

# Karakterizacija čelika nepoznatog sastava

---

**Trupina, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:966199>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-08**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivan Trupina**

Zagreb, 2016. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor :

Dr. sc. Vera Rede

Student :

Ivan Trupina

Zagreb, 2016. godina

## **IZJAVA:**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se vlastitim znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem se svojoj mentorici dr. sc. Veri Rede na pomoći, savjetima, utrošenom vremenu i trudu, te ustupljenoj literaturi.

Zahvaljujem svojoj obitelji, djevojci i kolegama na strpljenju, povjerenju i iznimnoj podršci tijekom studiranja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **IVAN TRUPINA**

Mat. br.: 0035193982

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija čelika nepoznatog sastava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterisation of unknown steel**

Opis zadatka:

U okviru završnog rada potrebno je napraviti karakterizaciju čelika nepoznatog kemijskog sastava.

Na uzorcima izrezanim iz okrugle šipke promjera 220 mm potrebno je napraviti sljedeće:

- analizu kemijskog sastava,
- kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture,
- statičko vlačno ispitivanje,
- mjerenje tvrdoće i žilavosti.

Dobivene rezultate potrebno je analizirati i zaključiti o kojem čeliku se radi.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Rok predaje rada:

**1. rok:** 25. veljače 2016.

**2. rok (izvanredni):** 20. lipnja 2016.

**3. rok:** 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 29.2., 02. i 03.03. 2016.

**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2016.

**3. rok:** 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

**SADRŽAJ:**

POPIS SLIKA: .....	3
POPIS TABLICA:.....	5
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA : .....	6
SAŽETAK:.....	7
SUMMARY: .....	8
1.UVOD .....	9
2. KARAKTERIZACIJA ČELIKA [1, 2, 3].....	10
2.1. Analiza kemijskog sastava.....	10
2.2. Analiza mikrostrukture .....	10
2.2.1. Priprema uzorka .....	12
2.2.2. Kvalitativna i kvantitativna analiza mikrostrukture.....	14
2.2.2.1 Analiza svjetlosnim mikroskopom.....	15
2.2.2.2. Elektronska metalografija.....	16
2.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava [1, 5, 6] .....	17
2.3.1. Statičko vlačno ispitivanje .....	17
2.3.2. Ispitivanje žilavosti .....	20
2.3.3. Mjerenje tvrdoće [1,6].....	21
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	24
4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja.....	24
4.2. Materijal za ispitivanje .....	24
4.3. Analiza kemijskog sastava.....	25
4.4. Analiza mikrostrukture .....	26
4.4.1. Priprema uzorka .....	27
4.4.1.1. Izrezivanje .....	27
4.4.1.2. Zalijevanje.....	27
4.4.1.3. Brušenje.....	28

---

4.4.1.4. Poliranje .....	29
4.4.1.5. Nagrizanje .....	30
4.4.2. Analiza mikrostrukture svjetlosnim mikroskopom.....	30
4.4.2.1. Analiza u poliranom stanju .....	31
4.4.2.2. Analiza u nagriženom stanju .....	33
4.4.2.3. Određivanje veličine kristalnog zrna.....	35
4.4.2.4. Analiza mikrostrukture na elektronskom mikroskopu .....	36
4.5. Statičko vlačno ispitivanje.....	38
4.6. Ispitivanje žilavosti.....	40
4.7. Mjerenje tvrdoće materijala.....	42
5. ANALIZA REZULTATA.....	44
5.1. Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava .....	44
5.2. Osvrt na analizu mikrostrukture .....	44
5.3. Osvrt na rezultate ispitivanja mehaničkih svojstava.....	46
6. ZAKLJUČAK .....	47
7. LITERATURA.....	48
PRILOG: .....	49

**POPIS SLIKA:**

Slika 1. Shematski prikaz strukturne analize.....	11
Slika 2. Metode analize metalografske slike .....	14
Slika 3. Korelacija između veličine austenitnog zrna određenoj po ASTM-u i JK metodi .....	15
Slika 4. Refleksija svjetla koje pada na površinu i granice zrna .....	16
Slika 5. Epruveta za statičko vlačno ispitivanje kružnog poprečnog presjeka [6] .....	17
Slika 6. Tijek statičnog vlačnog ispitivanja [7] .....	18
Slika 7. Dijagram naprezanje – istezanje ( $\sigma - \epsilon$ ) [7] .....	18
Slika 8. Udarno opterećivanje epruvete na Charpyjevu batu [8] .....	20
Slika 9. Utjecaj temperature na udarnu radnju loma [9] .....	21
Slika 10. Mjerenje tvrdoće po Brinellu .....	22
Slika 11. Mjerenje tvrdoće po Vickersu .....	22
Slika 12. Shematski prikaz provedbe ispitivanja tvrdoće po HRC metodi .....	23
Slika 13. Položaj ispitnih uzoraka u vruće valjanom profilu .....	25
Slika 14. Materijal za ispitivanje kemijskog sastava i mikrostrukture .....	25
Slika 15. Optički emisijski spektrometar LECO GDS 850A .....	26
Slika 16. Pozicije uzoraka za mikrostrukturnu analizu .....	27
Slika 17. Preša za toplo zalijevanje metalografskih uzoraka .....	28
Slika 18. Uzorci zaliveni u polimernu masu .....	28
Slika 19. Brušenje uzorka.....	29
Slika 20. Poliranje uzorka .....	29
Slika 21. Metalografski uzorak nakon poliranja .....	30
Slika 22. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51 .....	30
Slika 23. Polirana površina uzorka, uzdužni presjek.....	31
Slika 24. Polirana površina uzorka, poprečni presjek .....	32
Slika 25. Uključci manganovog sulfida, uzdužni smjer .....	32
Slika 26. Nagrižena površina uzorka, uzdužni presjek .....	33
Slika 27. Nagrižena površina uzorka uz veće povećanje, uzdužni presjek .....	33
Slika 28. Nagrižena površina uzorka, poprečni presjek .....	34
Slika 29. Nagrižena površina uzorka uz veće povećanje, poprečni presjek.....	34
Slika 30. Fotografija mikrostrukture na kojoj je određena veličina zrna .....	35
Slika 31. Određivanje veličine zrna .....	35
Slika 32. Struktura uzdužnog presjeka dobivena elektronskim mikroskopom .....	36
Slika 33. Struktura poprečnog presjeka dobivena uz pomoć EDS detektora .....	37



---

Slika 34. Epruveta za statičko vlačno ispitivanje .....	38
Slika 35. Hidraulička kidalica WOLPERT .....	39
Slika 36. Izgled epruvete nakon statičko vlačnog ispitivanja .....	39
Slika 37. Charpyjev bat „Otto Wolpert-Werke GmbH“ .....	40
Slika 38. Izgled prijelomnih površina epruveta nakon udarnog opterećenja .....	41
Slika 39. Mikrotvrdomjer PMT - 3 .....	42
Slika 40. Tvrdomjer Zwick .....	43
Slika 41. Mikrostruktura sredine .....	45
Slika 42. Mikrostruktura ruba .....	45

**POPIS TABLICA:**

Tablica 1. Broj zrna po inču kvadratnom po ASTM normi .....	15
Tablica 2. Mehanička svojstva zajamčena od strane proizvođača .....	24
Tablica 3. Kemijski sastav materijala.....	26
Tablica 4. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje .....	38
Tablica 5. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja i dimenzije epruvete nakon ispitivanja.....	39
Tablica 6. Rezultati ispitivanja žilavosti .....	41
Tablica 7. Vrijednost mikrotvrdoće HV,02.....	42
Tablica 8. Vrijednosti makrotvrdoće HV10 .....	43
Tablica 9. Usporedba mehaničkih svojstava čelika 42CrMo4 .....	46

**POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA :**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
ASTM		veličina zrna po američkoj ASTM normi
JK		veličina zrna po Jernkontorentovoj normi
$d_0$	[mm]	početni promjer epruvete
$L_0$	[mm]	početna mjerna duljina epruvete
$S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	početna površina poprečnog presjeka
$S_k$	[mm <sup>2</sup> ]	krajnja površina poprečnog presjeka
$d_k$	[mm]	konačni promjer epruvete
$L_k$	[mm]	konačna mjerna duljina epruvete
$E$	[N/mm <sup>2</sup> ]	modul elastičnosti
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	naprezanje
$F$	[N]	sila
$F_e$	[N]	sila razvlačenja
$F_m$	[N]	maksimalna sila
$F_k$	[N]	konačna sila
$\Delta L$	[mm]	produljenje
$\varepsilon_u$	[mm/mm]	istezanje
$\varepsilon_u$	[N/mm <sup>2</sup> ]	konačno istezanje
$R_e$	[N/mm <sup>2</sup> ]	granica razvlačenja
$R_{p0,2}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	konvencionalna granica razvlačenja
$R_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	vlačna čvrstoća
$R_k$	[N/mm <sup>2</sup> ]	konačno naprezanje
$A$	[%]	istezljivost
$K$	[%]	kontrakcija ili relativno suženje poprečnog presjeka
KV	[J]	žilavost
$\vartheta_p$	[°C]	prijelazna temperatura
HB		tvrdoća po Brinellu
HV		tvrdoća po Vickersu
HRC		tvrdoća po Rockwellu

**SAŽETAK:**

Cilj ovog rada je napraviti karakterizaciju vruće valjane, okrugle čelične šipke nepoznatog sastava kako bi se ocijenila kvaliteta materijala i njegova moguća primjena.

Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu opisana je analiza kemijskog sastava, kvalitativna i kvantitativna analiza mikrostrukture te opis metode za određivanje mehaničkih svojstava materijala.

U eksperimentalnom dijelu prikazani su rezultati ispitivanja dobiveni analizom kemijskog sastava, kvalitativnom i kvantitativnom analizom mikrostrukture, statičkim vlačnim ispitivanjem, mjerenjem udarne radnje loma na Charpy-jevom batu i mjerenjem tvrdoće po Vickersu.

Rezultati analize kemijskog sastava pokazali su da je analizirani materijal po sastavu najbliži čeliku oznake 42CrMo4, odnosno niskolegiranom Cr–Mo čeliku za poboljšavanje.

Mikrostruktura analiziranog čelika je potpuno martenzitna, a veličina kristalnih zrna je oko 7.

Izmjerene vrijednosti za vlačnu čvrstoću i istežljivost su u granicama koje za čelik 42CrMo4 u popuštenom stanju propisuje norma EN 10083-3:2006. Vrijednosti ostalih mehaničkih svojstava ne zadovoljavaju propise norme. Navedena norma propisuje tehničke uvjete isporuke za niskolegirane čelike za kaljenje i popuštanje.

S obzirom da je kemijski sastav u propisanim granicama, pretpostavlja se da su loša mehanička svojstava posljedica neodgovarajuće toplinske obrade čelika.

**KLJUČNE RIJEČI :** karakterizacija materijala, kemijski sastav, mikrostruktura, svojstva

**SUMMARY:**

The aim of this paper is to make a characterization of hot rolled, round steel bar of unknown composition that we could rate the quality of material and possibly its possible application.

The work consists of theoretical and experimental part.

In the theoretical part, the analysis of chemical composition, qualitative and quantitative analysis of the microstructure and the methods for determining the mechanical properties of materials, are described.

The experimental part presents the results of tests obtained by analyzing the chemical composition, qualitative and quantitative analysis of the microstructure, static tensile testing, measuring fracture tendency to Charpy-ement piston and measuring the hardness by Vickers.

Results of the analysis of the chemical composition showed that analyzed material in its composition is closest to 42CrMo4 steel or to low alloyed Cr-Mo steel for quenching and tempering.

The microstructure of analyzed steel is fully martensitic, and the size of crystal grains is about seven.

The measured values for tensile strength and elongation are within the limits for the 42CrMo4 steel in tempered condition which is provided by the standard EN 10083-3: 2006. The values of other mechanical properties do not satisfy the regulations of the standard. The specified standard prescribes the technical conditions of delivery for low alloyed steels for quenching and tempering.

Considering that the chemical composition is within the prescribed limits, it is assumed that the poor mechanical properties are results of improper heat treatment of steel.

**KEY WORDS :** Characterization of materials, chemical composition, microstructure, properties

## 1.UVOD

Mehanička svojstva materijala zauzimaju posebno mjesto skupa s fizikalnim i kemijskim svojstvima, budući da se na osnovi njihove veličine dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. Mehanička svojstva materijala, kao i sva ostala svojstva, posljedica su strukturnog stanja materijala. Struktura materijala ovisi o kemijskom sastavu ali i o primijenjenim postupcima. Tako se izborom materijala određenog kemijskog sastava i izborom odgovarajućeg tehnološkog postupka postiže ciljano strukturno stanje materijala koje daje željena svojstva. Poznavanjem odnosa strukturno stanje – mehanička svojstva moguće je proračunati mehanička svojstva koristeći se strukturnim parametrima. To je moguće samo za idealne tvari, budući da su u realnim sustavima prisutne strukturne nepravilnosti koje nije moguće uočiti i obuhvatiti proračunom. Zato se mehanička svojstva realnih tvari mogu utvrditi samo pokusom, a poznavanje kemijskog sastava i strukture materijala uvelike može pomoći u daljnjoj karakterizaciji i primjeni materijala.

Kako bi se okarakterizirao čelik nepoznatog sastava potrebno je provesti analizu kemijskog sastava te napraviti kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture kojom bi se vidjela povezanost između sastava i strukture ali i mehaničkih svojstava.

U ovom radu, kao predmet istraživanja korišten je uzorak izrezan iz okrugle čelične šipke, promjera 220 mm, nepoznatog kemijskog sastava i mikrostrukture. Stanje isporuke i neka mehanička svojstva jamčena su od strane proizvođača.

U smislu karakterizacije materijala provest će se sljedeća ispitivanja:

- Analiza kemijskog sastava
- Kvalitativna i kvantitativna analiza mikrostrukture
- Statičko vlačno ispitivanje
- Mjerenje tvrdoće i žilavosti

## 2. KARAKTERIZACIJA ČELIKA [1, 2, 3]

Karakterizacija čelika nepoznatog sastava provodi se u svrhu dobivanja potrebnih informacija o čeliku, počevši od kemijskog sastava čelika pa sve do njegove strukture, svojstava i moguće primjene. Kako bi se pristupilo postupku karakterizacije, najprije je potrebno pripremiti ispitne uzorke ili epruvete te različitim postupcima analizirati kemijski sastav, strukturu i svojstva čelika. Kemijski sastav ima važnu ulogu ali ne određuje u potpunosti svojstva čelika. Struktura materijala, koja je posljedica kemijskog sastava i tehnoloških postupaka potpuno određuje mehanička svojstva. Istraživačka metoda, koja obuhvaća optičko istraživanje mikrostrukture sa svrhom njezina kvalitativnog i kvantitativnog opisa, naziva se metalografijom.

Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava trebaju biti u skladu s mikrostrukturnim stanjem. Mehanička i ostala svojstva čelika određuju njegovu primjenu.

### 2.1. Analiza kemijskog sastava

Prvi korak pri otkrivanju vrste čelika, jest analiza kemijskog sastava. Kemijski sastav i način prerade određuje strukturu materijala. Raznovrsnim postupcima prerade moguće je, uz istovjetan kemijski sastav, dobiti materijale različite strukture, a time i različitih svojstava. Mnogi materijali se mogu prepoznati po karakterističnim svojstvima bez pomagala kao npr. težini, tvrdoći, boji, izgledu površine,... Međutim, točnije prepoznavanje materijala može se obaviti pomoću analize kemijskog sastava koja može biti kvalitativna i kvantitativna. Kvalitativnom analizom određujemo od kojih se kemijskih elemenata materijal sastoji, dok se kvantitativnom analizom određuje količina pojedinih elemenata. Ovom analizom može se točno odrediti o kojem se sastavu radi, ali se ne može ocijeniti kakva svojstva materijal ima.

