

# Karakterizacija toplinski i toplinsko-kemijski obrađenih čelika

---

Lehpamer, Adam

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:421799>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-16**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

*Završni rad br. 397/PS/2022*

## **Karakterizacija toplinski i toplinsko-kemijski obrađenih čelika**

**Adam Lehpamer, 2800/336**

Varaždin, rujan 2022. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 397/PS/2022

## Karakterizacija toplinski i toplinsko-kemijski obrađenih čelika

### Student

Adam Lehpamer, 2800/336

### Mentor

Izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić

Varaždin, rujan 2022. godine



## **Zahvala**

Najprije zahvaljujem mentorici Izv. prof. dr. sc. Sanji Šolić na savjetima i smjernicama koji su uvelike doprinijeli izrada ovog završnog rada. Također bih se zahvalio Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu te Prof. dr. sc. Darku Landeku i laborantu Ivanu Vovku koji su pomogli sa izvedbom praktičnog dijela ovog završnog rada.

## Sažetak

Ovim radom obrađena je teme karakterizacije toplinsko i toplinsko-kemijski obrađenih čelika. Sam rad se sastoji od teoretskog i praktičnog dijela, uz koji je obavljena i analiza rezultata dobivenih u praktičnom dijelu. Teoretski dio se sastoji od samog opisa toplinske obrade i njenih parametra, opisa toplinske obrade kaljenjem i važnosti metastabilnog Fe-Fe<sub>3</sub>C i TTT dijagrama za sami postupak. Objasnjena su svojstva zakaljivosti i prokaljivosti i navedeni i razrađeni ostali postupci toplinske obrade cjelovitog volumena. Također u teoretskom dijelu su opisani postupci obrade površinskim modificiranjem nitriranje, nitrokarburiranje, boriranje i induksijsko kaljenje.

U praktičnom dijelu rada provedena je metalografska priprema toplinski i toplinsko-kemijski obrađenih uzoraka, analiza njihove mikrostrukture pomoću svjetlosnog mikroskopa i mjerenje mikrotvrdoće kaljenih uzoraka čelika s različitim udjelima ugljika. Također je provedena analiza utjecaja ugljika na mikrostrukturu i izmjerenu tvrdoću za uzorke obrađene kaljenjem i iste uzorke u normaliziranom stanju.

***Ključne riječi:** Toplinska obrada, kaljenje, zakaljivost, prokaljivost, mikrostruktura, mikrotvrdoća, površinsko modificiranje, nitriranje, nitrokarburiranje, induksijsko kaljenje, boriranje.*

## Summary

The topic of this paper is the characterization of heat-treated and thermochemically treated steels. The paper itself consists of a theoretical and a practical part, along with which an analysis of the results obtained in the practical part was also carried out. The theoretical part consists of the description of the heat treatment and its parameters, the description of hardening, and the importance of the metastable Fe-Fe<sub>3</sub>C and TTT diagram for the procedure itself. Hardenability is defined as the property of steel. Other procedures for heat treatment are listed and elaborated. Also, processes of surface modification, nitriding, nitrocarburizing, boriding, and induction hardening are described.

In the practical part of the paper, metallographic preparation of thermally and thermochemically treated samples was done, analysing their microstructures using a microscope and measuring the microhardness of hardened samples with different carbon contents. Finally, an analysis of the influence of carbon content on the microstructure and the measured hardness was also carried out for the hardened samples and the same samples in the normalized state.

**Keywords:** *Heat treatment, hardening, hardenability, microstructure, microhardness, surface modification, nitriding, nitrocarburizing, induction hardening, boriding.*



# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Adam Lehpamer

JMBAG 2800/336

DATUM 13.09.2022.

KOLEGIJ Materijali II

NASLOV RADA Karakterizacija toplinski i toplinsko-kemijski obrađenih čelika

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Characterization of heat treated and surface hardened steels

MENTOR dr.sc. Sanja Šolić

ZVANJE izvanredna profesorica

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc.dr.sc. Matija Bušić, član, predsjednik
2. izv.prof.dr.sc. Sanja Šolić, mentor, član
3. doc.dr.sc. Tanja Tomić, član
4. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, zamjenski član
- 5.

VŽDK

MAMI

## Zadatak završnog rada

BROJ 397/PS/2022

OPIS

U završnom radu potrebno je opisati i prikazati postupke toplinske obrade cjelovitog volumena te dio postupaka inženjerstva površina koji obuhvaćaju postupke toplinsko - kemijske obrade površine strojnih dijelova. U teorijskom dijelu potrebno je detaljnije obraditi navedene postupke uz jasan prikaz njihove važnosti i utjecaja na kreiranje potrebnih mehaničkih svojstava materijala i strojnih dijelova. U eksperimentalnom dijelu potrebno je na uzorcima ugljičnog čelika različitog kemijskog sastava napraviti analizu mikrostrukture i ispitivanje mikrotvrdoće te odrediti utjecaj udjela ugljika na postignute vrijednosti tvrdoće i mikrostrukturu. Na uzorcima obrađenim postupcima indukcijskog kaljenja, cementiranja, nitriranja i boriranja potrebno je napraviti analizu dobivenog površinskog sloja pomoću svjetlosnog mikroskopa.

Na kraju je potrebno zaključiti na koji način je primjena toplinske obrade kaljenja utjecala na mikrostrukturu i tvrdoću toplinski obrađenih čelika različitih udjela ugljika te kakve promjene mikrostrukture su nastale primjenom površinskog kaljenja i toplinsko kemijskih obrada cementiranja, nitriranja i boriranja.

ZADATAK URUČEN

22.09.2022

POTPIS MENTORA

Sanja Šolić



HUBON  
ALIFBBAINB

Sveučilište  
Sjever



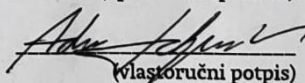
SVEUČILIŠTE  
SIEVER

IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, ADAM LEHPAMER (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom KARAKTERIZACIJA TOPLINSKI I TOPLINSKO - KEMIJSKI OBRADENIH ČELIKA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

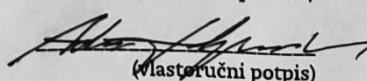
Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

  
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, ADAM LEHPAMER (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom KARAKTERIZACIJA TOPLINSKI I TOPLINSKO - KEMIJSKI OBRADENIH ČELIKA (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

  
(vlastoručni potpis)

## Popis korištenih kratica

<b>Fe</b>	Željezo
<b>C</b>	Ugljik
<b>Fe<sub>3</sub>C</b>	Cementit
<i>t<sub>ohl</sub></i>	Vrijeme ohlađivanja
<i>v<sub>ohl</sub></i>	Brzina ohlađivanja
<b>θ</b>	Temperatura [°C]
<b>θ<sub>TO</sub></b>	Temperatura toplinske obrade [°C]
<i>t</i>	Vrijeme [s]
<b>TO</b>	Toplinska obrada
<b>BCC</b>	BCC kristalna rešetka
<b>FCC</b>	FCC kristalna rešetka
<b>BTC</b>	Tetragonalna kristalna rešetka
<b>A, γ</b>	Austenit
<b>F, α</b>	Ferit
<b>P</b>	Perlit
<b>L</b>	Ledeburit
<b>γ'</b>	Primarni austenit
<b>γ<sup>e</sup></b>	Eutektički austenit
<b>Fe<sub>3</sub>C'</b>	Primarni cementit
<b>Fe<sub>3</sub>C''</b>	Sekundarni cementit
<b>Fe<sub>3</sub>C<sup>id</sup></b>	Eutektoidni cementit
<b>Fe<sub>3</sub>C<sup>e</sup></b>	Eutektički cementit
<b>α<sup>id</sup></b>	Eutektoidni ferit
<b>M</b>	Martenzit
<b>A<sub>p</sub>, A<sub>z</sub></b>	Pothlađeni, zaostali austenit
<b>B</b>	Bainit
<b>K</b>	Karbid (cementit)
<b>K<sup>“</sup></b>	Sekundarni karbid (cementit)
<b>HV</b>	Tvrdoća po Vickersu
<b>HRC</b>	Tvrdoća po Rockwellu
<b>SHD</b>	Efektivna dubina kaljenja
<b>HG</b>	Granična tvrdoća
<i>f</i>	Frekvencija [Hz]
<b>N</b>	Dušik
<b>N<sub>ht</sub></b>	Efektivna dubina nitriranja/nitrokarburiranja
<b>Ni</b>	Nikal
<b>O</b>	Kisik
<b>QPQ</b>	eng. Quench-Polish-Quench
<b>B</b>	Bor
<b>Si</b>	Silicij
<b>Al</b>	Aluminij
<b>Fe<sub>2</sub>B, FeB</b>	Boridi
<b>Fe<sub>2</sub>N, Fe<sub>4</sub>N</b>	Nitridi
<b>SHIP</b>	Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje

# Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Toplinska obrada čelika .....	2
2.1.	Parametri toplinske obrade.....	2
2.2.	Fe-Fe <sub>3</sub> C Dijagram i njegova važnost za toplinsku obradu čelika (Kaljenje) .....	4
2.3.	TTT dijagram za kontinuirano hlađenje.....	10
2.4.	Zakaljivost i prokaljivost čelika .....	12
2.5.	Ostali postupci toplinske obrade cjelovitog volumena.....	14
2.5.1.	Žarenje.....	14
2.5.2.	Popuštanje.....	16
2.5.3.	Poboljšavanje.....	16
3.	Toplinske i toplinsko - kemijske obrade površinskih slojeva (postupci inženjerstva površina) .....	17
3.1.	Podjela postupaka površinske obrade.....	17
3.2.	Površinskim kaljenje .....	19
3.2.1.	Indukcijsko kaljenje.....	19
3.3.	Toplinsko – kemijsko modificiranje .....	22
3.3.1.	Nitriranje i nitrokarburiranje.....	22
3.3.2.	Boriranje .....	25
4.	Praktični dio .....	30
4.1.	Uzorci .....	30
4.2.	Metalografska priprema uzoraka.....	32
4.3.	Analiza mikrostrukture svjetlosnim mikroskopom .....	36
4.4.	Mjerenje mikrotvrdoće toplinski obrađenih uzorka .....	37
5.	Rezultati i analiza rezultata.....	39
5.1.	Analiza uzoraka obrađenih toplinskom obradom cjelovitog volumena.....	39
5.2.	Utjecaj ugljika na tvrdoću i mikrostrukturu .....	41
5.3.	Analiza mikrostrukture površinski modificiranih uzoraka.....	42
6.	Zaključak.....	45
7.	Literatura.....	46



# 1. Uvod

Čisti metal se vrlo rijetko rabe u mehaničkim konstrukcijama. Razlog je relativno niska mehanička otpornost, rješenje ovog problema je primjena metalnih materijala u obliku legura. Legure imaju znatno bolja mehanička svojstva koja postižu nekim od mehanizama očvršnuća (kristal mješanci, dvojne faze, očvršćivanje deformacijom), no navedeni mehanizmi su ipak ograničeni te znatnije povećanje čvrstoće postizemo postupcima toplinske obrade. Primjenom postupaka toplinske obrade znatno se mijenja mikrostruktura. Upravo je promjena mikrostrukture i analiza iste te sam opis pojedinih postupaka toplinske obrade jedan od zadatak ovog rada.

Dvije su vrste toplinske obrade, toplinske obrade kod kojih dolazi do ugrijavanja cijelog volumena obrađivanog predmeta i postupke toplinske obrade površinskih slojeva. U prošlosti su se željena svojstva postizala najčešće prvom od navedenih vrsta, no sve veći zahtjevi za strojne dijelove tražili su od materijala kombinacije svojstava u samim strojnim dijelovima. Takve kombinacije dobivene su upravo korištenjem površinskih obrada.

Upravo zbog različitosti i velikog broja toplinskih obrada bitno je izabrati optimalan postupak kojim će se dobiti željena svojstva na najisplativiji mogući način. U ovom radu detaljno su opisane te karakterizirane toplinske i toplinsko-kemijske obrade uz analizu mikrostrukture i mjerenje tvrdoće pojedinih uzoraka.

## 2. Toplinska obrada čelika

Toplinska obrada je proces kod kojega se predmet obrade namjerno podvrgava vremensko – temperaturnim ciklusima s ciljem postizanja željene mikrostrukture, a time i željenih mehaničkih, fizičkih i kemijskih svojstava [1].

Metalne legure se dijele na dvije vrste s obzirom na promjene navedenih svojstava:

- Legure kod kojih glavna komponenta ima svojstvo polimorfne promjene (promjene koje se međusobno ne razlikuju po kemijskom sastavu, već po kristalnoj strukturi).
- Legure kod kojih niti jedna komponenta nema svojstvo polimorfne promjene

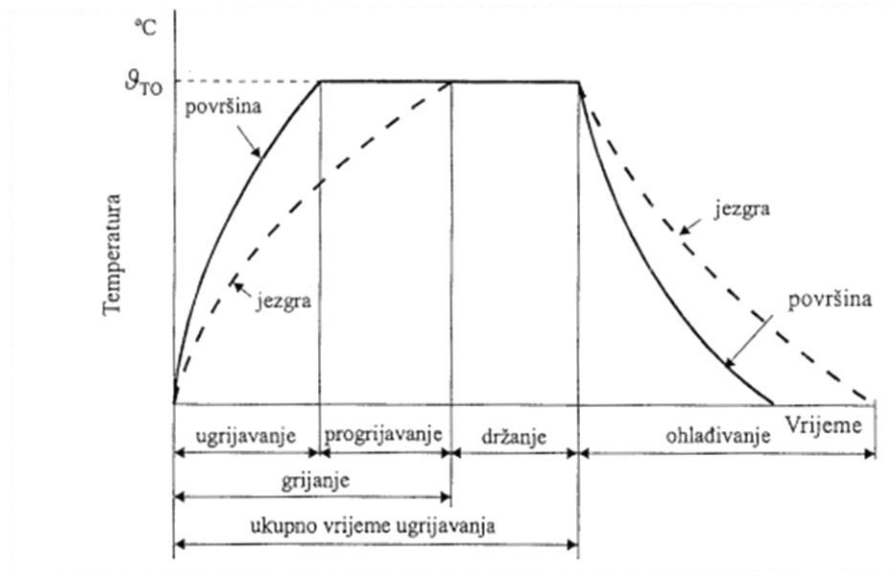
Čelik spada u prvu od navedenih mogućnosti budući da željezo kod zagrijavanja mijenja oblik kristalne rešetke [2].

Razlikujemo toplinske obrade kod kojih dolazi do ugrijavanja cijelog volumena obrađivanog predmeta, takve obrade nazivamo toplinskom obradom cjelovitog volumena, i postupke toplinske obrade površinskih slojeva. Postupci koji spadaju u toplinsku obradu cjelovitog volumena su kaljenje, žarenje, popuštanje i poboljšavanje. Površinski postupci se dijele na toplinske (površinsko kaljenje), toplinsko – kemijske postupke (cementiranje, nitriranje, nitrokarburiranje, boriranje ...) i postupke prevlačenja (PVD, CVD ...) [3].

### 2.1. Parametri toplinske obrade

Dva osnovna parametra pri toplinskoj obradi su temperatura, i vrijeme trajanja obrade. Iz ta dva osnovna parametra izvodimo dodatni parametar koji se naziva brzina ohlađivanja/grijanja. Valja napomenuti da će upravo zbog ovog parametra mikrostruktura biti drugačija nego u Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagramu (iznimka kod izotermičke obrada). Kod Fe-Fe<sub>3</sub>C je vrijeme trajanja procesa beskonačno ( $t_{ohl} \approx \infty$ ), a iz toga proizlazi da je brzina ohlađivanja vrlo mala ( $v_{ohl} \approx 0$ ), u takvom procesu dolazi do potpune difuzije atoma željeza i ugljika. Kod toplinske obrade pak dolazi do skraćivanja trajanja ohlađivanja, a s time i do sve nepotpunije difuzije [1].

Uz pomoć ovih parametara mogu se grafički prikazati svi toplinski postupci u tzv. dijagramu postupka ( $\vartheta - t$  dijagramu), koji je prikazan na slici 1.



