

# MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA MARTENZITNOG KOROZIJSKI POSTOJANOG ČELIKA

---

**Rendulić, Matija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*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:128:469028>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-22**



**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  
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

MATIJA RENDULIĆ

**MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA  
MARTENZITNOG KOROZIJSKI  
POSTOJANOG ČELIKA**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2021. godina

VELEUČILISTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

MATIJA RENDULIĆ

**MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA  
MARTENZITNOG KOROZIJSKI  
POSTOJANOG ČELIKA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor :  
dr. sc. Tihana Kostadin

KARLOVAC, 2021.godina



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

Klasa:  
602-11/\_\_\_-01/\_\_\_

## ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

Datum:  
**02.03.2021**

|   |  |                           |  |
|---|--|---------------------------|--|
| Ime i prezime   | MATIJA RENDULIĆ                          |                           |  |
| OIB / JMBG  |  |                           |  |
| Adresa  |  |                           |  |
| Tel. / Mob./e-mail  |  |                           |  |
| Matični broj studenta                                       |  |                           |  |
| JMBAG   |  |                           |  |
| Studij (staviti znak <b>X</b> ispred odgovarajućeg studija) | <b>X</b> prediplomski                    | specijalistički diplomski |  |
| Naziv studija   | PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA |                           |  |
| Godina upisa  |  |                           |  |
| Datum podnošenja molbe                                      |  |                           |  |
| Vlastoručni potpis studenta/studentice                      |  |                           |  |

Naslov teme na hrvatskom: MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA MARTENZITNOG KOROZIJSKI POSTOJANOG ČELIKA

Naslov teme na engleskom: MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF MARTENSITIC STAINLESS STEEL

**Opis zadatka:** Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu potrebno je opisati proces korozije, te korozijski postojane čelike, sa posebnim naglaskom na martenzitne čelike, te njihova mehanička svojstva i obradivost, kao i njihovu primjenu.

U eksperimentalnom dijelu rada, za izabrani martenzitni korozijski postojani čelik, napraviti: ispitivanje vlačne čvrstoće, udarnog rada loma, tvrdoće i metalografsku analizu mikrostrukture, te analizirati dobivene rezultate, uz osnovnu statističku obradu rezultata dobivenih ispitivanjima. Na kraju napisati odgovarajući zaključak.

Rad urediti prema pravilima VUK.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ja, student Matija Rendulić, matični broj studenta: 0110616047, upisan u VI. semestar preddiplomskog stručnog studija strojarstva, akademske godine 2020./2021., radio ovaj rad samostalno, primjenom znanja stečenih na Veleučilištu u Karlovcu, uz pomoć korištenja stručne literature i savjeta mentora. Zahvaljujem se svima koji su mi pružili podršku tijekom studiranja, te uz stručnu pomoć i vođenje mentorice Tihane Kostadin, dr.sc, kojoj se također ovim putem zahvaljujem.

Karlovac, 02.03.2021

Matija Rendulić

---

## SAŽETAK

Završni rad podijeljen je u dva dijela, teorijski i eksperimentalni dio. U teorijskom dijelu opisana je korozija, njezini oblici, te mikrostruktura nehrđajućih postojanih čelika. Posebno je naglašena mikrostruktura, svojstva i primjena martenzitnih korozijskih postojanih čelika.

U eksperimentalnom dijelu provedena su ispitivanja vlačne čvrstoće, udarnog rada loma, tvrdoće i metalografska analiza mikrostrukture za izabrani materijal, oznake X20 Cr13 ili HRN oznake Č4172. Na temelju dobivenih rezultata i provedene analize donesen je odgovarajući zaključak.

Ključne riječi: vlačna čvrstoća, udarni rad loma, tvrdoća, mikrostruktura nehrđajućih postojanih čelika.

# **MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF MARTENSITIC STAINLESS STEEL**

## **SUMMARY**

The final paper is divided into two parts, theoretical and experimental part. The theoretical part describes corrosion, its forms, and the microstructure of stainless steels. The microstructure, properties and application of martensitic stable steels are especially emphasized.

In the experimental part, tests of tensile strength, impact fracture, hardness and metallographic analysis of the microstructure on selected martensitic steel marked X20 Cr13 were performed. Based on the obtained results and the conducted analysis, an appropriate conclusion was made.

Key words : tensile strength, impact fracture, hardness and microstructure.

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS OZNAKA

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1.Uvod o koroziji.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Kemijska korozija.....   | 2         |
| 1.2 Elektrokemijska korozija.....                                      | 2         |
| 1.3.Korozijska postojanost.....  | 2         |
| <b>2. Oblici korozije.....</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1. Posebni oblici korozije.....                                      | 4         |
| 2.1.1 Interkristalna korozija.....                                     | 4         |
| 2.1.2 Točkasta – jamičasta korozija.....                               | 5         |
| 2.1.3 Napetosna korozija.....  | 5         |
| 2.1.4 Erozija i kavitacija.....  | 6         |
| <b>3. Mikrostruktura korozijskih postojanih čelika.....</b>            | <b>7</b>  |
| 3.1 Feritni čelici.....  | 7         |
| 3.2 Superferitni čelici.....   | 9         |
| 3.3 Austenitni čelici.....   | 9         |
| 3.4 Austenitno feritni čelici s 40% do 60% ferita (Duplex čelici)..... | 10        |
| <b>4. Martenzitni korozijski postojani čelici.....</b>                 | <b>12</b> |
| 4.1 Mikrostruktura martenzitnog postojanog čelika.....                 | 12        |
| 4.2 Toplinska obrada korozijskih postojanih martenzitnih čelika.....   | 14        |
| 4.3 Martenzitna pretvorba.....   | 20        |
| 4.4 Mekomartenzitni čelici.....  | 23        |
| 4.5 Martenzitno – feritni čelici.....                                  | 24        |



|  |    |
|--|----|
| <b>5. Eksperimentalni dio</b> .....      | 25 |
| 5.1 Ispitni materijal.....               | 25 |
| 5.2 Ispitivanje udarnog rada loma.....   | 26 |
| 5.2.1 Rezultati udarnog rada loma.....   | 29 |
| 5.3 Ispitivanje tvrdoće.....             | 31 |
| 5.3.1 Rezultati ispitivanja tvrdoće..... | 32 |
| 5.4 Ispitivanje vlačne čvrstoće.....     | 34 |
| 5.4.1 Rezultati vlačne čvrstoće.....     | 36 |
| 5.6 Metalografsko ispitivanje.....       | 41 |
| 5.7 Analiza rezultata.....               | 44 |
| <b>6. Zaključak</b> .....                | 45 |

LITERATURA

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| SLIKA 1. : Mikrostruktura interkristalne korozije.....                        | 4  |
| SLIKA 2. : Oblici točkaste - jamičaste korozije.....                          | 5  |
| SLIKA 3. : Mikrostruktura napetosne korozije.....                             | 6  |
| SLIKA 4. : Mikrostruktura feritnih čelika.....                                | 8  |
| SLIKA 5. : Mikrostruktura austenitnih čelika.....                             | 10 |
| SLIKA 6. :Mikrostruktura duplex čelika.....                                   | 11 |
| SLIKA 7. : Mikrostruktura martenzitnih čelika.....                            | 12 |
| SLIKA 8. : Prikaz BTC kristalne rešetke.....                                  | 13 |
| SLIKA 9. : Prikaz mikrostrukture martenzitnih čelika nakon kaljenja.....      | 14 |
| SLIKA 10. : Dijagram popuštanja čelika.....                                   | 15 |
| SLIKA 11. : Dijagram popuštanja za oznaku čelika Č. 4172.....                 | 16 |
| SLIKA 12. : Karakteristike čelika oznake Č. 4172.....                         | 17 |
| SLIKA 13. : Parametri kaljenja i popuštanja za čelik Č. 4172.....             | 18 |
| SLIKA 14. : Uptnov dijagram.....  | 21 |
| SLIKA 15. : Područja optimalnih temp. austenitizacije čelika.....             | 22 |
| SLIKA 16. : Oblik i dimenzije epruveta za ispitivanje udarnog rada loma.....  | 26 |
| SLIKA 17. : Prikaz Charpyjev bat.....   | 27 |
| SLIKA 18. : Prikaz uzorka prije ispitivanja udarnog rada loma.....            | 28 |
| SLIKA 19. : Djagram analize udarnog rada loma.....                            | 30 |
| SLIKA 20. : Prikaz uzorka nakon provedenog ispitivanja udarnog rada loma..... | 30 |
| SLIKA 21. : Mjerenje tvrdoće.....   | 31 |

|  |    |
|--|----|
| SLIKA 22. : Skala tvrdoće po Vickersu i Brinellu.....                              | 33 |
| SLIKA 23. : Presjek okrugle epruvete.....  | 35 |
| SLIKA 24. : Prikaz epruveti prije ispitivanja vlačne čvrstoće.....                 | 35 |
| SLIKA 25. : Postavljanje epruvete u čeljust kidalice.....                          | 39 |
| SLIKA 26. : Mjerenje sile $F_m$ i $R_m$ .....                                      | 39 |
| SLIKA 27. : Epruveta nakon loma.....   | 40 |
| SLIKA 28. : Prikaz epruvete nakon provedenog statičkog<br>vlačnog ispitivanja..... | 40 |
| SLIKA 29. : Uređaj za brušenje i poliranje.....                                    | 41 |
| SLIKA 30. : Svjetlosni metalografski mikroskop.....                                | 42 |
| SLIKA 31. : Mikrostruktura ispitnog materijala X20 Cr13<br>pri povećanju 200x..... | 43 |

## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| TABLICA 1. : Četiri stupnja postojanosti opće korozije.....                                | 3  |
| TABLICA 2. : Korozijski postojani martenzitni čelici.....                                  | 16 |
| TABLICA 3. : Primjena martenzitnih čelika.....   | 19 |
| TABLICA 4. : Korozijski postojani mekomartenzitni čelici.....                              | 24 |
| TABLICA 5. : Kemijski sastav materijala X20 Cr13.....                                      | 25 |
| TABLICA 6. : Rezultati ispitivanja udarnog rada loma.....                                  | 29 |
| TABLICA 7. : Parametri ispitivanja tvrdoće po Brinellu.....                                | 31 |
| TABLICA 8. : Rezultati ispitivanja tvrdoće po Brinellu.....                                | 32 |
| TABLICA 9. : Standardne mjere za označavanje okruglih epruveta<br>vlačnog ispitivanja..... | 34 |
| TABLICA 10. : Rezultati dobiveni ispitivanjem vlačne čvrstoće.....                         | 36 |
| TABLICA 11. : Analiza rezultata.....   | 44 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka       | Jedinica           | Naziv veličine                             |
|--------------|--------------------|--|
| $\vartheta$  | $^{\circ}\text{C}$ | temperatura                                |
| $F_e$        | $N$                | sila tečenja                               |
| $F_m$        | $N$                | maksimalna sila                            |
| HB           | -                  | tvrdća prema Brinellu                      |
| HRC          | -                  | tvrdća prema Rockwellu                     |
| $L_0$        | $mm$               | početna mjerna duljina                     |
| $S_0$        | $mm^2$             | površina početnog presjeka                 |
| D            | $Mm$               | promjer kuglice                            |
| $R_{p0,2}$   | $N/mm^2$           | konvencionalna granica razvlačenja         |
| $R_e$        | $N/mm^2$           | granica razvlačenja                        |
| $R_m$        | $N/mm^2$           | vlačna čvrstoća                            |
| Z            | %                  | kontrakcija                                |
| $M_s$        | $^{\circ}\text{C}$ | temperatura početka stvaranja martenzita   |
| $M_f$        | $^{\circ}\text{C}$ | temperatura završetka stvaranja martenzita |
| KV           | $J$                | udarni rad loma                            |
| $Fe_3C^{id}$ | $mas. \%$          | udio eutektoidnog cementita                |
| $Fe_3C^e$    | $mas. \%$          | udio eutektičnog cementita                 |
| $Fe_3C'$     | $mas. \%$          | udio primarnog cementita                   |
| $Fe_3C''$    | $mas. \%$          | udio sekundnog cementita                   |
| P            | -                  | perlit                                     |

# 1. UVOD U KOROZIJU

Korozija je razaranje metala i legura zbog elektrokemijskog ili kemijskog međusobnog djelovanja metala i vanjskog medija.

Ovisno o svojstvima medija i međudjelovanja, razlikuju se sljedeće vrste korozije: plinska, atmosferska, biološka, podvodna, itd. Do pojave opasnosti od korozije utječe na konstrukcije u različitim granama industrije poput:

- Dijelovima opreme u prehrambenoj ili farmaceutskoj industriji,
- Propuštanje cjevovoda ili spremnika,
- Kod mostova, brodova, platformi za bušenje i drugih opterećenih konstrukcija.

Kako bi se usporila reakcija na razaranje površinskih slojeva, potrebno je uzeti u obzir da na brzinu i mehanizam korozijskih procesa djeluju vanjski i unutrašnji faktori.

