

POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA NE.23-DT.37

Dolić, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:190:779041>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-17**



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 NE.23-
DT.37**

Rijeka, ožujak 2024.

Marko Dolić

0069081976

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**POSTUPAK TOPLINSKE OBRADJE STROJNOG DIJELA NE.23-
DT.37**

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

Rijeka, ožujak 2024.

Marko Dolić

0069081976

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 11. ožujka 2023.

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

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Marko Dollč (0069081976)**
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**
Modul: **Inženjerstvo materijala**

Zadatak: **Postupak toplinske obrade strojnog dijela NE.23-DT.37 / Heat treating process of workpiece NE.23-DT.37**

Opis zadatka:

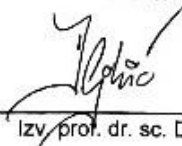
Potrebno je proanalizirati proces toplinske obrade strojnog dijela NE.23-DT.37. Potrebno je teorijski opisati postupak i sve promjene u mikrostrukтури koje nastaju pri odabranom postupku toplinske obrade. Potrebno je opisati metode određivanja parametara toplinske obrade te pretkazivanja rezultata toplinske obrade.

Nadalje, potrebno je definirati proces toplinske obrade te opisati postrojenje za toplinsku obradu strojnog dijela NE.23-DT.37. Potrebno je verificirati definirani proces toplinske obrade, proanalizirati rezultate toplinske obrade i donijeti odgovarajuće zaključke.

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

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Dario Iljkić

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

IZJAVA

Sukladno člankom 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 NE.23-DT.37“ izradio samostalno u razdoblju od 1. studenoga 2023. do 12. ožujka 2024. godine.

Diplomski rad je izrađen korištenjem stečenih znanja tijekom studija s naglaskom na kolegij „Termalni procesi materijala“ pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Daria Iljkića.

Rijeka, ožujak 2024.

Marko Dolić

Zahvala

Na početku želio bih se zahvaliti mentoru izv. prof. dr. sc. Dariu Iljkiću na smjernicama i savjetima koje sam slijedio tijekom pisanja diplomskog rada.

Također, zahvaljujem se mentoru što mi je omogućio korištenje prostora i opreme Laboratorija za materijale na Zavodu za materijale Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Bez korištenja opreme u Laboratoriju za materijale diplomski rad ne bih mogao napraviti u cijelosti.

Također veliku zahvalu dajem svojoj djevojci koja mi je bila potpora u svim teškim situacijama tijekom studiranja.

Zahvaljujem se svojim roditeljima i sestri što su pratili moje obrazovanje i bili mi podrška.

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. OPĆENITE SPOZNAJE O ČELIKU I FAZNE PRETVORBE | 2 |
| 2.1. Spoznaje o čeliku | 3 |
| 2.2. Fazne pretvorbe | 5 |
| 2.3. Formiranje austenita | 7 |
| 2.4. Pretvorba pothlađenog austenita | 11 |
| 2.5. Transformacija perlita | 13 |
| 2.6. Transformacija bainita | 15 |
| 2.7. Martenzitna pretvorba | 18 |
| 3. ČELICI ZA CEMENTIRANJE | 20 |
| 3.1. Postupak cementiranja | 25 |
| 3.2. Pougličavanje | 26 |
| 3.2.1 Pougličavanje u krutom sredstvu | 30 |
| 3.2.2 Pougličavanje u solnoj kupki | 31 |
| 3.2.3 Pougličavanje u plinskim atmosferama | 32 |
| 3.3. Kaljenje | 34 |
| 3.4. Niskotemperaturno popuštanje | 39 |
| 4. TOPLINSKA OBRADA STROJNOG DIJELA NE.23.-DT.37 | 40 |
| 4.1. Materijal strojnog dijela NE.23-DT.37 | 41 |
| 4.2. Izračun i parametri postupka cementiranja strojnog dijela NT.23-DT.37 | 42 |
| 4.3. Tehnološka dokumentacija | 43 |
| 4.4. Verifikacija parametara toplinske obrade strojnog dijela NT.23-DT.37 | 47 |
| 5. ZAKLJUČAK | 52 |
| POPIS SLIKA | 53 |
| POPIS TABLICA | 55 |
| LITERATURA | 56 |
| SAŽETAK | 57 |
| SUMMARY | 58 |

1. UVOD

Materijali u osnovnom stanju ponekad ne posjeduju tražena svojstva stoga je potrebno primijeniti postupke toplinske obrade materijala kako bi se ispunili specifični zahtjevi u struci.

Cilj ovog diplomskog rada je razjasniti pojmove toplinske obrade materijala, općenite spoznaje o čeliku i faznim pretvorbama, teorijski postupak cementiranja i sve promjene u mikrostrukturi prilikom cementiranja te određivanje parametara te pretkazivanje rezultata toplinske obrade. Toplinska obrada se može definirati kao proces podložnosti određenog strojnog elementa na temperaturno-vremenski ciklus kako bi se postigli određeni parametri materijala, a to je poželjna mikrostruktura materijala čime dobivamo poželjna mehanička, kemijska te fizička svojstva.

Česta toplinska obrada materijala tj. čelika i strojnih dijelova je cementiranje. Razlog tome je poboljšanje mehaničkih svojstava čelika, odnosno postizanje tvrdoće koja zamjenjuje neke skuplje i teže obradive metale. Cementiranje, kao toplinska obrada omogućava pojeftinjenje strojnih dijelova, a dobivanje boljih svojstava nego u izvornom obliku.

Uz cementiranje, postoje razne metode obogaćivanja površinskog sloja čelika raznim kemijskim elementima poput bora i dušika. Takve toplinske obrade su prepoznatljive kao nitriranje, kaljenje, popuštanje, normalizacija i dr...

Također, uz teorijski dio biti će obrađen i praktični dio diplomskog rada u svrhu rješavanja problema koji proizlazi iz cementiranja zadanog strojnog dijela NE.23-DT.37.

2. OPĆENITE SPOZNAJE O ČELIKU I FAZNE PRETVORBE

Čelik koji je poznat kao legura željeza i ugljika, u industriji zauzima istaknuto mjesto među inženjerskim materijalima. Karakteristike čelika proizlaze iz složenih faznih pretvorbi prilikom toplinske obrade koje su ključne za postizanje mehaničkih, toplinskih i kemijskih svojstava. Čelik uvijek ima legirajuće elemente osim željeza i ugljika poput mangana, kroma i nikla. Udio ugljika igra ključnu ulogu te određuje osnovna svojstva čelika te se kao takvi mogu podijeliti na visoko ugljične, srednje ugljične te nisko ugljične čelike.

Fazne pretvorbe u čeliku se odražavaju kroz tri ključne faze, a to su ferit, austenit i cementit. Ferit je mekan i duktilan koji je suprotnost austenitu koji je čvrst i formiran na višim temperaturama. Cementit se odlikuje visokom tvrdoćom te visokim udjelom ugljika.

Temperaturni ciklusi koji su dio toplinske obrade čelika igraju važnu ulogu u kontroliranju faznih promjena, npr. kod austenizacije, zagrijavanje iznad temperature austenizacije, temperaturni ciklusi omogućuju pretvorbu ferita u austenit. Kaljenjem se fiksira struktura u martenzit koja je po svojim karakteristikama čvrsta i tvrda faza.

Temperature austenizacije A_{C1} i A_{C3} ključne su u faznim pretvorbama. A_{C1} predstavlja početak pretvorbe ferita u austenit dok A_{C3} predstavlja potpunu transformaciju. Razumijevanje ovih temperatura omogućuje preciznu kontrolu toplinske obrade.

Fazne pretvorbe praktično se primjenjuju u procesima poput gašenja, cementiranja i popuštanja. Gašenjem se postiže visoka tvrdoća površine dok se popuštanjem smanjuje krhkost i unutarnje naprezanje u materijalu. [1], [2]

Opće spoznaje o čeliku i faznim pretvorbama ključne su za optimalnu primjenu materijala u inženjerskim praksama. Razumijevanje kako kontrolirati strukturu čelika putem toplinske obrade otvara vrata širokom spektru primjena u raznim industrijama. Općenite spoznaje o čeliku i faznim pretvorbama su opširnije opisane u potpoglavljima ovog diplomskog rada.

2.1. Spoznaje o čeliku

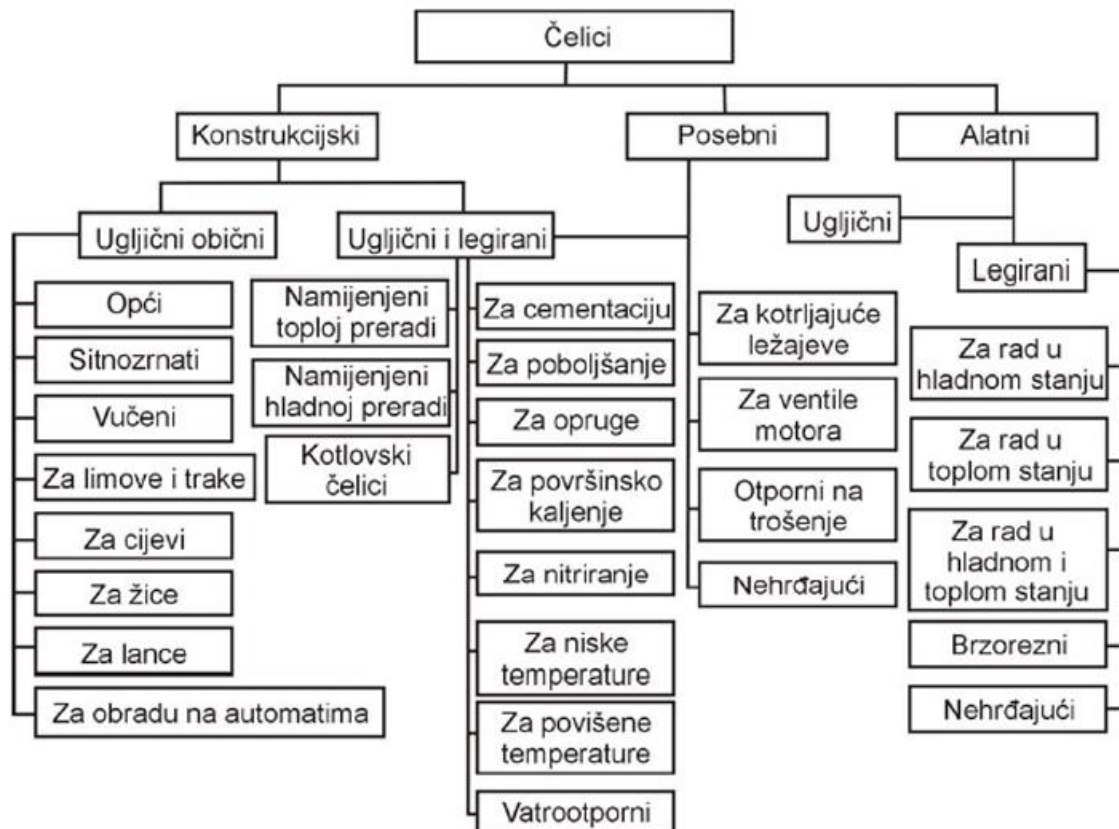
Čelik je legura dva vrlo poznata kemijska elementa, željeza i ugljika, i to s udjelom ugljika između 0.008 % i 2.14 %. Gotovo cjelokupna proizvedena količina željeza koja nastaje u visokim pećima podvrgava se procesima prerade u čelik zbog poboljšanja u vidu mehaničkih, kemijskih i fizičkih svojstava u usporedbi s čistim željezom.

Primjena željeza prevladava u obliku čelika dok se lijevano ili sirovo željezo koristi vrlo rijetko, tj. u manjoj mjeri. Legura željeza i ugljika ističe se svojim iznimnim svojstvima kao što su tvrdoća, žilavost, sposobnost lijevanja, čvrstoća te elastičnost.

Čelik se također može definirati kao metastabilna kristalna legura željeza i ugljika. Nadalje, često sadržava prateće elemente poput sumpora (S), fosfora (P), mangana (Mn), silicija (Si) te različite dodatke drugih legirajućih elemenata. Navedeni elementi imaju veliki utjecaj na konačna svojstva čelika. Neki od takvih elemenata doprinose poboljšanju svojstava čelika, dok drugi mogu imati i neželjeni učinak te nisu poželjni u strukturi čelika. [2]

Kemijski element koji ključno utječe na mikrostrukturu svojim udjelom je ugljik koji direktno utječe na mehanička svojstva čelika. Udjelom ugljika moguće je kontrolirati čvrstoću, tvrdoću, granicu razvlačenja, istezljivost te otpornost na udare. Promjenama udjela ugljika, tj. povećanjem ili smanjenjem udjela znatno se utječe na svojstva prema potrebama za što je čelik namijenjen. Također, udjel ugljika utječe i na obradivost materijala gdje se rastućom količinom ugljika povećava zakaljivost, ali se smanjuje sposobnost za plastičnu deformaciju i zavarljivost čelika.

Čelici su svakako postali ključni tehnički materijali u širokom opsegu industrijskih primjena. Sama spoznaja da globalna proizvodnja čelika čini značajan udio od 65% u ukupnoj proizvodnji tehničkih materijala možemo reći kako se radi o materijalu koji je našao veliki broj primjena i aplikacija kako u industriji tako i u svijetu. [2]



Slika 2.1. Podjela čelika [2]

Na slici 2.1. je prikazana opća podjela čelika prema namjeni u industriji. Čelike dijelimo na tri glavne skupine: konstrukcijski, posebni i alatni te svaki od njih ima još dodatne pod skupove specifičnih vrsta čelika.

Prva skupina čelika su konstrukcijski čelici koji su našli primjenu u izgradnji raznoraznih konstrukcija kao što su zgrade, mostovi i drugo. Konstrukcijskim čelicima su svojstva prilagođena čvrstoći i nosivosti što ga čini visoko vrijednim materijalom u građevinskoj industriji.

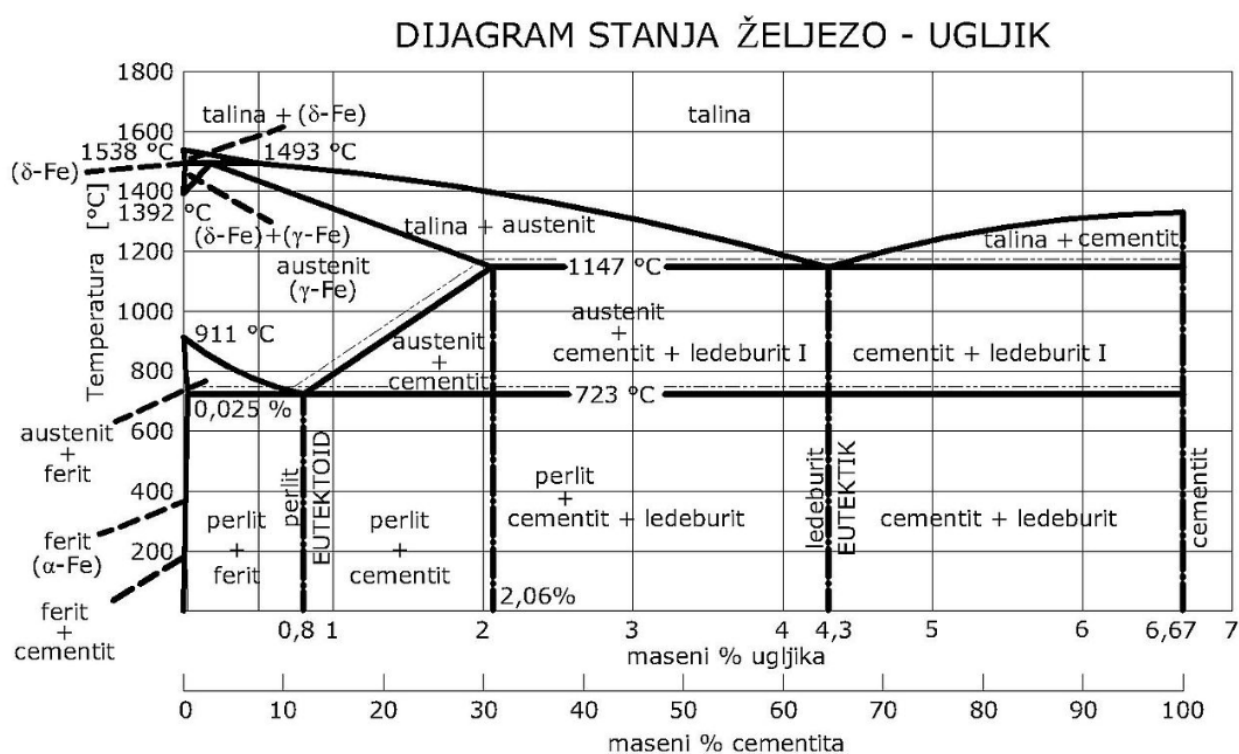
Druga skupina obuhvaća posebne čelike koji se koriste u industriji gdje se zahtijevaju specifična svojstva kao što je kemijska stabilnost, visoko čvrstoća te otpornost na visoke temperature. Ova kategorija najčešće obuhvaća legure koje su prilagođeni prije navedenim uvjetima rada.

Treća skupina su alatni čelici koji su dizajnirani za izradu alata, naprava i opreme te se vrlo često koristi u strojarскоj industriji. Ovakav tip čelika je karakterističan zbog svoje visoke tvrdoće i otpornosti na trošenje te ga čini idealnim materijalom za alate koji su izloženi velikim naprezanjima. [2]

Svaka od glavnih skupina dijeli se dalje na specifične podskupine kako bi se zadovoljili raznoliki zahtjevi i potrebe industrijskih sektora. Raznolikost čelika prema namjeni čini ih iznimno prilagodljivim materijalom u više područja inženjeringa i proizvodnje.