Slika 1. Općeniti dijagram postupka toplinske obrade [1]

Na slici 1 su prikazana razdoblja:

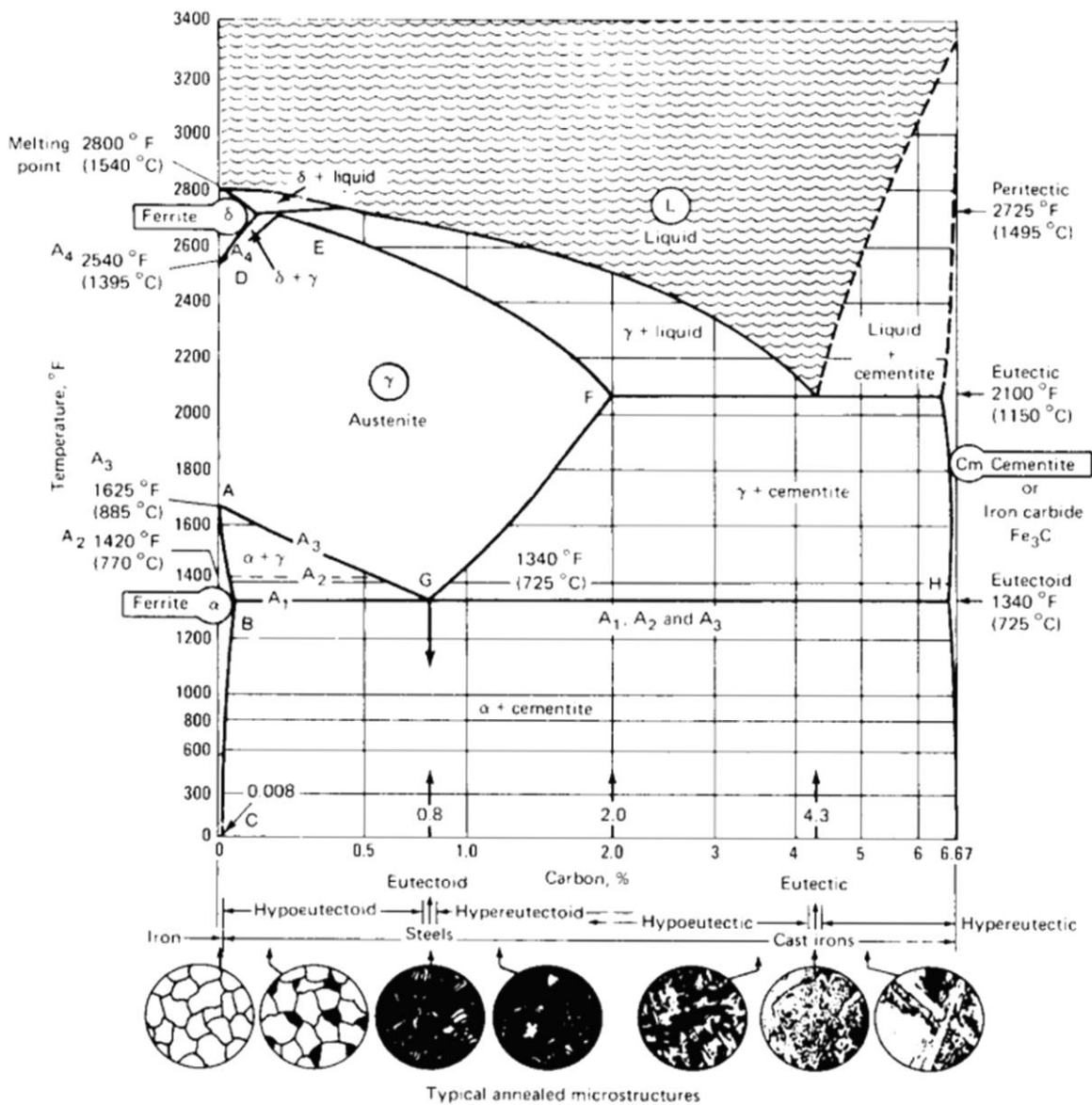
- **Ugrijavanje:** razdoblje do trenutka pri kojem površinski slojeve obrađivanog predmeta postignu temperaturu toplinske obrade -  $\vartheta_{TO}$ .
- **Progrijavanje:** razdoblje od trenutka kada površinski slojevi postignu  $\vartheta_{TO}$  do trenutka kada je temperatura po cijelom presjeku konstantna ( $\vartheta_{TO}$ ).
- **Grijanje:** Suma trajanja prethodna dva razdoblja.
- **Držanje:** Koliko predmet obrade boravi na  $\vartheta_{TO}$  od trenutka kada je progrijan do početka ohlađivanja.
- **Ohlađivanje:** Razdoblje snižavanja temperature jezgre i površine do temperature okoline [1].



## 2.2. Fe-Fe<sub>3</sub>C Dijagram i njegova važnost za toplinsku obradu čelika (Kaljenje)

Najčešće cilj kaljenja čelika nije dobivanje ravnotežnih faza. Neravnotežne faze rezultiraju većom čvrstoćom i tvrdoćom čelika, a često i optimalnom kombinacijom čvrstoće i žilavosti. Metastabilni dijagram (Slika 2) ne može dati uvid u neravnotežne faze koje nastaju bržim hlađenjem. Ipak, u fazi projektiranja postupka toplinske obrade koristi se i metastabilni dijagram za procjenu pravilne temperature austenitizacije [4].

Metastabilna kristalizacija nastaje pri relativno sporom hlađenju Fe–C legura, pri kojem će ugljik koji nije otopljen u kristalima mješancima željeza ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ) kristalizirati u obliku željeznog karbida Fe<sub>3</sub>C, cementita. Na slici 2 vidimo kristalizacije čelika s različitim udjelom ugljika, tijekom primarne kristalizacije iz taline Fe-C s manje od 4,3 %C izlučuju se kristalna zrna austenita s FCC jediničnom ćelijom (kao primarni austenit  $\gamma'$  i eutektički austenit  $\gamma^e$ ). Ako je u Fe-C leguri od 4,3 do 6,67%C iz taline se izlučuju kristali (primarnog cementita (Fe<sub>3</sub>C')). Na eutektičkoj temperaturi od 1147°C sva preostala talina kristalizira u obliku eutektika ledeburita (L) koji je po strukturi smjesa austenita i cementita (tj.  $L = \gamma^e + \text{Fe}_3\text{C}^e$ ). Tijekom hlađenja od eutektičke do eutektoidne temperature (723°C) kod Fe-C legura smanje od 0,8 %C nastupa sekundarna kristalizacija (FCC jedinične ćelije u BCC ćeliju) pri kojoj se iz austenita izlučuje primarni ferit (F, mikrostrukturalna faza željeza s BCC jediničnom ćelijom). Kod Fe-C legura s više od 0,8 %C iz austenita se izlučuje višak ugljika i spaja se s željezom u sekundarni cementit (Fe<sub>3</sub>C'') koji se izlučuje po granicama austenitnih zrna. Na eutektoidnoj temperaturi A1= 723°C sav nerastvoreni austenit pretvara se u eutektoid perlit, koji je po strukturi smjesa eutektoidnog ferita i cementita ( $P = \alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$ ) [5].



**Mikrostrukturne faze**

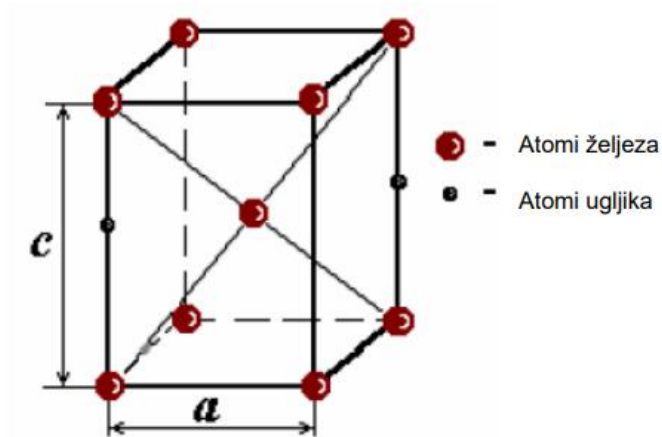
(konstituenti):  
 F ... ferit ( $\alpha'$ ,  $\alpha^{id}$ )  
 A ... austenit ( $\gamma'$ ,  $\gamma^c$ )  
 K ... karbid:(cementit)  
 ( $Fe_3C'$ ,  $Fe_3C^c$ ,  
 $Fe_3C''$ ,  $Fe_3C^{id}$ )

**Pseudo faze**

(konstituenti):  
 L ... ledeburit (eutektik)  
 $L = \gamma^c + Fe_3C^c$   
 P ... perlit (eutektoid)  
 $P = \alpha^{id} + Fe_3C^{id}$

Slika 2. Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram [4]

Promjene iz gore priloženog dijagrama vrijede samo kod sporog hlađenja. Međutim kada bi se čelik ohlađivao naglo, atomi ugljika ne bi uspjeli „pobjeći“ iz rešetke, već bi prouzročili distorziju u rešetki koja rezultira povišenom tvrdoćom i/ili čvrstoćom, ali i smanjenom duktilnošću. Ako je ohlađivanje dovoljno brzo formira se nova struktura - martenzitna struktura, iako je i ona u  $\alpha$  fazi. Takva martenzitna struktura nalazi se u novonastaloj tetragonalnoj kristalnoj rešetki (BTC), a vidimo ju na slici 3 [4].



Slika 3. Tetragonalna kristalna rešetka (BTC) [6]

Što je veći sadržaj ugljika u martenzitu, to je veći omjer  $c:a$ , tj. veća je tetragonalnost rešetke.

Čelik koji se nalazi u martenzitnoj strukturi je zakaljen, a postupak naglog hlađenja austenitiziranog čelika se naziva kaljenje [4].

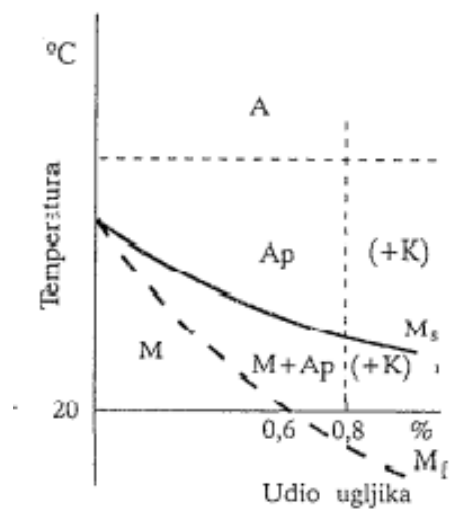
Kaljenje čelika se fizički temelji na:

- Sposobnosti željeza u  $\gamma$  – fazi da rastvori veće udjele ugljika (teorijski najviše 2,03 %C pri 1147 °C).
- Sposobnosti austenita da se pothladi, zadrži ugljik u čvrstoj otopini sve do temperature pri kojoj počinje pretvorba austenita u martenzit ( $M_S$  – Martensite start temperatura) [1].

Uvjeti zakaljivanja čelika su:

- $\alpha \rightarrow \gamma / \gamma \rightarrow \alpha$  pretvorba.
- Čelik mora imati dovoljno visoki udio ugljika,  $\geq 0,35\%$  C, da bi se smatrao konvencionalno zakaljivim (čelici s nižim udjelima ugljika su zakaljivi, ali povećanje tvrdoće nije dovoljno veliko da bi se smatrali konvencionalno zakaljivim).
- Čelik moramo ugrijati na optimalnu temperaturu austenitizacije (martenzit nastaje samo od austenita).
- Austenitizirani čelik treba hladiti („gasiti“) brzinom većom od gornje kritične brzine gašenja, kako bi se omogućilo prisilno zadržavanje atoma ugljika u martenzitnoj rešetci [1].

Na slici 4 je prikazan Uptonov dijagrama; na njemu uočavamo krivulje  $M_S$  (početak stvaranja martenzita) i  $M_F$  (završetak stvaranja martenzita), te  $A_p$  (pothlađeni austenit), novu fazu M (Martenzit), K (Karbid). Uptonov dijagram daje nam krivulje  $M_S$  i  $M_F$ , koje su nastale kao rezultat vrlo naglog ohlađivanja austenita i potiskivanja krivulja  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_{cm}$  (Slika 4) [1].



Slika 4. Prikaz Uptonova dijagrama [1]

Mikrostruktura čelika nakon kaljenja u ovisnosti o udjelu ugljika u čeliku prikazane su u tablici

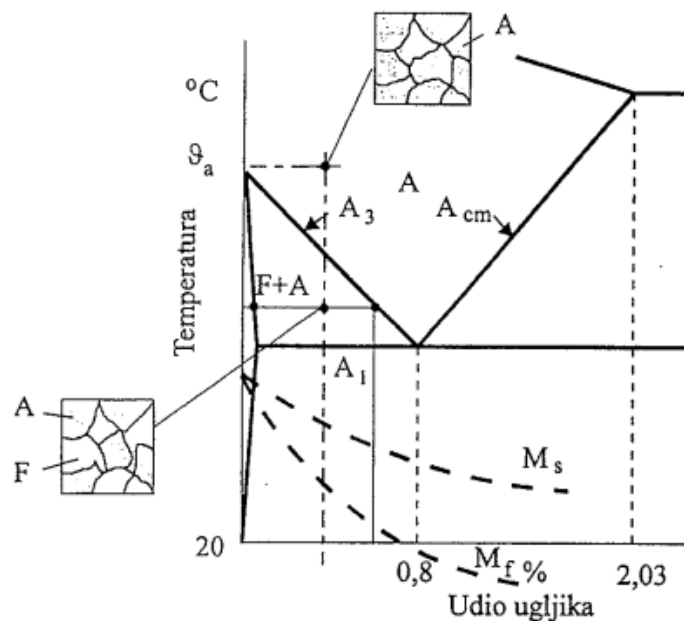
1.

Tablica 1. Mikrostruktura kaljenja ugljičnog čelika [1]

%C u čeliku	Nastale faze kod kaljenja (na 20°C)
- 0,6	M (Martenzit)
0,6 – 0,8	M + A <sub>z</sub> (Martenzit + zaostali(pothlađeni) austenit)
> 0,8	M + A <sub>z</sub> + K (Martenzit + zaostali austenit + karbid)

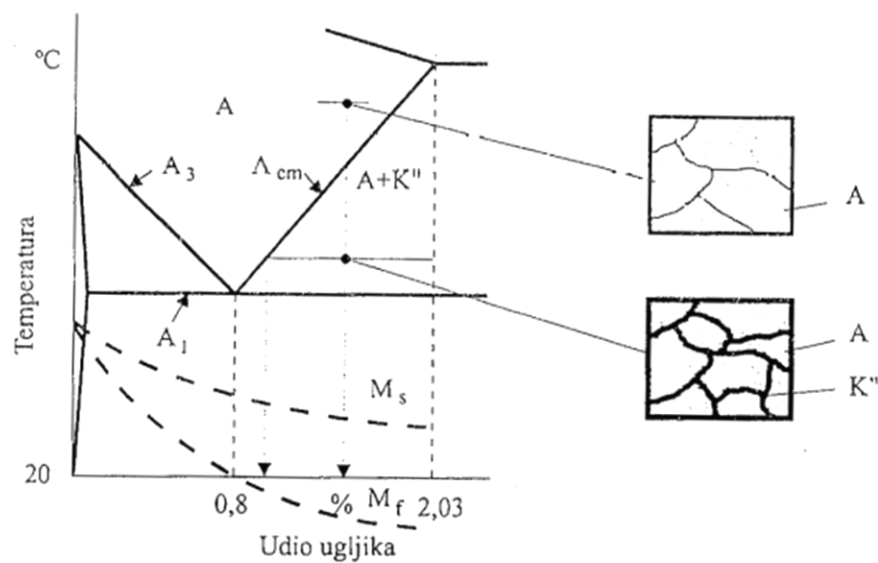
Da bi se neki ugljični čelik zakalio, potrebno ga je prvo austenitizirati. Potrebna se temperatura austenitizacije određuje iz Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagrama i to za:

- **Podutektoidne čelike (<0,8% C):** ako bi, na primjer, ugrijali podutektoidni čelik na temperaturu između krivulja A<sub>3</sub> i A<sub>1</sub> vidimo da bi struktura tako zagrijanog čelika bila A + F, a njegovim gašenjem bi se struktura sastojala od M + F (Slika 5). Pošto martenzit ima vrlo visoku tvrdoću (do 900 HV), a ferit vrlo nisku (oko 100 HV), koegzistencija konstituenata tako različitih svojstava ne bi bila povoljna. Iz toga zaključujemo da trebamo austenitizirati čelik malo iznad (30-70°C) temperature A<sub>3</sub> [1].



Slika 5. Određivanje temperature austenitizacije kod podutektoidnog čelika [1]

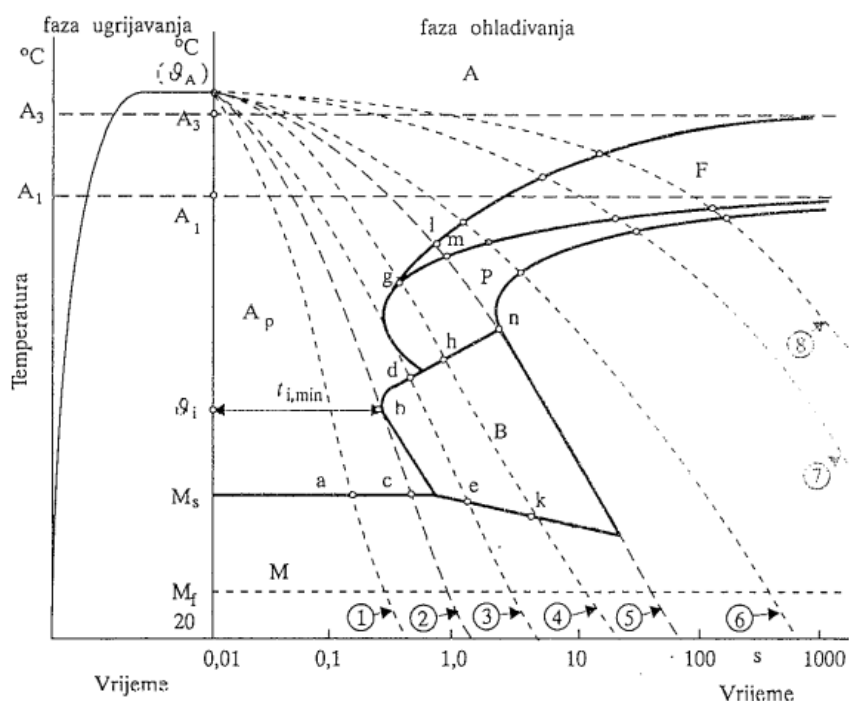
- Nadeutektoidne čelike (>0,8% C):** određivanje temperature austenitizacije za ovakve čelike prikazano je na slici 6. Ako bi ovakav čelik ugrijali na temperaturu između  $A_1$  i  $A_{cm}$  čelik bi doveli do strukturnog stanja austenita (A) i sekundarnog karbida ( $K''$ ). Gašenjem bi takav čelik postigao strukturu  $M + A_z + K''$ . Gdje bi martenzit imao visoku tvrdoću ( $\approx 900$  HV), isto tako i karbid ( $\approx 100$  HV), dok bi zaostali austenit imao manju (400 HV). Ugrijavanjem ovakvog čelika na temperaturu iznad  $A_{cm}$ , u područje gdje je prisutan samo austenit, čelik se pretvara dijelom u martenzit, ali veliki dio ostaje kao zaostali austenit. Iz prethodno napisanog zaključujemo da temperatura austenitizacije za nadeutektoidne čelike treba biti malo iznad krivulje  $A_1$  (50-70°C) [1].



