

# Utjecaj parametara toplinske obrade na eksploatacijska svojstva

---

**Krnežić, Mario**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:465956>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

# Utjecaj parametara toplinske obrade na eksploatacijska svojstva

---

**Krnežić, Mario**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:465956>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2023-02-17**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
**STROJARSKI ODJEL**  
**SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA**  
**PROIZVODNO STROJARSTVO**

**MARIO KRNEŽIĆ**

**UTJECAJ PARAMETARA TOPLINSKE OBRADNE NA**  
**EKSPLOATACIJSKA SVOJSTVA DIJELA UDARNOG**  
**MEHANIZMA**

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
**STROJARSKI ODJEL**  
**SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA**  
**PROIZVODNO STROJARSTVO**

MARIO KRNEŽIĆ

**UTJECAJ PARAMETARA TOPLINSKE OBRADNE NA**  
**EKSPLOATACIJSKA SVOJSTVA DIJELA UDARNOG**  
**MEHANIZMA**

Mentor:

Tomislav Božić, dipl.ing. strojarstva

**KARLOVAC, 2019.**

**IZJAVA:**

Izjavljujem da sam ja – student Mario Krnežić, OIB: 28716357887, matični broj: 0123416040, upisan kao apsolvent akademske godine 2018./2019., radio ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja, te uz stručnu pomoć i vođenje mentora Tomislava Božića, dipl. ing. stroj. kojem se ovim putem zahvaljujem. Također, zahvaljujem se svojoj supruzi, svojoj i njenoj obitelji na potpori tijekom studija.

Mario Krnežić

---

# SADRŽAJ

SAŽETAK .....	I
SUMMARY .....	II
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA.....	VIII
1. UVOD .....	1
2. TOPLINSKA OBRADA METALA .....	2
2.1 Pобољшanje čelika.....	4
2.1.1. Kaljenje čelika .....	5
2.1.2. Popuštanje čelika .....	10
2.2. Kaljivost čelika.....	13
2.2.1. Zakaljivost.....	13
2.2.2. Prokaljivost.....	15
3. FAZNE TRANSFORMACIJE U ČELIKU.....	16
3.1. Fazne transformacije kod zagrijavanja .....	16
3.2 Fazne transformacije kod hlađenja austenita .....	17
3.2.1 Bainitna transformacija.....	29
4. MJERENJE TVRDOĆE ROCKWELOVOM METODOM.....	32
5. EKPERIMENTALNI DIO ZAVRŠNOG RADA.....	34
5.1. Plan pokusa.....	34
5.2. Čelik Č.1731 .....	36
5.3. Čelik Č.4830.....	41
5.4. Kemijski sastav materijala ispitnih uzoraka .....	47

5.6. Ispitni uzorci .....	48
5.6.1 Opis problema.....	48
5.6.2. Ispitni uzorci „I“ .....	49
4.6.3. Ispitni uzorci „II“ .....	50
4.6.4. Ispitni uzorci „III“ .....	51
5.7. Testiranje ispitnih uzoraka na batu.....	53
5.8. Metalografska analiza .....	57
6. ANALIZA REZULTATA.....	61
7. ZAKLJUČAK.....	62
LITERATURA .....	63

# SAŽETAK

## UTJECAJ PARAMETARA TOPLINSKE OBRADNE NA EKSPLOATACIJSKA SVOJSTVA DIJELA UDARNOG MEHANIZMA

U ovom završnom radu istraženi su utjecaji parametara toplinske obrade na vijek trajanja i tvrdoću određenog strojnog dijela. Rad je zahtijevao proučavanje literature, teorijski dio, planiranje te izvođenje pokusa, metalografsku analizu te statistički pregled rezultata dobivenih pokusima.

Teorijskim djelom rada prikazan je proces toplinske obrade kaljenjem, moguće strukture materijala koje se mogu dobiti kaljenjem te mehanička svojstva prije i nakon toplinske obrade.

Na početku eksperimentalnog dijela rada prikazan je plan cijelog pokusa. Prikazan je dio strojnog dijela, način provođenja toplinske obrade, ispitivanja tvrdoće te način izvođenja pokusa na uzorcima.

Dobivenim vrijednostima dana je analiza i zaključak o utjecaju temperature sredstva za gašenje (soli) na tvrdoću i vijek trajanja strojnog dijela u eksploataciji.

Ključne riječi: toplinska obrada, kaljene, struktura materijala, metalografska analiza



## **SUMMARY**

### **INFLUENCE OF HEAT TREATMENT PARAMETERS ON THE EXPLOITATION PROPERTIES**

In this final work we investigated the influence of heat treatment parameters on the life time and hardness of the machine part. The paper required study of literature, theoretical part, planning and performing of experiments, metallographic analysis and statistical analysis of the results obtained in the experiments.

The theoretical part of the paper presents the process of heat treatment of the hardening, the possible structure in material after the heat treatment and mechanical properties before and after the heat treatment.

The beginning of the experimental part shows the plan of the whole experiment, there is a picture of the machine part, the way of performing heat treatment, the hardness test and the way of performing the experiments.

The obtained values and diagrams give an analysis and conclusion on the influence of the temperature of the medium of cooling (salt) on the hardness and lifetime of the machine part in exploitation.

Key words: heat treatment, hardening, material structure, metallographic analysis

## POPIS SLIKA

Slika 1: Dijagramski prikaz postupka toplinske obrade (općenito) [1] .....	3
Slika 2a: Dijagram postupka poboljšanja čelika otpornih na krhkost popuštanja .....	4
Slika 2b: Dijagram postupka poboljšanja čelika sklonih krhkosti popuštanja. [2] .....	4
Slika 3: Burnsov dijagram [3] .....	6
Slika 4: Dijagram postupka kaljenja nekog podeutektoidnog čelika [1].....	6
Slika 5: Dijagram Fe-Fe <sub>3</sub> C s ucrtanim poljima optimalnih temperatura kaljenja odnosno normalizacije [2].....	7
Slika 6: Utjecaj legirnih elemenata na temperaturu pretvorbe austenita u ferit [1].....	8
Slika 7: Utvrđivanje gornje kritične brzine gašenja [1] .....	10
Slika 8: Dijagram postupka popuštanja čelika [1] .....	11
Slika 9: Dijagrami popuštanja različitih vrsta čelika [1].....	12
Slika 10: Prikaz gašenja u kontinuiranom dijagramu TTT [2].....	13
Slika 11: Ovisnost tvrdoće gašenja čelika o udjelu („angažiranog“) ugljika u čeliku [HRC=f(%C)] [2].....	14
Slika 12: Ovisnost tvrdoće gašenja čelika o udjelu („angažiranog“) ugljika u čeliku [HV <sub>g</sub> =f(%C)] [2] .....	14
Slika 13: Dijagram stanja Fe–Fe <sub>3</sub> C i prikaz nastajanja austenitnih zrna u procesu zagrijavanja [2] .....	16
Slika 14: Kinetika izotermalne austenitno-perlitne transformacije na 700°C u čeliku sa 0,98% C [4].....	18
Slika 15: Čelik sa 0,98% C, 900°C/4min, 700°C/voda ; Martenzit i sekundarni cementit [4].....	20
Slika 16: Čelik sa 0,98% C, 900°C/5min, 700°C/voda ; Početak austenitno-perlitne transformacije [4] .....	20
Slika 17: Čelik sa 0,98% C, 900°C/6min, 700°C/voda ; Napredovanje transformacije perlita [4].....	20

Slika 18: Čelik sa 0,98% C, 900°C/8min, 700°C/voda ; Napredovanje transformacije perlita [4].....	21
Slika 19: Čelik sa 0,98% C, 900°C/15min, 700°C/voda ; Završetak transformacije perlita [4].....	21
Slika 20: Čelik sa 0,98% C, 900°C/30min, 700°C/voda ; Grubolamelarni perlit [4] ...	21
Slika 21: Čelik sa 0,98% C, 900°C/3s, 600°C/voda ; Austenitno-perlitna transformacija je napredovala [4].....	21
Slika 22: Čelik sa 0,98% C, 900°C/15s, 600°C/voda ; Finolamelarni perlit [4].....	22
Slika 23: Čelik sa 0,98% C, 900°C/2s, 500°C/voda ; Austenitno-perlitne transformacija je napredovala [4].....	22
Slika 24: Čelik sa 0,98% C, 900°C/15s, 500°C/voda ; Finolamelarni perlit [4].....	22
Slika 25: Čelik sa 0,98% C, 900°C/15s, 400°C/voda ; Transformacija austenita je napredovala [4].....	22
Slika 26: Čelik sa 0,98% C, 900°C/4min, 400°C/voda ; Perlit i Bainit [4] .....	23
Slika 27: Čelik sa 0,98% C, 900°C/4min, 300°C/voda ; Austenitno-perlitna transformacija je napredovala [4].....	23
Slika 28: Čelik sa 0,98% C, 900°C/30min, 300°C/voda ; Bainit [4] .....	23
Slika 29: Čelik sa 0,98% C, 900°C/2h, 200°C/voda ; Austenitno-bainitna transformacija je napredovala [4].....	23
Slika 30: Čelik sa 0,98% C, 900°C/8h, 200°C/voda ; Bainit [4].....	24
Slika 31: Čelik sa 0,98% C, 900°C/1min, 700°C/voda ; Početak izdvajanja sekundarnog cementita. Nagrizano alkalnom otopinom natrij-pikrata [4].....	24
Slika 32: Čelik sa 0,98% C, 900°C/4min, 700°C/voda ; Kraj izdvajanja sekundarnog cementita. Nagrizano alkalnom otopinom natrij-pikrata [4] .....	24
Slika 33: Dijagram izotermalnog razlaganja pothlađenog austenita čelika sa 0,98% C [4] .....	26
Slika 34: Shematski prikaz austenitno-perlitne transformacije [4].....	26
Slika 35: Shematski prikaz austenitno-bainitne transformacije [4] .....	27

Slika 36: Shematski prikaz transformacije austenita u slučaju grubozrnatog (a) i sitnozrnatog (b) austenita kod istog vremena transformacije [4].....	29
Slika 37: Dijagram izotermalne transformacije austenita eutektoidnog čelika (0,8%C), TTT–dijagram [3] .....	31
Slika 38: Mikrostruktura bainita: (a) gornji bainit, x5000; (b) donji bainit i zaostali austenit, x500 [3].....	31
Slika 39: Mjerenje tvrdoće po Rockwellu [6] .....	33
Slika 40: Plan pokusa .....	35
Slika 41: Vrijednosti utjecaja temperatura popuštanja na mehanička svojstva čelika Č.1731 [5].....	40
Slika 42: Pojas garantirane prokaljivosti čelika Č.4830 [5].....	46
Slika 43: Vrijednosti utjecaja temperatura popuštanja na mehanička svojstva čelika Č.4830 [5].....	46
Slika 44: Uređaj za analizu kemijskog sastava materijala.....	47
Slika 45: Dio ispitnog uzorka .....	48
Slika 46: Režimi toplinske obrade uzoraka „I“.....	49
Slika 47: Režimi toplinske obrade uzoraka „II“ .....	50
Slika 48: Bat i priprema za stezanje ispitnih uzoraka.....	53
Slika 49: Ispitni uzorak stegnut u pripremi i bat .....	54
Slika 50: Ispitni uzorak A3 .....	55
Slika 51: Ispitni uzorak B3 .....	55
Slika 52: Ispitni uzorak C3 .....	56
Slika 53: Ispitni uzorak D3 .....	56
Slika 54: Rezačica Labotom-3 .....	57
Slika 55: Uređaj za poliranje Struers LoboPol-5 .....	58
Slika 56: Uzorci pripremljeni za metalografsku analizu.....	58
Slika 57: Mikroskop BX51M.....	58

Slika 58: Metalografska slika uzorka A .....	59
Slika 59: Metalografska slika uzorka B .....	59
Slika 60: Metalografska slika uzorka C .....	60
Slika 61: Metalografska slika uzorka D .....	60

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Izotermna transformacija austenita (čelik C 100; austenitiziran 5min na 900°C [4].....	25
Tablica 2: Kemijski sastav čelika Č.1731 [5].....	36
Tablica 3: Mehanička svojstva čelika Č.1731 u poboljšanom stanju [5] .....	38
Tablica 4: Mehanička svojstva čelika Č.1731 u normaliziranom stanju [5] .....	38
Tablica 5: Mehanička svojstva čelika Č.1731 kod trajnih titrajnih naprezanja [5].....	39
Tablica 6: Fizikalna svojstva čelika Č.1731 [5] .....	39
Tablica 7: Kemijski sastav čelika Č.4830 [5].....	41
Tablica 8: Mehanička svojstva čelika Č.4830 u poboljšanom stanju [5] .....	43
Tablica 9: Mehanička svojstva čelika Č.4830 kod trajnih titrajnih naprezanja [5].....	43
Tablica 10: vrijednosti tvrdoće čelika Č.4830 s obzirom na stanje toplinske obrade [5] .....	44
Tablica 11: Fizikalna svojstva čelika Č.4830 [5] .....	44
Tablica 12: Linearni toplinski koeficijent istežanja čelika Č.4830 [5].....	45
Tablica 13: Prokaljivost čelika Č.4830 (orijentacijske vrijednosti) (JUS C.B9.021/74) [5] .....	45
Tablica 14: Kemijski sastav čelika Č.1731 dobiven analizom .....	47
Tablica 15: Vrijednosti tvrdoće nakon toplinske obrade.....	52
Tablica 16: Rezultati dobiveni udaranjem ispitnih uzoraka na batu .....	54

## POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
<i>A</i>		austenit
<i>A<sub>c1</sub></i>	°C	kritična temperatura
<i>A<sub>c3</sub></i>	°C	kritična temperatura
<i>A<sub>cm</sub></i>	°C	kritična temperatura
<i>A<sub>r1</sub></i>	°C	kritična temperatura
<i>A<sub>1</sub></i>	°C	točka pretvorbe
<i>A<sub>3</sub></i>	°C	točka pretvorbe
<i>B</i>		bainit
<i>dT</i>	°C	promjena temperature
<i>dt</i>	s, min, h	promjena vremena
<i>F</i>		ferit
<i>F<sub>0</sub></i>	N	sila predopterećenja
<i>F<sub>1</sub></i>	N	sila glavnog opterećenja
<i>h</i>	mm	dubina prodiranja penetranta
<i>h<sub>0</sub></i>	mm	dubina prodiranja penetranta
<i>h<sub>1</sub></i>	mm	dubina prodiranja penetranta
<i>h<sub>2</sub></i>	mm	dubina prodiranja penetranta
<i>HR<sub>C</sub></i>		tvrdoća prema Rockwellu
<i>HR<sub>CA</sub></i>		tvrdoća uzoraka A
<i>HR<sub>CB</sub></i>		tvrdoća uzoraka B
<i>HR<sub>CC</sub></i>		tvrdoća uzoraka C
<i>HR<sub>CD</sub></i>		tvrdoća uzoraka D
<i>K</i>		kaljenje
<i>M</i>		martenzit temp. početka stvaranja

$M_p$	°C	martenzita kod zagrijavanja
		temp. početka stvaranja martenzita kod gašenja
$M_s$	°C	broj udaraca na batu uzoraka A
$n_A$		broj udaraca na batu uzoraka B
$n_B$		broj udaraca na batu uzoraka C
$n_C$		broj udaraca na batu uzoraka D
$n_D$		popuštanje
$P$		temp. gašenja uzoraka A
$t_{gA}$	°C	temp. gašenja uzoraka B
$t_{gB}$	°C	temp. gašenja uzoraka C
$t_{gC}$	°C	temp. gašenja uzoraka D
$t_{gD}$	°C	minimalno trajanje
$t_{i min}$	s	brzina grijanja/hlađenja
$v$	°C/s, °C/min, °C/h	gornja kritična brzina gašenja
$v_{kg}$	°C/s	temp. toplinske obrade
$\vartheta_{T.O.}$	°C	temp. austenizacije
$\vartheta_a$	°C	temp. inkubacije
$\vartheta_i$	°C	temp. popuštanja
$\vartheta_p$	°C	



## 1. UVOD

U današnje vrijeme jako je bitno da se proizvod napravi sa što manjim troškovima proizvodnje, jer će na taj način biti jeftiniji a samim time i pristupačniji krajnjem kupcu. Zbog toga je jako bitno da se prilikom konstruiranja strojnog dijela, odabere takav materijal i takva tehnologija izrade da krajnji proizvod bude zadovoljavajuće kvalitete i zadovoljavajuće cijene za krajnjeg kupca. Dakle, cilj je napraviti što kvalitetniji proizvod, a pritom ga čim jeftinije proizvesti.

Glavni dio ovog rada je eksperimentalni dio u kojem će se, kroz postupak toplinske obrade kaljenja režimima takvima da se dobije optimalna struktura materija, a s ciljem dobivanja boljih eksploatacijskih svojstava strojnog dijela, pokazati da li je moguće promjenom režima gašenja nakon kaljenja dobiti zadovoljavajuća eksploatacijska svojstva strojnog dijela. Na ovaj način pokazat će se može li se u proizvodnji zadržati postojeći materijal ili treba doći do zamjene materijala nekim novim materijalom a s ciljem zadovoljavanja eksploatacijskih svojstava strojnog dijela.

## 2. TOPLINSKA OBRADA METALA

Toplinska obrada je postupak u kojem se predmet namjerno podvrgava određenim temperaturno vremenskim ciklusima kako bi se postigla željena mehanička, fizička i kemijska svojstva materijala, a to se ostvaruje promjenom mikrostrukture materijala.

Znatnije povećanje čvrstoće postiže se postupcima toplinske obrade kojima se bitno mijenja mikrostruktura materijala. Pri tome nastaju i novi mikrostrukturalni oblici različiti od onih u pripadnim ravnotežnim stanjima.

Dva temeljna parametra postupka toplinske obrade su temperatura i vrijeme.