## a) Vanjski faktori [ 2 ]:

- temperatura,
- naprezanje,
- tlak medija, promjena pH,
- kavitacija,
- erozija,
- iznos trenja,
- brzina protoka medija.

## b) Unutrašnji faktori:

- prisutnost uključaka,
- nejednoličnost čelika uslijed likvacije,
- različit sastav površinskih slojeva čelika,
- nejednoličnost deformacije, rasporeda naprezanja,
- nejednolična rekristalizacija.

Korozija konstrukcijskih materijala prema mehanizmu procesa razlikuje se:

1. Kemijska korozija metala,
2. Elektrokemijska korozija metala,
3. Koroziju ili degradaciju nemetala u fluidima.

### **1.1 Kemijska korozija**

Kemijska korozija je proces između metala i plinovitog, odnosno kapljevito medija koji nisu elektroliti, ali imaju sklonost prema metalu. Primjeri spajanja metala s kisikom iz suhog vrućeg plina su slučajevi pri kovanju, valjanju metala, zavarivanju, žarenju, itd. Kemijska korozija u kapljevitom stanju, odnosno tekućine koje nisu električni vodiči i ne sadrže vodu su razni tekući kemijski spojevi kao npr. alkohol, benzin, nafta, aceton, i sl.

### **1.2 Elektrokemijska korozija**

Elektrokemijska korozija javlja se kod metala u električki vodljivim tekućinama, odnosno elektrolitima. Proces elektrokemijske korozije sastoji se od ionizacije metala i redukcije depolarizatora. Depolarizator se reducira vezanjem viška elektrona, a može biti kation ili anion otopljen u elektrolitu ili molekula čvrste tvari.

### **1.3 Korozijska postojanost**

Korozijska postojanost je otpornost materijala na djelovanje okolnog medija, odnosno postojaniji je onaj materijal kod kojeg, u jednakim vanjskim uvjetima dolazi do manjeg razaranja na površinu ili do promjena mikrostruktura.

Na pasivaciju, tj. stvaranje tanke guste zaštitne prevlake najviše utječe maseni udio kroma i drugih legiranih elemenata.

Dva su uvjeta korozijski postojanog čelika. Prvi je da sadrži barem 12% kroma u čvrstoj otopini, a drugi uvjet je homogena monofazna mikrostruktura.

## 2. OBLICI KOROZIJE

Postoje oblici korozije koji su opasni za rad različitih strojnih dijelova, a često nastupaju u unutrašnjosti presjeka, stoga nisu vidljivi na površini.

Pojavni oblici korozije su:

1. Opća, ravnomjerna ili neravnomjerna korozija, koja zahvaća čitavu izloženu površinu materijala,
2. Lokalna (mjestimična) korozija, koja zahvaća dio izložene površine materijala.

Najmanji opasan oblik korozije, a nastupa ravnomjerno po cijeloj površini je opća (jednolična) korozija.

Za postojanost opće korozije prikazuje se u četiri stupnja, prikazani tablicom. Intenzivnost opće korozije mjeri se u određenom rasponu gubitka mase, odnosno određenom gubitku dimenzije u mm/godini.

Tablica 1. Četiri stupnja postojanosti opće korozije [ 4 ]

| Stupanj | Gubitak mase<br>$\Delta G$ , g/m <sup>2</sup> h | Gubitak dimenzije<br>$\Delta s$ , mm/god. | Opis postojanosti   |
|---------|---|---|---------------------|
| 0       | < 0,1   | < 0,11                                    | potpuno postojana   |
| 1       | 0,1...1,0                                       | 0,11...1,1                                | praktički postojana |
| 2       | 1,0...10,0                                      | 1,1...11,0                                | slabo postojano     |
| 3       | >10,0   | >11,0                                     | nepostojano         |



## 2.1 Posebni oblici korozije

Posebni oblici korozije pojavljuju se lokalno na površini i širi se prema unutrašnjosti presjeka strojnog dijela.

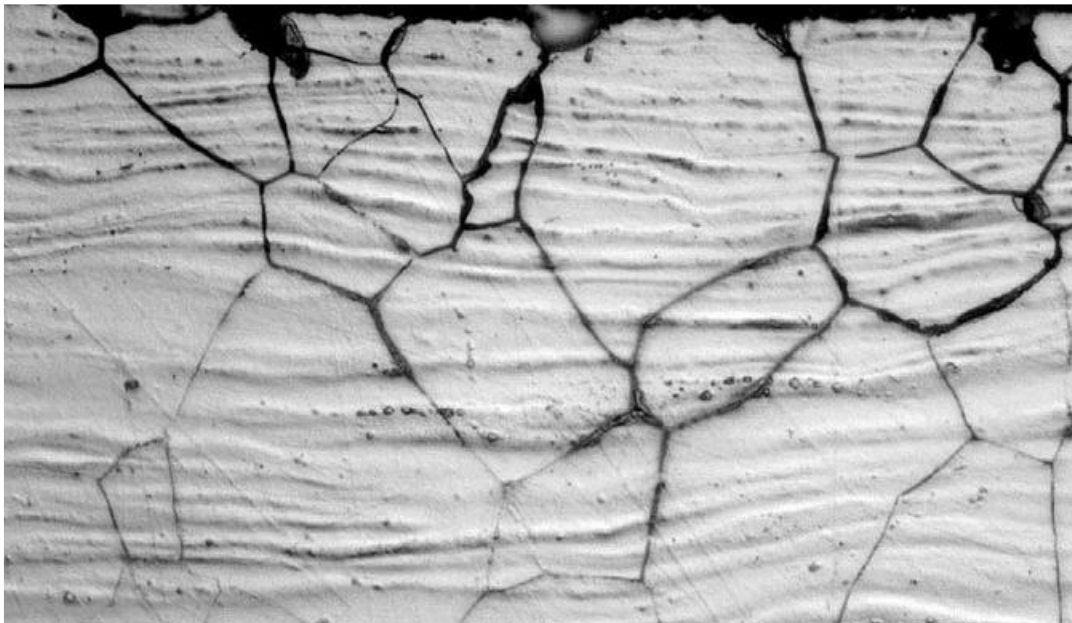
Dijele se na:

- interkristalna korozija,
- točkasta – jamičasta korozija,
- napetosna korozija,
- kontaktna korozija,
- korozija u rasporu,
- erozija i kavitacija.

### 2.1.1 Interkristalna korozija

Radi se o korozijskoj agresiji duž granice zrna čime izaziva razaranje metalne veze među kristalima u mikrostrukturi čelika i do konačnog raspada strojnog dijela.

Opasan oblik korozije jer ostaje neprimijećen, a pri tome utječe na mehanička svojstva materijala, žilavost i smanjenje čvrstoće.



Slika 1. : Mikrostruktura interkristalne korozije

## 2.1.2 Točkasta – jamičasta korozija

Točkasta – jamičasta (engl. pitting), pojavljuje se u obliku malih jamica, a s vremenom u rupice, odnosno prodore, te zahvaća mali dio površine strojnog dijela. Jedna od najopasnijih oblika korozije, a uzrok je nehomogenost strukture ili u kemijskom sastavu materijala. Kako bi se spriječila opasnost od pojave točkaste korozije, pasivizira se površina u 10 do 12% - noj dušičnoj kiselini.



Slika 2. : Oblici točkaste- jamičaste korozije

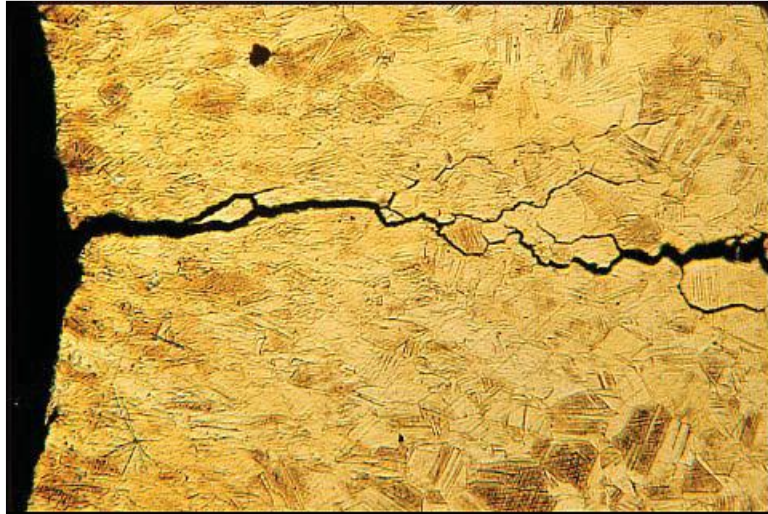
## 2.1.3. Napetosna korozija

Napetosna korozija nastupa kada su strojni dijelovi istodobno izloženi vlačnom naprezanju i kemijskoj agresiji. Posljedica naprezanja dolazi uslijed hladnog oblikovanja deformiranjem, hladne obrade, zavarivanja, prenaplog gašenja i sl.

Naprezanja zajedno s djelovanjem agresivnog medija, zazivaju pukotine okomito na smjer naprezanja. Kako bi se spriječila pojava napetosne korozije potrebno je provesti žarenje za smanjenje zaostalih naprezanja pri temperaturi od 850 do 900°C.

Proces napetosne korozije može se podijeliti u četiri faze:

1. Inkubacija,
2. Pojava pukotine,
3. Prodiranje pukotine,
4. Lom.



Slika 3. : Mikrostruktura napetosne korozije

#### 2.1.4. Erozija i kavitacija

Ukoliko se radi o djelovanju medija mehaničkog trošenja uzrokovano udaranjem tekućine, plina ili pare koje sadržavaju krute čestice vrlo je teško prepoznati radi li se o eroziji ili od nekih drugih korozijskih oblika. Primjeri kod kojih se pojavljuje erozija su cjevovodi, lopatica, pumpi, i sl.

Kavitacija se pojavljuje ako unutar tekućine dolazi do naglog pada tlaka i stvaranja parnih mjehurića i pri tome do oštećenja na površinu materijala. Oblik kavitacije se može spriječiti sniženjem brzine. Primjeri kavitacije su oštećenja u pumpama, propelerima, ventilima, i sl.

### 3. MIKROSTRUKTURA KOROZIJSKI POSTOJANIH ČELIKA

Korozijski postojani čelici s obzirom na sastav i mikrostrukturu dijele se na [ 2 ] :

1. Jednostruko legirani Cr – čelici koji prema mikrostrukтури mogu biti:

- Feritni,
- Martenzitni i martenzitno – karbidni,
- Feritno – martenzitni.

2. Cr – Ni, Cr – Ni – Mo i Cr – Mn čelici:

- Austenitni,
- Feritni,
- Martenzitni,
- Austenitno – feritni,
- Martenzitno – feritni,
- Austenitno – martenzitno – feritni.

Podskupine čelika dobivene modificiranjem sastava i mikrostrukture su:

- Superferitni čelici s vrlo niskim %C i niskim masenim udjelima nečistoća,
- Austenitni s vrlo niskim %C,
- Duplex čelici,
- Niskouglični martenzitni.

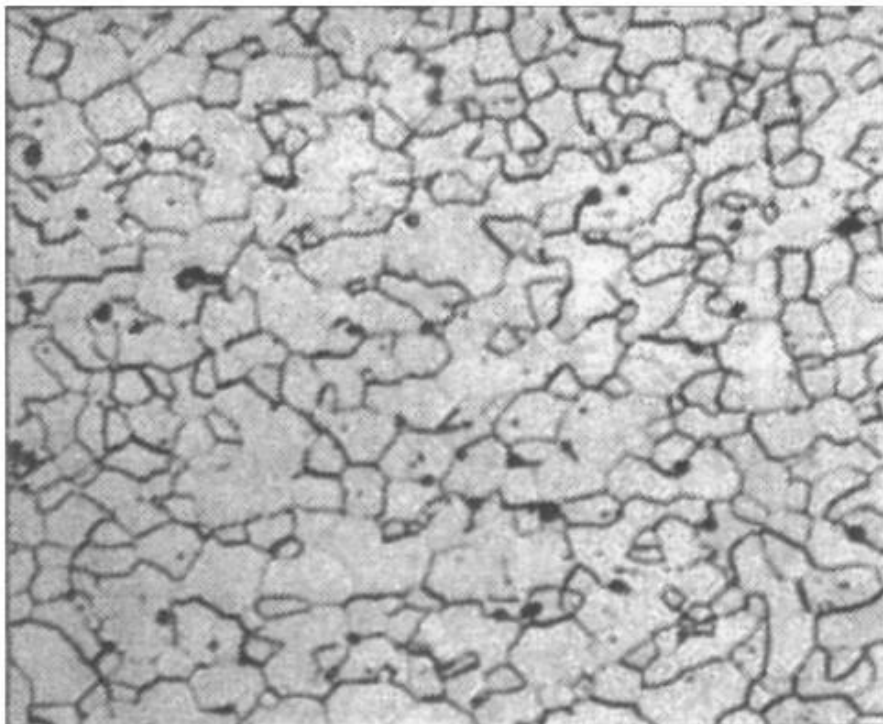
#### 3.1 Feritni čelici

Feritna struktura sadrži vrlo niski udio ugljika ( $< 0,1\%C$ ) i visoki udio kroma (13...17%Cr). Primjenjuju se u brušenom ili fino poliranom žarenom stanju. Feritni čelici su feromagnetični i ne mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade jer nemaju faznu pretvorbu. Prednost feritnih čelika je što su ekonomski prihvatljiviji i otporniji na koroziju i oksidaciju čelika.