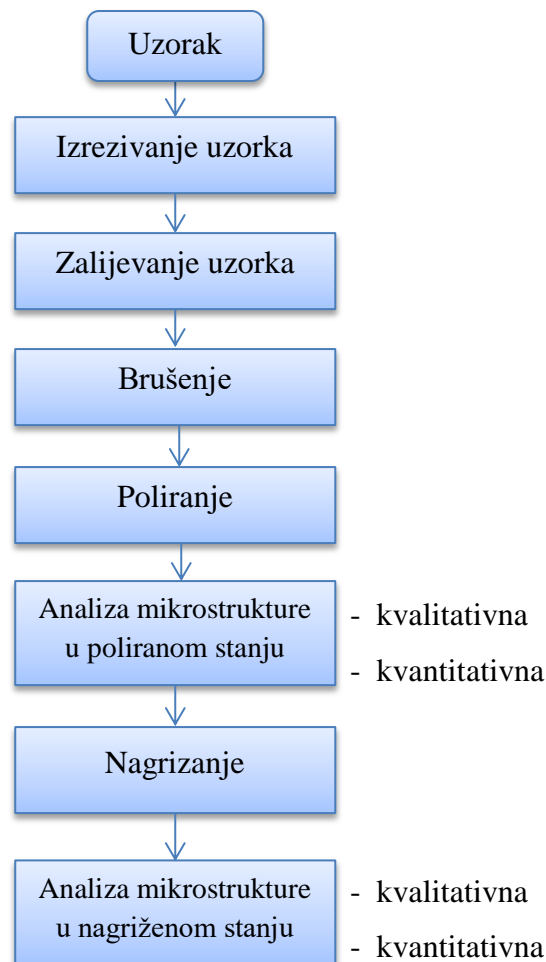
### 2.2. Analiza mikrostrukture

Poznavanjem mikrostrukture čelika važno je zbog direktne veze između mikrostrukture i svojstava. Najčešće se mikrostruktura opisuje kvalitativno, ali su danas dostupne metode i uređaji za njezinu kvantitativnu procjenu. Konačni cilj svakog proučavanja mikrostrukture jest procjena stupnja njezine povezanosti s proizvodnim procesima, ali i utvrđivanje stupnja njezine povezanosti s izmjerenim svojstvima, tj. primjenom.

Za provedbu mikrostrukturne analize potreban je kvalitetno pripremljen metalografski uzorak. Taj uzorak mora biti reprezentativan tj. mora u cijelosti predstavljati materijal koji se analizira. Zbog specifičnosti metalnih materijala i principa rada svjetlosnog mikroskopa kvalitetno pripremljen metalografski uzorak mora imati ravnu i glatku površinu.

Mikrostruktura uzorka analizira se prvo u poliranom, a kasnije i u nagriženom stanju.

Na slici 1 shematski je prikazan tijek pripreme i analiza metalografskog uzorka.



**Slika 1. Shematski prikaz strukturne analize**

- **Makrostrukturna analiza**

Makrostruktura je razina strukture gdje se uzorak promatra golim okom ili povećalom pri povećanju do približno 20 puta. Na ovoj razini uočavaju se razne greške, pukotine, promatra se oblik zavora i površinske greške kod zavora, uključujući troske, morfologija prijelomnih površina i drugo.



- **Mikrostrukturalna analiza**

Kod mikrostrukturne analize uzorak promatramo svjetlosnim ili elektronskim mikroskopom, odnosno otkrivamo elemente u strukturi koji su nevidljivi golim okom. Na taj način možemo vidjeti i analizirati vrstu, oblik i veličinu kristalnih zrna, precipitate, porozitet, interkristalnu koroziju i drugo. Gornja granica povećanja na svjetlosnom mikroskopu određena je valnom duljinom svjetlosti i iznosi do 1000 puta.

Na elektronskom mikroskopu mogu se postići puno veća povećanja.

### **2.2.1. Priprema uzorka**

Uzorci koji će se promatrati na optičkom i elektronskom mikroskopu moraju biti pripremljeni na odgovarajući način.

Dobro pripremljen uzorak treba biti:

- jednak materijalu koji predstavlja, tj reprezentativan
- odvojen, brušen i poliran tako da su uklonjena sva oštećenja površine metala zbog mehaničke deformacije, kako bi se otkrila prava mikrostruktura u postupku nagrizanja
- bez ogrebotina i jamica od poliranja te bez vodenih mrlja
- poliran tako da su sačuvani svi uključci
- dovoljno ravan da omogućiti promatranje pri velikim povećanjima.

Da bi se sve to postiglo uzorak treba pažljivo izrezati, po potrebi zaliti u masu, izbrusiti, ispolirati i nakon analize u poliranom stanju nagristi.

- **Izrezivanje uzorka**

Izrezivanje uzorka je prvi korak u pripremi uzorka za metalografsku analizu, gdje rezanjem dobivamo reprezentativni uzorak osnovnog materijala. Prilikom rezanja treba pripaziti na oštećenja uzorkovana pregrijavanjem te nastojati da površina reza bude što ravnija i što manje ugnječena. To će pojednostavniti i skratiti daljnju mehaničku obradu (brušenje i poliranje).

- **Zalijevanje uzorka**

Zalijevanje uzorka provodi se iz više razloga. Time se štiti uzorak od vanjskog utjecaja, postiže se uniformni oblik za daljnju obradu i olakšava rukovanje uzorkom. Prilikom skrućivanja polimerna masa treba imati što manju kontrakciju, kako se uzorak ne bi odvojio od mase. Nužna je ista otpornost na abraziju između mase i uzorka kako se prilikom brušenja i poliranja ne bi pojavile udubine ili izbočine na masi ili uzorku.

- **Brušenje**

Brušenjem se nastoji skinuti sloj prljavštine, apsorbiranih plinova, oksida i plastično deformirani sloj, kako bi ostao reprezentativan materijal. Brušenje se izvodi abrazivnim sredstvima odgovarajuće veličine zrna, koja su najčešće vezana za odgovarajuću podlogu. To su brusni papiri koji se izmjenjuju u nizu od krupnijeg prema sitnijem zrnju. Tijekom brušenja nužno je hladiti površinu uzorka. Za hlađenje se najčešće koristi voda. Vodom se, osim hlađenja, odvodi strugotina koja bi inače oštetila pripremanu površinu.

- **Poliranje**

Poliranje slijedi nakon brušenja. Mehanički se polira različitim abrazivima koji se slobodno kotrljaju na podlozi od tkanine. I kod poliranja se koristi sredstvo za hlađenje i podmazivanje. Vrsta abraziva, podloge i sredstva za podmazivanje ovisi o materijalu koji se polira. Površina nakon poliranja treba biti ravna, glatka i sjajna poput zrcala.

- **Nagrivanje**

Nagrivanje je postupak selektivnog korodiranja s namjerom da se učine vidljivom kristalna zrna pojedinih faza i ostale karakteristike materijala nevidljive u nenagriženom stanju.

Parametri za nagrivanje su sastav sredstva za nagrivanje, vrijeme nagrivanja, temperatura i drugo.