Slika 6. Određivanje temperature austenitizacije kod nadeutektoidnog čelika [1]

### 2.3. TTT dijagram za kontinuirano hlađenje

Kako bi se još jasnije objasnio utjecaj promjena brzine hlađenja na samu promjenu mikrostrukture koristi se TTT (eng. Time – Temperature – Transformation) dijagram. Takvi dijagrami služe samo za jedan čelik. U dijagramu su također ucrtane različite krivulje ohlađivanja. Valja naglasiti kako ovakav dijagram vrijedi samo za ohlađivanje, a nikako ne za ugrijavanje. Jedna takva krivulja za podeutektoidni čelik prikazana je na slici 7. Ovakav tip TTT dijagrama se ujedno naziva i kontinuirani TTT dijagram, pošto prati promjenu mikrostrukture pri kontinuiranom ohlađivanju (za razliku od izotermnog) [4].



Slika 7. TTT dijagram za podeutektoidni čelik [1]

Dijagram sa slike 8 ima na sebi ucrtano osam krivulja ohlađivanja, a brzina ohlađivanja bi se izračunala kao tangens kuta nagiba tangente u točkama krivulje prema apcisi [4].

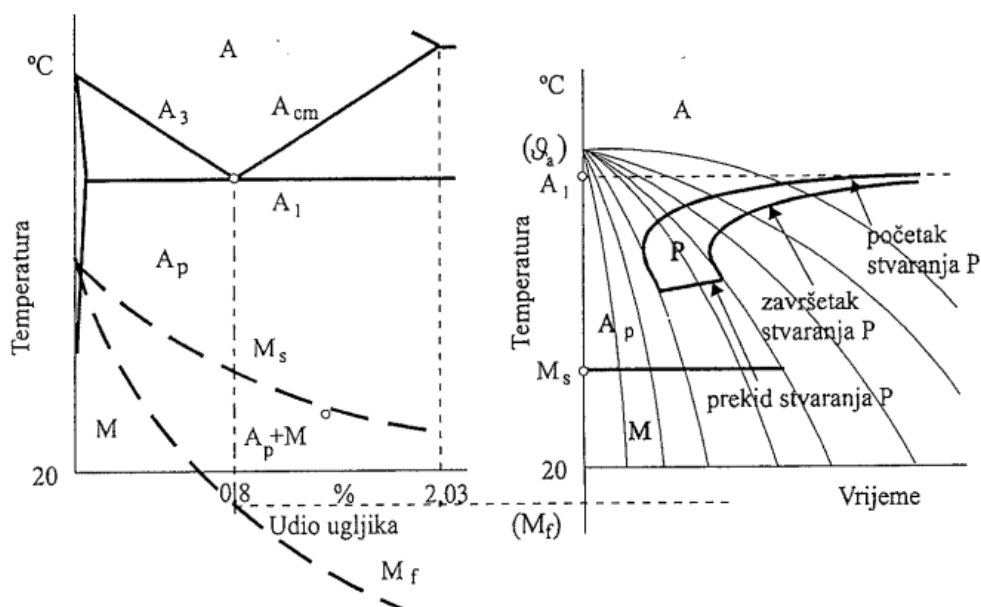
Neki od primjera promjena prema dijagramu na slici 8:

- (1) Čelik ugrijan na temperaturu austenitizacija (malo iznad  $A_3$ ) i vrlo intenzivno gašen. Sve do točke a imamo potplađeni martenzit, a u točki a počinje pretvorba u martenzit i završava na krivulji  $M_f$ . Ukoliko čelik ima 0,6% C ili manje, mikrostruktura nakon gašenja će biti 100 % martenzitna, tvrdoća će biti maksimalna za taj čelik, a hlađenje kojim se postiže takva mikrostruktura naziva se nadkritično gašenje.

- (2) Čelik ugrijan na temperaturu austenitizacije koji bi se gasio tako da krivulja gašenja tangira krivulju početka pretvorbe (točka b) i završava na krivulji  $M_f$  (100% M) naziva se gornja kritična krivulja gašenja, ona koja osigurava da  $100\% A \rightarrow 100\% M$ . Takva krivulja predstavlja kritičnu brzinu gašenja ( $v_{kg}$ ).
- (3) Čelik ugrijan na temperaturu austenitizacije i ohlađuje se prema krivulji 3: u točki d počinje stvaranje bainita (B), traje do točke e gdje počinje stvaranje martenzita i završava kod temperature  $M_f$ . Bainit je vrsta niskotemperaturnog eutektoida (sastoji se kao i perlit (P) od ferita i cementita, ali je igličaste mikrostrukture). Ima dobra svojstva, tvrdoću (400-600 HV) i visoku žilavost. Kontinuiranim gašenjem nije moguće postići takvu mikrostrukturu koja bi bila 100% B, nego samo smjese (B+M, P+B+M, F+P+B+M) pa njegove karakteristike ne dolaze do izražaja.
- (5) Ova krivulja je krivulja kod koje se više ne pojavljuje martenzit u mikrostrukturi. Naziva se donja kritična krivulja gašenja. To je ono najintenzivnije gašenje kod kojeg se u strukturi ne postiže niti najmanji udio martenzita [1].

Kod slučajeva gornjeg kritičnog ili nadkritičnog gašenja postiže se tvrdoća u skladu sa Burns-ovim dijagramom (Slika 10).

Istim razmatranjima prikazanim u tekstu iznad dolazimo i do dijagrama za eutektoidni čelik, prikazan na slici 8 i nadeutektoidni čelik.



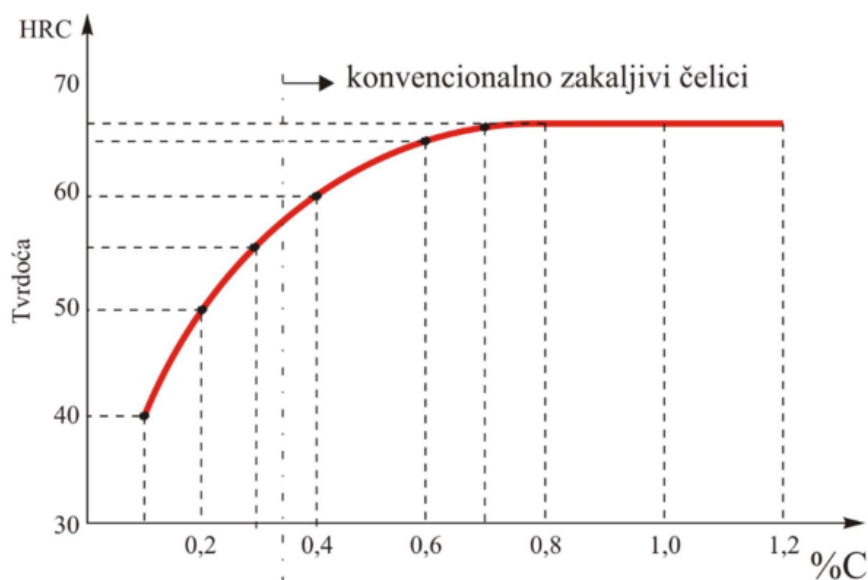
Slika 8. Primjer TTT dijagrama (kontinuiranog) za eutektoidni čelik [1]



## 2.4. Zakaljivost i prokaljivost čelika

Kaljivost se definira kao svojstvo čelika da se naglim ohlađivanjem (gašenjem) s temperature austenitizacije zakali (što viša tvrdoća površine) i prokali (jednolika tvrdoća kroz cijeli poprečni presjek). Zakaljivost je svojstvo čelika da se postigne maksimalna moguća površinska tvrdoća. Zakaljivost ovisi o udjelu ugljika u čeliku, što je veći udio ugljika to će zakaljivost čelika biti bolja. Konvencionalno zakaljivima smatraju se čelici s udjelom ugljika većim od 0,35% jer postižu dovoljnu tvrdoću s aspekta otpornosti na trošenje. Legirajući elementi u čeliku ne utječu na tvrdoću nakon gašenja, nego samo na iznos gornje kritične brzine gašenja.

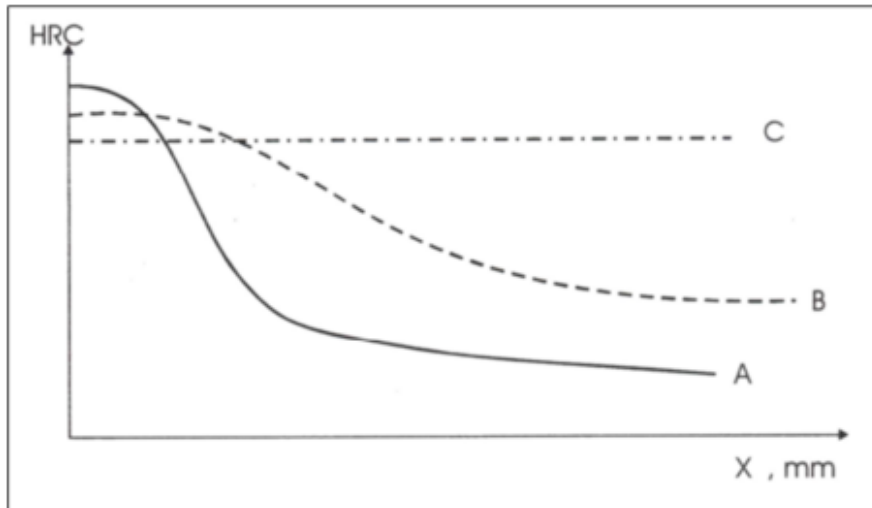
Kontrola kvalitete zakaljenog predmeta se, u praksi, provodi mjerenjem tvrdoće nakon gašenja i usporedbom dobivenog iznosa s tvrdoćom prema Burnsovom dijagramu, prikazanom na slici 9 [7].



Slika 9. Burnsov dijagram [8]

Prokaljivost čelika je svojstvo čelika da postigne što je moguće jednoličniji raspored tvrdoće po presjeku predmeta nakon kaljenja. Čak i kada imamo predmet obrade koji je relativno malih dimenzija, brzina odvođenja topline nije jednaka na cijelom presjeku. Toplina se uvijek odvodi brže od površinskih slojeve u odnosu na unutrašnjost predmeta obrade. Kada hladimo (gasimo) predmet obrade u nekom mediju (voda, ulje) brzina gašenja, i površine i unutrašnjosti, se smanjuje kako se dimenzije predmeta povećavaju te se time smanjuje mogućnost postizanja kritične brzine gašenja. Kako bi izbjegli ovaj problem čelik gasimo u mediju koji ima veliku brzinu odvođenja topline. Čak i uz ovu mjeru mnogi čelici imaju ograničenja vezana uz maksimalnu dimenziju uz koju je izvedivo kaljenje. Prokaljivost raste s povećanjem sadržaja legiranih elemenata izuzev kobalta [7].

Prokaljivost se ispituje Jominy metodom, kod koje se na uzorku propisanih dimenzija, nakon ugrijavanja gasi čelo. Na uzorku se postižu različite brzine ohlađivanja, time i mikrostrukture i tvrdoće koje se mjere. Iz dobivenih iznosa tvrdoće formira se „Jominy krivulja“ koja je pokazatelj tvrdoće u ovisnosti o udaljenosti od čela uzorka (gdje je mikrostruktura 100%M – maks. tvrdoća). Jedna takva krivulja je prikazana na slici 10, kod koje imamo 3 čelika (A,B i C), od kojih je C najviše prokaljiv, B dosta manje, a A je najmanje prokaljiv [9].



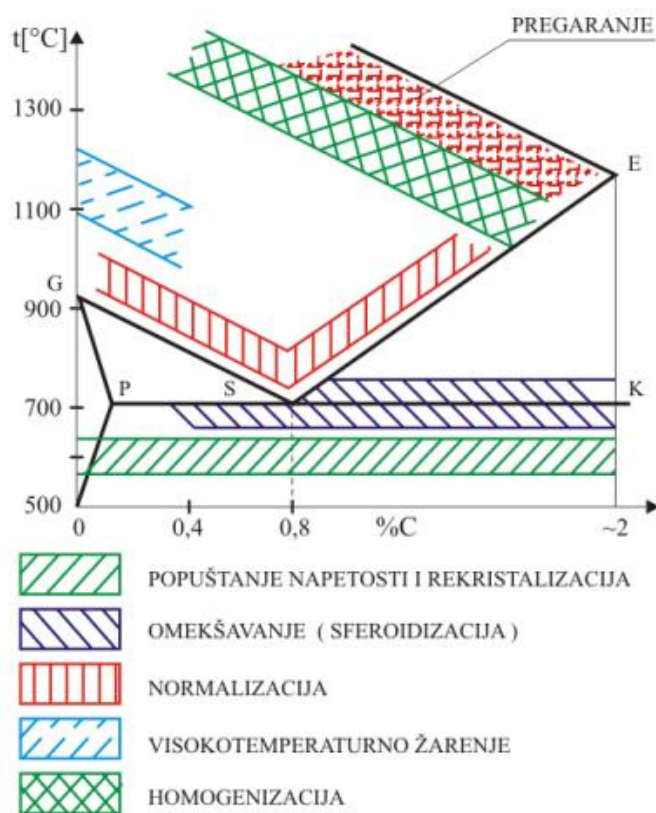
Slika 10. Jominy krivulja za tri različita čelika (A,B,C) [9]

## 2.5. Ostali postupci toplinske obrade cjelovitog volumena

### 2.5.1. Žarenje

Postupci žarenja primjenjuju se u preradi raznih metala i njihovih legura u cilju postizanja specifičnih tehnoloških svojstava (obradljivost). Postoji relativno velik broj ovakvih postupaka, posebni kod čelika se primjenjuje mnogo vrsta žarenja. Može se reći da je kaljenje postupak kojim se čelik udaljava od stanja metastabilne ravnoteže, a postupci žarenja, suprotno od toga, dovode čelik bliže stanju metastabilne ravnoteže. To znači da će se čelik podvrgavati nekom od postupaka žarenja u slučaju da se mikrostruktura čelika treba „približiti“ strukturi Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagrama za metastabilnu kristalizaciju [1].

Postupci žarenja se dijele na dvije skupine, prva skupina su oni postupci koji se provode ispod temperature A1 (rekristalizacijsko, žarenje za redukciju zaostalih naprezanja), a druga su oni postupci su oni koji se provode oko ili iznad temperature A1 (sferoidizacijsko, normalizacijsko, žarenje na grubo zrno, homogenizacijsko) [1]. Postupci žarenja čelika i njihova temperaturna područja pregledno su prikazani u okviru Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagrama prikazanog na slici 11.



Slika 11. Temperaturna područja žarenja čelika [10]

**Normalizacijsko žarenje:** Postupak ugrijavanja (za podeutektoidne čelike 30-70°C iznad temperature A3) i potom podkritičnog ohlađivanja, tj. Sporije od donje kritične brzine ohlađivanja (u pravilu na zraku) s glavnom svrhom postignuća sitnozrnate i jednolične mikrostrukture. Normalizacija se primjenjuje kada se kod postupaka zavarivanja, kovanja i valjanja pogrubu kristalno zrna, čime mu se snižava žilavost [1].

**Rekristalizacijsko žarenje:** Provodi se nakon hladnog oblikovanja (npr. valjanja) tijekom kojega se promijenila tekstura materijala (spljoštena su kristalna zrna) i nastupilo je hladno deformacijsko očvrnuće. Cilj rekristalizacijskog žarenja je povećanje duktilnosti (smanjenje pri hladnom deformiranju) čelika postizanjem poligonalnih kristalnih zrna [1].