Iz ovih osnovnih parametara toplinske obradbe izvodi se parametar brzina grijanja, odnosno hlađenja :

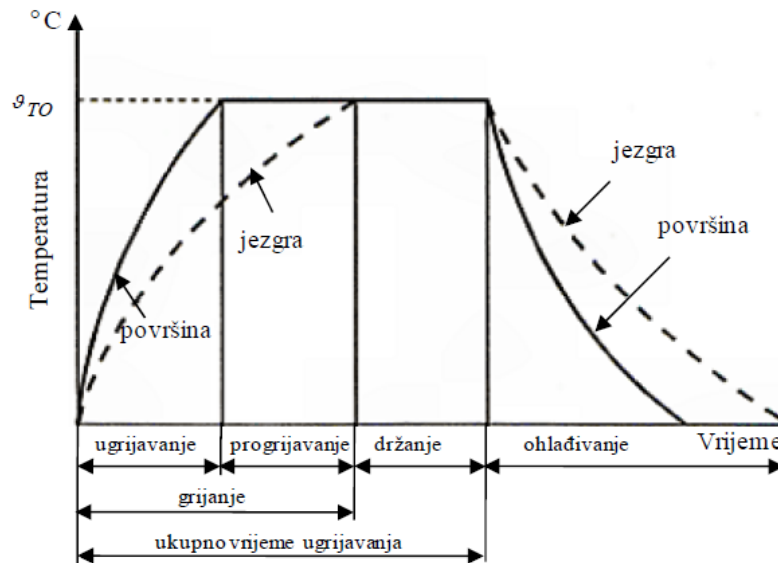
$$\frac{dT}{dt} = v \quad (^\circ\text{C/s, } ^\circ\text{C/min, } ^\circ\text{C/h}) \quad (1)$$

gdje je:

$dT$  - promjena temperature

$dt$  – promjena vremena

Procesi toplinske obrade obuhvaćaju žarenje, kaljenje, popuštanje, poboljšavanje te površinska otvrdnjavanja. Opći postupak svake od navedenih toplinskih obrada može se opisati dijagramom ovisnosti promjene temperature o vremenu (trajanju toplinske obrade). Taj dijagram je prikazan na slici 1, te se naziva dijagram postupka.



Slika 1: Dijagramski prikaz postupka toplinske obrade (općenito) [1]

Navedene veličine na slici 1 znače:

$\vartheta_{T.O.}$  - temperatura toplinske obrade (općenito)

**ugrijavanje** - trajanje do trenutka kada površinski slojevi dostignu temperaturu toplinske obrade

**progrijavanje** - vrijeme trajanja od trenutka ugrijavanja površine do trenutka kada i slojevi jezgre postignu temperaturu toplinske obrade, tj. kada po cijelom presjeku radnog dijela imamo konstantnu temperaturu

**grijanje** - zbroj trajanja vremena ugrijavanja i progrijavanja

**držanje** - trajanje boravka radnog dijela na temperaturi toplinske obrade od trenutka kada je on progrijan do trenutka kada započinje hlađenje radnog dijela

**ohlađivanje** - trajanje snižavanja temperature radnog dijela sve dok svi slojevi jezgre ne dostignu zadanu temperaturu, tj. izjednače je s temperaturom površinskih slojeva i okoliša [1]

## 2.1 Poboljšanje čelika

Postupak poboljšanja provodimo sa svrhom povećanja žilavosti i rastezljivosti a na račun pada tvrdoće i čvrstoće. Provodi se na elementima strojeva koji su dinamički opterećeni te se nastoji postići kompromis mehaničkih svojstava.

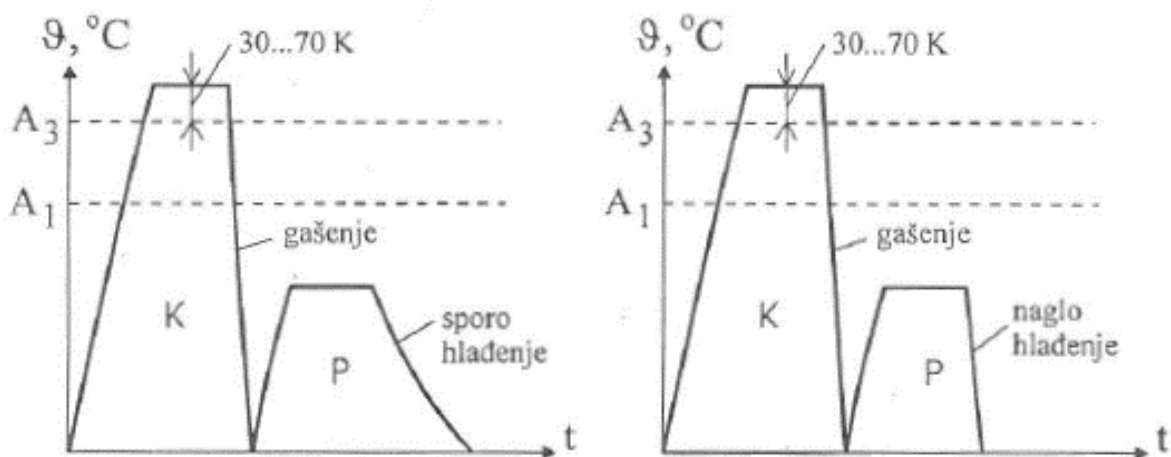
Poboljšanje je postupak toplinske obrade čelika, koji se sastoji iz kaljenja i popuštanja na relativno visoke temperature, koje se često već približavaju temperaturama mekog žarenja. S obzirom na korišteno rashladno sredstvo pri kaljenju govorimo o poboljšanju u vodi, ulju ili na zraku.

Pri poboljšanju u čeliku dobijemo tzv. tipične „poboljšanje strukture“, koje su uglavnom sorbitne, bainitne ili troostitne.

Poboljšanje se sastoji od toplinske obrade kaljenja sa pravilne temperature austenitizacije, odgovarajućeg ohlađivanja u odgovarajućem sredstvu (voda, ulje, zrak) i naknadnog visokog popuštanja na odgovarajuću temperaturu ispod  $A_{c1}$ .

Kod ohlađivanja s temperature popuštanja potrebno je obratiti pažnju na krtost čelika nakon poboljšanja.

Postupak se dijagramski prikazuje u temperaturno-vremenskom dijagramu (slika 2a i 2b):



Slika 2a: Dijagram postupka poboljšanja čelika otpornih na krhkost popuštanja

Slika 2b: Dijagram postupka poboljšanja čelika sklonih krhkosti popuštanja. [2]

Navedene veličine na slici 2a i 2b znače:

**A<sub>3</sub>** - točka pretvorbe (911°C)

**A<sub>1</sub>** - točka pretvorbe (723°C)

**K** - kaljenje

**P** – popuštanje

Postupku poboljšanja podvrgavaju se samo čelici čiji je sadržaj ugljika od 0,3 % do 0,6 %, tj. podeutektoidni čelici. Taj postupak još nazivamo oplemenjivanje.

Poboljšanje se radi nakon nekog procesa obrade (lijevanje, obrada odvajanjem čestica, deformiranje, itd.) da se promijeni prvobitna struktura materijala (koja nam je bila pogodna za prethodnu obradu), a samim time i mehanička svojstva (čvrstoća, tvrdoća, žilavost), poboljša, na taj način da strojni dio ima zadovoljavajuća mehanička svojstva.

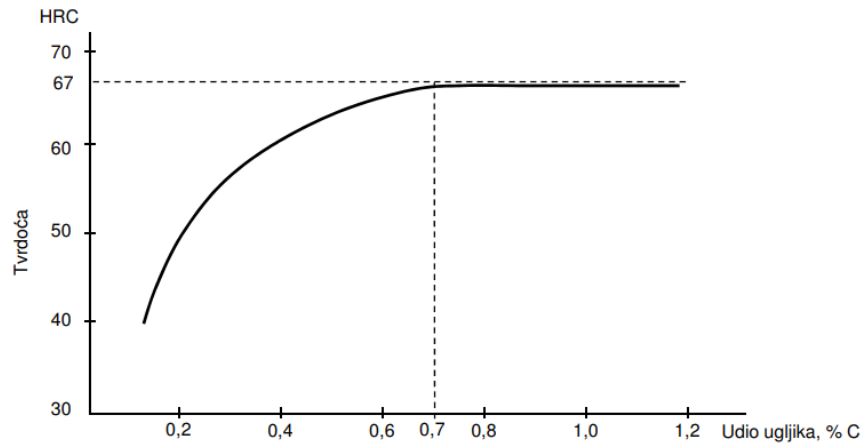
### **2.1.1. Kaljenje čelika**

Osim kaljenja cijelog strojnog dijela, u praksi se često primjenjuje i postupak lokalnog (površinskog) kaljenja. Tim postupkom ugrijavaju se samo neki dijelovi strojnog dijela koje kaljenjem treba otvrdnuti.

Tada se primjenjuju izvori topline velike gustoće energije kao što su:

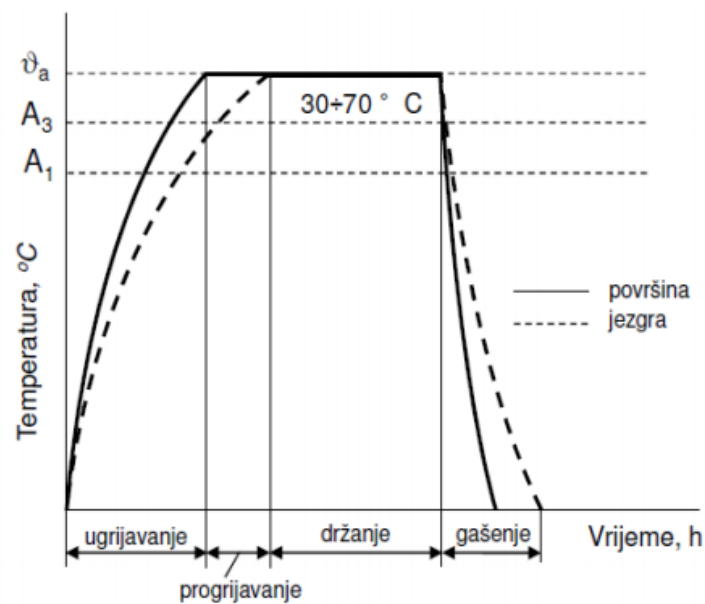
- plinski plamenici,
- inducirana električna energija,
- u novije vrijeme laserski snop i snop elektrona.[1]

Glavna svrha kaljena čelika je postizanje maksimalne tvrdoće, koja ovisi o udjelu ugljika u čeliku (Burnsov dijagram) te postizanje što boljeg tj. jednoličnijeg prokaljenja a to znači što jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku strojnog dijela.



Slika 3: Burnsov dijagram [3]

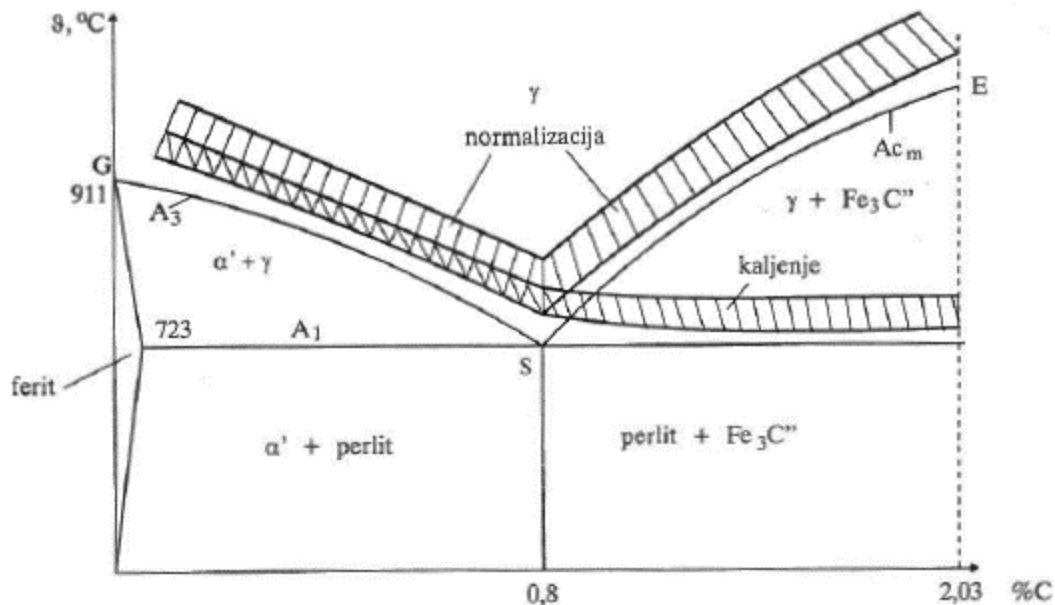
Postupak kaljenja sastoji se od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije (u svrhu otapanja ugljika i legirajućih elemenata u austenitu) i gašenja (u svrhu postizanja martenzitne mikrostrukture). Na slici 4 prikazan je dijagram kaljenja nekog podeutektoidnog čelika.



Slika 4: Dijagram postupka kaljenja nekog podeutektoidnog čelika [1]

## Temperatura austenitizacije $\vartheta_a$ :

Temperatura austenitizacije utvrđuje se prema željenom udjelu C kojeg treba otopiti austenit.



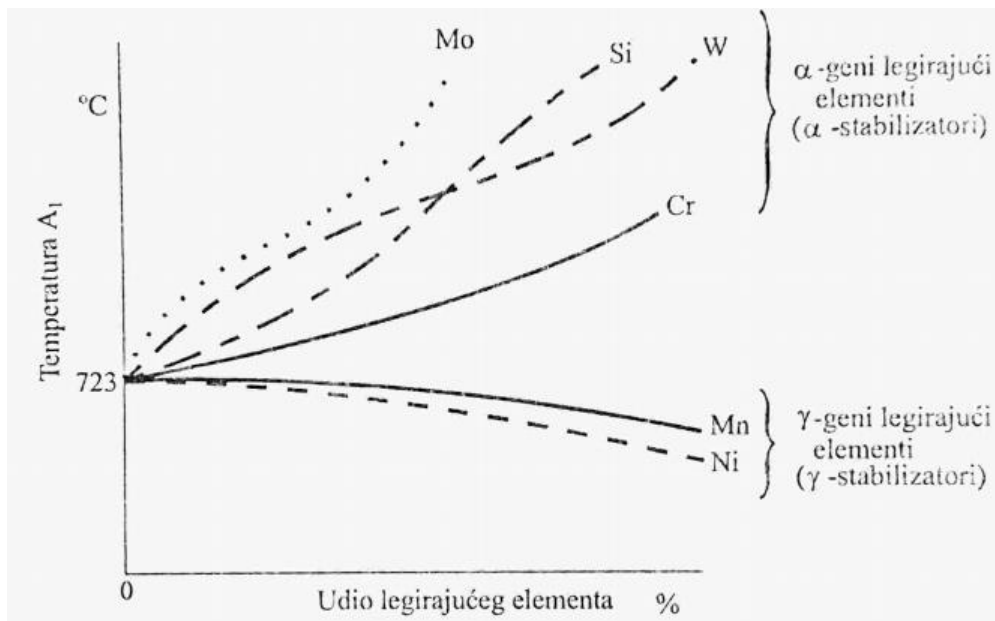
Slika 5: Dijagram Fe-Fe<sub>3</sub>C s ucrtanim poljima optimalnih temperatura kaljenja odnosno normalizacije [2]

Razlozi zbog kojih treba  $\vartheta_a$  držati što je moguće nižom jesu:

- povećana tendencija pojave deformacija i pukotina s višom  $\vartheta_a$
- povećana tendencija oksidaciji i razugljičenju s višom  $\vartheta_a$
- povećani rast zrna strukture pri višim  $\vartheta_a$ .

Izbor temperature austenitizacije se vrši na način:

- za ugljične (nelegirane) čelike iz dijagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C
- za čelike legirane  $\alpha$ -genim legirajućim elementima, temperatura austenitizacije se u odnosu na nelegirane čelike povisuje približno za iznos povišenja temperatura A<sub>1</sub> (odnosno A<sub>3</sub>); slika 6
- za čelike legirane  $\gamma$ -genim legirajućim elementima, temperatura austenitizacije se snižava u odnosu na odgovarajuće nelegirane čelike otprilike za iznos sniženja temperatura A<sub>1</sub> (odnosno A<sub>3</sub>); slika 6



Slika 6: Utjecaj legiranih elemenata na temperaturu pretvorbe austenita u ferit [1]

Temperaturu austenitizacije, najčešće, određujemo iz podataka dobivenih od proizvođača čelika te po potrebi eksperimentalnom provjerom.

### Držanje na temperaturi austenitizacije:

Držanje na temperaturi austenitizacije bitno je zbog eliminacije grešaka koje mogu nastati zbog prebrzog zagrijavanja strojnog dijela. U slučaju prebrzog zagrijavanja eutektoidni karbidi se ne stignu svi rastvoriti pri temperaturi  $A_1$ , pa niti u intervalu  $A_1 - A_3$ . U tom slučaju čelik sadrži još uvijek neraspadnute karbide i na temperaturi  $A_3$ , a to znači da je u tom trenutku sadržaj ugljika u austenitu niži nego što očekujemo. Kako bi austenit primio ugljik, u čvrstu otopinu, ugljik iz tih karbida, strojni dio treba neko vrijeme držati na temperaturi austenitizacije. Tek nakon što se da austenitu dovoljno vremena da otopi željezni udio ugljika, možemo očekivati da će se on pri gašenju ponašati onako kako nam to pokazuje odgovarajući TTT – dijagram, tj. Burnsov dijagram.

### Gašenje

Gašenje je naglo odvođenje topline. Svrha gašenja je dovoljno pothlađivanje da bi se od austenita preklpom dobio martenzit.



Osnovna podjela navedenih sredstava za gašenje je prema stvaranju parnog omotača na početku uranjanja vrućeg obradka (tzv. Leidenfrost-ovom fenomenu). Prema tom kriteriju se sredstva za gašenje u toplinskoj obradi uobičajeno dijele na slijedeće skupine:

1) Sredstva s vrelištem ispod temperature austenitizacije čelika (sredstva podložna Leidenfrost-ovom fenomenu):

- voda,
- vodene otopine anorganskih ili organskih tvari (npr. otopine polimera),
- ulje za kaljenje,
- emulzije (otopine ulja i vode).

2) Sredstva s vrelištem iznad temperature austenitizacije čelika (sredstva koja ne podliježu Leidenfrost-ovom fenomenu):

- rastaljene soli,
- rastaljeni metali.