Postupci nagrivanja:

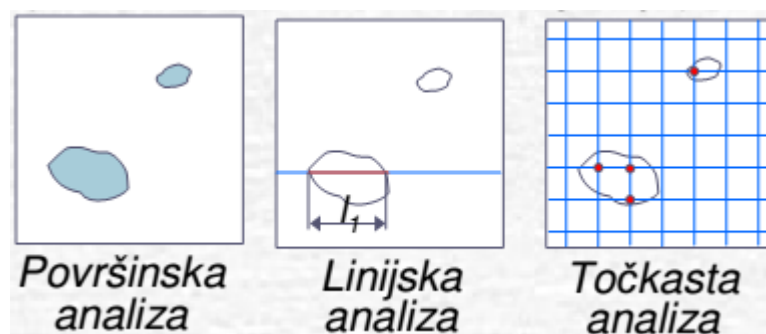
- Kemijsko nagrivanje se obavlja na čelicima, lakim i obojenim metalima. Čelike nagrivate u 3%-tnom nitalu ( 3 % HNO<sub>3</sub> + alkohol)
- Elektrolitičko nagrivanje je postupak kojim nagrivate nehrđajuće čelike

- Termičkim nagrizanjem se nagriza keramika
- Obojeno nagrizanje

### 2.2.2. Kvalitativna i kvantitativna analiza mikrostrukture

Nakon kvalitetno napravljene pripreme metalografskog uzorka slijedi analiza mikrostrukture. Uzorak se prvo analizira u poliranom stanju, a nakon toga slijedi analiza u nagrizenom stanju. Cilj analize mikrostrukture jest jasno i vjerno prikazati strukturu nekog materijala i odrediti vrstu, veličinu, količinu i raspodjelu pojedinih strukturnih konstituenata.

Analiza mikrostrukture može biti kvalitativna i kvantitativna. U okviru kvalitativne analize mikrostrukture određuju se prisutni mikrostrukturni konstituenti (faze) prisutni u mikrostrukтури, njihova homogenost, morfologija kristalnih zrna i drugo. Za jednoznačno definiranje mikrostrukture, pored vizualnog pregleda i prepoznavanja prisutnih faza, potrebno je brojčano izraziti udjel, veličinu, oblik i raspodjelu sastavnih elemenata mikrostrukture tj. potrebno je napraviti kvantitativnu metalografsku analizu. Ona se najčešće provodi analizom dvodimenzionalne metalografske slike (površinska analiza, linijska analiza i točkasta analiza), prikazanom na slici 2.



Slika 2. Metode analize metalografske slike

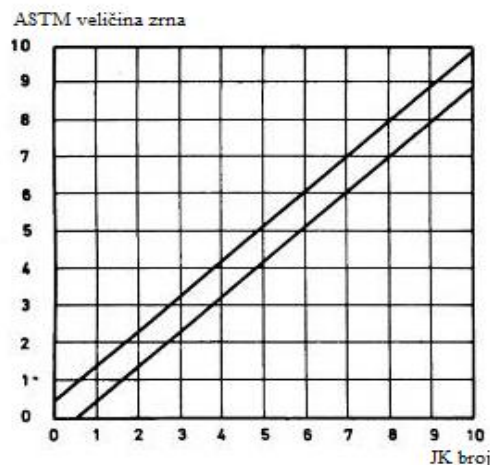
U okviru kvantitativne analize mikrostrukture često se provodi određivanje veličine zrna. Razlog tome je veliki utjecaj veličine zrna na mehanička svojstva materijala. Najčešće se veličina zrna određuje metodom procjene pomoću slika za usporedbu. Postoji i standardna metoda određivanja veličine zrna ASTM E 112 (ASTM - American Society for Testing Materials). Veličina zrna ( $G$ ) je bez dimenzijska veličina i predstavlja broj zrna po kvadratnom inču. U tablici 1 prikazan je odnos između veličine zrna ( $G$ ) i broja zrna po kvadratnom inču. [10]

**Tablica 1. Broj zrna po inču kvadratnom po ASTM normi**

ASTM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Broj zrna / in <sup>2</sup>	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512

Jedan od razloga zbog kojih se u okviru analize mikrostrukture određuje veličina zrna jest činjenica da veličina austenitnog zrna prije kaljenja utječe na veličinu martenzitnog zrna, a samim time i na duktilnost nakon toplinske obrade. Teži se da veličina austenitnog zrna bude što manja. Osim metode po ASTM-u koriste se i neke druge metode određivanja veličine kristalnog zrna. Najpoznatije su Shepherdova i Jernkontoretova metoda (JK). Jernkontoretova metoda se često koristi kod ispitivanja utjecaja veličine zrna na izgled prijelomne površine. Dokazano je da prijelomna površina kod zakaljenog čelika podvrgnutog ispitivanju lomne žilavosti, prati granice austenitnih zrna koje su postojale prije kaljenja. Što je sitnije austenitno zrno prijelomna površina ima finiju mikrostrukturu.

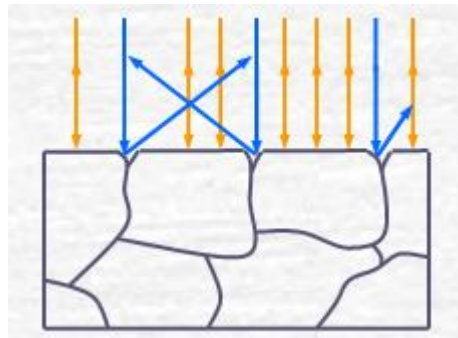
Na slici 3 prikazana je korelacija između veličine zrna određene metodom po ASTM-u i Jernkontoretove metode.

**Slika 3. Korelacija između veličine austenitnog zrna određene po ASTM-u i JK metodi**

### 2.2.2.1 Analiza svjetlosnim mikroskopom

Od svih metalografskih metoda svakako je najvažnija tzv. svjetlosna metalografija, u kojoj se za rasvjetu koristi vidljivi dio spektra, a osnovni instrument je svjetlosni mikroskop. Svjetlosni mikroskop sastoji se najmanje od dvaju sustava leća: objektiv koji povećava uzorak i okulara koji povećava sliku dobivenu na objektivu. Kao izvor svjetlosti u mikroskopu upotrebljava se

vidljivi dio spektra prirodne ili umjetne svjetlosti. Pomoću svjetlosnog mikroskopa može se postići povećanje od približno 1000 puta i razlučivanje od 250 nm, što omogućuje opažanje elemenata mikrostrukture, npr. granice zrna, granice faza, fizikalne nečistoće (uključci) i drugo. Konačna slika površine uzorka koju formira okular, svijetla je za sve zrake okomite na optičku os, a tamna za sve priklonjene zrake. Tako se mogu vidjeti različiti elementi mikrostrukture slike poput granica zrna, koje su nagrižene da bi se dobile jamice s kosim rubovima kao što je prikazano na slici 4.



**Slika 4. Refleksija svjetla koje pada na površinu i granice zrna**

#### 2.2.2.2. Elektronska metalografija

Za još detaljniju analizu koristi se elektronski mikroskop. Primjenjuje se u metalografiji kada se pojedini elementi mikrostrukture ne mogu dalje razlučiti pomoću svjetlosnog mikroskopa. Umjesto svjetlosne zrake koristi se snop elektrona koji se usmjerava elektromagnetskim poljem. Prednosti u odnosu na svjetlosni mikroskop proizlaze iz vrlo male veličine elektrona čime je omogućeno razlučivanje od samo nekoliko desetinki nanometara, što odgovara veličini parametara rešetke. Sve to dopušta promatranje dislokacija, različitih izlučina, nepravilnosti slaganja, područja pretvorbi kristalnih sustava i drugo.

Dva su osnovna tipa elektronskog mikroskopa:

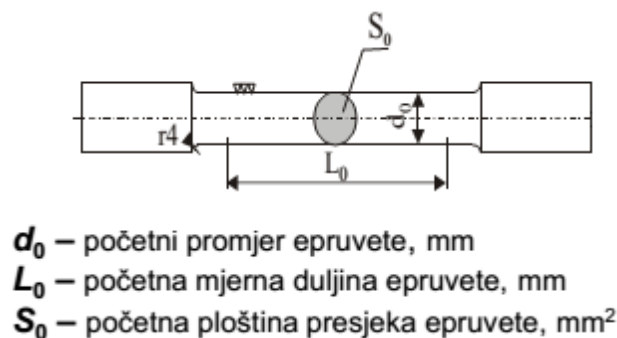
- a) SEM (pretražni ili skenirajući elektronski mikroskop) - pretražuje površinu uzorka te sliku oblikuje otkrivajući elektrone koji se odbijaju od površine uzorka
- b) TEM (transmisijski elektronski mikroskop) – oblikuje sliku pomoću elektrona koji prolaze kroz uzorak.