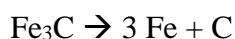
2.2. Fazne pretvorbe

Sami početak analize kod toplinske obrade čeličnih materijala je fazni dijagram Fe-Fe₃C (slika 2.2). Na faznom dijagramu stanja Fe-Fe₃C mogu se uočiti kritične temperature prekrystalizacije u ravnotežnim uvjetima koje odgovaraju ohlađivanju ili ugrijavanju čelika te fazna područja čelika. [1]



Slika 2.2. Fazni dijagram Fe-Fe₃C [9]

Fazni dijagram Fe-Fe₃C koji je često korišten, ne predstavlja ravnotežni dijagram. Fazni dijagram Fe-Fe₃C prikazuje da se prisutne faze ne mijenjaju tijekom određenog vremena, ali u stvarnosti željezni karbid Fe₃C (cementit) podvrgava se raspadu tijekom vremena (pahuljasti grafit) po jednadžbi:



Cementit se pri sobnoj temperaturi razgrađuje izuzetno sporo, čak i pri temperaturi od 700 °C razgradnja se odvija nekoliko godina. Stoga, u uvjetima laganog zagrijavanja i hlađenja Fe – Fe₃C dijagram može se promatrati kao ravnotežni dijagram stanja.

Faze koje se javljaju u čeličnoj mikrostrukturi te odgovaraju Fe-Fe₃C dijagramu su perlit, ferit, sekundarni cementit te austenit koji je smješten iznad kritične temperature A₁ (arret – stojište). Zbog temperaturnih histerza kritičnih temperatura kod faznih pretvorbi nisu jednake pri ugrijavanju ili hlađenju te se dodano uvode indeksi kako bi jasno mogli raspoznati radi li se o hlađenju ili ugrijavanju. Kada dolazi do zagrijavanja, tada se dodaje indeks „c“ (chauffage – ugrijavanje) te za ohlađivanje se dodaje indeks „r“ (refroidissement – ohlađivanje). Primjera radi, ravnotežna temperatura austenita i perlita označava se s A₁. Kritična temperatura pretvorbe perlita u austenit se označuje kao A_{C1} dok se kritična temperatura pretvorbe austenita u perlit označuje sa A_{r1}. Spoznaje o označavanju kritičnih temperatura pretvorbe olakšat će čitanje simbola u praktičnom dijelu. [1]

O ovisnosti o udjelu ugljika, čelici se klasificiraju na podeutektoidne koji imaju manje od 0,8 % ugljika, eutektoidne koji imaju otprilike 0,8 % ugljika te nadeutektoidne koji imaju više od 0,8 % ugljika.

Ferit predstavlja uključinski kristalni mješanac željeza i ugljika s prostorno centriranom kubičnom rešetkom. Ferit je drugim riječima kruta otopina ugljika u željezu. Udio ugljika u feritu može dostići maksimalno 0,0025 %. Ferit se često u stručnoj literaturi može pronaći s oznakom α - željezo.

Sekundarni cementit je kemijski spoj željeznog karbida Fe₃C koji može primiti u svoju strukturu maksimalno 6,67 % ugljika.

Perlit, poznat kao i sorbit, predstavlja eutektoidnu mješavinu ferita i cementita koja sadrži 0.8 % ugljika te se formira hlađenjem na malim temperaturama, tj. pri temperaturi od 723 °C.

Lamelarna struktura perlita sastoji se od tankih pločica cementita te bijele osnove ferita. Lamelle ferita su otprilike sedam puta veće debljine od lamela cementita i mogu se vidjeti samo prilikom korištenja optičkog mikroskopa. [1], [3]

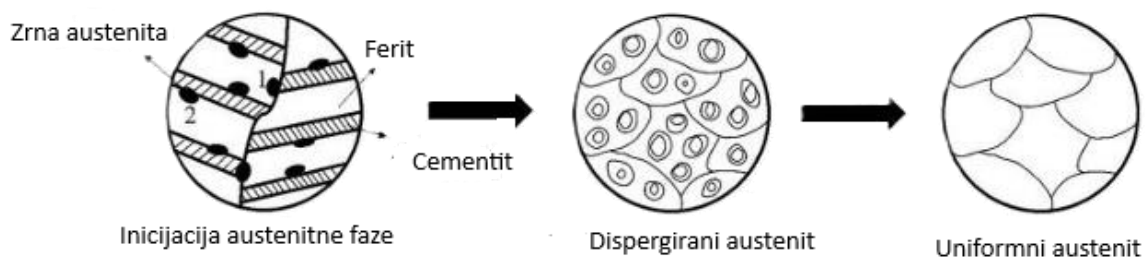
Austenit se referira kao uključinski kristal mješanac željeza i ugljika s plošno centriranom kubičnom rešetkom gdje se ugljik otapa u čvrstom željezu zbog značajno manjih veličina atoma. Maksimalna topljivost ugljika u asudentitnom čeliku doseže do 2,06 % te se postiže na temperaturi od 1147 °C. Također, austenit se još naziva i γ-faza te se definira kao kruta otopina ugljika u γ-željezu.

2.3. Formiranje austenita

U procesu formiranja austenita, ferit i cementit koji imaju različite kemijske sastave prelaze u treću fazu koja se naziva austenit te takvo formiranje faze se odvija putem difuzijskog mehanizma. Ovakva transformacija feritno-cementitne smjese u austenit događa se kada se zbog povećanja temperature stvore kinetički i termodinamički uvjeti koji omogućuju nastajanje austenita. [1]

Drugim riječima, u procesu formiranja austenita, slobodna energija austenita postaje niža od slobodne energije feritno-karbidne smjese te je omogućeno dovoljno vremena da se putem difuzijskih procesa formira austenit.

Proces transformacije austenita ima ključnu ulogu u strukturalnim promjena čelika i uvelike određuje mehanička svojstva čelika. U trenutku kada se ostvaraju optimalni uvjeti za stvaranje austenita dolazi do mikro-strukturalnih promjena koje za rezultat imaju značajan utjecaj na čvrstoću, žilavosti te druge karakteristike čelika. Bitno je za napomenuti da transformacija zahtijeva točnost parametara tj. preciznu kontrolu temperature i vremena kako bi se postigla željena struktura čelika. Slika 2.3. prikazuje formiranje austenita iz niskougličnog perilita.



Slika 2.3. Nukleacija austenita u homogeni austenit [5]

Nastanak austenita lagano se ostvaruje između dvije faze tj. između feritne i cementitne faze gdje su posebno istaknuta mjesta s minimalnom slobodnom energijom za određeni kemijski sastav i temperaturu u području kritičnih veličina. Nadalje, daljnji rast austenitne faze postiže se prvobitno difuzijom ugljika u novonastalom austenitu. Maksimalna koncentracija ugljika u austenitu nalazi se na granici između austenitne i karbidne faze dok minimalna koncentracija cementita smještena je na granici s feritnom fazom.

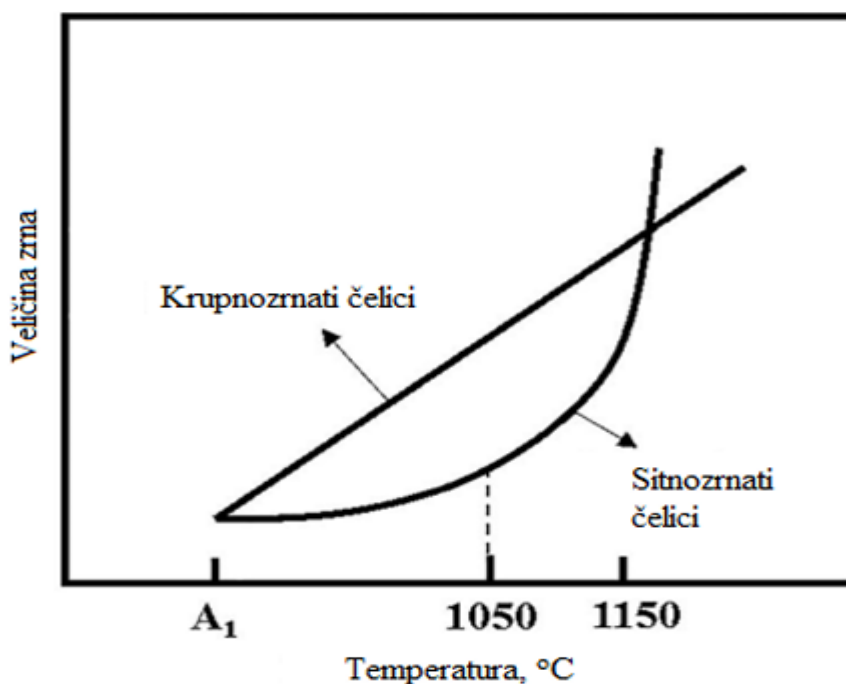
Eksperimentalnim istraživanjem potvrđena je činjenica da brzina transformacije u austenitnu fazu direktno ovisi o brzini difuzije ugljika u novonastaloj fazi. Iako je u toplinskoj obradi čelika često od značaja brzina procesa tijekom hlađenja, postoje situacije u kojima je posebno bitno

razumijevanje brzina formiranja austenita. Povećanjem termodinamičke temperature iznad ravnotežne temperature dolazi do ubrzanja difuzije atoma ugljika te se povećava razlika u slobodnoj energiji između trenutne i stabilne strukture što često rezultira ubrzanjem procesa transformacije perlita u austenit. [3], [6]

Svojstva čelika, uključujući glavne parametre čelika koji su vlačna čvrstoća, žilavost te tvrdoća definiraju se veličinom austenitnih zrna te imaju ključnu ulogu u određivanju parametara čelika. Promjena veličine zrna austenita mogu se bitno modificirati različita svojstva materijala. Postoje dvije osnovne kategorije čelika, a to su sitnozrnati i krupnozrnati te se razlikuju prema sklonosti rasta austenitnih zrna.

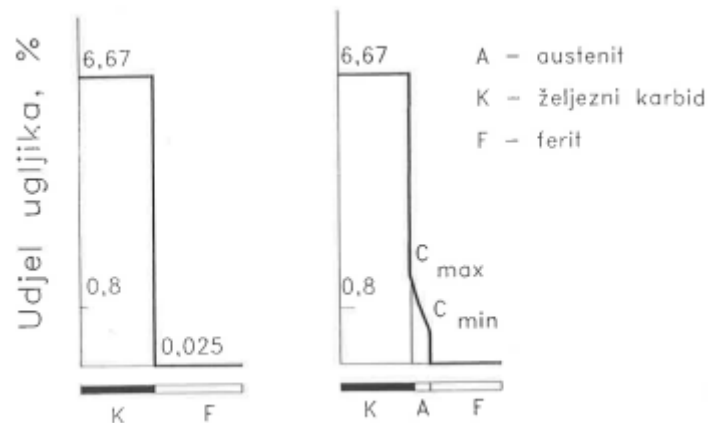
Krupnozrnati čelici imaju nagli rast zrna s porastom temperature. Takav rast se odvija između 1000 °C i 1050 °C. Sitnozrnati čelici se karakteriziraju s otpornošću na brzi rast zrna austenita s povećanjem temperature. [1]

Kada temperatura nadmaši 1050 °C, rast kod sitnozrnatih čelika postaje brži u usporedbi s krupnozrnatim čelicima, ali kada temperatura iznosi oko 1150 °C, sitnozrnati i krupnozrnati čelici postižu jednaku veličinu zrna. Sitnozrnati čelici imaju sposobnost zadržavanja male veličine austenita dulje vrijeme te se zato koriste u procesu cementiranja na temperaturama oko 950 °C s dugim trajanjem cementiranja. Slika 2.4. prikazuje koliko temperatura ima utjecaj na veličinu austenita u sitnozrnatim i krupnozrnatim čelicima.



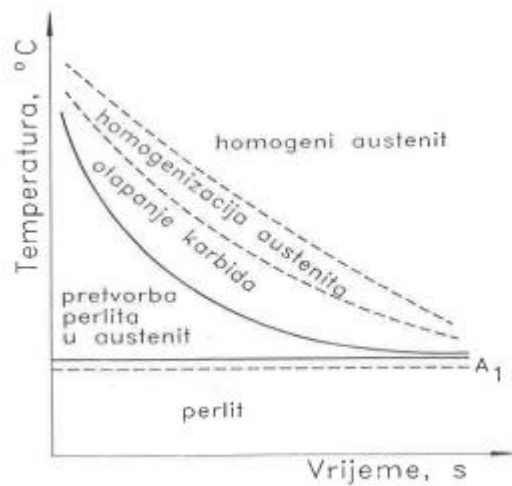
Slika 2.4. Utjecaj temperature na veličinu zrna [3]

Formiranje austenita najlakše se događa na granicama feritne i cementitne faze. Na tim mjestima stvara se austenit koji ima minimalnu slobodnu energiju za određenu temperaturu i kemijski sastav u kritičnoj veličini. Daljnji rast austenitne faze postiže se prvenstveno difuzijom ugljika u novonastalom austenitu. Na slici 2.5. prikazana je raspodjela ugljika u procesu stvaranja austenita. Maksimalna koncentracija ugljika u austenitu C_{\max} nalazi se na granici austenita s cementitnom fazom dok minimalna koncentracija ugljika u austenitu C_{\min} nalazi se na granici s feritnom fazom.



Slika 2.5. Shematski prikaz raspodjele ugljika [1]

Iako je brzina procesa hlađenja čelika često od velike važnosti u toplinskoj obradi materijala, postoje situacije u kojima je posebno značajno poznavati brzinu formiranja austenita. Povećanjem temperature iznad ravnotežne temperature, povećava se difuzija atoma ugljika i razlika u slobodnoj energije između trenutne i stabilne strukture. Stoga, povećanje temperature iznad ravnotežne temperature ubrzava proces transformacije perlita u austenit.



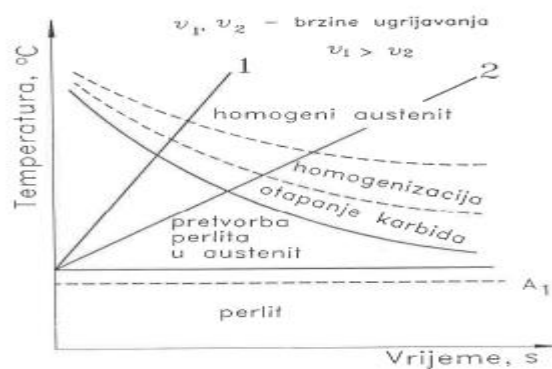
Slika 2.6. Izotermna tvorba austenita [1]

Na slici 2.6. može se uočiti da se povišenjem temperature smanjuje trajanje tvorbe austenita.

Proces tvorbe homogenog austenita sastoji se od:

- pretvorba perlita u austenit
- otapanje karbida
- homogenizacija austenita

Na slici 2.7. prikazan je dijagram tvorbe austenita pri konstantnim uvjetima ugrijavanja.



Slika 2.7. Dijagram pretvorbe austenita pri konstantnim uvjetima ugrijavanja. [1]

Na slici 2.7. prikazane krivulje 1 i 2, ilustriraju shematski dvije različite krivulje zagrijavanja čelika. Krivulja 1 predstavlja veću brzinu zagrijavanja. Analizom dijagrama na slici 2.7. primjetno je da povećanje brzine zagrijavanja rezultira bržim postizanjem viših temperatura te istovremeno

manjuje vrijeme pretvorbe. Također, uočljivo je da se karakteristične temperature formiranja austenita pri većim brzinama zagrijavanja pomiču prema višim vrijednostima.

U postupku formiranja austenita u podeutektoidnim i nadeutektoidnim čelicima, temperatura A_{C3} i A_{cm} povisuju se pri većim brzinama zagrijavanja u odnosu na temperatura A_{C1} .

Zadržavanjem čelika na povišenim temperaturama dolazi do rasta kristalnih zrna austenita (slika 2.8). Povećavanjem veličine austenitnog zrna događa se kao spontani proces, praćen smanjenjem slobodne energije.

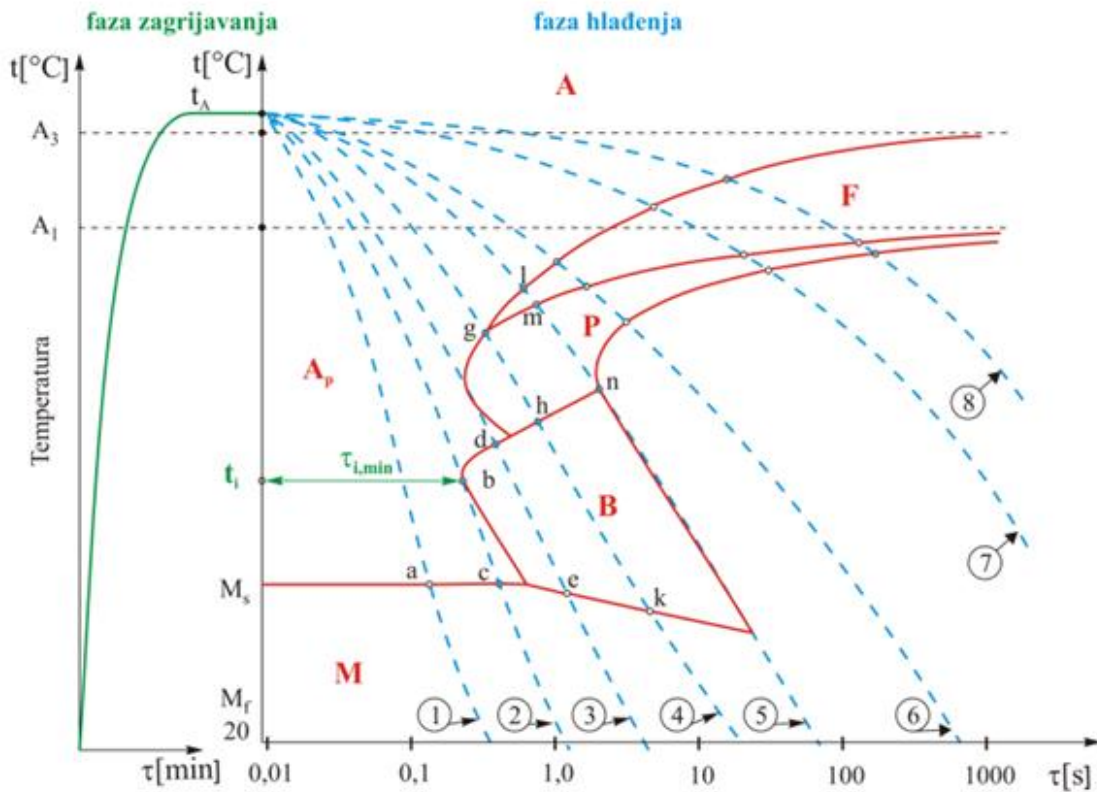


Slika 2.8. Promjena veličine kristalnog zrna austenita ovisno o temperaturi [1]

U sitnozrnatim čelicima, nagli rast austenitnog zrna javlja se kada prestane djelovanje prepreka koje su do tada ograničavale rast zrna. Sitnozrnati austenit predstavlja preduvjet za formaciju fine mikrostrukture s malim zrnima pri sobnoj temperaturi. Čelik s finom sitnozrnatom strukturom, u pravilu gotovo uvijek, pokazuje povoljna mehanička svojstva u usporedbi s čelicima koji posjeduju grubu krupnozrnatu mikrostrukturu.

