

Postupak toplinske obrade strojnog dijela MJ.22-DT.39

Jelenić, Marcel

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:190:308124>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-22**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA MJ.22-
DT.39**

Rijeka, ožujak 2022.

Marcel Jelenić

0069081271

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA MJ.22-
DT.39 / HEAT TREATING PROCESS OF WORKPIECE MJ.22-
DT.39**

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

Komentor: Doc. dr. sc. Matej Fonović

Rijeka, ožujak 2022.

Marcel Jelenić

0069081271

Rijeka, 16. ožujka 2022.

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

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: Marcel Jelenić (0069081271)
Studij: Diplomski sveučilišni studij strojarstva
Modul: Inženjerstvo materijala

Zadatak: Postupak toplinske obrade strojnog dijela MJ.22-DT.39 / Heat treating process of workpiece MJ.22-DT.39

Opis zadatka:


Potrebno je definirati proces toplinske obrade te opisati postrojenje za toplinsku obradu strojnog dijela MJ.22-DT.39. Potrebno je proanalizirati rezultate toplinske obrade i donijeti odgovarajuće zaključke. Nadalje, potrebno je proanalizirati proces toplinske obrade strojnog dijela MJ.22-DT.39. 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.

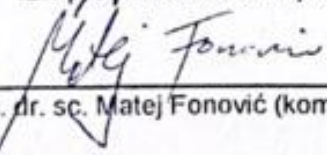
Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Marcel Jelenić


Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:


Izv. pred. dr. sc. Dario Iljkić


Doc. dr. sc. Matej Fonović (komentor)

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:


Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod nazivom „Postupak toplinske obrade strojnog dijela MJ.22-DT.39“ izradio samostalno u razdoblju od 21. ožujka 2022. do 20. lipnja 2022.

Diplomski rad je izrađen korištenjem stečenih znanja tijekom studija, posebno iz kolegija „Termalni procesi materijala“, pod voditeljstvom mentora izv. prof. dr. sc. Daria Iljića i komentora doc. dr. sc. Mateja Fonovića.

Marcel Jelenić

ZAHVALA

Zahvaljujem se svome mentoru izv. prof. dr. sc. Dariju Iljkiću i komentoru doc. dr. sc. Mateju Fonoviću na vremenu, trudu, pomoći, savjetima i prenesenom znanju koje mi je izrazito pomoglo u izradi ovog diplomskog rada. Nadalje bih se zahvalio asistentu Dariju Kvirgiću koji mi je pomogao kada god mi je pomoć bila potrebna.

Najviše se zahvaljujem obitelji i prijateljima koji su uvijek bili uz mene tijekom studiranja i davali mi bezuvjetnu podršku.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. FAZNE PRETVORBE ČELIKA.....	2
2.1. Nastanak austenita	4
2.2. Pretvorbe pothlađenog austenita.....	6
2.3. Perlitna transformacija	8
2.4. Bainitna transformacija.....	10
2.4.1. Gornji bainit	10
2.4.2. Donji bainit.....	11
2.5. Martenzitna transformacija	12
3. CEMENTIRANJE	15
3.1. Cementiranje u usporedbi s drugim postupcima za otvrdnjavanje površine	17
3.2. Čelici za cementiranje	18
3.3. Pougličavanje	26
3.3.1. Pougličavanje u krutom sredstvu.....	27
3.3.2. Pougličavanje u kapljevitom sredstvu.....	32
3.3.3. Pougličavanje u plinovitom sredstvu	34
3.3.4. Pougličavanje u vakuumu	36
3.3.5. Pougličavanje plazmom	37
3.4. Kaljenje.....	38
3.4.1. Direktno kaljenje	40
3.4.2. Jednostruko kaljenje	41
3.4.3. Dvostruko kaljenje	42
3.5. Niskotemperaturno popuštanje	43
4. POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA MJ.22-DT.39.....	44
4.1. Materijal strojnog dijela MJ.22-DT.39	45
4.2. Parametri postupka cementiranja	45
4.3. Tehnološka dokumentacija postupka cementiranja.....	47
4.4. Probno cementiranje strojnog dijela MJ.22-DT.39	50
4.5. Ispitivanje tvrdoće i metalografija	57
5. ZAKLJUČAK	62

LITERATURA	63
POPIS SLIKA.....	64
POPIS TABLICA	66
SAŽETAK	67
ABSTRACT.....	67

1. UVOD

Tema ovog diplomskog rada je postupak toplinske obrade strojnog dijela MJ.22-DT.39. Toplinskom se obradom nazivaju postupci u kojima se djelovanjem temperature na određeni materijal, u većini slučajeva je to čelik, mijenja njegova mikrostruktura. Strojni dio MJ.22-DT.39 je čelični obradak, izrađen od čelika 16MnCrS5 koji spada u skupinu čelika za cementiranje. Cementiranje je jedan od toplinsko – kemijskih postupaka obrade čelika. Osnovna svrha mu je postizanje tražene tvrdoće na površini obradka.

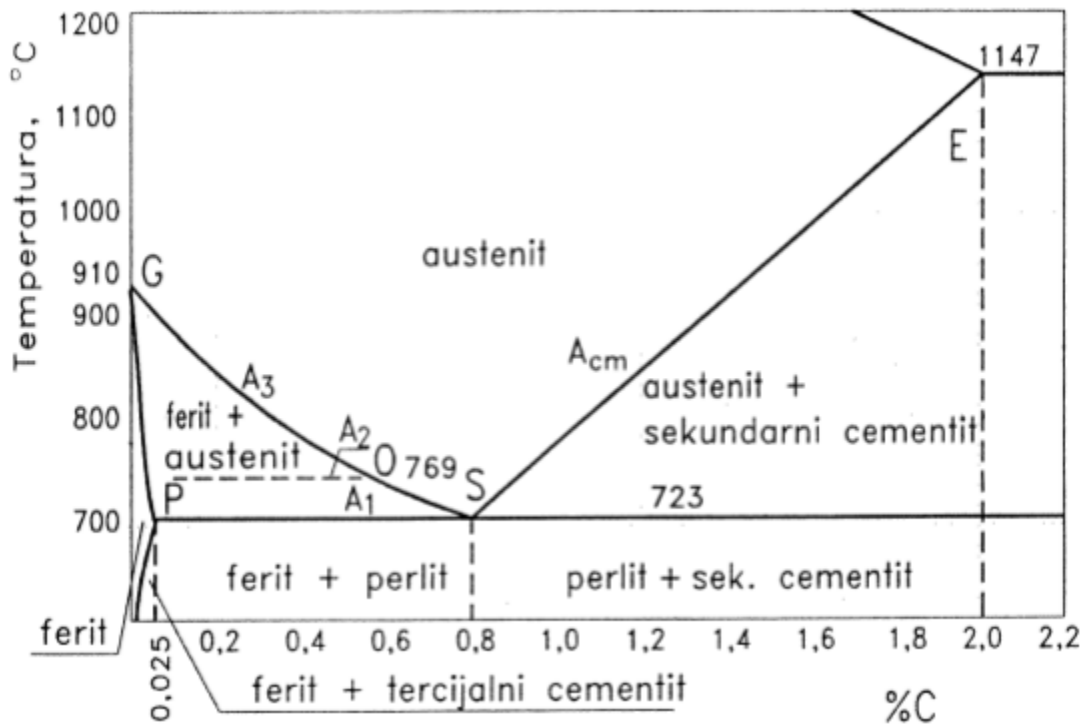
Ovaj diplomski rad je podijeljen na tri poglavlja. U prvome poglavlju prikazana je teorijska podloga o svim vrstama faznih pretvorbi koje se događaju u čeliku, različite vrste mikrostruktura koje ovise o temperaturama, te koje su bitne za kompletan proces cementiranja koji je i zadatak ovog diplomskog rada.

U drugome poglavlju je opisan postupak provođenja cementiranja do detalja, navedene su različite skupine čelika koje se koriste za cementiranje, te je navedena usporedba cementiranja sa nekim drugim postupcima za otvrdnjavanje površine.

U zadnjem, odnosno trećem poglavlju, prikazan je strojni dio na kojemu se vršila toplinska obrada, navedeni su parametri koji su bili potrebni za postizanje traženih zahtjeva, opisana je korištena oprema za postupak toplinske obrade, te metalografije, opisan je detaljno proces kako se i što radilo, te su na kraju izneseni rezultati toplinske obrade cementiranja.

2. FAZNE PRETVORBE ČELIKA

Kod analize toplinske obrade čelika potrebno je razumjeti fazni dijagram stanja Fe-Fe₃C. Slika 2.1 prikazuje spomenuti dijagram. U tom je dijagramu osim karakterističnih faznih područja moguće vidjeti i kritične temperature prekrystalizacije. Ove kritične temperature vrijede samo za prekrystalizaciju u ravnotežnim uvjetima, te odgovaraju dovoljno sporom ugrižavanju, odnosno ohlađivanju čelika.



Slika 2.1. Dio faznog Fe-Fe₃C dijagrama [1]

U ovisnosti o sadržaju ugljika u čeliku, mogu postojati tri osnovne faze. Te faze su ferit, cementit, te austenit koji se nalazi iznad kritične temperature A₁. Osim ovih osnovnih faza u čelicima se mogu pojaviti različite strukture ili mješavine struktura o kojima će više biti rečeno u nastavku. Također, ovisno o udjelu ugljika čelike dijelimo na :

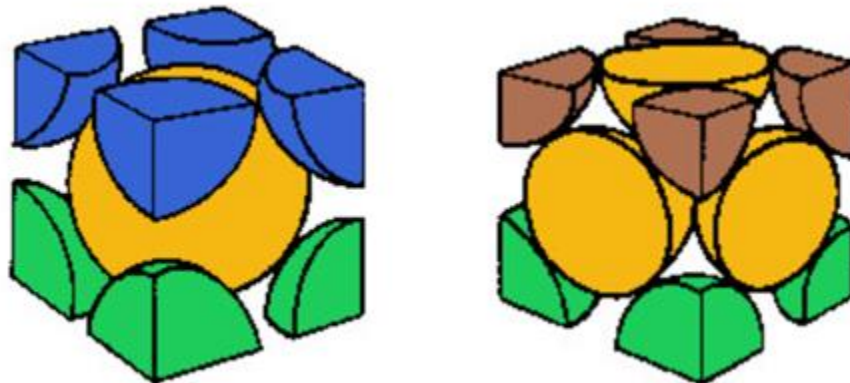
- podeutektoidne (< 0,8 % C)
- eutektoidne (0,8 % C)

- nadeutektoidne ($> 0,8 \% C$)

Ferit predstavlja uključinski kristal mješanac željeza i ugljika. Struktura kristalne rešetke mu je BCC, odnosno prostorno centrirana kubična rešetka. Drugim riječima, kruta otopina ugljika u željezu. Ferit se označava grčkim slovom α , te se zato i naziva α željezom. Udio ugljika u feritu može iznositi maksimalno 0,025 %. Slika 2.2, lijevo, prikazuje kristalnu rešetku ferita.

Sekundarni cementit, koji se još naziva i perlitni cementit, jest kemijski spoj. To je željezni karbid Fe_3C , koji može primiti maksimalno 6,67 % C u svoju strukturu.

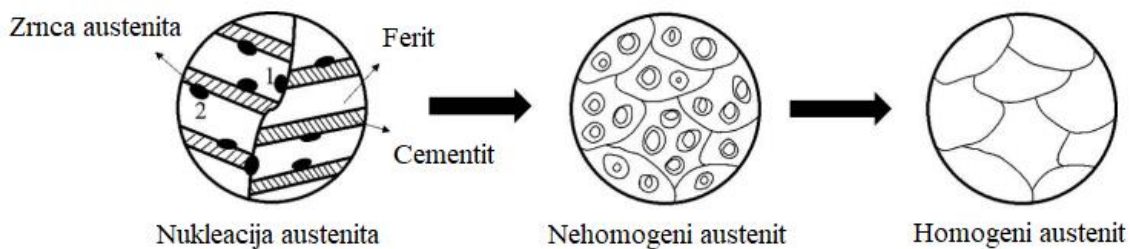
Austenit predstavlja uključinski kristal mješanac željeza i ugljika. Austenit ima FCC strukturu kristalne rešetke, odnosno plošno centriranu kubičnu rešetku. Kao i za ferit, može se reći kako je to kruta otopina ugljika u željezu. Austenit se označava grčkim slovom γ , te se zbog toga naziva i γ fazom željeza. Slika 2.2, desno, prikazuje kristalnu rešetku austenita.



Slika 2.2. Kristalna struktura ferita i austenita [2]

2.1. Nastanak austenita

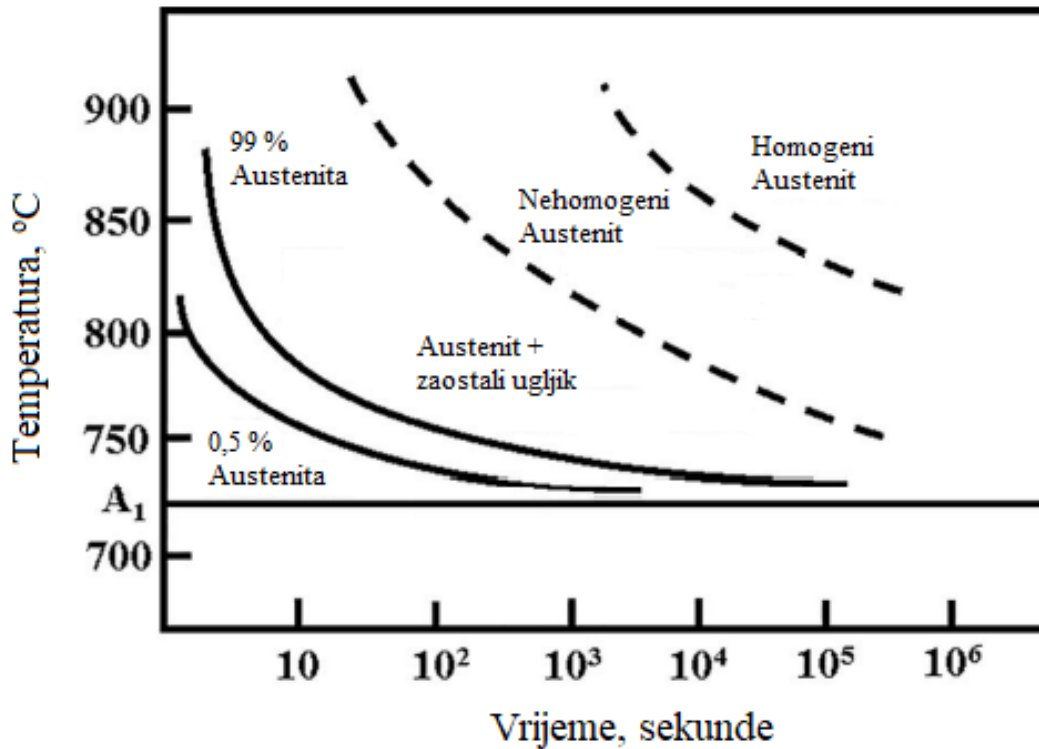
Ugljični čelik sadrži mješavinu ferita i perlita, samo perlita ili perlita i cementita na sobnoj temperaturi ovisno o sadržaju ugljika u čelika. Kada se čelik zagrije iznad kritične temperature, odnosno u područje γ faze, te kada je slobodna energija austenita dovoljno niža od energije feritno-karbidne smjese, dolazi do stvaranja austenita. Austenit nastaje difuzijskim mehanizmom. Na primjer za podeutektoidne čelike, formiranje austenita započinje kada temperatura čelika prijeđe nižu kritičnu temperaturu, A_1 . Na sličan način, austenit se počinje stvarati na eutektoidnoj temperaturi, koja iznosi $723\text{ }^\circ\text{C}$ za eutektoidne čelike. Transformacija počinje nukleacijom austenita na granici između ferita i cementita. Međutim, poželjnije mjesto za nukleaciju je granica perlita. Slika 2.3 prikazuje proces nastanka austenita.



Slika 2.3. Različite faze nastanka austenita iz lamelnog perlita [3]

Ovaj proces transformacije se nastavlja sve dok se sav ferit i cementit ne otope, odnosno sve dok se ne dobije 100% austenitna struktura. Dok se ferit mijenja u austenit promjenom kristalne strukture, cementit se transformira u austenit difuzijom ugljikovih atoma. Međutim, proces otapanja ferita je brži i stoga se završava prije nego proces pretvorbe cementita u austenit.

Homogenizacija austenita se događa ili povećavanjem temperature ili držanjem čelika duži vremenski period kako bi svi atomi ugljika difuzirali. Slika 2.4 prikazuje cjelovit proces nastanka austenita iz perlita.

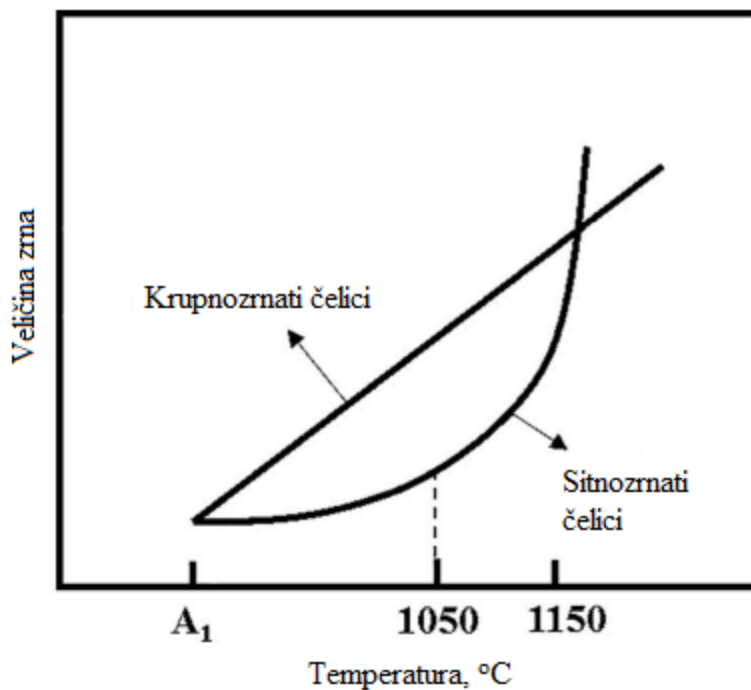


Slika 2.4. Utjecaj temperature i vremena na nastanak austenita iz perlita u eutektoidnom čeliku [3]

Veličina zrna austenita određuje svojstva čelika. Dakle, različita svojstva kao što su vlačna čvrstoća, žilavost, obradivost i tvrdoća mogu se mijenjati ukoliko se promijeni i veličina austenitnog zrna.

Na temelju sklonosti rasta zrna austenita, razlikuju se dvije vrste čelika. Postoje sitnozrnati i krupnozrnati čelici. Sitnozrnati čelici odupiru se rastu zrna austenita s porastom temperature, dok krupnozrnati čelici počinju naglo rasti s porastom temperature (1000 °C – 1050 °C), te se tako dobivaju, kako im i ime kaže, čelici s krupnim zrnima. Slika 2.5 prikazuje vezu između veličine zrna i temperature kod sitnozrnatih i krupnozrnatih čelika.