### 2.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava [1, 5, 6]

Poznavanjem mehaničkih svojstava moguće je objektivno ocijeniti kvalitetu materijala pri kontroli poluproizvoda i završnoj kontroli gotovog proizvoda. Ispitivanja mehaničkih svojstava većinom se provode na epruvetama odnosno ispitnim uzorcima normiranog oblika i dimenzija. Broj epruveta potrebnih za utvrđivanje nekoga mehaničkoga svojstva ovisi o nehomogenostima prisutnim u materijalu.

#### 2.3.1. Statičko vlačno ispitivanje

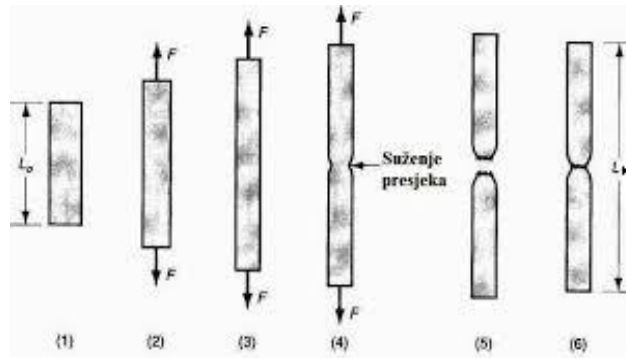
Postupkom ispitivanja mehaničkih svojstava, utvrđuju se glavna svojstva koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala ali i njihovu deformabilnost. Kako se radi o statičkom naprezanju, prirast naprezanja mora biti manji od  $10 \text{ N/mm}^2$  u sekundi. Ispitivanje se provodi na kidalicama ili univerzalnim ispitivalicama koje kontinuirano opterećuju epruvete četvrtastog ili okruglog poprečnog presjeka. Na slici 5 prikazana je epruveta s okruglim poprečnim presjekom. Početna površina okruglog poprečnog presjeka računa se po formuli 2.1.



Slika 5. Epruveta za statičko vlačno ispitivanje kružnog poprečnog presjeka [6]

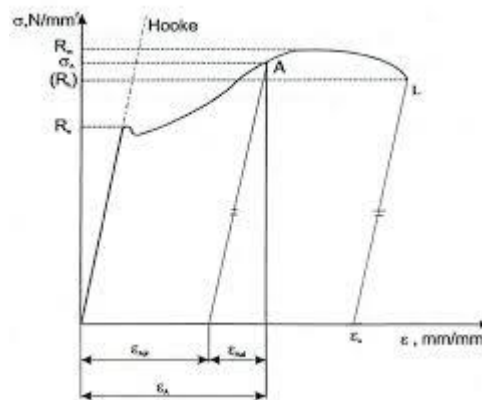
$$S_0 = \frac{d_0^2 \times \pi}{4} \quad (2.1)$$

Djelovanjem sile  $F$  na epruvetu početne duljine  $L_0$ , dolazi do produljenja epruvete, što za posljedicu ima promjenu promjera od vrijednosti  $d_0$  do  $d_k$ , sve do pojave loma i konačne mjerne duljine  $L_k$  epruvete, kako je prikazano na slici 6.



Slika 6. Tijek statičnog vlačnog ispitivanja [7]

Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje, te se grafički registrira dijagram *sila – produljenje*, a uz pomoć podataka iz dijagrama dobiva se dijagram *naprezanje – istezanje* prikazan na slici 7, koji utvrđuje mehanička svojstva koja karakteriziraju otpornost materijala ali i njegovu deformabilnost.



Slika 7. Dijagram naprezanje – istezanje (\$\sigma - \epsilon\$) [7]

Dijagram *naprezanje – istezanje* počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hookeovim pravcem. Naprezanje u ovom dijelu dijagrama računa se prema formuli 2.2.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.2)$$

gdje je:

- $E$  – Youngov modul elastičnosti, N/mm\$^2\$
- $\sigma$  – naprezanje, N/mm\$^2\$
- $\epsilon$  - relativno produljenje, mm/mm

*Modul elastičnosti* predstavlja nagib krivulje u elastičnom području. Što je strmiji nagib, za isto istezanje  $\varepsilon$  bit će potrebno veće naprezanje  $\sigma$ . Hookeov pravac završava *granicom razvlačenja*  $R_e$ , a ona se računa prema izrazu 2.3:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (2.3)$$

gdje je:

- $R_e$  – granica razvlačenja
- $F_e$  – sila tečenja
- $S_0$  – površina početnog presjeka epruvete

*Granica razvlačenja* je naprezanje kod kojeg materijal počinje teći bez povećanja naprezanja. Prelaskom granice razvlačenja materijal prelazi u područje trajnih ili plastičnih deformacija. Naprezanje pri maksimalnoj sili naziva se *vlačnom čvrstoćom* i računa se prema izrazu 2.4:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (2.4)$$

Od trenutka kada se postigne maksimalna sila, površina presjeka epruvete počinje se smanjivati pa se iz tog razloga ovo naprezanje ne smije nazivati maksimalnim naprezanjem. Dostizanjem naprezanja  $R_m$  dolazi do lokaliziranja deformacija na jednom mjestu pa nastaje tzv. vrat. Naprezanje kod kojeg dolazi do loma epruvete naziva se *konačno naprezanje*  $R_k$  i računa se prema izrazu 2.5:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (2.5)$$

Dijagram *naprezanje – istezanje* naziva se još konvencionalni ili inženjerski dijagram, a s obzirom da se sve vrijednosti dobivaju pomoću početnog poprečnog presjeka epruvete  $S_0$ , naprezanja dobivena na taj način točna su samo za elastično područje. U području plastičnih deformacija dolazi do suženja poprečnog presjeka pa su stvarna naprezanja znatno veća. Za proračun konstrukcija, dijelova i uređaja, koristi se konvencionalni dijagram jer se sve konstruira u području elastičnih vrijednosti.



Statičkim vlačnim pokusom utvrđuju se i svojstva koja daju informaciju o deformabilnosti materijala.

Istezljivost  $A$  daje informaciju o deformabilnosti materijala u uzdužnom smjeru epruvete, a računa se po formuli 2.6:

$$A = \varepsilon_u \cdot 100, \% \quad (2.6)$$

gdje je:

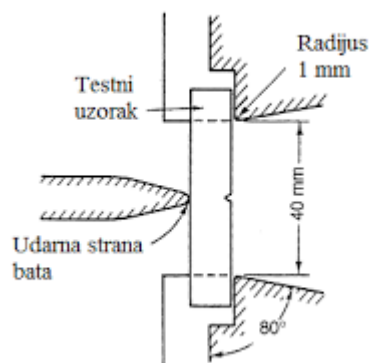
- $\varepsilon_u$  – konačno istežanje, mm/mm

Veličina koja karakterizira deformabilnost materijala u poprečnom smjeru naziva se *kontrakcija*  $Z$  ili relativno suženje površine presjeka epruvete u odnosu na površinu početnog presjeka i računa se prema izrazu 2.7:

$$Z = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \cdot 100, \% \quad (2.7)$$

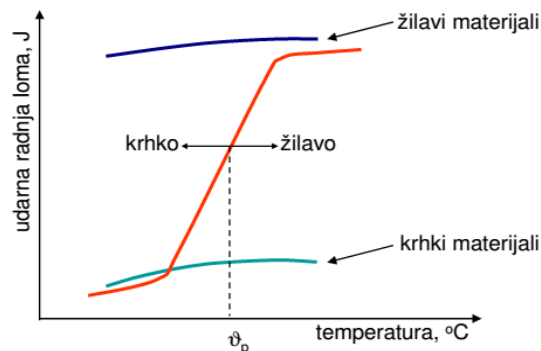
### 2.3.2. Ispitivanje žilavosti

Ispitivanjem žilavosti ili udarne radnje loma utvrđuje se ponašanje materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Ispitivanje se provodi na Charpyjevu batu, gdje se epruveta kvadratnog poprečnog presjeka, s utorom na sredini i oslonjena na dva oslonca, savojno opterećuje prilikom udarca bata nasuprot utoru. Postupak ispitivanja prikazan je na slici 8.