Svojstva feritnih čelika:

- Skloni su pojavi "krhkosti 475°C" pri duljem zagrijavanju na temperaturama od 350 do 520°C,
- Slabo zavarljivi zbog rasta zrna pri temperaturama iznad 900°C,
- Nepostojani su na djelovanje rastaljenih metala i kloridnim otopinama,
- Magnetični,
- Postojani su prema oksidirajućim kiselinama (dušičnoj kiselini, vodenim otopinama, amonijevoj salitri, smjesi dušične, fosforne i solne kiseline), te su postojani u dimnim plinovima koji sadrže sumpor.

Feritni čelici se koriste za izradu automobilskeg ispušnog katalizatora, nosača semafora i natpisa iznad autocesta.



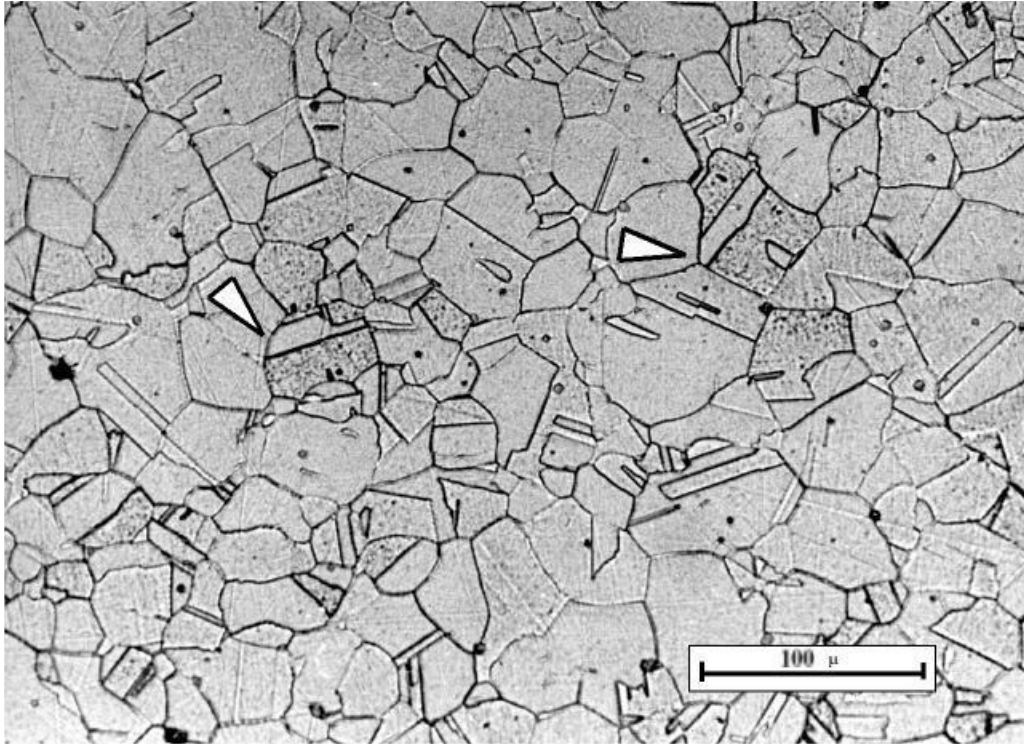
Slika 4. : Mikrostruktura feritnih čelika

### **3.2 Superferitni čelici**

Superferitni čelici oznakom "ELA" (engl. Extra Low Additions) imaju vrlo mali udio nečistoća i primjesa u sastavu čelika, odnosno ima vrlo visoku čistoću sa sniženim postotkom ugljika i povišenim udjelom kroma i legiranim elementima za razliku od feritnih čelika. Za takvo postignuće superferitni čelici se proizvode sa suvremenim metodama u indukcijskim vakuumskim pećima, elektronskom mlazu, itd. Imaju višu granicu razvlačenja pri radnim temperaturama do  $\approx 350^{\circ}\text{C}$ , višu otpornost na puzanje pri  $20^{\circ}\text{C}$ , te žilavost pri niskim temperaturama. Zbog navedenih svojstava superferitni čelici mogu biti zamjena za skuplje austenitne čelike.

### **3.3 Austenitni čelici**

Skupina austenitnih čelika sadrže uglavnom od 0,02 do 0,15% C, 7 do 20% Ni, 15 do 20% Cr, te uz dodatne legirane elemente Mo, Ti, Nb, Ta koji dovode do pojave ferita od do 10% u mikrostrukturi. Mikrostruktura austenitnih čelika može bit monofazna, odnosno bez ferita i austenitno feritna sa 5% do 10% delta – ferita. Austenitni čelici imaju dobru žilavost i čvrstoću i prikladni su za deformiranje u hladnom i toplom stanju. Primjenjuju se prehrambenoj industriji, mljekarima, u industriji nafte, tekstila, papira, kože, šećera, primjenjiv je za izradu tlačnih spremnika, uređaja u medicini i ortopediji, itd.



Slika 5. : Mikrostruktura austenitnih čelika

Svojstva austenitnih čelika:

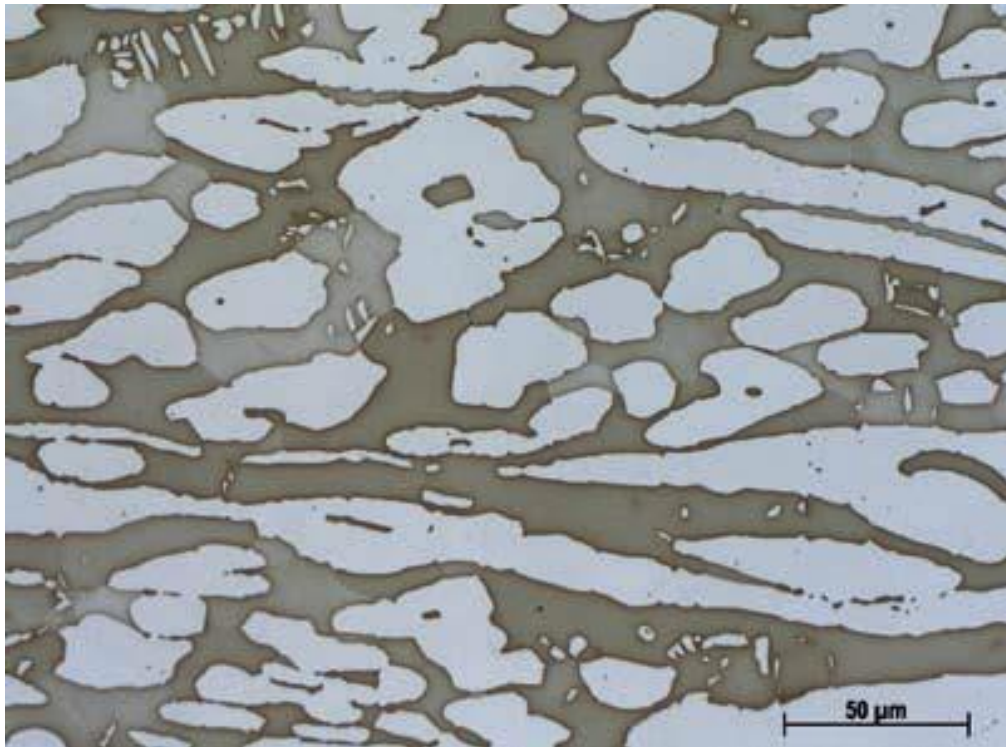
- Visoka otpornost na puzanje materijala,
- Prisutnost delta – ferita u zavarivanju otežava pojavu toplih pukotina,
- Očvršćuju hladnom deformacijom,
- Dobra žilavost pri vrlo niskim temperaturama,
- Pojava senzibilizacije čelika na duljem izotermičkom držanju pri temperaturama od 550° do 850°C. Senzibilizacija smanjuje otpornost napetosnu i rupičastu koroziju u procijepu što dovodi do pada mehaničkih svojstava.

### **3.4 Austenitno – feritni čelici s 40% do 60% ferita (duplex čelici)**

Duplex čelici kombiniraju prednosti austenitne i feritne mikrostrukture. Zbog visokog udjela ferita su feromagnetični, imaju višu toplinsku vodljivost i nižu toplinsku rastezljivost od austenitnih čelika.

Svojstva austenito – feritnih čelika (duplex čelici):

- Viša granica razvlačenja,
- Povišena tvrdoća,
- Otpornost na abrazijsko trošenje,
- Dobra žilavost i duktilnost,
- Bolja otpornost na rupičastu koroziju od austenitnih čelika,
- Otporan prema napetosnoj koroziji,
- Dobra mehanička svojstva.



Slika 6. : Mikrostruktura duplex čelika

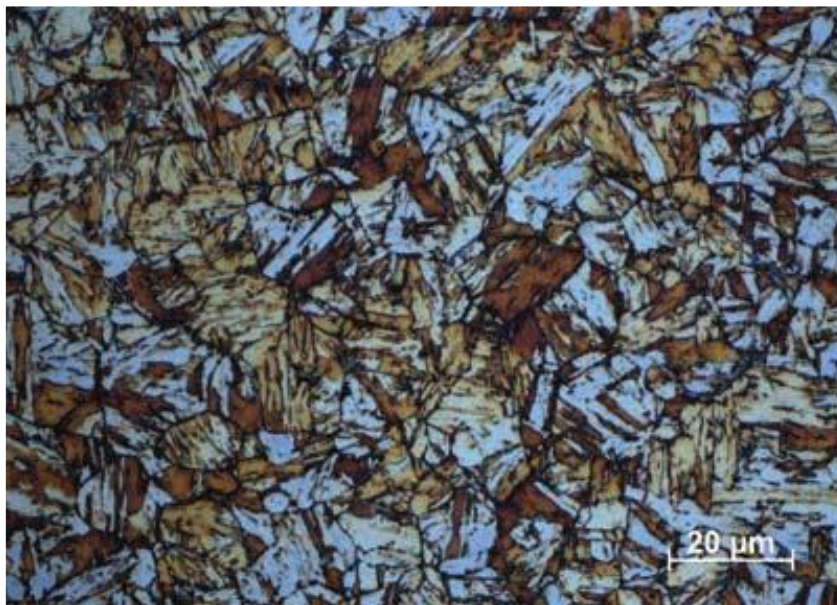
Zbog svojih korozijskih i mehaničkih svojstava duplex čelici se primjenjuju za izradu transporta (cisterne), u industriji nafte i plina ( crpke, destilatori, ventili, cjevovodi,...), brodogradnji (kormila, ležajevi, propelerske osovine,...), za izmjenjivače topline i separatore u petrokemijskoj industriji itd.



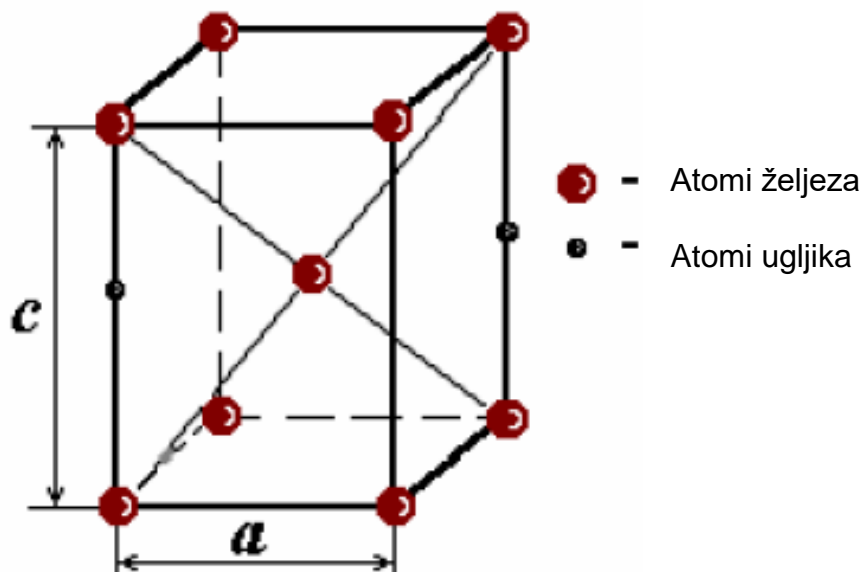
## 4. MARTENZITNI KOROZIJSKI POSTOJANI ČELICI

### 4.1 Mikrostruktura martenzitnih postojanih čelika

Martenzitni postojani čelici sadrže od 0,2% do 1,0% C i sa 13% do 18% Cr. Čelici sa 1,5% do 2,5% Ni, poboljšavaju korozivsku otpornost i postižu monofaznu martenzitnu ili martenzitno – karbidnu strukturu. Martenzitno – karbidna struktura nastaje kada brzina hlađenja stabilnog austenita dostigne vrijednost kritične brzine. U mikrostrukturi kaljenog čelika martenzit se javlja u obliku igličastih kristala. Reakcijom martenzita transformira se  $\gamma$ -faza s plošno centriranom kubičnom kristalnom rešetkom u  $\alpha$ -fazu s bazno - centriranom tetragonskom rešetkom (BTC). Uslijed velike brzine hlađenja i pada temperature brzina difuzije približava se praktički nuli, pa ugljik više nema mogućnosti da difundira kroz kristalnu rešetku ferita ( $\alpha$ -Fe). Tetragonska kristalna struktura martenzita je prezasićena čvrsta otopina ugljika u  $\alpha$ -Fe, koja ima određenu unutrašnju napetost i kojom se objašnjavaju visoka tvrdoća i otpornost martenzita prema nagrizanju s metalografskim reagensima. Martenzit nastaje kao rezultat bez difuzijske pretvorbe austenita i ovisi samo o temperaturi, a ne o vremenu trajanja procesa. Martenzit nastao pretvorbom austenita, sa sadržajem  $>0,15\%$  C ima BTC kristalnu rešetku kod koje je parametar c veći od parametra a. Što je veći sadržaj ugljika u martenzitu, to je veći omjer c:a, tj. veća je tetragonalnost rešetke.