2.4. Pretvorba pothlađenog austenita

Austenit se mora dovesti u stanje neravnoteže da bi se mogao transformirati u drugu fazu. Kako bi postao nestabilan i težio prijelazu na niskotemperaturne faze, austenit je potrebno hladiti. Na slici 2.8. vidljivo je da austenit postoji na temperaturama A_1 , koji iznosi otprilike 723 °C. To znači da će austenit u čeliku postati nestabilan ohlađivanjem ispod prethodno navedene temperature. Ovisno o brzini hlađenja, austenit će se pothlađivati raznim procesima, raspadajući se na niskotemperaturne faze. Slika 2.8. prikazuje TTT dijagram kontinuiranog ohlađivanja čelika s manje od 0,8 % ugljika, na kojem su nacrtane različite krivulje gašenja čelika.



Slika 2.8. TTT dijagram za različite temperature hlađenja podeutektoidnog čelika [10]

Između bitnih krivulja gašenja, posebno se izdvajaju dvije, gornja i donja kritična brzina gašenja. Gornja kritična brzina gašenja označava krivulju ohlađivanja koja dodiruje "nos" krivulje početka pretvorbe u perlitnu ili bainitnu fazu. To implicira da se gornjom kritičnom brzinom gašenja postiže pretvorba austenita u martenzit, bez prisustva perlita ili bainita u strukturi. U slučaju da se želi izbjeći dobivanje martenzita hlađenjem, ključnu ulogu igra donja kritična brzina gašenja. Donja kritična brzina gašenja označava najveću brzinu hlađenja pri kojoj u strukturi još uvijek nema prisutnog martenzita.

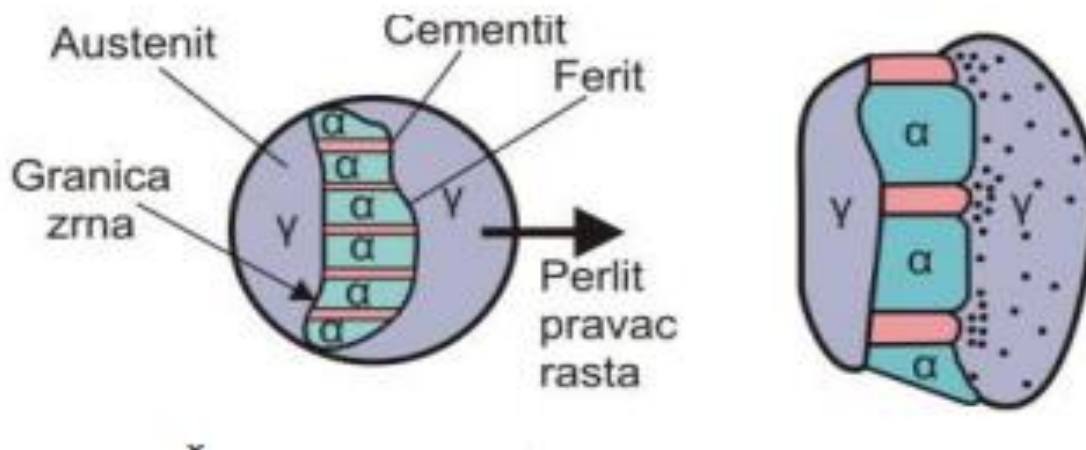
Proces hlađenja može se odvijati na dva načina, kontinuiranim hlađenjem te diskontinuiranim hlađenjem. Kontinuirano hlađenje podrazumijeva postupno ohlađivanje do temperature okoline korištenjem jednog ili više rashladnih medija. Tijekom ovog hlađenja, čelik se prebacuje iz jednog rashladnog sredstva u drugo, neprekidno sve dok temperatura čelika ne postigne ravnotežu s temperaturom rashladnog sredstva.

S druge strane, diskontinuirano hlađenje uključuje ohlađivanje u jednom rashladnom mediju koji je prethodno zagrijan iznad sobne temperature. Čelik se zadržava u tom sredstvu sve dok se pretvorba austenita ne dovrši, bilo potpuno ili djelomično. Konačno hlađenje do sobne temperature često se provodi vrlo sporo kako bi se postigla mehanička ravnoteža, minimizirajući preostala

naprezanja. Ovo konačno hlađenje do temperature okoline obično ne utječe na prethodno formirane faze.

2.5. Transformacija perlita

Perlit je eutektoid sastavljen od kristalnih zrna cemenitita i ferita te se može također definirati kao spoj različitih faza. Austenit koji se ohladi ispod kritične temperature, a ima isti eutektoidni sastav obično formira perlit. Perlitna transformacija odvija se u temperaturnom rasponu od kritične točke A_1 do temperature $550\text{ }^\circ\text{C}$ te ima kristalizirajući karakter koji je iniciran putem difuzijskog mehanizma. Netom prije same transformacije, atomi ugljika bivaju istisnuti iz rešetke γ željeza. Takvi istisnuti atomi ugljika se kombiniraju sa željezom i formiraju Fe_3C -cementit. Formiranje jezgre cementita na početku se izdvajaju duž granica austenitnih zrna i ponašaju se kao centri kristalizacije. Rast jezgre cementita događa se putem difuzije atoma ugljika okolnog austenita. Dijelovi austenitnih zrna koji okružuju lamele cementita transformiraju se u ferit kada postanu dovoljno siromašni ugljikom. Paralelno s formiranjem lamela cementita na takav način stvaraju se i lamele ferita, koji je prikazan na slici 2.9. Ovakav postupak rezultira nastajanjem lamela ferita i cementita unutar austenitnih zrna koji s vremenom rastu po dužini te se nastale lamele bočno pridružuju već stvorenim lamelama. [10]

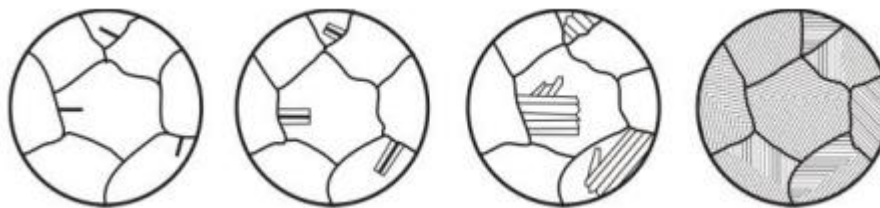


Slika 2.9. Prikaz formiranja perlita iz austenita te pravac difuzije atoma ugljika [10]

Proces rasta klica lamela ferita i cementita nastavlja se sve dok se ne spoje sa susjednim perlitnim zrnima. Takav rast traje do konačne transformacije austenitnih u perlitna zrna.

Na slici 2.10. prikazano je kako se vrši formiranje faza iz perlitnih zrna u austenitna zrna.

Na prvoj slici lijevo prikazano je formiranje kristala cementita na granicama austenitnih zrna, sve ostale slike prikazuju faze rasta lamela ferita i cementita i stvaranje perlitnog zrna.



Slika 2.10. shematski prikaz formiranja faza perlitnih u austenitna zrna [10]

Veličina perlitnih zrna manja je sa smanjenjem veličine zrna pothlađenog austenita i povećanjem stupnja pothlađivanja. Pri nižoj temperaturi austenitne transformacije postiže se fina feritno-cementitna struktura te se stvara manja među laminarna udaljenost, tj. srednja udaljenost između dvije susjedne lamele ferita i cementita kako je prikazano na slici 2.9.

Smanjena žilavost i plastičnost perlita se pospješuje s tanjim lamelama ferita i cementita u strukturi dok tanje lamele ferita i cementita perlitnog zrna povećavaju tvrdoću.

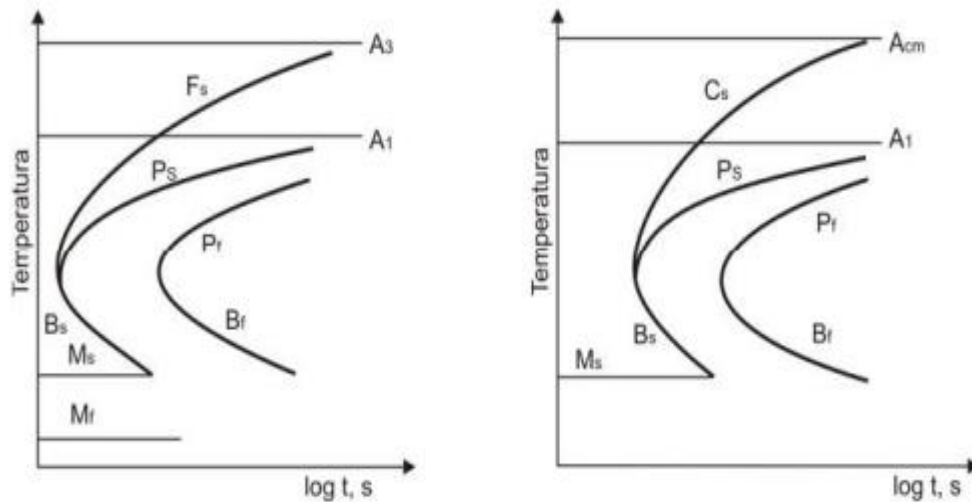
U strukturi čelika eutektoidnog sastava koji imaju otprilike 0,8 % ugljika, mikrostruktura se razlikuje u ovisnosti o gustoći i veličini lamela ferita i cementita. Ovisno o gustoći i veličini mogu se javiti razne mikrostrukture kao što su perlit, sorbit i trustit koji odgovaraju grubom, finom te vrlo finom perlitu (slika 2.11). Takve mikrostrukture se javljaju tijekom razgradnje pothlađenog austenita koji se stvaraju putem difuzijskih mehanizama premještanja atoma ugljika prije same transformacije austenita.



Slika 2.11. mikrostruktura perlita, sorbita te trustita [10]

Izotermna transformacija austenita koji ima manje od 0,8 % ugljika (podeutektoidni čelik) odvija se na sličan način kao i kod čelika s 0,8 % ugljika (eutektoidnog čelika) (slika 2.12). Jedina razlika je što proces počinje izdvajanjem ferita na temperaturi A_3 . Faza je označena dodatnom linijom f_s .

na TTT dijagramu. Pri temperaturi nižoj od A_1 kada se izdvoji određena količina ferita. Austenit se dalje transformira u feritno-cementitnu strukturu. Smanjenjem temperature transformacije ili povećanjem stupnja pothlađivanja količina ferita se smanjuje. Proces izdvajanja ferita završava na „koljenu“ krivulje nakon čega se raspad austenita nastavlja bez izdvajanja ferita.

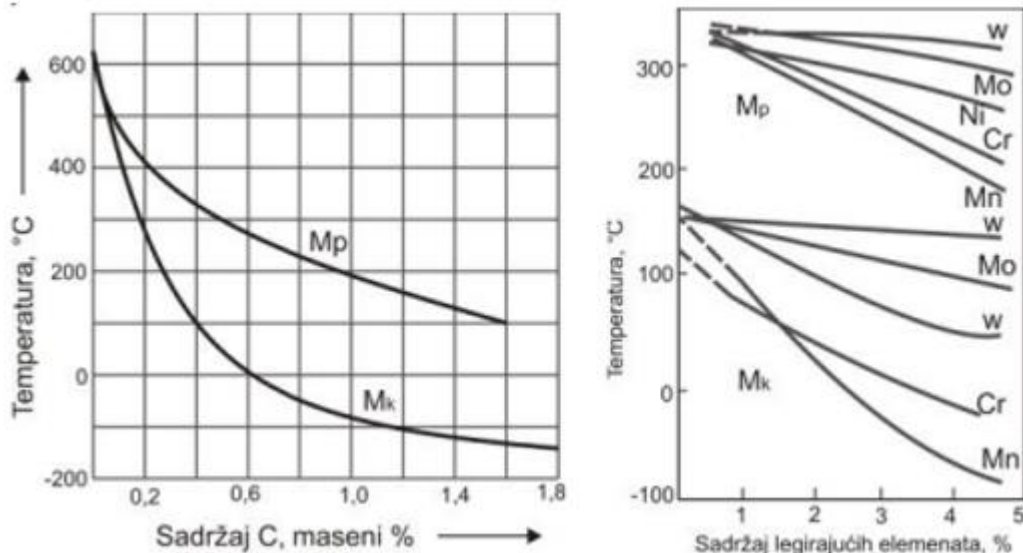


Slika 2.12. Dijagram raspada austenita: a) podeutoktoidni čelik b) nadeutoktoidni čelik [9]

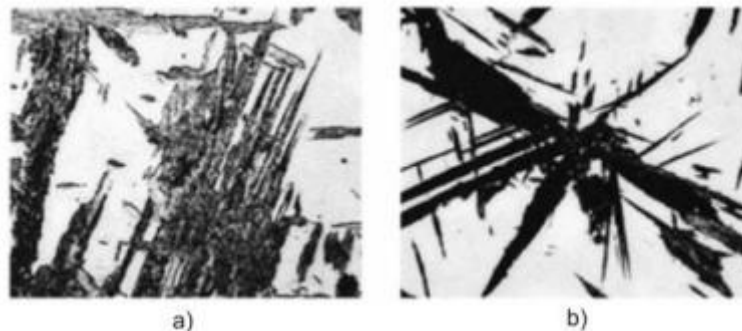
2.6. Transformacija bainita

Bainitna struktura se sastoji od ferita i cementita. Ova pretvorba je specifična zbog bezdifuzijske transformacije martenzita i difuzijske transformacije perlita te se zbog toga naziva međufaznom transformacijom. Transformacija bainita se odvija tijekom hlađenja između donje i gornje kritične brzine hlađenja pri nižim temperaturama, tj. između temperature stvaranja perlita.

Proces bainitne transformacije vrši se u temperaturnom intervalu od „koljena“ TTT krivulje, otprilike na 550 °C do temperature M_p . Kod niske temperature brzina difuzije atoma ugljika je mala te se atomi ne mogu pomicati na veće udaljenosti, sprečavajući formiranje listića cementita. Pošto je temperatura mala te se ne mogu formirati lamele cementita, formiraju se samo lamele ferita na čijim se granicama počinje stvarati cementit u obliku sitnih kuglica.

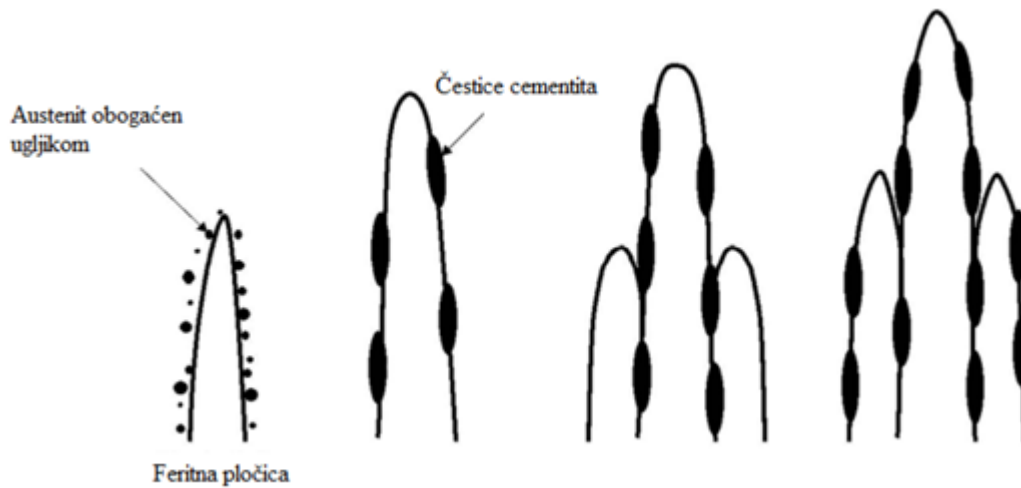


Slika 2.13. Utjecaj sadržaja ugljika: a) na temperature početka i završetka martenzitne transformacije b) na legirajuće elemente [13]



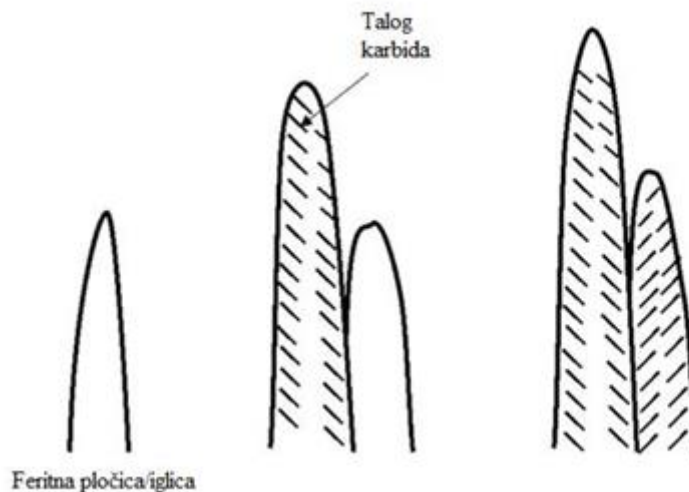
Slika 2.14. Mikrostruktura a) gornjeg bainita b) donji bainit [13]