Slika 8. Udarno opterećivanje epruvete na Charpyjevu batu [8]

Udarna radnja loma jest energija potrebna da brid Charpyjeva bata prelomi epruvetu ili je provuče između oslonaca. Kod većine konstrukcijskih čelika ispitna temperatura znano utječe na žilavost pa se ispitivanja često provode na sniženim temperaturama, a utjecaj temperature na udarnu radnu loma je prikazano na slici 9.



**Slika 9. Utjecaj temperature na udarnu radnju loma [9]**

Vidljivo je da sniženjem temperature, općenito pada žilavost. Kod nekih materijala pad žilavosti je postupan, a kod nekih vrlo nagli. Nelegirani i niskolegirani čelici su pri višoj temperaturi žilavi, a pri nižoj vrlo krhki. Prijelaz iz žilavog u krhko područje je vrlo nagli, a temperatura kod koje se to događa zove se prijelazna temperatura.

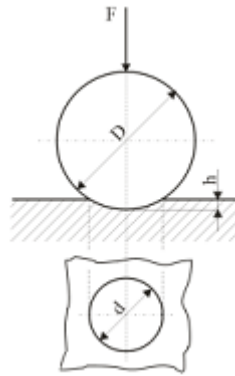
### 2.3.3. Mjerenje tvrdoće [1,6]

Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju drugoga, znatnije tvrdog materijala. Ispitivanje tvrdoće tek neznatno oštećuje površinu ispitivanog predmeta pa se može svrstati i u nerazorne metode ispitivanja. Osnovni princip mjerenja kod većine metoda jest mjerenje veličine ili dubine otiska što ga penetrator, opterećen nekom silom, ostavi u površini.

Uređaji za mjerenje tvrdoće nazivaju se tvrdomjeri. Danas najčešće primjenjive metode mjerenja su: Brinellova, Vickersova i metoda po Rockwellu.

- Brinellova metoda

-u ispitivanom materijalu nastaje otisak u obliku kalote promjera baze  $d$  i dubine  $h$ , prikazano na slici 10.



**Slika 10. Mjerenje tvrdoće po Brinellu**

-mjeri se promjer otiska  $d$ , a tvrdoća se računa pomoću izraza 2.8:

$$HB = \frac{2 \times F}{\pi \times D^2 \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right)} \quad (2.8)$$

gdje je:

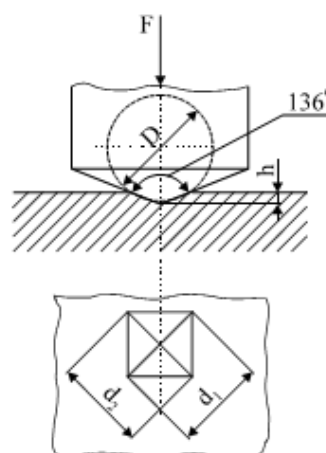
$F$  – sila, N

$D$  – promjer kuglice, mm

$d$  – promjer baze otiska kuglice, mm

- Vickersova metoda

-kod ove metode kao penetrator koristi se dijamanтна četverostrana piramida s kutom između stranica  $136^\circ$ , slika 11. Ovakvim penetratorom automatski su uklonjeni nedostaci Brinellove metode, tj. omogućuje se mjerenje tvrdoće na materijalima koji imaju tvrdoću veću od 650HB.



**Slika 11. Mjerenje tvrdoće po Vickersu**

-pomoću mjernog mikroskopa mjeri se dijagonala baze otisnuća, ploština otisnuća izražava se pomoću dijagonale  $d$  te se računa vrijednost HV dobivena izrazom 2.9:

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (2.9)$$

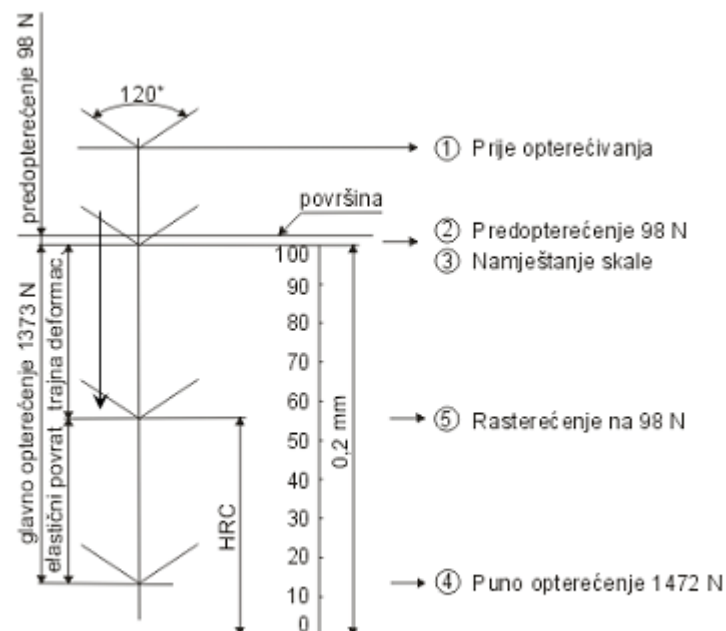
gdje je:

$F$  – sila, N

$d$  – srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale otiska, mm

- Metoda po Rockwellu

Za razliku od Brinellove i Vickersove metode, ova metoda ne mjeri veličinu otiska nego dubinu prodiranja penetratora. Penetor je dijamantni stožac s vršnim kutom od  $120^\circ$  ili kuglica od kaljenog čelika. Vrijednost tvrdoće očitava se na skali tvrdomjera i to nakon rasterećenja kao što je prikazano na slici 12. Mjerenje je brzo i nije potrebna brižljiva priprema mjerne površine, ali postoji određena nepreciznost  $\pm 1,5$  HRC



**Slika 12. Shematski prikaz provedbe ispitivanja tvrdoće po HRC metodi**

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

U radu je napravljena karakterizacija čelika nepoznatog kemijskog sastava.

Karakterizacija je uključivala sljedeće:

- analizu kemijskog sastava čelika
- kvalitativnu analizu mikrostrukture
- kvantitativnu analizu mikrostrukture
- mjerenje tvrdoće i mikrotvrdoće materijala
- statičko vlačno ispitivanje
- ispitivanje žilavosti.

Nakon provedenih ispitivanja, dobiveni rezultati su interpretirani i analizirani te su doneseni odgovarajući zaključci.

### 4.2. Materijal za ispitivanje

Sva predviđena ispitivanja provedena su na uzorcima izrezanim iz okrugle čelične šipke promjera 220 mm. Kemijski sastav čelika nije poznat, a poluproizvod je isporučen u poboljšanom stanju. Toplinska obrada se sastoji od grijanja čelika na temperaturu austenitizacije između 820 i 880 °C, gašenja s temperature austenitizacije te popuštanja na temperaturi između 540 i 680 °C.

Proizvođač čelika jamči određena mehanička svojstva za isporučeno stanje.

Jamčene vrijednosti prikazane su u tablici 2.