Slika 7. : Mikrostruktura martenzitnog čelika

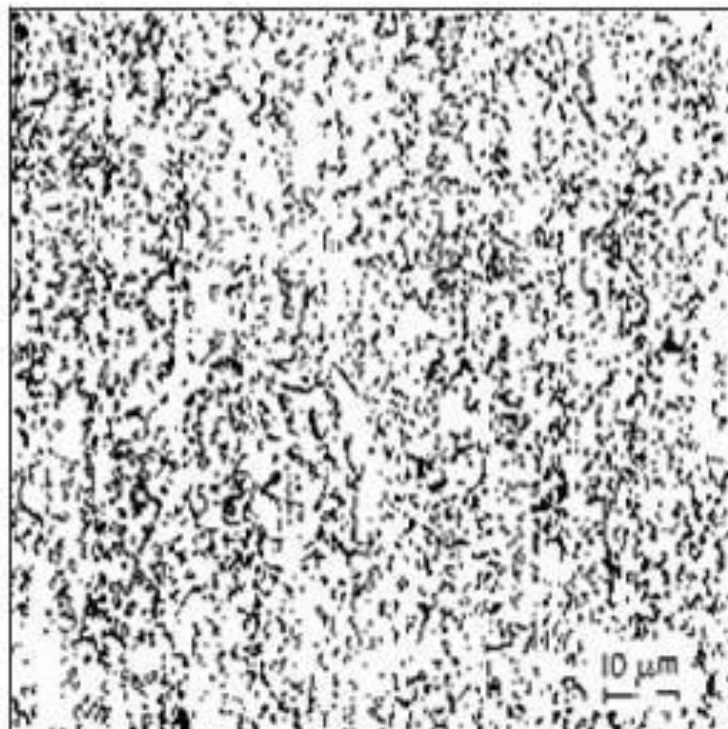


Slika 8. : Prikaz BTC kristalne rešetke

Martenzitni čelici mogu se podijeliti u dvije skupine. Prva skupina je ona koja sadrži do 0,25%C i pripadaju konstrukcijskim čelicima i obično se poboljšavaju, a druga skupina s više od 0,3%C pripadaju alatnim čelicima i nakon kaljenja se nisko popuštaju. U poboljšanom stanju čelici su korozijski postojani uz visoku granicu razvlačenja i žilavost, a u kaljenom stanju dobru korozijsku postojanost i otpornost na trošenje.

## 4.2 Toplinska obrada korozivskih postojanih martenzitnih čelika

Postupke toplinske obrade korozivski postojanih martenzitnih čelika čine: žarenje, kaljenje, te nisko ili visoko popuštanje. Granica razvlačenja martenzitnih čelika u žarenom stanju (prije kaljenja i popuštanja) iznosi oko  $275 \text{ N/mm}^2$ . Postupak sferoidizacijskog, odnosno mekog žarenja se provodi na temperaturama od  $770^\circ\text{C}$  za podeutektoidne čelike, za nadeutektoidne čelike do  $800^\circ\text{C}$ . Cilj mekog žarenja čelika je omekšati ga zbog što bolje obradivosti rezanjem strugotine, jer u protivnom se oštrice alata brzo troše i ne održavaju oštrinu prolaskom kroz strukture s tvrdim lamelama cementita te osiguravaju čeliku strukturu koja je pogodna za naknadne toplinske obrade (kaljenje). Nakon žarenja ostvaruje max. tvrdoću od 220 HB i max. čvrstoću od  $740 \text{ N/mm}^2$ . U ovom stanju čelici imaju dobru rastezljivost i oblikovljivost u hladnom stanju, i lakše se oblikuju u konačni oblik.



Slika 9. : Prikaz mikrostrukture martenzitnog čelika nakon kaljenja

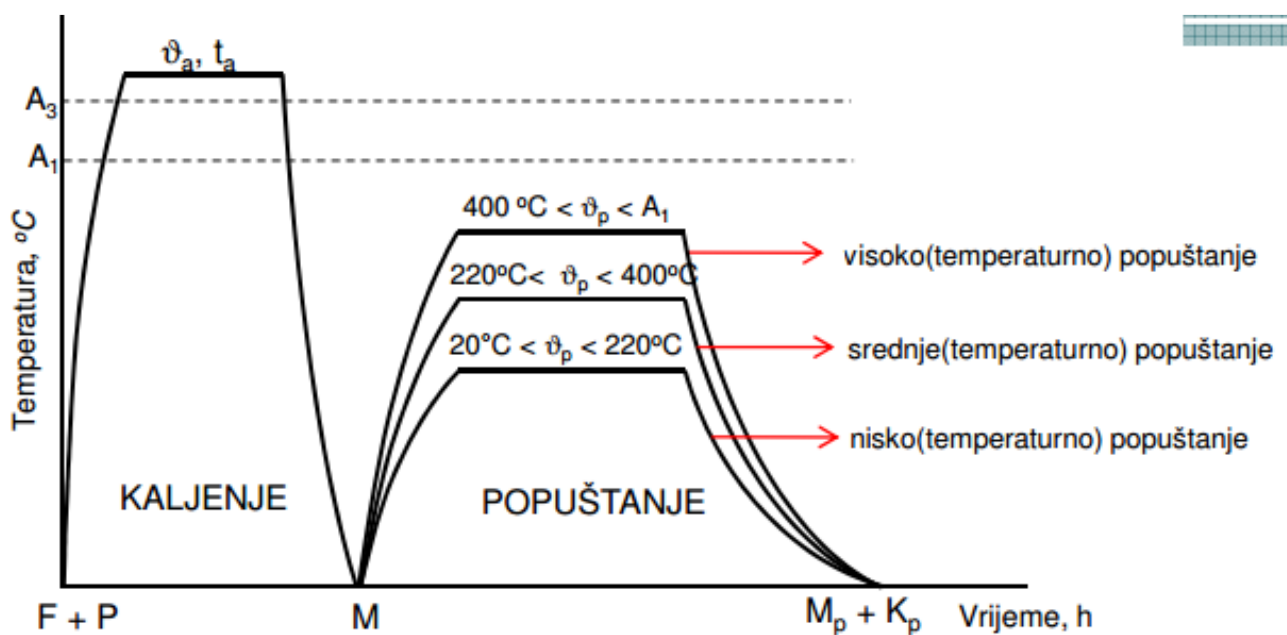
Kaljenje martenzitnog čelika Č. 4172 se odvija na temperaturama od 950 do 1020°C. Zbog toga su poželjna predgrijavanja, te rad u zaštitnoj atmosferi ili u vakuumskim pećima. Postupak kaljenja se sastoji od:

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

Nepotpuno kaljenje se povodi u svrhu jednoličnog rasporeda ugljikovih i kromovih atoma u završnom kaljenju u smislu smanjenja deformacija.

Sredstva za gašenje mogu biti zrak ili ulje. Ako se želi postići bolja tvrdoća nakon kaljenja potrebno je gasiti čelik u boljem sredstvu, odnosno ako čelik gasimo na zraku ostvaruje se tvrdoća od 44 HRC, a ako se gasi u ulju može se ostvariti tvrdoća od 53 HRC.

Kod gašenja je primjenjiv postupak martempering. Izvodi se na način da se gasi u toploj kupki pri 280° do 320°C u cilju smanjenja deformacija oblika proizvoda pri završnom kaljenju.



Slika 10. : Dijagram popuštanja čelika [ 1 ]

Postoje dva područja temperaturnih popuštanja [ 4 ] :

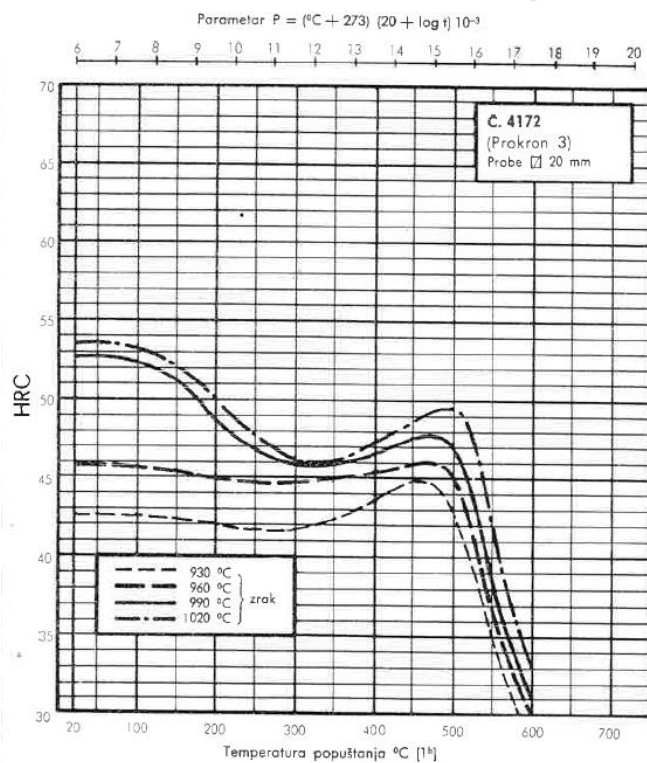
- $\vartheta_p \approx 140 - 450^\circ\text{C}$  pretežno se primjenjuju za alate,
- $\vartheta_p > 630^\circ\text{C}$  za dijelove strojeva ili uređaja.

Čelik Č.4172 sa kemijskim sastavom od 0,2 % ugljika, 13% kroma i 1% silicija i mangana se popušta na temperaturama od 150 - 450°C, te se ostvaruje radna tvrdoća alata od 52 do 44 HRC.

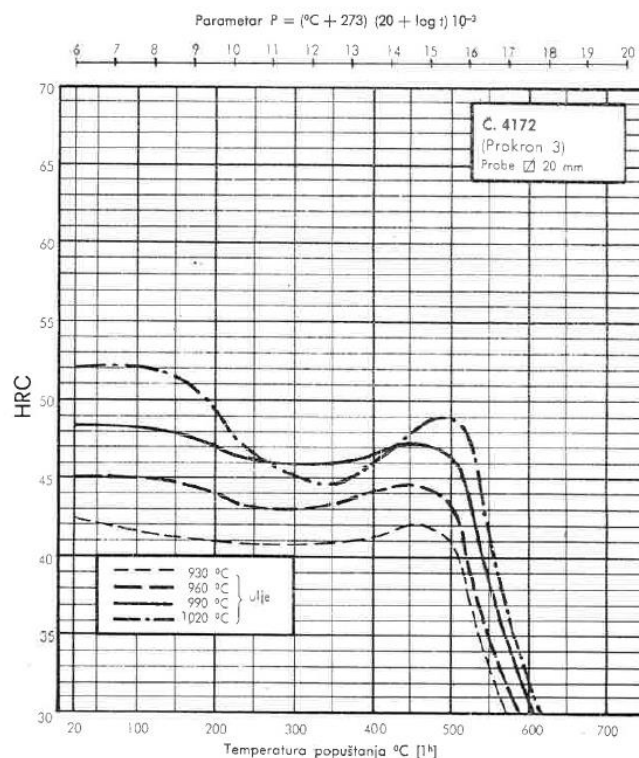
## Č. 4172

(Prokron 3)

Dijagram popuštanja:



Dijagram popuštanja:



Slika 11. : Dijagram popuštanja za oznaku čelika Č. 4172 [ 10 ]

# Č. 4172

(Prokron 3)

## Približan kemijski sastav u %

| C   | Si     | Mn     | Cr |
|-----|--------|--------|----|
| 0,2 | max. 1 | max. 1 | 13 |

## Usporedbe:

| SR Njemačka       |              | USA      | Francuska | Italija    | CCCP    | CSSR  |
|-------------------|--------------|----------|-----------|------------|---------|-------|
| W. №<br>DIN 17007 | DIN<br>17006 | AISI     | AFNOR     | UNI        | ГОСТ    | ČSN   |
| 1.2082<br>1.4021  | X 20 Cr 13   | Type 384 | Z 20 C 13 | X 20 Cr 13 | 20 X 13 | 17022 |

## Tip čelika:

Visoko legirani kromov nerđajući čelik nižeg sadržaja ugljika.