Kada temperatura transformacije ostane unutar gornjeg raspona bainitne zone (između 550 i 400 °C) stvara se gornji bainit. Gornji bainit ima strukturu u obliku perja te se cementit izdvaja u obliku izoliranih čestica smještenih na feritnim lamelama. U usporedbi s mikrostrukturom koja se dobiva perlitnom pretvorbom, gornji bainit ima smanjenu plastičnost čelika. Čvrstoća i tvrdoća se ne mijenjaju značajno. Gornji bainit ima tendenciju smanjivanja plastičnosti čelika u usporedbi sa strukturama trustita i sorbita. Razlog smanjenju plastičnosti gornjeg bainita je povezana s izdvajanjem jako grubog cementita na granicama feritnih zrna (slika 2.14). Donji bainit za razliku od gornjeg bainita pokazuje izvrsna mehanička svojstva te ima tvrdoću od 550 do 550 HB i veliku čvrstoću uz očuvanje prihvatljive žilavosti i plastičnosti. Ovakvo ponašanje donjeg bainita se objašnjava velikom gustoćom dislokacija u bainitoj α fazi (feritu), također kao i formiranjem disperzivnog cementita lociranog unutar kristalne rešetke α faze. Na slici 2.15. vidi se građa gornjeg bainita. [3], [4]



Slika 2.15. Faze koje su uključene u stvaranje gornjeg bainita [3]

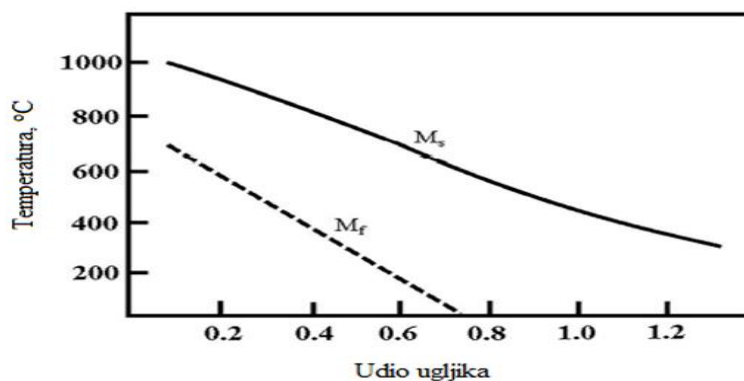
Donji bainit se stvara na temperaturama između 250 i 400 °C u donjoj zoni bainitne pretvorbe. Karbidi koji su karakteristični za donji bainit često se stvaraju pod kutovima od 55 do 60 ° prema glavnoj bainitnoj osi. Zbog stvaranja karbida pod određenim kutovima, donji bainit se još naziva i igličastim bainitom. Donji bainit po mikrostrukтури je sličan martenzitu te se pojavljuje kao pojedinačne iglice s oblikom leće. Struktura karbida u donjem bainitu (slika 2.16) može imati oblik sličan oštricama. [4]



Slika 2.16. Vremenski tijek stvaranja donjeg bainita [3]

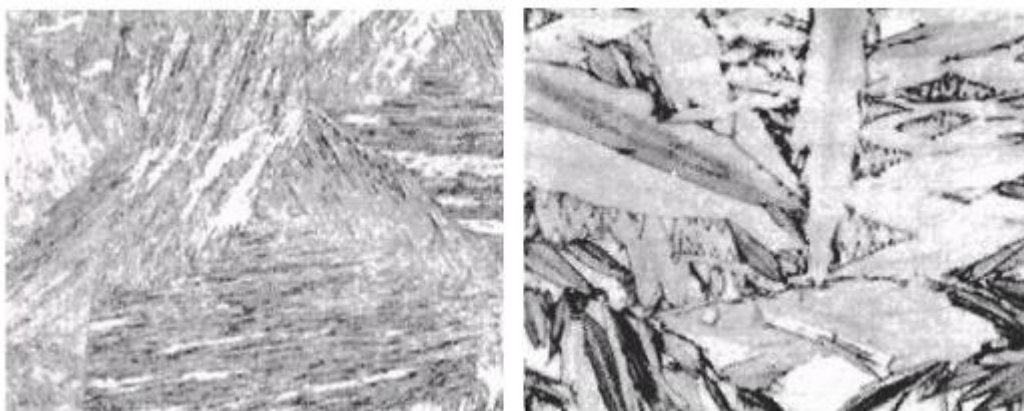
2.7. Martenzitna pretvorba

Martenzitna transformacija nastaje kada brzina hlađenja austenita dolazi do kritične vrijednosti, pri čemu se austenit, bez prethodnog oslobađanja ugljika pretvori u prezasićenu α čvrstu otopinu. Martenzit je prezasićena kruta otopina ugljika u volumenski centriranoj tetragonalnoj kristalnoj rešetci željeza. Martenzit nastaje kada se čelik s austenitnom strukturom ohladi na dovoljno nisku temperaturu. Oznake koje se koriste kod pretvorbe martenzita su M_s i M_f (slika 2.17.) koje redom predstavljaju temperaturu početka stvaranja martenzita te temperaturu završetka stvaranja martenzita. [9], [12]



Slika 2.17. Početak i završetak martenzitne pretvorbe u ovisnosti o udjelu ugljika [13]

U mikrostrukturi kaljenog čelika, martenzit se pojavljuje kao skupina igličastih kristala, koji se sijeku pod određenim kutovima (slika 2.18). Pretvorba martenzita se vrši bez difuzijskog mehanizma, ovisna samo o temperaturi, a ne i o vremenu (atermička reakcija). Nestabilan je, vrlo je tvrd i krhak te odgovoran za veliku tvrdoću čelika ukoliko se vrši postupak kaljenja.



Slika 2.18. Mikrostruktura martenzita [13]

Čelik koji se vrlo brzo hladi, nedostaje vrijeme za dovršetak difuzijskog procesa. Mikrostruktura takvog čelika se bitno razlikuje od one koju pokazuje ravnotežni dijagram stanja. Kod manjih brzina hlađenja koje otprilike iznose 50 °C/s, linije A_{r2} i A_{r1} su vrlo udaljene. Ispod linije A_{r2} formira se čelik sa više od 0,8 % ugljika, a blizu linije A_{r1} zaostali austenit pretvara se u perlit.

Kod većih brzina hlađenja (npr. pri brzini hlađenja od 250 °C/s) dolazi do vrlo brzog transformiranja mikrostruktura. Temperatura stvaranja martenzita ovisi o sastavu legure, postupku kojem je čelik bio podvrgnut prije kaljenja, temperaturi te načinu hlađenja, a ne o brzini hlađenja.

Martenzit je atermička transformacije jer martenzit može nastati pri brzom hlađenju legure ispod određene temperature M_s , dok količina martenzita ovisi o temperaturi zakaljivanja.



Slika 2.19. Kristalna rešetka martenzita [10]

3. ČELICI ZA CEMENTIRANJE

Čelici za cementiranje spadaju u vrstu konstrukcijskih čelika kod kojih nakon postupka strojne obrade, pougljičava se površinski sloj, nakon pougljičavanja provodi se kaljenje kako bi se postigla velika otpornost na trošenje površinskih slojeva te istovremeno i žilavost jezgre, tj. unutrašnjosti strojnog dijela. Čelici za cementiranje sadrže oko 0,1 % do 0,2 % ugljika prije pougljičavanja. U nekim slučajevima, mogu se izabrati čelici koji su nelegirani ili niskolegirani.

Niskougljični čelici s 0,1 % do 0,2 % ugljika često nisu konvencionalno zakaljivi tj. zakaljivi su u smislu povišenja tvrdoće tek čelici sa 0,35 % ugljika te kako bi imali povećanu otpornost na abrazijsko trošenje potrebno je na površinskom sloju povećati sadržaj ugljika uglavnom do oko 0,9 % ugljika. Povišenje sadržaja ugljika na površinskom sloju vrši se postupkom pougljičenja. Postupak povišenja sadržaja ugljika u površinskom sloju vrši se na temperaturama austenizacije te postoje razni načini povišenja sadržaja ugljika (granulat, solna kupka ili plin za pougljičavanje). Kada se pougljiči površinski sloj, takav sloj može biti podvrgnut zakaljivanju (gašenju s izračunate temperature austenizacije te tako postaje sposoban poprimiti strukturu visokougljičnog martenzita otpornog na udarna opterećenja i trošenje). [1], [2]

U praksi, toplinska obrada čelika u kojoj se pougljičava površinski sloj te nakon toga slijedi proces kaljenja naziva se cementiranje.

Nakon procesa cementiranja, jezgra koja se nije pougljičila ostaje feritno-perlitna ako strojni dio nije prokaljen tj. jezgra postaje niskougljična i martenzitna u slučaju postupka prokaljivanja. Karakteristika obje strukture je visok rad loma te rezultat tome je da će i pougljičeni i zakaljivi strojni dio biti otporan na trošenje i žilavost. [2]

Tablica 3.1.(DIN 17210) Podjela čelika na legirane plemenite, nelegirane te kvalitetne čelike [5]

| 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 |

U tablici 3.1. može se vidjeti podjela čelika na tri dijela. Čelici C10 i C15 su kvalitetni, Ck10 i Ck15 su nelegirani plemeniti te svi iza 15Cr3 su legirani, plemeniti čelici.

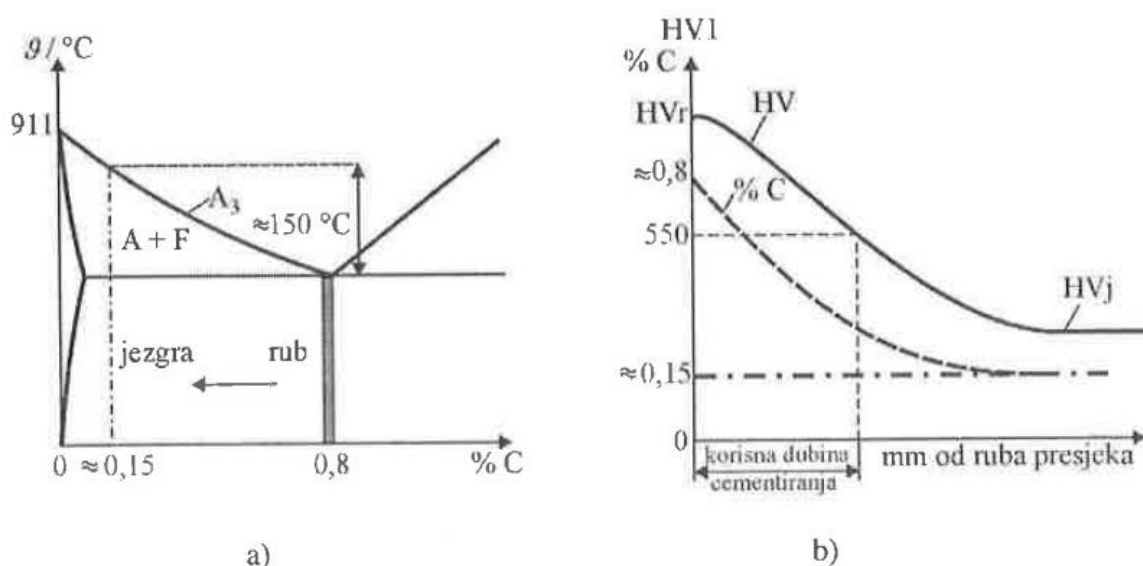
Kvalitetni čelici razlikuju se od plemenitih čelika po sniženom sadržaju fosfora i sumpora. Plemeniti čelici imaju oko 0,035 % sumpora odnosno fosfora dok kvalitetni imaju 0,045 % sumpora odnosno fosfora.

Također se razlikuju i po jednoličnosti svojstava, prvobitno u jezgri strojnog dijela kao posljedica toplinske obrade. Kvalitetnije je obrađena površina kod plemenitih čelika te je i broj nemetalnih uključaka u sastavu plemenitih čelika bitno manja nego kod kvalitetnih čelika. Cilj legirajućih elemenata je utjecaj na što jače prokaljivanje. Povećana prokaljivost postiže se u strojnom dijelu niskougljičnim martenzitom koji osigurava odlična svojstva čvrstoće jezgre te njezinu povišenu dinamičku izdržljivost te žilavost.

Legirajući elementi utječu i na svojstva pougljičenog ruba i to na brzinu procesa pougljičavanja, sadržaj ugljika u površinskoj zoni te dubinu cementiranog sloja.

Nekarbidotvorci tj. silicij, nikal i kobalt ubrzavaju difuznost ugljika u austenitnom području, ali će također smanjivati topljivost ugljika u površinskom sloju. Nekarbidotvorci koji se otapaju u

cementitu su krom, molbiden, vanadij te mangan. Oni snižavaju koeficijent difuzije ugljika u austenitu te na taj način povećavaju udio ugljika u rubnom sloju strojnog elementa, što može rezultirati stvaranjem karbida i površinskih pukotina.



Slika 3.1. Prikaz promjene udjela ugljika od ruba prema jezgri tijekom procesa pougličavanja:
 a) prikaz dijagrama Fe – C
 b) tvrdoća po dubini pougličenog sloja i promjena udjela ugljika [9]

Glavni problem kod postupka pougličavanja i kaljenja je pravilno utvrđivanje temperature gašenja. Na slici 3.1 a) može se primijetiti cjelina kod koje postoji istovremeno mjesta razmjerno visokog udjela ugljika te mjesta niskog sadržaja ugljika. Austenizacija se kod čelika izvodi pri temperaturama većim od temperature A₃ te bi izbor temperature austenizacije prema rubnim slojevima izazvao zakaljivanje tih slojeva, ali bi zakaljivanje i prokaljivanje centra strojnog dijela, tj. jezgre bilo nepotpuno. Razlog tome je da bi se jezgra strojnog dijela ustvari gasila iz strukturnog područja austenita i ferita.

Ukoliko bi se temperatura austenizacije utvrđivala na osnovi udjela ugljika u jezgri tada bi rubni slojevi bili pregrijani. Iz slike 3.1 a) takva temperatura pregrijavanja bi iznosila otprilike 150 °C. U cilju postignuća najboljih svojstava zakaljivanja, potrebno je odabrati temperature austenizacije koja će predstavljati kompromis između idealne temperature za jezgru i one koja je potrebna za postizanje visokog sadržaja ugljika na rubu. Takva temperatura austenizacije je važna zbog toga što je potrebno izbjeći pregrijavanje. Pregrijavanje može utjecati na način da na rubu imamo grublje strukture martenzita koje povećavaju krhkost te rizik od odvajanja od niže ugljične zone. [6]

Kod niskolegiranih čelika najmanje će se javljati problem u tom pogledu kod kojih je dopušteno direktno kaljenje, tj. kaljenje s temperature cementiranja.

Primjera radi, 15Cr3 se može direktno kaliti, a budući da takav čelik nije sklon porastu zrna pri austenizaciji zahvaljujući kromu. Direktno kaljenje se ne smije izvoditi kod pougljičavanja u granulatu već samo kod pougljičavanja u solnoj kupki ili plinu. Ostale legirane čelike je potrebno poslije pougljičavanja prvo sporo ohladiti te opet zagrijati na temperaturu austenizacije te konačno zakaliti. [14]

Ohlađivanje sporim tempom s temperature pougljičavanja pri čemu je strojni dio proveo dugi period vremena utječe na način da usitnjuje zrno koje je vrlo vjerojatno pogrubjelo pri pougljičavanju. Takvo usitnjene zrna pozitivno se reflektira na svojstva pougljičenog ruba koji je na temperaturama austenitizacije bio najviše pregrijan, ali i na jezgru strojnog dijela koja se može pogrubiti zbog dugog boravka na takvoj temperaturi.

Dubinu pougljičavanja najčešće definira inženjer strojnog dijela i to na osnovnoj procjeni najvišeg tlaka kojim će strojni dio biti izložen. U tehničkom smislu, najčešće se dubina regulira trajanjem pougljičavanja. Takav način regulacije dubine pougljičavanja se koristi najčešće kod čelika bez vanadija, molbidena i titana, tj. bez jakih karbidotvoraca.

Na slici 3.1 b) prikazan je isprekidanom linijom tijek udjela ugljika kroz pougljičeni sloj te tijek tvrdoća kaljenja. Iz grafa se može prepoznati zakonitost ovisnosti tvrdoće gašenja o udjelu ugljika u čeliku. Nadalje, iz istog tog grafa se može zaključiti da nije moguće jednoznačno utvrditi dubinu cementiranja niti dubinu pougljičenja. Razlog tome je da se obje krivulje asimptotički približavaju tvrdoći jezgre. Zato se prema DIN standardu (50190) utvrđuje dogovorena korisna dubina cementiranja kao dubina sloja pri kojoj mjerenjem tvrdoće HV1 (Vickersovom metodom) na poprečnom presjeku izmjerena vrijednost od 550 HV1.

Legirajući elementi mogu djelovati posredno na ostvarenu dubinu pougljičavanja preko njegovog utjecaja na difuzijski koeficijent tj. na udio ugljika u krajnjem vanjskom rubu. Zaključno, nekarbidotvorci omogućuju veće dubine pougljičavanja nego karbidotvorci. [14]

Nakon kaljenja, na pougljičenom rubu strojnog dijela mogu se naći razne mikrostrukture kao zaostali martenzit, karbidi i martenzit. U slučaju kada imamo veliki udio karbida potrebno je primijeniti blaže sredstvo za pougljičavanje ili izabrati čelik koji ima manje karbidotvoraca. U slučajevima kada ima znatan udio zaostalog austenita, koji je općenito iznad 5 %, kaljeni strojni dio treba što prije nakon kaljenja duboko hladiti kako bi dostignućem temperature M_f bio prisiljen austenit pretvoriti u martenzit. Nakon kaljenja, kao i uvijek, potrebno je napraviti toplinsku obradu niskotemperaturnog popuštanja na određenoj temperaturi i vremenu. Kod cementiranja se najčešće strojni dijelovi popuštaju u prvom stadiju popuštanja na temperaturama od 155 do 210 °C.