**Sferoidizacijsko žarenje:** Provodi se radi omogućavanja lakše obrade čelika (prvenstveno rezanjem i deformiranjem). Ovim postupkom se, kod čelika, vrši pretvorba lamelnog cementita (eutektoidni  $\text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$  ili sekundarni  $\text{Fe}_3\text{C}''$ ) u kuglasti [9x]. Tim se postupkom dobiva najmekše stanje čelika i najlakša obradivost rezanjem ili deformiranjem, sferoidizirano stanje je međustanje čelika te se nakon provedene mehaničke obrade čelik mora drugim toplinski obradama dovesti u željeno strukturno stanje radi postizanja zahtijevanih eksploatacijskih svojstava. Najčešće se provodi za nadeutektoidne čelike [1].

**Žarenje za redukciju zaostalih napreznja:** Ovakva vrsta žarenja izvodi se za čelike pri temperaturama od 400 do 650 °C u svrhu razgradnje zaostalih napreznja (napetosti), nastalih tijekom deformiranja, pri obradi odvajanjem čestica ili pri prebrzom ohlađivanju nakon žarenja, zavarivanja itd. Pri ovom postupku ne dolazi do bitnijih mikrostrukturnih promjena ili promjena mehaničkih svojstava strojnih dijelova. Strojni dijelovi se pri žarenju drže najčešće 2 sata, a nekada i više, a ohlađuju se vrlo sporo (kako ne bi došlo do novih toplinskih napreznja). Zaostala napreznja kod strojnih dijelova često izazivaju deformacije, a nerijetko i lom. Iz tog razloga važno je reducirati što više zaostalih napreznja [1].

## 2.5.2. Popuštanje

Postupak toplinske obrade koji se izvodi nakon kaljenja zagrijavanjem predmeta obrade na temperaturu ispod  $A_1$ . Takav postupka se izvodi radi povećanja žilavosti martenzita (iako minimalno) što također rezultira uklanjanjem zaostalih naprezanja. Kod predmeta koji nakon kaljenja nisu popušteni, u eksploataciji vrlo često dolazi do loma. Posljedica popuštanja je smanjenje tvrdoće čelika uz minimalno povećanje žilavosti. Ovisno o temperaturi izvođenja postupka popuštanje se dijeli na:

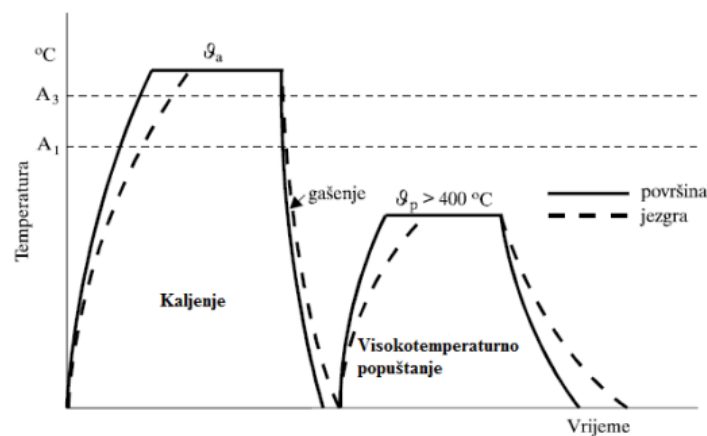
**Niskotemperaturno:** temperatura popuštanja manja od  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Srednjetemperaturno:** temperatura popuštanja od  $220^{\circ}\text{C}$  do  $400^{\circ}\text{C}$

**Visokotemperaturno:** temperatura popuštanja viša od  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  [10].

## 2.5.3. Pobljšavanje

Postupak TO čelika koji se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Provođi se s ciljem postizanja visoke granice razvlačenja, vlačne čvrstoće uz dobru žilavost, istežljivost i dinamičku izdržljivost. Primjenjuje se za strojne dijelove koji su mehanički opterećeni i zahtijevaju otpornost na intenzivno trošenje. Kroz ovaj se postupak provode samo podeutektoidni čelici sa udjelom ugljika od  $0,3 - 0,6\%$ . Dijagram postupka pobljšavanja prikazan je na slici 12 [10].



Slika 12. Dijagram postupka pobljšavanja čelika [10]

### **3. Toplinske i toplinsko - kemijske obrade površinskih slojeva (postupci inženjerstva površina)**

Osnovna značajka postupaka inženjerstva površina je da se prethodno pripremljeni predmet obrade naknadno tretira jednim ili više postupaka ili površinskih obrada. Na takav se način dobiva kombinacija svojstava površine i jezgre strojnog dijela koju nije moguće postići primjenom samo jednog homogenog materijala. Nekada su se željena svojstva materijala (otpornost na trošenje, korozijska postojanost, mali faktor trenja ...) dobivala najčešće promjenom svojstava osnovnog (T.O. cjelovitog volumena) materijala, no sve su veći zahtjevi na strojne dijelove koje je nemoguće postići korištenjem samo jednog materijala već ih je potrebno postići kombinacijom svojstava u strojnom dijelu korištenjem površinskih obrada. Površinska svojstva mogu se mijenjati promjenom sastava i strukture površine ili na način da se na površinu nanese sloj drugog materijala. Primjenom postupaka inženjerstva površina se dobivaju površinski slojevi koji su bitno različiti od jezgre obrađivanog predmeta i po svojstvima i po strukturi [11].

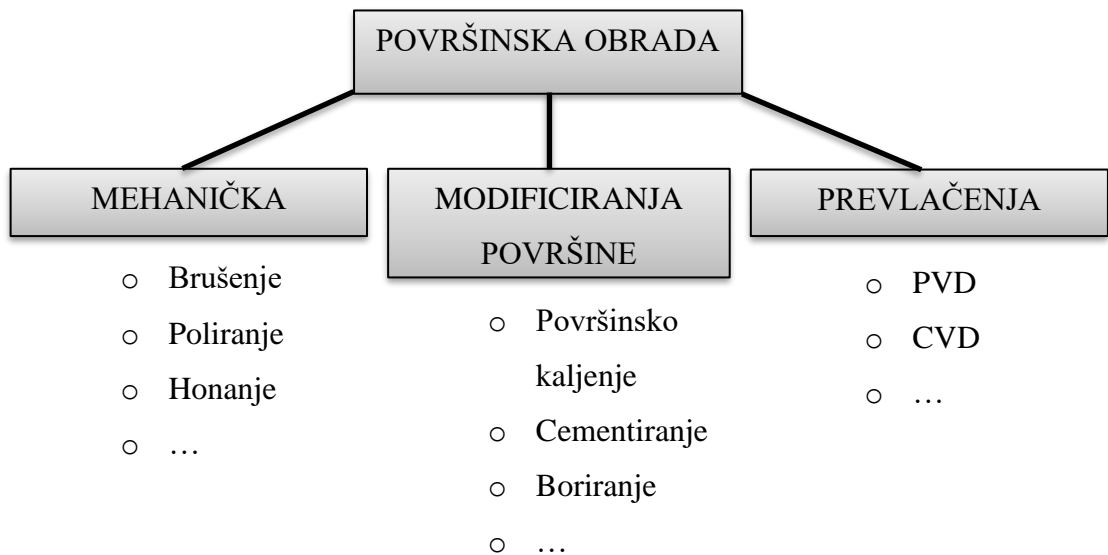
Brojni su postupci i podjele površinske obrade te nije jednostavno izabrati optimalan postupak za neki konkretan slučaj obrade. Izbor ovisi o analizi očekivanog ponašanja obrađivanog predmeta u odgovarajućim uvjetima, s posebnom pažnjom na mehaničku, toplinsku i kemijsku stabilnost i dimenzije obrađivanog predmeta. Još jedan od faktora koji je bitan pri izboru optimalnog postupka je i cijena. Svaki postupak ima svoje prednosti i nedostatke te ne postoji univerzalni postupak površinske obrade [11].

#### **3.1. Podjela postupaka površinske obrade**

Površinska obrada dijeli se:

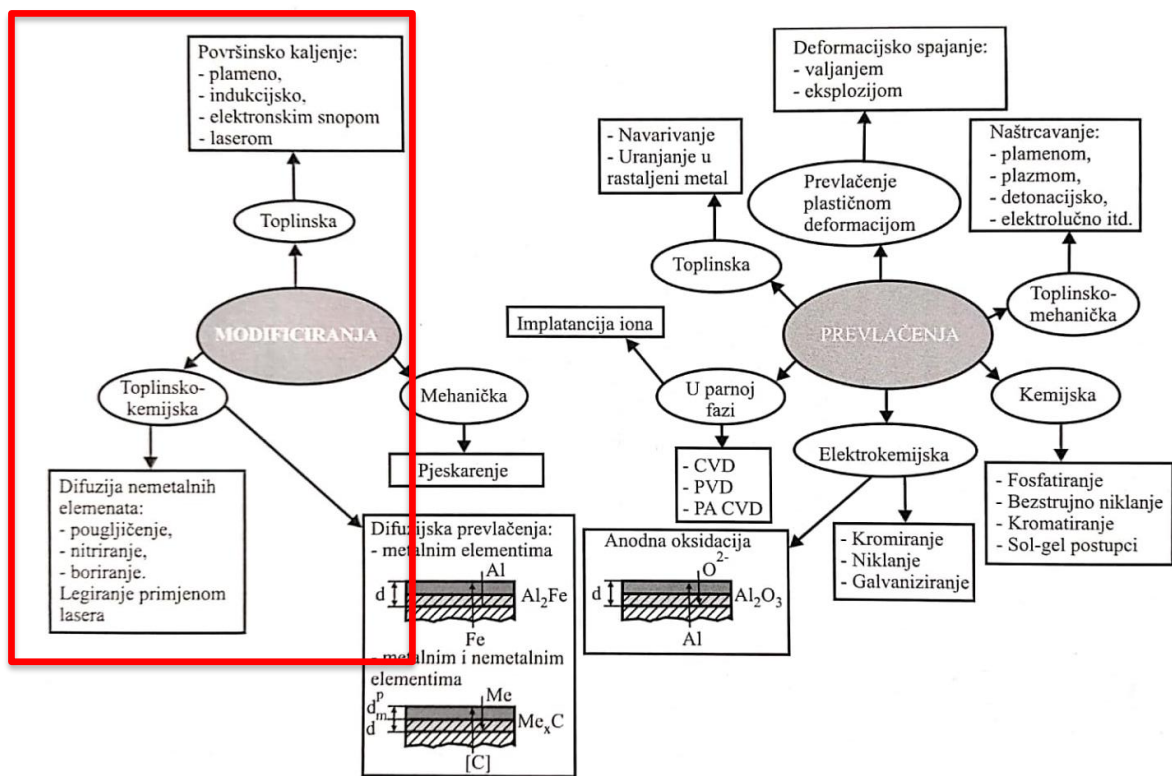
- Mehaničke postupke
- Modificiranje površina
- Prevlačenje [11].

Podjela na ova tri načina površinske obrade prikazana je na slici 13.



Slika 13. Jedna od podjela površinske obrade materijala

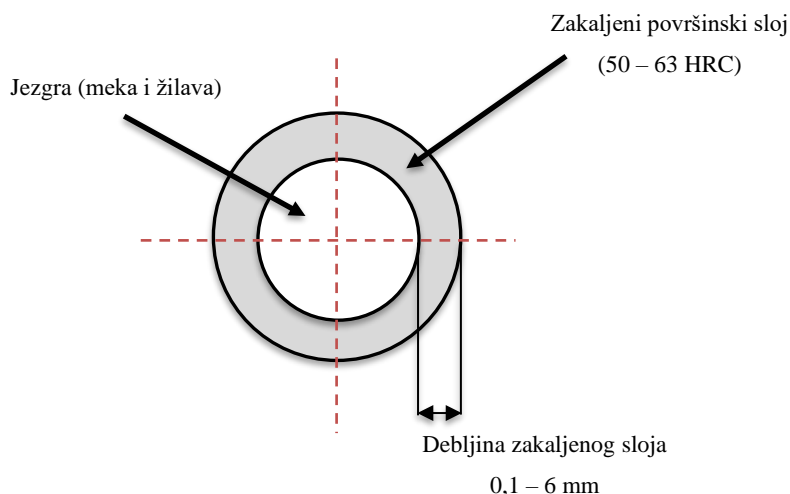
Na slici 14 prikazan je kompletan shematski prikaz podjele postupaka prevlačenja i modificiranja površina. Postupci modificiranja uključuju mehaničke, toplinske i toplinsko kemijske postupke. U nastavku ovog rada će naglasak biti upravo na toplinskim (indukcijsko kaljenje) i toplinsko kemijskim postupcima modificiranja površina.



Slika 14. Shematski prikaz podjele modificiranja i prevlačenja površina [11]

## 3.2. Površinskim kaljenje

Ovakvom vrstom modificiranja postiže se, u površinskom sloju obrađivanog predmeta, martenzitna mikrostruktura, dok se u jezgri obrađivanog predmeta zadržava početna mikrostruktura. Kod površinskog kaljenja se zagrijavanje na temperaturu austenitizacije provodi samo u tankom površinskom sloju. Nakon zagrijavanja slijedi intenzivno gašenje (nadkritičnom brzinom hlađenja) pri čemu se površinski sloj zakali, a središnji ostaje u početnom stanju jer je praktično neugrijan. Površinski sloj ima visoku tvrdoću, povećanu dinamičku čvrstoću, povećanu otpornost na trošenje, visoku granicu puzanja i povećanu otpornost na udarno opterećenje. Zahvaljujući jezgri koja je ostala u polaznom stanju postiže se dobra dinamička izdržljivost površinski kaljenih strojnih dijelova. Na slici 15 je prikazan shematski prikaz površinski zakaljenog obratka [11].



Slika 15. Shematski prikaz površinski zakaljenog obratka

Površinsko kaljenje obzirom na način ugrijavanja ili izvor energije dijelimo na indukcijско, plameno, elektronskim i laserskim snopom. Kod plamenog i indukcijскоg kaljenja se gašenje provodi primjerenim sredstvom, dok kod kaljenja elektronskim i laserskim snopom dolazi do samozakaljenja [11].

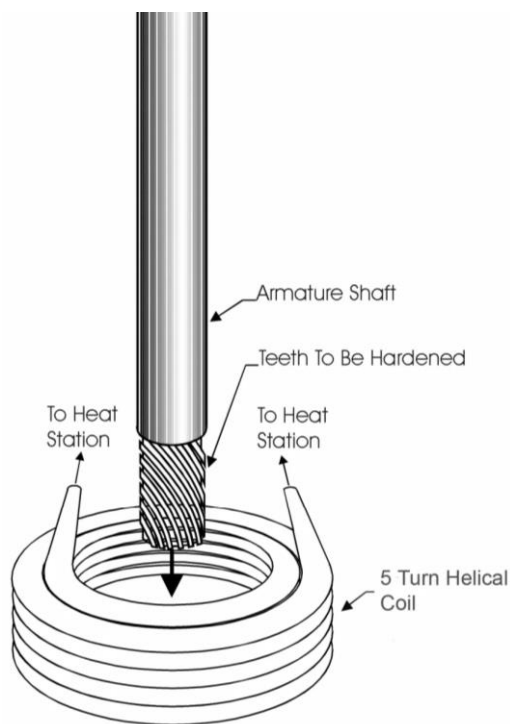
### 3.2.1. Inducijско kaljenje

Za razliku od ostalih postupaka površinskog kaljenja, pri indukcijском se ugrijavanje vrši induciranjem struje u površinskom sloju obratka, a vrijeme ugrijavanja je vrlo kratko. Postoji mogućnost kaljenja relativno kompliciranih obratka, oksidacija i razugljičenje su zanemarivi, a i uvjeti za rad su bolji. Ovo je najčešći oblik površinskog kaljenja zbog svoje produktivnosti i dobrih



svojstava zakaljenog sloja. Koristi se kod obrade osovine, vratila, zupčanika, lopatica turbina, alata itd. Glavni razlozi primjene ovog postupka su: povećanje dinamičke izdržljivosti i čvrstoće i povećanje otpornosti na trošenje. Kod postupka indukcijuskog kaljenja zaostala naprezanja su gotovo uvijek tlačna, što ih čini veoma poželjnim [11].

Postupak indukcijuskog kaljenja se temelji na prolaženju izmjenične struje induktorom ili zavojnicom, oko kojeg se stvara magnetsko polje. Kada se u takvo magnetsko polje postavi obratka u kojem se induciraju „vrtložne struje“, one se ne induciraju ravnomjerno po poprečnom presjeku već se najveća gustoća struje postiže na samoj površini – tzv. „skin efekt“ (zbog toga se do visokih temperatura ugriju površinski slojevi, dok jezgra ostaje hladna). Proces indukcijuskog kaljenja prikazan je na slici 16 [12].

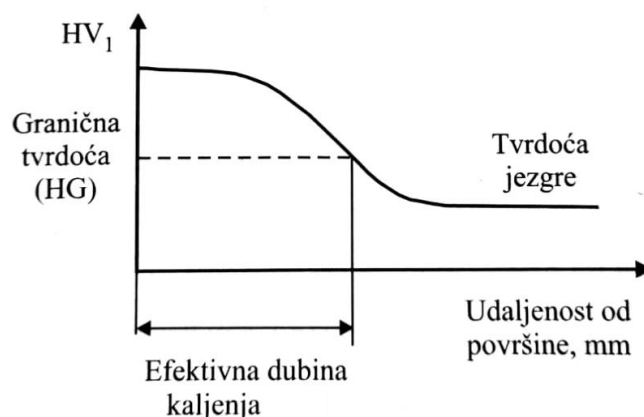


Slika 16. Indukcijsko kaljenje vratila [12]

Indukcijski se može kaliti skupina čelika za plameno i indukcijusko kaljenje, zatim svi ugljični čelici za poboljšavanje, niskolegirani čelici za poboljšavanje (42CrMo4), neki alatni čelici za rad u hladnom stanju (npr. 100Cr6), neki nehrđajući čelici, sivi, čelični i nodularni lijev. Preporučljivo je da polazna mikrostruktura bude u poboljšanom ili normaliziranom stanju [11].