## Karakteristike i osnovna svojstva:

Prvenstveno se koristi za nerđajuće konstrukcione dijelove, a korisno se upotrebljava i za nerđajuće alate od kojih se ne traži naročito velika tvrdoća i otpornost protiv habanja.

## Upotreba:

Matrice za prešanje tableta i dugmadi. Matrice za lijevanje predmeta iz aluminija i mesinga. Za kirurške instrumente, koji nisu namijenjeni za rezanje.

## Tipizacija:

Netipiziran.

## Kovanje:

1100—850°C

## Meko žarenje:

| Temperatura | Tvrdoća nakon žarenja | Čvrstoća nakon žarenja     |
|-------------|-----------------------|----------------------------|
| 770—800°C   | max. 220 HB           | max. 740 N/mm <sup>2</sup> |

## Kritične preobražajne točke (srednje orijentacione vrijednosti)

| Ac početak | Ac završetak | Ar početak | Ar završetak |
|------------|--------------|------------|--------------|
| 790°C      | 850°C        | 830°C      | 670°C        |

## Linearni toplinski koeficijent istezanja — (brzina zagrijavanja 2,5 °C/min) Stanje: žareno

| 100<br>α (°C <sup>-1</sup> )<br>20 | 200<br>α (°C <sup>-1</sup> )<br>20 | 300<br>α (°C <sup>-1</sup> )<br>20 | 400<br>α (°C <sup>-1</sup> )<br>20 | 500<br>α (°C <sup>-1</sup> )<br>20 | 600<br>α (°C <sup>-1</sup> )<br>20 | 700<br>α (°C <sup>-1</sup> )<br>20 | 800<br>α (°C <sup>-1</sup> )<br>20 |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 9,4·10 <sup>-6</sup>               | 10,4·10 <sup>-6</sup>              | 11,1·10 <sup>-6</sup>              | 11,6·10 <sup>-6</sup>              | 11,8·10 <sup>-6</sup>              | 12,0·10 <sup>-6</sup>              | 12,5·10 <sup>-6</sup>              |                                    |

## Ms točka (orijentaciona vrijednost)

| Temp. aust.<br>za Ms | Sredstvo<br>rashladivanja | Temperatura<br>Ms |
|----------------------|---------------------------|-------------------|
| 1000°C               | ulje                      | 300°C             |
| 1000°C               | zrak                      | 280°C             |

Slika 12. :Karakteristike čelika oznake Č. 4172 [ 10 ]

# Č. 4172

(Prokron 3)

Kaljenje:

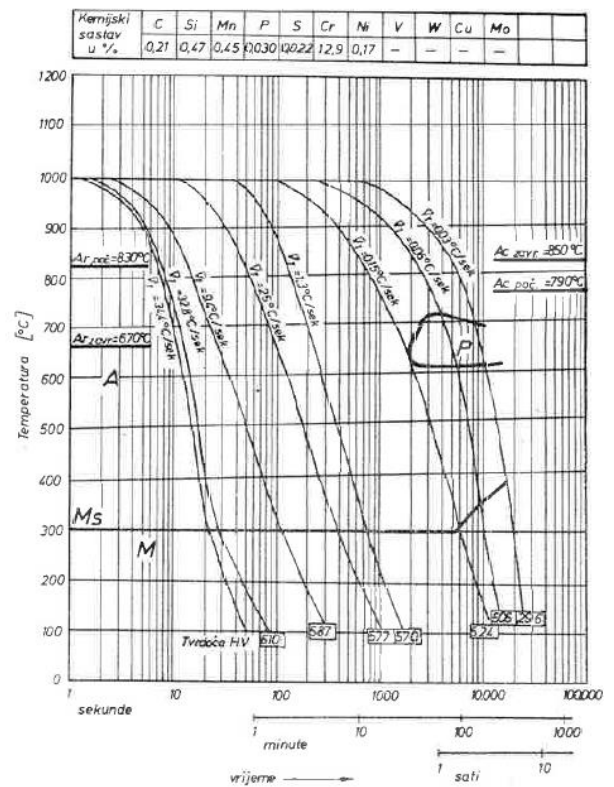
| Temperatura | Sredstvo      | Tvrdoća kaljene probé Ø 20 mm |
|-------------|---------------|-------------------------------|
| 950—1020°C  | zrak ili ulje | 44—53 HRC                     |

Popuštanje:

(Prema dijagramu popuštanja)

| Temperatura | Radna tvrdoća alata |
|-------------|---------------------|
| 150—450°C   | 52—44 HRC           |

TTT — dijagram



Č.4172 ŽR Prokron-3  
Austenitizacija 1000°C  
20min

Slika 13. :Parametri kaljenja i popuštanja za čelik Č. 4172 [ 10 ]

Tablica 2. : Korozijski postojani martenzitni čelici [ 4 ]

| Oznaka čelika      |       | Sastav %     | Tvrdća u sferoidizacijskom žarenju, HB | Toplinska obrada                            |                         |                                       | Mehanička svojstva nakon popuštanja |  |                          |
|--------------------|-------|--------------|--|---|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------|
| EN                 | HRN   |              |  | Austenitizacija, $\Theta_a, ^\circ\text{C}$ | Gašenje * HRC $\approx$ | Popuštanje $\Theta_p, ^\circ\text{C}$ | R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup>  | R <sub>p0,2</sub> N/mm <sup>2</sup> , min. | A <sub>5</sub> , %, min. |
| X20Cr13            | Č4172 | -            | ≤220                                   | 980...1030                                  | z, u<br>47              | 650...750                             | 800...650                           | 400  | 18                       |
| X20CrMo13          | -     | 1...1,3 Mo   | ≤265                                   | 950...1000                                  | u<br>47                 | 650...750                             | 900...750                           | 550  | 14                       |
| X22CrNi17          | Č4570 | 1,5...2,5 Ni | ≤275                                   | 1000...1050                                 | u<br>47                 | 630...720                             | 950...800                           | 600  | 14                       |
| X30Cr13            | Č4173 | -            | ≤245                                   | 980...1030                                  | u, z                    | 640...740                             | 1000...800                          | ≤500                                       | 11                       |
| X36CrMo17 (alatni) | -     | 1...1,3 Mo   | ≤250                                   | 1000...1030                                 | u<br>49                 | 650...750                             | 950...800                           | 600  | 14                       |

\*gašenje na z...zrak  
u...ulje

Tablica 3. : Primjena martenzitnih čelika

| Čelik                | Primjena  |
|----------------------|---|
| X20 Cr 13 (Č4172)    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• kirurški instrumenti</li> <li>• pribor za jelo: vilice, žlice,...</li> <li>• strojni dijelovi: osovine, turbinske lopatice, ventilni stošci</li> </ul> |
| X20 CrMo 13          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• isto kao Č4172, ali za radne temperature do 500°C</li> <li>• toplinske napregnute opruge</li> </ul>  |
| X22 CrNi 17 (Č4570)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• osovine, ventili, dijelovi pumpa</li> <li>• u industriji papira</li> <li>• za dijelove kompresora</li> </ul>   |
| X30 Cr13 (Č4173)     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• opruge</li> <li>• vijci (za radu u agresivnoj atmosferi)</li> <li>• mjerni alat</li> </ul>   |
| X36 CrMo 17 (alatni) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• kirurški rezni alat</li> <li>• zubarski alat</li> <li>• dijelovi kalupa za preradu polimera</li> </ul>   |