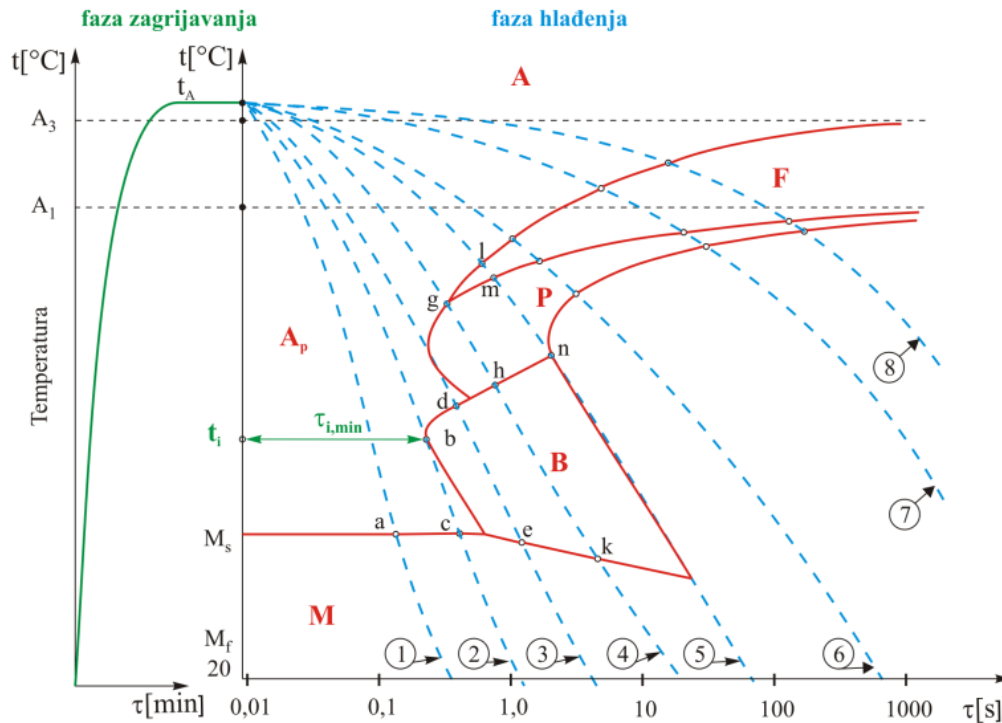
Međutim, nakon što temperatura poraste iznad 1050 °C, rast zrna u sitnozrnatim čelicima raste poprilično brzo, u odnosu na krupnozrnate čelike, dok na temperaturi od oko 1150 °C obje vrste čelika imaju istu veličinu zrna. Budući da su sitnozrnati čelici sposobni zadržati sitnu veličinu zrna austenita dulje vrijeme, oni se često i koriste za proces pougljičavanja na oko 950 °C s dugim ciklusima pougljičavanja.



Slika 2.5. Utjecaj temperature na veličinu zrna austenita u sitnozrnatim i krupnozrnatim čelicima [3]

2.2. Pretvorbe pothlađenog austenita

Kako bi se austenit mogao pretvoriti u neku drugu fazu, potrebno ga je dovesti u stanje neravnoteže. Da bi austenit postao nestabilan i težio raspadanju na niskotemperaturne faze potrebno ga je ohladiti. Na slici 2.1 se može uočiti kako austenit postoji na temperaturama iznad temperature A_1 koja iznosi 723 °C, što znači da će austenit u čeliku ohlađivanjem ispod prethodno spomenute temperature postati nestabilan. U ovisnosti o brzini ohlađivanja, pothlađeni će se austenit raznim procesima raspadati na niskotemperaturne faze. Slika 2.6 prikazuje jedan TTT – dijagram kontinuiranog ohlađivanja podeutektoidnog čelika, kojem su ucrtane i razne krivulje gašenja.



Slika 2.6. TTT – dijagram kontinuiranog ohlađivanja podeutektoidnog čelika s ucrtanim krivuljama gašenja [4]

Od bitnijih krivulja gašenja postoje dvije krivulje koje predstavljaju gornju i donju kritičnu brzinu gašenja. Gornjom kritičnom brzinom gašenja se naziva krivulja ohlađivanja koja tangira „nos“ krivulje početka pretvorbe u perlitni ili bainitni stupanj. To znači da se gornjom kritičnom brzinom gašenja postiže pretvorba austenita u martenzit, bez postojanja perlita ili bainita u strukturi. U slučaju ako ohlađivanjem ne želimo dobiti martenzit, važnu ulogu ima donja kritična brzina gašenja. Donja kritična brzina gašenja predstavlja maksimalnu brzinu ohlađivanja kod koje se još uvijek u strukturi ne pojavljuje martenzit.

Proces hlađenja se može zbivati na dva načina, a to je kontinuiranim ili anizotermnim hlađenjem, te diskontinuiranim ili izotermnim hlađenjem.

Kontinuirano hlađenje podrazumijeva ohlađivanje do sobne temperature u jednom ili više rashladnih sredstava, gdje se za vrijeme ohlađivanja čelik prebacuje iz jednog rashladnog sredstva u drugo. Hlađenje se vrši, kako mu i ime kaže kontinuirano, odnosno neprekidno, sve dok se temperatura čelika ne izjednači s temperaturom rashladnog sredstva.

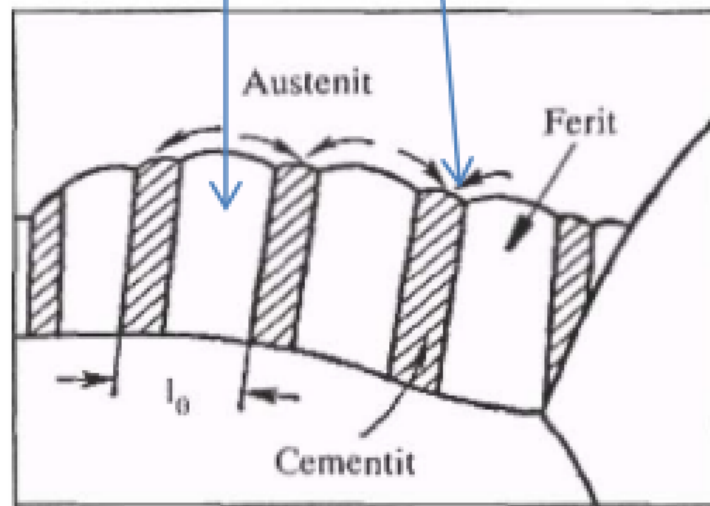
Diskontinuirano hlađenje podrazumijeva ohlađivanje u samo jednom rashladnom sredstvu, koje je zagrijano iznad sobne temperature, te se zadržava u tom sredstvu sve dok se pretvorba austenita ne završi potpuno ili djelomično. Da li će se pretvorba odviti potpuno ili djelomično ovisi o svojstvima i strukturi koju želimo postići. Na kraju se hlađenje do sobne temperature vrši najčešće vrlo malim brzinama kako bi se postigla mehanička ravnoteža, odnosno da preostane vrlo malo zaostalih naprezanja. Ovo završno hlađenje do sobne temperature ne utječe na prethodno nastale faze.

2.3. Perlitna transformacija

Perlit se može definirati kao mješavina dviju različitih faza, tj. ferita i cementita. Perlit nastaje uz potpunu difuziju metalnih i nemetalnih atoma, odnosno difuziju atoma ugljika i željeza. U slučaju eutektoidnog čelika, jezgra može biti bilo koja od dvije faze – ferit ili cementit, no u većini slučajeva je to cementit. Da bi se perlitna transformacija mogla ostvariti, potrebno je zadovoljiti dva osnovna uvjeta. Prvi uvjet je dovoljna energetska nestabilnost, odnosno dovoljna razlika između slobodne energije austenita i perlita, a drugi uvjet je dovoljna difuzija atoma. Brzina kojom se odvija perlitna transformacija uvjetovana je brzinom nukleacije i brzinom rasta novih faza.

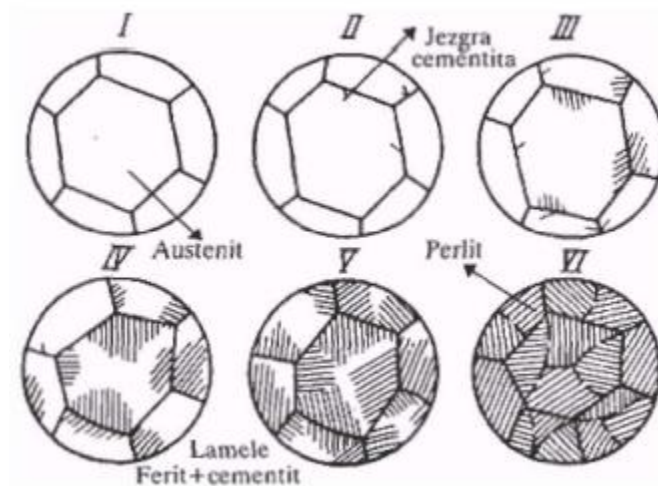
Prije početka pretvorbe austenita u perlit, atomi ugljika se istišću iz γ – faze (austenita). Prethodno istisnuti atomi ugljika se povezuju sa atomima željeza u kemijski intermetalni spoj Fe_3C , odnosno cementit. U početku cementit nastaje na granici zrna austenita, te zatim raste. Daljnji rast cementitne jezgre se događa zbog difuzije ugljika iz austenita. Zatim nastaju lamele cementita, koje okružuju dijelove austenitnog zrna, te se na kraju i ti dijelovi austenitnog zrna pretvaraju u ferit kada se dovoljno osiromaše ugljikom. To znači da stvaranjem lamela cementita nastaju i lamele ferita. Slika 2.7 prikazuje nastanak lamela ferita i cementita.

Lamele ferita i cementita



Slika 2.7. Nastajanje lamela ferita i lamela cementita iz austenita [5]

Slika 2.8 prikazuje proces pretvorbe austenita u perlit.



Slika 2.8. Shematski prikaz pretvorbe austenita u perlit [5]

Na slici 2.8 označeno rimskim brojem jedan (I) prikazano je austenitno zrno. Zatim je prikazano nastajanje jezgre kristalizacije cementita na granicama austenitnog zrna (II). Shematski

prikazi (III, IV i V) prikazuju faze rasta nastalih lamela ferita i cementita, te stvaranje zrna perlita, i na kraju (VI) je prikazan perlit.

Mehanička svojstva čelika ovise o razmacima između lamela cementita i lamela ferita u perlitu. Tvrdoća će čelika biti veća ukoliko su lamele tanje. Isto tako, ukoliko su lamele tanke, žilavost će biti manja, kao i plastičnost perlita, odnosno eutektoidni čelik. Perlit može imati, u ovisnosti o mikrostrukturi, tri oblika. Razlikuju se perlit, sorbit i troostit. Sve tri navedene mikrostrukture mogu nastati pretvorbom pothlađenog austenita pomoću difuzije ugljika prije pretvorbe austenita u perlit. Na najvišim temperaturama se pojavljuje perlit, sorbit na nešto nižim temperaturama od perlita, a troostit nastaje na najnižim temperaturama perlitnog stupnja.

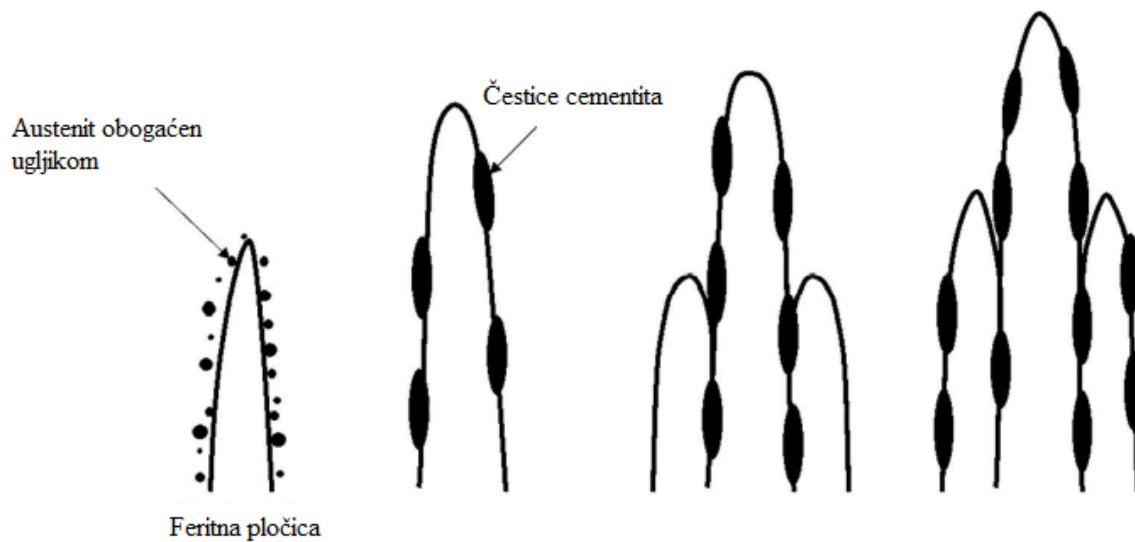
2.4. Bainitna transformacija

Bainit se sastoji od ferita i karbida s feritom kao jezgrom. To je fino dispergirana mješavina od navedenih elemenata, te se još i naziva međustupnjem. Pretvorba austenita u bainit se jednim dijelom odvija bezdifuzijskim mehanizmom, a jednim dijelom difuzijskim mehanizmom.

U slučaju eutektoidnog čelika, stvaranje bainita se odvija u temperaturnom rasponu od 200 do 500 °C iz pothlađenog austenita. Kod čelika s nepovezanim perlitnim i bainitnim zonama (kod nekih legiranih čelika), bainitna transformacija je moguća i izotermnim i kontinuiranim hlađenjem iz austenita, dok kod običnih ugljičnih čelika preklapanje ovih perlitnih zona s bainitnom zonom otežava bainitnu transformaciju. Bainit ima veću tvrdoću od perlita.

2.4.1. Gornji bainit

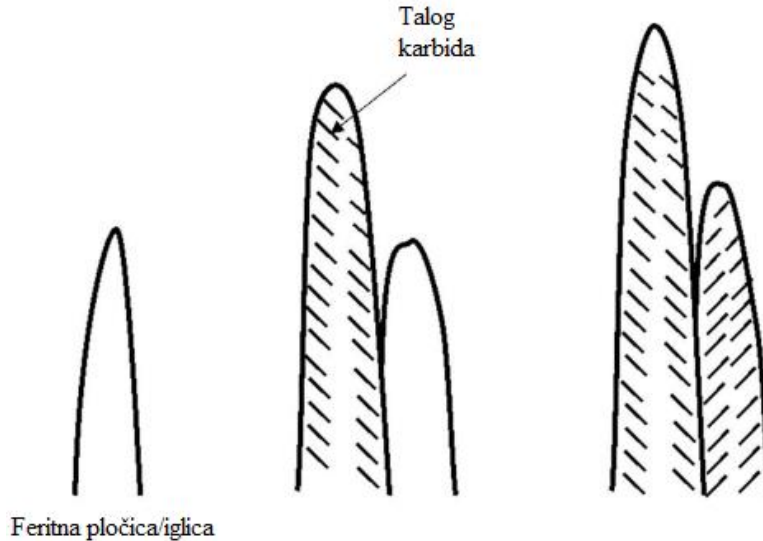
Kada temperatura transformacije ostane u gornjem dijelu bainitne zone, obično od 550 do 400 °C, nastaje gornji bainit. Gornji bainit ima tzv. „perjastu građu“, gdje je cementit izdvojen u obliku izoliranih čestica smještenih na feritnim pločicama. Potrebno je napomenuti kako gornji bainit, u usporedbi s mikrostrukturama koje su dobivene perlitnom pretvorbom, smanjuje i plastičnost čelika. Tvrdoća kao i čvrstoća se značajno ne mijenjaju. Slika 2.9 prikazuje izgled gornjeg bainita.



Slika 2.9. Različite faze uključene u stvaranje gornjeg bainita [3]

2.4.2. Donji bainit

Nastanak donjeg bainita olakšan je kada se omogući transformacija u donjoj zoni bainitne regije, odnosno od 250 do 400 °C. Zanimljivo je da se u slučaju donjeg bainita karbidi općenito talože pod kutom od 55 do 60° prema glavnoj bainitnoj osi. Također se naziva i igličastim bainitom. Ima oblik nalik martenzitu jer se formira kao pojedinačna iglica koja poprima lećasti oblik. Karbidi imaju oblik šipki ili oštrica. Donji bainit čeliku osigurava dobru plastičnost i žilavost, kao i dobra mehanička svojstva. Slika 2.10 prikazuje izgled donjeg bainita.



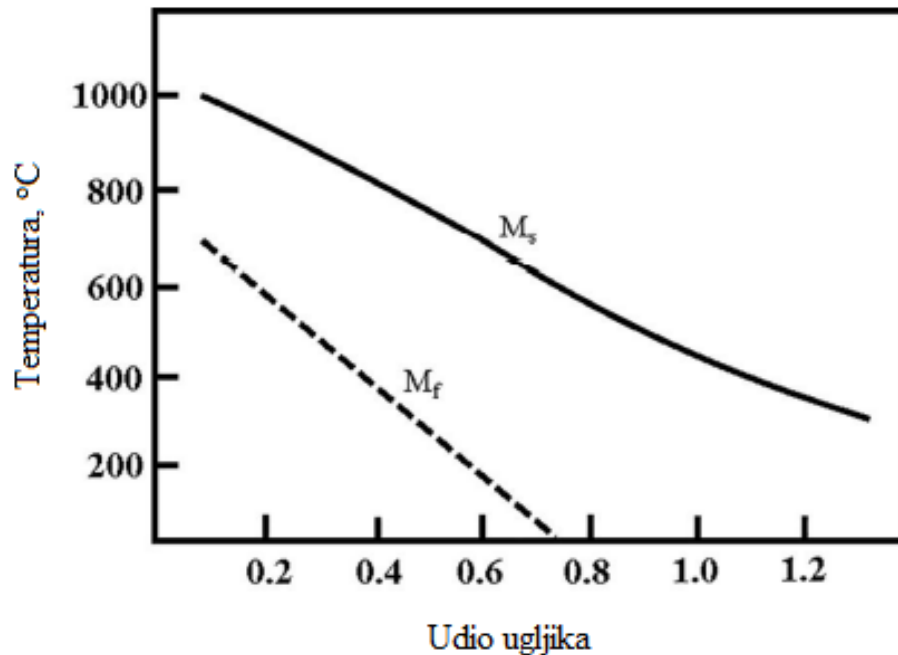
Slika 2.10. Različite faze uključene u stvaranje donjeg bainita [3]

2.5. Martenzitna transformacija

Martenzit nastaje dovoljno brzim gašenjem austenita. Nastanak martenzita ovisi samo o temperaturi, ne i o vremenu trajanja procesa. Martenzitna transformacija je bezdifuzijski proces. Budući da u ovoj transformaciji nema difuzije ugljika, nema niti promjene u kemijskom sastavu.

To znači da α i γ faza imaju isti sastav. Dakle, α – faza postaje zasićena ugljikom jer je dobro poznato da je granica topljivosti ugljika znatno veća u γ željezu nego u α željezu. Prema tome, martenzit se obično definira kao prezasićena kruta otopina ugljika u α – željezu. Martenzit ima tatreagonalnu kristalnu rešetku. Tetreagonalnost je posljedica zarobljavanja ugljika u otopini.