Određivanje dubine zakaljene zone kod indukcijuskog kaljenja ispituje se mjerenjem tvrdoće Vickersovom metodom HV1 (provodi se opterećenjem silom koji je proizveo uteg mase 1 kg), prema normi DIN EN 10328 efektivna dubina kaljenja se nalazi na udaljenosti od površine na kojoj je postignuto 80% maksimalne tvrdoće površine. Efektivna dubina kaljenja (SHD) je ona

udaljenost od površine obratka prema sloju gdje je tvrdoća jednaka po vrijednosti specificiranoj graničnoj tvrdoći (HG). Određivanje efektivne dubine kaljenja prikazano je na slici 17 [11].



Slika 17. Određivanje efektivne dubine indukcijskog kaljenja

Na dubinu kaljenja čelika utječu parametri kaljenja (frekvencija vrtložnih struja), a na samu tvrdoću zakaljenog sloja utječe udio ugljika u čeliku. Čeliku sa udjelom ugljika do 0,8% prokaljivost raste. Temperature austenitizacije su više za 50 °C radi brzog ugrijavanja koje podiže temperature A1 i A3. Mikrostruktura zakaljenog sloja ovisi o brzini ugrijavanja i postignutoj maksimalnoj temperaturi. Maksimalna tvrdoća koja se postiže pri indukcijski kaljenim predmetima je 2 – 3 HRC viša od tvrdoće koja se postiže običnim kaljenjem, zbog sitnozrnate mikrostrukture postignute zahvaljujući velikoj brzini ugrijavanja [11].

Za indukcijsko kaljenje se u današnje vrijeme koriste moderni indukcijski generatori velikog raspona frekvencija i snaga. Za provođenje postupka nužni su induktor i prskalica, induktor za prijenos snage generatora na površinski sloj i prskalica za odgovarajuće uvjete hlađenja [11].

- Prednosti indukcijskog kaljenja su: visoka produktivnost, mala potrošnja energije, velika kvaliteta zakaljenog sloja, ograničeno lokalno otvrdnjavanje, automatizacija procesa, viša dinamička čvrstoća u odnosu na uobičajeno kaljenje, mala deformacija itd.
- Nedostaci indukcijskog kaljenja su: skupa oprema, ovisnost oblika induktora o obliku obrađivanog predmeta, nemogućnost kaljenja određenih vrsta čelika, otežana kontrola temperatura [13].

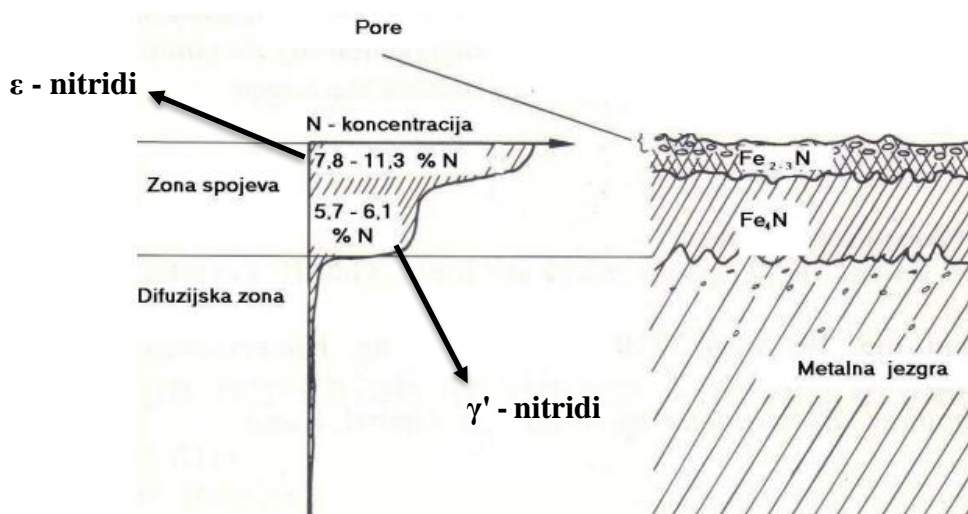
### 3.3. Toplinsko – kemijsko modificiranje

#### 3.3.1. Nitriranje i nitrokarburiranje

Nitriranje i nitrokarburiranje su postupci toplinsko – kemijskog modificiranja površine kod kojih se površinski sloj obogaćuje dušikom, odnosno kod nitrokarburiranja dušikom i ugljikom, pri čemu se na površini stvara zona spojeva, a ispod je difuzijska zona. Nakon provedenog nitriranja očekujemo povišenu površinsku tvrdoću, povećanu otpornost na trošenje, povećana korozivna otpornost, postojanost materijala na visokim temperaturama, sve to uz nikakve ili vrlo male deformacije, kod nitrokarburiranja očekujemo sva ta svojstva uz smanjenje žilavost kod postupka QPQ (u manjoj mjeri) [13].

Ovakvi se postupci provode u solnim kupkama, u plinu i u plazmi, a koriste se pri izradi zupčanika, vratila, osovina, kalupa za preradu polimera i kalupa za tlačni lijev, matrica, žigova, itd. [13] U pravilu, pogodni za nitriranje, su svi čelici, sivi i čelični lijev i titanove legure. Ugljični čelici nisu preporučljivi za postupak plinskog nitriranja, zbog stvaranja krhke površine s malim porastom tvrdoće u difuzijskoj zoni [11].

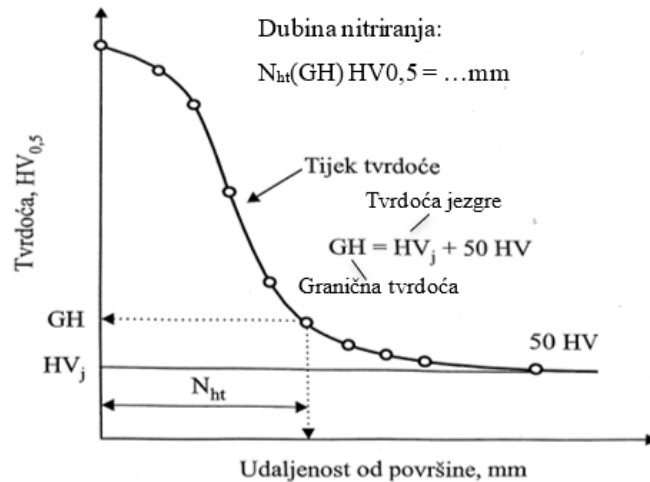
Oba postupka se provode ispod temperature austenitizacije ( $A_1$  u  $Fe_3C$  dijagramu). Uobičajeno je da su temperature kod nitriranja niže od  $590\text{ }^{\circ}C$  (Iznad te temperature se stvaraju krhki nitridi  $Fe-N$ ). To znači da u željeznim legurama neće biti nikakve prekrystalizacije (pretvorbe) što za posljedicu ima toplinsku obradu bez deformacije. Nakon provedenog postupka nitriranja dobiveni površinski sloj sastoji se od zone spojeva (na površini) i difuzijske zone (bliže jezgri). Ove su zone vidljive na slici 18.



Slika 18. Shematski prikaza zone spojeva i difuzijske zone kod postupaka nitriranja i nitrokarburiranja [13]

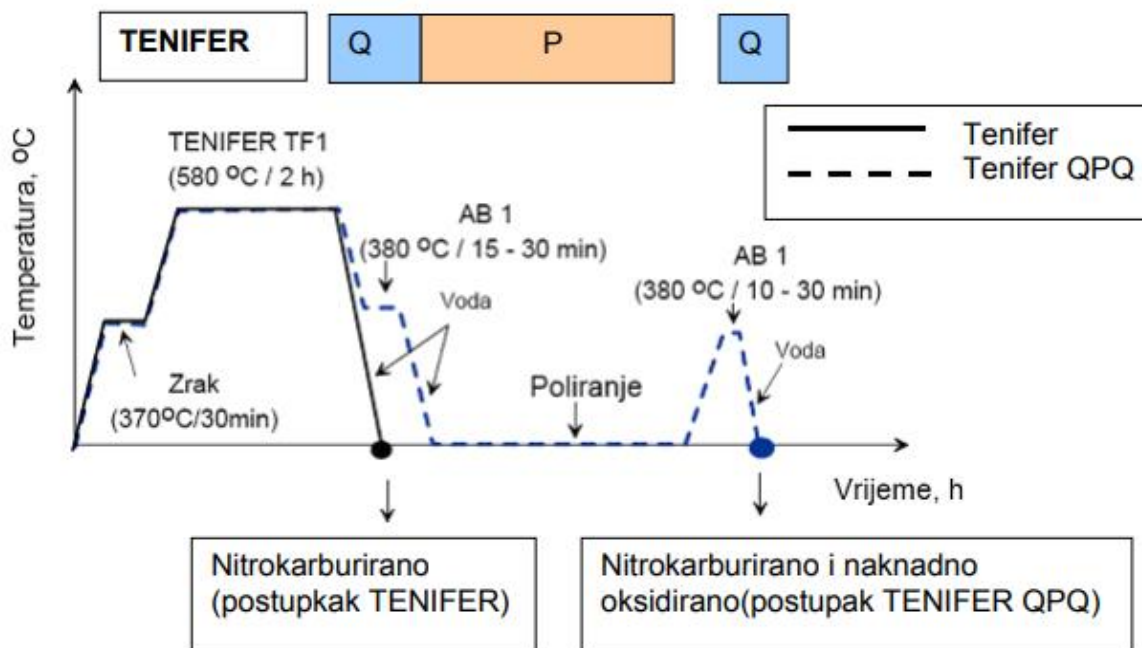
Do stvaranja zone spojeva dolazi zbog male topivosti ugljika u feritu pa u samom početku procesa nitrokarburiranja dolazi na površini do stvaranja sloja koji se sastoji samo od spojeva željeza i eventualno legirajućih elemenata, sa N i C, te se stvaraju nitridi i karbidi. Kao posljedica stvaranja nitrida sa željezom ( $\text{Fe}_2\text{N}$ ,  $\text{Fe}_4\text{N}$ ) navodi se povećana otpornost na trošenje. U zoni spojeva su zbog visokog sadržaja dušika prisutni karbonitridi i/ili nitridi ( $\gamma' - \text{Fe}_4\text{N}$ ,  $\epsilon - \text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ,  $\text{Fex}(\text{C},\text{N})$ ) u tolikoj mjeri, da je struktura tog sloja bitno različita od ostalog područja: kemijskim sastavom, svojstvima i izgledom. Zona spojeva sastoji se od  $\gamma'$  i  $\epsilon$  faze.  $\gamma'$  - nitridi imaju udio dušika od 5,7 do 6,1 %, te se nalaze u obliku FCC kristalne rešetke i iznad 650 °C disociraju. Željezni se nitridi tipa  $\epsilon$  nalazi u obliku HCP kristalne rešetke i sadrže od 7,8 do 11,3 % N. Najčešće se pojavljuju kod nitriranja u solnim kupkama.  $\epsilon$  – faza je žilava, te je stoga poželjna pogotovo za zaštitu od adhezijskog trošenja (Zbog HCP kristalne rešetke). Difuzijska zona nastavlja se na zonu spojeva i sadrži osim elemenata N,C,O u čvrstom ili djelomično precipitiranom stanju i nitride. Postupnim hlađenjem ili naknadnim ugrijavanjem čelika (namjerno ili postupak post-oksidacije) moguće je difuzijsku zonu uočiti zbog izlučivanja igličastih nitrida i karbonitrida. Zona spojeva je kod nitrokarburiranja, je vrlo bitna za visoku otpornost na trošenje bez obzira na svoju malu debljinu (služi kao klizni sloj). Zato je jedan od zahtjeva kod nitrokarburiranja, ispravna i dovoljno debela zona spojeva [13].

Efektivnu dubinu nitriranja / nitrokarburiranja ( $N_{ht}$ ) čini zona spojeva i onaj dio difuzijske zone kod kojega je tvrdoća povišena u odnosu na jezgru, a predstavlja ju okomita udaljenost od površine nitrokarburiranog predmeta do mjesta na kojem tvrdoća odgovara prethodno utvrđenoj graničnoj vrijednosti. valja naglasiti da se ukupna dubina nitrokarburiranja (ukupna dubina difundiranja ugljika u čelik) razlikuje od dogovorene dubine nitrokarburiranja ( $N_{ht}$ ). Tvrdoća se mjeri na već pripremljenom uzorku, od ruba prema jezgri. Mjerenje se izvodi Vickers - ovom ili Knoop – ovom metodom sa silom utiskivanja 4,9 N (HV0,5). Potrebno je izmjeriti dva niza tvrdoća na jednom uzorku te se dobiveni rezultati ucrtavaju u dijagram. Potom se određuje sama dubina nitrokarburiranja na način da je to okomita udaljenost od ruba do mjesta na kojem je granična vrijednost jednaka tvrdoći jezgre + 50 HV prema DIN-u 50190 [13]. Dobivanje efektivne dubina nitriranja prikazano je na slici 19.



Slika 19. Dobivanje efektivne dubine nitiranja ( $N_{ht}$ ) [11]

Jedan od najjednostavnijih postupaka modificiranja površine i postupaka nitrokarburiranja je nitrokarburiranje u solnoj kupci (Tenifer postupak). Nakon završetka ovog postupka obrađivani predmeti mogu u eksploataciju ili mogu biti povrgnuti postupku poliranja i postupku naknadne oksidacije (QP, QPQ postupci). Ovim se postupcima korozivna otpornost te otpornost na trošenje [10]. Postupak tenifer ili TF1 postupak je postupak nitrokarburiranja u rastaljenoj soli na temperaturi od 580 °C. U mnogim slučajevima TF1 proces je alternativa drugim postupcima povišenja površinske tvrdoće, kao što je površinsko kaljenje ili tvrdo kromiranje, jednake je ili bolje kvalitete i idealno je za obradu pojedinačnih dijelova. Oksidirajući naknadni tretman u takozvanoj AB1 kupci može poboljšati otpornost na koroziju (Q). Daljnja optimizacija može se postići naknadnom međuobradom, poliranjem (QP) ili međuobradom (poliranje) s ponovljenom obradom u AB1 kupci (QPQ). QPQ je skraćenica od Quench-Polish-Quench i stoga uključuje Tenifer tretman u kombinaciji s 2-strukim oksidacijskim hlađenjem i međuobradom (poliranjem). Obradivani predmeti dobivaju estetsku crnu površinu, a u mnogim slučajevima otpornost na koroziju je bolja od otpornosti galvanskih površinskih slojeva. Ovakvi postupci vidljivi su na slici 20 [15].



Slika 20. Dijagram postupka Tenifer, QP/QPQ [16]

### 3.3.2. Boriranje

Boriranje je postupak toplinsko – kemijske modifikacije površine kod kojeg se omogućuje da u površinu obrađivanog predmeta (čeličnog) difundira bor (B). Temperature obrade kod boriranja su od 800 – 1000 °C te traju po nekoliko sati. Ovisno o parametrima ovim postupkom se dobiva sloj koji se sastoji ili od jednofaznog ili od dvofaznog sloja borida [13].

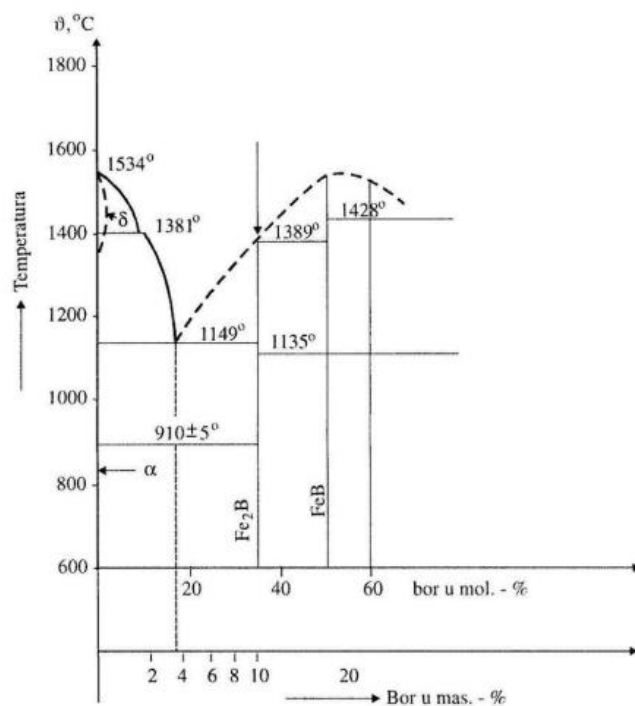
Postupak boriranja se provodi u različitim sredstvima koja sadrže bor, a mogu biti u plinovitom, krutom i tekućem stanju. Najpovoljnije sredstvo za provođenje postupka je čvrsto sredstvo, zbog mogućnosti raznih varijacija u postupku, a time i podešenja samog postupka po potrebi. Danas postoji mogućnost podešenja samog sredstva tako da se dobije samo jednofazni sloj, ali to ovisi o udjelu ugljika u čeliku, drugim legirnim elementima i parametrima same obrade boriranjem. Najveća prednost ovog postupka je mogućnost provođenja postupka u svim kalionicama koje imaju komornu peć za cementiranje mogućnosti ugrijavanja na barem 1000 °C. Između danas poznatih postupaka, najekonomičniji je postupak boriranja u aktivnoj smjesi na bazi borova karbida koji u trgovini se nalazi pod komercijalnim nazivom EKABOR [17]. Tablicom 2 su prikazane razlike između različitih vrsta EKABOR sredstava, ovisno o svojstvima i veličini zrna.