Svojstva jezgre poput dinamičke izdržljivosti i žilavosti te granice razvlačenja su ključna za strojne dijelove koji su prošli proces toplinske obrade cementiranja s razmjerno velikom tvrdoćom i otpornošću na trošenje. Ipak, ta svojstva, uvelike ovise o prokaljivosti materijala. Prilikom odabira čelika za cementiranje za određenu svrhu, vrlo je bitna i dimenzija strojnog dijela. Dimenzije strojnog dijela će diktirati svojstva jezgre. Iako to nije apsolutno pravilo, može se reći da će za strojne dijelove do približno Φ 10 mm biti prikladniji nelegirani čelici, a za one do Φ 8 mm biti će prikladni Mangan-krom čelici dok za strojne dijelove većih dimenzija biti preporučljivi visoko prokaljivi Krom-molibden ili Krom-nikal čelici.

Glavne osobine pojedinih čelika za toplinsku obradu cementiranja su sljedeće:

- Kvalitetni ili plemeniti nelegirani čelici koji su kaljivi samo u vodi te su prokaljivi do Φ 10 mm, svojstva jezgre su vrlo slaba te se primjenjuju za strojne dijelove malih udarnih opterećenja i malih dimenzija, ali s naglaskom na neopterećene udarnim opterećenjem.
- Cr-čelici koji su skloni nastanku karbida u pougljičenom sloju te ih je potrebno pougljičavati u blagim sredstvima. Ako zrno u rubu nije pogrubjelo, onda su otporni na trošenje, ali su skloni stvaranju karbida.
- Mangan-krom čelici nisu podložni odvajanju karbida u rubu, iako to upućuje na visok sadržaj kroma u materijalu, ali prisutnost mangana će tu težnju ublažiti i tako djelovati povoljnije. Primjenom mangana povećava se prokaljivost u takvim čelicima i oni postaju prikladni za izradu strojnih dijelova srednjih dimenzija. Mangan-krom čelici su uobičajeno osjetljivi na pregrijavanje pa se zato nakon postupka pougljičavanja trebaju hladiti te nakon toga ponovno dovesti u stanje austenitizacije i kaliti te nakon toga niskotemperaturno popustiti.
- Krom-nikal čelici za cementiranje imaju najbolju ravnotežu u smislu djelovanja separacije karbida i suprotno. Takvi čelici su prikladni za izradu strojnih dijelova velikih dimenzija pa čak i za strojne dijelove koji su izloženi niskim temperaturama. Negativna strana Krom-nikal čelika je sklonost pojavljivanju zaostalog austenita u rubnim dijelovima te ih je potrebno kaliti na nižim temperaturama koje su od 780 °C do 800 °C ili hladiti odmah pri završetku kaljenja. [14]
- Molibden-krom čelici nemaju posebnu namjenu već služe za zamjenu Nikal-krom čelika koji su u pravilu skuplji od ostalih. Nikal je takozvani deficitarni element te se uglavnom pokušava nadomjestiti manganom ili molibdenom koji povišenjem prokaljivosti omogućuje vrlo slična svojstva kao nikal. Glavna prednost Molibden-nikal čelika je prikladnost direktnim gašenjem. Molibden je vrlo jak karbidotvorac te stvara posebne

karbide koji su izuzetno otporni na habanje, ali čini čelik osjetljivim na razdvajanje karbida pa ga je potrebno pougljičavati u blagom sredstvu i ne predugo.

3.1. Postupak cementiranja

Postupak toplinske obrade čelika koji je poznat kao cementiranje čelika obuhvaća pougljičavanje površinskog sloja čelika s naknadnim kaljenjem te niskotemperaturnim popuštanjem. Ovaj postupak se primjenjuje na čelike s 0,25 % ugljika. Glavni i osnovni cilj cementiranja je povećanje sadržaja ugljika u površinskom sloju. Nakon gašenja postiže se visoka tvrdoća površinskog sloja, dok jezgra strojnog dijela ostaje nepougljičena i tvrdoća je značajno niža.

Parametri pougljičavanja određuju dubinu pougljičavanja, pri čemu se sadržaj ugljika na površini kreće između 0,8 % do 1 %, a prema jezgri ravnomjerno pada, takav pad je opisan u sljedećem potpoglavlju. Visoka tvrdoća površinskog sloja uvjetuje austenitno-martenzitna transformacija koja se postiže gašenjem. Martenzit karakterizira velika tvrdoća i otpornost na trošenje i udarnim opterećenjima što je posebice važno kod visokih napreznja. Nepougljičena jezgra zadržava visoku žilavost, pružajući visoku otpornost prema visokim napreznjima. [1]

Zbog kombinacije visoke površinske tvrdoće i žilavosti jezgre, postupak toplinske obrade cementiranjem primjenjuje se na strojne dijelove izložene površinskom trošenju i visokim dinamičkim napreznjima.

Postupci cementiranja čelika su vrlo dugo korišteni u industriji, što danas rezultira raznolikim postupcima.

Cementiranje, tj. dio postupka cementiranja, pougljičavanje mogu se podijeliti na sredstva pougljičavanja:

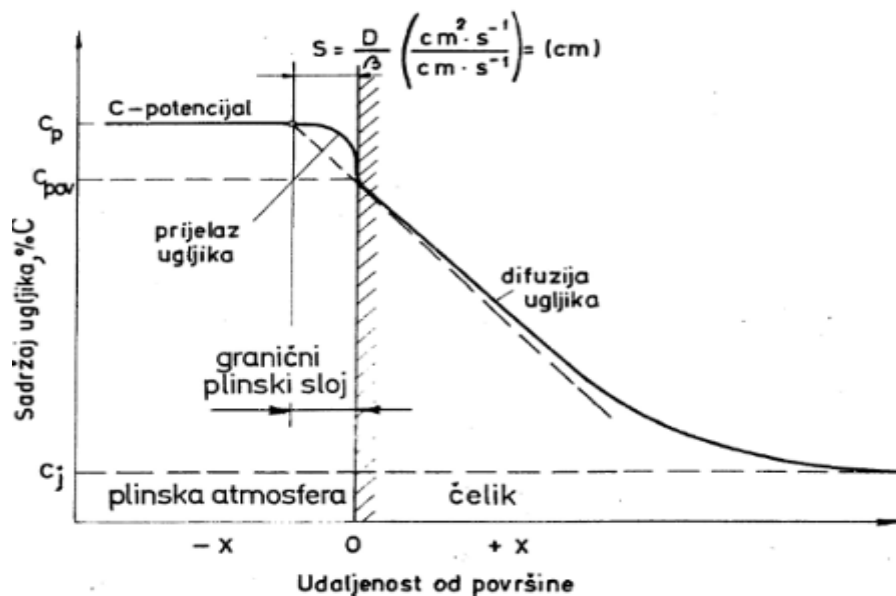
- pougljičavanje u krutom sredstvu
- pougljičavanje u tekućem sredstvu
- pougljičavanje u plinovitim sredstvima
- vakuumsko pougljičavanje
- plazma pougljičavanje

Unutar svake od navedenih grupa postoje različiti postupci koji se razlikuju po sastavu i svojstvima sredstva za pougljičavanje.

3.2. Pougličavanje

Važan proces toplinske obrade koji ima za cilj poboljšati otpornost na trošenje i tvrdoću površinskog sloja je pougličavanje čelika prilikom cementiranja. Postupak je primjenjiv kada se želi postići velika tvrdoća na površini strojnog dijela čime se poboljšavaju mehanička svojstva s naglaskom na područja rada gdje se od strojnog dijela očekuje izloženost trenju i habanju. Dodavanjem ugljika na površinski sloj čelika postiže se specifična mikrostruktura koja poboljšava otpornost materijala na habanje što ga čini vrlo korisnim u proizvodnji dijelova podložnim visokim dinamičkim opterećenjima.

Unatoč raznolikosti agregatnih stanja, proces toplinske obrade cementiranja čelika dijeli određena zajednička svojstva. Najbitniji parametar cementiranja je temperatura pougličavanja koja je vrlo visoka i kreće se u intervalu između 880 i 950 °C tj. na temperaturama austenizacije. Važno je napomenuti da se proces pougličavanja može vršiti i na temperaturama do 1095 °C. Visoka temperatura je bitna zbog toga što se na tim temperaturama odvijaju nužne reakcije kako bi se postigao visok sadržaj ugljika na površini i željena dubina pougličavanja. Proces se sastoji od par faza kako je prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2. Dijagram procesa pougličavanja sa stijenkom strojnog dijela [11]

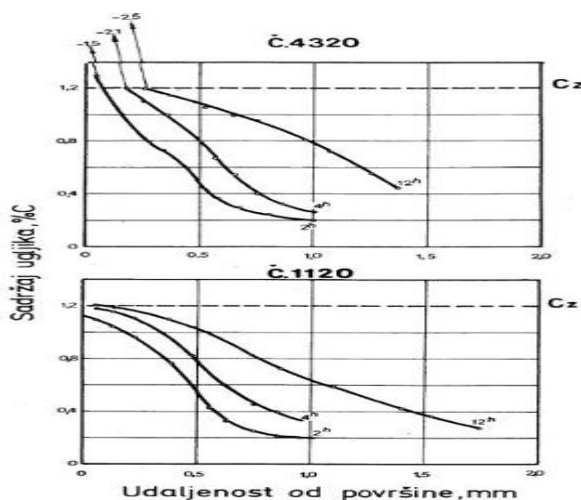
Dijagram procesa pougličavanja prikazuje faze u procesu. C-potencijal predstavlja ravnotežni sadržaj ugljika u sredstvu za pougličavanje. Zagrijavanjem na temperature austenizacije i

zadržavanje, neko vrijeme na toj istoj temperaturi dolazi do difuzijske reakcije u graničnom sloju. Takva reakcija smanjuje C-potencijal u širini „S“ po formuli:

$$S = \frac{D}{\beta} \text{ [cm]}$$

Sadržaj ugljika na površini strojnog dijela se povećava (C_{pov}), a takvu fazu zovemo prijelaz ugljika. Difuzijska reakcija se odvija od površine prema jezgri gdje je sadržaj ugljika C_j te on ostaje nepromijenjen. Budući da na površini materijala prevladava austenitna struktura, ugljični atom zauzimaju intersticijski položaj.

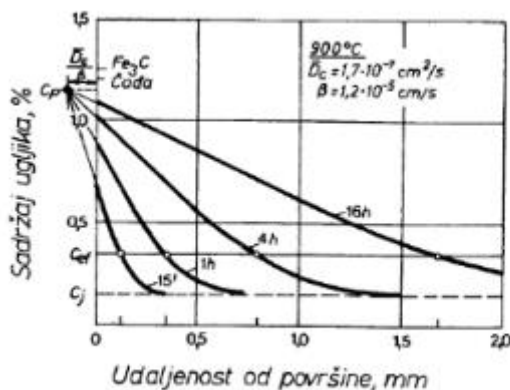
Koeficijent prijelaza ugljika ovisi o sredstvu i vrsti sredstva za pougljičavanje, potencijalu ugljika, temperaturi procesa difuzije te vrsti čelika, tj. utjecaju legirajućih elemenata. Cijeli proces je podložan zakonima kinetike i termodinamike, a najvažnije varijable su trajanje i temperatura pougljičavanja. Pougljičavanje se temelji na difuziji ugljika u austenitnoj fazi, gdje stvaraju krutu otopinu te se odvija termodinamička aktivnost ovisna o temperaturi i udjelu ugljika. U normalnim uvjetima, grafit predstavlja referentno stanje. Povećanjem temperature povećava se rastopljivost ugljika u austenitnoj fazi pri čemu doseže vrijednosti oko 1,2 % ugljika pri temperaturama od 900 °C i 1,35 % ugljika pri 950 °C. ovakve vrijednosti vrijede samo za nelegirane čelike jer kod legiranih čelika svaki element u čeliku ima razne utjecaje na termodinamiku i rastopljivost ugljika. Na slici 3.3. je prikazan primjer pougljičavanja legiranog čelika te nelegiranog čelika. [11]



Slika 3.3. a) 1120 nelegirani čelik b) 4320 legirani čelik [11]

Na slici 3.3. isti su uvjeti pougljičavanja s velikim potencijalom ugljika u sredstvu za 4320 uz visok sadržaj ugljika (1,5;2,1;2,5 % ugljika) i 1120 pokazuju različite dubine i koncentracije

ugljika. U čelicima koji su legirani nastaju karbidi (karbidotvorci) koji negativno utječu na dubinu pougljičavanja i koncentraciju ugljika. Izbjegavanje ovog utjecaja, koriste se manje aktivna sredstva s manjim potencijalom ugljika. Rizik stvaranja karbida povećava se duljim vremenom pougljičavanja. S obzirom na veliki broj faktora kod legiranih čelika, često se ne mogu točno odrediti koeficijenti difuzije ugljika pougljičavanja. Međutim, za nelegirane čelike dostupni su pouzdani podaci koji omogućuju proračun difuzije ugljika i utvrđivanjem odnosa dubine pougljičavanja i vremena pougljičavanja, kako prikazuje slika 3.4.



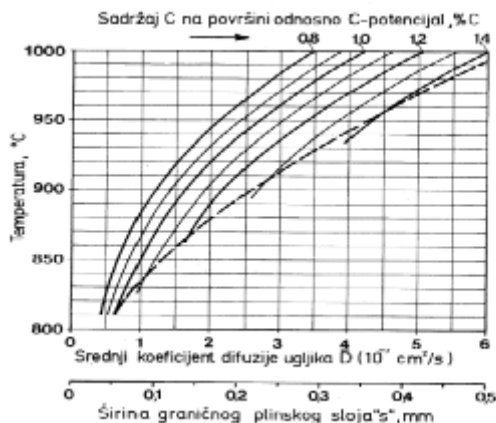
Slika 3.4. Krivulja pougljičavanja za različita vremena pougljičavanja [7], [11]

Na slici se vidi pougljičavanja nelegiranog čelika s visokim C-potencijalom, uočava se pojava čađe. Što označava granicu u ovom slučaju. Kratko vrijeme procesa pougljičavanja rezultira niskim udjelom ugljika na površini, ali s povećanjem vremena pougljičavanja, sadržaj ugljika raste te se približava vrijednosti C-potencijala. Time se također povećava dubina pougljičavanja. Brzina pougljičavanja je najveća na početku, a ravnomjerno opada kako proces traje. Krivulje na dijagramu daju informacije o ukupnoj dubini pougljičavanja, određenoj kao dubina gdje se izjednačava sadržaj ugljika sa sadržajem ugljika jezgre koji je označen s oznakom C_j . U realnim uvjetima, efektivna dubina pougljičavanja (C_{ef}) uobičajeno 0,35 % do 0,40 % ugljika često se koristi kao relevantna vrijednost. Ta vrijednost može se izračunati prema formuli:

$$d_{ef} = \frac{0,79 \cdot \sqrt{D_c \cdot \tau}}{0,24 + (C_{ef} - C_j) \cdot (C_p - C_j)} - 0,7 \cdot (D_c \cdot \beta) \text{ [cm]}$$

- D_c – srednji koeficijent difuzije ugljika
- C_p – potencijal ugljika
- C_j -sadržaj ugljika u jezgri
- τ – vrijeme pougljičavanja u satima

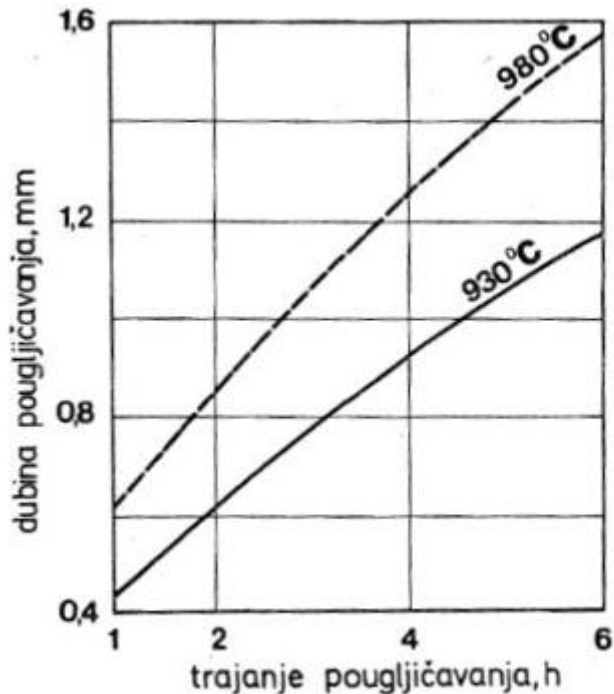
U praksi se vrlo često upotrebljava dijagram za utvrđivanje trajanja procesa pougljičavanja nelegiranih čelika.



Slika 3.5. Ovisnost srednjeg koeficijenta difuzije ugljika i C-potencijala [7]

Za prethodni dijagram mora se odrediti srednji koeficijent difuzije ugljika \bar{D}_c za određen sadržaj ugljika i temperaturu na površini, a zatim i širina graničnog plinskog sloja s . [7]

Osim prethodnih parametara, veliki utjecaj ima temperatura na brzinu pougljičavanja, što se može vidjeti na slici 3.6.

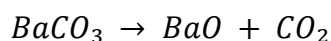


Slika 3.6. Utjecaj temperature na dubinu pougljičavanja

Primjera radi, povećanje temperature za samo 50 °C ima za posljedicu veliko povećanje dubine pougljičavanja i to sa 1,08 mm na 1,53 mm. Kada se zahtjeva duboko pougljičavanje primjenjuje se cementiranje na visokoj temperaturi te se provodi u svrhu skraćivanja vremena pougljičavanja. Negativna strana ovakve toplinske obrade je veća potrošnja topline. Važnost cementiranja na visokoj temperaturi je porast austenitnog zrna i većinom se koriste sitnozrnati čelici za cementiranje ili se provodi postupak usitnjena zrna prije gašenja za obične čelike.