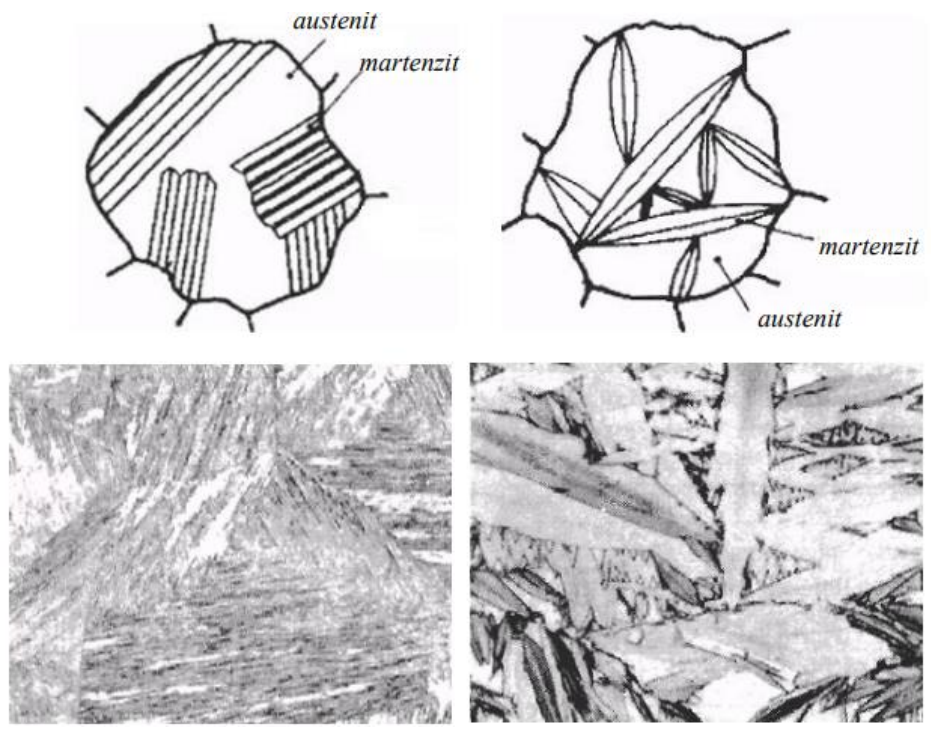
Martenzitna transformacija započinje na temperaturi M_s i završava na temperaturi M_f . Kako je i prethodno rečeno, martenzitna pretvorba ovisi samo o temperaturi, ne i o vremenu, ali je potrebno poznavati sadržaj ugljika u čeliku kako bi se mogla točno odrediti početna i završna temperatura pretvorbe. Slika 2.11 prikazuje karakteristične temperature za određeni sadržaj ugljika. Iz slike se može vidjeti kako će se zahtjevati veća temperatura, ukoliko je udio ugljika u čeliku manji.



Slika 2.11. Početak i završetak martenzitne pretvorbe - odnos između temperature i udjela ugljika [3]

Čelici koji imaju martenzitnu strukturu su zakaljeni. Postupak toplinske obrade, kojim se dobiva martenzitna struktura, a koji se sastoji od naglog hlađenja austenitiziranog čelika, naziva se kaljenje. Čelik koji ima martenzitnu strukturu ima vrlo visoku tvrdoću i čvrstoću, ali nisku žilavost i duktilnost.

Martenzit može imati dva oblika strukture. Ukoliko se radi o podeutektoidnom čeliku, onda se taj martenzit naziva masivnim, a ukoliko se radi o nadeutektoidnom čeliku onda se taj martenzit naziva pločastim. Slika 2.12 prikazuje masivni (lijevo) i pločasti (desno) martenzit.



Slika 2.12. Shematski prikaz masivnog i pločastog martenzita [4]

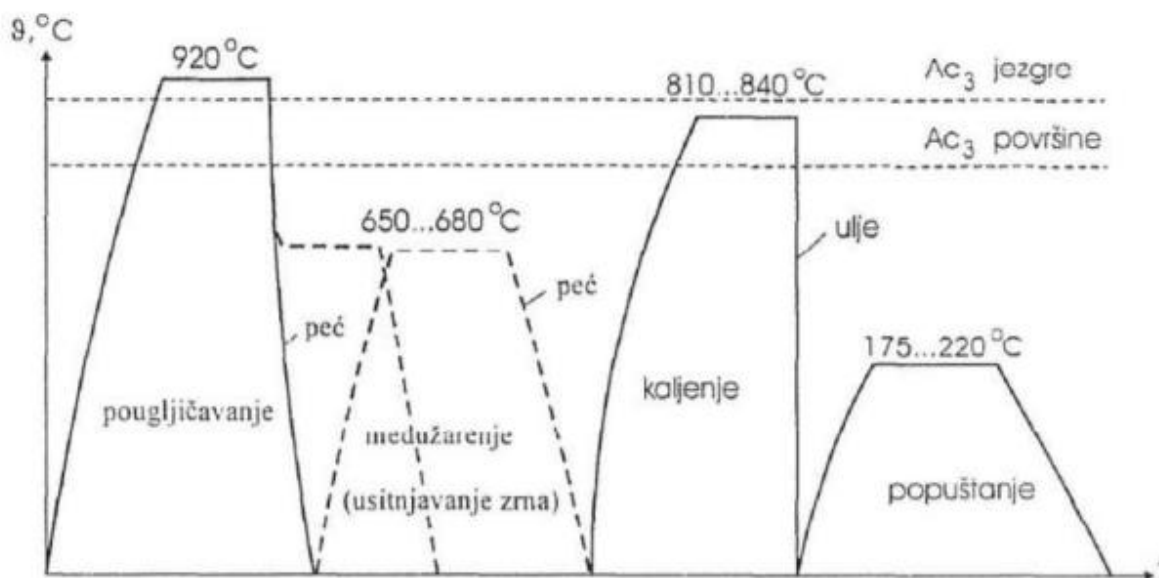
3. CEMENTIRANJE

Cementiranje spada u kemijsko – difuzijske postupke toplinske obrade. Postupak cementiranja se zasniva na principu toplinske i kemijske obrade metala. Cementiranjem se naziva proces površinske obrade, kojem je glavni zadatak otvrdnjivanje površine čelika na način da se ta površina obogaćuje ugljikom. To je moguće ostvariti zagrijavanjem čelika na vrlo visoke temperature (900 °C) uz prisustvo tvari koje sadrže ugljik. Neke od tih tvari su ugljen, natrijev karbonat, te prirodni plin. Pri tome u plinovitoj fazi nastaje ugljik u obliku atoma, koji se zatim adsorbira i difundira u površinski sloj čelika. Najčešće zahtijevano svojstvo je tvrdoća površine, ali i čvrstoća i žilavost jezgre.

Postupak cementiranja se sastoji od sljedećih postupaka :

1. Pougličavanje – obogaćivanje površinskog sloja čelika ugljikom
2. Kaljenje (gašenje) – dovođenje pougličanog sloja u čvrstu martenzitnu strukturu
3. Niskotemperaturno popuštanje – naknadno grijanje s ciljem smanjenja naprezanja i postizanja duktilnosti

Slika 3.1 prikazuje postupak cementiranja.



Slika 3.1. Shematski prikaz postupka cementiranja [8]

Osnovni cilj je postići tvrdoću na površinskim slojevima čime se povećava otpornost na trošenje, te zadržavanje žilavosti u jezgri kako se čeliku ne bi smanjila otpornost na udarna opterećenja (zupčanicima, vratila i osovine). Zbog toga se ova toplinska obrada koristi kod strojnih dijelova koji su izloženi površinskom trošenju i visokim dinamičkim naprezanjima. Primjeri strojnih dijelova koji se podvrgavaju postupku cementiranja su zupčanicima, bregaste osovine i vratila. Slika 3.2 prikazuje neke od spomenutih cementiranih strojnih dijelova.



Slika 3.2. Cementirani strojni dijelovi – zupčanicima [9]

U svrhu cementiranja upotrebljavaju se ugljični i niskolegirani konstrukcijski čelici. Bitno je napomenuti da ove vrste čelika sadrže najviše 0,25 % C. Kada bi ovakve čelike prokaljivali, oni ne bi imali tvrdoću veću od 45 HRC. Kako je prethodno spomenuto, za postizanje veće tvrdoće, površinske slojeve prije kaljenja potrebno je pougljičiti. Nakon pougljičenja poželjno je da se sadržaj ugljika u površinskom sloju kreće u granicama od 0,6 do 1 %.

3.1. Cementiranje u usporedbi s drugim postupcima za otvrdnjavanje površine

Jedan od raširenijih postupaka kod kojih se kreira tvrdi površinski sloj sa većom gustoćom površinskih tlačnih napreznja naziva se nitriranje. U slučaju nitriranja ne dolazi do izmjene dimenzija tijekom postupka. To je niskotemperaturni postupak. Razina otvrdnuća većinom je povezana sa udjelom kroma koji se nalazi u čeliku. Zbog toga se tvrdoća ovim postupkom neznatno povisuje kod ugljičnih čelika. Dubinu slojeva koju je moguće dobiti pomoću nitriranja je vrlo mala u odnosu na slojeve koji se postižu kod cementiranja. Efektivna dubina kreće se uglavnom od 0,3 do 0,6 mm, čak i kod dugačkih vremena obrade. Zbog toga je uporaba čelika koji su podvrgnuti postupku nitriranja ograničena. Za primjer zupčanika, granična veličina zuba u slučaju postupka nitriranja iznosi 2 mm.

Kod primjene postupka indukcijskog kaljenja zupčanika cilj je dobiti površinsku tvrdoću od oko 55 HRC, a u jezgri oko 30 HRC. Iz ovog primjera se može vidjeti kako je vrijednost tvrdoće niža od tvrdoće koja se dobije postupkom cementiranja. Također, strojni dijelovi obrađeni na ovaj način nemaju toliko visoku kontaktnu čvrstoću ili otpornost na trošenje kao što je to slučaj kod cementiranih dijelova. Indukcijsko kaljenje se primjenjuje za otvrdnjavanje površina većih strojnih dijelova, koji bi se pri cementiranju deformirali ili promijenili dimenzije.

Za slučaj kod cementiranja, pougljičeni slojevi mogu imati veću dubinu u odnosu na nitriranje (više od 4 mm). Pri tome je moguće postizanje tvrdoće površine od oko 60 HRC. Također je, kod cementiranja, moguće postići veće vrijednosti savojne čvrstoće u odnosu na indukcijski kaljene i nitrirane površine. Naravno, kod ovog postupka postoje i određeni nedostaci. Pri promjeni mikrostrukture na površinskom sloju, kao i u jezgri, doći će do pojave deformacija i promjene dimenzija obratka. Ove nedostatke je moguće umanjiti, ili ukloniti naknadno nakon provođenja postupka. Kako bi kontrolirali deformacije u određenoj mjeri, potrebno je koristiti odgovarajuće stezaljke i naprave. Problem promjena dimenzija se rješava naknadnim brušenjem nakon kaljenja kako bi se postigle konačne dimenzije. U slučajevima gdje su postavljeni zahtjevi za što manje deformacije, postignut je značajan napredak u pogledu korištenja postrojenja za cementiranje. Kod ovakvih vrsta postrojenja gašenje se obavlja u plinu, a ne u ulju ili vodi.

3.2. Čelici za cementiranje

Čelici za cementiranje spadaju pod konstrukcijske čelike. Ovim čelicima se pougljičava rubni sloj nakon obrade odvajanjem čestica. Kaljenje je sljedeći postupak koji se provodi nakon pougljičavanja rubnog sloja s ciljem da se postigne povišena žilavost jezgre, te da bi se postigla visoka otpornost na trošenje rubnih, odnosno površinskih slojeva. Na kraju se provodi postupak niskotemperaturnog popuštanja.

Ova skupina čelika se naziva još i niskougljičnim čelicima, zbog toga što uglavnom sadrže od 0,1 do 0,2 % C prije postupka pougljičenja. Općenito, ovi čelici mogu biti nelegirani ili niskolegirani. Niskougljični čelici s 0,1 do 0,2 % ugljika nisu konvencionalno zakaljivi. Čelici koji imaju udio ugljika veći od 0,35 % smatraju se zakaljivima u smislu znatnijeg povećanja tvrdoće. U cilju zakaljivanja i postizanja povišene otpornosti na abrazijsko trošenje, potrebno je niskougljičnim čelicima povisiti sadržaj ugljika u rubnim slojevima. Udio ugljika se uglavnom povećava na 0,8 do 0,9 %. Ovakvo povišenje ugljika u površinskim slojevima se postiže postupkom pougljičenja. Na taj način nastali obogaćeni rub ugljikom postaje zakaljiv. To znači da gašenjem s odgovarajuće temperature austenitizacije čelik postaje sposoban poprimiti strukturu visokougljičnog martenzita. Visokougljični martenzit je izrazito tvrd i otporan na trošenje.

U tehnici toplinske obrade čelika postupak pougljičenja i kaljenja pougljičenog površinskog sloja se naziva cementiranjem. Ukoliko obradak nije prokaljen, nakon cementiranja će nepougljičena jezgra ostati feritno perlitne strukture. Za slučaj prokaljivanja jezgra će postati niskougljično martenzitna. Zbog toga što je visoki rad loma karakterističan za oba strukturna oblika, potrebno je razumijeti da će zbog toga i pougljičeni i zakaljivi („cementirani“) obradak također biti otporan na trošenje i žilav. Tablica 3.1 prikazuje neke od čelika za cementiranje.

Tablica 3.1. Čelici za cementiranje [11]

Oznaka čelika			Sastav "ostalo" %	Tvrdća u isporučenom "BG"-stanju, HB	Slijepo kaljeno ϕ 30 mm			Kaljenje	
Stare norme		HRN EN 10027-1			$R_{p0.2}$ MPa min.	R_m MPa	A_5 % min.	I. jezgre °C	II. ruba °C
DIN 17006 (VDEh)	HR C.B0.002								
C 10	Č1120	-	-	90...126	295	490...640	16	880...920 voda	-
C 15	Č1220	-	-	103...140	355	590...790	14	880...920 voda	-
Ck 10	Č1121	C10E	-	90...126	295	490..640	16	880...920 voda	-
Ck 15	Č1221	C15E	-	103...140	355	590..790	14	880...920 voda	-
17Cr3	Č4120	17Cr3	-	118...160	440	690...890	11	870...900 voda, ulje	-
16MnCr5	Č4320	16MnCr5	1Cr	140...187	590	780...1080	10	850...880 ulje	810...840 ulje
20MnCr5	Č4321	20MnCr5	1,2Cr	152...201	685	980...1280	7	890...920 ulje	810...840 ulje
20CrMo5	Č4721	-	0,25Mo 1,1Mn	152...201	785	1080...1380	7	850...880 ulje	810...840 ulje
20MoCr4	Č7420	20MnCr4	0,4Cr	140...187	590	780...1080	10	890...920 ulje	-
15CrNi6	Č5420	-	1,5Ni	152...201	635	880...1180	9	840...870 ulje	800...830 ulje
18CrNi8	Č5421	-	2Ni	170...217	785	1180...1430	7	840...870 ulje	800...830 ulje

Iz prethodne tablice je moguće vidjeti kako se čelici za cementiranje dijele u sljedeće kategorije :

1. kvalitetni čelici (C 10 i C 15)
2. nelegirani plemeniti čelici (Ck 10 i Ck 15)
3. legirani plemeniti čelici

Razlika između plemenitih i kvalitetnih čelika je u sniženom sadržaju fosfora i sumpora, ali i u jednoličnosti svojstava, prije svega onih svojstava postignutih u jezgri proizvoda kao posljedica

toplinske obrade. Plemeniti čelici sadrže po 0,035 % S i P, dok kvalitetni čelici sadrže nešto više, odnosno 0,045 % S i P. Također, kod plemenitih je čelika obrađena površina kvalitetnija, te je i broj nemetalnih uključaka u masi čelika manji nego kod kvalitetnih čelika.

Nadalje, plemeniti legirani čelici se dijele u sljedeće skupine :

- jednostruko legirani čelici kromom,
- čelici legirani kromom i manganom
- čelici legirani kromom i molibdenom – glavni legirajući element može biti ili krom ili molibden
- čelici legirani kromom i niklom

Osnovni zadatak legirajućih elemenata je povećanje prokaljivosti pri gašenju nakon pougljičenja. Rezultat povišenja prokaljivosti jest dobivanje u jezgri strukturu niskougljičnog martenzita. Spomenuta struktura osigurava visoka svojstva čvrstoće jezgre, kao i njenu povećanu dinamičku izdržljivost, te visoki rad loma, odnosno žilavost.

Legirajući će elementi pored glavnog utjecaja na svojstva jezgre utjecati i na svojstva pougljičenog ruba. Neka od svojstava na koja će utjecati legirajući elementi su brzina procesa pougljičenja, sadržaj ugljika u površinskom sloju i dubina pougljičenog sloja.

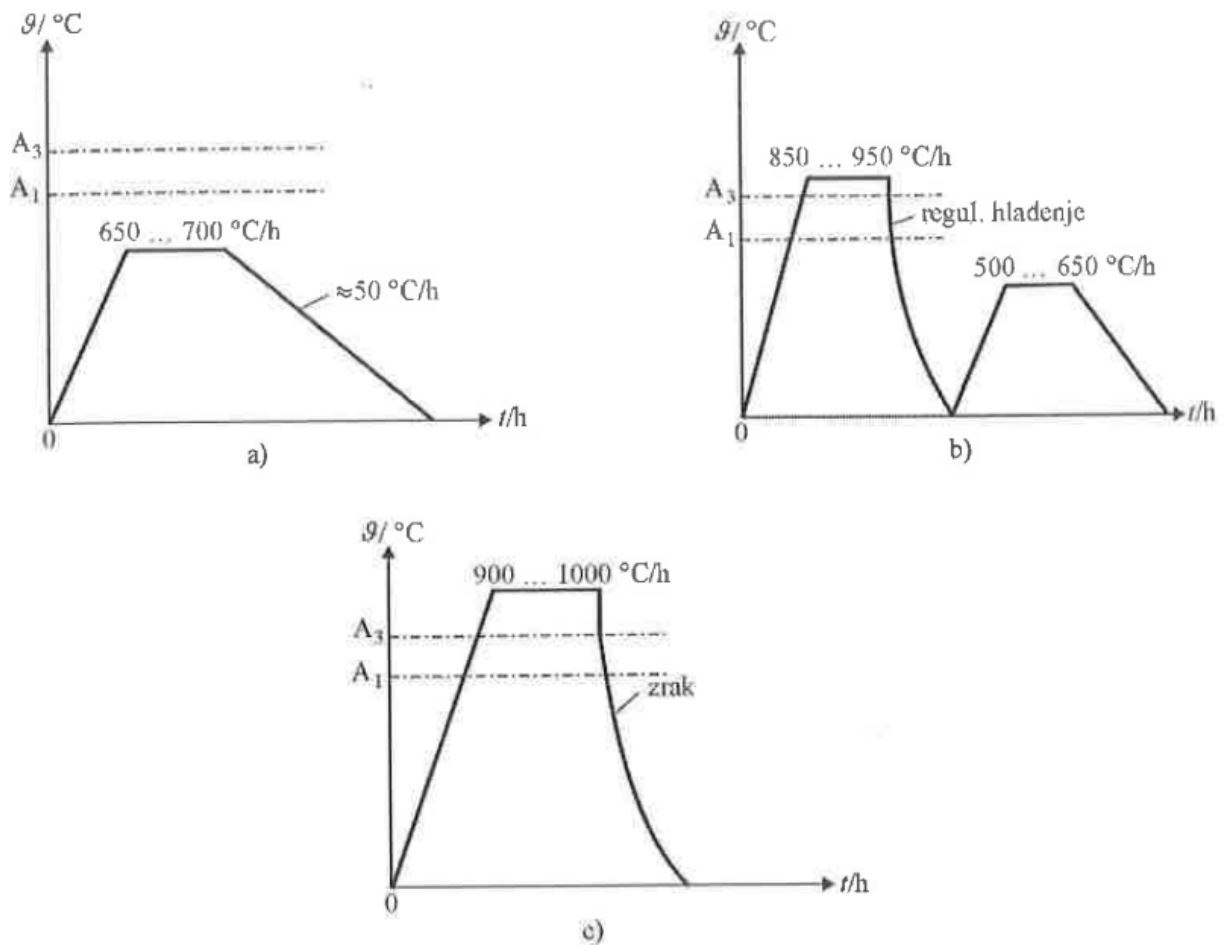
S obzirom na to će elementi kao što su nikel, silicij i kobalt, odnosno nekarbidotvorci, ubrzavati difuziju ugljika u austenitu, ali će i istovremeno snižavati maksimalnu topivost ugljika u površinskom sloju. Nasuprot tome, karbidotvorci poput kroma, molibdena, vanadija i mangana će utjecati na snižavanje koeficijenta difuzije ugljika u austenitu. Zbog toga će karbidotvorci povisiti udio ugljika u rubnom sloju obradka. Ovo povećanje udjela ugljika može dovesti do ubrzanog stvaranja karbida, te samim time i do pojave površinskih pukotina.