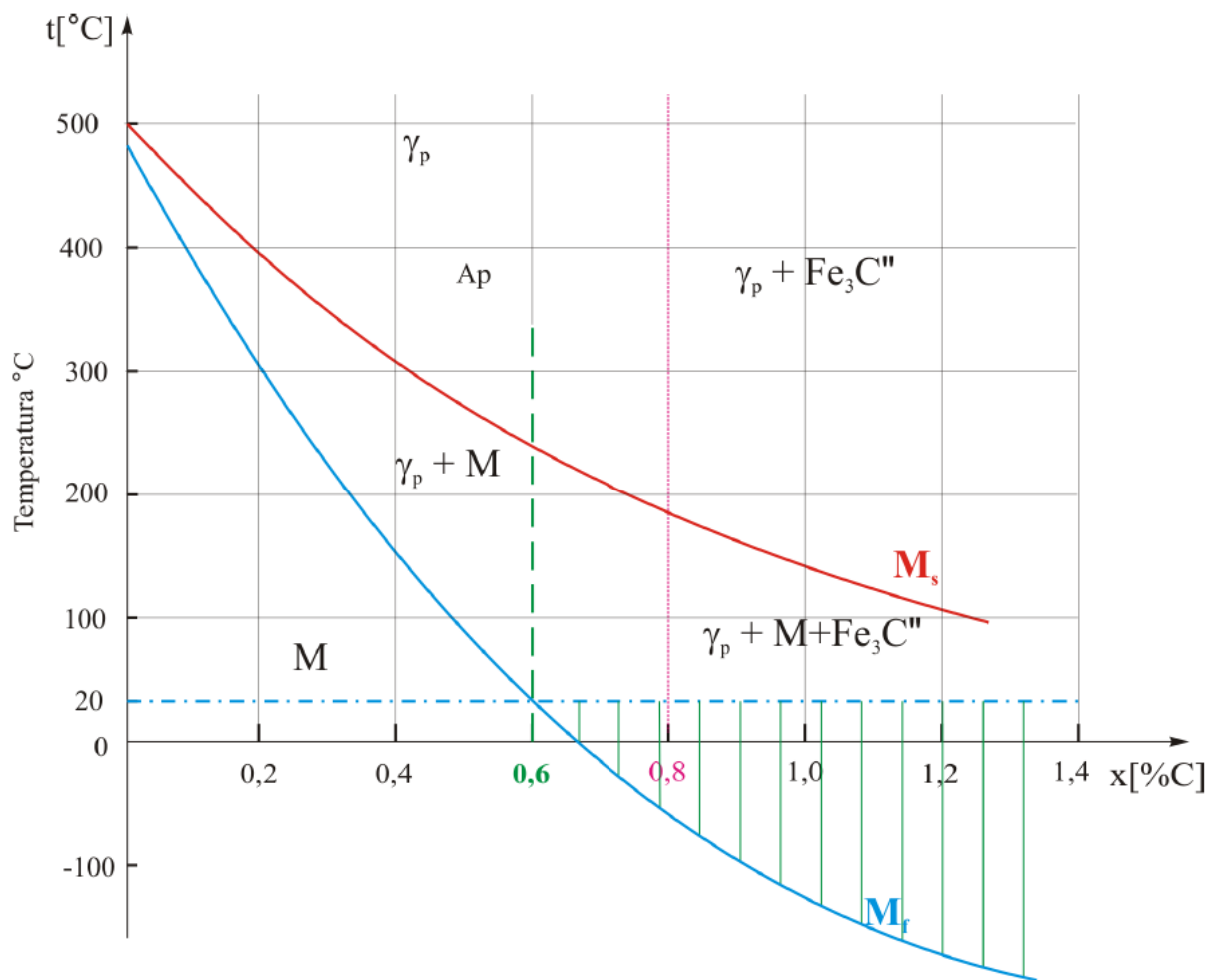


### 4.3 Martenzitna pretvorba

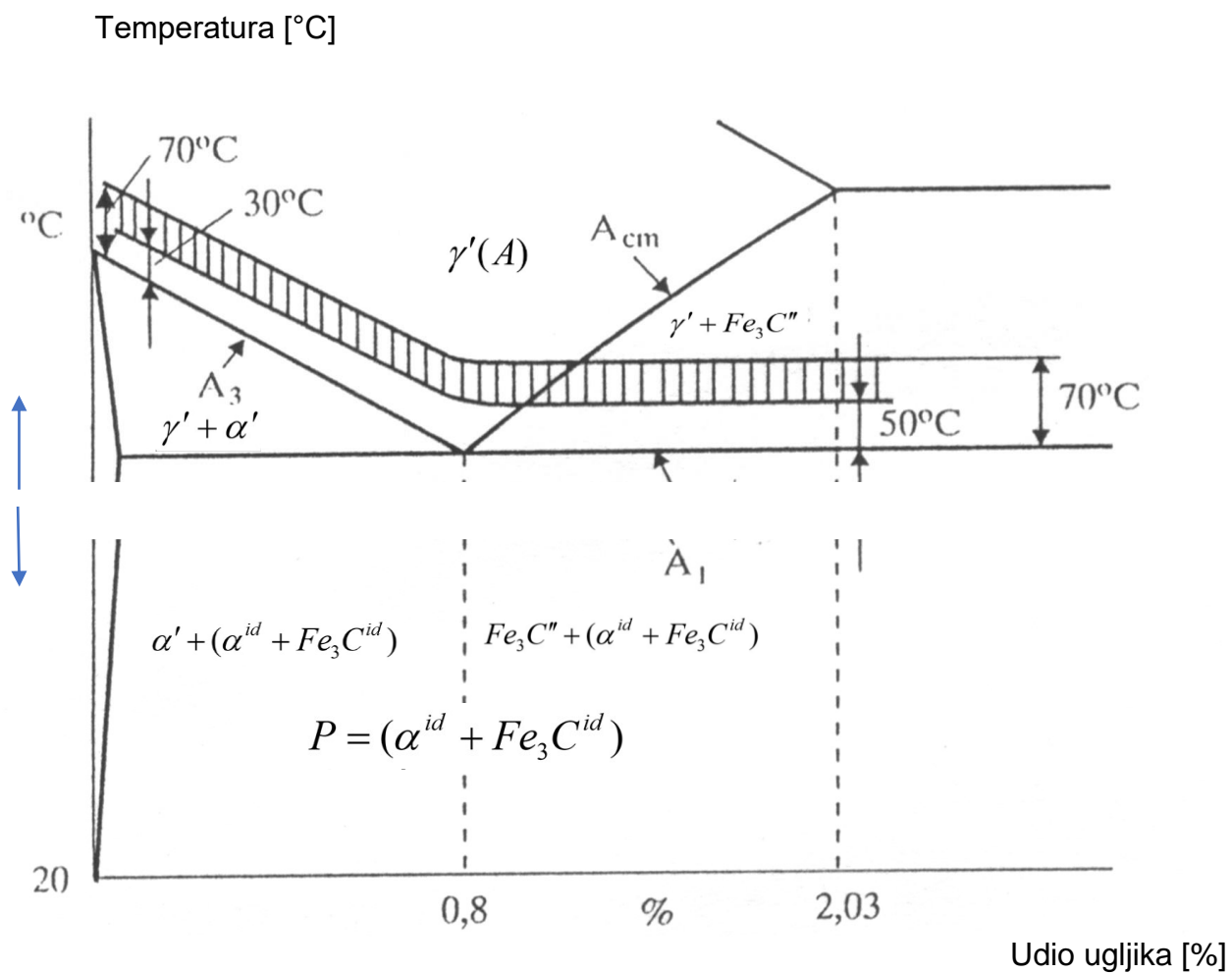
Martenzitna pretvorba se ne provodi do kraja. Kod čelika sa većim sadržajem ugljika i kod legiranih elemenata, odnosno kod čelika čija je temperatura  $M_s$  niža od  $+20^\circ\text{C}$ , zaostaje određena količina austenita. Zaostali austenit smanjuje tvrdoću, čvrstoću i otežava obradivost brušenjem. Kako bi se eliminirao zaostali austenit i postigla približno martenzitna struktura provodi se toplinska obrada na temperaturama ispod  $0^\circ\text{C}$ . Čelik treba hladiti u sredstvima koja imaju nižu temperaturu nego što je temperatura završetka stvaranja martenzitne strukture kao npr. suhi led, tekući dušik, smjesa alkohola). Takva obrada se zove duboko pothlađivanje.

Ugrijavanjem na neku temperaturu između  $A_1$  i  $A_3$  za padeutektoidni čelik, postiže se stanje austenita i ferita. Gašenjem dolazi do pretvorbe pothlađenog austenita u martenzit, pa se takva kaljena mikrostruktura austenitiziranog čelika sastoji od martenzita i ferita. Ugrijavanjem na temperaturu od  $50^\circ\text{C}$  do  $70^\circ\text{C}$  iznad  $A_1$  za nadeutektoidni čelik dovodi čelik u stanje austenita i sekundarnog cementita. Gašenjem dolazi do pretvorbe pothlađenog austenita u martenzit, a jedan dio austenita ostaje zatvoren jer nije dostignuta temperatura završetka pretvorbe austenita u martenzit. Detaljan prikaz austenitizacije čelika prikazan je na slici 15.

Povećanjem brzine hlađenja austenitiziranog čelika temperature potiskuju se prema nižim temperaturama, odnosno temperature  $A_3$ ,  $A_1$  i  $A_{cm}$  prelaze u jednu krivulju  $M_s$  (početak stvaranja martenzitne transformacije). Ako se čelik austenitne strukture dovoljno brzo hladi, austenit će ostati postojan sve do sjecišta pripadajuće koncentracije čelika s krivuljom  $M_s$ . i tek će tada početi transformacija u martenzit. Austenit, postojan između  $A_3$  i  $M_s$ , odnosno između  $A_{cm}$  i  $M_s$  temperatura, naziva se pothlađeni austenit –  $\gamma_p$ . Do transformacije pothlađenog austenita u martenzit, konačno dolazi u određenom temperaturnom intervalu, odnosno ispod  $M_s$  temperature. Temperatura na kojoj završava transformacija austenita naziva se  $M_f$  (završetak stvaranja martenzita). Dijagram koji predstavljaju  $M_s$  i  $M_f$  krivulje naziva se Uptonov dijagram prikazan na slici 14.



Slika 14. : Uptnov dijagram



Slika 15. : Područje optimalnih temperatura austenitizacije za kaljenje ugljičnih čelik [ 1 ]

#### 4.4 Mekomartenzitni čelici

Skupina mekomartenzitnih čelika zbog sniženog udjela ugljika utječe na povišenje prokaljivosti do otpornosti na popuštanje i na visoku radnu temperaturu. Sadrži <0,1% C, 13 do 18% Cr, 1 do 6% Ni i 0 do 3% Mo. Mekomartenzitni čelici sa svojim realnim postotkom ugljika od 0,03 do 0,05%, postiže mehanička, fizikalna i kemijska svojstva austenitizacijom pri 950°C do 1050°C, gašenjem na zraku ili ulju, te popuštanju pri temperaturama od 450°C do 600°C.

Svojstva mekomartenzitnih čelika:

- pripadaju među visokočvrste čelike – njihova granica razvlačenja  $R_{p0,2}$  iznosi do 1000 N/mm<sup>2</sup>,
- postojani na opću koroziju, ali slabi su na jamičastu koroziju.

Primjenjuju se za dijelove strojeva, za dijelove izložene agresiji nečistog zraka (npr. u zrakoplovstvu), agresiji slane atmosfere. Primjenjivat će se za turbine, vijke u proizvodnji papira, za dijelove pumpa (rotori, osovine, lopatice).

Tablica 4. Korozijski postojani mekomartenzitni čelici [ 4 ]

| Oznaka čelika<br>EN | Sastav<br>% | Gašenje             |          | Popuštanje             |          | R <sub>p0,2</sub><br>N/mm <sup>2</sup> |
|---------------------|-------------|---------------------|----------|------------------------|----------|--|
|                     |             | Θ <sub>a</sub> , °C | Sredstvo | Θ <sub>p</sub> ,<br>°C | tp,<br>h |  |
| X5CrNi13 14         | ≤0,7 Mo     | 900...1000          | zrak     | 450                    | 2        | 900                                    |
|                     |             |                     |          | 530                    | 8        | 850                                    |
|                     |             |                     |          | 600                    | 8        | 600                                    |
| X3CrNi13 4          | ≤1,0, Mo    | 950...1050          | zrak     | 680                    | 2        | 750                                    |
| X5CrNi 13 6         | -           | 950...1050          | zrak     | 530                    | 8        | 850                                    |
|                     |             |                     |          | 600                    | 8        | 600                                    |
| X3CrNiMo 14 5       | 2,3 Mo      | 950...1050          | zrak     | 450                    | 2        | 990                                    |
|                     |             |                     |          | 500                    | 2        | 100                                    |
|                     |             |                     |          | 600                    | 2        | 800                                    |
| X4CrNiMo 16 5       | 1,0 Mo      | 1000                | zrak     | 450                    | 2        | 980                                    |
|                     |             |                     |          | 500                    | 2        | 1020                                   |
|                     |             |                     |          | 620                    | 2        | 580                                    |

#### 4.5 Martenzitno – fritni čelici

Martenzitno – feritni čelici sadrže do 0,2% ugljika, 13 do 17 % kroma. Prikladni su za poboljšavanje i kaljenje s visokim popuštanjem. Imaju bolju čvrstoću, tvrdoću i otporniji su na mehanička trošenja, ali zato imaju nižu korozijsku postojanost. Karakterizira ih feritno – karbidna struktura u žarenom stanju, feritno – martenzitna nakon gašenja s oko 1000°C i feritno- austenitna struktura pri 1000°C. Postojani su na vlažan zrak, vodenu paru i vodu, pa se stoga primjenjuju za dijelove vodnih turbina, strojne dijelove u proizvodnji dušične kiseline, te za pribor za jelo. Vrste martenzitno feritnih čelika: X10 Cr 13 (Č4170), X15 Cr13 (Č4171), X7 CrAl 13, ...

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu zadatka provedena su tri različita ispitivanja: ispitivanje vlačne čvrstoće, udarnog rada loma i tvrdoće na materijalu EN oznake X20Cr13 ili HRN oznake Č4172. Ispitivanja su se provodila u laboratoriju na Veleučilištu u Karlovcu.

### 5.1 Ispitivani materijal

Ispitivani materijal X20Cr13 je u poboljšanom stanju, te kemijski sastav naveden je u tablici.

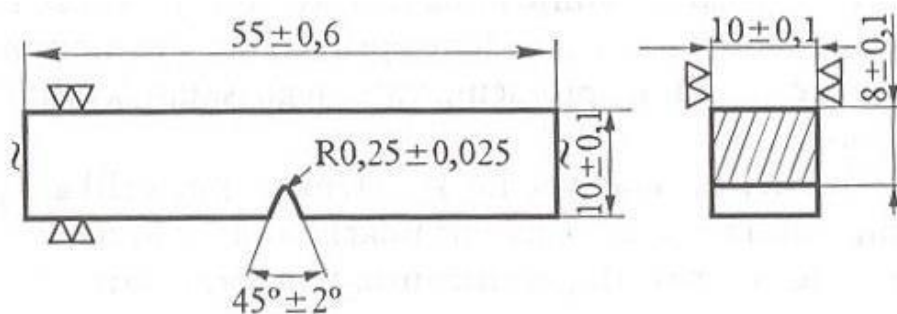
Tablica 5. : Kemijski sastav materijala X20Cr13

| Fe, % | C, %  | Si, % | Mn, % | P, %  | S, %  | Cr, % | Mo, % | Ni, % | V, %  | Nb, % | Cu, % |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 85,85 | 0,236 | 0,352 | 0,683 | 0,044 | 0,023 | 11,97 | 0,125 | 0,299 | 0,053 | 0,07  | 0,195 |

## 5.2 Ispitivanje udarnog rada loma

Za ispitivanje udarnog rada loma koristi se Charpyjev bat. Provodi se sa ciljem utvrđivanja udarnog opterećenja, a iznos udarnog rada loma je pokazatelj žilavosti ili krhkosti materijala s utorom. Ispitni uzorak se opterećuje udarcem brida bata, po sredini uzorka, nasuprot uzorku.

Ispitivanje se provodilo na pet uzoraka, odnosno epruveta kvadratnog presjeka s dimenzijama 10 x 10 x 55mm i V utorom.