3.2.1 Pougljičavanje u krutom sredstvu

Pougljičavanje u krutom sredstvu predstavlja jedan od najstarijih postupaka toplinske obrade cementiranja čelika koji se i danas često primjenjuju, s obzirom na kontinuirano usavršavanje procesa. Smjesa koja se koristi za pougljičavanje sastoji se od mješavine drvenog ugljena, aktivatora i veziva u obliku zrnatog granulata veličina reda 3 do 5 mm, takvi granulati se mogu usporediti s peletima za grijanje. Česti aktivator je barijev karbonat koji reakcijom s visokom temperaturom se kemijskim postupkom rastvara na ugljični dioksid i barijem oksid prema reakciji:



Tijekom procesa toplinske obrade, ugljični dioksid reagira s ugljenom iz granulata stvarajući ugljični monoksid, što stvara plinsku atmosferu ugljičnog monoksida i ugljičnog dioksida koja je optimalna za reakciju pougljičavanja:



Cijeli proces odvija se u plinskoj fazi, iako je sredstvo za pougljičavanje prvobitno bilo u krutom stanju. Važno je istaknuti cirkulaciju plinova koja je omogućena pomoću granulata tijekom procesa što isključuje upotrebu drugih oblika sredstava. Aktivatori se klasificiraju prema sadržaju i vrsti, a prema svojem djelovanju dijele se na jače i slabije. Aktivatori utječu na postizanje sadržaja ugljika i opasnost od karbida u površinskom sloju. Odabir aktivatora se mora prilagoditi vrsti čelika i specifičnim zahtjevima pougljičavanja. [5], [7]

Cijeli postupak provodi se tako da se strojni dijelovi postave u posudu s granulatom, zatvore i zagriju na određenoj temperaturi, obično u pećima s termalnom izolacijom. Proizvođač granulata određuje vrijeme potrebno za postizanje željene dubine pougljičavanja i vrstu granulata. Radi optimizacije i uštede, iskorišteni granulati se ne baca nego se nadopunjuje novim granulatom u određenom postotku.

Nedostatak pougljičavanja u krutom sredstvu uključuje nemogućnost kontinuirane kontrole i regulacije C-potencijala, opasnost od nastanka karbida te rizik od lokalnog razugljičavanja tijekom

procesa hlađenja. Prednosti pougljičavanja u krutom sredstvu uključuje jednostavnost provedbe, male investicije u usporedbi s drugim postupcima pougljičavanja.

3.2.2 Pougljičavanje u solnoj kupki

Pougljičavanje u solnoj kupki izvodi se otapanjem odgovarajućih soli u posudama. Takve soli se zagrijavaju na odgovarajuću temperaturu te takve soli često sadrže cijanide, najčešće natrijev cijanid (NaCN) ili kalijev cijanid (KCN), a zanimljivo je da se takve soli mogu koristiti i za nitriranje i karbonitriranje. Cijanidi obogaćuju površinu dušikom i ugljikom, pri čemu se vrši kontrola da pri povišenim temperaturama prevladava pougljičavanje, a ne nitrirajuće djelovanje koje se javlja pri nižim temperaturama.

Sve solne kupke mogu se podijeliti na dvije osnovne skupine ovisno o vrsti proizvođača soli:

1. Neaktivirane solne kupke:

- primjenjuju se za toplinsku obradu karbonitriranje pri temperaturama do 850 °C i dubinama karbonitiranja od 0,5 mm čime se postiže 0,4 % do 0,6 % ugljika na površinskom sloju.
- proces je otvoren i u doticaju s okolinom, tj. zrakom. Kisik iz zraka potpomaže kemijskoj reakciji.
- kemijska reakcija neaktivirane solne kupke:



- potrebna je kontrola samo sadržaja cijanida (CN).

2. Aktivirane solne kupke:

- osim cijanida, aktivirane solne kupke sadrže i aktivatore poput barijevog klorida (BaCl₂) ili stroncijevog klorida (SrCl₂) koji potiču kemijsku reakciju.
- primjenjuje se na temperaturama nešto većim od pougljičavanja u krutom sredstvu, tj. na temperaturama od 900 do 1000 °C te se time postiže udjel ugljika od 0,5 % do 1,2 % ugljika.
- razlikuju se „slabo“ i „jako“ aktivirane solne kupke.
- kemijska reakcija se može opisati na sljedeći način:



- proces se nadopunjava cijanidnom solju te solju za aktivaciju kako bi se održao C-potencijal.

Istraživanjem i usavršavanjem procesa razvijen je sustav nadopunjavanja samo jednom smjesom (sol i aktivator).

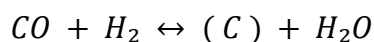
Kao i inače, dubina pougljičavanja ovisi o C-potencijalu, vremenu i temperaturi procesa uz izračun za određeni čelik. Prednost solnih kupki uključuju brzo zagrijavanje čelika, jednostavnost rada i relativno niske investicije. Međutim, nedostaci uključuju opasnost od otrovnosti i skladištenje, visoki troškovi te regulacija sastava kupke. Nakon procesa pougljičavanja, potrebna je neutralizacija otpadnih soli i vode.

3.2.3 Pougljičavanje u plinskim atmosferama

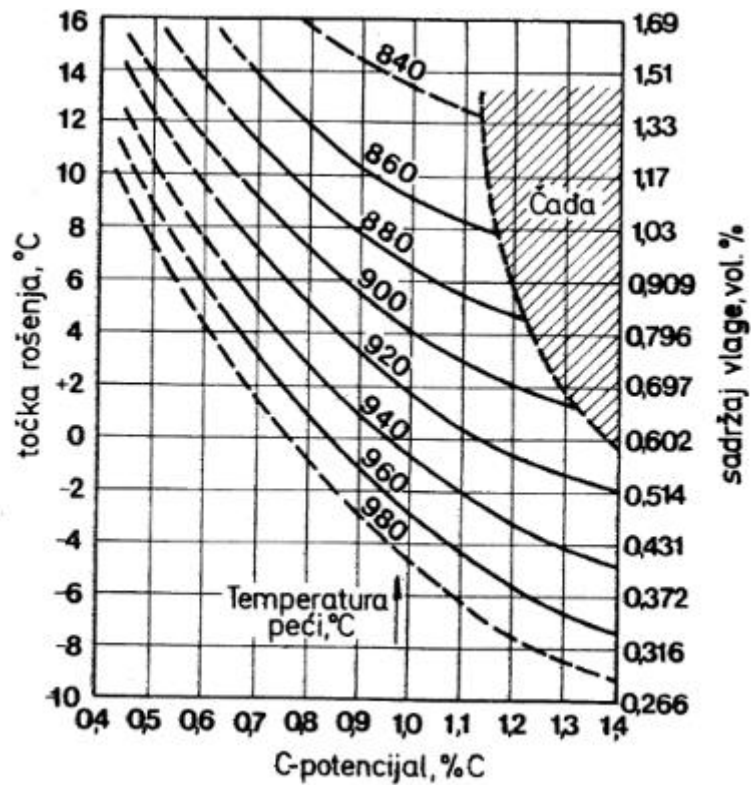
Proces pougljičavanja u plinskim atmosferama često se primjenjuje u skladu s razvojem automatski regulirane kontrole procesa te regulacije sastava plinske atmosfere te je danas najznačajniji tehnološki postupak. Termalni proces obrade ovim postupkom provodi se u pećima koristeći smjesu pročišćenih plinova, a peći u kojima se obavlja proces mogu biti jamaste, prolazne i specijalne komore. Sastav smjese plinova može uključivati ugljični monoksid, ugljični dioksid, vodenu paru, vodik i metan u tragovima. Sadržaj slobodnog uljika regulira se prema apsorpcijskoj moći površine čelike na kojoj se odvija reakcija:



U atmosferama koje zadrže vodik ili ugljični monoksid, kemijska reakcija koja nastaje je:

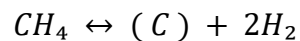


Produkt reakcije je vodena para, a ona nastaje kao produkt izgaranja vodika, a kontrola koncentracije u plinskoj atmosferi određuje C-potencijal. Kontrola vodene pare vrši se mjerenjem temperature kondenzacije, na temelju koje se određuje koncentracija vodene pare u smjesi (slika 3.7.)



Slika 3.7. Odnos C potencijala i temperature kondenzacije [9]

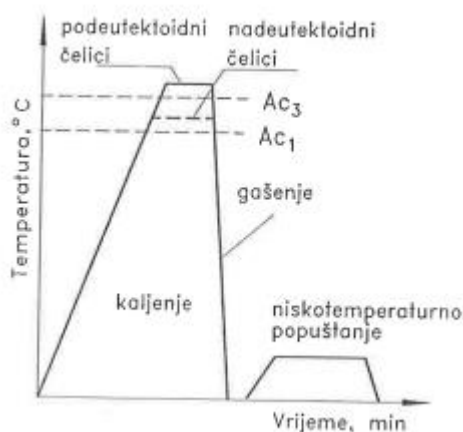
Plinska atmosfera u kojima je prisutan metan, vrši se reakcija:



Iz reakcija koje su navedene, vidljivo je da C-potencijal ovisi o parcijalnim tlakovima i temperaturi plinskih komponenti. Plinske atmosfere koje se učestalo primjenjuju dijele se prema načinu formiranja. Prema načinu formiranja, plinske atmosfere se dijele na atmosfere na osnovi plina nosača, atmosfere koje se dobivaju ukapljivanjem ugljikovodika te pougljičavanja pod pritiskom plinske atmosfere.

3.3. Kaljenje

Kaljenje je dio toplinske obrade kojim se nastoji postići pretežito martenzitna struktura. Proces kaljenja se sastoji od par faza, a to su grijanje strojnog dijela do temperature koja odgovara austenizaciji, progrijavanja te držanja na maksimalnoj temperaturi i gašenja brzinom kojim se postiže poželjna tvrdoća. Na slici 3.8. je prikazan dijagram postupka kaljenja i gašenja te niskotemperaturnim popuštanjem.

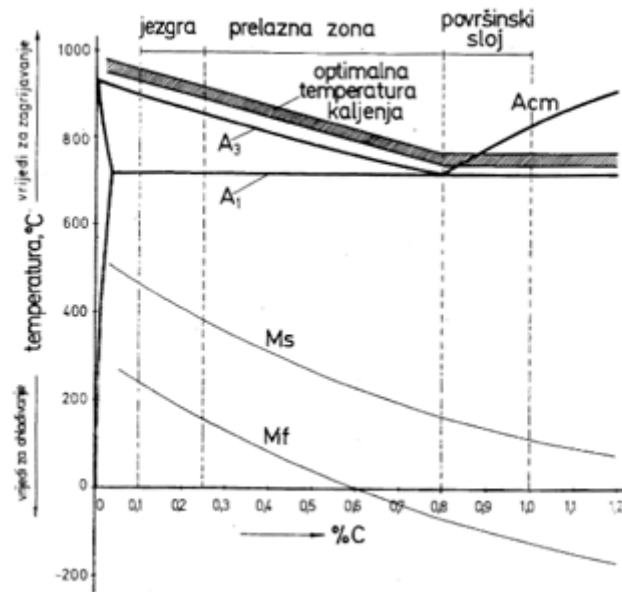


Slika 3.8. Dijagram procesa kaljenja i niskotemperaturnim popuštanjem [1]

Kod čelika s manje od 0,8 % ugljika (podeutektoidnog čelika), temperatura austenizacije treba biti 30 do 70 °C viša od temperature AC₃. Budući da cementit posjeduje tvrdoću koja je otprilike 850 HV, za čelike s udjelom ugljika većim od 0,8 % (nadeutektoidnim) područjem austenizacije trebala bi biti veća za otprilike 30 do 70 °C od temperature AC₁. Povećanjem temperature austenizacije raste i količina zaostalog austenita. Tijekom provedenog vremena na maksimalnoj temperaturi izjednačavaju se temperature u površini i jezgri strojnog dijela, provodi se proces progrijavanja te se otapaju neotopljeni karbidi, a istovremeno se odvija proces homogenizacije austenita. Vrijeme držanja na temperaturi austenizacije mora biti dovoljno za progrijavanje strojnog dijela i otapanje karbida. Dozvoljena brzina zagrijavanja ovisi o stanju čelika pri kaljenju, geometriji i dimenzijama strojnog dijela te kemijskom sastavu čelika. Potrebno je vrlo pažljivo odabrati brzinu zagrijavanja kako ne bi došlo do prebrzog zagrijavanja, što može uzrokovati pukotine, prevelike deformacije i naprezanja.

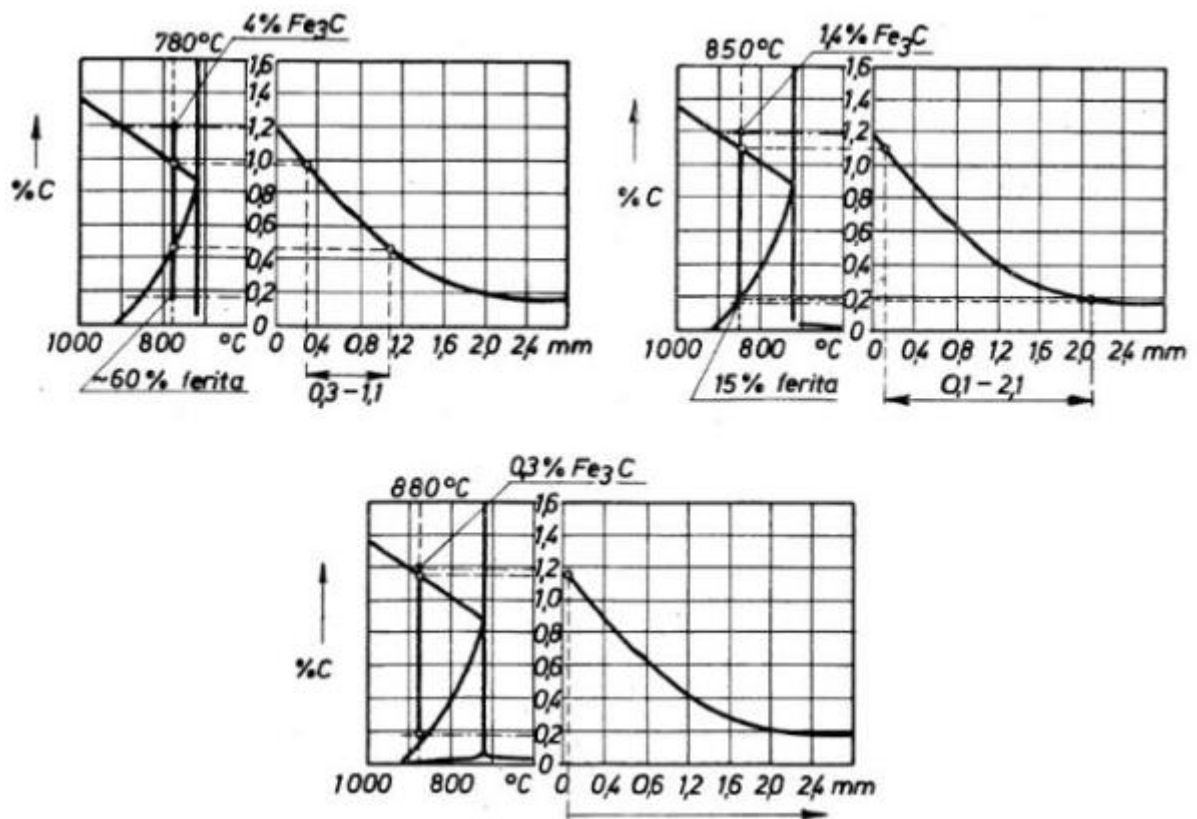
Sredstvo za gašenje i brzina gašenja određuju se analizom prokaljivosti čelika i dimenzijama strojnog dijela. Nakon kaljenja u čeliku se javljaju često zaostala vlastita naprezanja te zbog toga strojne dijelove nakon kaljenja je potrebno niskotemperaturno popuštat. U vezi sa dinamikom popuštanja i relaksacijom vlastitih naprezanja u procesu popuštanja, vrijeme držanja na maksimalnoj temperaturi popuštanja ovisi o temperaturi popuštanja. Na temperaturi od 180 do 220

°C, strojne dijelove je potrebno držati obično oko 1,5 do 2 sata, dok na temperaturi od 100 do 120 °C potrebno je držati otprilike 10 do 15 sati.



Slika 3.9. Stanje nakon pougljičavanja u FeC dijagramu [7]

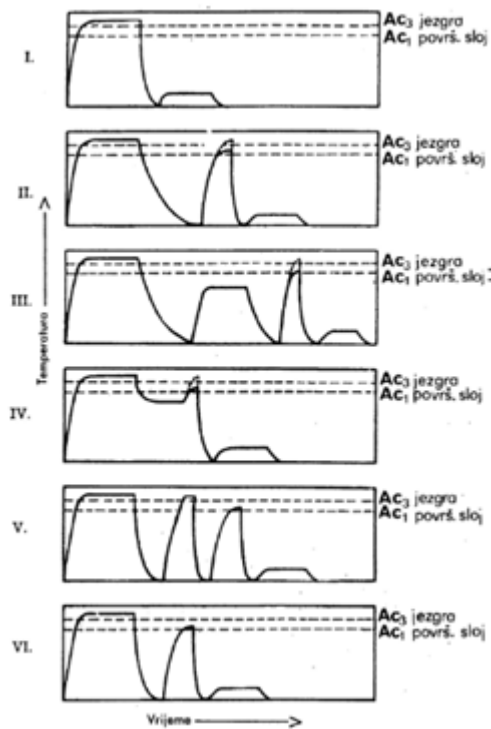
Iz dijagrama se vidi kako je jezgra smještena u području s vrlo malo ugljika (podeutektoidni čelik), dok je površinski sloj u području s dosta ugljika (nadeutektoidno područje). Prijelazna zona pokazuje stupnjeviti pad sadržaja ugljika prema vrijednostima sadržaja u jezgri, što u stvari predstavlja početni sadržaj ugljika u čeliku. Na dijagramu postoji linija koja je optimalna temperatura kaljenja. Te temperature su objašnjene prethodno. Važno je napomenuti da se pri odabiru temperature kaljenja moraju postaviti prioriteta ili za jezgru ili za površinski sloj. Ako se izabere temperatura za jezgru tada površinski sloj postaje pregrijan dok odabir temperature za površinski sloj za rezultat daje nedostatnu temperaturu za potpunu austenizaciju jezgre. Ovaj problem najbolje se ilustrira kada postignemo previsok sadržaj ugljika na površini tijekom pougljičavanja koji se može vidjeti na slici 3.10.