Tablica 2. Razlike u veličini zrna i dobivenih svojstava između EKABOR sredstava [13]

SREDSTVO ZA BORIRANJE	VELIČINA ZRNA	SVOJSTVA BORIRANE POVRŠINE
<b>EKABOR 1</b>	< 150 $\mu\text{m}$	Visoka kvaliteta površine, odlično sidrenje
<b>EKABOR 2</b>	< 850 $\mu\text{m}$	Vrlo dobra kvaliteta površine, lako vađenje obratka nakon T.O.
<b>EKABOR 3</b>	< 1400 $\mu\text{m}$	Dobra kvaliteta površine, lako vađenje obratka nakon T.O.
<b>EKABOR HM</b>	< 150 $\mu\text{m}$	Vrlo dobra kvaliteta površine, sloj borida tanji, pogodno za tvrde metale
<b>EKABOR Ni</b>	< 150 $\mu\text{m}$	Boriranje Ni - legura

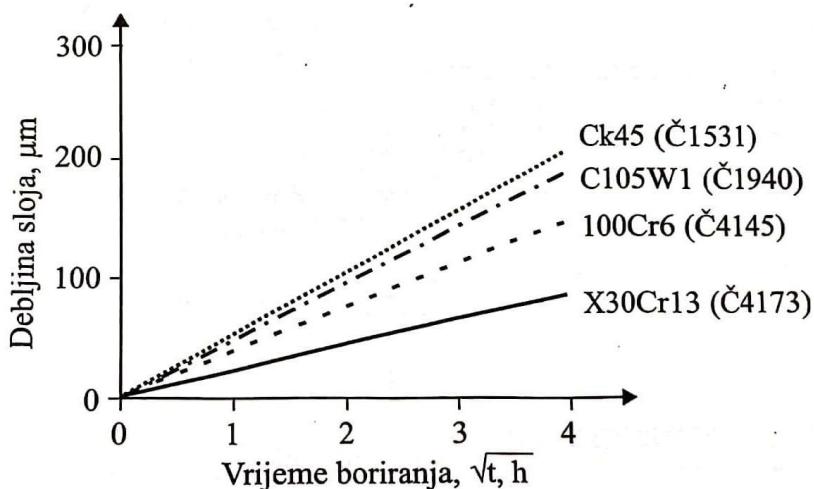
Boriranje se provodi u uvjetima kod kojih želimo postići povećanu otpornost na abrazijsko, adhezijsko i erozijsko trošenje. A boriranjem srednje legiranih čelika moguće je zamijeniti visokolegirani čelik. Boriranje se primjenjuje kod izrade dijelova za ventile, mjenjače, turbine, naftovoda, plinovoda, kalupa za prešanje, sapnica za lijevanje itd. [13].

Tijekom postupka boriranja čelika elementarni bor (B) difundira u površinski sloj obrađivanog predmeta i stvara kompleksne boride  $\text{Fe}_2\text{B}$  (poželjan) i/ili FeB (nepoželjan).  $\text{Fe}_2\text{B}$  se nalazi u rombskoj kristalnoj rešetci, tvrdoće je od 1400 do 1600 HV ( $\text{HV}_{01}$ ), dok je FeB u FCC kristalnoj rešetci, tvrdoće od 1800 do 2100 HV ( $\text{HV}_{01}$ ), ali i znatno krhkiji (zbog toga nepoželjan). Oba borida imaju svojstvo postojanosti pri povišenim temperaturama, svojstvo otpornosti na trošenje, niži koeficijent trenja, nisku sklonost hladnom zavarivanju, povišenu otpornost na kiseline i lužine itd. Debljina zone spojeva je od 20 do 500  $\mu\text{m}$ , a dubina difuzijske zone može biti, ovisno o uvjetima boriranja, i do 1 mm [12]. Na slici 21 prikazan je Fe – B dijagram, a na njemu  $\text{Fe}_2\text{B}$  borid sa 8,83 % B, FeB borid sa 16,23 % B i eutektik sa 3,8 % B (talište na 1149 °C) [17].



Slika 21. Fe – B dijagram [17]

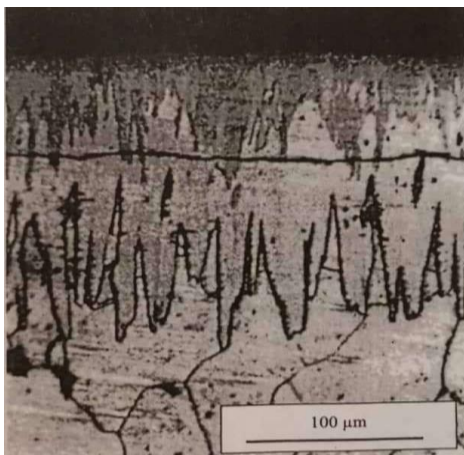
S obzirom da je kod ugljičnih čelika veza između boridnog sloja i osnovnog materijala solidna (prodor borida), možemo zaključiti da su oni najpovoljniji za provođenje boriranja, a prikladni za boriranje su još i niskolegirani čelici, tvrdi metali, Armco željezo i željezni ljevovi. Razlog tome što je ugljični čelik najpogodniji za boriranje je to što ostali pogodni materijali nemaju „zubati“ prodor i čvrsto sidrenje, već je veza glađa. Dubina boriranog sloja ovisi o temperaturi postupka, trajanju postupka i sastavu materijala [17]. Na slici 22 je prikazan dijagram ovisnosti debljine boridnih slojeva i trajanja boriranja za različite čelike borirane na 900 °C.



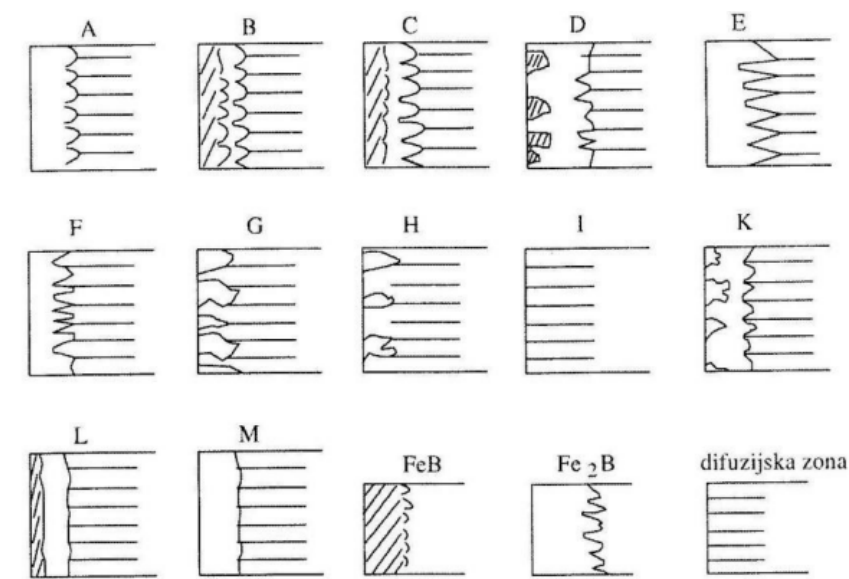
Slika 22. Ovisnost debljine sloja o vremenu trajanja postupka za čelike borirane na 900 °C [11]



Dobiveni boridni sloj može se formirati od jedne ili dvije vrste borida. Ako se radi o sredstvima s visokom sposobnošću boriranja nastat će dvofazni sloj, što je nepoželjno. Tada se vanjska faza sastoji od FeB (bogat borom) i Fe<sub>2</sub>B (siromašan borom), mikrostruktura jednog takvog dvofaznog sloja je vidljiva na slici 23. Ovisno o parametrima boriranja (vremenu i temperaturi) nastaju različiti tipovi borida prikazani na slici 24 [13].



Slika 23. Mikrostruktura dvofaznog boridnog sloja, FeB tamniji sloj, a Fe<sub>2</sub>B svjetliji [11]



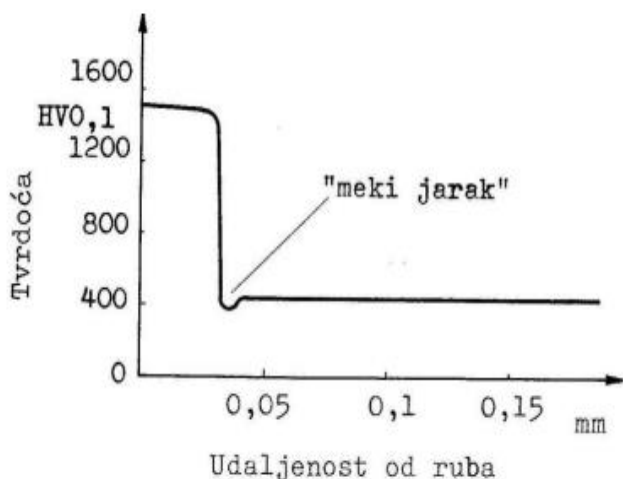
- Tip A: jednofazni sloj, isključivo FeB.
- Tip B: dvofazni sloj od Fe<sub>2</sub>B i FeB, što tvori zatvoreni sloj.
- Tip C: dvofazni sloj; sloj FeB je tanji nego kod tipa B.
- Tip D: dvofazni sloj ali se FeB zubi pojavljuju mjestimično i pojedinačno.
- Tip E: jednofazni sloj, samo Fe<sub>2</sub>B jako "nazubljen".
- Tip F: jednofazni sloj, samo Fe<sub>2</sub>B manje "nazubljen".
- Tip G: sloj se sastoji od pojedinačnih Fe<sub>2</sub>B "zubi".
- Tip H: sloj od jako odijeljenih Fe<sub>2</sub>B "zubi".
- Tip I: difuzijska zona.
- Tip K: nepravilan sloj.
- Tip L: dvofazni sloj od FeB i Fe<sub>2</sub>B nalegnut ravno, "nenazubljen".
- Tip M: jednofazni sloj od Fe<sub>2</sub>B nalegnut ravno, "nenazubljen".

Slika 24. Tipični boridni slojevi [17]

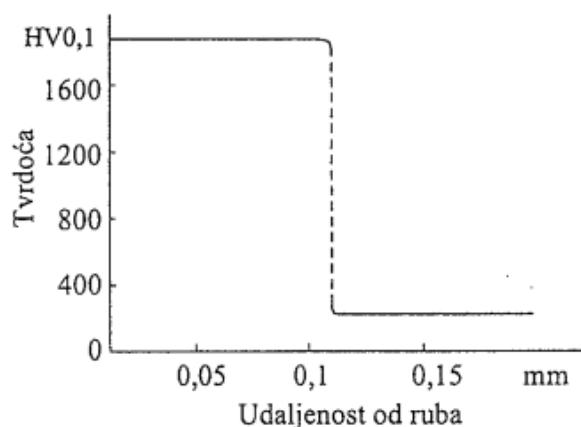
Najpovoljniji od tipova boridnih slojeva prikazanih na slici 24 su monofazni slojevi E i F, a dopušta se još i tip D [13].

Nakon provedenog boriranja ispod zone dobivenih boridnih slojeva nalazi se difuzijska zona. U toj zoni kemijski element bor je otopljen u feritu koji je zbog toga očvrstnuo, također dolazi i do povišenja udjela perlita neposredno ispod zone spojeva te dolazi do pojave tzv. ugljikovog bedema. Ugljikovim bedemom nazivamo područje koje se nalazi ispod zubi boridnog sloja, a koje ima povećanu koncentraciju ugljika u odnosu na osnovni materijal, a nastaje jer prilikom difuzije kemijskog elementa bora, bor potiskuje ugljik sa površine prema jezgri obrađivanog predmeta. Ova pojava poželjna je ako je borirani predmet namijenjen za daljnju toplinsku obradu kaljenjem jer će veća koncentracija ugljika rezultirati i višom tvrdoćom, ali negativna strana stvaranja ugljikova bedema je povećana krhkost, posebno izražena kod nadeutektoidnih čelika [13].

Negativan utjecaj na rezultate boriranja može imati povećani udio Si i Al u čeliku. Kod slučaja boriranja takvog čelika dolazi do stvaranja tzv. „mekog jarka“, a on vrlo loše utječe na svojstva obrađivanog predmeta u eksploataciji jer se kod takvog čelika stvara tvrdi rub na mekoj podlozi. Raspored tvrdoće na boriranom uzorku čelika Č 4751 i tzv. „meki“ jark vidljiv je na slici 25, a raspored tvrdoća na boriranom čeliku bez „mekog jarka“ (mali udio Si i Al) na slici 26 [13].



Slika 265. Raspored tvrdoća boriranom uzorku čelika Č 4751 [13]



Slika 256. Raspored tvrdoća na boriranom čeliku bez „mekog jarka“ [13]

## 4. Praktični dio

U praktičnom dijelu ovog rada bilo je potrebno metalografski pripremiti toplinsko (obrada cjelovitog volumena), toplinsko-kemijski obrađene uzorke čelika (modificiranje površinskih slojeva) i iste te čelike u polaznom (normalizacijski žarenom) stanju te napraviti analizu mikrostrukture svjetlosnim mikroskopom pod povećanjem od 100, 200 i 500 puta. Cjelovito obrađenim uzorcima (ugljičnog čelika s različitim kemijskim sastavom) se zatim mjerila mikrotvrdoća i analizirala ovisnost udjela ugljika na mikrostrukturu i dobivene vrijednosti tvrdoće. Toplinsko-kemijski obrađene uzorke (indukcijski kaljene, borirane, nitrirane) bilo je potrebno analizirati na temelju dobivenog površinskog sloja. Praktični dio se izvodio u Laboratoriju za toplinsku obradu i Laboratoriju za metalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

### 4.1. Uzorci

Uzorci koji su analizirani u ovom radu su ugljični čelici: čelik za cementiranje C 15, čelik za poboljšavanje C 35 i C 45 i čelik za opruge C 75. Toplinska obrada uzoraka sastojala se od normalizacijskog žarenja jedne skupine uzoraka, a kaljenja bez naknadnog popuštanja druge skupine uzoraka. Provodila se u električnoj peći bez zaštitne atmosfere, a gašenje se provodilo u mirnoj vodi temperature 20 °C uz obavezno miješanje radi razbijanja parnog omotača kako bi se postigla predviđena nadkritična brzina hlađenja na površini ispitnih uzoraka. Nakon normalizacijskog žarenja, uzorci su izvađeni iz peći i ostavljeni da se hlade na mirnom zraku. Tablicom 3 prikazani su točni parametri navedenih toplinskih obrada i udio ugljika u navedenim uzorcima.

Tablica 3. Parametri provedenih toplinskih obrada

Uzorak	%C	Normalizacija (Temperatura obrade/trajanje/medij ohlađivanja)	Kaljenje (Temperatura obrade/trajanje/medij ohlađivanja)
C 15 ( Č 1220 )	0,12 – 0,18	900 °C / 15 min / zrak	900 °C / 15 min / voda
C 35 ( Č 1430 )	0,32 – 0,39	820 °C / 30 min / zrak	820 °C / 30 min / voda
C 45 ( Č 1530 )	0,42 – 0,5	850 °C / 45 min / zrak	850 °C / 45 min / voda
C75	0,7 – 0,8	800 °C / 45 min / zrak	800 °C / 45 min / voda

Također su za potrebe rada korišteni i toplinsko-kemijski površinski modificirani uzorci: čelik C 45 nitrokarburiran u solnoj kupci (tenifer postupak), čelik C 45 nitrokarburiran u solnoj kupci (Tenifer QP postupak), čelik C 45 indukcijski kaljen i čelik 42CrMo4 (Č 4732) boriran u čvrstom EKABOR sredstvu. Parametri navedenih obrada navedeni su u tablici 4.

*Tablica 4. Parametri toplinsko- kemijskih obrada provedenih u praktičnom dijelu rada*

<b>Uzorak</b>	<b>Postupak</b>	<b>Parametri obrade</b> (Temperatura obrade/trajanje/medij ohlađivanja)
C 45 ( Č 1530 )	Tenifer	580 °C / 2h / voda
C 45 ( Č 1530 )	Tenifer QP	580 ° / 2h / voda + AB1 390° / 15min / voda
C 45 ( Č 1530 )	Indukcijsko kaljenje	
42CrMo4 (Č 4732)	Boriranje	Ekabor 900° / 4h / hlađenje u peći

## 4.2. Metalografska priprema uzoraka

Uzorci za metalografsku analizu pripremljeni su standardnim postupkom pripreme koji se sastoji od oblaganja uzorka polimernom masom, brušenja, poliranja te razvijanja mikrostrukture.