3) Tehnički plinovi i vakuum (sredstva koja ne podliježu Leidenfrost-ovom fenomenu):

- zrak (mirni, komprimirani)
- inertni plinovi: dušik, helij, argon
- fluidizirane čestice

Izbor sredstava za gašenje slijedi iz iznosa gornje kritične brzine gašenja. Ona se izračunava iz odgovarajućeg TTT – dijagrama prema izrazu (2):

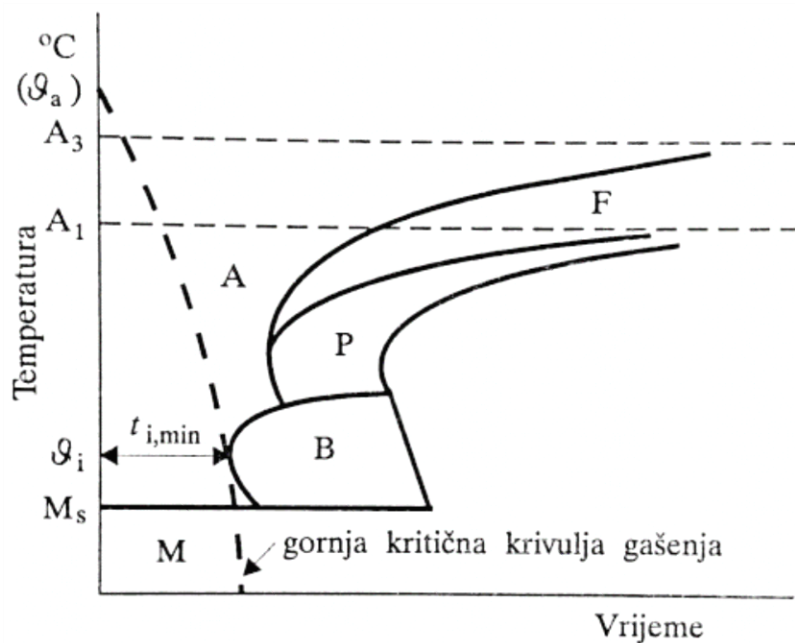
$$v_{kg} = \frac{\vartheta_a - \vartheta_i}{t_{i,min}}, [^{\circ}\text{C/s}] \quad (2)$$

$v_{kg}$  - gornja kritična brzina gašenja

$\vartheta_a$  - temperatura austenitizacije

$\vartheta_i$  - temperatura inkubacije

$t_{i,min}$  - minimalno trajanje inkubacije



Slika 7: Utvrđivanje gornje kritične brzine gašenja [1]

## Kontrola kaljenja

Kontrola kvalitete zakaljenog predmeta najčešće se provodi mjerenjem tvrdoće nakon gašenja te usporedbom postignute tvrdoće s Burnsovim dijagramom. U nekim slučajevima radit će se neka druga ispitivanja kao što su ultrazvučna ispitivanja, mikrografska ispitivanja ili neka druga ispitivanja.

### 2.1.2. Popuštanje čelika

Popuštanje je postupak zagrijavanja kaljenog čelika na neku temperaturu nižu od temperature  $A_1$ , držanja na toj temperaturi određeno vrijeme, a zatim sporog hlađenja. Kod visokolegiranih alatnih čelika postupak popuštanja treba ponoviti dva ili čak tri puta da bi se izlučili karbidi popuštanja i uklonio zaostali austenit čime se postiže povoljna kombinacija svojstava poput tvrdoće, žilavosti i otpornosti na trošenje.

Ovim postupkom toplinske obrade postiže se:

- eliminacija zaostalih naprezanja,

- povećanje žilavosti (eliminacijom krhkog tetragonalnog martenzita koji uopće nema izražena svojstva rastezljivosti i žilavosti),
- dimenzijska stabilnost izratka (pojava promjene dimenzije izražena je kod visokolegiranih alatnih čelika – zagrijavanjem ovih čelika, nakon kaljenja, već na nižim temperaturama dolazi do pretvorbe zaostalog austenita u martenzit i karbide popuštanja što je praćeno promjenom volumena/dimenzija).

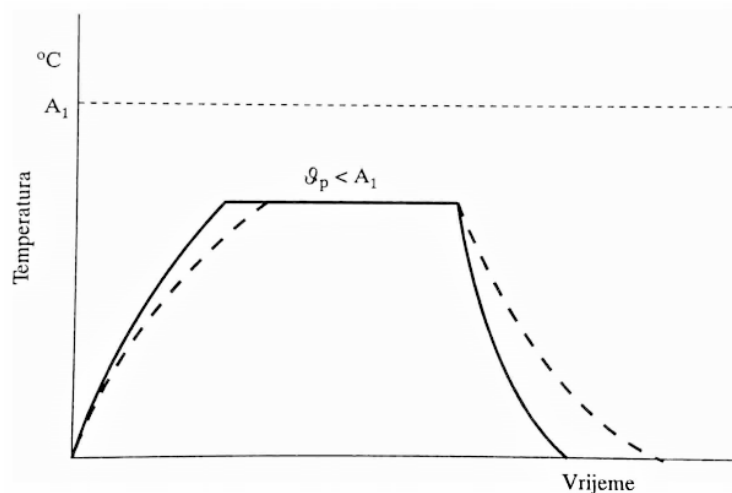
Rezultati popuštanja nakon kaljenja:

- Smanjuje se: tvrdoća, čvrstoća i granica elastičnosti (u odnosu na zakaljeno stanje).
- Povećava se: žilavost i rastezljivost (u odnosu na zakaljeno stanje).

Prema visini temperature popuštanja ( $\vartheta_p$ ) postupci popuštanja se dijele na:

- Niskotemperaturno popuštanje ( $\vartheta_p < 220^\circ\text{C}$ )
- Srednjetemperaturno popuštanje ( $220^\circ\text{C} < \vartheta_p < 400^\circ\text{C}$ )
- Visokotemperaturno popuštanje ( $400^\circ\text{C} < \vartheta_p < A_1$ )

Slika 8 prikazuje opći dijagram postupka popuštanja čelika.



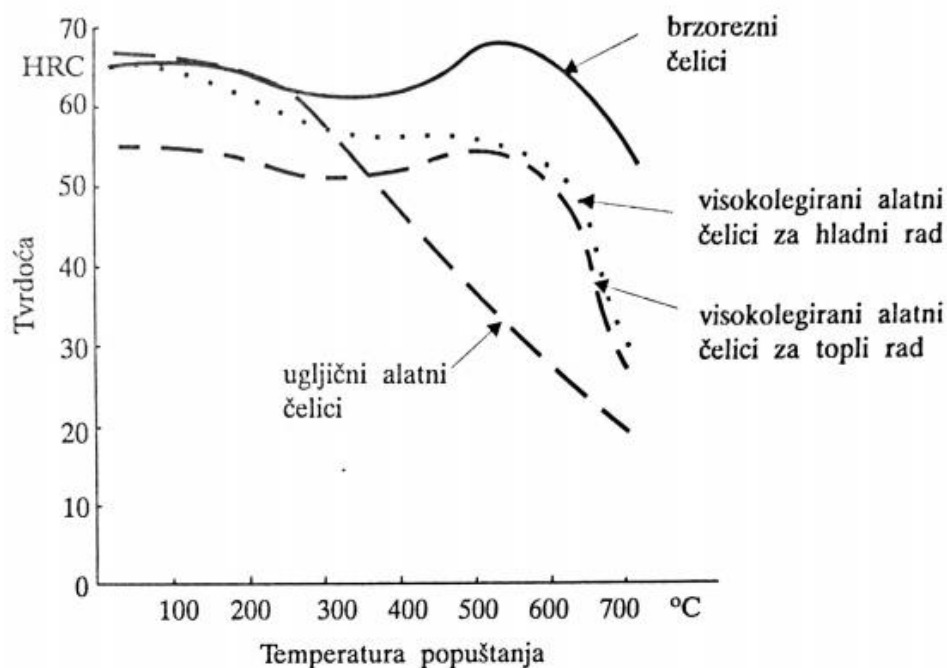
Slika 8: Dijagram postupka popuštanja čelika [1]

Ovaj proces je difuzijskog karaktera pa se jednak učinak popuštanja može postići:

- višom temperaturom popuštanja uz kraće vrijeme popuštanja ili
- nižom temperaturom popuštanja uz dulje vrijeme popuštanja.

Popuštanje kaljenog strojnog dijela nužno je provesti nakon gašenja i to na temperaturu višu od one na kojoj će strojni dio biti izložen u eksploataciji. Popuštanjem se redovno snizuje tvrdoća postignuta kaljenjem, ali to sniženje nikako nije cilj, nego samo nužna posljedica popuštanja. Izuzetak od pojave sniženja tvrdoće su visokolegirani alatni čelici (čelici za topli rad i brzorezni čelici) koji, zbog pojave sekundarnog otvrdnuća (sekundarna tvrdoća), nakon popuštanja zadržavaju istu ili postižu čak nešto višu tvrdoću od one u kaljenom stanju. Iznos tvrdoće čelika nakon popuštanja na različitim temperaturama prikazuje se dijagramima popuštanja. Iz njih se može procijeniti i sposobnost čelika da zadrži visoku tvrdoću postignutu kaljenjem unatoč povišenju temperature popuštanja (tj. njegova otpornost na popuštanje).

Slika 9 prikazuje dijagram popuštanja nekih karakterističnih vrsta čelika.



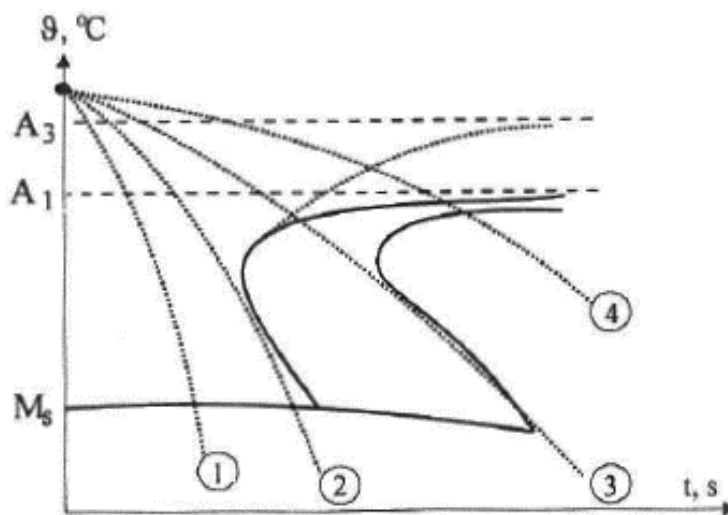
Slika 9: Dijagrami popuštanja različitih vrsta čelika [1]

## 2.2. Kaljivost čelika

Kad govorimo o kaljivosti čelika možemo razgovarati o zakaljivosti i prokaljivosti čelika.

### 2.2.1. Zakaljivost

Zakaljivost je sposobnost čelika da postigne što je moguće višu tvrdoću na površini nakon kaljenja, tj. nakon gašenja iz A-područja. Dakle, radi se o površinskoj tvrdoći uz pretpostavku da je na površini čelika kaljenjem postignuto 100% martenzit, tj. da je površinski sloj gašen gornjom kritičnom ili nadkritičnom brzinom (slika 10).



Slika 10: Prikaz gašenja u kontinuiranom dijagramu TTT [2]

Objašnjenje slike 10:

Krivulja 1 : krivulja nadkritičnog gašenja,

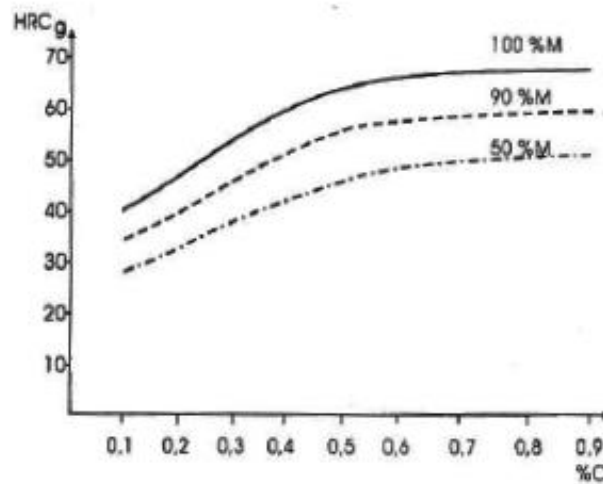
Krivulja 2 : krivulja gornjeg kritičnog gašenja,

Krivulja 3 : krivulja donjeg kritičnog gašenja,

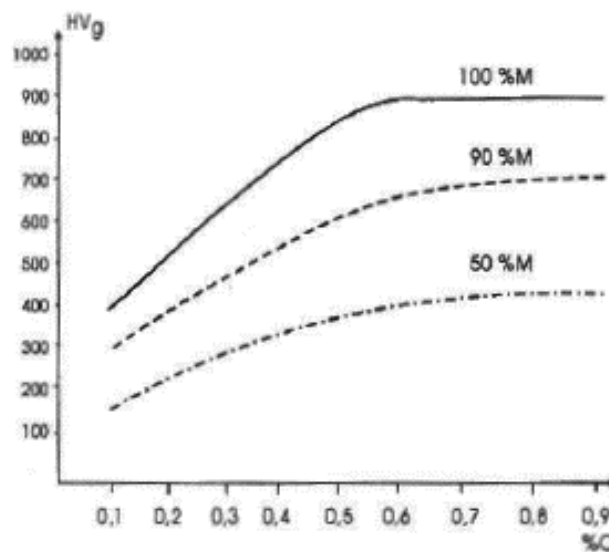
Krivulja 4 : krivulja podkritičnog gašenja.

Zakaljivost =  $f(\%C)$ . Površinska tvrdoća čelika ovisi samo o onom udjelu ugljika, koji sudjeluje u procesu, tj. u onom udjelu C, koji je otopljen („angažiran“) u austenitu i

„zarobljen“ u martenzitu. Prema Hodgeu, Orehoskom, Burns, Mooreu i Archeru dobiveni su dijagrami zakaljivosti (slika 11 i slika 12).



Slika 11: Ovisnost tvrdoće gašenja čelika o udjelu („angažiranog“) ugljika u čeliku [ $HRC=f(\%C)$ ] [2]



Slika 12: Ovisnost tvrdoće gašenja čelika o udjelu („angažiranog“) ugljika u čeliku [ $HV_g=f(\%C)$ ] [2]

Legirajući elementi ne utječu na zakaljivost čelika, nego samo omogućuju da se ta tvrdoća postigne i blažim gašenjem.

### **2.2.2. Prokaljivost**

Prokaljivost čelika je sposobnost čelika da postigne što je moguće ravnomjerniji raspored tvrdoće po presjeku nakon kaljenja.

Na prokaljivost utječu :

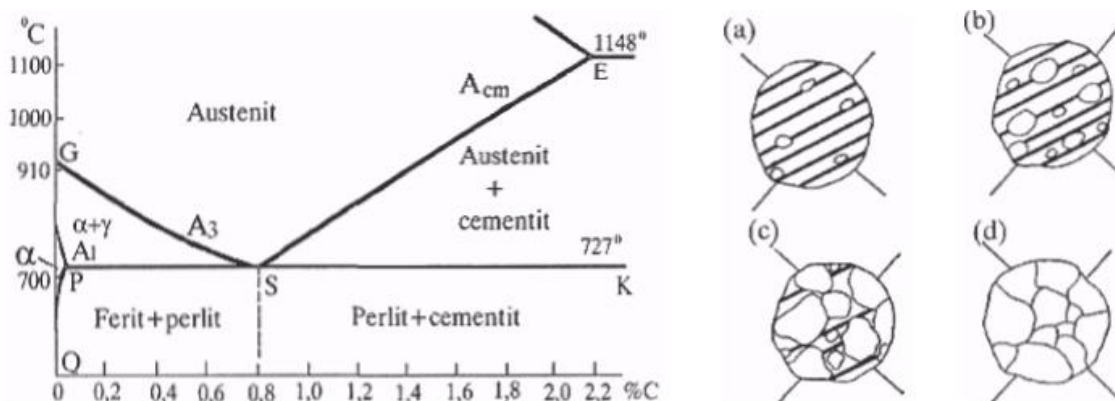
- sastav čelika (C, Me – svi, osim Co i Al)
- dimenzije predmeta
- sredstvo za gašenje

Prokaljenost će biti tim bolja što je kaljeni predmet manjih dimenzija i što je veća brzina gašenja. Postoji granična brzina gašenja iznad koje tvrdoća više ne raste - "gornja kritična brzina gašenja".

### 3. FAZNE TRANSFORMACIJE U ČELIKU

#### 3.1. Fazne transformacije kod zagrijavanja

Do transformacije perlita u austenit dolazi u procesu zagrijavanja čelika kod nekih toplinskih obrada. Na slici 13 je dijagram stanja Fe–Fe<sub>3</sub>C, prema tom dijagramu eutektoidni čelik 0,8% C, ima perlitnu strukturu (lamelle ferita + cementit). U procesu zagrijavanja do temperature A<sub>C1</sub> (727°C) manja količina cementita otapa se u feritu po liniji PQ. Zagrijavanjem iznad temperature A<sub>C1</sub> na granicama feritne i cementitne faze stvaraju se mala zrna austenita, (slika 13a) u kojima je otopljen ugljik. Dalje, ova stvorena zrna rastu uz stvaranje novih zrna austenita, a proces otapanja cementita se nastavlja, (slika 13b i 13c). Proces transformacije perlita u austenit se završava kada se bivše perlitno zrno ispuni austenitnim zrnima, (slika 13d). Stvorena zrna austenita nisu homogena u smislu sadržaja otopljenog ugljika, pa je potrebno neko dodatno vrijeme da bi se izvršila homogenizacija austenitnih zrna. Prema tome, transformacija perlita u austenit nastaje uslijed alotropskih promjena rešetke železa  $\alpha \rightarrow \gamma$ , razlaganja Fe<sub>3</sub>C i difuzije atoma ugljika.



Slika 13: Dijagram stanja Fe–Fe<sub>3</sub>C i prikaz nastajanja austenitnih zrna u procesu zagrijavanja [2]

Kod zagrijavanja podeutektoidnih čelika, čija je struktura ferit + perlit, proces austenitizacije počinje kod postizanja kritične temperature od 727°C u točki A<sub>C1</sub>, tada se perlit transformira u austenit te se stvara struktura ferit + austenit. Daljim



zagrijavanjem ferit se postepeno transformira u austenit i dostizanjem temperature koja odgovara kritičnoj točki  $A_{C3}$  (linija GS), struktura čelika postaje austenitna.