Slika 3.10. Kaljenje za tri različite temperature [7]

Na temperaturi od 780 °C, površinski sloj se sastoji od Fe₃C faze tj. austenita i cementita, dok je jezgra i prijelazna zona sastavljena od austenita i ferita. Pri temperaturi kaljenja od otprilike 850 °C, često se bilježi smanjenje udjela cementita, često do vrijednosti od 0,3 % dok područje jezgre sadrži oko 15 % ferita pri temperaturi austenizacije. 880 °C smatra se optimalnom za učinkovito eliminiranje cementita u površinskom sloju. Međutim, ukoliko površinski sloj sadrži oko 0,8 % ugljika tada ova temperatura postaje previsoka za kaljenje jer značajno prelazi temperaturu A₁. [5]

Početak i kraj transformacije martenzita koji su označeni na slici s M_s i M_f (slika 2.17.) ovise o sadržaju ugljika. Prilikom gašenja (kaljenja) transformacija se prvo javlja iz austenita u području jezgre dok se kod nižih temperatura pojavljuje u površinskom sloju. Ova transformacija neće biti potpuna te će u strukturi materijala na sobnoj temperaturi ostati prisutan zaostali austenit. Potpuna transformacija se postiže dubokim ohlađivanjem na temperature ispod M_f. Za legirane čelike, temperatura i položaji linija M_s i M_f su još niži. Nakon procesa pougljičavanja, otvara se mogućnost za primjenu raznolikih toplinskih obrada koji su prikazani na slici 3.11.



Slika 3.11. Postupci kaljenja poslije pougljičavanja

Pod rednim brojem I opisan je postupak direktnog kaljenja s temperature pougljičavanja. To je vrlo jednostavan i najviše ekonomski isplativ postupak kaljenja. Međutim, ovaj postupak nema veliku preciznost te može uzrokovati pogrubljivanje austenitnog zrna koja za rezultat ima smanjenje žilavosti strojnog dijela. Pougljičavanje čelika s višim C-potencijalom rezultira većim udjelom zaostalog austenita. Ovaj postupak često se primjenjuje kod standardnih čelika kada nisu postavljeni vrlo precizni ili zahtjevni uvjeti. U situacijama gdje je potrebna poboljšana mehanička i strukturna svojstva, koriste se sitnozrnati čelici kako bi se izbjeglo bitno pogrubljenje zrna, a istodobno se smanjuje sklonost zaostalom austenitu. Praktično iskustvo često preporučuje direktno kaljenje s niže temperature, koja je temperatura kaljenja jezgre, kako bi se postigla povoljnija svojstva.

Pod rednim broj II nalazi se postupak jednostrukog kaljenja nakon ohlađivanja poslije pougljičavanja. Ovakav postupak može se provesti s temperaturom kaljenja površinskog sloja ili jezgre. Postoje različite varijante jednostrukog kaljenja, a zajednička točka im je provođenje postupka pretvorbe austenita između kaljenja i pougljičavanja, što dovodi do djelomične prekrystalizacije. Takav postupak rezultira usitnjivanjem zrna i treba paziti na rastvaranje karbida stvorenih na granicama zrna.

Pod rednim brojem III označen je postupak kaljenja nakon međužarenja čiji je prvobitan cilj smanjenje deformacija. Ovakav postupak kaljenja ne rezultira previše vidljivim poboljšanjem

svojstava jer naknadno kaljenje može izazvati deformacije strojnih dijelova, a temperatura žarenja je vrlo niska te se ne uspijevaju ukloniti formirani karbidi.

Pod rednim brojem IV opisan je skiciran postupak međuohlađivanja nakon pougljičavanja, gdje se čelik vrlo brzo ohladi s temperature pougljičavanja do temperature od otprilike 600 °C. Potrebno je poslije toga držati strojni dio na istoj temperaturi pri čemu se događa pretvorba austenitne u perlitnu fazu. Vrijeme držanja na temperaturi od 600 °C ovisi o vrsti čelika, a nakon toga se čelik ponovno zagrijava na temperaturu kaljenja ili jezgre. Prednost ovog postupka uključuje smanjuje ukupnog ciklusa procesa i manju potrošnju energije.

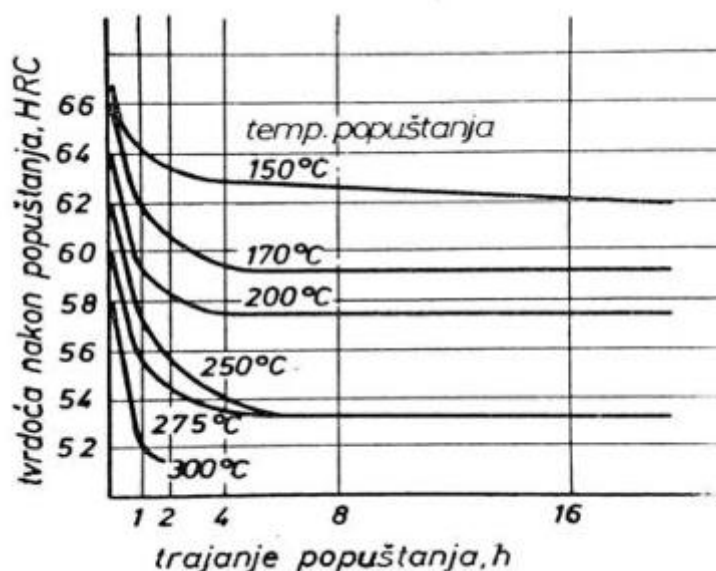
Redni broj V predstavlja postupak dvostrukog kaljenja. Dvostruko kaljenje rezultira najvećom površinskom tvrdoćom i najboljom žilavošću jezgre. U praksi nije izvedivo postizanje ovakvih svojstava. Najbolja žilavost dobivena prvim kaljenjem značajno se smanjuje drugim kaljenjem s niže temperature jer se na tim nižim temperaturama postiže samo djelomična prekristalizacija jezgre, a prisutan je i ferit. Osim smanjenja željenih svojstava, povećava se broj ciklusa ugrijavanja i hlađenja što povećava gotovo uvijek mogućnost nastanka defekta u materijalu. Kako bi se smanjio nedostatak, primjenjuje se dvostruko kaljenje direktno s temperature pougljičavanja, što označava broj VI. Drugo kaljenje provodi se s temperaturom kaljenja površinskog sloja čime se smanjuje broj ciklusa. Kaljenje se provodi ovisno o vrsti čelika i dimenzijama strojnih dijelova, koristeći vodu ili ulje. [8]

3.4. Niskotemperaturno popuštanje

Popuštanje je toplinska obrada koja se najčešće izvodi nakon kaljenja s ciljem postizanja ravnoteže faza npr. poput strukture ferita s perlitom te uspostavljanja mehaničke ravnoteže. Kod niskotemperaturnog popuštanja glavni je cilj postizanje martenzita s kubičnom rešetkom. Takvo popuštanje provodi se kako bi se spriječilo stvaranje defekata zbog visokih napreznja u cementiranom čeliku iako kao negativna strana ovog postupka dolazi do gubitka tvrdoće materijala.

Ovaj postupak toplinske obrade vrlo se često izvodi u kupkama ili pećima s cirkulacijom zraka. Jedan od ciljeva niskotemperaturnog popuštanja je smanjenje napreznja u strukturi što rezultira povećanjem žilavosti materijala. Niskotemperaturno popuštanje ima i neželjene posljedice, a to su smanjenje tvrdoće i povećavanje krhkosti te promjene u mikrostrukturi materijala.

Proces popuštanja ovisi o temperaturi i vremenu trajanja popuštanja kako je prikazano na slici 3.12. Uobičajne temperature za niskotemperaturno popuštanje kreću se u intervalu između 150 i 200 °C, a tvrdoća površine postiže vrijednosti između 58 i 62 HRC. Bitno je napomenuti da kod viših temperatura niskotemperaturno popuštanje rezultira smanjenjem dinamičke izdržljivosti i tvrdoće. [1]



Slika 3.12. Vrijednosti tvrdoće postignute nakon procesa niskotemperaturnog popuštanja s obzirom na temperaturu i vrijeme [14]

4.1. Materijal strojnog dijela NE.23-DT.37

Materijal koji je zadan za strojni dio je 16MnCr5 (Č4320). Zadani čelik se svrstava po specifikacijama u plemenite legirane čelike koji imaju specijalnu namjenu za cementiranje. Ovaj čelik se često koristi kod proizvodnje različitih strojnih elemenata koji su izloženi visokim udarnim opterećenjima. Na slici 4.2. može se vidjeti kemijski sastav 16MnCr5 čelika koji je bio ključan za provedbu postupka toplinske obrade u okviru praktičnog dijela diplomskog rada.

| C | Si | Mn | P | S | Cr |
|-------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| 0.14 - 0.19 | max 0.4 | 1 - 1.3 | max 0.025 | max 0.035 | 0.8 - 1.1 |

Slika 4.2. kemijski sastav 16MnCr5 čelika

16MnCr5 ima legirajuće elemente koji se mogu vidjeti na slici 4.2., a ti legirajući elementi su silicij, mangan, krom i sumpor koji mu daju određena mehanička svojstva. Ova vrsta čelika se primjenjuje i odabire zbog svoje sposobnosti postizanja željene tvrdoće površinskih slojeva te ga čini idealnim za strojne dijelove koji su izloženi naprezanju, trenju i trošenju.

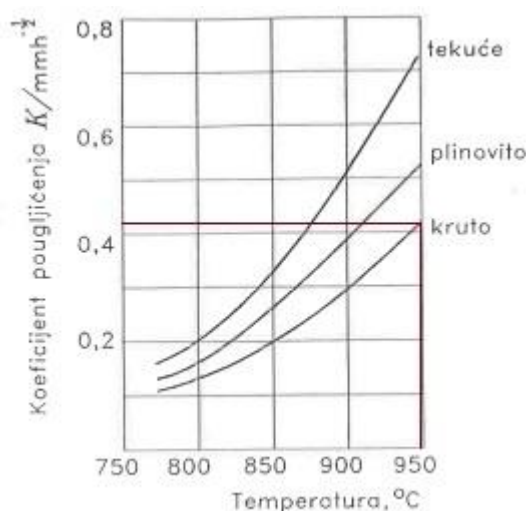
Kod toplinske obrade cementiranjem, zadani čelik prolazi kroz postupak povećavanja sadržaja ugljika na površini kako bi se postigle željena mehanička svojstva. S obzirom na specijalan kemijski sastav, provedba postupka zahtjeva precizno podešavanje parametara toplinske obrade koji uključuju temperaturu, brzinu i trajanje hlađenja.

4.2. Izračun i parametri postupka cementiranja strojnog dijela NT.23-DT.37

Za uspješno provođenje ovog praktičnog dijela toplinske obrade cementiranjem, potrebno je definirati parametre toplinske obrade. Dva faktora su vrlo bitna, a to su temperatura i vrijeme trajanja procesa. U slučaju 16MnCr5 čelika, preporučena je temperatura u rasponu između 880 i 980 °C. Za ovaj diplomski rad, odabrana je temperatura pougljičavanja od 950 °C te u nastavku je izvedena formula za vrijeme trajanja procesa kako bi pougljičeni sloj bio 0,5 mm od površine strojnog dijela:

$$\delta = K \cdot \sqrt{t_p} \text{ [mm]}$$

$$t_p = 95 \text{ min}$$



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

Za odabranu temperaturu pougljičavanja od 950 °C i pougljičavanje u krutom sredstvu tj. drvenom ugljenu, koeficijent pougljičenja iznosi 0,4 mmh^{-1/2} te dubina po gore navedenoj formuli iznosi 0,5 mm. Dubina zadovoljava postavljene zahtjeve.

Poslije svih parametara za pougljičavanje, potrebno je odrediti trajanje i temperaturu za jednostruko kaljenje. Odabrana je temperatura od 850 °C te trajanje procesa je izračunato po Smoljinkovoj metodi koja glasi:

$$t_{gr} = \frac{1}{60} * m * K * \beta * D \text{ [min]}$$

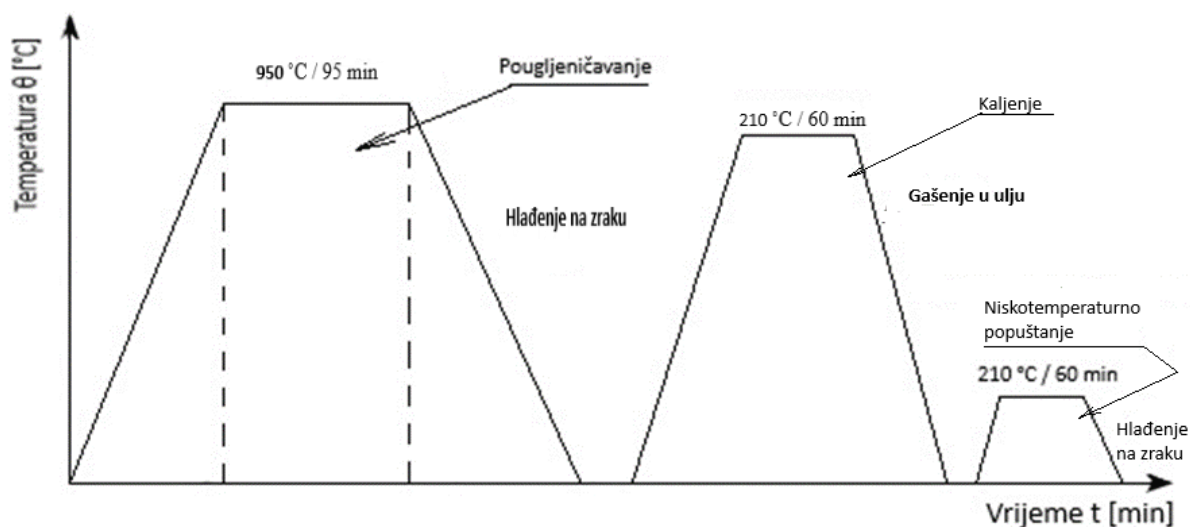
$$t_{gr} = \frac{1}{60} * m * [19 - 0,04 * (\theta - 800)] * \beta * D$$

$$t_{gr} = 60 \text{ min}$$

gdje je:

- t_{gr} predstavlja vrijeme grijanja strojnog dijela (min)
- m predstavlja značajku medija za zagrijavanje (iz tablice vrijednost 4)
- K predstavlja koeficijent specifičnog vremena progrijavanja
- β predstavlja koeficijent konfiguracije
- D predstavlja promjer strojnog dijela
- Θ predstavlja temperaturu na kojoj je ugrijava peč

Nakon pougličavanja i kaljenja, potrebno je strojni dio niskotemperaturno popustiti. Ovaj dio toplinske obrade se provodi da ne bi došlo do prevelike krivosti strojnog dijela i pucanja pri udarnim opterećenjima. Niskotemperaturno popuštanje izvodilo se jedan sat tj. 60 minuta na temperaturi od 210 °C poštivajući dijagram na slici 3.17.



Slika 4.4. Dijagram procesa cementiranja strojnog dijela NE.23-DT.37

4.3. Tehnološka dokumentacija

Za praktični dio ovog diplomskog rada bilo je potrebno izraditi tehničku dokumentaciju putem operacijskih listova. Operacijski listovi moraju biti koncipirani s ciljem preciznog praćenja postupka toplinske obrade strojnog dijela NE.23-DT.37. Za ovaj slučaj, potrebna će biti tri odvojena operacijska lista i to za cementiranje, kaljenje te treći za niskotemperaturno popuštanje. Općenito, operacijski listovi imaju svrhu u proizvodnom strojarstvu kako bi se dali jasni naputci

operateru kako da nešto učini prilikom obrade, nebitno radi li se o toplinskoj, strojnoj ili nekoj drugoj obradi materijala. Operacijski listovi za cementiranje i kaljenje te niskotemperaturno popuštanje nalaze se u tablicama 1, 2 i 3.