Za ovu skupinu čelika postoje i norme koje ne propisuju samo kemijski sastav, već i svojstva u stanju isporuke od strane čeličane potrošaču čelika, odnosno metaloprerađivaču. Prema normama DIN 17210 propisuje se za isporuku jedno od sljedećih stanja, odnosno strukture :

1. stanje „G“: mekožareno – propisuje se maksimalna dopuštena tvrdoća pri isporuci čeličnog poluproizvoda. Slika 3.3, a) prikazuje meko žarenje.

2. stanje „BF“: niskotemperaturna normalizacija s eventualnim popuštanjem – regulira se željena vlačna čvrstoća isporučenog poluproizvoda. Slika 3.3, b) prikazuje niskotemperaturnu normalizaciju.
3. stanje „BG“: visokotemperaturna normalizacija – cilj je postizanje optimalne obradljivosti odvajanjem čestica. Slika 3.3, c) prikazuje visokotemperaturnu normalizaciju.

U tablici 3.1 se nalaze samo propisi tvrdoće za stanje „BG“.

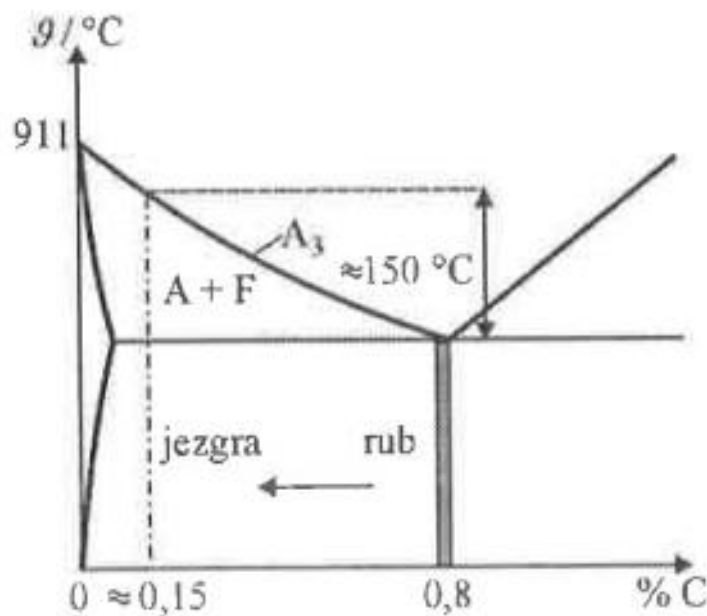


Slika 3.3. Postupci toplinske obrade čelika za cementiranje prije isporuke: a) meko žarenje, stanje “G”, b) niskotemperaturna normalizacija, stanje “BF”, c) visokotemperaturna normalizacija, stanje “BG” [11]

Kako je u današnje vrijeme provođenjem postupka pougljičenja gotovo nemoguće ne postići visoku tvrdoću cementiranog sloja, takva se tvrdoća niti ne propisuje posebno. Tvrdoća nakon gašenja, a prije popuštanja rubnog sloja iznosi od 61 do 64 HRC.

Slijepim kaljenjem je moguće vrlo dobro simulirati postiziva svojstva jezgre pougljičenog proizvoda. Slijepo kaljenje je postupak propisanog trajanja držanja epruvete pri temperaturi pougljičenja, ali u inertnom, odnosno nepougljičujućem sredstvu. Norme za ovakvo ispitivanje propisuju šipke promjera 11, 30 ili 63 mm. U tablici 1 uneseni su samo propisi za vlačnu, odnosno rasteznu čvrstoću, konvencionalnu granicu razvlačenja i lomno razvlačenje šipke koja je isporučena s promjerom od 30 mm.

Utvrđivanje temperature gašenja predstavlja najveći problem pri postavljanju postupka pougljičenja i kaljenja. Slika 3.4 prikazuje promjenu udjela ugljika od ruba prema jezgri tijekom pougljičenja. Kako je i vidljivo na ovoj slici, na obradku istovremeno postoje područja vrlo visokog sadržaja ugljika (rub sa otprilike 0,8 % C), ali i područja niskog sadržaja ugljika (jezgra sa manje od 0,2 % C). Zbog toga što se austenitizacija čelika u većini slučajeva izvodi na temperaturama koje su nešto više od temperature A_3 , time bi izbor temperature austenitizacije prema rubnim slojevima izazvao zakaljivanje tih slojeva, ali bi zakaljivanje jezgre bilo nepotrebno, jer bi se ta jezgra u stvari gasila iz strukturnog područja austenita i ferita.



Slika 3.4. Prikaz promjene udjela ugljika od ruba prema jezgri tijekom pougljičenja [11]

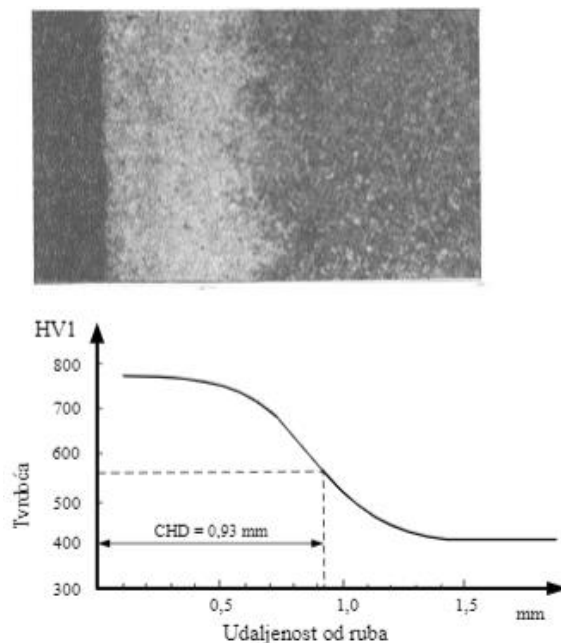
Rubni slojevi bi bili pregrijani ukoliko bi se temperatura austenitizacije utvrđivala na osnovi sadržaja ugljika u jezgri. Za slučaj sa prethodne slike ovo pregrijanje iznosilo bi čak oko 150 °C. Ovakvo pregrijanje bi uzrokovalo pogrubljenje zrna martenzita u rubu, a time i njegove povišene krhkosti i sklonosi odlupljivanju od nižeugljične podloge. Zbog ovoga je potrebno odabrati kompromisnu temperaturu austenitizacije u cilju konačnog zakaljivanja. To znači da će temperatura morati biti niža od one idealne temperature za jezgru, a viša od one potrebne za visokouglični rub.

S obzirom na prethodno rečeno, najmanje će problema biti kod nelegiranih čelika. Tome je razlog što se kod njih dopušta tzv. direktno gašenje, odnosno gašenje s temperature pougljičenja zbog toga što se od ovakvih čelika izrađuju proizvodi manjih dimenzija za sporedne namjene, odnosno mala udarna naprezanja u radu. Čelici 15Cr3 i 20MoCr4 se također mogu gasiti direktno zbog toga što oba čelika nisu sklona porastu zrna pri visokoj temperaturi austenitizacije. To je zahvaljujući legirajućim elementima molibdenu i kromu. Direktno gašenje se provodi samo nakon pougljičenja u tekućem i plinovitom sredstvu. Ostale čelike koji su legirani potrebno je nakon postupka pougljičenja sporo hladiti, te ih zatim ponovo austenitizirati do temperature koja je nešto viša od one primjerene rubu i na kraju je potrebno čelik gasiti, tj. zakaliti.

Usitnjavanje zrna, koje je pogrubjelo pri postupku pougljičavanja, postiže se sporim ohlađivanjem s temperature pougljičenja gdje je proizvod proveo dugo vremena. Usitnjavanje se događa najviše u površinskom pougljičenom sloju koji je bio najjače pregrijan, ali također u nešto manjoj mjeri i u jezgri gdje su zrna mogla postati grublja zbog vrlo dugog boravka u austenitnom stanju.

U pravilu konstruktor stroja ili uređaja definira dubinu cementiranog sloja, najčešće na osnovi procijenjenog površinskog pritiska kojem će proizvod biti izložen. Kod čelika bez jakih karbidotvoraca se dubina uglavnom regulira trajanjem pougljičenja.

Slika 3.5 prikazuje mikrostrukturu čelika i tvrdoću u ovisnosti o udaljenosti od ruba čelika.



Slika 3.5. Prikaz mikrostrukture cementiranog obratka i raspored tvrdoće u ovisnosti o udaljenosti od ruba [10]

Poznato je kako na postignutu dubinu pougljičenja preko svojeg utjecaja na koeficijent difuzije djeluju legirajući elementi, odnosno na koncentraciju ugljika u krajnjem vanjskom rubu. S obzirom na to će nekarbidotvorci omogućavati postignuće veće dubine nego karbidotvorci. Na rubu pougljičenih čelika u zakaljenom stanju, a posebno kod legiranih čelika, moguće je pronaći sljedeće strukturne sastojke : martenzit, karbidi i zaostali austenit. Ukoliko se pri pokusnom cementiranju na rubu dobije prevelika količina karbida potrebno je koristiti „blaže“ sredstvo za pougljičenje ili koristiti neki drugi čelik (čelik sa slabijim karbidotvorcima).

Ukoliko u obradku postoje prevelike količine zaostalog austenita, uglavnom više od 5 %, nakon završenog gašenja obradak je potrebno duboko hladiti. Na taj način se postizanjem temperature M_f zaostali austenit prisili na pretvorbu u martenzit. Nakon provedenog dubokog hlađenja se provodi postupak popuštanja.

Osnovne karakteristike prethodno nabrojenih skupina čelika za cementiranje su sljedeće :

- nelegirani, kvalitetni ili plemeniti, čelici su zakaljivi jedino u vodi. Zbog toga su prokaljivi samo do oko promjera od 10 mm. Svojstva jezgre kod ovakvih čelika, a posebno kod

neprokaljenih, su vrlo slaba. Zbog toga su primjenu pronašli kod dijelova malih dimenzija i malih udarnih opterećenja.

- čelici jednostruko legirani kromom direktno su kaljivi u vodi. Dijelovi manjih dimenzija se uspješno zakaljuju i prokaljuju i u ulju. Otpornost ove skupine čelika na trošenje je vrlo visoka ukoliko zrno u rubu nije pogrubjelo, čemu su uglavnom dosta skloni. Također su skloni i stvaranju karbida u pougljičenom rubu, te ih se zbog toga treba pougljičavati u blažim sredstvima. Primjenjuju se kod gradnje automobila za poluosovine i bregaste osovine, te zupčanike manjih dimenzija.
- mangan – krom čelici nisu previše skloni odvajanju karbida na rubu, iako bi na to upućivao vrlo visok sadržaj kroma. Međutim, mangan djeluje suprotno od kroma, te ublažava i djeluje povoljno na odvajanje karbida. Mangan također utječe na povećanje prokaljivosti, te su zbog toga Mn – Cr čelici prikladni i za izradbu proizvoda srednjih dimenzija. To su na primjer zupčanici, vretena i osovine alatnih strojeva. Ova skupina čelika je vrlo osjetljiva na pregrijanje, te ih je zbog toga nakon pougljičenja potrebno prvo usporeno ohladiti, te nakon toga ih austenitizirati i gasiti, te popuštati.
- molibden – krom i krom – molibden čelici nemaju neku posebnu namjenu. Ova skupina čelika predstavlja pokušaj zamjene skupih Ni – Cr čelika. Nikal se smatra deficitarnim elementom, te ga se zbog toga nastoji zamijeniti manganom ili molibdenom. Mangan i molibden povišenom prokaljivošću omogućuju postignuće svojstava sličnih niklu. Međutim, najbitnija prednost Mo – Cr čelika je njihova prikladnost za direktno gašenje. Molibden je karbidotvorac koji stvara posebne karbide otporne na trošenje. Molibden također čini čelik osjetljivijim na separaciju karbida, te ga zbog toga treba pougljičavati u blažem sredstvu i to ne predugo.
- krom – nikal čelici za cementiranje imaju najbolje uravnoteženo djelovanje u smislu separacije karbida i suprotno. Nikal se smatra uzročnikom sprečavanja ove separacije. Ovi čelici imaju vrlo dobru prokaljivost. Koriste se za izradu proizvoda najvećih dimenzija, te proizvoda za rad pri sniženim temperaturama. Glavni nedostatak ove skupine čelika je sklonost prema zaostajanju austenita u rubnim slojevima. Zbog toga ih je potrebno gasiti s nižih temperatura (780 do 800 °C) ili duboko hladiti odmah nakon završenog gašenja.

3.3. Pougličavanje

Kao što je i prethodno spomenuto, pougličavanjem se smatra proces kojim se stvara površinski sloj bogat ugljikom kojim se nakon kaljenja postiže tražena tvrdoća površine. Potrebno je napomenuti kako se tvrdoća ne smatra jedinim pokazateljem zadovoljavajuće kvalitete cementiranog sloja. Osim tvrdoće, na kvalitetu cementiranog sloja utječu mikrostruktura i njezina svojstva zbog toga što ta mikrostruktura ima veliki utjecaj na ukupna svojstva obratka, te time utječe i na životni vijek strojnog dijela.

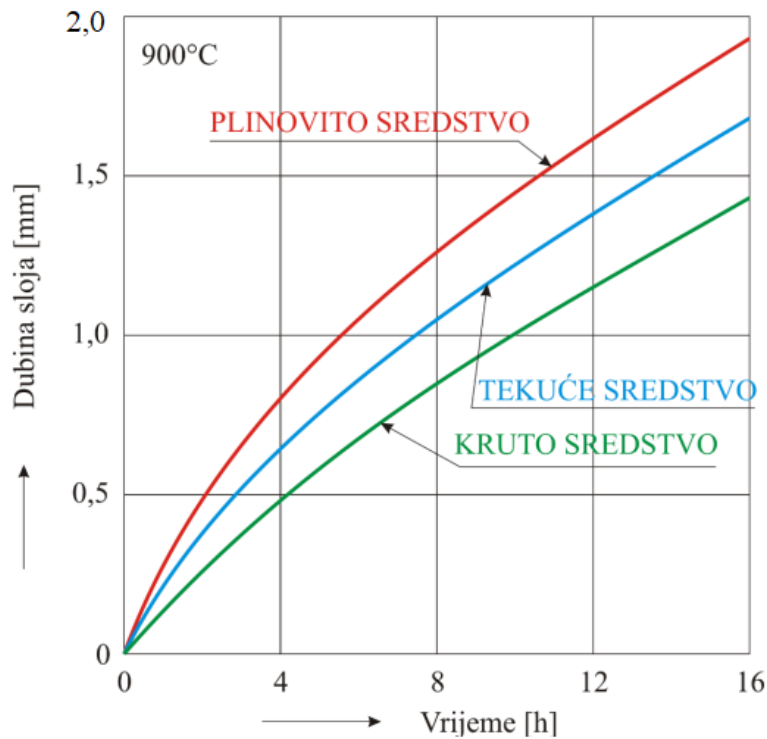
Neka od mikrostrukturnih svojstava koja također utječu i na ukupna svojstva su : zaostali austenit, slobodni karbidi, razugličenje, oksidacija i mikropukotine u martenzitu. Dodatne izmjene koje se događaju u mikrostrukuri martenzita zbivaju se pri postupku popuštanja. Pothlađivanjem nakon kaljenja se može utjecati na udio martenzita kao i austenita.

Brzina postupka pougličavanja (cementiranja) je ovisna o temperaturi, kemijskom sastavu čelika i vrsti sredstva u kojemu će se događati pougličavanje. S obzirom na izvor ugljika sredstva za cementiranje mogu biti :

1. Cementiranje u krutim sredstvima – sredstvo za cementiranje je granulat, a sastoji se od smjese drvenog ugljena (nositelj ugljika), veziva i aktivatora (BaCO_3)
2. Cementiranje u kapljevitim sredstvima – solne kupke kalijeva i natrijeva cijanida s odgovarajućim aktivatorima
3. Cementiranje u plinovitim sredstvima – cementiranje se provodi u plinskim atmosferama koje sadrže razne spojeve ugljika (npr. CO , CH_4) i ugljikovodika, zbog toga je ova metoda cementiranja značajnije brža u odnosu na cementiranje u granulatu, te je moguća kvalitetna regulacija C – potencijala atmosfere, kao i rad s promjenjivim C – potencijalom, odnosno veći C – potencijal
4. Cementiranje u vakuumu – podrazumijeva se obrada čelika u plinovitoj atmosferi koja može biti sastavljena od ugljika, ugljikovodika, te raznih spojeva ugljika i dušika.

5. Cementiranje plazmom – korištenje ioniziranih plinova, neprekidan C – potencijal je moguće regulirati pomoću gustoće struje; ovdje dolazi do pojave bombradiranja površine obratka koncentriranim ugljikovim atomima

Slika 3.6 prikazuje ovisnost postizivih dubina pougljičenja o vremenu, te o vrsti sredstva za cementiranje.



Slika 3.6. Utjecaj dužine vremena držanja izratka (pri temperaturi pougljičavanja) na veličinu dubine pougljičena sloja za različita sredstva za cementiranje [4]

3.3.1. Pougljičavanje u krutom sredstvu

Postupak pougljičavanja, odnosno cementiranje u krutom sredstvu se susreće vrlo rijetko u industrijskoj primjeni, te spada među jedne od najstarijih postupaka koji se uspješno održao do danas. Glavni razlog tomu je to što ima slabiju mogućnost kontrole procesa u odnosu na ostala sredstva, te je također i ekološki neprihvatljiv.

Primjena ovog postupka je najčešća u slučajevima u kojima je potrebno pougljičiti mali broj proizvoda ili strojnih dijelova. Prvenstveno su to dijelovi ili proizvodi koje nije potrebno naknadno kaliti s temperature pougljičenja. Korištena smjesa kod provođenja ovog postupka je mješavina drvenog ugljena, aktivatora, te vezivnog sredstva. Vezivno sredstvo je u obliku zrnatih granula veličine od 3 do 5 mm. Slika 3.7 prikazuje granulat, odnosno mješavinu drvenog ugljena.



Slika 3.7. Kruto sredstvo za pougljičavanje [12]

Proces pougljičavanja u krutom sredstvu odvija se prema sljedećim reakcijama :

Ugljik (C) iz krutog sredstva reagira s kisikom (O) iz okoline :



Nakon toga, dobiveni ugljični dioksid reagira s ugljikom iz krutog sredstva :

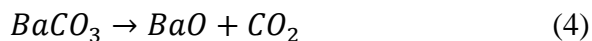


Nastankom dvije molekule ugljikovog monoksida dolazi do ravnoteže plinskih atmosfera. Nakon kontakta s površinom čelika događa se pougljičenje :



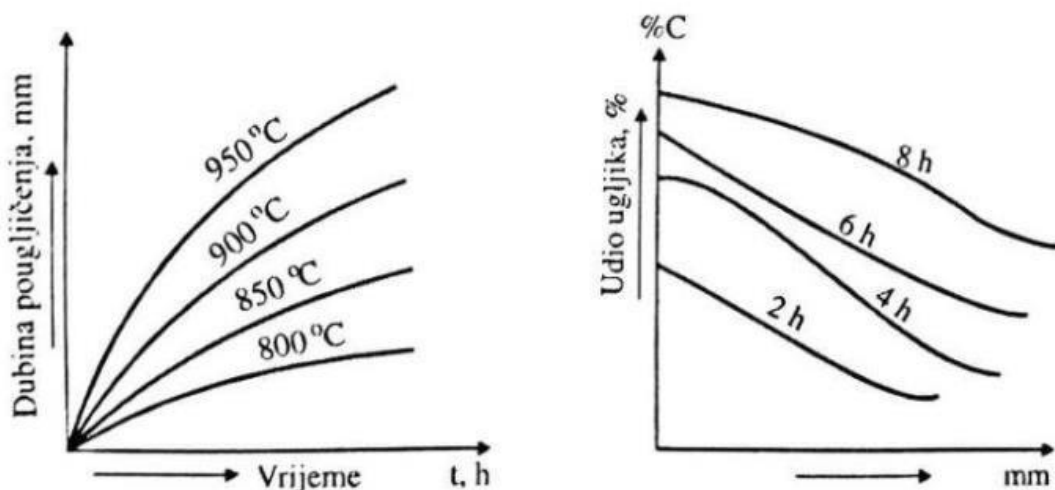
Ovim procesom dolazi do ugradnje ugljika u austenitno zрно. Daljnom difuzijom ugljik prodire i u unutrašnjost jezgre.