Kod zagrijavanja nadeutektoidnih čelika, čija je struktura perlit + cementit, proces austenitizacije počinje kod postizanja kritične temperature od  $727^{\circ}\text{C}$  u točki  $A_{C1}$ , daljnjim zagrijavanjem cementit se potpuno transformira u austenit kod dostizanja temperature u kritičnoj točki  $A_{cm}$  (linija SE).

Brzina transformacije feritno-cementitne strukture u austenitnu, pored temperature zagrijavanja, ovisi i o veličini njihovih lamela. Što su lamele ferita i cementita manje (tanje), to se brže stvara jezgra austenita i proces austenitizacije je brži.

Na brzinu austenitizacije utječe i sadržaj ugljika. Što je veći sadržaj ugljika, to je proces kraći, tj. austenitizacija se brže odvija. Isto tako na brzinu austenitizacije utječu i neki od legirajućih elemenata u čeliku. Elementi kao što su krom, molibden, volfram i drugi elementi za oblikovanje karbida, a zbog težeg otapanja karbida legirajućih elemenata u austenitu, usporavaju proces austenitizacije. Sadržaj otopljenih legirajućih elemenata u austenitu nije ujednačen. Proces homogenizacije austenita, koji sadrži legirajuće elemente, traje duže jer je difuzija atoma legirajućih elemenata u rešetki  $\gamma\text{-Fe}$  znatno sporija u odnosu na ugljik.

### **3.2 Fazne transformacije kod hlađenja austenita**

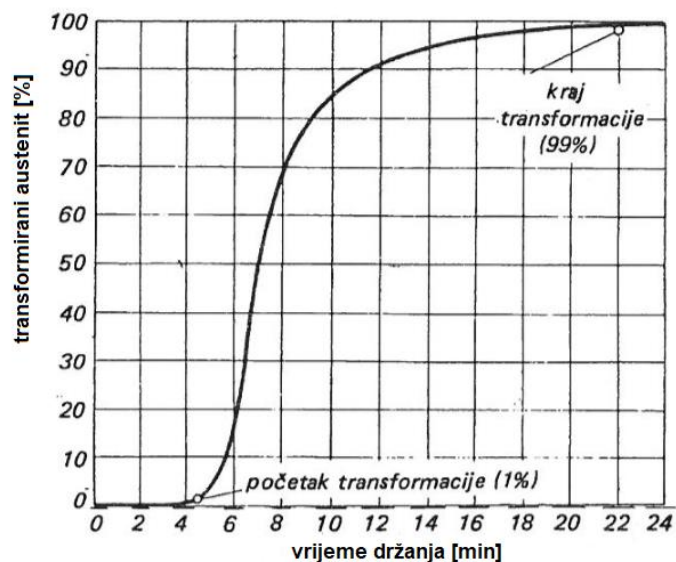
Razgradnja austenita odvija se samo na temperaturama nižim od  $727^{\circ}\text{C}$  (kritična točka  $A_{r1}$ ).

Austenit se kod vrlo male brzine hlađenja transformira u kritičnoj točki  $A_{r1}$  u eutektoidni perlit, koji se sastoji do ferita i cementita; međutim, kod vrlo velike brzine hlađenja na točki  $M_s$  nastaje martenzitna struktura, tj. struktura kaljenja. Brzine hlađenja koje se nalaze između ova dva ekstremna slučaja izazivaju pojavu drugih vrsta struktura.

Procesi koji se odvijaju na različitim temperaturama jako su složeni ali su ipak objašnjeni u nekim najbitnijim pojedinostima. Razgradnja austenita čini osnovu svih pogleda toplinske obrade čelika, ona će se dalje detaljno razmotriti.

Najbolji pregled karakteristika transformacije austenita daje dijagram izotermne razgradnje, tj. IR-dijagram. Da bi se napravio ovakav dijagram, uzorci malih dimenzija kale se iz  $\gamma$  - područja u talini metala ili soli čija je temperatura niža od  $A_1$  točke i drže na konstantnoj temperaturi duže vremena. Krivulja razgradnje austenita na datoj temperaturi ispitivanja (tj. postotna količina transformiranog austenita u ovisnosti od vremena držanja) može se odrediti na različite načine, npr. dilatometrijski ili magnetometrijski.

Slika 14 pokazuje krivulju transformacije čelika sa 0,98% C; 0,24% Si; 0,16% Mn; 0,008% P i 0,010% S (čelik C 100), koji je austenitiziran 5 min na 900°C i tada brzo prebačen u talinu olova temperature od 700°C postojan oko 4 min. Tada ragradnja lagano počinje, ubrzava se jako naglo i ponovno se postepeno prekida.



Slika 14: Kinetika izotermalne austenitno-perlitne transformacije na 700°C u čeliku sa 0,98% C [4]

Iz tehničkih razloga početak transformacije austenitizacije definira se kao trenutak kada je transformirano 1% austenita, a završetak transformacije kao trenutak kada je transformirano 99% austenita. Iz gore navedene krivulje transformacija-vrijeme na 700°C u ovom smislu postižu vrijednost od 22 min.

Tok transformacije može se pratiti i metalografski. Ako se transformacija prekine nakon različitog vremena držanja i uzorci zakale u vodi, kaljenjem se ne mijenja struktura nastala kod transformacije. Jedino još netransformirani austenit prelazi u martenzit. Znači da poslije kaljenja u vodi količina martenzita određena

metalografski odgovara količini austenita koji se još nije transformirao u datom vremenu na temperaturi ispitivanja.

Na slici 15 pokazana je struktura čelika C 100 koji je sa 900°C brzo prebačen u otopinu olova, držan 4 min, a zatim zakaljen u vodi. Struktura se 100% sastoji od martenzita (ako se zanemari sekundarni cementit koji se nalazi na granicama zrna), što je znak da transformacija austenita u perlit nije počela poslije 4 min držanja.

Nakon 5 min držanja u strukturi se zapaža već nekoliko „otočića“ perlita (slika 16). Transformacija je započela. (Martenzit je u ovom slučaju, kao i na ostalim uzorcima, slabo nagrizan, kako bi se perlit učinio kontrastnijim). Nakon 6 min držanja stvorilo se oko 20% perlita (slika 17), nakon 8 min 70% (slika 18), nakon 15 min 95% (slika 19), a nakon 30 min držanja transformacija je završena: struktura se sastoji 100% od grubog lamelnog perlita (slika 20).

Transformacije slično prolaze i na drugim temperaturama, samo se početak i kraj transformacije pomiču ka kraćim ili dužim vremenima, a nastala struktura mijenja svoj karakter. Na narednim slikama biti će prikazane karakteristične strukture koje se javljaju u čeliku C 100 na različitim temperaturama izotermalnog držanja.

Na 600°C poslije sasvim kratkog inkubacijskog perioda javlja se finolamelarni perlit. U ovoj strukturi se može samo pri vrlo velikim povećanjima raspoznati finolamelarna građa. Slika 21 pokazuje da je poslije 3 s držanja transformacija prilično napredovala, poslije 15 s transformacija se potpuno završila (slika 22).

Na 500°C perlit je mnogo finiji nego na 600°C.

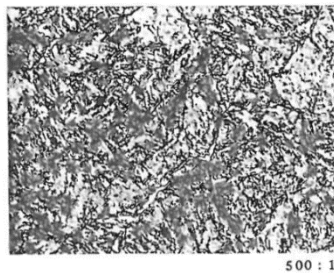
Slika 23 pokazuje strukturu nastalu poslije 2 s držanja, a slika 24 završetak transformacije poslije 15 s držanja na 500°C.

Lamelarna građa perlita može se dokazati samo pod određenim uvjetima i kod vrlo velikog povećanja (elektronski mikroskop).

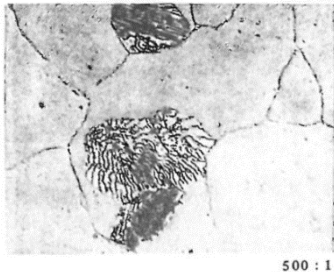
Na 400°C iz austenita nastaje mješana struktura: uz tamni perlit oblika rozete istovremeno se javljaju i tamno nagrizle iglice bainita. Bainit ili međustruktura ne sastoji se od lamelnog perlita, već od kristala cementita u obliku sićušnih globula raspoređenih u feritnoj osnovi. Slika 25 pokazuje mješovitu strukturu poslije 15 s držanja, a slika 26 završetak transformacije poslije 4 min držanja na 400°C.

Na 300°C perlit se više ne javlja, već samo igličasti bainit. Preobražaj se pomiče ka dužim vremenima i protječe vrlo sporo. Slika 27 pokazuje količinu naraslih iglica bainita nakon 4 minute držanja na 300°C, a slika 28 pokazuje mikrostrukturu nakon završene transformacije.

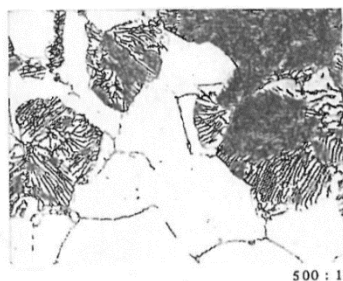
Na 200°C transformacija protiče znatno sporije nego na 300°C. Pri tome nastaje bainit kojeg karakteriziraju duge iglice. Slika 29 pokazuje napredovanje transformacije poslije 2 sata držanja na 200°C. Transformacija još uvijek nije potpuno završena ni nakon 8 sati držanja. Međutim, u strukturi se više ne mogu dokazati mali ostaci martenzita (slika 30). [4]



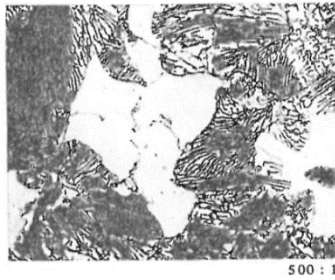
Slika 15: Čelik sa 0,98% C, 900°C/4min, 700°C/voda ; Martenzit i sekundarni cementit [4]



Slika 16: Čelik sa 0,98% C, 900°C/5min, 700°C/voda ; Početak austenitno-perlitne transformacije [4]



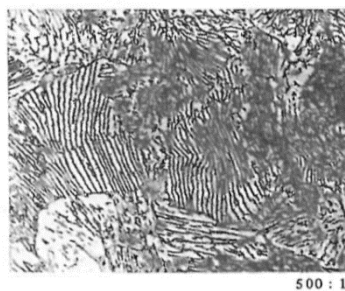
Slika 17: Čelik sa 0,98% C, 900°C/6min, 700°C/voda ; Napredovanje transformacije perlita [4]



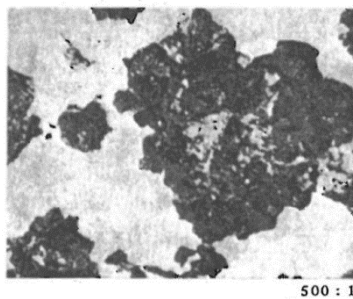
Slika 18: Čelik sa 0,98% C, 900°C/8min, 700°C/voda ; Napredovanje transformacije perlita [4]



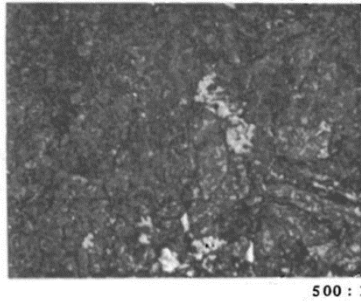
Slika 19: Čelik sa 0,98% C, 900°C/15min, 700°C/voda ; Završetak transformacije perlita [4]



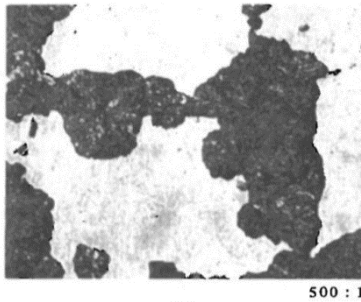
Slika 20: Čelik sa 0,98% C, 900°C/30min, 700°C/voda ; Grubolamelarni perlit [4]



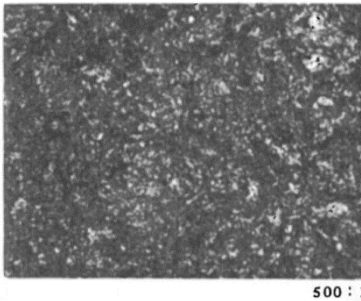
Slika 21: Čelik sa 0,98% C, 900°C/3s, 600°C/voda ; Austenitno-perlitna transformacija je napredovala [4]



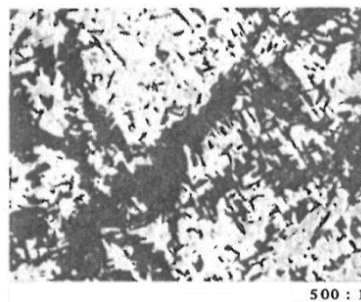
Slika 22: Čelik sa 0,98% C, 900°C/15s, 600°C/voda ; Finolamelarni perlit [4]



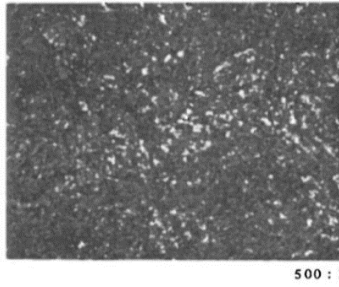
Slika 23: Čelik sa 0,98% C, 900°C/2s, 500°C/voda ; Austenitno-perlitne transformacija je napredovala [4]



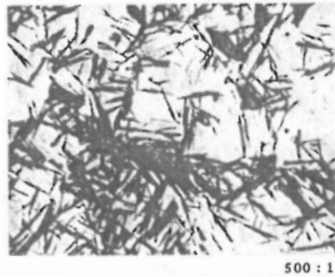
Slika 24: Čelik sa 0,98% C, 900°C/15s, 500°C/voda ; Finolamelarni perlit [4]



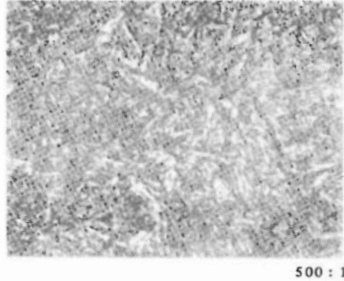
Slika 25: Čelik sa 0,98% C, 900°C/15s, 400°C/voda ; Transformacija austenita je napredovala [4]



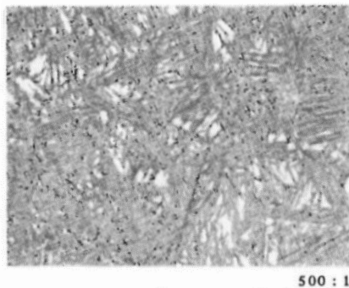
Slika 26: Čelik sa 0,98% C, 900°C/4min, 400°C/voda ; Perlit i Bainit [4]



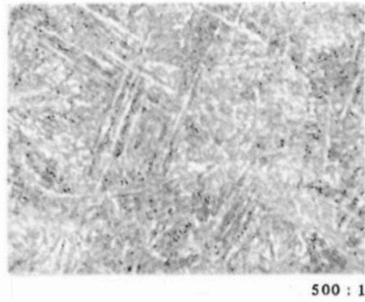
Slika 27: Čelik sa 0,98% C, 900°C/4min, 300°C/voda ; Austenitno-perlitna transformacija je napredovala [4]



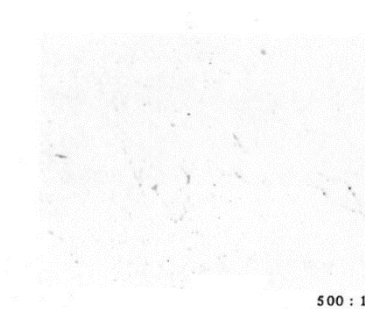
Slika 28: Čelik sa 0,98% C, 900°C/30min, 300°C/voda ; Bainit [4]



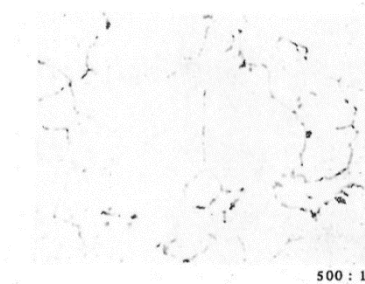
Slika 29: Čelik sa 0,98% C, 900°C/2h, 200°C/voda ; Austenitno-bainitna transformacija je napredovala [4]



Slika 30: Čelik sa 0,98% C, 900°C/8h, 200°C/voda ; Bainit [4]



Slika 31: Čelik sa 0,98% C, 900°C/1min, 700°C/voda ; Početak izdvajanja sekundarnog cementita. Nagrizano alkalnom otopinom natrij-pikrata [4]



Slika 32: Čelik sa 0,98% C, 900°C/4min, 700°C/voda ; Kraj izdvajanja sekundarnog cementita. Nagrizano alkalnom otopinom natrij-pikrata [4]

Martenzitna temperatura ovog čelika je 180°C. Na nižim temperaturama, npr. na 150°C, najveći dio austenita transformira se u martenzit. Preostali austenit transformira se, pak, poslije odgovarajuće dužeg vremena u bainit.

Trebamo spomenuti da i izdvajanje sekundarnog cementita iz prezasićenog i pothlađenog austenita zahtijeva određeno vrijeme. Slika 31 pokazuje da se i poslije 1 min držanja na 700°C sekundarni cementit stvara samo na nekim mjestima, no



nakon 4 min držanja sekundarni cementit se praktično potpuno izdvojio na granicama zrna (slika 32). Uzorak se poslije kaljenja nagriza u zagrijanoj alkalnoj otopini nartij-pikrata, pri čemu se martenzit ne nagriza, a slobodni cementit se nagriza tamno.

U tablici 1 prikazani su početak i završetak transformacije austenita na pojedinim temperaturama, kao i vrsta i tvrdoća nastale mikrostrukture.