**Tablica 2. Mehanička svojstva zajamčena od strane proizvođača**

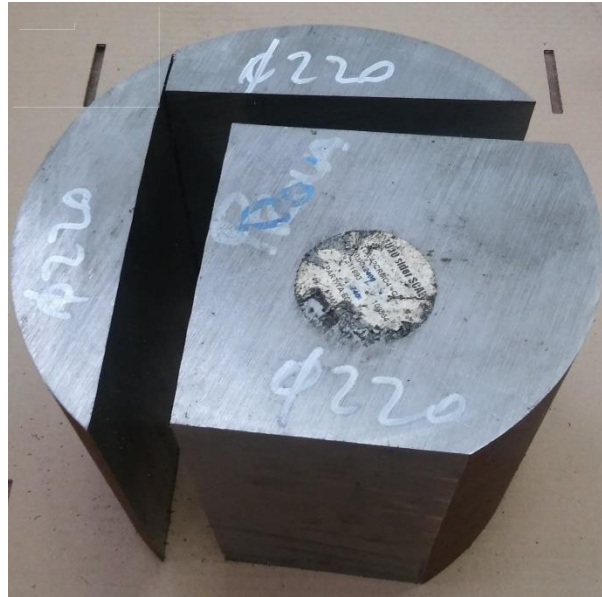
Svojstvo	R <sub>e</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	A [%]	Z [%]	KV (20 °C) [J]			HB		
								1	2	1
Vrijednost	624	832	20	65	50	41	55	277	229	-

Na slici 13 prikazan je dio profila iz kojeg su izrezani uzorci.

Uzorci za mehanička ispitivanja uzimaju se sukladno normi EN ISO 377:2013 koja propisuje sve u vezi s položajem i pripremom uzoraka za ispitivanje mehaničkih svojstava.

Iz istog komada izrezani su i uzorci za analizu kemijskog sastava, kao i uzorci za analizu mikrostrukture, slika 14.

Analiza mikrostrukture provedena je na uzorku uzetom na rubnom dijelu i iz središta profila.



**Slika 13. Položaj ispitnih uzoraka u vruće valjanom profilu**



**Slika 14. Materijal za ispitivanje kemijskog sastava i mikrostrukture**

### **4.3. Analiza kemijskog sastava**

Kemijski sastav čelika određen je u Laboratoriju za analizu metala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Analiza je provedena metodom optičke emisijske spektrometrije na uređaju LECO GDS 850A, prikazanom na slici 15.



**Slika 15. Optički emisijski spektrometar LECO GDS 850A**

Rezultati kemijske analize navedeni su u tablici 3.

**Tablica 3. Kemijski sastav materijala**

	Maseni udio elemenata, %										
Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Fe
%	0,47	0,26	0,68	0,018	0,024	1,03	0,13	0,17	0,25	0,027	ostatak

#### 4.4. Analiza mikrostrukture

Analiza je provedena na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS GX51 i na pretraženom elektronskom mikroskopu (SEM) Tescan TS5136LS.

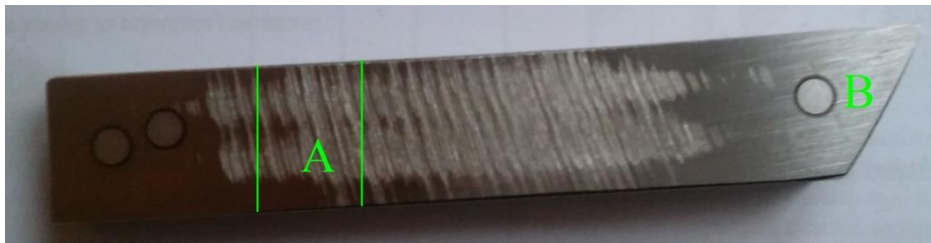
Priprema uzroka kao i naknadna analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Analizirana je mikrostruktura uz površinu i mikrostruktura iz središnjeg dijela profila. Nakon izrezivanja uzorci su zaliveni u polimernu masu, brušeni i polirani, te na kraju i nagrizani. Analiza mikrostrukture je provedena u poliranom i nagriženom stanju.

#### 4.4.1. Priprema uzorka

##### 4.4.1.1. Izrezivanje

Izrezivanje uzorka za ispitivanje obavljeno je na tračnoj pili uz konstantno hlađenje kako bi se izbjegao utjecaj temperature na mikrostrukturu. Materijal za ispitivanje je izrezan na dva manja dijela kako bi se analizirala mikrostruktura uz površinu profila i mikrostruktura središnjeg dijela profila. Na slici 16 vidi se položaj uzoraka za analizu mikrostrukture.



**Slika 16. Pozicije uzoraka za mikrostrukturnu analizu**

A – središnji dio profila (uzdužni presjek)

B – rub profila (poprečni presjek)

##### 4.4.1.2. Zalijevanje

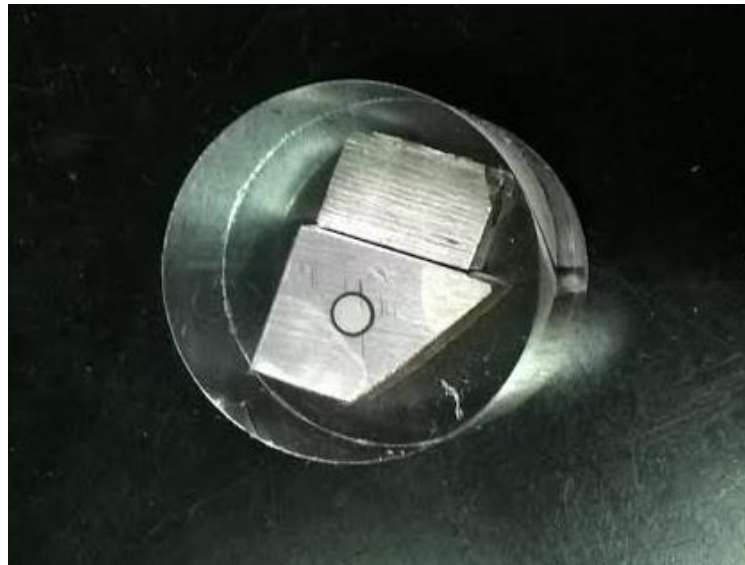
Zalijevanje u kalup provodi se radi zaštite i olakšanog rukovanja uzorkom. Korišten je postupak toplog zalijevanja, a proveden je na pneumatskoj preši Pneumet Press, slika 17. Uzorci se stavljaju na čelo klipa preše koji se spušta u kalup, koji se zatim puni polimernim prahom i nakon toga zatvara. Uslijed visokog tlaka i temperature polimerni prah prelazi u prozirnju polimernu masu o kojoj su izrezani uzorci zarobljeni.

Na slici 18 vide se zaliveni uzorci spremni za daljnju pripremu.





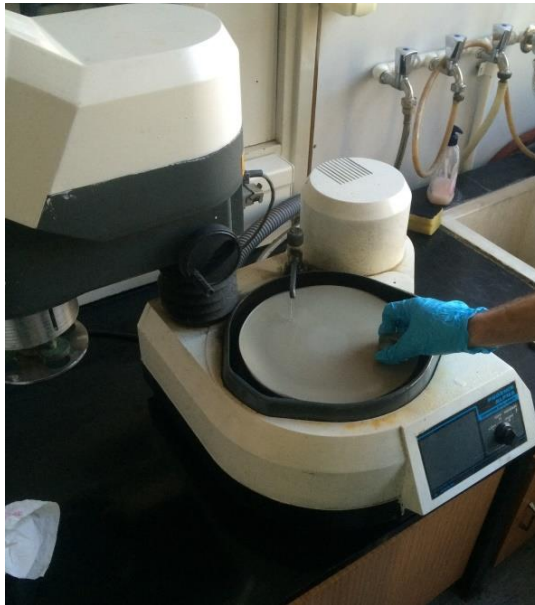
**Slika 17. Preša za toplo zalijevanje metalografskih uzoraka**



**Slika 18. Uzorci zaliveni u polimernu masu**

#### 4.4.1.3. Brušenje

Postupak brušenja je proveden na uređaju Phoenix Alpha prikazanom na slici 19. Brusni papiri se namoče vodom kako bi prijanjali na rotacijsku plohu uređaja na kojoj se vrši brušenje pri brzini od 300 o/min. Prvi brusni papir s abrazivnim česticama od silicijevog karbida ima oznaku P320. Nakon brusnog papira P320 korišteni su brusni papiri oznaka P500, P1000, P2000 i P4000 kojim se postiže odgovarajuća površina uzorka. Kod brusnog papira P4000 abrazivne čestice su aluminijev oksid veličine 5  $\mu\text{m}$ . Tijekom proces brušenja uzorak se kontinuirano hladi vodom da ne dođe do zagrijavanja površine uzorka što bi moglo utjecati na mikrostrukturu.