U procesu cementiranja u krutom sredstvu može se koristiti više aktivatora. Najčešće korišten je barijev karbonat ($BaCO_3$) koji se koristi kao dodatak drvenom ugljenu, te se još koristi i natrijev karbonat (Na_2CO_3). Barijev karbonat se pri povišenim temperaturama raspada na dva spoja, barijev oksid i ugljični dioksid.



Pougličavanje se događa u trenutku kada plinska atmosfera i površina obrađivanog dijela, obratka ili proizvoda međusobno reagiraju. Kao rezultat ovakve reakcije nastaje ugljik. Ugljik se zatim difundira u austenit. Difuzija ugljika u austenit utječe na očvršćivanje površine obratka. Nakon otvrdnuća površine ugljik se širi dalje prema jezgri. Obnavljanje ugljikovog monoksida se događa zbog prisutnosti drvenog ugljena, te zbog toga ponovo reagira ugljični dioksid. To utječe na konstantnu regeneraciju plinske atmosfere, te se cijeli proces obnavlja. Cijeli proces se odvija u plinskoj fazi.

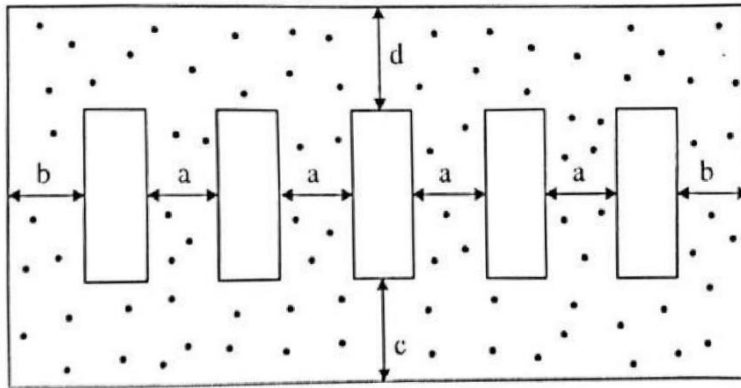
Temperature pougličavanja se uglavnom kreću od 800 do 950 °C. Međutim, najekonomičnijim temperaturama u pogledu vijeka trajanja peći, kutija za pougličavanje, pogrubljenja zrna čelika i samog procesa, se smatraju temperature u području od 850 do 900 °C. Slika 3.8 prikazuje ovisnost dubine pougličavanja o vremenu i temperaturi držanja čelika.



Slika 3.8. Ovisnost dubine pougličavanja o vremenu i temperaturi [8]

Kutija za pougličavanje napravljena je od vatrootpornog ili niskougljičnog čelika. Vijek trajanja kutija od niskougljičnih čelika se uglavnom kreće od 150 do 200 sati, dok kod kutija od vatrostalnog čelika vijek trajanja može iznositi i do 6000 sati. Kompletan proces pougličavanja izvodi se tako da se kutije pune smjesom granulata visine od 13 do 50 mm. Nakon toga se na taj sloj postavljaju dijelovi koje je potrebno pougličiti. Potrebno je voditi računa o njihovom

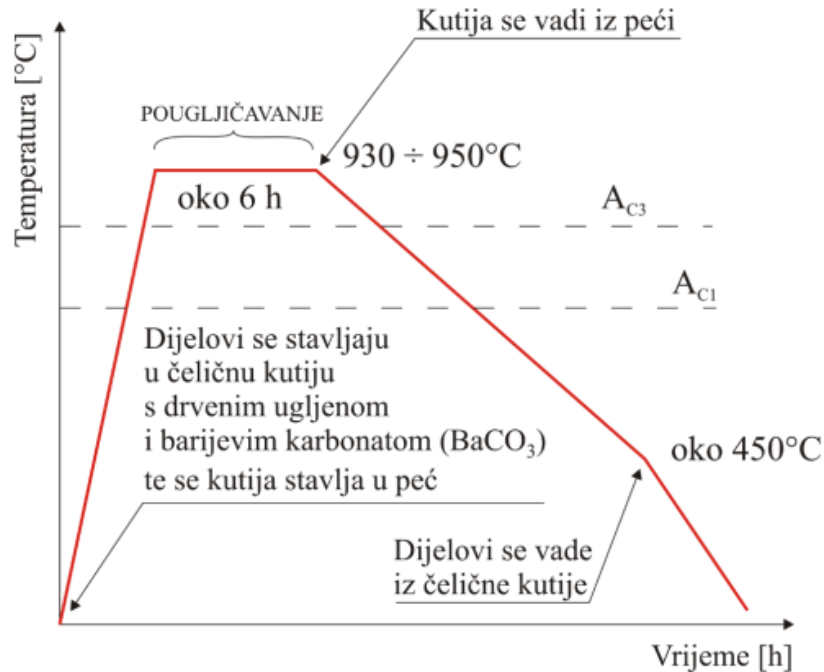
međusobnom razmaku i položaju. Slika 3.9 prikazuje položaj čeličnih dijelova u kutiji za pougljičavanje.



Slika 3.9. Raspored obradaka unutar kutije za pougljičavanje [8]

Na kraju se dijelovi prekrivaju s ostatkom smjese. Kako bi se spriječio ulazak zraka, kutije je potrebno zatvoriti poklopcem premazanim glinom ili šamotom. Kutija se postavlja u prethodno zagrijanu peć na temperaturi od oko 600 do 700 °C, te se zatim temperatura postupno povećava na temperaturu potrebnu za pougljičavanje u ovisnosti o materijalu i potrebama.

Dubina pougljičenja površinskog sloja ovisi o vremenu držanja kutije u peći. Nakon jednog sata u peći ugljik prodre do otprilike 0,3 mm, a nakon 8 sati držanja u peći može doći i do 2 mm. Slika 3.10 prikazuje cjeloviti postupak pougljičenja u krutom sredstvu.



Slika 3.10. Postupak pougljičenja u krutom sredstvu [8]

Prednosti pougljičavanja u krutom sredstvu :

- jednostavna provedba procesa,
- minimalni troškovi opreme,
- kvaliteta procesa je zadovoljavajuća,
- mogu se obrađivati dijelovi raznih dimenzija i oblika,
- velike dubine pougljičenja,
- mogućnost korištenja istog aktivatora više puta.

Nedostaci pougljičenja u krutom sredstvu :

- spor i dugotrajan proces – nepogodno za serijsku proizvodnju,
- opasnost od razugljičavanja kod faze ohlađivanja,
- problem sa prevelikim dubinama pougljičenja – prezasićenje austenita,
- dubinu pougljičenja je teško točno odrediti,
- otežano kontroliranje postupka.

3.3.2. Pougličavanje u kapljevitom sredstvu

Za razliku od prethodnog postupka gdje se koristio drveni ugljen i čelične kutije, u ovome se postupku koriste solne kupke. Zbog toga se ova metoda još naziva i pougličavanjem u solnim kupkama. Ove kupke su ustvari solne smjese dviju soli. Ove soli je potrebno rastaliti, a njihova temperatura taljenja se kreće od 500 do 600 °C, te se njihove radne temperature kreću u rasponu od 820 do 950 °C. Strojne dijelove koje pougličujemo je potrebno prethodno ugrijati, te ih je zatim potrebno objesiti za žicu ili postaviti u prikladnu napravu. Predgrijavanje se provodi kako bi se smanjila toplinska naprezanja, te se osim toga još i štiti radnika od prskanja soli.

Smjesa soli za cementiranje načinjena je od rastaljenih soli natrijeva ili barijeva klorida, te od alkalnih cijanida. Primjeri alkalnih cijanida su natrij-cijanid (NaCN), kalij-cijanid (KCN) i kalcij-cijanid (Ca(CN)₂). Cijanidi su otrovni spojevi, te zbog toga prostorija i postupak izvođenja moraju zadovoljiti stroge propise zaštite zdravlja. Pougličeni sloj u kapljevitom sredstvu jednak je kao i sloj u krutom sredstvu.

Za poboljšavanje i ubrzavanje kemijskih reakcija u kupkama ponekada se dodaju i neke druge kemikalije, prema potrebi. Prema dodanim kemikalijama solne se kupke mogu još podijeliti na dvije vrste :

1. neaktivna kupka,
2. aktivna kupka

Aktivne solne kupke osim cijanida još sadrže i aktivatore. Kao aktivatori se koriste barijev ili stroncijev klorid. Aktivatori otpuštaju ugljik koji se koristi za pougličavanje sloja, te snižavaju viskoznost kupke, kao i temperaturu taljenja. U aktivnim solnim kupkama se proces odvija na temperaturama od 900 do 1000 °C. Na taj način moguće je postići udio ugljika u površinskom sloju od 0,5 do 1,2 %. Kod aktivnih kupki moguće je kontrolirati tokom cijelog procesa sadržaj cijanida i C – potencijal. Nakon provođenja procesa kaljenja, obratke je nužno držati 5 do 10 minuta u spremnicima koji sadrže otopinu željeznog sulfata. Razlog tomu je taj što su cijanidi otrovni. Nakon toga se ispiru 5 minuta toplom vodom.

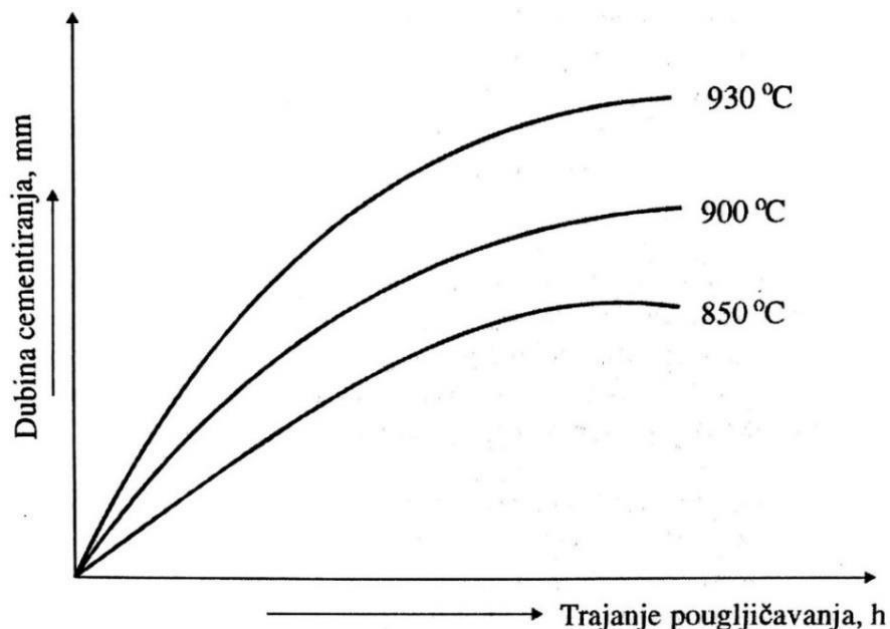
Neaktivnim solnim kupkama se smatraju kupke koje se koriste za karbonitriranje pri temperaturi od 850 °C i dubine do 0,5 mm. Time se dobiva dubina pougličena sloja od 0,4 do 0,6

% ugljika na površini obratka. Cijeli je proces otvoren, što znači da je u kontaktu sa zrakom. Za razliku od aktivnih kupki, ovdje se samo kontrolira sadržaj cijanida. Ukoliko je taj sadržaj malen kupku je potrebno nadopuniti sa svježom smjesom soli.

Solne kupke učinkovito pougljičuju površinu do neke određene granice koja ovisi o temperaturi procesa. Slika 3.11 prikazuje postizivu ekonomsku granicu dubine pougljičavanja u tekućem, odnosno kapljevitom sredstvu u odnosu na temperaturu kupke. Naziva se ekonomskom granicom zbog toga što iznad ove granice nema značajnijeg povećanja dubine.

Za dijelove i obratke koji su skloni deformaciji pri kaljenju potrebno je primjeniti niže temperature kod pougljičenja. Pri pougljičenju na nižim temperaturama treba voditi računa o tome da će vrijeme potrebno za provedbu postupka biti znatno duže nego pri korištenju viših temperatura. Stoga, pougljičenje na 890 °C će trajati dvostruko duže, a pougljičenje na 850 °C će trajati četiri puta duže u odnosu na pougljičenje pri temperaturi od 930 °C pri jednakoj dubini cementiranog sloja.

Kolika će se dubina pougljičenja postići ovisi o C – potencijalu, vremenu i temperaturi na kojoj se odvija proces pougljičenja, te naravno o vrsti čelika.



Slika 3.11. Postizive dubine u kapljevitom sredstvu u odnosu na trajanje postupka [13]

Neke od prednosti pougljičenja u kapljevitim sredstvima su :

- postupak je vrlo jednostavan,
- ulaganja u opremu su mala,
- dubine pougljičenja su jednolično postizive,
- proces se može koristiti pri serijskoj i masovnoj proizvodnji

Nedostaci pougljičenja u kapljevitim sredstvima :

- nije moguće konstantno kontroliranje C – potencijala,
- nije moguće konstantno kontroliranje i reguliranje smjese kupke,
- korištenje otrovnih spojeva – cijanida, te njihovo zbrinjavanje,
- neutraliziranje soli i vode

3.3.3. Pougljičavanje u plinovitom sredstvu

Ovaj postupak se u industrijskoj proizvodnji primjenjuje već duže vrijeme. Zadnjih nekoliko godina se ovaj postupak pokazao vrlo uspješnim zbog toga što je moguća stalna automatska kontrola, kao i reguliranje sastava plinske atmosfere. U pougljičavanje u plinovitom sredstvu bi se zapravo mogla svrstati i prethodna dva spomenuta postupka, no bez mogućnosti kontroliranja nastalog plina na površini izratka.

Pri pougljičenju u plinovitom sredstvu se plinovi stvaraju kontroliranjem procesa smjese plina u generatorima. U toj smjesi plina se najčešće nalaze ugljikov monoksid, vodik, te vodena para. Kod ovog načina pougljičavanja vrlo je jednostavno reguliranje C – potencijala, te se primjenjuje kod velikoserijskih proizvodnji. Peći u kojima se provodi ovaj postupak pougljičenja mogu biti prolazne, jamske i komorne. Koja će se peć odabrati ovisi o veličini i obliku proizvoda, te dubini željenog sloja. Prolazne peći se primjenjuju za masovnu proizvodnju, kao na primjer kod automobilske industrije, dok se jamaste peći koriste za pougljičenje manjih dijelova koji se postavljaju u držače.

Za stvaranje uvjeta pougljičenja korišteni su i različiti gorivi plinovi. Jedan od primjera je postupak s metanolom. Kapljeviti metanol se unosi u komoru gdje se nalaze čelični obratci za

pougljičavanje. Zatim metanol isparava pri temperaturi pougljičenja, te zbog ovog isparavanja dolazi do oslobađanja potrebnih plinskih komponenata za provedbu procesa pougljičenja. U slučaju da površine ne uspije apsorbirati sve nastale ugljikove atome, može doći do stvaranja čađe.

Proces pougljičenja u plinovitom sredstvu se odvija u dvije faze. Prva se faza naziva još i „pougljičavajući korak“. U toj fazi se u atmosferi nalazi sadržaj ugljikovog monoksida koji je veći od parcijalnog tlaka koji je potreban da se održi željeni sadržaj ugljika. Zbog toga se pougljičavanje zbiva sve dok ne dođe do postizanja nove ravnoteže ili dok ne dođe do vrlo visokog sadržaja ugljika. U drugoj fazi procesa dolazi do gubljenja ugljika, to znači da će doći do razugljičenja na način da će se sadržaj ugljika koji se nalazi na površini obratka smanjiti na nižu razinu.

Da bi proces pougljičenja u plinu bio uspješan, potrebno je ostvariti kontrolu nad temperaturom, vremenom i sastavom atmosfere pougljičenja. Za postizanje relativno brzog pougljičenja bez pojavljivanja određenih negativnih posljedica, te kako bi se omogućilo postizanje preciznijeg kontroliranja dubine pougljičenja, temperatura treba biti kontinuirano održavana na 925 °C. Za postizanje što boljih rezultata pougljičavanja u plinovitom sredstvu, obratke je potrebno zagrijati na određenu temperaturu pougljičenja u gotovo neutralnoj atmosferi, poput endo – plina. Cilj je dobivanje jednake temperature u presjeku obratka, te kada se to postigne započinje se sa dovođenjem plina za obogaćivanje.

Potrebno je dobiti vrlo visoku kvalitetu atmosfere pougljičenja koju je moguće kontrolirati. To se postiže upotrebom atmosfere koja sadrži ugljični monoksid i dušik. Stoga se vrste atmosfera pri pougljičenju u plinovitom sredstvu mogu podijeliti na :

1. Atmosfere na osnovi dušika i metanola
2. Atmosfere na osnovi plina nosača – endoplina
3. Atmosfere koje su dobivene direktno iz peći

Da bi se izbjegla opasnost od negativnih utjecaja na dubinu pougljičenog sloja, potrebno je postići potpunu kontrolu C – potencijala. Kako bi se provela kontrola C – potencijala, neophodno je odrediti koncentraciju sastava ugljikovodika. To se postiže korištenjem tzv. kisikove sonde na način da se izmjeri parcijalni pritisak kisika, te metodom mjerenja infracrvenim plinskim analizatorom. Infracrveni plinski analizator radi na način da emitira zračenje koje se dijeli u dvije

zrake. Jedna zraka prolazi kroz uzorak plinske atmosfere iz peći, dok druga prolazi kroz referentni plin, te se zatim na izlazu pomoću detektora mjeri razlika apsorbiranih zraka.

Prednosti pougljičenja u plinovitom sredstvu su :

- mogućnost velikoserijske i masovne proizvodnje,
- mogućnost kontroliranja nastalog plina koji se nalazi uz površinu izratka,
- više dostupnih metoda za provedbu procesa.

Nedostaci pougljičenja u plinovitom sredstvu su :

- plinske pare mogu biti otrovne,
- može doći do požara ili eksplozije,
- povećani investicijski troškovi opreme.

Postoji par verzija na koje je moguće provesti plinsko pougljičavanje. Jedna od tih verzija je plinovito pougljičavanje pomoću čvrstog sredstva. Ovdje se plin potreban za pougljičenje proizvodi u pretkomori peći od drvenog ugljena i aktivatora. Druga verzija bi bila plinsko pougljičenje gdje se isparavanje događa u peći za pougljičenje, a gdje smjese acetona ili etilnog alkohola isparavaju u Ni – katalizatoru.

3.3.4. Pougljičavanje u vakuumu

Temperature na kojima se provodi ovaj postupak se kreću od 900 do 1040 °C, te u plinskoj atmosferi. Plinska atmosfera može biti sastavljena od vodika, ugljikovodika i smjese ugljikovodika. Nakon završetka postupka čelik je potrebno zakaliti u ulju ili u plinu.