Tablica 1: Izotermna transformacija austenita (čelik C 100; austenitiziran 5min na 900°C [4])

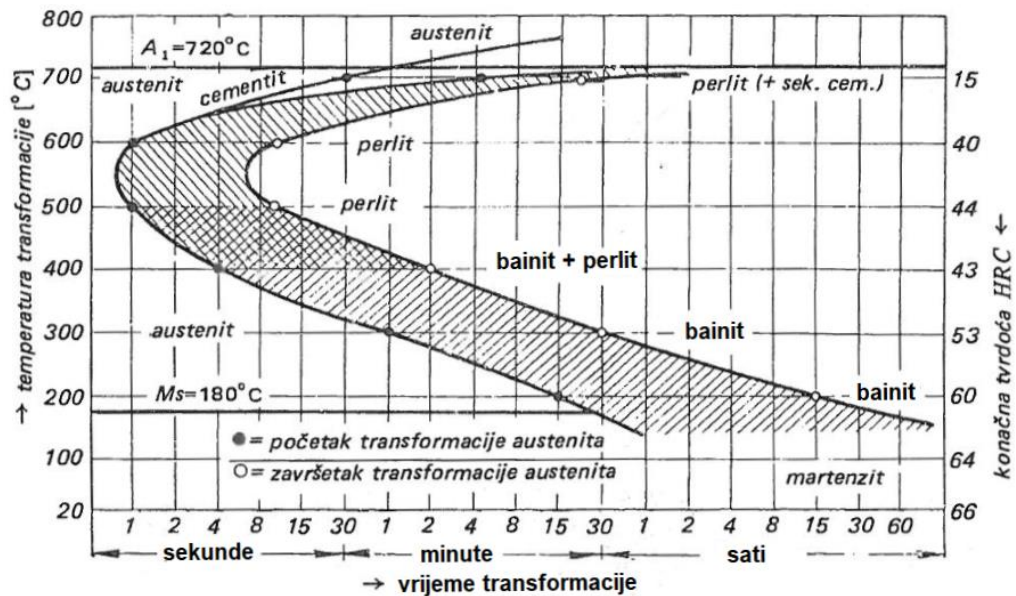
Temperatura [°C]	Transformacija		Nastala mikrostruktura	Hvrdoća [HRC]
	početak	završetak		
700	4,2 min	22 min	perlit	15
600	1 s	10 s	perlit	40
500	1 s	10 s	perlit	44
400	4 s	2 min	bainit (+perlit)	43
300	1 min	30 min	bainit	53
200	15 min	15 h	bainit	60
100	-	-	martenzit	64
20	-	-	martenzit	66

Ako se početak i kraj transformacije austenita na pojedinim temperaturama unesu u dijagram na čijoj je ordinati nanešena temperatura transformacije, a na apcisi vrijeme transformacije u logaritamskoj podjeli, dobije se IR-dijagram čelika, kao na slici 33. Gornja granična linija na dijagramu predstavlja  $A_1$  točku, 720°C, a donja granična linija martenzitnu točku,  $M_s=180^\circ\text{C}$ . Vremena početka transformacije austenita leže na lijevoj krivulji, a završetka transformacije austenita na desnoj strani krivulje. Lijevo od prve krivulje nalazi se područje postojanosti austenita, a desno od druge krivulje naznačene su mikrostrukture koje nastaju kod transformacije. Unutar šrafiranog područja dolazi do transformacije austenita. Na desnoj ordinati nanešena je tvrdoća mikrostrukture koje nastaju kod transformacije u RC-jedinicama. U dijagramu je ucrtana i krivulja početka izdvajanja sekundarnog cementita.

Poseban oblik krivulje transformacije pothlađenog austenita ispod  $A_1$  temperature uvjetovan je djelovanjem dvaju suprotnih faktora. Porastom pothlađenja raste težnja ka transformaciji austenita i uslijed toga se transformacija pomiče ka kraćim vremenima (gornji dio krivulje na slici 33). Međutim, sniženjem temperature opada brzina difuzije ugljika u željezu. Okupljanje atoma u rešetci, koje je neophodno

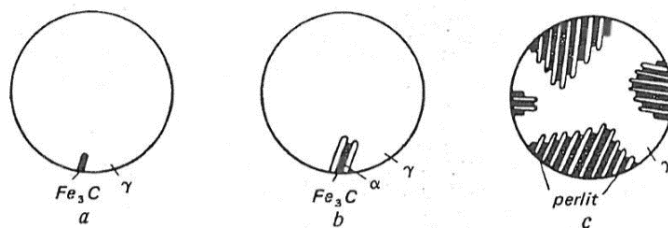
za proces izdvajanja, zahtjeva duže vrijeme zbog toga se produžuje razlaganje na nižim temperaturama (donji dio krivulje na slici 33).

Usljed toga dolazi u ugljičnim čelicima do pojave maksimuma brzine transformacije na oko 550°C, tzv. koljena na krivulji transformacije.



Slika 33: Dijagram izotermalnog razlaganja pothlađenog austenita čelika sa 0,98% C [4]

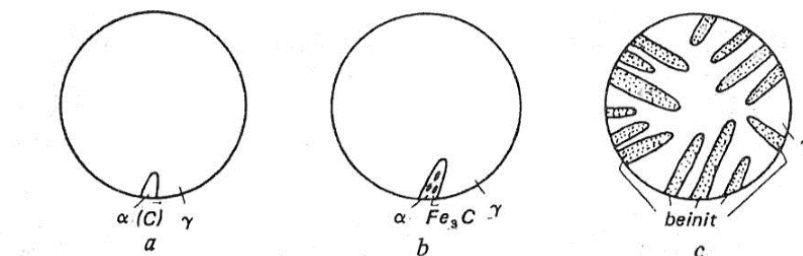
I različite mikrostrukture koje nastaju kod transformacije austenita posljedica su ovih dvaju suprotnih faktora. Na temperaturama preobražaja između 720 i oko 450°C (perlitno područje) transformacija počinje pojavom klica cementita na granicama austenitnih zrna. Ove rastu ka unutrašnjosti  $\gamma$  - zrna (slika 34a). Okolina kristala cementita siromaši ugljikom i transformira se u  $\alpha$ -željezo (slika 34b). Pošto je rastvorljivost ugljika u  $\alpha$ -željezu veoma mala, to se ugljik koji se još nalazio u  $\alpha$ -željezu potiskuje u susjedna austenitna područja. Ova postaju prezasićena ugljikom, pa slijedi pojava novih kristala cementita, itd. (slika 34c).



Slika 34: Shematski prikaz austenitno-perlitne transformacije [4]

Perlit nastaje neposredno iz austenita na granicama zrna ili drugim greškama u rešetci i raste kako u dubinu tako i u širinu, čime se objašnjava njegova lamelarna struktura. Rastojanje između lamela određuje se prije svega brzinom difuzije ugljika u austenitu. Kako se ova smanjuje sniženjem temperature, to se smanjuje i međulamelarno rastojanje: na 700°C nastaje grubozrnati perlit, na 600°C finolamelarni perlit i na 500°C jako finolamelarni perlit. Tvrdća i čvrstoća rastu kod snižavanja temperature transformacije uslijed sve većoj disperznosti obiju faza, ferita i cementita (perlit: HRc=15; na 700°C do HRc=44 na 500°C).

Kod većeg pothlađenja, tj. između približno 400°C i  $M_s$  točke (bainitno područje) iz austenita nastaje bainit. Pri tome su temperature tako niske da je difuzija ugljika u austenitu jako otežana. Početak razlaganja se ponovno pomiče k dužim vremenima, a vrijeme trajanja transformacije raste. Jako prezasićeni ugljikom kristali ferita nastaju iz austenita grupnim pomicanjem atoma na granicama zrna, ili drugim greškama u rešetci i nastavljaju rast (slika 35a). Kako je brzina difuzije ugljika u  $\alpha$ -rešetci znatno veća nego u  $\gamma$ -rešetci, dolazi do izdvajanja ugljika, i to u obliku globularnih ili duguljastih kristala cementita (slike 35b i 35c). Što je temperatura nastajanja bainita niža, to je manja brzina difuzije ugljika u  $\alpha$ -rešetci, pa je utoliko finije izdvojen cementit u feritu.



Slika 35: Shematski prikaz austenitno-bainitne transformacije [4]

Bainit se, kao i perlit, sastoji od ferita i cementita, no nasuprot ovome, ne nastaje direktno iz austenita, već preko jednog prijelaznog stanja, sličnog martenzitu, tj. ugljikom prezasićenog  $\alpha$ -željeza, iz kojeg se ugljik tek kasnije izdvaja u obliku karbida željeza. Na ovaj se način objašnjava igličasta struktura bainita, globularna struktura karbida i porast tvrdoće uvjetovan povećanjem disperznosti.

Karbidi koji se stvaraju u gornjem bainitnom području grublji su od onih koji se stvaraju u donjem perlitnom području (veća brzina difuzije ugljika u  $\alpha$ -rešetci). Uslijed toga „gornji“ bainit može biti mekši od „donjeg“ perlita, i pored toga što je nastao na nižoj temperaturi.

Ispod  $180^{\circ}\text{C}$  (martenzitno područje) iz pothlađenog austenita nastaje martenzit. Na ovim niskim temperaturama brzina difuzije ugljika u  $\alpha$ -rešetci toliko je mala da više ne može doći do izdvajanja karbida. Atomi ugljika su zamrznuti na svojim mjestima u rešetci. Kada se grupnim pomicanjem atoma  $\gamma$ -rešetka transformira u  $\alpha$ -rešetku, ugljik ostaje rastvoren u  $\alpha$ -rešetci, što predstavlja tetragonalni martenzit. Ako se martenzit koji se stvorio između  $180$  i  $100^{\circ}\text{C}$  ostavi da stoji duže vremena na ovim temperaturama u sredstvu za kaljenje, on se postepeno transformira u kubni martenzit. Brzina difuzije ugljikovih atoma na ovim temperaturama, doduše, vrlo je mala, no ipak dovoljna da u toku dužeg vremena izazove okupljanje atoma, ili čak izdvajanje karbida. Ovaj otpušteni, kubni martenzit nagriza se tamno zbog fino izdvojenog karbida (crni martenzit), nasuprot svjetlom, tetragonalnom martenzitu, koji se teško nagriza (bijeli martenzit).

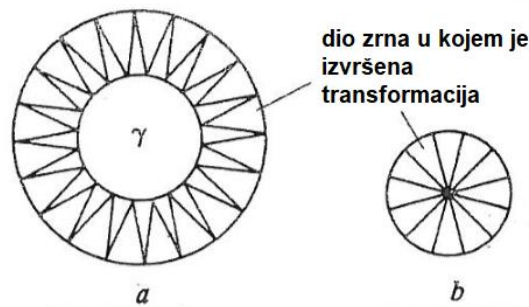
Na temperaturama ispod približno  $100^{\circ}\text{C}$  martenzit i zaostali austenit jako su postojani i u strukturi ne dolazi do transformacije. I pored toga, tokom vremena mijenja se atomska struktura martenzita i zaostalog austenita, jer je pokretljivost atoma ugljika još uvijek moguća, iako u jako malom stupnju. Ovo se, npr. može utvrditi promjenom dimenzija ili promjenom magnetskih svojstava.

Linija koja pokazuje početak izdvajanja sekundarnog cementita na IR-dijagramu javlja se samo kod nadeutektoidnih čelika. Ona izostaje kod eutektoidnih čelika. Podeutektoidni čelici posjeduju također odgovarajuću liniju na IR-dijagramu, no ova pokazuje početak izdvajanja proeutektoidnog ferita.

Jedan IR-dijagram strogo vrijedi samo za temperaturu i vrijeme austenitizacije koji su korišteni kod izrade dijagrama. Svaka promjena uvjeta ispitivanja povezana je sa pomicanjem linije (krivulje) preobražaja. Porastom temperature i vremena austenitizacije S-krivulja se pomiče udesno, k dužim vremenima. Ovo je u suštini posljedica dvaju osnovnih uzoraka.

Transformacija pothlađenog austenita počinje prvenstveno na greškama u rešetci. Zbog toga se može očekivati ovisnost transformiranog austenita od veličine austenitnog zrna, u smislu da se u slučaju grubog zrna poslije određenog vremena transformira manje austenita u usporedbi sa finim zrnom, što je doista i slučaj.

Poslije određenog vremena transformacija u grubom zrnju prodire u zrno do određene dubine, tako da se jezgra još uvijek sastoji od austenita (slika 36a). Nasuprot ovome, u finom zrnju transformacija poslije istog vremena obuhvaća već cjelokupni volumen zrna (slika 36b).



Slika 36: Shematski prikaz transformacije austenita u slučaju grubozrnatog (a) i sitnozrnatog (b) austenita kod istog vremena transformacije [4]

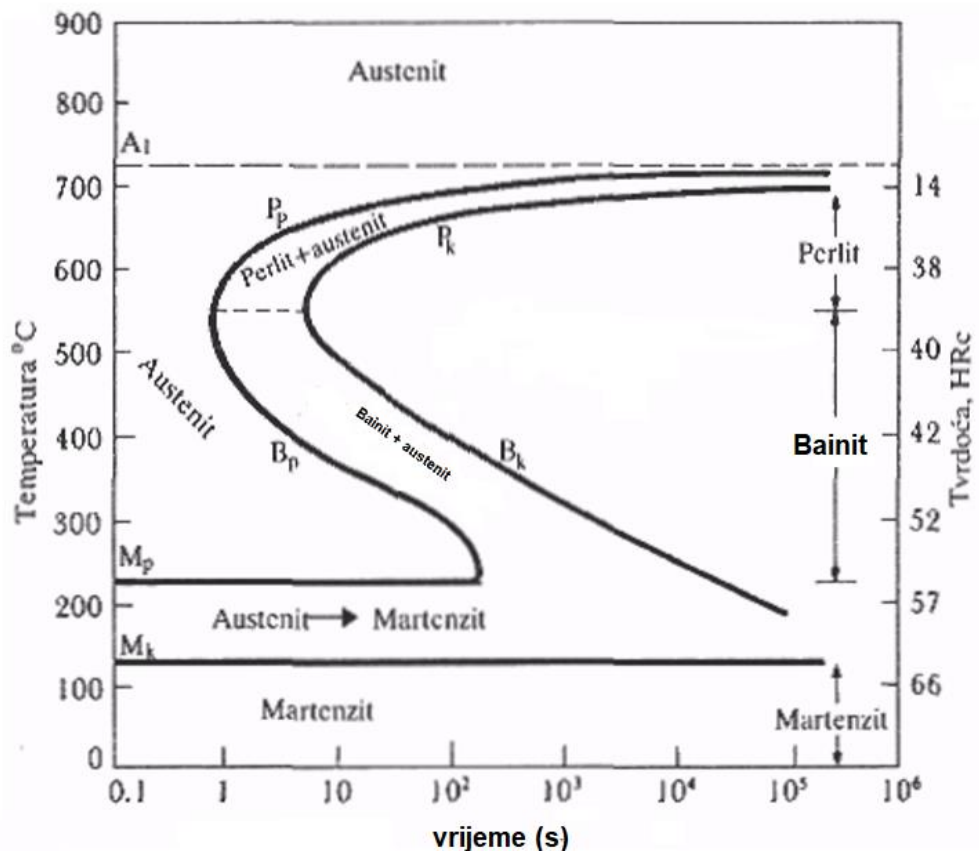
Porastom temperature i vremena austenitizacije ne samo da raste austenitno zrno već jednostavno dolazi i do homogenizacije austenita. Karbidi, nitridi i druge komponente strukture prelaze u otopinu, a otopljeni atomi se ravnomjerno raspoređuju u austenitu, koji uslijed toga postaje stabilniji. Pri narednom hlađenju jako se smanjuje broj klica na kojima počinje transformacija austenita. U ovom slučaju prvo se moraju stvoriti nove klice, za što je potrebno određeno vrijeme, tj. S-krivulja se i iz ovog razloga pomiče k dužim vremenima.

### 3.2.1 Baitna transformacija

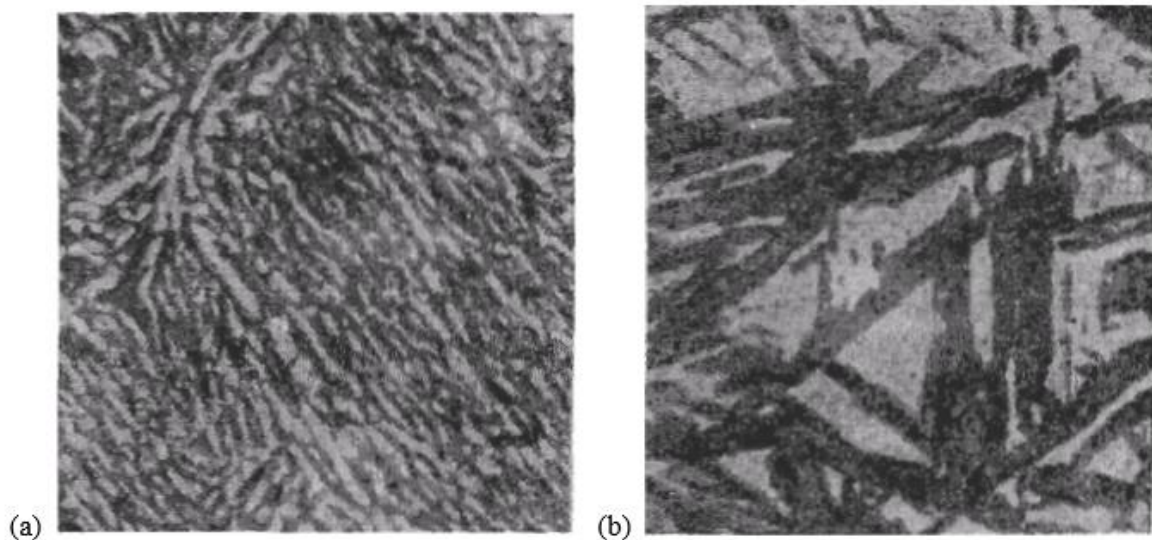
Kod izotermalnog razlaganja austenita u temperaturnom intervalu od „koljena“ TTT–krivulje ( $\sim 550^{\circ}\text{C}$ ) do temperature  $M_p$  (slika 37), tj. u temperaturnom području između perlitne i martenzitne transformacije, kao rezultat međufazne transformacije nastaje struktura koja se naziva baint. Baint ima jako finu mikrostrukturu, koji se sastoji od  $\alpha$ –čvrste otopine, ferita, prezasićene ugljikom, i iz čestica cementita.