Slika 16. : Oblik i dimenzije epruveta za ispitivanje udarnog rada loma



Slika 17. : Prikaz Charpyje bata





Slika 18. : Prikaz uzorka prije ispitivanja udarnog rada loma

## 5.2.1 Rezultati udarnog rada loma

Tablica 6. : Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

| Uzorak      | Izmjerena udarnog rada loma, KV, J |
|-------------|------------------------------------|
| 1           | 16,0                               |
| 2           | 17,0                               |
| 3           | 15,0                               |
| 4           | 12,50                              |
| 5           | 15                                 |
| $\Sigma$ KV | 75,50                              |

Prema izmjenom udarnog rada loma može se izračunati aritmetička sredina:

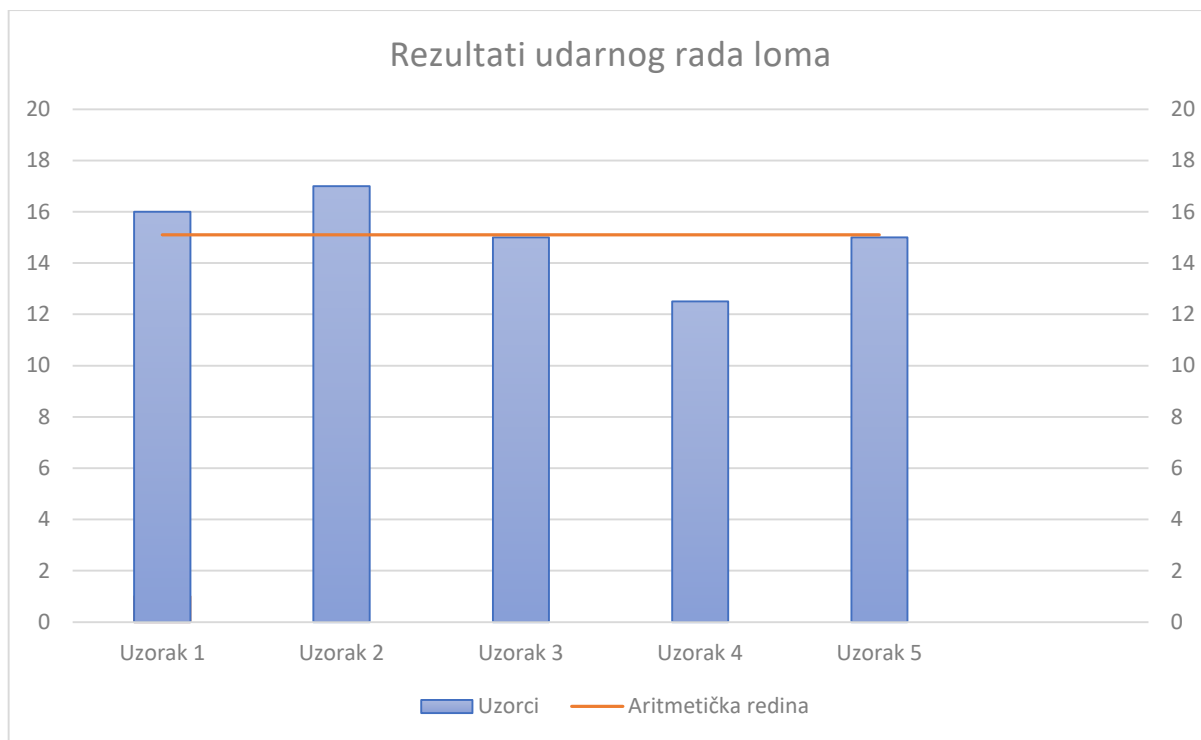
$$X = \frac{\Sigma KV}{br. uzoraka} = 15,1 J \quad (1)$$

Standardna devijacija:

$$s = \sqrt{\frac{(uzorak_1 - x)^2 + (uzorak_2 - x)^2 + (uzorak_3 - x)^2 + (uzorak_4 - x)^2 + (uzorak_5 - x)^2}{n}} \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{(16,0 - 15,1)^2 + (17,0 - 15,1)^2 + (15,0 - 15,1)^2 + (12,50 - 15,1)^2 + (15 - 15,1)^2}{5}} \quad (3)$$

$$s = 1,50 J \quad (4)$$



Slika 19. : Dijagram analize udarnog rada loma



Slika 20. : Prikaz uzoraka nakon provedenog ispitivanja udarnog rada loma

### 5.3 Ispitivanje tvrdoće

Samo ispitivanje se provodi na tvrdomjeru. Tvrdomjer je uređaj pomoću kojeg se ispituje tvrdoća materijala prilikom prodiranja znatno tvrdog materijala.

Za ispitivanje tvrdoće koristila se metoda po Brinellu. Napravljena su tri mjerenja iz prethodnog navedenih uzoraka.



Slika 21. : Mjerenje tvrdoće

Tablica 7. : Parametri ispitivanja tvrdoće po Brinellu

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| Sila utiskivanja $F$ , $N$     | 1893 |
| Promjer kuglice $\phi$ ,<br>mm | 2,5  |
| Vrijeme utiskivanja $t$ ,<br>s | 20   |

### 5.3.1 Rezultati ispitivanja tvrdoće

Tablica 8. : Rezultati ispitivanja tvrdoće po Brinellu

| Izmjerena tvrdoća, HB |            |            |
|-----------------------|------------|------------|
| Mjerenje 1            | Mjerenje 2 | Mjerenje 3 |
| 272                   | 278        | 278        |

Izračun aritmetičke sredine za tvrdoću prema Brinellu:

( 5 )

$$X = \frac{\Sigma \text{ izmjerenih tvrdoća}}{\text{br. uzoraka}} = \frac{828}{3} = 276HB$$

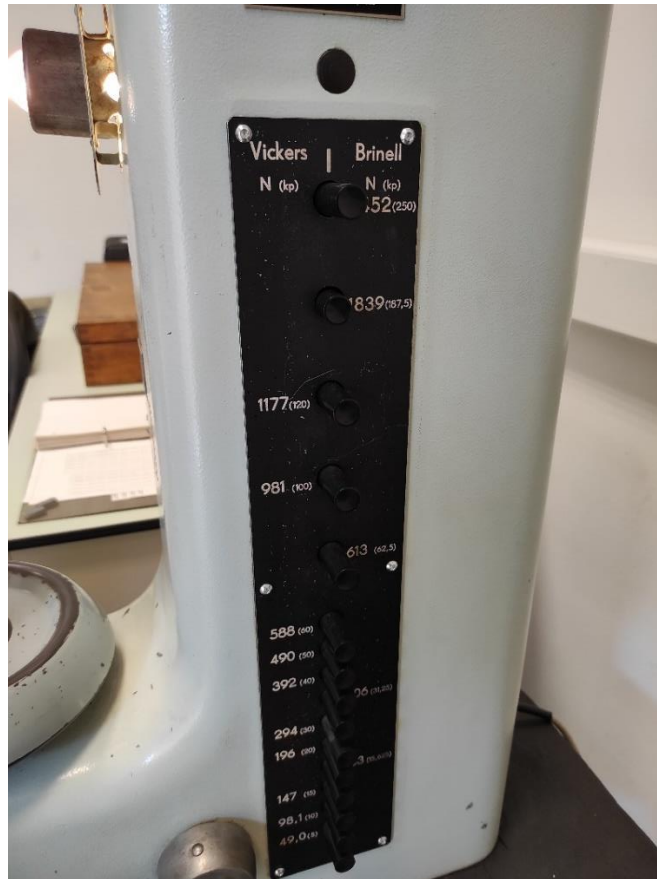
Standardna devijacija:

( 6 )

$$s = \sqrt{\frac{(\text{mjerenje}_1 - x)^2 + (\text{mjerenje}_2 - x)^2 + (\text{mjerenje}_3 - x)^2}{n}}$$

( 7 )

$$s = \sqrt{\frac{(272 - 276)^2 + (278 - 276)^2 + (278 - 276)^2}{3}} = 2,80 HB$$



Slika 22. : Skala tvrdoće po Vickersu i Brinellu

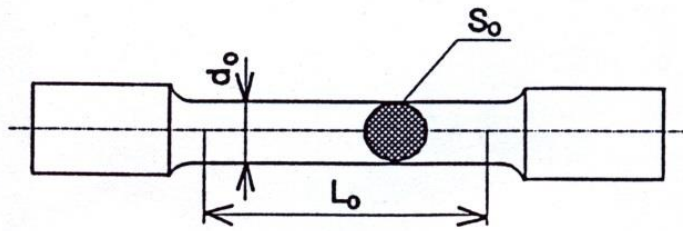
## 5.4 Ispitivanje vlačne čvrstoće

Statičko vlačno ispitivanje čvrstoće se provodi u svrhu ponašanja materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja. Uređaj kojim se mjeri vlačna čvrstoća naziva se kidalica ili univerzalna ispitivalica. Uređaj na kojem je provedeno ispitivanje je Otto Wolpert Werke, tip U60, 1953.godine. Ima svoje mjerno područje do 600kN. Osim mjerenja vlačne čvrstoće, može mjeriti i tlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja, istezanja i kontrakcije.

U ovom dijelu ispitivalo se pet epruveta. Epruvete su okruglog presjeka sa istom početnom mjernom duljinom. Mjerena su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, istezljivost, te produženje. Standardne mjere označavanja vlačne epruvete okruglog presjeka s promjerom epruvete  $d_0 = 10$  mm i početnom mjernom duljinom epruvete  $L_0 = 50$  mm prikazano je tablicom.

Tablica 9. : Standardne mjere za označavanje okruglih epruveta vlačnog ispitivanja

| Promjer epruvete<br>$d_0$ | Metrički navoj<br>$d_1$ | Najmanji polumjer unutarnjeg navoja | Visina glave epruvete<br>$h$ | Kratka proporcionalna epruveta           |                         |                                  | Dulja proporcionalna epruveta            |                         |                                  |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|
|                           |                         |                                     |                              | Početna mjerna duljina epruvete<br>$L_0$ | Probna duljina<br>$L_v$ | Ukupna duljina epruvete<br>$L_t$ | Početna mjerna duljina epruvete<br>$L_0$ | Probna duljina<br>$L_v$ | Ukupna duljina epruvete<br>$L_t$ |
|                           |                         |                                     |                              | <b>8</b>                                 | M12                     | 9,33                             | 10                                       | <b>40</b>               | 48                               |
| <b>10</b>                 | M16                     | 13,00                               | 12                           | <b>50</b>                                | 60                      | 90                               | <b>100</b>                               | 110                     | 140                              |
| <b>12</b>                 | M18                     | 14,35                               | 15                           | <b>60</b>                                | 72                      | 110                              | <b>120</b>                               | 132                     | 170                              |



Slika 23. : Presjek okrugle epruvete



Slika 24. : Prikaz epruvete prije ispitivanja vlačne čvrstoće



#### 5.4.1 Rezultati vlačne čvrstoće

Tablica 10. : Rezultati dobiveni ispitivanjem vlačne čvrstoće

| Epruvete | Promjer epruvete $\phi$ , mm | Površina $S_0$ , mm <sup>2</sup> | Granica razvlačenja Fe, Re | Vlačna čvrstoća Fm, Rm, | Izduženje A | Kontrakcija Z |
|----------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------|---------------|
| 1        | 10                           | 78,53                            | 56000 N                    | 65000 N                 | 58,48 mm    | 6,15 mm       |
|          | Izračunata vrijednost:       |                                  | 713 N/mm <sup>2</sup>      | 828 N/mm <sup>2</sup>   | 16,9 %      | 62,1 %        |
| 2        | 10,05                        | 79,32                            | 55000 N                    | 65000 N                 | 57,95 mm    | 6,10 mm       |
|          | Izračunata vrijednost:       |                                  | 693 N/mm <sup>2</sup>      | 819 N/mm <sup>2</sup>   | 15,9 %      | 63,1 %        |
| 3        | 10,05                        | 79,32                            | 57500 N                    | 65500 N                 | 58,76 mm    | 6,74 mm       |
|          | Izračunata vrijednost:       |                                  | 725 N/mm <sup>2</sup>      | 826 N/mm <sup>2</sup>   | 17,5 %      | 55,0 %        |
| 4        | 9,92                         | 77,28                            | 58000 N                    | 64000 N                 | 59,86 mm    | 6,05 mm       |
|          | Izračunata vrijednost:       |                                  | 751 N/mm <sup>2</sup>      | 828 N/mm <sup>2</sup>   | 19,7 %      | 62,8 %        |
| 5        | 9,85                         | 76,20                            | 55000 N                    | 63000 N                 | 58,87 mm    | 6,02 mm       |
|          | Izračunata vrijednost:       |                                  | 722 N/mm <sup>2</sup>      | 827 N/mm <sup>2</sup>   | 17,7 %      | 62,6 %        |

Izračun aritmetičke sredine za izračunate vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće:

( 8 )

$$\Sigma Re = \text{epruveta 1} + \text{epruveta 2} + \text{epruveta 3} + \text{epruveta 4} + \text{epruveta 5} = 3604 \text{ N/mm}^2$$

( 9 )

$$X_{Re} = \frac{\Sigma Re}{Uk. broj eruveta} = \frac{3604}{5} = 720,80 \text{ N/mm}^2$$

( 10 )

$$\Sigma Rm = epruveta 1 + epruveta 2 + epruveta 3 + epruveta 4 + epruveta 5 = 4128 \text{ N/mm}^2$$

( 11 )

$$X_{Rm} = \frac{\Sigma Rm}{Uk. broj epruveta} = \frac{4128}{5} = 825,60 \text{ N/mm}^2$$

Standardna devijacija za granicu razvlačenja  $R_e$  :

( 12 )

$$s_{Re} =$$

( 13 )

$$= \sqrt{\frac{(epruveta_1 - X_{Re})^2 + (epruveta_2 - X_{Re})^2 + (epruveta_2 - X_{Re})^2 + (epruveta_3 - X_{Re})^2 + (epruveta_4 - X_{Re})^2 + (epruveta_5 - X_{Re})^2}{n}}$$