Kod ovog načina pougljičenja, za razliku od pougljičenja plinovitim sredstvom, gdje C – potencijal predstavlja funkciju plinske atmosfere, ovdje se C – potencijal određuje tako da se površina izratka zasiti ugljikom, te proteklim vremenom pougljičenja kod određenih temperatura. C – potencijal atmosfere koja se sastoji od propana je veći u odnosu na atmosferu koja se sastoji od metana zbog toga što se procesom kreiranja propana stvara više ugljika.

Materijal od kojega je izrađena vakuumska peć je grafit ili keramika. Ova dva materijala se koriste zbog visokih tlakova koji moraju biti manji od 0,4 bara. Na taj način se sprječava preveliko taloženje ugljika u peći.

Prednosti pougljičenja u vakuumu :

- obrađeni predmeti imaju čišću površinu u odnosu na ostale postupke,
- moguće je predgrijati i naknadno obraditi izradak pod vakuumom,
- zbog većih radnih temperatura dobiva se kraće vrijeme obrade, te veća debljina pougljičenog sloja,
- manji utrošak plina za pougljičavanje,
- postizanje boljih mehaničkih svojstava (prokaljivost i zamorna čvrstoća).

Nedostaci pougljičenja u vakuumu :

- veliki investicijski troškovi zbog toga što je oprema skupa,
- potrebno je naći kompromis, odnosno ravnotežu procesnih uvjeta kako bi se zadovoljili zahtijevani zahtjevi, npr. dubina pougljičenog sloja, brzina obrade i smanjenje rizika od čađe.

3.3.5. Pougljičavanje plazmom

Glavna značajka pougljičenja plazmom je bombardiranje površine izratka koncentriranim ugljikovim ionima. Čelični predmeti se moraju prethodno postaviti u visokotemperaturnu peć, te razmak između izradaka mora biti 6 mm, kako bi se postigli uvjeti za bombardiranje. Čelični predmeti služe kao katode.

Kod ovog načina pougljičenja se konstantan C – potencijal regulira pomoću gustoće struje, a ne pomoću kisikove sonde kao što je to slučaj kod plinskog pougljičavanja. Kako bi se postiglo zasićenje ugljikom na površini, čelik se zagrijava na temperature od 850 do 1040 °C.

Kao anoda se koristi unutrašnja konstrukcija peći. Između katode i anode se kreira plazma. Za proces pougljičenja u plazmi kao plin se koriste smjesa ugljikovodika (npr. metan, propan), dušika, argona ili vodika. Kako bi se plin ionizirao potrebno je koristiti istosmjerni napon koji se

kreće od 350 V do 1 kV pri tlaku od 0,013 do 0,33 bara. U reakciji s površinom izratka atomi vrlo brzo difundiraju u površinu materijala. Zbog toga je ovaj postupak brži od prethodno spomenutih postupaka. Pri malim brzinama struje plina i tlaka, dolazi do tinjajućeg pražnjenja između anode i katode. Posljedica ovoga je razdvajanje plina (npr. metana) na vodik i ugljik.

Proces pougljičavanja plazmom, nakon što se obradak zagrije na temperaturu pougljučenja, sastoji se od sljedećih faza :

1. Vremenski period pougljičenja kod kojega dolazi do strujnog pražnjenja plazme
2. Faza bez plazme, odnosno difuzijska faza – dolazi do sniženja visokog površinskog sadržaja ugljika na poželjnu razinu, te zatim dolazi do postizanja tražene dubine pougljičenja

Prednosti pougljičenja plazmom :

- kraće vrijeme postupka u odnosu na ostale,
- bolja topivost ugljika u austenitu, kao i veća difuzija ugljika,
- ekološki prihvatljiv postupak (nije opasno za okoliš),
- niža cijena zbog manje potrošnje plina.

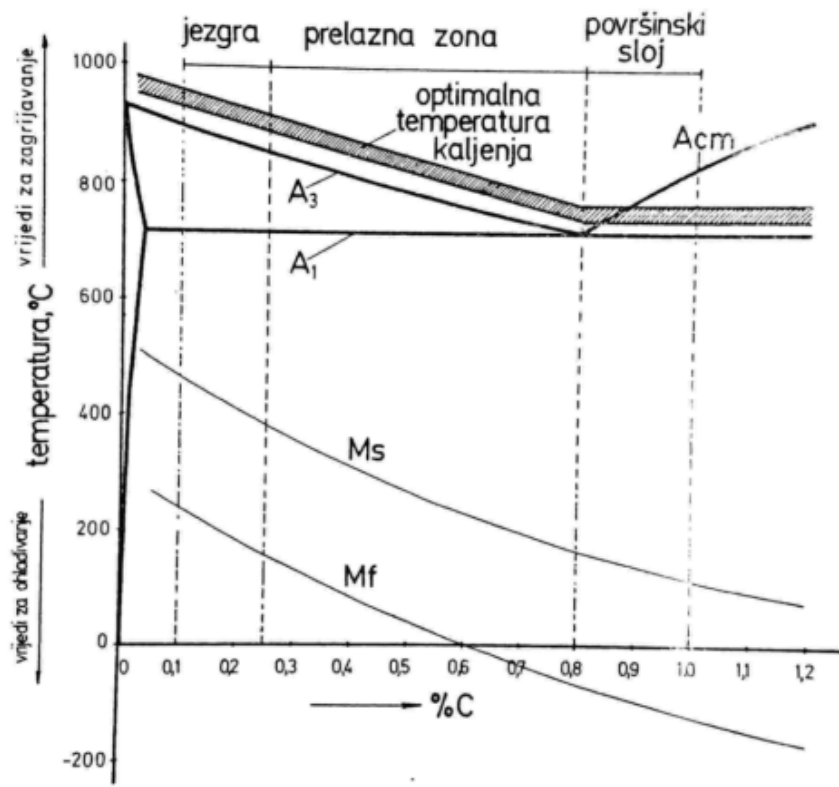
Nedostaci pougljičenja plazmom :

- visoki investicijski troškovi zbog cijene opreme,
- nije pogodan proces za obradu većih predmeta.

3.4. Kaljenje

Cementiranjem se smatra postupak pougljičavanja i kaljenja. Kaljenjem se naziva postupak čiji je osnovni cilj postići martenzitnu strukturu i visoku tvrdoću površinskog sloja. Kaljenje je proces koji se sastoji od zagrijavanja čelika na temperaturu austenitizacije, zatim držanja na toj temperaturi određeni vremenski period, te na kraju gašenja kako bi se dobila martenzitna struktura. Ovim procesom se obradak udaljava od stanja ravnoteže. Provođenje kaljenja nakon

pougličavanja nije jednostavan postupak zbog toga što se sadržaj ugljika u cementiranom sloju mijenja od površine do jezgre. Slika 3.12 prikazuje postizive različite mikrostrukture čelika u ovisnosti o sadržaju ugljika.



Slika 3.12. Mikrostrukture u različitim slojevima pougličenog čelika [14]

Iz dijagrama na slici 12 može se zaključiti kako se jezgra nalazi u pondeutektoidnom području, dok je površinski sloj u nadeutektoidnom području. Optimalna temperatura kaljenja iznosi od 30 do 70 °C iznad temperature A₃ za pondeutektoidne čelike, te 50 do 70 °C iznad temperature A₁ za nadeutektoidne čelike. Zbog ovoga nije moguće odrediti jednu temperaturu koja bi bila optimalna i za jezgru i za površinski sloj. Stoga, prije izbora temperature kaljenja potrebno je odrediti da li je prioritet jezgra ili površinski sloj. Iz dijagrama je također vidljiva i temperatura početka i kraja transformacije martenzita. Prvo će doći do promjene austenita u martenzit unutar jezgre, a zatim u površinskom sloja. Ukoliko se površinski sloj hladi do sobne temperature, neće doći do potpune transformacije austenita u martenzit, te će se u strukturi pojaviti zaostali austenit. Jedini način postizanja potpune transformacije je duboko ohlađivanje.

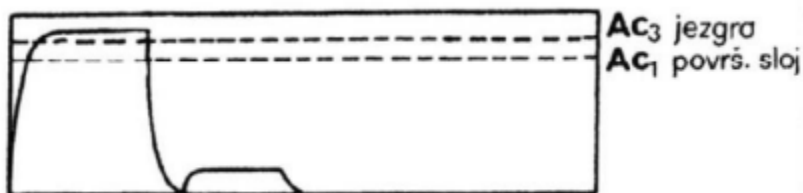
S obzirom na tražene zahtjeve i uvjete, postoji više načina provođenja toplinske obrade kaljenjem. Načini provođenja kaljenja su sljedeći :

- Direktno kaljenje
- Jednostruko kaljenje
- Dvostruko kaljenje

3.4.1. Direktno kaljenje

Ovo je postupak kaljenja koji je najjednostavniji i ujedno najjeftiniji za izvesti. Nedostaci su mu smanjenje žilavosti obradka i pogrubljivanje austenitnog zrna. Za provedbu je potrebno jedno rashladno sredstvo u kojemu će se obradak hladiti. Postupak je primjenjiv kod manjih i jednostavnijih oblika izradaka, te kod legiranih čelika zbog toga što nema opasnosti od zaostalih naprezanja. Ukoliko su postavljeni stroži zahtjevi koriste se sitnozrnati čelici jer kod njih neće doći do bitnijeg pogrubljivanja zrna, a sklonost zaostalom austenitu je manja.

Odvija se na temperaturi pougliččenja. U praksi se često koristi direktno kaljenje „snižene temperature“. Kod ove metode se čelik nakon pougliččenja ohlađuje na nižu temperaturu. Ova temperatura je uglavnom temperatura kaljenja jezgre s koje se provodi kaljenje. Na taj način se smanjuju deformacije koje bi nastale kod kaljenja, zbog toga što je temperaturna razlika manja. Slika 3.13 prikazuje postupak direktnog kaljenja.

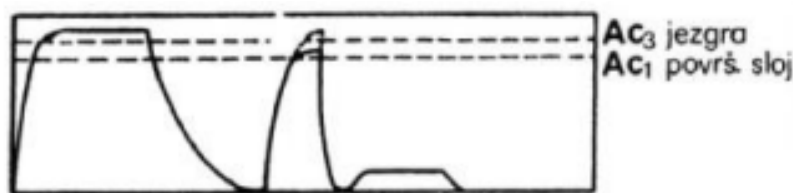


Slika 3.13. Direktno kaljenje [14]

3.4.2. Jednostruko kaljenje

Proces jednostrukog kaljenja se provodi na temperaturi koja odgovara temperaturi kaljenja za površinski sloj ili za kaljenje jezgre. Ukoliko se izradak sporo hladi nakon pougljičenja može doći do stvaranja karbidne mreže po granicama zrna. To se može dogoditi ukoliko je sadržaj ugljika u površinskom sloju iznad eutektoidne koncentracije. Zbog toga se preporuča brže hlađenje.

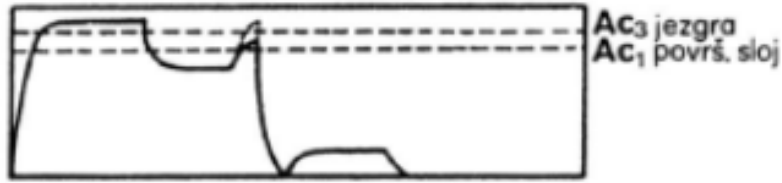
Postoji više varijacija ovog postupka kaljenja. Međutim, zajedničko im je da se između pougljičenja i kaljenja provodi postupak gdje dolazi do pretvorbe austenita, te se kod naknadne austenitizacije na temperaturi iznad A_1 postiže djelomična prekrystalizacija. Rezultat je usitnjenje zrna. Slika 3.14 prikazuje postupak jednostrukog kaljenja.



Slika 3.14. Jednostruko kaljenje [14]

Postupak jednostrukog kaljenja nakon međuzarenja se provodi na temperaturi od $650\text{ }^\circ\text{C}$. To je jedan od starijih postupaka kaljenja. Predlagan je s ciljem smanjenja deformacija i naprezanja. Međutim, postupak je odbačen jer to nije moguće postići međuzarenjem. Razlog tomu je to što naknadno kaljenje ima odlučujući utjecaj na deformacije izradaka.

Nakon pougljičavanja u solnim kupkama ili u plinskim atmosferama najčešće se primjenjuje postupak jednostrukog kaljenja nakon izotermičke pretvorbe. Odvija se na način da se temperatura nakon pougljičenja brzo ohladi na $600\text{ }^\circ\text{C}$, te se zatim drži na toj temperaturi određeni vremenski period. Na taj način se postiže pretvaranje austenita u perlitnom stupnju. Nakon toga se obradak ponovo zagrijava na temperaturu kaljenja površinskog sloja ili temperaturu kaljenja jezgre. Ovaj postupak se koristi zbog manje potrošnje energije i kraćeg ciklusa toplinske obrade. Slika 3.15 prikazuje postupak jednostrukog kaljenja nakon izotermičke pretvorbe.

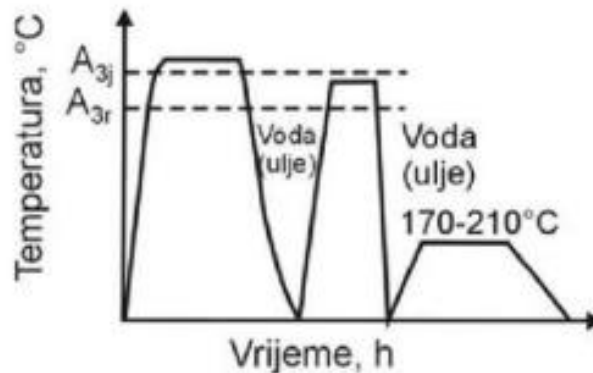


Slika 3.15. Jednostruko kaljenje nakon izotermičke pretvorbe [14]

3.4.3. Dvostruko kaljenje

Za postizanje najvećih površinskih tvrdoća i najbolje žilavosti u jezgri se u prošlosti koristio proces dvostrukog kaljenja. U praksi postizanje ovih zahtjeva nije bilo ostvarivo. Razlog tomu je što se najbolja postignuta žilavost prvim kaljenjem bitno smanjila s drugim kaljenjem koje je provedeno na nižoj temperaturi. To se događalo zbog toga što se na nižim temperaturama događala samo djelomična prekristalizacija jezgre. Zbog toga je u strukturi austenita postojao i ferit koji je smanjio žilavost.

Posebnim slučajem dvostrukog kaljenja se smatra kada se provođenje prvog kaljenja izvede izravno sa temperature pougljičenja, a sekundarno kaljenje s temperature kaljenja površinskog sloja. Slika 3.16 prikazuje postupak provođenja dvostrukog kaljenja.



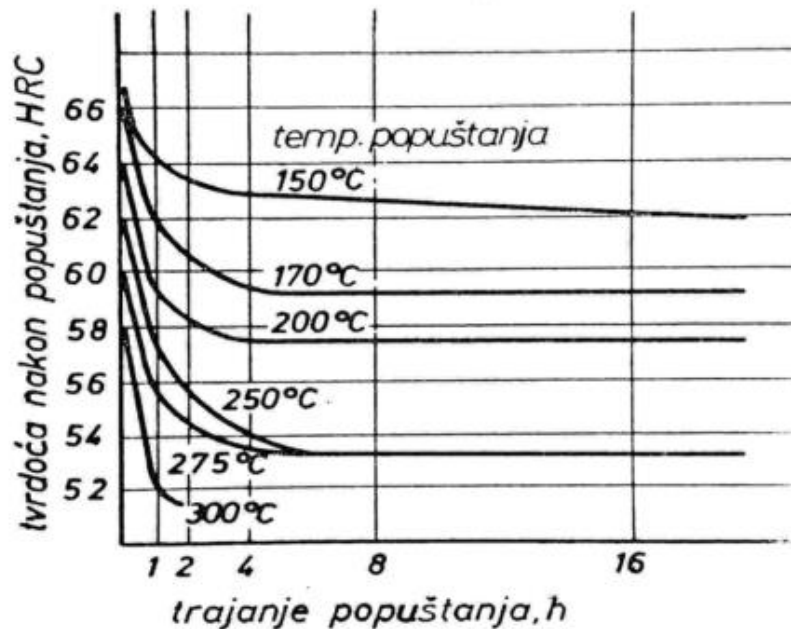
Slika 3.16. Dvostruko kaljenje [14]

Za sve spomenute postupke kaljenja, gašenje se može odvijati u vodi, ulju ili toploj kupki, što ovisi o vrsti korištenog čelika i dimenzijama dijelova.

3.5. Niskotemperaturno popuštanje

Popuštanje je toplinska obrada koja se provodi nakon kaljenja s ciljem da se postigne ravnoteža faza (npr. struktura ferita s perlitom), te da se postigne mehanička ravnoteža. Popuštanjem se postiže povećanje žilavosti i smanjenje napetosti u strukturi. Cilj je postizanje kubičnog martenzita. Niskotemperaturno popuštanje se provodi s ciljem da se spriječi nastajanje defekta zbog visokih naprezanja u cementiranom čeliku. Negativna strana ovog postupka je gubitak tvrdoće. Niskotemperaturno popuštanje se provodi u većini slučajeva u kupkama ili komornim pećima s cirkulacijom zraka.

Neke od posljedica postupka niskotemperaturnog popuštanja su smanjenje vrijednosti tvrdoće i pojava krhkosti, te promjena mikrostrukture. Proces popuštanja zavisao je o temperaturi i vremenu trajanja popuštanja što je vidljivo iz sljedeće slike. Postupak se odvija na temperaturama koje iznose od 150 do 200 °C, te se postiže tvrdoća površine od 58 do 62 HRC. Ukoliko bi se koristile veće temperature došlo bi do smanjenja tvrdoće, kao i dinamičke izdržljivosti zbog pojave krtosti kod određenih vrsta čelika. Slika 3.17 prikazuje ovisnost postignute tvrdoće postupkom niskotemperaturnog popuštanja o vremenu trajanja postupka i temperaturi provođenja postupka.

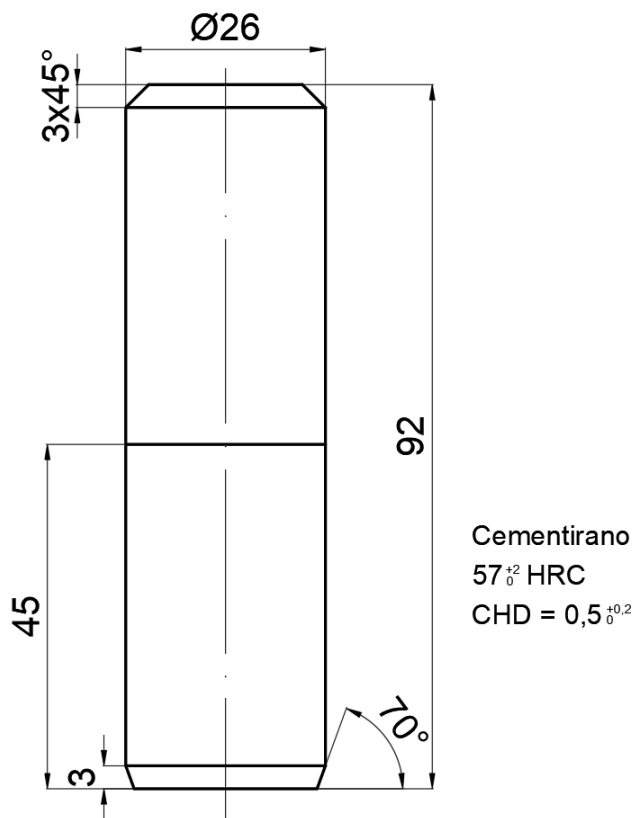


Slika 3.17. Postizive vrijednosti tvrdoće nakon popuštanja s obzirom na temperature i vrijeme procesa popuštanja [14]

4. POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA MJ.22-DT.39

Zadatak ovog diplomskog rada bio je definirati proces toplinske obrade, te odrediti parametre za postizanje traženih rezultata, kao i opisati okruženje u kojemu se toplinska obrada provodila, provesti postupak cementiranja i na kraju proanalizirati i komentirati dobivene rezultate. Strojni dio na kojem se vršila toplinska obrada cementiranja je bio MJ.22-DT.39. Proces cementiranja je opisan u prethodnom dijelu rada, a cilj je bilo dobivanje tražene tvrdoće površine strojnog dijela, te postizanje tražene dubine pougljičenog sloja. Provedeni postupak toplinske obrade je odrađen od početka pa do kraja na Tehničkom fakultetu u Rijeci u laboratoriju za toplinsku obradu i inženjerstvo površina na zavodu za materijale.