Karakteristično za bainitnu transformaciju je kombinacija difuzne–perlitne i bezdifuzne–martenzitne transformacije zbog čega se još naziva i međufaznom transformacijom. Bainitna transformacija počinje sa difuzionim pregrupiravanjem–preraspodjelom atoma ugljika u pothlađenom austenitu, stvarajući zone austenita sa obogaćenim i osiromašenim sadržajem ugljenika. U zonama sa osiromašenim austenitom, čije se temperature početka martenzitne transformacije  $M_p$  nalaze u području temperature međufazne transformacije,  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformira se po mehanizmu martenzitne transformacije. Ovako stvoreni niskougljениčni martenzit je nestabilan i odmah, na temperaturi međufaznog područja, stvara bainitnu strukturu. Iz austenita obogaćenog ugljikom, ako je prezasićenost ugljikom velika, u procesu izotermalnog razlaganja, izdvajaju se čestice cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), što dovodi do osiromašavanja austenita ugljikom i njegove dalje transformacije sve do stvaranja bainitne strukture. Međufazna transformacija austenita, kao i martenzitna transformacija, ne obavlja se u potpunosti, pa se u strukturi čelika pored bainita nalazi i izvesna količina zaostalog austenita.

Mikrostruktura i mehanička svojstva bainita razlikuju se u ovisnosti od temperature na kojoj dolazi do izotermalnog razlaganja austenita. Razlikujemo gornji bainit i donji bainit. Gornji bainit se stvara (nastaje) na višim temperaturama, a u intervalu od 500–350°C i ima „perastu“ građu kod koje je cementit izdvojen u obliku izdvojenih uskih čestica smeštenih između feritnih pločica i podseća na perlit (slika 38a). Donji bainit se stvara na nižim temperaturama u intervalu od 350°C do temperature  $M_p$ . Donji bainit ima igličastu strukturu, koja podseća na martenzit. Čestice cementita su sitne i izdvojene su unutar  $\alpha$ –faze (ferit), (slika 38b).



Slika 37: Dijagram izotermalne transformacije austenita eutektoidnog čelika (0,8%C), TTT–dijagram [3]



Slika 38: Mikrostruktura bainita: (a) gornji bainit, x5000; (b) donji bainit i zaostali austenit, x500 [3]

## 4. MJERENJE TVRDOĆE ROCKWELOVOM METODOM

Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju drugog, znatno tvrdog tijela. Osnovni princip mjerenja kod većine metoda je mjerenje veličine ili dubine otiska što ga penetrator, opterećen nekom silom, načini u ispitivanom materijalu. Te su metode pogodne za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala kod kojih je moguća neka plastična deformacija. Penetranti ili indentori oblika su kuglice, stošca ili piramide, a izrađeni su od tvrdih materijala (kaljeni čelik, tvrdi metal ili dijamant).

Kod Rockwellove metode mjeri se dubina prodiranja penetratora. Kod ove metode vrijednost tvrdoće očitava se neposredno na skali tvrdomjera nakon rasterećenja.

Upotrebljava se više vrsta penetratora:

- za meke materijale upotrebljava se mala čelična kuglica (HRB metoda),
- za tvrde materijale dijamantni stožac (HRc metoda).

Dijamantni stožac ima vršni kut  $120^\circ$  i radijus zaobljenja 0,2 mm, dok promjeri čeličnih kuglica iznose  $1/16''$ ,  $1/8''$ ,  $1/4''$  i  $1/2''$ .

### Rockwellova HRc metoda

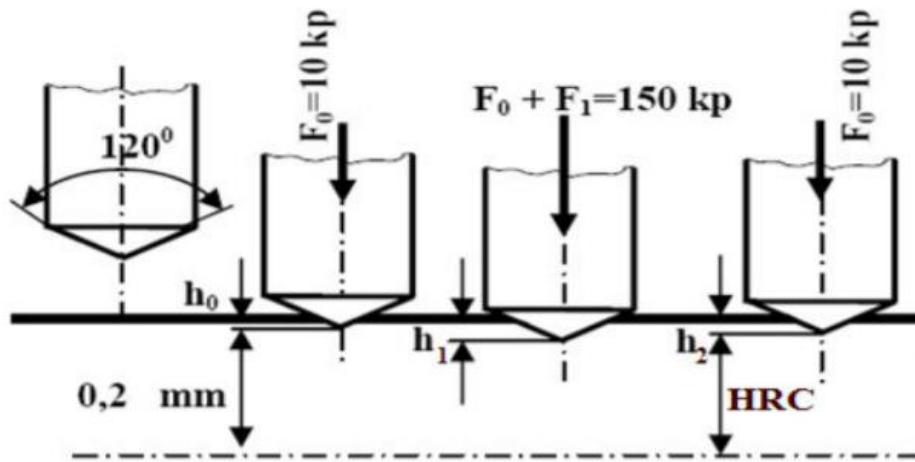
Rockwell HRc-metoda koristi se za tvrde materijale (npr. toplinski obrađeni čelici). Postupak mjerenja tvrdoće odvija se u tri faze:

- Prva faza – predopterećenje  $F_0 = 98 \text{ N}$  (10 kp), penetrant (dijamantni stožac) prodire na dubinu  $h_0$  tj. početni položaj mjerenja.
- Druga faza – glavno opterećenje  $F_1 = 1373 \text{ N}$  (140 kp) koje se dodaje na predopterećenje utiskuje penetrant na dubinu  $h_1$ .

$$F_0 + F_1 = 1471 \text{ N} \text{ (150 kp)} \quad (3)$$

- Treća faza - rasterećenje, tj. otklanjanje glavnog opterećenja  $F_1$ . Dolazi do povrata elastičnih deformacija u uzorku nastalih u drugoj fazi i penetrant se zaustavlja na dubini  $h_2$  ( $h_2 < h_1$ ).





Slika 39: Mjerenje tvrdoće po Rockwellu [6]

Dubina prodiranja penetratora:

$$H = h_2 - h_0, \text{ [mm]} \quad (4)$$

Kod HRc metode ukupna moguća dubina prodiranja penetratora iznosi 0,2 mm i podijeljena je na 100 dijelova, pa Rockwellova jedinica za tvrdoću iznosi 0,002 mm.

Tvrdoća po HRc metodi određuje se po izrazu:

$$HRc = 100 - \frac{h}{0,002} \quad (5)$$

Mjerno područje HRc metode je od 20 do 70 HRc.

Prednosti:

- veća brzina mjerenja tvrdoće
- neposredno očitavanje tvrdoće na uređaju
- plitak otisak

Nedostaci:

- mogućnost loma dijamantnog stošca
- nepreciznost  $\pm 2$  HRB/HRc

## 5. EKPERIMENTALNI DIO ZAVRŠNOG RADA

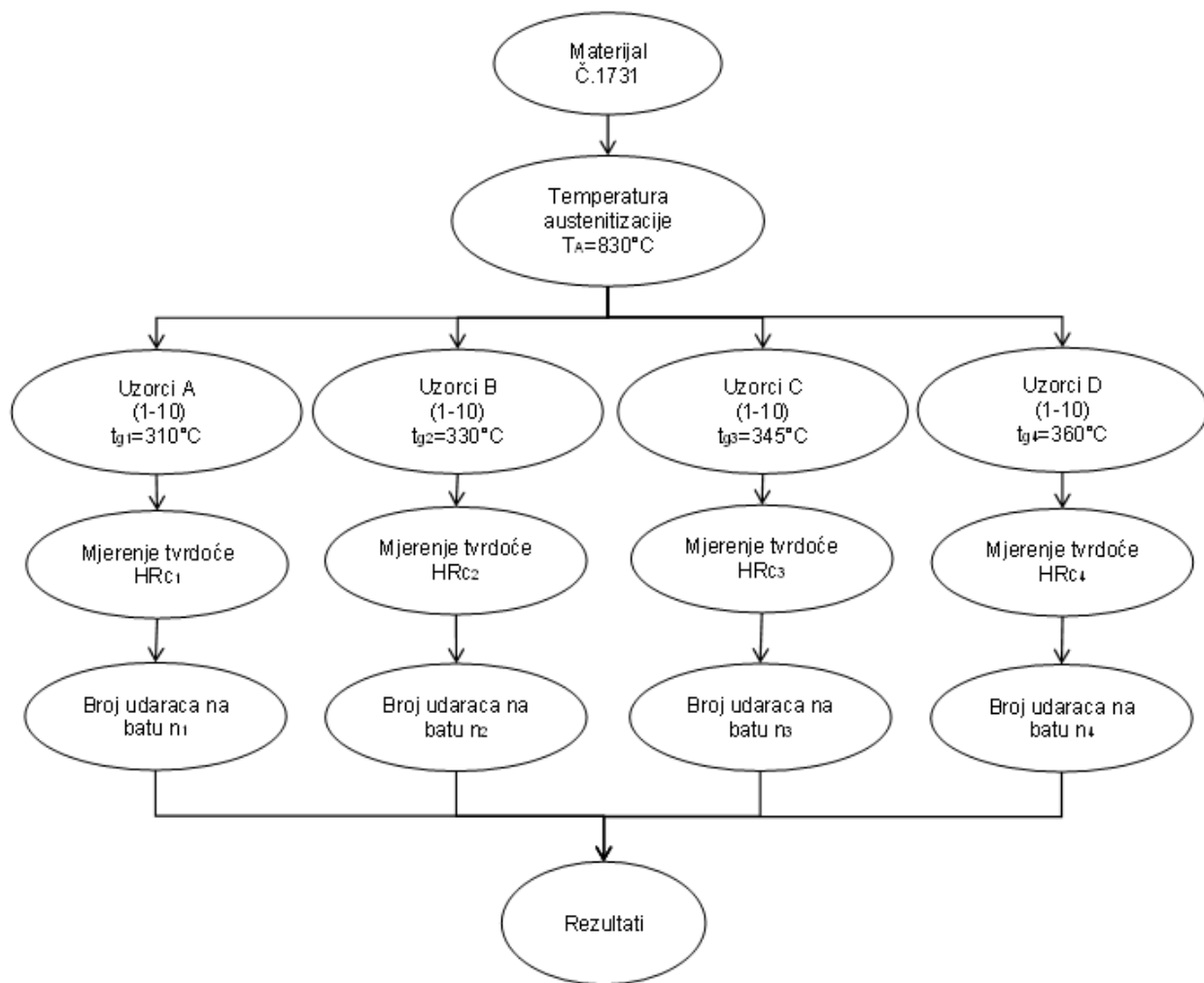
Eksperimentalni dio rada temelji se na ispitivanju gotovih strojnih dijelova. Strojni dijelovi napravljeni su tehnološkim postupkom isprešavanja, rekristalizacijskog žarenja, ravnanja, savijanja do završnog oblika strojnog dijela i toplinske obrade.

Prvi cilj eksperimentalnog dijela rada je utvrditi da li se promjenom toplinske obrade (u smislu dobivanja drugačije mikrostrukture materijala) može utjecati na tvrdoću i radni vijek trajanja strojnog dijela. Drugi cilj je utvrditi da li se kod toplinske obrade kaljenja, nakon austenitizacije, različitim temperaturama sredstva za gašenje (soli) može utjecati na tvrdoću i vijek trajanja strojnog dijela u eksploataciji, te treći cilj je da li promjenom materijala možemo dobiti strojni dio duljeg vijeka trajanja.

### 5.1. Plan pokusa

Redoslijed rada eksperimentalnog dijela rada prikazan je na slici 40. Strojni dijelovi koji se ispituju izrađuju se od čelika Č.1731, koji je detaljnije pojašnjen u točki 5.2, koji se isporučuje u trakastom obliku poznatih dimenzija. Prije izrade strojnih dijelova radi se analiza kemijskog sastava materijala, da se provjeri da li imamo odgovarajući materijal. Nakon izrade strojnih dijelova radi se odgovarajuće označavanje kombinacijom slova i brojeva. Zatim slijedi toplinska obrada sa odgovarajućim režimima. Nakon toplinske obrade slijedi mjerenje tvrdoće Rockwelovom metodom, testiranje strojnih dijelova na batu te metalografska analiza.

Cilj eksperimentalnog rada je provesti toplinsku obradu u kontroliranim uvjetima s ciljem postizanja optimalne međustrukture. Nakon provedene toplinske obrade uzorci će biti podvrgnuti ispitivanjima sukladno eksploatacijskim uvjetima.



Slika 40: Plan pokusa

## 5.2. Čelik Č.1731

Strojni dijelovi izrađuju se od čelika Č.1731, to je plemenit nelegiran – ugljični čelik za poboljšanje visoke čvrstoće, kemijskog sastava prikazanog u tablici 2, a neke od karakteristika ovog čelika su:

Tablica 2: Kemijski sastav čelika Č.1731 [5]

<b>Kemijski sastav u %: (JUS C.B9.021/74)</b>				
C	Si	Mn	P	S
0,57-0,65	0,15-0,35	0,60-0,90	Max. 0,035	Max. 0,035

### Prokaljivost

Od grupe nelegiranih čelika za poboljšanje ovi čelici posjeduju najbolju prokaljivost. Tvrdoća koja se postiže na osnovi visokog sadržaja C kod Jominy-ovog pokusa na čelu probe u prosjeku iznosi 62 HRc. Tvrdoća opada strmo na maloj udaljenosti od zakaljenog komada.

### Sklonost prema pukotinama pri kaljenju

Ovaj čelik je osjetljiv kod kaljenja u vodi. Zbog toga treba primjenjivati kaljenje u ulju.

### Obradivost skidanjem strugotine

Vrijeme trajanja alata kod grube obrade je najveće kad je čelik u meko žarenom stanju (feritna osnovna masa s uležištenim zrnatim cementitom). Za postizanje dobre kvalitete površine kod fine obrade, većinom je korisna veća čvrstoća čelika i viša brzina rezanja.

### Zavarljivost

Ove čelike nije uobičajeno koristiti kod zavarivanja, jer zavarivanje taljenjem metala dovodi do poteškoća, čak i kad se primjenjuju osobite mjere opreza. Ovi čelici mogu se zavarivati samo elektrootpornim zavarivanjem.

## **Krhkost nakon popuštanja**

Ne naginje krhkosti poslije popuštanja pri uobičajenim temperaturama i trajanju popuštanja. U tom smislu nije potrebno poštivati bilo kakve posebne mjere pri određivanju načina ohlađivanja, odnosno sredstava za ohlađivanje poslije popuštanja.

## **Krhkost pri niskim temperaturama**

Opadanje temperature od +20°C do -30°C kod ovih čelika dovodi do osjetnog gubitka žilavosti. Ispod -20°C do -30°C ovi čelici naginju lomu kod odgovarajućeg naprezanja. Zbog toga se ne preporuča upotrebljavati ove čelike na temperaturama ispod -20°C, osobito kod udarnih i promjenjivih naprezanja.

## **Postojanost prema popuštanju**

Utjecaj temperature popuštanja na mehanička svojstva nakon kaljenja vidljiv je iz dijagrama orijentacijskih vrijednosti utjecaja temperatura popuštanja na mehanička svojstva.

## **Otpornost prema trošenju**

Otpornost prema trošenju je osobito povoljna u kaljenom i niskopopuštenom stanju, odnosno nakon površinskog kaljenja (plameno kaljenje, indukcijsko kaljenje). Postupci površinskog kaljenja izvode se poslije poboljšanja čelika.

## **Osjetljivost prema zareznom djelovanju**

Osjetljivost prema zareznom djelovanju kod dinamičkog naprezanja raste s rastućom vlačnom čvrstoćom. Kod visokih vlačnih čvrstoća osjetljivost na zrezno djelovanje svakako treba uzeti u obzir kod konstrukcije i kod prerade (veliki prijelazni radijusi, izbjegavanje mjesta velike promjene smjera sile itd.). Pjeskarenjem ili obradom pomoću čelične sačme, površinskim pritiskivanjem, hladnim valjanjem i sl. smanjuje se osjetljivost na zrezno djelovanje.

## **Upotreba**

Upotrebljava se pretežno u poboljšanom ili normaliziranom stanju za strojne dijelove više čvrstoće:

- osovine

- čahure
- bandaže
- alatni čelik za alate za obradu kamena

### Mehanička svojstva:

Tablica 3: Mehanička svojstva čelika Č.1731 u poboljšanom stanju [5]

<b>Mehanička svojstva u poboljšanom stanju (JUS C.B9.021/74)</b>				
Promjer [mm]	Granica razvlačenja (0,2 granica) [N/mm <sup>2</sup> ] min.	Zatezna Čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Izduženje A [%] min	Suženje Z [%] min
do 16	570	830-980	11	25
od 16 do 40	490	780-930	13	35
od 40 do 100	450	740-890	14	40

Tablica 4: Mehanička svojstva čelika Č.1731 u normaliziranom stanju [5]

<b>Mehanička svojstva u normaliziranom stanju (JUS C.B9.021/74)</b>			
Promjer [mm]	Granica razvlačenja (0,2 granica) [N/mm <sup>2</sup> ] min.	Zatezna Čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Izduženje A [%] min
16-100	380	690-890	14

Tablica 5: Mehanička svojstva čelika Č.1731 kod trajnih titrajnih naprezanja [5]

<b>Mehanička svojstva kod trajnih titrajnih naprezanja</b>			
Zatezna Čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Dinamička izdržljivost na savijanje [N/mm <sup>2</sup> ]	Dinamička izdržljivost na tlak-vlak [N/mm <sup>2</sup> ]	Dinamička izdržljivost na torziju [N/mm <sup>2</sup> ]
880	430	345	255
780	380	305	225
690	335	265	195

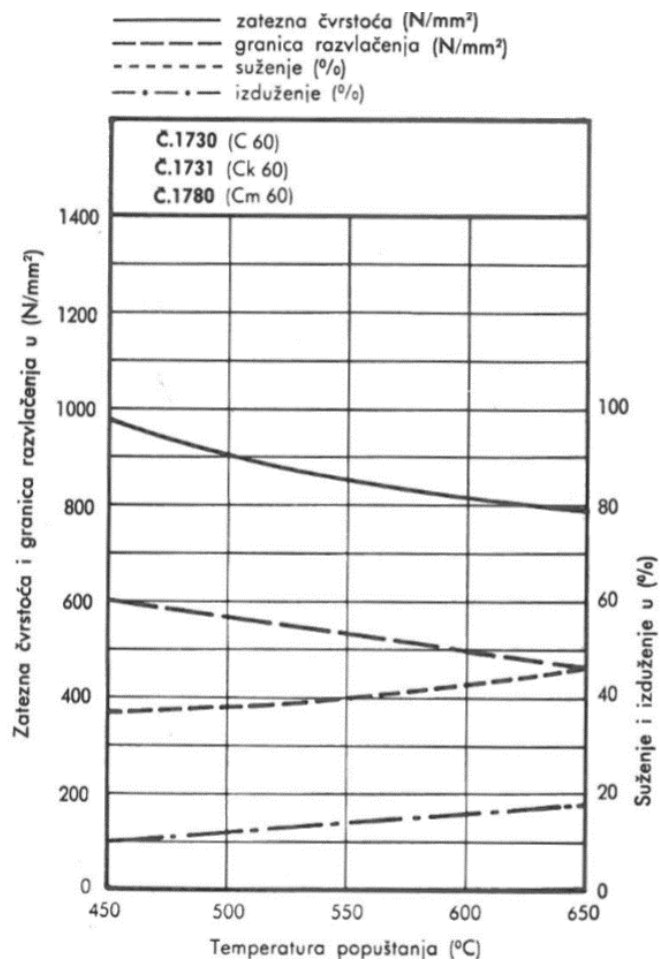
Navedene vrijednosti vrijede za toplinski obrađene, poboljšane, glatke, polirane štapove promjera 5 do 10mm. Utjecaji dimenzija strojnog dijela, svojstva površine i oblika (zarezo djelovanje i forma presjeka) moraju se dodatno obuhvatiti konstrukcijskim proračunom.