Tablica 4.1. Operacijski list za cementiranje

| Tvrtka: Tehnički fakultet | | Naziv elementa: NE.23-DT.37 | | Materijal: 16MnCr5 / Č4320 | | Radno mjesto: | | List: 1 Listova: 3 |
|------------------------------|--|----------------------------------|---------------------------|------------------------------------|------------------|---------------------------|--------------|-------------------------|
| | | | | Kvaliteta: 62 HRC CHD 0,5 mm | | Naziv uređaja: | | |
| Operacijski list: 1 | | Oznaka: | | Oblik: valjkasti | | Oznaka: | | Operacija broj: 1 |
| | | Naziv operacije: Cementiranje | | Masa / dimenzija: | | Radionica: Laboratorij | | |
| Zahvat | Opis zahvata | Količina: | Sredstvo ili materijal | T [°C] | Vrijeme [min] | Minuta | | |
| | | Kom. | | | | t_s | t_r | |
| 1 | Usipanje granulata i postavljanje strojnog dijela | 1 | Posuda | - | 3,0 | - | 3,0 | |
| 2 | Umetanje u peć | 1 | Ručno | - | 1,0 | - | 1,0 | |
| 3 | Pougljičavanje | 1 | Peć | 950 | 95 | 95 | - | |
| 4 | Vađenje iz peći | 1 | Ručno | - | 3,0 | - | 3,0 | |
| 5 | Hlađenje i priprema za kaljenje | 1 | Ručno | - | 15,0 | - | 15,0 | |
| Izradio: | | Kontrola: | Izmjene: | Broj: | | Σt_s | Σt_r | |
| Marko Dolić | | Dario Iljkić | | Datum: | | 95 | 22,0 | |
| | | | | Ime | | | | |
| | | | | | | | | |

Tablica 4.2. Operacijski list za kaljenje

| Tvrtka: Tehnički fakultet | | Naziv elementa: NE.23-DT.37 | | Materijal: 16MnCr5 / Č4320 | | Radno mjesto: | | List: 2 Listova: 3 |
|------------------------------|--|--|---------------------------|------------------------------------|------------------|---------------------------|--------------|-------------------------|
| | | | | Kvaliteta: 62 HRC CHD 0,5 mm | | Naziv uređaja: | | |
| Operacijski list: 2 | | Oznaka: | | Oblik: valjkasti | | Oznaka: | | Operacija broj: 2 |
| | | Naziv operacije: kaljenje i gašenje | | Masa / dimenzija: | | Radionica: Laboratorij | | |
| Zahvat | Opis zahvata | Količina: | Sredstvo ili materijal | T [°C] | Vrijeme [min] | Minuta | | |
| | | Kom. | | | | t_s | t_r | |
| 1 | Postavljanje strojnog dijela u peć | 1 | Ručno | - | 3,0 | - | 3,0 | |
| 2 | Postavljanje temperature za kaljenje | 1 | Ručno | - | 1,0 | - | 1,0 | |
| 3 | Kaljenje | 1 | Peć | 210 | 60 | 60 | - | |
| 4 | Vađenje iz peći | 1 | Ručno | - | 3,0 | - | 3,0 | |
| 5 | Gašenje u ulju | 1 | Ručno | - | 15,0 | - | 15,0 | |
| Izradio: | | Kontrola: | Izmjene: | Broj: | | Σt_s | Σt_r | |
| Marko Dolić | | Dario Iljkić | | Datum: | | 60 | 22,0 | |
| | | | | Ime | | | | |

Tablica 4.3. Niskotemperaturno popuštanje te hlađenje na sobnu temperaturu

| Tvrtka: Tehnički fakultet | | Naziv elementa: NE.23-DT.37 | | Materijal: 16MnCr5 / Č4320 | | Radno mjesto: | | List: 3 Listova: 3 | |
|------------------------------|-------------------------------|---|----------|----------------------------------|-------------|---------------------------|--------------|--------------------------|-------|
| | | | | Kvaliteta: 62 HRC CHD 0,5 | | Naziv uređaja: | | | |
| Operacijski list: 3 | | Oznaka: | | Oblik: valjkasti | | Oznaka: | | Operacija broj: 3 | |
| | | Naziv operacije: Niskotemperaturno popuštanje | | Masa / dimenzija: | | Radionica: Laboratorij | | | |
| Zahvat | Opis zahvata | Količina: | | Sredstvo ili materijal | T [°C] | Vrijeme [min] | | Minuta | |
| | | Kom. | | | | | | t_s | t_r |
| 1 | Postavljanje u peć | 1 | | Ručno | - | 1,0 | - | 1,0 | |
| 2 | Progrijavanje i popuštanje | 1 | | Peć | 210 | 60,0 | 60,0 | - | |
| 3 | Vađenje iz peći | 1 | | Ručno | 0 | 0 | - | 1,0 | |
| 4 | Hlađenje | 1 | | Zrak | 20 | | - | - | |
| Izradio: | | Kontrola: | Izmjene: | Broj: | | | Σt_s | Σt_r | |
| Marko Dolić | | Dario Iljkić | | Datum: | | | 60 | 2,0 | |
| | | | | Ime | | | | | |

4.4. Verifikacija parametara toplinske obrade strojnog dijela NT.23-DT.37

Za Provođenje toplinske obrade strojnog dijela NE.23-DT.37. bili su korišteni razni strojevi koji su u vlasništvu Tehničkog fakulteta u Rijeci. Svi strojevi koji će biti navedeni nalaze se na Zavodu za materijale u laboratoriju za toplinsku obradu.

Proces pougljičavanja i kaljenja realiziran je pomoću posude s ugljičnim granulatom koja je postavljena u peć marke „OVER“. Peć funkcioniра na principu grijanja žarnih niti pomoću trofazne struje 380 V i snage od 12 kW. Žarnih niti u peći je tri te su postavljene unutar izolacijskog materijala. Vanjski dio peći izrađen je od lima koji je premazan visokotemperaturnim lakom, a unutarnji dio obložen je keramičkom oblogom koja djeluje kao izolator. Maksimalna temperatura koja se može dostići u peći je 1200 °C, a podešavanje temperature se provodi preko digitalnog monitora. Postoje također i dva prekidača, jedan služi za paljenje peći dok drugi se koristi na način ako nije aktivan, tada temperatura dođe do zadane vrijednosti i peć se počinje hladiti, a kada je aktivan, tada peć održava konstantnu temperaturu.

Prije samog postavljanja u peć bilo je potrebno napuniti posudu s granulatom (slika 4.5.) te postaviti strojni dio u posudu. Na slici 4.6. je prikazan ugljični granulati koji se je koristio za pougljičavanje.



Slika 4.5. Posuda za pougljičavanje i strojni dio



Slika 4.6. Ugljični granulat za cementiranje



Slika 4.7. Peć za toplinsku obradu marke „OVER“

Nakon postavljanja posude s granulatom i strojnim dijelom u peć bilo je potrebno namjestiti temperaturu koja odgovara austenitnoj zoni u FeC_3 dijagramu koja iznosi $950\text{ }^\circ\text{C}$. Nakon vremena koji je proračunato, strojni dio je bilo potrebno hladiti (slika 4.8.).



Slika 4.8. Hlađenje nakon pougljičavanja

U istoj peći nakon pougljičavanja i hlađenja, peć je namještena na $850\text{ }^\circ\text{C}$ te je ponovno strojni dio postavljen u peć. Bilo je potrebno pažljivo postaviti strojni dio na ciglu u peći da ne bi došlo do kotrljanja u pećnici i oštećenja. Nakon grijanja od jednog sata trebalo je ugaziti strojni dio u ulju. Za gašenje koristilo se ulje marke INA „KALENOL 22“ (slika 4.9).



Slika 4.9. INA KALENOL 22 ulje za gašenje strojnog dijela

Nakon kaljenja, kada se strojni dio ohladio, bio je podvrgnut ispitivanju tvrdoće na mjernom uređaju za tvrdoću te je pokazao vrlo nisku tvrdoću (40 HRC). Razlog tome što je čelik oksidirao te je stvorio na površini „listiće“ ugljika. Nakon brušenja površinskog sloja koji je „izgorio“ mogla se očitati tvrdoća.

Glavni cilj ove toplinske obrade strojnog dijela NE.23-DT.37 bio je postizanje zadane tvrdoće rubnog sloja i ostvarivanje dubine pougljičenog sloja. Mjerenje tvrdoće je izvršeno na Rockwell-C skali pomoću tvrdomjera koji se nalazi na Tehničkom fakultetu u Rijeci. Tvrdoća je mjerena nakon procesa kaljenja (gašenja) te nakon postupka niskotemperaturnog popuštanja. Postignuta tvrdoća nakon kaljenja iznosila je 64 HRC (slika 4.10), a tvrdoća nakon procesa niskotemperaturnog popuštanja iznosila je 61 HRC (slika 4.11). Tvrdoća koja se tražila bila je $60 \text{ HRC } \frac{+2}{0}$ te toplinska obrada cementiranjem zadovoljava početne uvjete što potvrđuje kvalitetnu provedbu postupaka i pridržavanje izračunatih vrijednosti. Na sljedećim slikama može se vidjeti ispitivanje tvrdoće prije i poslije niskotemperaturnog popuštanja.



Slika 4.10. Ispitivanje tvrdoće prije niskotemperaturnog popuštanja (63 HRC)



Slika 4.11. Ispitivanje tvrdoće poslije niskotemperaturnog popuštanja (61 HRC)

5. ZAKLJUČAK

Čelik, legura željeza i ugljika, danas se opravdano smatra jednim od najvažnijih materijala na svijetu. Njegova svestranost i široka primjena u različitim sektorima postavlja zahtjeve za stalnim poboljšanjem čeličnih karakteristika. Ovisno o uvjetima rada, postavljaju se specifični zahtjevi, poput povećanja tvrdoće površine te otpornosti na trošenje.

U cilju postizanja tih unaprjeđenih svojstava, nužno je promijeniti mikrostrukturu čelika. Fe-Fe₃C dijagram prikazuje različite faze i mikrostrukture čelika. Transformaciju mikrostrukture postiže se kroz primjenu različitih toplinskih obrada. Ipak, važno je napomenuti da je toplinska obrada postupak koji se provodi na visokim temperaturama te donosi određene rizike. U toplinsko-kemijskim procesima, mogu se pojaviti različiti kemijski spojevi i plinovi koji predstavljaju potencijalnu opasnost za zdravlje ljudi.

Cementiranje kao toplinsko-kemijski proces obrade čelika, uključuje pougljičavanje, kaljenje te niskotemperaturno popuštanje. Pougljičavanje se može izvesti različitim sredstvima, a u ovom radu koristilo se kruto sredstvo kao granulat drvenog ugljena. Kaljenjem se postiže martenzitna struktura, a proces se može provesti u raznim medijima. Za strojni dio NE.23-DT.37 odabrano je ulje. Konačno, strojni dio se nakon kaljenja niskotemperaturno popuštao te hladio na zraku kako bi se smanjila zaostala naprezanja.

Nakon provedbe postupka toplinske obrade, bilo je ključno izmjeriti tvrdoću površine kako bi se procijenila uspješnost obrade. Nakon niskotemperaturnog popuštanja, tvrdoća površine je iznosila 61 HRC te je na taj način toplinska obrada uspješno provedena i zadovoljava postavljanje zahtjeve. Osim tvrdoće, postavljen je i zahtjev za dubinu pougljičenog sloja koji je trebao biti minimalno 0,5 milimetara što je također zadovoljeno.

Zaključno, možemo reći da su postavljeni parametri procesa toplinske obrade za strojni dio NE.23-DT.37 bili ispravni te je proces uspješno proveden.

POPIS SLIKA

| | |
|---|-----------|
| <i>Slika 2.1. Podjela čelika [2].....</i> | <i>4</i> |
| <i>Slika 2.2. Fazni dijagram Fe-Fe₃C [9].....</i> | <i>5</i> |
| <i>Slika 2.3. Nukleacija austenita u homogeni austenit [5]</i> | <i>7</i> |
| <i>Slika 2.4. Utjecaj temperature na veličinu zrna [3].....</i> | <i>8</i> |
| <i>Slika 2.5. Shematski prikaz raspodjele ugljika [1].....</i> | <i>9</i> |
| <i>Slika 2.6. Izotermna tvorba austenita [1]</i> | <i>10</i> |
| <i>Slika 2.7. Dijagram pretvorbe austenita pri konstantnim uvjetima ugrijavanja. [1]</i> | <i>10</i> |
| <i>Slika 2.8. Promjena veličine kristalnog zrna austenita ovisno o temperaturi [1]</i> | <i>11</i> |
| <i>Slika 2.8. TTT dijagram za različite temperature hlađenja podeutektoidnog čelika [10]</i> | <i>12</i> |
| <i>Slika 2.9. Prikaz formiranja perlita iz austenita te pravac difuzije atoma ugljika [10]</i> | <i>13</i> |
| <i>Slika 2.10. shematski prikaz formiranja faza perlitnih u austenitna zrna [10]</i> | <i>14</i> |
| <i>Slika 2.11. mikrostruktura perlita, sorbita te trustita [10]</i> | <i>14</i> |
| <i>Slika 2.12. Dijagram raspada austenita: a) podeutektoidni čelik b) nadeutektoidni čelik [9]</i> | <i>15</i> |
| <i>Slika 2.14. Mikrostruktura a) gornjeg bainita b) donji bainit [13]</i> | <i>16</i> |
| <i>Slika 2.15. Faze koje su uključene u stvaranje gornjeg bainita [3].....</i> | <i>17</i> |
| <i>Slika 2.16. Vremenski tijek stvaranja donjeg bainita [3].....</i> | <i>17</i> |
| <i>Slika 2.17. Početak i završetak martenzitne pretvorbe u ovisnosti o udjelu ugljika [13]</i> | <i>18</i> |
| <i>Slika 2.18. Mikrostruktura martenzita [13]</i> | <i>18</i> |
| <i>Slika 2.19. Kristalna rešetka martenzita [10]</i> | <i>19</i> |
| <i>Slika 3.1. Prikaz promjene udjela ugljika od ruba prema jezgri tijekom procesa pougličavanja:</i> <i>a) prikaz dijagrama Fe – C b) tvrdoća po dubini pougličanog sloja i promjena udjela</i> <i>ugljika [9].....</i> | <i>22</i> |
| <i>Slika 3.2. Dijagram procesa pougličavanja sa stijenkom strojnog dijela [11]</i> | <i>26</i> |
| <i>Slika 3.4. Krivulja pougličavanja za različita vremena pougličavanja [7], [11].....</i> | <i>28</i> |
| <i>Slika 3.5. Ovisnost srednjeg koeficijenta difuzije ugljika i C-potencijala [7]</i> | <i>29</i> |
| <i>Slika 3.6. Utjecaj temperature na dubinu pougličavanja</i> | <i>29</i> |
| <i>Slika 3.7. Odnos C potencijala i temperature kondenzacije [9]</i> | <i>33</i> |
| <i>Slika 3.8. Dijagram procesa kaljenja i niskotemperaturnim popuštanjem [1]</i> | <i>34</i> |
| <i>Slika 3.9. Stanje nakon pougličavanja u FeC dijagramu [7]</i> | <i>35</i> |
| <i>Slika 3.10. Kaljenje za tri različite temperature [7]</i> | <i>36</i> |
| <i>Slika 3.11. Postupci kaljenja poslije pougličavanja</i> | <i>37</i> |
| <i>Slika 3.12. Vrijednosti tvrdoće postignute nakon procesa niskotemperaturnog popuštanja s</i> <i>obzirom na temperaturu i vrijeme [14].....</i> | <i>39</i> |

| | |
|---|-----------|
| <i>Slika 4.1. Nacrt strojnog dijela NE.23-DT.37 i zahtjevi za obradu</i> | <i>40</i> |
| <i>Slika 4.2. kemijski sastav 16MnCr5 čelika.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Slika 4.3. Ovisnost koeficijenta pougljičavanja o temperaturi i sredstvu pougljičenja [1].....</i> | <i>42</i> |
| <i>Slika 4.4. Dijagram procesa cementiranja strojnog dijela NE.23-DT.37.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Slika 4.5. Posuda za pougljičavanje i strojni dio</i> | <i>47</i> |
| <i>Slika 4.6. Ugljični granulati za cementiranje.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Slika 4.7. Peć za toplinsku obradu marke „OVER“</i> | <i>48</i> |
| <i>Slika 4.8. Hlađenje nakon pougljičavanja</i> | <i>49</i> |
| <i>Slika 4.9. INA KALENOL 22 ulje za gašenje strojnog dijela.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Slika 4.10. Ispitivanje tvrdoće prije niskotemperaturnog popuštanja (63 HRC).....</i> | <i>51</i> |
| <i>Slika 4.11. Ispitivanje tvrdoće poslije niskotemperaturnog popuštanja (61 HRC).....</i> | <i>51</i> |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| <i>Tablica 3.1.(DIN 17210) Podjela čelika na legirane plemenite, nelegirane te kvalitetne čelike [5]</i> | 21 |
| <i>Tablica 4.1. Operacijski list za cementiranje.....</i> | 44 |
| <i>Tablica 4.2. Operacijski list za kaljenje</i> | 45 |
| <i>Tablica 4.3. Niskotemperaturno popuštanje te hlađenje na sobnu temperaturu</i> | 46 |

LITERATURA

- [1] Smoljan B.: “Toplinska obrada čelika sivog i nodularnog lijeva”, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1999.
- [2] Ray B. K.; Prusty R. K.; Nayak D.: “Phase Transformations and Heat Treatments of Steels”, CRC Press, Boca Raton, 2020.
- [3] Atomic-Scale Quantification of Grain Boundary Segregation in Nanocrystalline Material, PRL 112, 126103 (2014)
- [4] Gabrić, I.; Šitić, S.: „Materijali II“, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [5] Pereloma, E.; Edmonds, D. V.: “Phase transformations in steels”, Woodhead Publishing, Cambridge, 2012.
- [6] Parrish, G.: “Carburizing : Microstructures and Properties”, ASM International, Ohio, 1999.
- [7] Krumes, D.: „Površinske toplinske obrade i inženjerstvo površina“, Strojarski fakultet u Slavskom Brodu, Slavonski Brod, 2004.
- [8] Golubić, S.: „Tehnički materijali – 1. dio : metalni materijali“, Veleučilište u Bjelovaru, Bjelovar, 2019.
- [9] dio_7.pdf, nepoznati autor, s interneta 22.2.2024
- [10] Atomic-Scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite, Y.J L., P. Choi, C. Borchers, S. Westerkamp, S. Goto, D. Raabe, R. Kirchheim
- [11] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tisak "Kratiss" Zagreb, 1997.
- [12] Stupnišek, M., Cajner, F.: Osnove toplinske obrade metala, FSB Zagreb, 2001.
- [13] Kožuh, S.: Specijalni čelici – skripta, Sisak, 2010.
- [14] Poboljšanje procesa difuzijskog stvaranja karbidnog sloja, Đurđica Gorščak, 2004

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu detaljno je prikazan i opisan proces toplinske obrade cementiranjem strojnog dijela Ne.23-DT.37 koji je namijenjen kao svornjak za prikolicu traktora. U teorijskom dijelu diplomskog rada opisane su opće spoznaje o čeliku, glavne fazne pretvorbe relevantne za postupak cementiranja, a sam postupak cementiranja detaljno je razmatran. Nakon provedene toplinske obrade, strojni dio je bio podvrgnut mjerenju tvrdoće. Cilj ovog diplomskog rada bio je postizanje željene tvrdoće površinskog sloja i dobivanje propisane vrijednosti dubine pougljičenog sloja. Cijeli postupak toplinske obrade pratile su detaljne slike i opisi.

KLJUČNE RIJEČI: toplinska obrada, fazne pretvorbe, pougljičavanje, toplinska obrada, ispitivanje tvrdoće

SUMMARY

This master's thesis provides a detailed presentation and description of the heat treatment process involving carburization of the machine part NT.23-DT.37, intended for use as a tractor trailer pin. The theoretical part of the thesis encompasses general insights into steel, key phase transformations relevant to the carburization process, and a comprehensive examination of the carburization process itself. Following the heat treatment, the machine part underwent hardness measurements. The objective of this master's thesis was to achieve the desired surface hardness and obtain the specified depth of the carburized layer. Detailed images and descriptions accompanied the entire heat treatment process.

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