Postavljeni su zahtjevi koje je potrebno postići ovim postupkom, a oni su sljedeći. Tražena tvrdoća površinskog sloja je 57^{+2}_0 HRC, a tražena dubina pougljičenja je $0,5^{+0,2}_0$ mm. Slika 4.1 prikazuje strojni dio na kojemu je provedena toplinska obrada.



Slika 4.1. Skica strojnog dijela MJ.22-DT39. i zahtjevi za obradu

4.1. Materijal strojnog dijela MJ.22-DT.39

Materijal strojnog dijela prikazanog na slici 4.1 je 16MnCrS5. Ovaj čelik spada u skupinu legiranih plemenitih čelika za cementiranje. Najčešće se primjenjuje za izradu raznih strojnih dijelova koji su podvrgnuti visokim naprezanjima. Tablica 4.1 prikazuje propisani kemijski sastav čelika korišten u ovome diplomskom radu.

Tablica 4.1. Kemijski sastav čelika 16MnCrS5 [15]

Čelik		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Cu %	Al %
16MnCrS5	Min	0.16	0.15	1.15	-	0.025	0.90	-	0.015
	Max	0.19	0.35	1.30	0.035	0.04	1.10	0.35	0.05

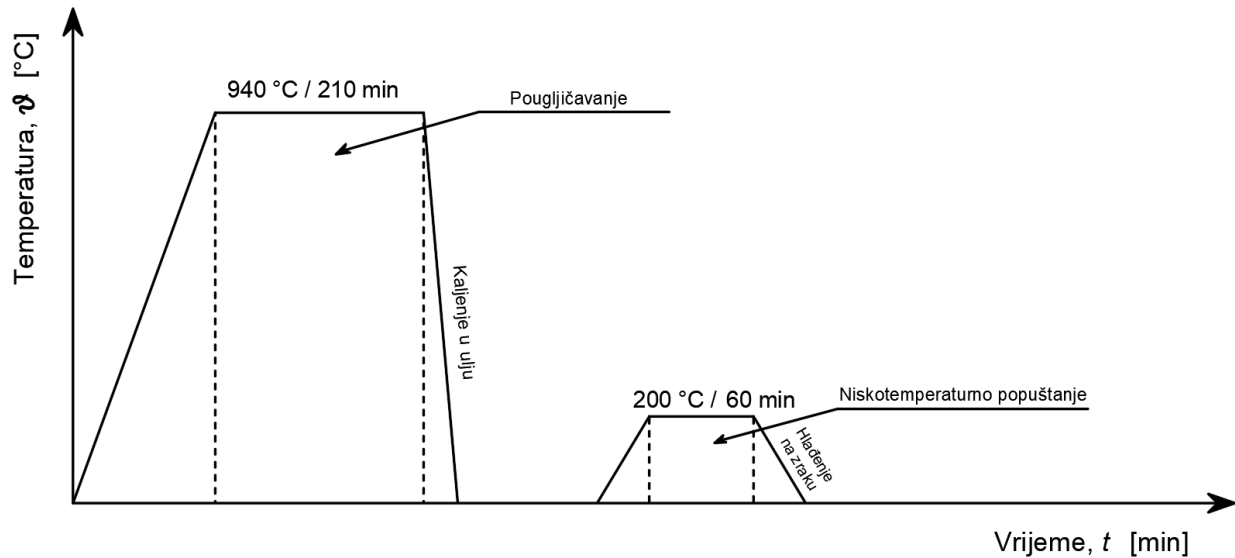
4.2. Parametri postupka cementiranja

Kako bi se postupak cementiranja uspješno proveo, prvi korak je kvalitetno definirati parametre toplinske obrade. Dva osnovna parametra koje je potrebno odrediti su temperatura i vrijeme. Za zadani čelik preporučena temperatura pougljičenja se kreće u vrijednostima od 880 do 980 °C, te je stoga odabrana temperatura pougljičenja od 940 °C, dok je za vrijeme držanja obratka u peći određeno 210 minuta, odnosno 3 sata i 30 minuta.

Nakon izvršenog pougljičenja, posuda s granulatom u kojoj se nalazio obradak je brzo izvađena iz peći, te je obradak direktno kaljen u ulju temperature 25 °C.

Zadnji korak postupka cementiranja je niskotemperaturno popuštanje. Preporučena temperatura provedbe niskotemperaturnog popuštanja za ovaj čelik je od 150 do 200 °C. S obzirom na to, odabrana je temperatura od 200 °C, te vrijeme popuštanja od 60 minuta, odnosno 1 sat. Nakon toga je obradak izvađen iz peći i ostavljen da se hladi na zraku.

Slika 4.2 prikazuje postupak cementiranja strojnog dijela MJ.22-DT.39.



Slika 4.2. Toplinska obrada strojnog dijela MJ.22-DT.39

Kod procesa pouglijčavanja korišteno je kruto sredstvo, odnosno granulat drvenog ugljena. Okvirnu dubinu pouglijčenja moguće je procijeniti pomoću paraboličkog zakona ovisnosti difuzijskog puta o vremenu, prema izrazu (4.1) :

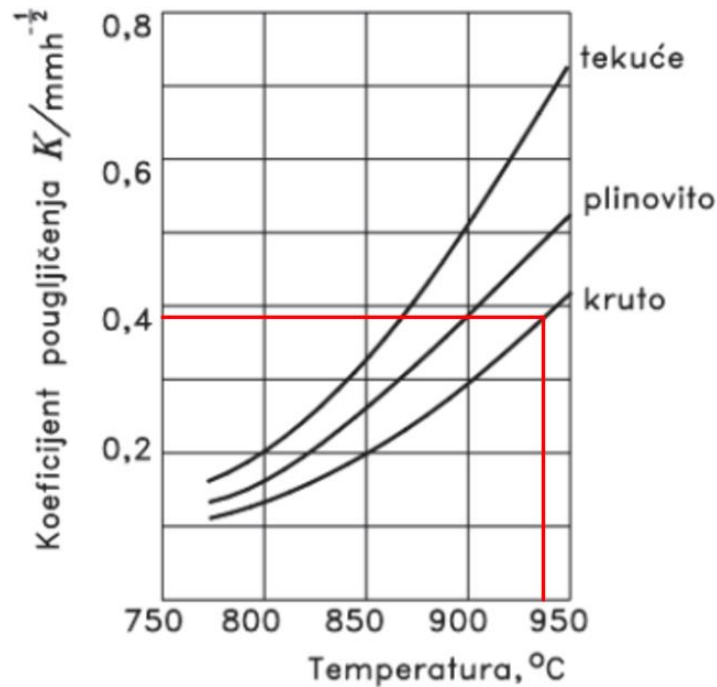
$$\delta = K \cdot \sqrt{t_p} \text{ [mm]} \quad (4.1)$$

gdje je :

K – koeficijent pouglijčenja, $\text{mmh}^{-1/2}$

t_p – vrijeme pouglijčenja, h.

Koeficijent K je parametar koji ovisi temperaturi pouglijčenja i korištenome sredstvu pouglijčenja, a određuje se prema slici 4.3.



Slika 4.3. Ovisnost koeficijenta pougljičenja o temperaturi i sredstvu pougljičenja [1]

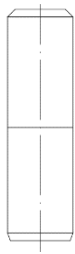
Za odabranu temperaturu pougljičenja od 940 $^{\circ}\text{C}$ i granulat drvenog ugljena, odnosno kruto sredstvo, koeficijent pougljičenja iznosi 0,38 $\text{mmh}^{-1/2}$. Prema izrazu 4.1, dobije se dubina pougljičenog sloja $\delta = 0,69$ mm. Ova dubina zadovoljava postavljene zahtjeve.

4.3. Tehnološka dokumentacija postupka cementiranja

Potrebno je napraviti i odgovarajuću tehnološku dokumentaciju u obliku operacijskih listova. Operacijski listovi moraju biti napravljeni na način da se njima prati postupak toplinske obrade strojnog dijela MJ.22-DT.39. Za postupak toplinske obrade su potreba dva operacijska lista. Na prvome operacijskom listu će biti prikazan postupak i potrebno vrijeme za proces pougljičenja i kaljenja, a na drugom operacijskom listu će biti prikazan postupak i vrijeme za proces niskotemperaturnog popuštanja.

Operacijski listovi su prikazani u tablicama 4.2 i 4.3.

Tablica 4.2. Operacijski list pougljičenja i direktnog kaljenja

Poduzeće: Tehnički fakultet		Naziv dijela: MJ.22-DT.39		Materijal: 16MnCrS5		Radno mjesto:		List: 1 Listova: 2
				Kvaliteta:		Naziv uređaja: Peć OVER 12 kW		
Operacijski list: 1		Oznaka:		Oblik: Valjak		Oznaka:		Operacija broj: 1
		Naziv operacije: Pougljičavanje i kaljenje		Masa/dimenzija:		Radionica: Laboratorij		
Zahvat	Opis zahvata	Količina:	Proiz. sredstvo	T [°C]	Vrijeme [min]	Minuta		
		Kom.	Proiz. materijal			t_s	t_r	
1	Punjenje granulatom i obratkom	1	Posuda	-	3	-	3	
2	Umetanje u peć	1	Ručno	-	0,5	-	0,5	
3	Pougljičenje	1	Peć	940	210	210	-	
4	Vađenje iz peći	1	Ručno	-	0,5	-	0,5	
5	Gašenje	1	Ulje	25	1	-	1	
Izradio:		Kontrola:	Izmjene:	Broj:		Σt_s	Σt_r	
Marcel Jelenić				Datum:		210	5	
				Ime				

Tablica 4.3 Operacijski list za postupak niskotemperaturnog popuštanja

Poduzeće: Tehnički fakultet		Naziv dijela: MJ.22-DT.39		Materijal: 16MnCrS5		Radno mjesto:		List: 2 Listova: 2
				Kvaliteta:		Naziv uređaja: Peć Estherm 12 kW		
Operacijski list:2		Oznaka:		Oblik: Valjak		Oznaka:		Operacija broj: 2
		Naziv operacije: Niskotemperaturno popuštanje		Masa/dimenzija:		Radionica: Laboratorij		
Zahvat	Opis zahvata	Količina:	Proiz. sredstvo	T [°C]	Vrijeme [min]	Minuta		
		Kom.	Proiz. materijal			t_s	t_r	
1	Umetanje u peć	1	Ručno	-	0,5	-	0,5	
2	Progrijavanje i popuštanje	1	Peć	200	89	89	-	
3	Vađenje iz peći	1	Ručno	-	0,5	-	0,5	
4	Hlađenje	1	Zrak	25	60	-	60	
Izradio:		Kontrola:	Izmjene:	Broj:		Σt_s	Σt_r	
Marcel Jelenić				Datum:		89	61	
				Ime				

4.4. Probno cementiranje strojnog dijela MJ.22-DT.39

Za uspješnu provedbu toplinske obrade strojnog dijela MJ.22-DT.39 koristili su se razni strojevi, uređaji i alati. Sve navedeno se nalazi na Zavodu za materijale na Tehničkom fakultetu u Rijeci u laboratoriju za toplinsku obradu i inženjerstvo površina i laboratoriju za metalografsko ispitivanje.

Za proces pougljičenja i kaljenja korištena je posuda sa granulatom, koja se umetnula u posebnu peć marke „OVER“. Ova peć radi na principu izmjenične struje. Njena snaga je 12 kW i sadrži tri grijača snage 380 V, te joj je vanjski dio izrađen od lima, dok je unutarnji dio peći obložen keramičkim ozidom. Keramički ozid je također i odličan izolator. Maksimalna postiziva temperatura iznosi 1200 °C. Podešavanje temperature je digitalno, te vrlo jednostavno za korištenje. Slika 4.4 prikazuje spomenutu peć.



Slika 4.4. Peć za pougljičavanje i kaljenje marke "OVER"

Za sljedeći postupak, niskotemperaturno popuštanje, korištena je peć marke „Estherm“. Regulacija temperature i kod ove peći je digitalna, te vrlo jednostavna za korištenje. Vanjski omotač peći je napravljen od čeličnog lima, lakiran vatrootalnim lakom. Radni prostor je izrađen od visokovatrootalnih aluminij – oksidnih opeka i ploča, te kalcij – silikatnih ploča. Maksimalna temperatura peći je 1200 °C, te je snage 12 kW i napona 400 V. Na slici 4.5 prikazana je spomenuta peć.



Slika 4.5. Peć za žarenje, tip "KER 175"

Nakon provedenog postupka pougličavanja, slijedi postupak kaljenja koji je proveden u ulju. Korišteno ulje je „INA KALENOL 22“. Nakon kaljenja i popuštanja korišten je uređaj za mjerenje tvrdoće koji će biti prikazan u nastavku.

Osim svega navedenog što je bilo potrebno za proces toplinske obrade, potrebno je bilo koristiti neke uređaje kojima je zadatak bio sljedeći. Prije svega je bilo potrebno strojni dio odrezati na uređaju za rezanje „Mecatome T202“ marke „Presi“. To je robustan i kompaktan, te precizan ručni stroj za mikro rezanje. Ima snažan motor koji mu omogućuje rad s konstantnim okretnim momentom u rasponu brzine od 100 do 4000 o/min. Poklopac se automatski zaključava kada uređaj počne sa rezanjem, a otključava se tek kada se rezna ploča potpuno zaustavi. Uređaj za rezanje prikazan je na slici 4.6. Uzorak se zatim postavio u optički mikroskop kako bi se provjerila dubina cementiranog sloja. Mikroskop koji se koristio za provjeru dubine je prikazan na slici 4.7.



Slika 4.6. Uređaj za rezanje "Mecatome T202"



Slika 4.7. Metalografski mikroskop "Carl Zeiss"

Prvi korak cementiranja je pougljičavanje. Za uspješno provođenje postupka pougljičavanja prvi je korak bio priprema posude sa granulatom drvenog ugljena. Nakon toga je bilo potrebno strojni dio staviti duboko unutar granulata kako bi mogao preuzeti otpušteni ugljik čime se povećava tvrdoća. Kako bi se omogućilo vađenje obratka iz granulata i stavljanje istoga u bačvu sa uljem, potrebno je bilo improvizirati „vješalicu“ za koju bi se zatim zakačila kuka. Slika 4.8 prikazuje strojni dio MJ.22-DT.39 u posudi s granulatom i improviziranom kukom.



Slika 4.8. Strojni dio u posudi s granulatom prije umetanja u peć

Kada se peć ugrijala na traženu temperaturu od 940 °C, posuda se zatvorila sa poklopcem te je unesena u peć pomoću kliješta. Potrebno je koristiti kliješta zbog visoke temperature unutar peći kako ne bi došlo do ozljeda. Nakon što je posuda postavljena u peć za pougljičenje potrebno je pričekati određeno vrijeme dok temperatura obradka ne postigne temperaturu peći. Kada se ovo dogodi, započinje se sa mjerenjem vremena.

Nakon provedenog vremena obradka unutar peći od 210 minuta, posudu je potrebno brzo i pažljivo izvaditi van, staviti na podlogu, skinuti poklopac i na kraju kuku objesiti za vješalicu sa koje visi obradak i što brže ga staviti u ulje kako bi se zakalio. Slika 4.9 prikazuje korišteno ulje za kaljenje.



Slika 4.9. Ulje za kaljenje "INA Kalenol 22"

Nakon provedenog postupka kaljenja uključuje se peć u kojoj će se vršiti niskotemperaturno popuštanje sa slike 4.5, te se podešava na potrebnu temperaturu od 200 °C. Nakon postavljanja obradka u peć, potrebno je pričekati da se on progrije. Za strojni dio MJ.22-DT.39 vrijeme progrijavanja iznosi 29 minuta. Nakon proteklih 29 minuta počinje mjerenje vremena potrebnog za proces popuštanja od 60 minuta. Nakon što je proteklo ovih 89 minuta, obradak se vadi iz peći, te ostavlja na zraku kako bi se ohladio. Kao i nakon kaljenja, potrebno je izmjeriti tvrdoću. Rezultati će biti prikazani u idućem potpoglavlju.

Slika 4.10 prikazuje strojni dio MJ.22-DT.39 nakon postupaka pougljičenja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja.



Slika 4.10. Strojni dio MJ.22-DT.39 nakon provedenog cementiranja

Nakon provedenog postupka toplinske obrade potrebno je bilo odrediti dubinu pougljičenog sloja. Da bi bilo moguće provjeriti dubinu pougljičenja, obradak je prije svega bilo potrebno odrezati koristeći uređaj „Mecatome T202“ sa slike 4.6. Uređaj za rezanje koristi „rezní kotač“ (engl. „Cut off wheel“) marke „Presi“. Dimenzije rezne ploče su $\Phi 180 \times 0,5 \times 25,4$ mm. Uređaj radi na način da se pomoću vanjske poluge rezna ploča pritisne na obradak i na taj način ga reže. Međutim, treba paziti da se ne pretjera sa snagom stiskanja poluge. Ukoliko se ploča naglo pritisne na obradak može doći do njenog pucanja. Isto tako treba pripaziti sa snagom jer može doći i do prestanka rada uređaja. Ukoliko ploča prestane sa okretanjem, jedini način ponovnog pokretanja je resetiranje, odnosno ponovno paljenje uređaja. Vrijeme potrebno za odrezivanje je iznosilo 10 minuta. Slika 4.11 prikazuje rezanje strojnog dijela i korištenu reznú ploču.



Slika 4.11. Odrezivanje strojnog dijela MJ.22-DT39 i korišteni rezni kotač

Slika 4.12 prikazuje odrezani obradak.



Slika 4.12. Odrezani strojni dio MJ.22-DT.39

Kako bi se mogla ispitati dubina pougljičenja odrezani dio obradka je potrebno pobrusiti i zatim ispolirati. Za brušenje su korišteni abrazivni brusni papiri marke „Presi“. Prvo je korišten abrazivni brusni papir P800. Nakon njega brusni papir P1200, zatim P2400, te na kraju P4000. Što je veći broj to znači da su zrnca na abrazivnom papiru sitnija, te se dobiva bolja kvaliteta površine. Uvijek se prvo treba koristiti brusni papir koji je grublji, odnosno koji ima veća zrnca, te se na kraju uvijek mora koristiti najfiniji abrazivni brusni papir. Za poliranje je korištena adhezivna tkanina za poliranje na koju je nanosena pasta za poliranje koja u sebi sadrži zrnca dijamanta, također marke „Presi“. Nakon izvršenog brušenja, te zatim poliranja, obradak je potrebno staviti i umakati u 3 % - tnu dušičnu kiselinu. Slika 4.13 prikazuje strojni dio nakon svih spomenutih radnji. Već golim okom se može vidjeti pougljičeni rubni sloj.



Slika 4.13. Strojni dio MJ.22-DT.39 nakon brušenja i poliranja

Zadnji korak je provjera dubine pougljičenog sloja pomoću optičkog mikroskopa prikazanog na slici 4.7. Rezultat će biti prikazani u nastavku.