#### **Fizikalna svojstva** (orijentacijske vrijednosti)

Tablica 6: Fizikalna svojstva čelika Č.1731 [5]

Svojstva		Kod temperature °C				
		-40	+20	+100	+200	+300
Modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	212 000	210 000	205 000	193 000	185 000
Modul smika	N/mm <sup>2</sup>	82 000	81 000	76 000	74 000	71 000
Gustoća	kg/dm <sup>3</sup>	-	7,85	-	-	-
Toplinska vodljivost	W/mK	-	46,5	-	-	-
Specifična toplina	J/kg K	-	-	498,2	531,7	-
Specifični električni otpor	Ω cm 10 <sup>-4</sup>	-	0,127	-	-	-

## Vrijednosti utjecaja temperatura popuštanja na mehanička svojstva



Slika 41: Vrijednosti utjecaja temperatura popuštanja na mehanička svojstva čelika Č.1731 [5]



### 5.3. Čelik Č.4830

Ukoliko prethodno spomenuti materijal, Č.1731, nakon eksperimentalnog dijela neće zadovoljavati eksploatacijske uvjete, tada se predlaže zamjena postojećeg materijala drugim materijalom, čelikom Č.4830, to je čelik za poboljšanje, kemijskog sastava prikazanog u tablici 7, a neke karakteristike ovog čelika su:

Tablica 7: Kemijski sastav čelika Č.4830 [5]

Kemijski sastav u %: (JUS C.B9.021/74)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	V
0,47-0,55	0,15-0,4	0,70-1,10	Max. 0,035	Max. 0,035	0,90-1,20	0,10-0,20

#### Prokaljivost

Pri Jominy-evom pokusu s čeono kaljenom probom postiže se kod ovog čelika u prosjeku tvrdoća od 61 HRc.

#### Skлонost prema pukotinama pri kaljenju

Ovaj čelik je osjetljiv kod kaljenja u vodi. Zbog toga treba primjenjivati kaljenje u ulju.

#### Obradivost skidanjem strugotine

Vrijeme trajanja alata kod grube obrade je najveće kad je čelik u meko žarenom stanju (feritna osnovna masa s uležištenim zrnatim cementitom). Za postizanje dobre kvalitete površine kod fine obrade, većinom je korisna veća čvrstoća čelika i viša brzina rezanja.

#### Zavarljivost

Prikladan je jedino za elektrootporno zavarivanje. Također i kod ovog načina zavarivanja potrebno je oprezno predgrijavanje i ohlađivanje predmeta. Ipak po mogućnosti ovaj čelik ne treba upotrebljavati u svrhe zavarivanja.

## **Krhkost nakon popuštanja**

Naginje krhkosti nakon popuštanja na osnovi sadržaja Cr. Zbog toga se propisuje nakon popuštanja predmete ohladiti u vodi ili ulju. To dovodi do vlastitih naprezanja. Ona su kod manjih predmeta podnosiva, ali kod većih više ne. Veliki predmeti moraju biti oslobođeni naprezanja žarenjem ispod temperature područja krhkoće. Ako se ovakva mjera smatra neprikladnom, tada ovaj čelik nije upotrebljiv za veće dijelove (otkivci).

## **Postojanost prema popuštanju**

Utjecaj temperature popuštanja na mehanička svojstva kaljenja vidljiv je iz dijagrama orijentacijskih vrijednosti utjecaja temperatura popuštanja na mehanička svojstva.

## **Krhkoća pri niskim temperaturama**

Na niskim temperaturama s obzirom na svojstva žilavosti ponaša se povoljnije nego nelegirani čelici za poboljšanje.

## **Otpornost prema trošenju**

Otpornost prema trošenju je povoljna u kaljenom odnosno površinsko kaljenom stanju (plameno kaljenje, indukciono kaljenje). Otpornost prema trošenju može se također poboljšati nitriranjem u solnoj kupci. Svršishodno je čelik poboljšati prije površinskog kaljenja.

## **Osjetljivost prema zareznom djelovanju**

Osjetljivost prema zareznom djelovanju kod dinamičkog naprezanja raste s rastućom vlačnom čvrstoćom. Kod visokih vlačnih čvrstoća treba osjetljivost na zarezno djelovanje svakako uzeti u obzir kod konstrukcije i kod prerade (veliki prijelazni radijusi, izbjegavanje mjesta velike promjene smjera sile itd.).

## **Upotreba**

Za statički i dinamički opterećene dijelove vozila, motora i strojeva, naročito za veće presjeke s visokom čvrstoćom:

- osovine automobilskih kotača (pogonske)
- dijelovi opterećeni udarno, savijanjem i torziona

- zupčanici
- torzione opruge
- ventili
- trnovi za glodala

### Mehanička svojstva:

Tablica 8: Mehanička svojstva čelika Č.4830 u poboljšanom stanju [5]

<b>Mehanička svojstva u poboljšanom stanju (JUS C.B9.021/74)</b>					
Promjer [mm]	Granica razvlačenja (0,2 granica) [N/mm <sup>2</sup> ] min	Zatezna Čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Izduženje A [%] min	Suženje Z [%] min	Žilavost [J] min
do 16	880	1080-1280	9	40	34
od 16 do 40	780	980-1180	10	45	34
od 40 do 100	690	880-1080	12	50	34
Od 100 do 160	640	890-980	13	50	34
od 160 do 250	590	780-930	13	50	34

Tablica 9: Mehanička svojstva čelika Č.4830 kod trajnih titrajnih napreznja [5]

<b>Mehanička svojstva kod trajnih titrajnih napreznja</b>			
Zatezna Čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Dinamička izdržljivost na savijanje [N/mm <sup>2</sup> ]	Dinamička izdržljivost na tlak-vlak [N/mm <sup>2</sup> ]	Dinamička izdržljivost na torziju [N/mm <sup>2</sup> ]
1180	530	420	325
980	470	375	285
780	380	305	225

Navedene vrijednosti vrijede za toplinski obrađene, poboljšane, glatke, polirane štapove promjera 5 do 10mm. Utjecaji dimenzija strojnog dijela, svojstva površine i oblika (zarezo djelovanje i forma presjeka) moraju se dodatno obuhvatiti konstrukcijskim proračunom.

Tablica 10: vrijednosti tvrdoće čelika Č.4830 s obzirom na stanje toplinske obrade [5]

<b>Tvrdoća</b>		
Meko žareno [HB] max	Obrada na određenu zateznu čvrstoću [HB] max	Obrada na najbolju obradivost [HB] max
235	-	248

**Fizikalna svojstva** (orijentacijske vrijednosti):

Tablica 11: Fizikalna svojstva čelika Č.4830 [5]

Svojstva		Kod temperature °C			
		+20	+200	+300	+400
Modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	212 000	195 000	185 000	175 000
Modul smika	N/mm <sup>2</sup>	83 000	-	-	-
Gustoća	kg/dm <sup>3</sup>	7,85	-	-	-
Toplinska vodljivost	W/mK	41,9	-	-	-
Specifična toplina	J/kg K	460,5	-	-	-
Specifični električni otpor	Ω cm 10 <sup>-4</sup>	0,190	-	-	-

## Linearni toplinski koeficijent istezanja:

Tablica 12: Linearni toplinski koeficijent istezanja čelika Č.4830 [5]

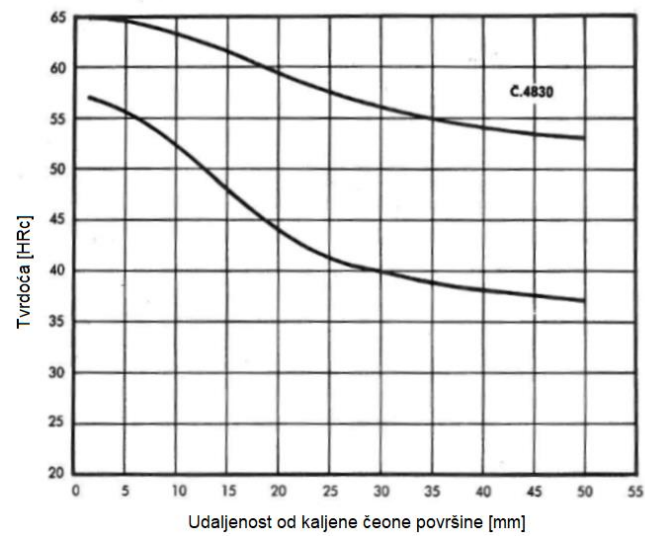
Linearni toplinski koeficijent istezanja				
Temperatura °C od 20 do	100	200	300	400
$10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	11,0	12,5	-	13,5

## Prokaljivost:

Tablica 13: Prokaljivost čelika Č.4830 (orijentacijske vrijednosti) (JUS C.B9.021/74) [5]

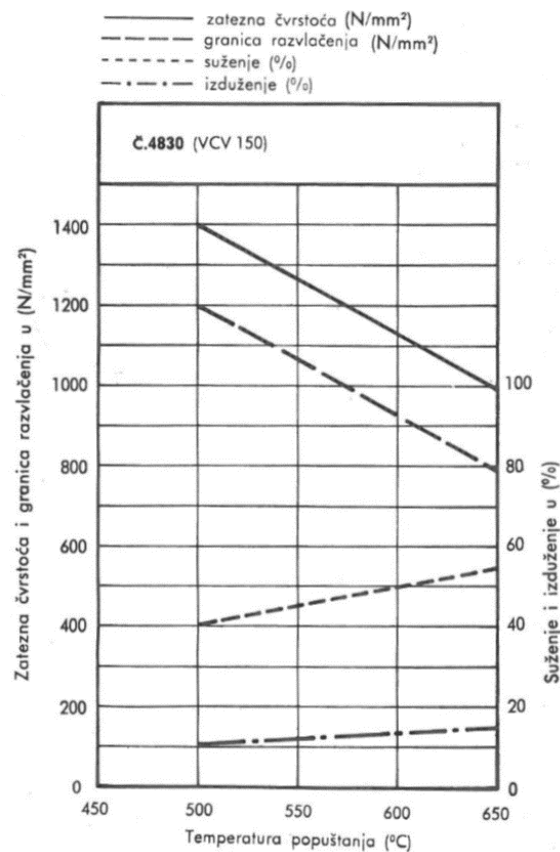
Prokaljivost (orijentacijske vrijednosti) (JUS C.B9.021/74)															
Udalje- nost	Tvrdća u HRc na udaljenosti od kaljene čeone površine [mm] od:														
	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50
max.	65	65	64	64	63	63	62	61	60	58	56	55	54	53	53
min.	57	56	56	55	53	52	50	48	44	41	40	39	38	37	37

## Pojas garantirane prokaljivosti



Slika 42: Pojas garantirane prokaljivosti čelika Č.4830 [5]

## Vrijednosti utjecaja temperatura popuštanja na mehanička svojstva



Slika 43: Vrijednosti utjecaja temperatura popuštanja na mehanička svojstva čelika Č.4830 [5]

#### 5.4. Kemijski sastav materijala ispitnih uzoraka

Kemijski sastav materijala određen je spektroskop uređajem, Spectro Isort (slika 44).



Slika 44: Uređaj za analizu kemijskog sastava materijala

Analizom obrađujemo kemijski sastav tvari odnosno utvrđujemo od kojih je kemijskih elemenata sastavljen materijal, također utvrđujemo koja količina ili međusobni omjer pojedinih sastavnih dijelova tvari imamo u materijalu.

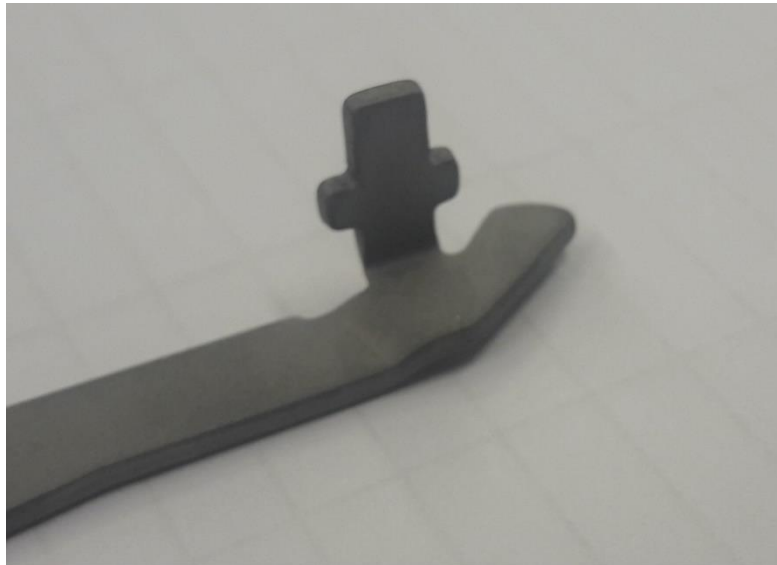
Teorijske vrijednosti kemijskih elemenata, po standardu, za čelik Č.1731 i vrijednosti dobivene analizom nalaze se u tablici 14. Analiza kemijskog sastava provedena je da se provjeri da li se radi o navedenom čeliku Č.1731.

Tablica 14: Kemijski sastav čelika Č.1731 dobiven analizom

Kemijski sastav u %: dobiveno analizom					
	C	Si	Mn	P	S
Vrijednosti po standardu	0,57-0,65	0,15-0,35	0,60-0,90	Max. 0,035	Max. 0,035
Vrijednosti analize (izmjerene vrijednosti)	0,61	0,22	0,67	0,020	0,015

## 5.6. Ispitni uzorci

Zbog specijalne namjene i funkcije dijela koji je tema ovog ispitivanja, cijeli prikaz pozicije nije dozvoljen kao ni njegova uloga u cijelom mehanizmu. Ispitni uzorci (strojni dijelovi) napravljeni su od čelika Č.1731, lima debljine 1,5 mm, postupkom isprešavanja, rekristalizacijskog žarenja, ravnanja i savijanja.



Slika 45: Dio ispitnog uzorka

### 5.6.1 Opis problema

Problem se sastoji od nezadovoljavajućeg podnošenja opterećenja kojem je podvrgnut dio u eksploataciji od deformacija do puknuća. Konstrukcijom uvjetovani dio savijen pod  $90^\circ$  je kritično mjesto na kojem su sva naprezanja (dinamička, strukturna, toplinska) koncentrirana, te uzrokuju nezadovoljavanje vijeka garantiranih rokova kvalitete cjelokupnog mehanizma.

Obzirom da za rješavanje problema ne možemo mijenjati konstrukciju dijela, eksperimentom će se mijenjati parametri toplinske obrade, dobiveni rezultati će se analizirati te predložiti optimalan način obrade.

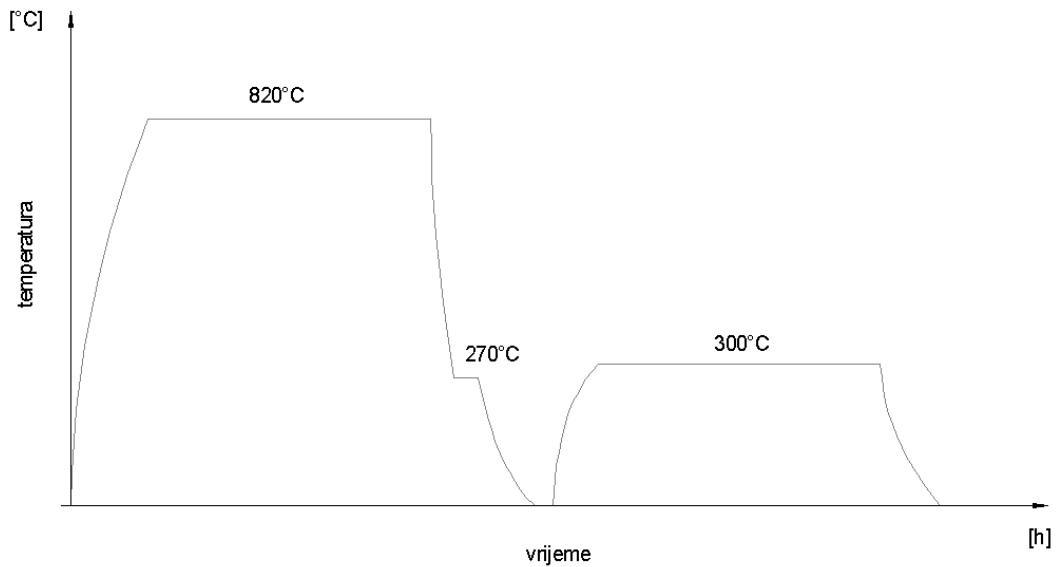
U konačnici, analiziranjem čelika iz srodnih skupina temeljem mehaničkih i triboloških svojstava dati će se prijedlog eventualnih alternativa za sada upotrijebljenom materijalu.



