15. TTT dijagram s prikazom utjecaja različitih medija za gašenje [10].....	27
Slika 4.16. Faza parnog omotača [10].....	27
Slika 4.17. Faza vrenja [10]	28
Slika 4.18. Faza konvekcijskog hlađenja [10].....	28

Slika 5.1. Visokopopušteni martenzit [4].....	29
Slika 5.2. Ovisnost mehaničkih svojstava čelika 42CrMo4 (Č4732) i 34Cr4 (Č4130) o dimenzijama [4].....	30
Slika 6.1. Peć u obliku kutije (eng. Box Furnace) [13].....	31
Slika 6.2. Integrirana peć sa košarom za gašenje (eng. Integral Quench Furnace) [14]	32
Slika 6.3. Cirkulacijska peć (eng. Pit Furnace) [15]	33
Slika 6.4. Peć sa pomičnim dnom (eng. Car Bottom Furnace) [16]	33
Slika 6.5. Peć za kontinuiranu obradu (eng. Continuous Furnace) [17]	34
Slika 7.1. Određivanje sredstva za gašenje [11].....	37
Slika 7.2. Pojas garantirane prokaljivosti čelika [18].....	38
Slika 7.3. Orijentacijske vrijednosti tvrdoće čelika u ovisnosti o koncentraciji ugljika u martenzitu i udjelu martenzita u mikrostrukturi čelika [11].....	38
Slika 7.4. Fe-Fe ₃ C dijagram stanja [19]	39
Slika 7.5. Nazivi vremena pri austenitizaciji [19].....	40
Slika 7.6. Vrijeme grijanja u zavisnosti od „s · k“ [20]	43
Slika 7.7. Dijagram ovisnosti mehaničkih svojstava o temperaturi popuštanja za čelik 42CrMo4 [22]	44
Slika 7.8. Dijagram postupka poboljšavanja strojnog dijela LD.22-ST.50.....	45
Slika 7.9. Strojni dio unutar elektro peći (tip „OVER“)	48
Slika 7.10. Spremnik sa vodom za gašenje	49
Slika 7.11. Elektro peći (tip „Estherm“)	49
Slika 7.12. Uređaj za mjerenje tvrdoće	50

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Usporedba mehaničkih svojstava nakon izotermičkog i klasičnog poboljšavanja [12]	24
Tablica 7.1. Faktori za proračunavanje idealnog kritičnog promjera D_I [10]	36
Tablica 7.2. Karakteristična dimenzija „s“ i koeficijent oblika „k“ za neke obratke [20]	42
Tablica 7.3. Odnos različitih mjera tvrdoće i čvrstoće čelika [21]	43
Tablica 7.4. Operacijski list kaljenja	46
Tablica 7.5. Operacijski list popuštanja	47

SAŽETAK

U ovom radu je opisan postupak poboljšavanja strojnog dijela LD.22-ST.50. Opisani su postupci kaljenja i popuštanja, te hlađenja u vodi. Strojni dio je kaljen na temperaturi od 840 °C i nakon toga gašen u vodi. Zatim je podvrgnut postupku visokotemperaturnog popuštanja pri temperaturi od 600 °C, a nakon toga ohlađen u vodi. Nakon postupka poboljšavanja, izmjerena je tvrdoća strojnog dijela od 27 HRC. Usporedbom dobivenog rezultata mjerenja, zaključeno je da dobivena tvrdoća strojnog dijela nakon postupka poboljšavanja zadovoljava prethodno postavljeni zahtjev.

KLJUČNE RIJEČI: poboljšavanje čelika, kaljenje, gašenje u vodi, popuštanje čelika, toplinska obrada, čelici za poboljšavanje, čelik 42CrMo4.

SUMMARY

In this thesis is described the process of heat treatment the workpiece LD.22-ST.50. The processes of quenching and tempering, and cooling in water are described. The workpiece was heated at a temperature of 840 °C and then quenched in water. After that the workpiece is subjected to a high-temperature stress relieving process at a temperature of 600 °C, and then cooled in water. After the heat treating process, the measured hardness of the workpiece was 27 HRC. By comparing the obtained measurement result, it was concluded that the obtained hardness of the workpiece after the procedure satisfies the previously set requirement.

KEYWORDS: hardening of steel, annealing, quenching in water, stress relieving of steel, heat treatment, steel for quenching and tempering, steel 42CrMo4.