4.5. Ispitivanje tvrdoće i metalografija

Osnovni cilj ovog toplinske obrade strojnog dijela MJ.22-DT.39 bio je postizanje zahtjevane tvrdoće rubnog sloja i postizanje zahtjevane dubine pougljičenog sloja. Tvrdoća se

mjerila nakon kaljenja i nakon postupka niskotemperaturnog popuštanja, na Rockwell – ovoj C skali, koristeći tvrdomjer na Tehničkom fakultetu u Rijeci.

Izmjerena tvrdoća nakon kaljenja je iznosila 62 HRC, dok je tvrdoća nakon niskotemperaturnog popuštanja iznosila 58 HRC. Tražena tvrdoća iznosi 57_0^{+2} , što znači da je ovaj zahtjev uspješno ostvaren. Sljedeća slika prikazuje tvrdomjer koji je korišten za mjerenje tvrdoće strojnog dijela.



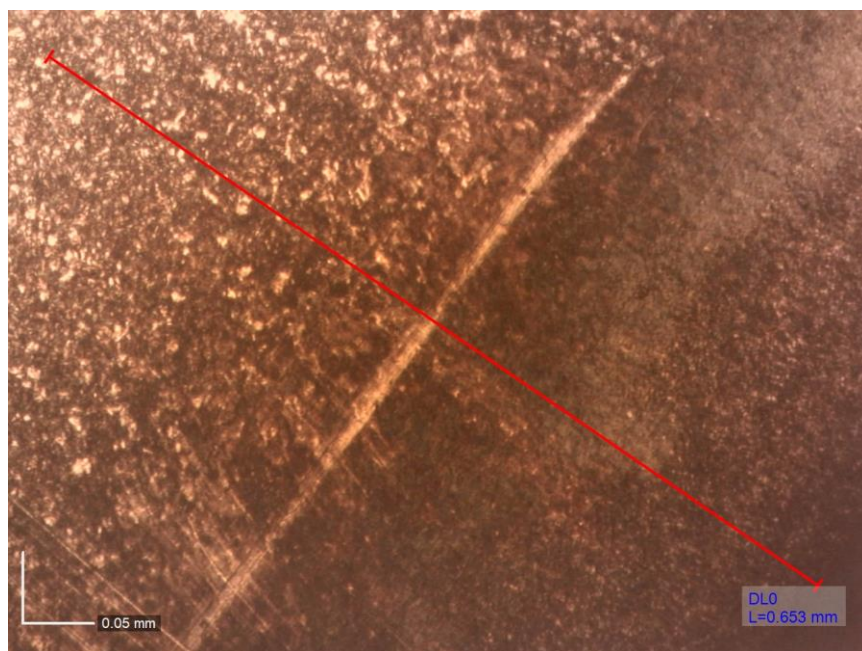
Slika 4.14. Uređaj za ispitivanje tvrdoće

Osim tvrdoće je bio postavljen na dubinu pougličnog sloja. Cilj je bio postići dubinu veću od 0,5 mm. Određivanje dubine pougličnog sloja je moguće na više načina. Prvi način, koji je ujedno i najjednostavniji ali daje najlošije rezultate jest mjerenje dubine ravnalom direktno na obradku. Slika 4.15 prikazuje mjerenje dubine pougličnog sloja ravnalom.



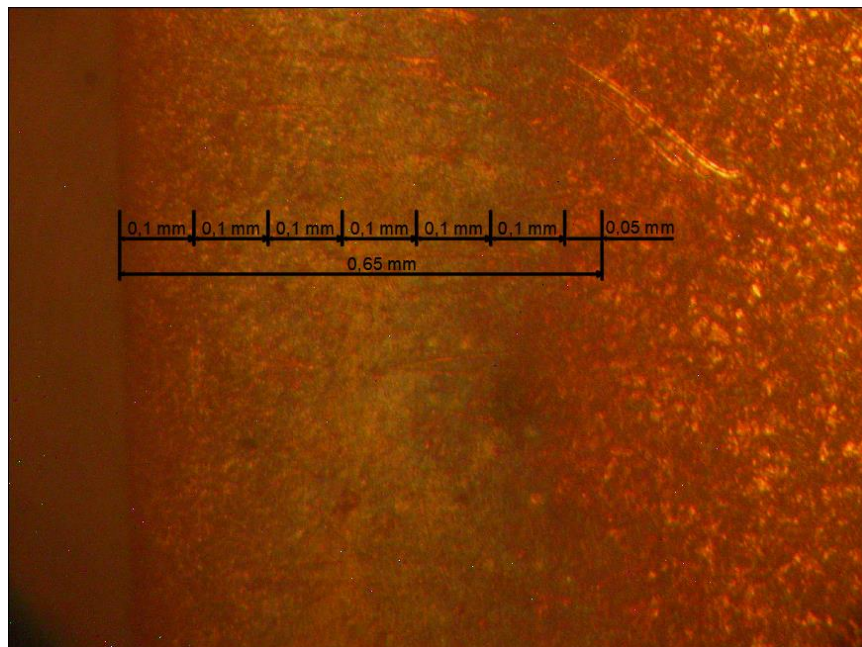
Slika 4.15. Mjerenje dubine pougljičenja ravnalom

Sa slike se može vidjeti kako je vrijednost dubine pougljičenog sloja nešto manja od 1 mm. Međutim, kako je i prethodno spomenuto ova metoda ne daje precizno rješenje, te je potrebno koristiti neku bolju metodu određivanja dubine pougljičenog sloja. Najbolje rješenje je ispitivanje optičkim mikroskopom korištenjem uvećanja od 50x. Slika 4.16 prikazuje dubinu pougljičenog sloja korištenjem mikroskopa i programa na računalu. Sa ove se slike može vidjeti kako je dubina pougljičenog sloja 0,653 mm. Ovime je dokazano da je ostvarena zahtjevana dubina pougljičenog sloja.

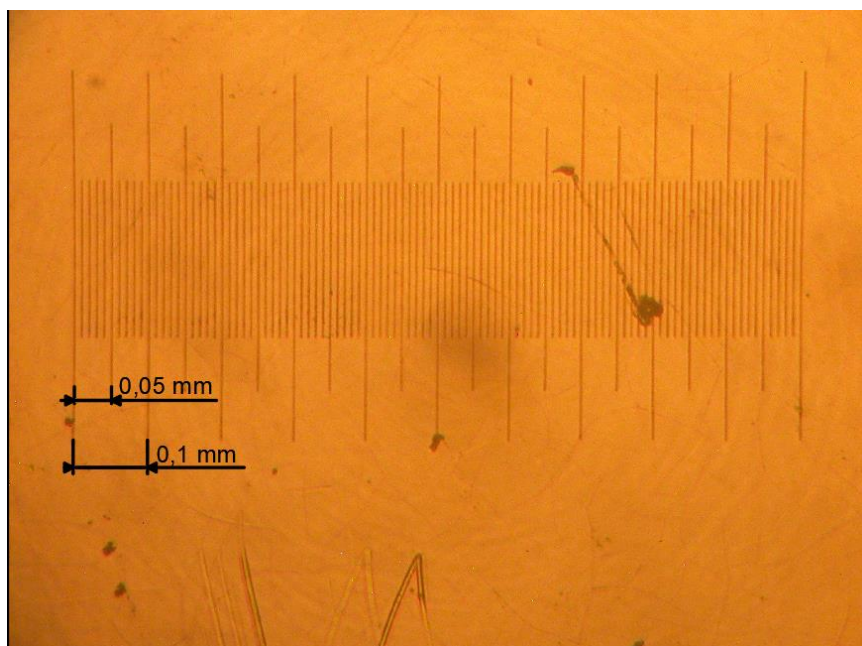


Slika 4.16. Dubina pougljičnog sloja korištenjem optičkog mikroskopa i odgovarajućeg programa na računalu

Osim korištenjem programa na računalu, provjera dubine pougljičenja je moguća korištenjem etalona i gledanjem kroz objektiv mikroskopa. Ovo je usporedna metoda. To znači da je potrebno uslikati fotoaparatom ili mobitelom objektiv. Mikroskop je prije toga potrebno namjestiti tako da se kroz objektiv vidi dubina pougljičenog sloja i zatim uslikati fotoaparatom. Nakon toga je potrebno namjestiti etalon da se vidi njegova skala, te nakon toga uslikati i ovu skalu. Posljednji korak ove metode je uspoređivanje skale etalona sa slikom dubine pougljičenog sloja i zatim mjerenje ravnalom ili nekim programom na računalu kako bi se odredila ta dubina. Slika 4.17 prikazuje pougljičeni sloj uslikan fotoaparatom, a slika 4.18 prikazuje skalu etalona uslikanu fotoaparatom kroz objektiv. Uspoređivanjem skale i dubine pougljičenog sloja dobije se dubina pougljičenja od otprilike 0,65 mm.



Slika 4.17. Dubina pougljičenog sloja kroz objektiv



Slika 4.18. Skala etalona uslikana kroz objektiv mikroskopa

5. ZAKLJUČAK

Čelik, slitina željeza s ugljikom, danas se smatra jednim od najvažnijih materijala na svijetu. Zbog njegove široke primjene u svim područjima postavljaju se zahtjevi za poboljšanje njegovih svojstava. Tražena svojstva se razlikuju o radnim uvjetima u kojima će se čelik nalaziti, neka od traženih svojstva su povećanje tvrdoće površine ili otpornost na trošenje.

Za postizanje boljih svojstava, odnosno za zadovoljavanje zahtjeva, potrebno je čeliku promijeniti strukturu. Različite postizive strukture su prikazane u Fe-Fe₃C dijagramu. Struktura čelika se mijenja pomoću raznih toplinskih obrada. Međutim, toplinska obrada nije bezopasan proces zbog toga što se izvodi na vrlo visokim temperaturama. Kod toplinsko – kemijskih proces toplinske obrade dolazi i do pojave raznih kemijskih spojeva i plinova koji također mogu biti opasni za ljudsko zdravlje.

Cementiranje spada u toplinsko – kemijski proces obrade čelika. Sastoji se od pougljičavanja, kaljenja, te niskotemperaturnog popuštanja. Pougljičenje je moguće provesti u raznim sredstvima poput tekućeg ili plinovitog, no za potrebe ovog diplomskog rada korišteno je kruto sredstvo, granulat drvenog ugljena. Kaljenjem se dobiva martenzita struktura, te je postupak kaljenja moguće provesti u različitim medijima, a za strojni dio MJ.22-DT.39 odabrano je ulje. Na kraju se obradak niskotemperaturno popustio na zraku kako bi se smanjila zaostala naprezanja.

Nakon provedenog postupka toplinske obrade vrlo je bitno bilo izmjeriti vrijednosti tvrdoće na površini kako bi se vidjelo da li se obrada pokazala uspješnom. Nakon postupka niskotemperaturnog popuštanja je tvrdoća na površini iznosila 58 HRC, što je zadovoljilo tražene zahtjeve. Osim tvrdoće, bio je postavljen zahtjev i na dubinu pougljičenog sloja. Tražena vrijednost je bila minimalno 0,5 mm. Mjerenjem na optičkom mikroskopu izmjerena je dubina pougljičenog sloja od 0,65 mm čime je zadovoljen i ovaj postavljeni zahtjev.

Na kraju se može zaključiti kako su postavljeni ispravni parametri procesa toplinske obrade strojnog dijela MJ.22-DT.39, te je proces uspješno proveden.

LITERATURA

- [1] Smoljan B.: “Toplinska obrada čelika sivog i nodularnog lijeva”, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1999.
- [2] Schaeffler, D. J.: „A review of steel microstructures“, s Interneta, 12.4.2022.
- [3] Ray B. K.; Prusty R. K.; Nayak D.: “Phase Transformations and Heat Treatments of Steels”, CRC Press, Boca Raton, 2020.
- [4] Gabrić, I.; Šitić, S.: „Materijali II“, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [5] Nepoznati autor: “10 toplinska obrada čelika”, s Interneta, <https://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr/mod/folder/view.php?id=37785>, 12.4.2022.
- [6] Pereloma, E.; Edmonds, D. V.: “Phase transformations in steels”, Woodhead Publishing, Cambridge, 2012.
- [7] Parrish, G.: “Carburizing : Microstructures and Properties”, ASM International, Ohio, 1999.
- [8] Krumes, D.: „Površinske toplinske obrade i inženjerstvo površina“, Strojarski fakultet u Slavskom Brodu, Slavonski Brod, 2004.
- [9] Nepoznati autor: “Cementacija”, s Interneta, <http://www.termickaobrada.rs/cementacija/>, 2.5.2022.
- [10] Golubić, S.: „Tehnički materijali – 1. dio : metalni materijali“, Veleučilište u Bjelovaru, Bjelovar, 2019.
- [11] Novosel, M.; Krumes, D.; Kladarić I.: “Željezni materijali – Konstrukcijski čelici”, Strojarski fakultet u Slavskom Brodu, Slavonski Brod, 2013.
- [12] Google, s Interneta, 3.5.2022.
- [13] Krumes, D.: „Toplinska obradba“, Strojarski fakultet u Slavskom Brodu, Slavonski Brod, 2000.
- [14] Stupnišek, M. i dr.: „Termokemijski postupci“, Metalburo, Zagreb, 1978.
- [15] OVAKO: “Material data sheet – Steel grade : 16MnCrS5”, s Interneta, <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/16mncrs6/>, 16.6.2022.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Dio faznog Fe-Fe ₃ C dijagrama [1]	2
Slika 2.2. Kristalna struktura ferita i austenita [2]	3
Slika 2.3. Različite faze nastanka austenita iz lamelnog perlita [3]	4
Slika 2.4. Utjecaj temperature i vremena na nastanak austenita iz perlita u eutektoidnom čeliku [3]	5
Slika 2.5. Utjecaj temperature na veličinu zrna austenita u sitnozrnatim i krupnozrnatim čelicima [3].....	6
Slika 2.6. TTT – dijagram kontinuiranog ohlađivanja podeutektoidnog čelika s ucrtanim krivuljama gašenja [4].....	7
Slika 2.7. Nastajanje lamela ferita i lamela cementita iz austenita [5]	9
Slika 2.8. Shematski prikaz pretvorbe austenita u perlit [5]	9
Slika 2.9. Različite faze uključene u stvaranje gornjeg bainita [3]	11
Slika 2.10. Različite faze uključene u stvaranje donjeg bainita [3]	12
Slika 2.11. Početak i završetak martenzitne pretvorbe - odnos između temperature i udjela ugljika [3]..	13
Slika 2.12. Shematski prikaz masivnog i pločastog martenzita [4]	14
Slika 3.1. Shematski prikaz postupka cementiranja [8]	15
Slika 3.2. Cementirani strojni dijelovi – zupčanci [9]	16
Slika 3.3. Postupci toplinske obrade čelika za cementiranje prije isporuke: a) meko žarenje, stanje “G”, b) niskotemperaturna normalizacija, stanje “BF”, c) visokotemperaturna normalizacija, stanje “BG” [11]..	21
Slika 3.4. Prikaz promjene udjela ugljika od ruba prema jezgri tijekom pougljičenja [11]	22
Slika 3.5. Prikaz mikrostrukture cementiranog obratka i raspored tvrdoće u ovisnosti o udaljenosti od ruba [10].....	24
Slika 3.6. Utjecaj dužine vremena držanja izratka (pri temperaturi pougljičavanja) na veličinu dubine pougljičena sloja za različita sredstva za cementiranje [4]	27
Slika 3.7. Kruto sredstvo za pougljičavanje [12].....	28
Slika 3.8. Ovisnost dubine pougljičenja o vremenu i temperature [8]	29
Slika 3.9. Raspored obradaka unutar kutije za pougljičavanje [8]	30
Slika 3.10. Postupak pougljičenja u krutom sredstvu [8]	31
Slika 3.11. Postizive dubine u kapljevitom sredstvu u odnosu na trajanje postupka [13].....	33
Slika 3.12. Mikrostrukture u različitim slojevima pougljičenog čelika [14].....	39
Slika 3.13. Direktno kaljenje [14]	40
Slika 3.14. Jednostruko kaljenje [14]	41
Slika 3.15. Jednostruko kaljenje nakon izotermičke pretvorbe [14].....	42
Slika 3.16. Dvostruko kaljenje [14].....	42
Slika 3.17. Postizive vrijednosti tvrdoće nakon popuštanja s obzirom na temperature i vrijeme procesa popuštanja [14]	43
Slika 4.1. Skica strojnog dijela MJ.22-DT39. i zahtjevi za obradu.....	44
Slika 4.2. Toplinska obrada strojnog dijela MJ.22-DT.39	46
Slika 4.3. Ovisnost koeficijenta pougljičenja o temperaturi i sredstvu pougljičenja [1]	47
Slika 4.4. Peć za pougljičavanje i kaljenje marke "OVER"	50
Slika 4.5. Peć za žarenje, tip "KER 175"	51
Slika 4.6. Uređaj za rezanje "Mecatome T202"	52
Slika 4.7. Metalografski mikroskop "Carl Zeiss"	52

Slika 4.8. Strojni dio u posudi s granulatom prije umetanja u peć	53
Slika 4.9. Ulje za kaljenje "INA Kalenol 22"	54
Slika 4.10. Strojni dio MJ.22-DT.39 nakon provedenog cementiranja.....	55
Slika 4.11. Odrezivanje strojnog dijela MJ.22-DT39 i korišteni rezni kotač	56
Slika 4.12. Odrezani strojni dio MJ.22-DT.39	56
Slika 4.13. Strojni dio MJ.22-DT.39 nakon brušenja i poliranja	57
Slika 4.14. Uređaj za ispitivanje tvrdoće	58
Slika 4.15. Mjerenje dubine pougljičenja ravnalom.....	59
Slika 4.16. Dubina pougljičenog sloja korištenjem optičkog mikroskopa i odgovarajućeg programa na računalu	60
Slika 4.17. Dubina pougljičenog sloja kroz objektiv	61
Slika 4.18. Skala etalona uslikana kroz objektiv mikroskopa	61

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Čelici za cementiranje [11]	19
Tablica 4.1. Kemijski sastav čelika 16MnCrS5 [15].....	45
Tablica 4.2. Operacijski list pougljičenja i direktnog kaljenja	48
Tablica 4.3 Operacijski list za postupak niskotemperaturnog popuštanja	49

SAŽETAK

U ovome diplomskom radu prikazan je postupak toplinske obrade cementiranja strojnog dijela MJ.22-DT.39. Strojnio dio je u obliku cilindra. U teorijskom dijelu rada opisane su fazne pretvorbe značajne za postupak cementiranja, te je opisan sam postupak cementiranja. Nakon toplinske obrade strojnom dijelu je izmjerena tvrdoća, te je obradak na kraju ispitan metalografski gdje mu je provjerena dubina pougljičenog sloja. Cilj rada je bio postići traženu tvrdoću površinskog sloja, te dobiti traženu vrijednost pougljičenog sloja. Cijeli postupak toplinske obrade i metalografskog ispitivanja je popraćen slikama i opisom.

KLJUČNE RIJEČI : cementiranje, toplinska obrada, pougljičenje, fazne pretvorbe, ispitivanje tvrdoće, metalografija

ABSTRACT

In this master thesis, the process of heat treatment of case-carburizing machine part named MJ.22-DT.39 is presented. The machine part is in the shape of a cylinder. In the theoretical part of thesis, phase transformations significant for the cementation process are described. After heat treatment, the hardness of the machine part was measured, and the part was finally tested metallographically, where the depth of the carbon layer was checked. The aim of this thesis was to achieve the required hardness of the surface layer, and to obtain the required value of the carbon layer. The whole process of heat treatment and metallographic testing is accompanied by pictures and descriptions.

KEY WORDS : carburization, heat treatment, carburizing, phase transformations, hardness testing, metallography