### 5.6.2. Ispitni uzorci „I“

Sukladno planu pokusa režimi toplinske obrade uzoraka „I“ su:

- Austenitizacija 820°C/1h
- Gašenje u soli 270°C/3min
- Popuštanje 300°C/1h



Slika 46: Režimi toplinske obrade uzoraka „I“

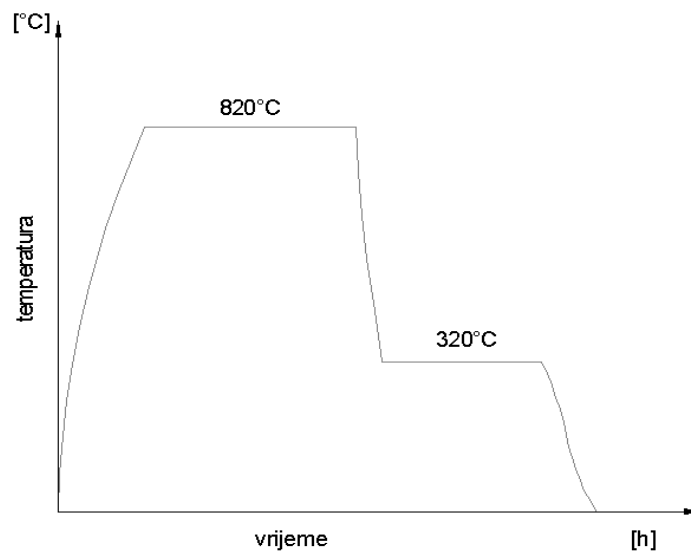
Srednja vrijednost izmjerene tvrdoće na 10 uzoraka je 51,3 HRc, a prosječan broj podnošenih udara na probnom stolu udarom bata je 4,5 nakon čega je došlo do potpunog razdvajanja (puknuća).

Analiza strukture dokazuje martenzitnu osnovu.

#### 4.6.3. Ispitni uzorci „II“

Sukladno planu pokusa režimi toplinske obrade uzoraka „II“ su:

- Austenitizacija 820°C/40min
- Gašenje u soli 320°C/30min



Slika 47: Režimi toplinske obrade uzoraka „II“

Srednja vrijednost izmjerene tvrdoće na 10 uzoraka je 50,3 HRc, a prosječan broj podnošenih udara na probnom stolu udarom bata je 6,75 što je znatno poboljšanje u odnosu na uzorke „I“ i daje ekvivalent koji je granično zadovoljavajuć za funkcionalnost mehanizma.

Analiza strukture dokazuje bainitnu strukturu.

Stoga su napravljeni i treći ispitni uzorci na kojima je rađena toplinska obrada s režimima za dobivanje bainitne strukture, a mijenjana je temperatura soli u svrhu dobivanja još boljih rezultata ispitivanja na batu a samim time i boljih eksploatacijskih rezultata.

#### **4.6.4. Ispitni uzorci „III“**

Temeljeno na rezultatima prethodnih uzoraka sva usmjerenost u pronalaženju optimalnih parametara toplinske obrade usmjerena je prema bainitnom području za analizirani čelik. Da bi analizom utvrdili više područja napravljen je plan pokusa naveden na str. 35.

Sukladno planu pokusa režimi toplinske obrade uzoraka „A“ su:

- Austenitizacija 830°C/1h
- Gašenje u soli 310°C/30min

Sukladno planu pokusa režimi toplinske obrade uzoraka „B“ su:

- Austenitizacija 830°C/1h
- Gašenje u soli 330°C/30min

Sukladno planu pokusa režimi toplinske obrade uzoraka „C“ su:

- Austenitizacija 830°C/1h
- Gašenje u soli 345°C/30min

Sukladno planu pokusa režimi toplinske obrade uzoraka „D“ su:

- Austenitizacija 830°C/1h
- Gašenje u soli 360°C/30min

Nakon toplinske obrade sa zadanim režimima na ispitnim uzorcima mjerena je tvrdoća Rockwelovom metodom na mjernom uređaju Emco Test, DuraJet.

Rezultati dobivenih tvrdoća prikazani su u tablici 15.

Tablica 15: Vrijednosti tvrdoće nakon toplinske obrade

Ispitni uzorci	Tvrdoća HRc			
	A	B	C	D
1	49,99	46,72	44,9	42,82
2	49,41	46,42	44,08	43,14
3	50,01	46,98	44,13	42,55
4	49,45	47,18	44,14	42,07
5	49,83	46,98	44,23	43,37
6	49,79	47,04	44,91	42,9
7	48,84	46,19	44,49	43,06
8	49,44	46,65	44,06	43,02
9	49,81	47,4	44,16	43,06
10	50,28	46,57	44,85	42,44
Prosjek	49,685	46,813	44,395	42,843

## 5.7. Testiranje ispitnih uzoraka na batu

Ispitni uzorci su testirani na batu (slika 48). Testiranje se provodilo na način da se ispitni uzorak stegnuo u posebnu pripremu i udarao batom (slika 49). Po jednom uzorku se udaralo batom sve dok uzorak ili nije puknuo ili se savio dovoljno jako da bat „preleti“ iznad njega.



Slika 48: Bat i priprema za stezanje ispitnih uzoraka



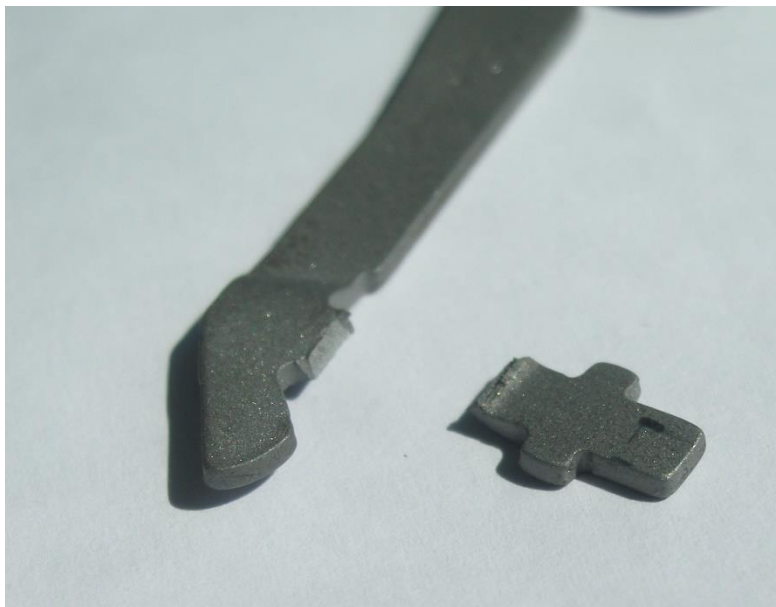
Slika 49: Ispitni uzorak stegnut u pripremi i bat

Rezultati dobiveni udaranjem ispitnih uzoraka na batu:

Tablica 16: Rezultati dobiveni udaranjem ispitnih uzoraka na batu

Ispitni uzorci	Broj udaraca n			
	A	B	C	D
1	8	8	6	6
2	8	7	7	6
3	7	8	7	6
4	8	7	7	6
5	8	8	7	6
6	7	7	6	6
7	8	8	7	6
8	8	8	7	6
9	7	7	7	6
10	8	7	6	6
Prosjek	7,70	7,50	6,70	6,00

Na slikama 50, 51, 52, 53 su prikazani ispitni uzorci A3, B3, C3 i D3 nakon udaranja na batu. Kod uzorka A3 došlo do puknuća na mjestu savijanja ispitnog komada, kod uzorka B3 pojavila se pukotina na mjestu savijanja, a na uzorcima C3 i D3 je ta pukotina manja.



Slika 50: Ispitni uzorak A3



Slika 51: Ispitni uzorak B3



Slika 52: Ispitni uzorak C3



Slika 53: Ispitni uzorak D3



## 5.8. Metalografska analiza

Nakon završenog ispitivanja na batu, na ispitnim uzorcima je provjerena dobivena mikrostrukturu.

Ispitni uzorci su rezani na rezačici proizvođača Struers, modela Labotom-3, uz obilno hlađenje (slika 54). Obilno hlađenje je potrebno da ne bi došlo do promjene mikrostrukture.



Slika 54: Rezačica Labotom-3

Nakon rezanja ispitni uzorci se zalijevaju plastičnom masom. Nakon skrućivanja plastične mase, uzorci se vade iz kalupa pa slijede brušenje i poliranje (slika 55). Kod postupka brušenja i poliranja također mora biti obilno hlađenje uzoraka da bi površina koju obrađujemo ostala iste mikrostrukture. Poliranje uzoraka izvodilo se na uređaju proizvođača Struers, modela LoboPol-5.



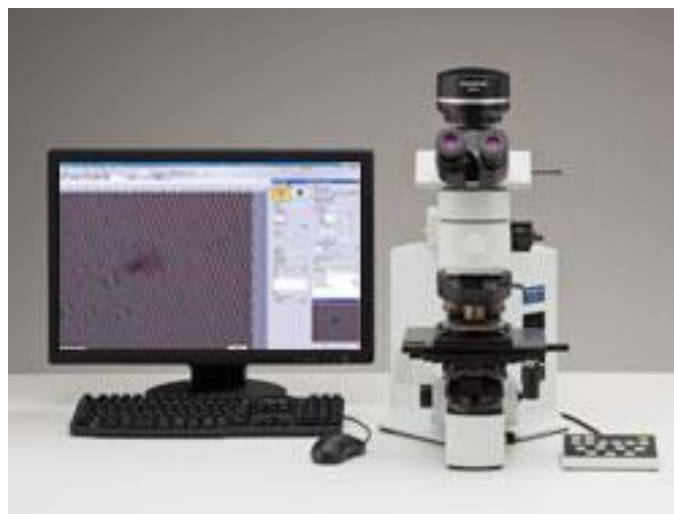
Slika 55: Uređaj za poliranje Struers LoboPol-5

Uzorci spremni za metalografsku analizu. Odrezani, brušeni, zaliveni u masu, polirani i označeni.



Slika 56: Uzorci pripremljeni za metalografsku analizu

Metalografska analiza rađena je pomoću mikroskopa BX51M.

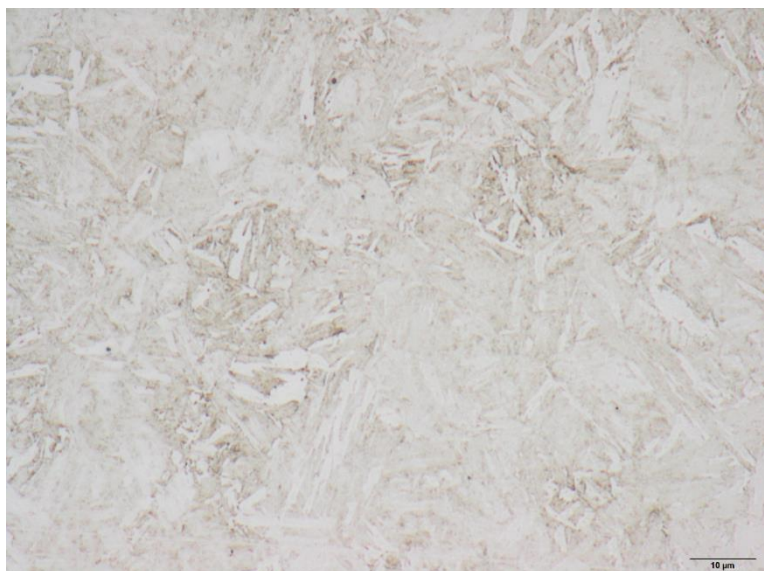


Slika 57: Mikroskop BX51M

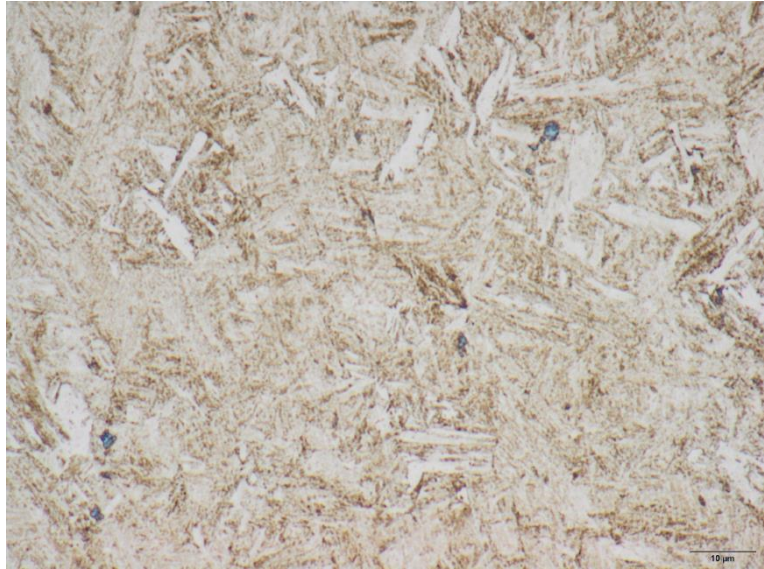
Metalografskom analizom kod uzorka A (slika 58) dobivena je fino-zrnata struktura, tj. donji bainit. Na ostalim uzorcima, kako je povećavana temperatura soli, tako je dobivana bainitna struktura „grubljeg“, tj. većeg zrna (slika 59 i slika 60). Na uzorku D (slika 61), koji je imao najvišu temperaturu soli tj. sredstva za gašenje, dobivena je grubozrnata struktura, tj. gornji bainit.



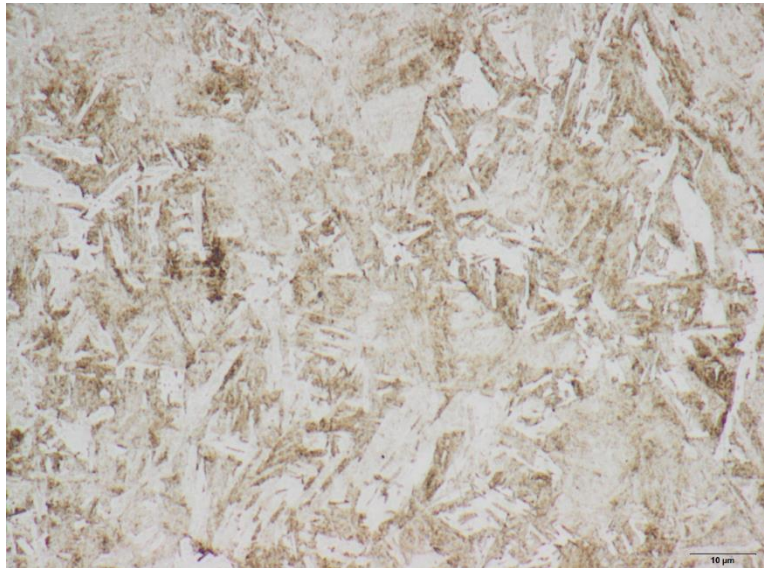
Slika 58: Metalografska slika uzorka A



Slika 59: Metalografska slika uzorka B



Slika 60: Metalografska slika uzorka C



Slika 61: Metalografska slika uzorka D

## **6. ANALIZA REZULTATA**

### **Mjerenje tvrdoće**

U tablici 15 prikazane su vrijednosti izmjerenih tvrdoća na ispitnim uzorcima. Povećanjem temperature sredstva za gašenje (soli) postiže se manja tvrdoća na površini ispitnih uzoraka, zaključuje se da struktura koja sadrži gornji bainit ima manju tvrdoću od strukture donjeg bainita, ovo mjerenje nam potvrđuje teoretski dio rada naveden u točki 3.2.

### **Ispitivanje na batu**

U tablici 16 prikazane su vrijednosti dobivene udaranjem ispitnih uzoraka na batu. Najveći broj udaraca dobiven je na ispitnim uzorcima gašenim u sredstvu za gašenje (soli) sa najnižom temperaturom. Pregledom ispitnih uzoraka nakon testiranja na batu (slike 50, 51, 52 i 53) zaključuje se da je struktura donjeg bainita žilavija od strukture gornjeg bainita.

### **Metalografska analiza**

Metalografskom analizom dobivene su bainitne strukture. Takve strukture su i očekivane jer su odabrane temperature sredstva za gašenje bile u tom temperaturnom rasponu u kojem se postiže bainitna struktura (dijagram prikazan na slici 37).

Ispitni uzorci gašeni u sredstvu za gašenje sa najnižom temperaturom imali su sitnozrnatu bainitnu strukturu odnosno donji bainit. Povećanjem temperature sredstva za gašenje dobivana je bainitna struktura sa sve većim zrnom. Ispitni uzorci gašeni u soli sa najvišom temperaturom imali su grubozrnatu bainitnu strukturu odnosno gornji banit (slike 58, 59, 60 i 61). Dobivene strukture potvrđuju teoriju opisanu u točki 3.2.1.

## 7. ZAKLJUČAK

Provedene promjene režima toplinske obrade čelika Č.1731 korištenog za izradu analiziranog strojnog dijela rezultirale su znatnim povećanjem vijeka trajanja u eksploataciji.

Povećanje od cca 75% (ekvivalent 4,4 udara batom na 7,7 udara do deformiranja ili puknuća) postignuto je parametrima toplinske obrade u cilju stvaranja donje bainitne strukture, povećane žilavosti uz neznatno smanjenje tvrdoće.

Ukoliko se na funkcionalnost opružnog mehanizma sa ovako obrađenim ključnim dijelom i rezultatima dobivenim ovim eksperimentom, budu postavili zahtjevi duljeg vijeka trajanja sugerira se promjena materijala.

Analizom skupine niskolegiranih konstrukcijskih čelika i njihovih poznatih mehaničkih svojstava obzirom na stanje strukture i toplinske obrade, kao alternativno rješenje predlaže se čelik Č.4830, DIN 17006 oznake 50CrV4, a za potvrdu rezultata treba eksperimentom utvrditi optimalne parametre toplinske obrade.

## LITERATURA

[1] M. Stupnišek, F. Cajner: Osnove toplinske obrade metala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2001.

[2] D. Krumes: Toplinska obradba, Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod, 2000.

[3][https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1329396769-0 prezentacija\\_mat\\_ii\\_to\\_pdf\\_bez\\_teksta.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1329396769-0 prezentacija_mat_ii_to_pdf_bez_teksta.pdf)

[4] H. Schumann: Metalografija, Tehnološko-metalurški fakultet, 1989

[5] Željezara ravne: Čelici za cementiranje, čelici za nitriranje, čelici za poboljšanje, Metalbiro, Zagreb

[6] <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Ispitivanje%20tvrdoce.pdf>