- **Oblaganje uzoraka:** Uzorci koji su pripremani već su bili rezani na odgovarajuće dimenzije za postavljanje u kalup te su se postavili u kalup na način da se uzorak postavi na samo dno kalupa (kako bi kasnije bio na samoj površini odljevka) što je prikazano na slici 27 i zalije akrilnom smolom (Slika 28). Nakon ulijevanja smole u kalup potrebno je, prije vađenja odljevka iz kalupa, pričekati najmanje 6 sati. Tijekom ulijevanje važno je bilo svaki uzorak numerirati radi daljnjeg raspoznavanja.



Slika 27. Pozicioniranje uzorka i ulijevanje smole u kalup



Slika 28. Korištena akrilna smola

- **Brušenje:** Nakon vađenja obloženih uzoraka iz kalupa slijedi brušenje samih uzoraka. Brušenje se izvodi u automatskom stroju za brušenje i poliranje Presi MecaTech 250 (Slika 29), stroj u držaču može primiti do 4 uzorka istovremeno. Brusi se brusnim papirom granulacije od 360 do 4000, pri 300 okretaja u minuti uz dodatak vode. Brusilica tijekom brušenja vidljiva je na slici 29, a njeno sučelje na slici 30.



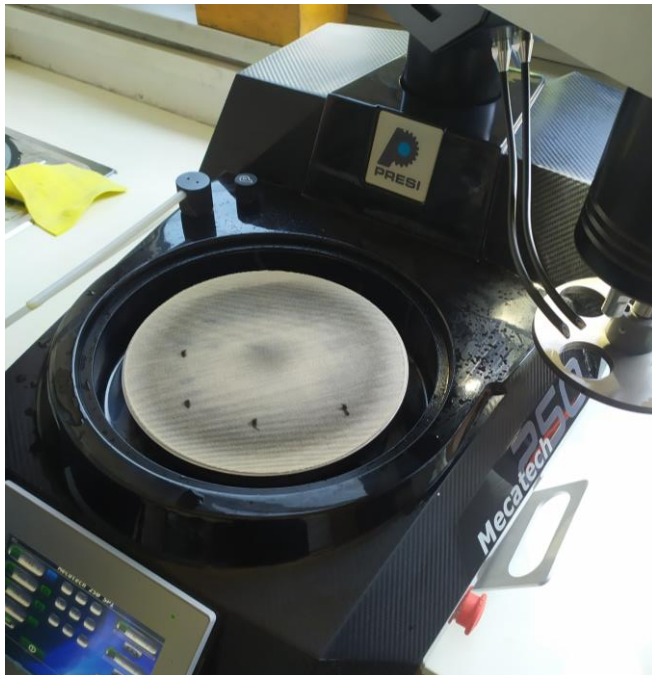
*Slika 29. Stroj tijekom brušenja*



*Slika 30. Sučelje upravljačke ploče stroja tijekom rada*



- **Poliranje:** Poliranje se izvodi na već ranije spomenutom stroju. Na stroj se stavlja tkanina za poliranje na koju se nanosi pasta za poliranje granulacije  $3\ \mu\text{m}$  vidljivo na slici 31, a nakon paste se koristi tekućina s granulatom koja se nalazi u spremniku stroja (Slika 32). Tijekom poliranja se ne koristi voda već se ručno dodaje sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP) (Slika 33). Poliranje se izvodi na 150 okretaja po minuti.



Slika 32. Nanošenje paste za poliranje

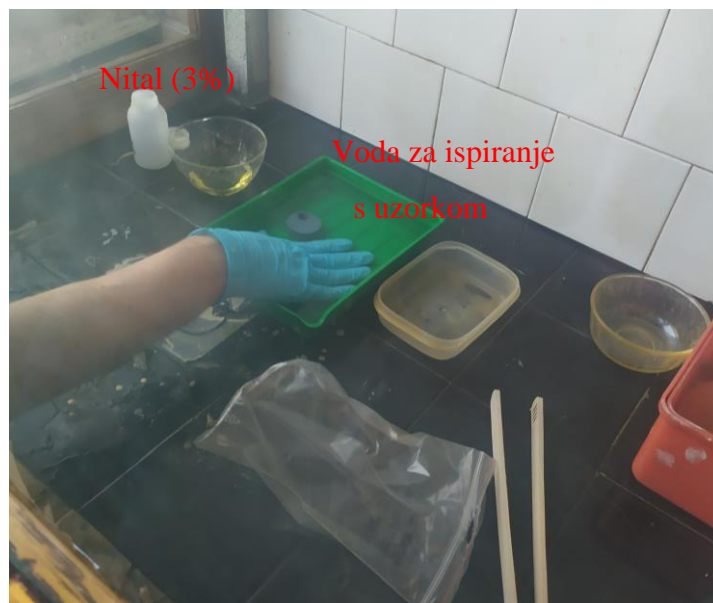


Slika 33. Spremnik tekućine za poliranje



Slika 31. Ručno dodavanje SHIP-a tijekom poliranja

- **Kemijsko razvijanje mikrostrukture:** kemijsko razvijanje mikrostrukture se izvodi kako bi se osigurala vidljivost mikrostrukture na poliranoj površini. Izvodi se uranjanjem uzorka u otopinu 3% nitala (par sekundi) i ispiranjem u vodi (Slika 34). Nakon ispiranja se vrši vizualni pregled nagrizedane površine i po potrebi se dodatno nagriza. Zbog agresivnosti otopine kemijsko razvijanje mikrostrukture se izvodi uz pomoć zaštitne opreme u digestoru koji vidimo na slici 35.



*Slika 34. Proces kemijskog razvijanja mikrostrukture*



*Slika 35. Digestor*



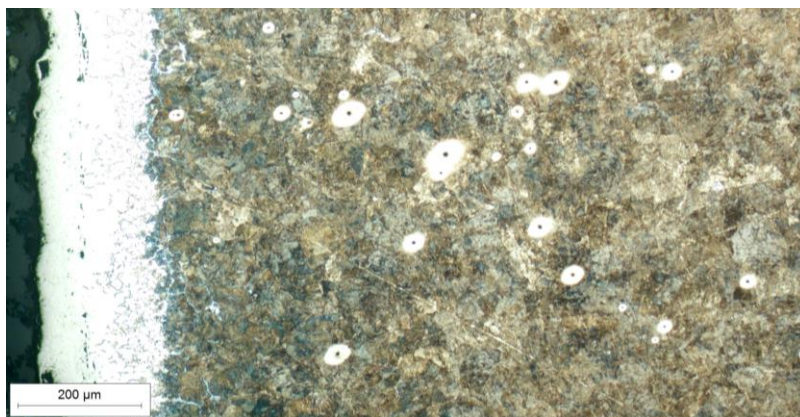
### 4.3. Analiza mikrostrukture svjetlosnim mikroskopom

Nakon uspješne metalografske pripreme uzorke je bilo potrebno fotografirati svjetlosnim mikroskopom pod povećanjem od 100, 200 i 500 puta. Fotografiranje je izvedeno na invertnom metalurškom svjetlosnom mikroskopu Olympus GX53 s DP23-CU digitalnom kamerom, mikroskop s uzorkom postavljenim za analizu prikazan je na slici 36.



*Slika 36. Olympus GX53 s DP23-CU digitalnom kamerom  
i uzorak pripremljen za analizu*

Kod izvođenja analize mikrostrukture, naročito toplinsko kemijski modificiranih uzoraka, važno je pravilno pozicionirati fotografiju tako da je vidljiv modificirani površinski sloj s lijeve strane (Slika 37). Kod cjelovito toplinski obrađenih uzoraka pozicionira se na sredini uzorka.



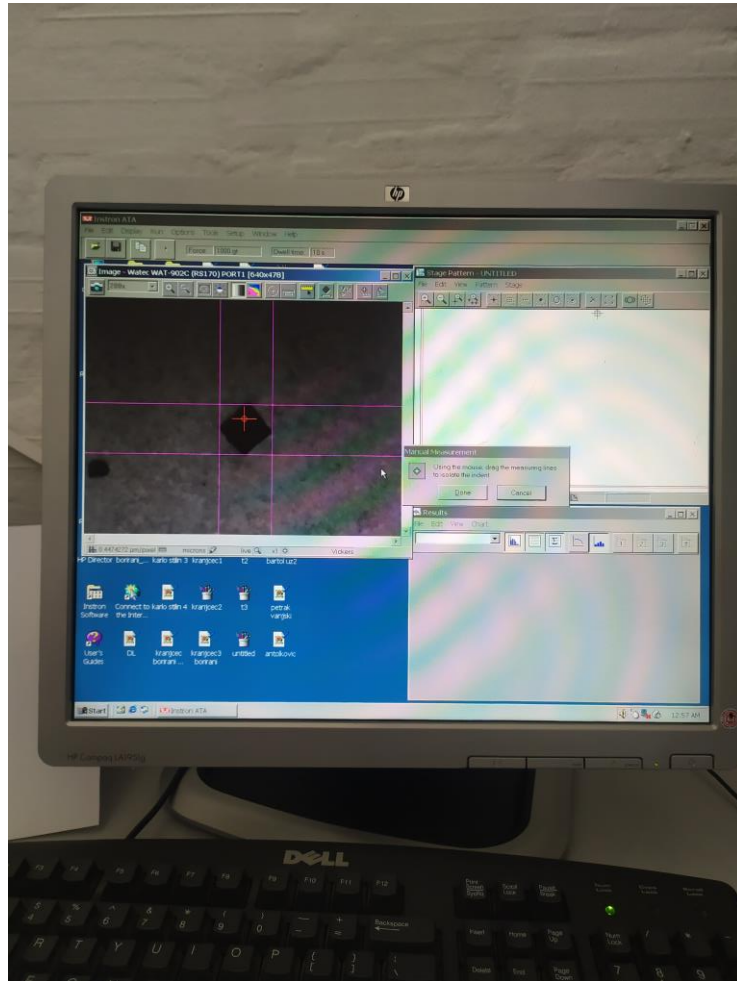
*Slika 37. Pravilno pozicioniranje površinski modificiranog uzorka  
(boriranog)*

#### 4.4. Mjerenje mikrotvrdoće toplinski obrađenih uzorka

Tvrdoća kaljenih uzoraka ugljičnih čelika s različitim udjelom ugljika mjerila se pomoću tvrdomjera Wilson-Wolpert Tukon 2100 (Slika 38) Vickersovom metodom opterećenjem silom mase 1 kg na sljedeći način: uzorak se utiskuje na komad gline i umeće u tvrdomjer, gdje vrh kvadratnog presjeka penetrira u sam uzorak. Pomoću kamere na samom uređaju pod povećanjem na računalu vidimo otisak koji je ostao u uzorku, otisak kvadratnog presjeka zatim u softwearu tvrdomjera omeđimo linijama (Slika 39) na temelju čega on izračunava tvrdoću po Vickersu. Radi točnosti uzimano je tri otiska po uzorku, a rezultati su uzeti kao srednja vrijednost tri utiskivanja.



*Slika 38. Tvrdomjer s postavljenim uzorkom*



*Slika 39. Dobivanje vrijednosti tvrdoće u softwareu*

## 5. Rezultati i analiza rezultata

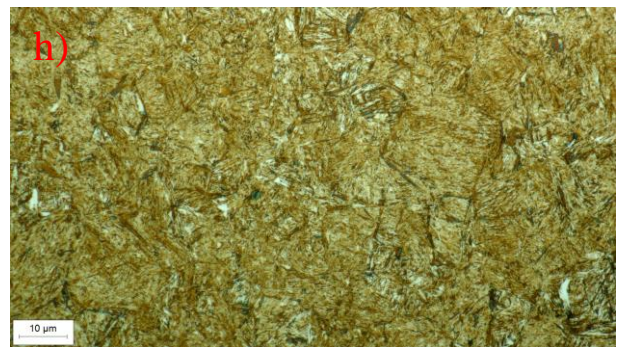
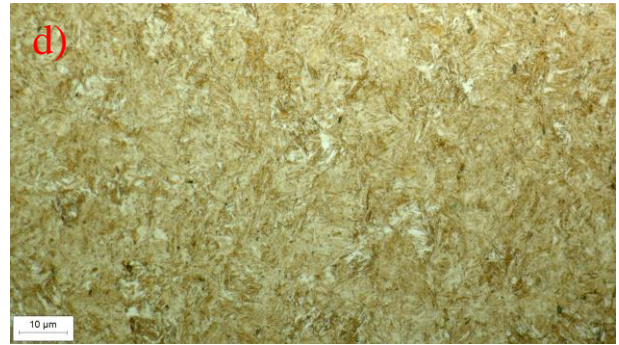
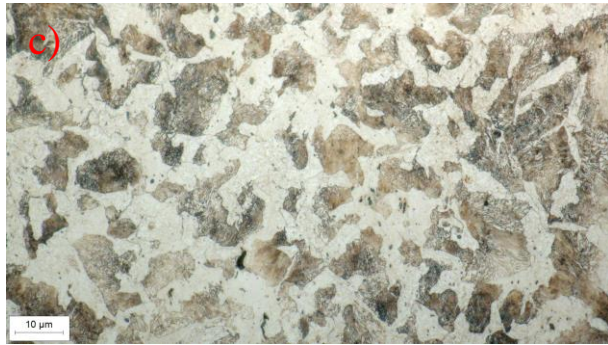
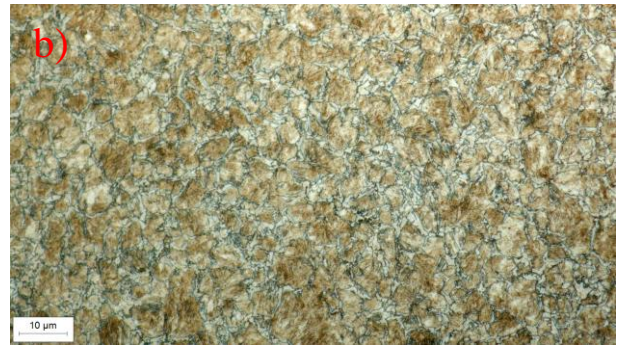
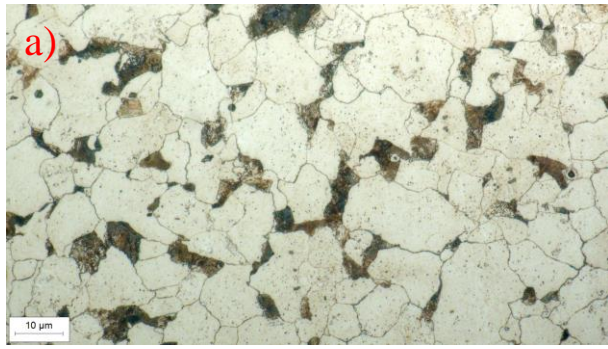
U ovom dijelu rada napravljena analiza mikrostrukture uzoraka koji su prošli kroz postupke toplinske obrade cjelovitog volumena (kaljenje) i imaju različite kemijske sastave te je na istim uzorcima analiziran utjecaj ugljika na dobivene vrijednosti tvrdoće i mikrostrukture.

Na uzorcima obrađenim postupcima indukcijskog kaljenja, boriranja i nitrokarburiranja napravljena je analiza površinskog sloja pomoću svjetlosnog mikroskopa.

### 5.1. Analiza uzoraka obrađenih toplinskom obradom cjelovitog volumena

Na slici 40 prikazane su dobivene mikrostrukture ispitnih uzoraka nakon provedenih toplinskih obrada. Na slici 40a vidljiva je feritno perlitna struktura normaliziranog čelika C15 s udjelom perlita približno 15 %. Na slici 40b vidljiva je djelomično zakaljena mikrostruktura čelika C15 s jasno uočljivim proeutektoidnim feritom oko martenzita iz čega se može zaključiti da uzorci čelika C15 nisu postigli optimalnu temperaturu austenitizacije te nije došlo do potpune prekrystalizacije ferita i perlita u austenit već je čelik bio ugrijan na graničnom području oko temperature A3 te je prilikom gašenja samo austenitna faza prešla u martenzit dok proeutektoidni ferit nije ušao u pretvorbu obzirom da je stabilan od temperature A3 do sobne temperature. Na slici 40c vidljiva je struktura ferita i perlita čelika s približno 0,35 % C s udjelom perlita nešto manje od 50 %. Slika 40d prikazuje martenzitnu mikrostrukturu s različitim orijentacijama lamela martenzita. Slika 40e prikazuje feritno perlitnu strukturu čelika C45 s udjelom perlita od 60 % koja je kaljenjem prešla u 100 % martenzitnu strukturu lamelarne morfologije karakteristične za čelike do 0,6 %C, vidljivu na slici 40f. Slika 3g prikazuje mikrostrukturu u kojoj prevladava perlitna faza s vidljivim malim udjelom ferita, do 10 %. Na slici 40h vidljiva je potpuna martenzitna struktura visokougličnog čelika tipične pločaste morfologije [18].