( 14 )

$$s_{Re} = 18,79 \text{ N/mm}^2$$

Standardna devijacija za vlačnu čvrstoću  $R_m$  :

( 15 )

$$s_{Rm} =$$

( 16 )

$$= \sqrt{\frac{(epruveta_1 - X_{Rm})^2 + (epruveta_2 - X_{Rm})^2 + (epruveta_3 - X_{Rm})^2 + (epruveta_4 - X_{Rm})^2 + (epruveta_5 - X_{Rm})^2}{n}}$$

( 17 )

$$s_{Rm} = 3,38 \text{ N/mm}^2$$

Formule za izračun vrijednosti:

- Površina epruvete  $S_0$  [ $mm^2$ ] :

( 18 )

$$\frac{D^2 \times \pi}{4}$$

- Granica razvlačenja  $Re$  [ $N/mm^2$ ] :

( 19 )

$$\frac{Fe}{S_0}$$

- Vlačna čvrstoća  $Rm$  [ $N/mm^2$ ] :

( 20 )

$$\frac{Fm}{S_0}$$

- Izduženje  $A$  [%] :

( 21 )

$$\frac{Luk - L_0}{L_0} \times 100$$

- Kontrakcija  $Z$  [%] :

( 22 )

$$\frac{S_0 - s_0}{S_0} \times 10$$



Slika 25. : Postavljanje epruvete u čeljust kidalice



Slika 26. : Mjerenje sile  $F_m$  i  $R_m$



Slika 27. : Epruveta nakon loma



Slika 28. : Prikaz epruveta nakon provedenog statičkog vlačnog ispitivanja

## 5.6 Metalografsko ispitivanje

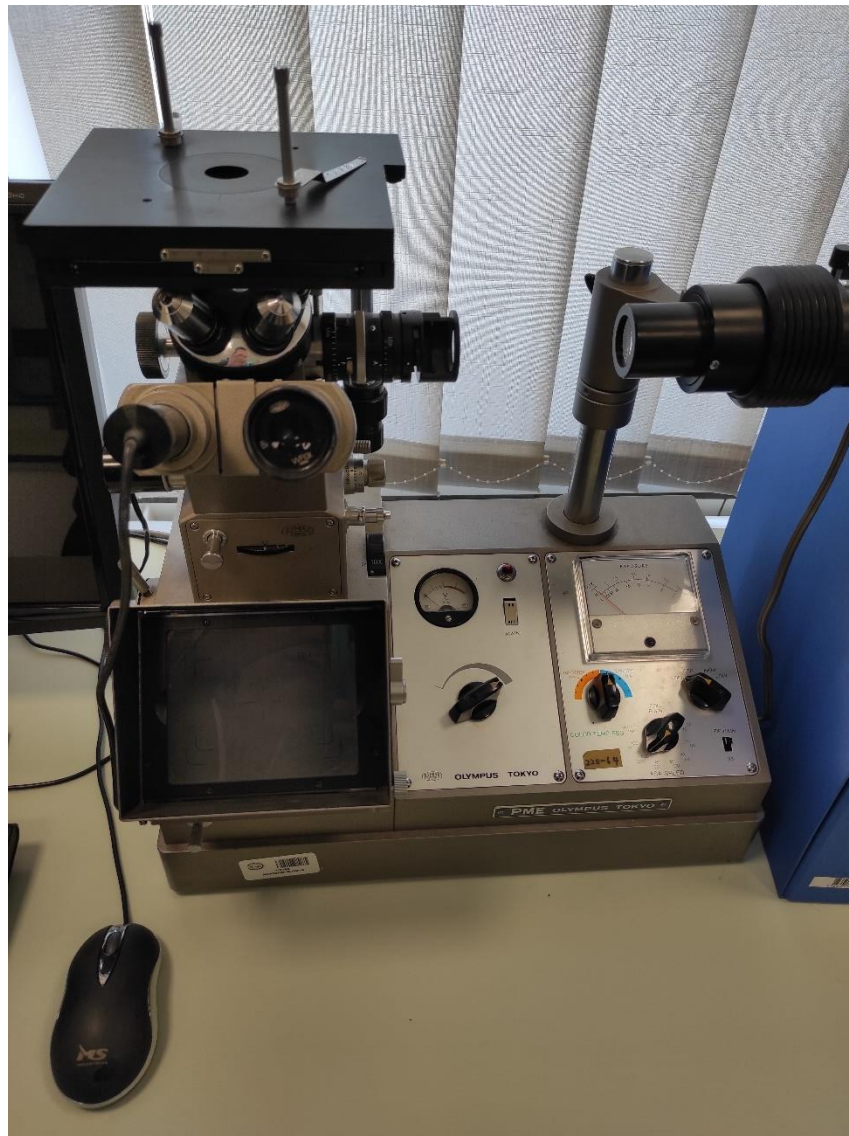
Metalografija se bavi istraživanjem strukture metala i legure pomoću svjetlosnog i elektronskog mikroskopa. Razlikuje se makrostruktura koja je vidljiva golim okom ili uz malo povećanje i mikrostruktura koja zahtjeva povećanje pomoću mikroskopa.

Priprema uzoraka za metalografsko ispitivanje:

1. Izrezivanje uzoraka,
2. Brušenje,
3. Umetanje malih uzoraka u smolu,
4. Fino brušenje,
5. Poliranje,
6. Odmašćivanje,
7. Nagrizanje površine uzorka,
8. Ispitivanje uzorka,
9. Sušenje.

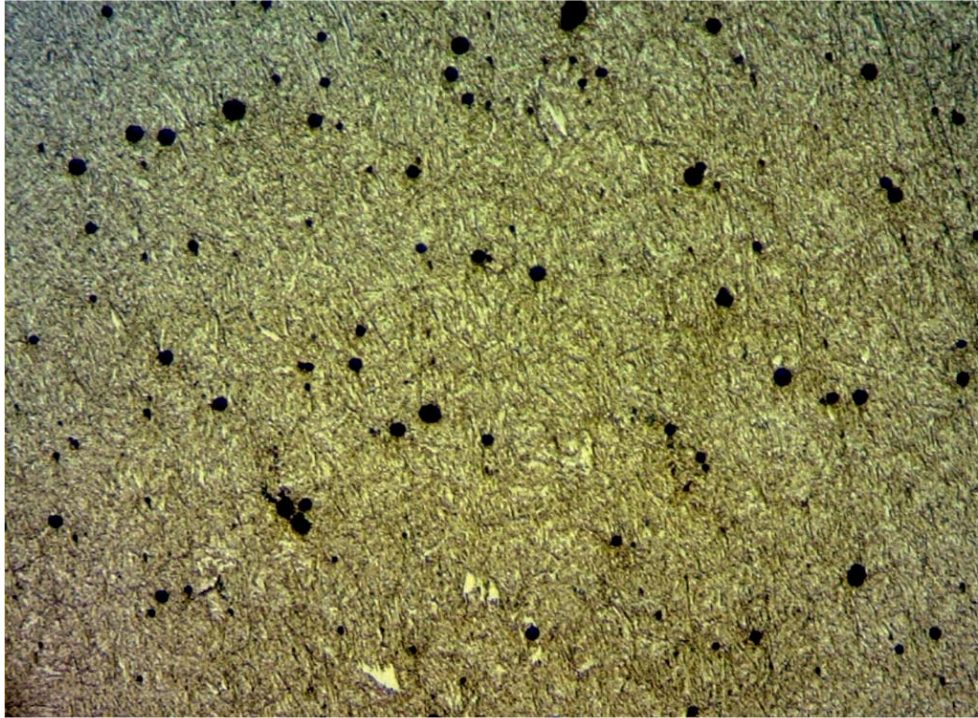


Slika 29. : Uređaj za brušenje i poliranje



Slika 30. : Svjetlosni metalografski mikroskop

Nakon pripreme uzorka za metalografsko ispitivanje prikazana je slika mikrostrukture ispitnog materijala X20Cr13.



Slika 31. : Mikrostruktura ispitnog materijala X20 Cr13 pri povećanju 200 x

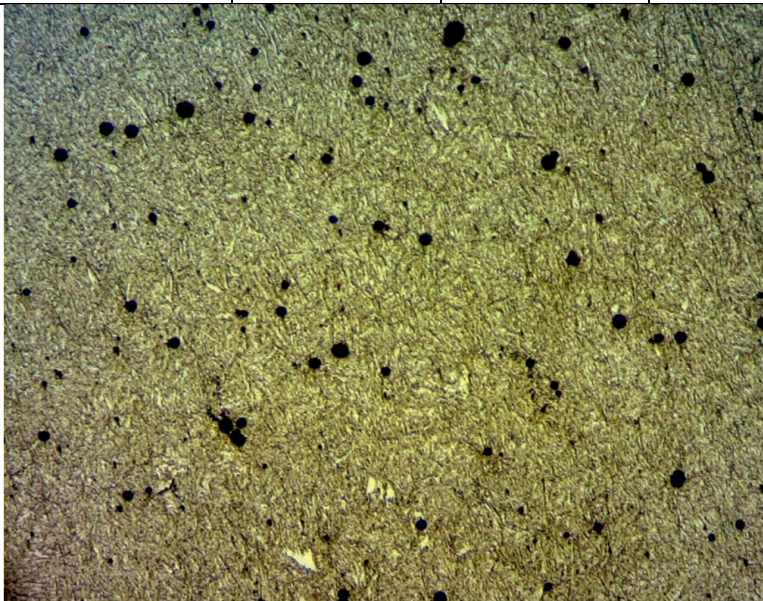


## 5.7 Analiza rezultata

Na prethodnim poglavljima vidljiva je analiza i statistička obrada što je sumarno dato u tablici 11.

Tablica 11. : Analiza rezultata

|                       | Udarni rad loma, KV, <i>J</i> | Tvrdoća, HB | Vlačna čvrstoća $R_m$ , <i>N/mm<sup>2</sup></i> |
|-----------------------|-------------------------------|-------------|---|
| Br. uzoraka           | 5                             | 3           | 5   |
| Aritmetička sredina   | 15,1                          | 276         | 825,60  |
| Standardna devijacija | 1,50                          | 2,80        | 3,38  |

A micrograph showing a needle-like martensitic microstructure. The image displays a dense field of fine, dark, needle-shaped features (martensite) distributed throughout a lighter, textured matrix. The needles are oriented in various directions, creating a complex, interlocking pattern. The overall appearance is characteristic of a high-carbon steel or alloy after quenching.

Prikazana je igličasta martenzitna mikrostruktura pri povećanju 200 x.

## 6. ZAKLJUČAK

Provedenim ispitivanjem materijala X20Cr13 u skladu sa dobivenim rezultatima može se zaključiti da izmjerene vrijednosti odgovaraju zahtijevanim vrijednostima za ispitani materijal. Također je nakon metalografskog ispitivanja vidljiva igličasta martenzitna mikrostruktura. Čelik X20Cr13 sadrži 0,2% ugljika, 13% kroma i maksimalno 1% mangana i silicija.

Osnovni uvjeti korozijski postojanih čelika je minimalno 12% kroma i monofazna mikrostruktura. Korozijski postojani čelici prema mikrostrukturi mogu biti: austenitni, feritni, superferitni, duplex čelici, martenzitni, niskougljični martenzitni, mekomartenzitni čelici.

U ovom radu ispitivana su osnovna mehanička svojstva i mikrostruktura korozijskog martenzitnog postojanog čelika. Martenzitni korozijski čelici postojani čelik koriste se za nehrđajuće alate od kojih se ne traži velika tvrdoća i otpornost na trošenje, primjenjuju se za kirurške instrumente, koji nisu namijenjeni za rezanje.

## LITERATURA

- [ 1 ] Sonički N. : *Tehnički materijali*, Veleučilište u Karlovcu, 2013.
- [ 2 ] Filetin T., Kovačiček F., Indof J. : *Svojstva i primjena materijala*, Sveučilište FSB Zagreb, 2002.
- [ 3 ] Laque F. L., Copson H. R., : *Otpornost materijala i legura na koroziju*
- [ 4 ] Novosel M., Krumes D. : *Posebni čelici*, Slavonski Brod, 1998.
- [ 5 ] Marković T. : *Korozija i zaštita materijala*, Sarajevo, 1964.
- [ 6 ] Kostadin T. : *Materijali 2*, (interna skripta Veleučilišta u Karlovcu)
- [ 7 ] Kostadin T. : *Materijali 1*, (interna skripta Veleučilišta u Karlovcu)
- [ 8 ] Božić T. : *Toplinska obrada materijala 1*, (interna skripta Veleučilišta u Karlovcu)
- [ 9 ] Kostadin T. : *Čelici i željezni ljevovi* (interna skripta Veleučilišta u Karlovcu)
- [10] Metalbiro : *Čelični materijali*, Zagreb, 1984.
- [ 11 ] Galić Iva : *Završni rad*, Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [ 12 ] Trifunović B. : *Poznavanje čelika*, 1957.