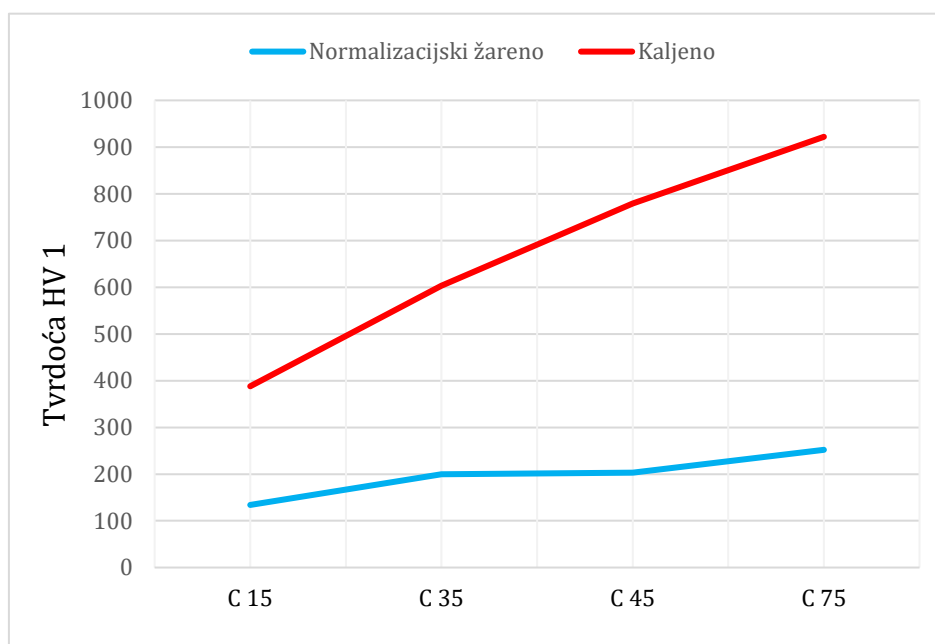
*Slika 40. Mikrostrukture ispitnih uzoraka nakon provedenih toplinskih obrada (uvećanje 500x)*

## 5.2. Utjecaj ugljika na tvrdoću i mikrostrukturu

Rezultati prethodno provedenih ispitivanja tvrdoće na uzorcima ugljičnih čelika s različitim udjelima ugljika prikazani su u tablici 5. Na slici 41 vidimo dobivene tvrdoće prikazane na dijagramu.

Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće HV 1 [17]

Uzorak	% C	Kaljeno stanje HV 1	Normalizirano stanje HV 1
C15	0,12 - 0,18	388	134
C35	0,32 - 0,39	603	200
C45	0,42 - 0,5	779	203
C75	0,7 - 0,8	922	252



Slika 41. Tvrdoća uzoraka u normaliziranom i kaljenom stanju

Dobiveni rezultati mjerenja tvrdoće u skladu su s mikrostrukturom koja je prikazana na slici 40. Vidljivo je da je nakon kaljenja došlo do značajnog povećanja tvrdoće kod ispitivanih čelika i da je tvrdoća rasla proporcionalno s porastom udjela ugljika u čelicima ispitnih uzoraka. Dobivena krivulja u skladu je s krivuljom dijagrama prikazanim na slici 9 te je jasno potvrđeno da visina tvrdoće nakon kaljenja ovisi samo o udjelu ugljika u čeliku, pod uvjetom da je kaljenje provedeno prema preporukama. Visina izmjerene tvrdoće čelika C15 nakon kaljenja nešto je niža od



očekivane, a razlog je nepotpuno kaljenje tj. miješana mikrostruktura martenzita i ferita radi preniske temperature austenitizacije kojoj je čelik bio podvrgnut. Dobiven rezultat je vrlo čest u praksi radi mogućih više razloga od kojih su neki prevelika zračnost vrata peći u kojoj se provodi toplinska obrada i smještaj uzoraka/obradaka preblizu vrata peći što je posebno izraženo kod šaržnih peći većeg volumena radnog prostora, indikatori temperature u peći za toplinsku obradu koji nisu dobro umjereni ili su pokvareni itd, a što rezultira loše provedenom toplinskom obradom i obradcima koji će u praksi imati slabija mehanička i tribološka svojstva te kraće vrijeme eksploatacije od predviđenog [18].

### 5.3. Analiza mikrostrukture površinski modificiranih uzoraka



Slika 42. Mikrostruktura uzorka obrađenog tenifer postupkom (uvećanje 200x)

Slika 42 prikazuje mikrostrukturu čelika C 45 nitriranog u solnoj kupci (Tenifer postupak), bez naknadne oksidacije. Jasno je vidljiva mikrostruktura osnovnog materijala (jezgre) koja je feritno-perlitna, vidljiva je i zona spojeva koja se od  $\gamma'$  i  $\epsilon$  željeznih nitrida. Difuzijska zona označena na slici nastavlja se na zonu spojeva sve do jezgre.



Slika 43. Mikrostruktura uzorka obrađenog Tenifer QP postupkom (uvećanje 200x)

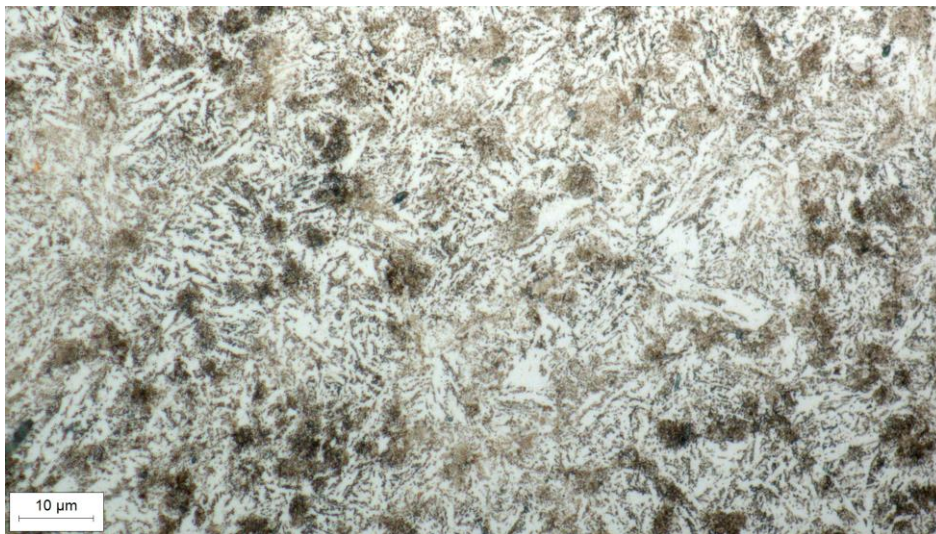
Na slici 45 vidljiva je mikrostruktura čelika C45 nitrokarburiranog u solnoj kupci s oksidirajućim naknadnim tretmanom u takozvanoj AB1 kupci (QP postupak) i obrađenog poliranjem. Također kao i na prethodnom uzorku prikazana je jezgra feritno-perlitne mikrostrukture, difuzijska zona i zona spojeva, koja je nešto deblja nego na uzorku koji je proveden bez naknadne oksidacije. Vidljiva je i polirana površina zone spojeva, za razliku od prethodnog uzorka.



Slika 44. Mikrostruktura uzorka boriranog u čvrstom sredstvu EKABOR 3 (uvećanje 200x)



Slika 44 prikazuje mikrostrukturu čelika Č 4732 boriranog u krutom sredstvu EKABOR 3. Na slici je vidljiva karakterističan boridni sloj na perlitno-feritnoj osnovi. Također se vidi ugljikov bedem koji je nastao potiskivanjem ugljika tijekom difuzije bora.



*Slika 45. Mikrostruktura jezgre i površinskog sloja indukcijski kaljenog uzorka (uvećanje 500x)*

Slika 45 prikazuje indukcijski kaljen površinski sloj (gore) i jezgru (dolje) uzorka čelika C 45. Površinski sloj ima 100% martenzitnu strukturu (laminarnu), a jezgra ima perlitno-feritnu strukturu karakterističnu za čelike do 0,6% C.

## 6. Zaključak

Cilj ovog rada bilo je okarakterizirati toplinsko i toplinsko – kemijski obrađene čelike tj. kaljene, indukcijski kaljene, nitrirane, nitrokarburirane i borirane uzorke čelika. Karakterizacija je obavljena na temelju analize mikrostrukture spomenutih uzoraka koja se vršila svjetlosnim mikroskopom, a za kaljene uzorke provelo se mjerenje mikrotvrdoće te analiza dobivenih rezultata.

Većina problema se kod navedenih postupaka javljaju u pogrešno provedenom postupku obrade, pogrešnom odabiru čelika i pogrešnim konstrukcijskim rješenjima. Tako je u analizi ovog rada bilo moguće vidjeti postizanje niže tvrdoće (od očekivanja) kod kaljenja čelika C15, razlog ovakvog rezultata je pak bila preniska temperatura austenitizacije. Na ovoj grešci možemo vidjeti važnost temperature austenitizacije za sami postupak kaljenja i postizanje očekivanih vrijednosti tvrdoće. Kaljeni uzorci čelika C 35, C 45 i C 75 postigli su tvrdoće i mikrostrukture koje su u skladu sa očekivanjima te se može zaključiti da je toplinska obrada provedena uspješno. Također su analize mikrostrukture indukcijski kaljenih, nitriranih, nitrokarburiranih i boriranih uzoraka bile u skladu sa očekivanjima te se na svim uzorcima mogla primijetiti razlika u površinskom sloju i samim jezgrama navedenih uzoraka. Kod toplinsko – kemijski obrađenih uzoraka vidljiva je bila zona spojeva, ali difuzijsku zonu nije bilo moguće točno odrediti zbog izostanka mjerenja mikrotvrdoće po poprečnom presjeku navedenih uzoraka.

Na kraju treba zaključiti da se primjenom u radu navedenih postupaka toplinske obrade može značajno utjecati na mehanička svojstva i mikrostrukturu (cijelog volumena strojnog dijela ili modificiranog površinskog sloja). Kao takva, toplinska obrada, trebala bi se birati pažljivo te iskoristiti na temelju zahtijevanih mehaničkih svojstava strojnih dijelova koji joj se podvrgavaju.

## 7. Literatura

- [1] M. Stupnišek, F. Canjer: Osnove toplinske obradbe metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [2] T. Lisak: Poboljšavanje kontrole parametara procesa toplinske obrade, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [3] K. Kolarić: Indukcijsko kaljenje vodilica gornjeg vreteništa i stupa, završni rad, Sveučilište sjever, Varaždin, 2018.
- [4] D. Landek; Materijali i proizvodni postupci, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [5] M. Rendulić: Mikrostruktura i svojstva martenzitnog korozijski postojanog čelika, završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2021.
- [6] D. Tahiri: Ispitivanje svojstava čelika nakon dupleks postupaka boriranja s naknadnim kaljenjem, završni rad, FSB, Zagreb, 2022.
- [7] U.S. Department of commerce, National bureau of standards; Heat treatment and properties of iron and steel
- [8] I. Gabrić; Materijali 2, Praktikum za laboratorijske vježbe, Sveučilište u Splitu, Split, 2017.
- [9] M. I. Prezelj: Ispitivanje prokaljivosti visokolegiranih alatnih čelika modificiranim Jominy pokusom, završni rad, FSB, Zagreb, 2018.
- [10] I. Gabrić, S. Šitić: Materijali 2, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [11] M. Gojić; Površinska obradba materijala, Metalurški fakultet, Zagreb, 2010.
- [12] <https://hr.dw-inductionheater.com>
- [13] B. Krsnik: Završni rad, FSB, Zagreb, 2010.
- [14] Franjo Cajner, Darko Landek, Sanja Šolić: Karakterizacija nitrokarburiranog sloja, Zbornik sažetaka MATRIB 2006/ Grilec, Krešimir (ur.). Zagreb: HDMT - Hrvatsko Društvo za Materijale i Tribologiju, 2006. (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), stručni)
- [15] <https://www.haertecenter.de>, Salt Bath Nitrocarburizing Tenifer process TF1, Q, QP, QPQ
- [16] I. Peharec: Utjecaj naknadne oksidacije na korozijsku postojanost nitrokarburiranog čelika, završni rad, FSB, Zagreb, 2009.
- [17] D. Krumes; Površinske toplinske obrade i inženjerstvo površina, Sl. brod, 2004.
- [18] Šolić, Lehpamer, Landek, Tropša; Karakterizacija toplinski obrađenih čelika, Matrib 2022 – Conference Proceedings – 22nd on Materials, Tribology & Recycling / Bušić, Matija ; Leder Horina, Jasna ; Tropša, Vlado (ur.). Zagreb: HDMT - Hrvatsko Društvo za Materijale i Tribologiju, 2022. str. 402-408 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), stručni)

## Popis slika

Slika 1. Općeniti dijagram postupka toplinske obrade [1] .....	3
Slika 2. Fe-Fe <sub>3</sub> C dijagram [4] .....	5
Slika 3. Tetragonalna kristalna rešetka (BTC) [6].....	6
Slika 4. Prikaz Uptonova dijagrama [1] .....	7
Slika 5. Određivanje temperature austenitizacije kod podeutektoidnog čelika [1] .....	8
Slika 6. Određivanje temperature austenitizacije kod nadeutektoidnog čelika [1] .....	9
Slika 7. TTT dijagram za podeutektoidni čelik [1] .....	10
Slika 8. Primjer TTT dijagrama (kontinuiranog) za eutektoidni čelik [1].....	11
Slika 9. Burnsov dijagram [8].....	12
Slika 10. Jominy krivulja za tri različita čelika (A,B,C) [9].....	13
Slika 11. Temperaturna područja žarenja čelika [10].....	14
Slika 12. Dijagram postupka poboljšavanja čelika [10].....	16
Slika 13. Jedna od podjela površinske obrade materijala .....	18
Slika 14. Shematski prikaz podjele modificiranja i prevlačenja površina [11] .....	18
Slika 15. Shematski prikaz površinski zakaljenog obratka .....	19
Slika 16. Indukcijsko kaljenje vratila [12].....	20
Slika 17. Određivanje efektivne dubine indukcijskog kaljenja .....	21
Slika 18. Shematski prikaz zone spojeva i difuzijske zone kod postupaka nitriranja i nitrokarburiranja [13] .....	22
Slika 19. Dobivanje efektivne dubine nitriranja ( $N_{ht}$ ) [11].....	24
Slika 20. Dijagram postupka Tenifer, QP/QPQ [16].....	25
Slika 21. Fe – B dijagram [17] .....	27
Slika 22. Ovisnost debljine sloja o vremenu trajanja postupka za čelike borirane na 900 °C [11] .....	27
Slika 23. Mikrostruktura dvofaznog boridnog sloja, FeB tamniji sloj, a Fe <sub>2</sub> B svjetliji [11].....	28
Slika 24. Tipični boridni slojevi [17].....	28
Slika 256. Raspored tvrdoća na boriranom čeliku bez „mekog jarka“ [13] .....	29
Slika 265. Rasopred tvrdoća boriranom uzorku čelika Č 4751 [13] .....	29
Slika 27. Pozicioniranje uzorka i ulijevanje smole u kalup.....	32
Slika 28. Korištena akrilna smola.....	32
Slika 29. Stroj tijekom brušenja .....	33
Slika 30. Sučelje upravljačke ploče stroja tijekom rada .....	33
Slika 31. Ručno dodavanje SHIP-a tijekom poliranja .....	34

Slika 32. Nanošenje paste za poliranje .....	34
Slika 33. Spremnik tekućine za poliranje .....	34
Slika 34. Proces kemijskog razvijanja mikrostrukture .....	35
Slika 35. Digestor .....	35
Slika 36. Olympus GX53 s DP23-CU digitalnom kamerom i uzorak pripremljen za analizu .....	36
Slika 37. Pravilno pozicioniranje površinski modificiranog uzorka (boriranog) .....	36
Slika 38. Tvrdomjer s postavljenim uzorkom .....	37
Slika 39. Dobivanje vrijednosti tvrdoće u softveru .....	38
Slika 40. Mikrostrukture ispitnih uzoraka nakon provedenih toplinskih obrada (uvećanje 500x)	40
Slika 41. Tvrdoća uzoraka u normaliziranom i kaljenom stanju .....	41
Slika 42. Mikrostruktura uzorka obrađenog tenifer postupkom (uvećanje 200x) .....	42
Slika 43. Mikrostruktura uzorka obrađenog Tenifer QP postupkom (uvećanje 200x).....	43
Slika 44. Mikrostruktura uzorka boriranog u čvrstom sredstvu EKABOR 3 (uvećanje 200x).....	43
Slika 45. Mikrostruktura jezgre i površinskog sloja indukcijski kaljenog uzorka (uvećanje 500x) .....	44

## Popis tablica

Tablica 1. Mikrostruktura kaljenja ugljičnog čelika [1] .....	8
Tablica 2. Razlike u veličini zrna i dobivenih svojstava između EKABOR sredstava [13] .....	26
Tablica 3. Parametri provedenih toplinskih obrada.....	30
Tablica 4. Parametri toplinsko- kemijskih obrada provedenih u praktičnom dijelu rada.....	31
Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće HV 1 [17] .....	41