**Slika 19. Brušenje uzorka**

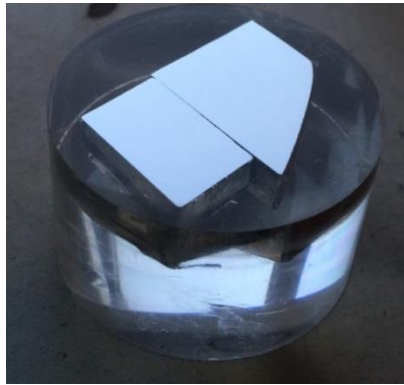
#### *4.4.1.4. Poliranje*

Poliranje je provedeno na uređaju za poliranje „Struers“ DAP-V, prikazanom na slici 20. Prilikom poliranja kao sredstvo za hlađenje koristi se lubrikant, smjesa alkohola i vode. Postupak poliranja provodi se u dva koraka pri brzini poliranja od 150 o/min. U prvom koraku korištena je dijamantna pasta promjera abrazivnih čestica 3  $\mu\text{m}$ , dok se u drugom koraku koristila dijamantna pasta promjera abrazivnih čestica od 1  $\mu\text{m}$ .

Na slici 21 prikazan je metalografski uzorak s poliranom površinom, spreman za daljnju analizu.



**Slika 20. Poliranje uzorka**



**Slika 21. Metalografski uzorak nakon poliranja**

#### *4.4.1.5. Nagrizanje*

Površina uzorka nagrižena je sredstvom za nagrizanje poznatim pod nazivom NITAL.

Sastav ovog sredstva za nagrizanje je sljedeći:

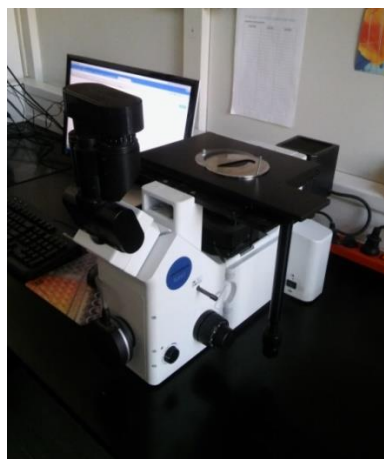
- 3 ml dušične kiseline
- 97 ml etilnog alkohola

Uzorci se ostave u sredstvu za nagrizanje 2 do 3 sekunde pri čemu dolazi do kemijske reakcije na površinu uzorka. Nakon toga se uzorci isperu u vodi da se prekine kemijska reakcija. Po potrebi, uzorci se mogu isprati u alkoholu, nakon čega su spremni za daljnju analizu mikrostrukture.

#### *4.4.2. Analiza mikrostrukture svjetlosnim mikroskopom*

Analiza je provedena na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS GX51, prikazanom na slici 22.

Analiza je provedena u poliranom i nagriženom stanju.



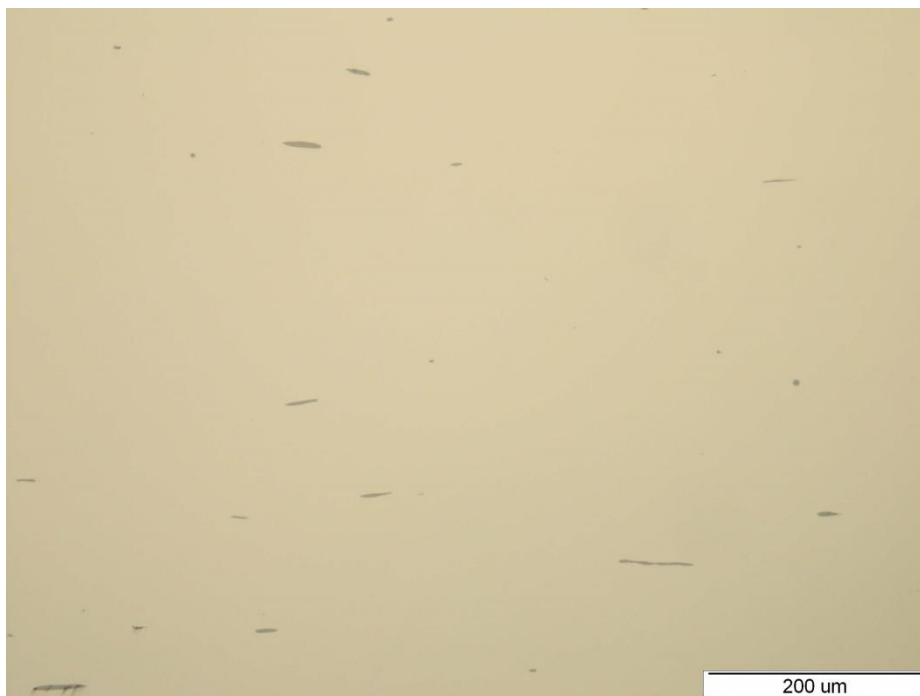
**Slika 22. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51**

#### 4.4.2.1. Analiza u poliranom stanju

Na slikama 23, 24 i 25 prikazana je površina uzoraka nakon poliranja snimljena na svjetlosnom mikroskopu.

Slika 23 predočuje mikrostrukturu iz uzdužnog presjeka, a slika 24 mikrostrukturu iz poprečnog presjeka. Na obje slike mogu se uočiti uključci manganovog sulfida, usmjerenih u smjeru valjanja. Duljina uključaka uglavnom je manja od 50  $\mu\text{m}$ .

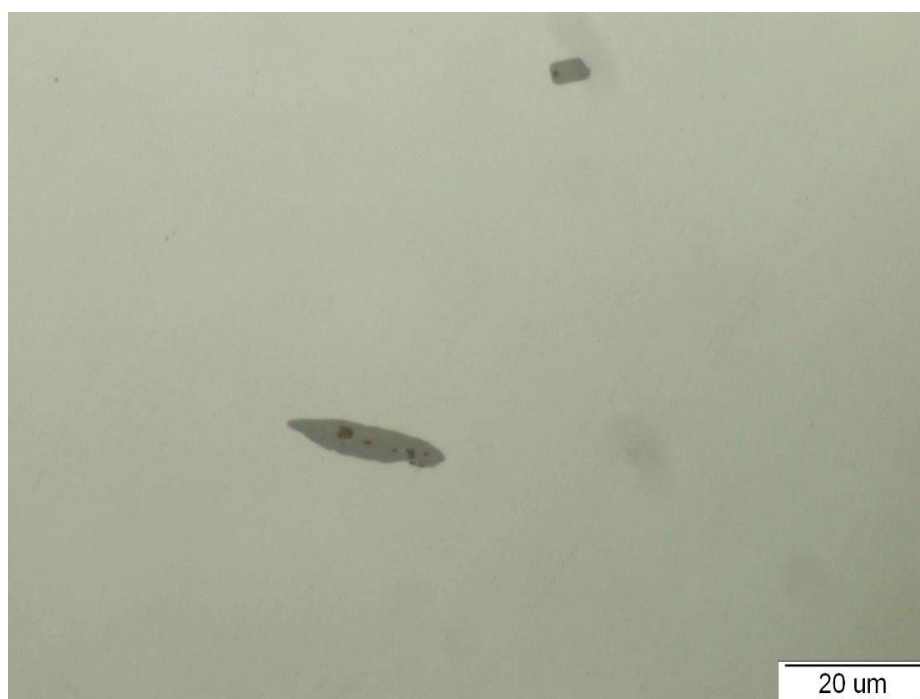
Na slici 25 prikazan je uključak manganovog sulfida snimljen pri povećanju od 1000x.



**Slika 23. Polirana površina uzorka, uzdužni presjek**



**Slika 24. Polirana površina uzorka, poprečni presjek**



**Slika 25. Uključci manganovog sulfida, uzdužni smjer**



#### 4.4.2.2. Analiza u nagriženom stanju

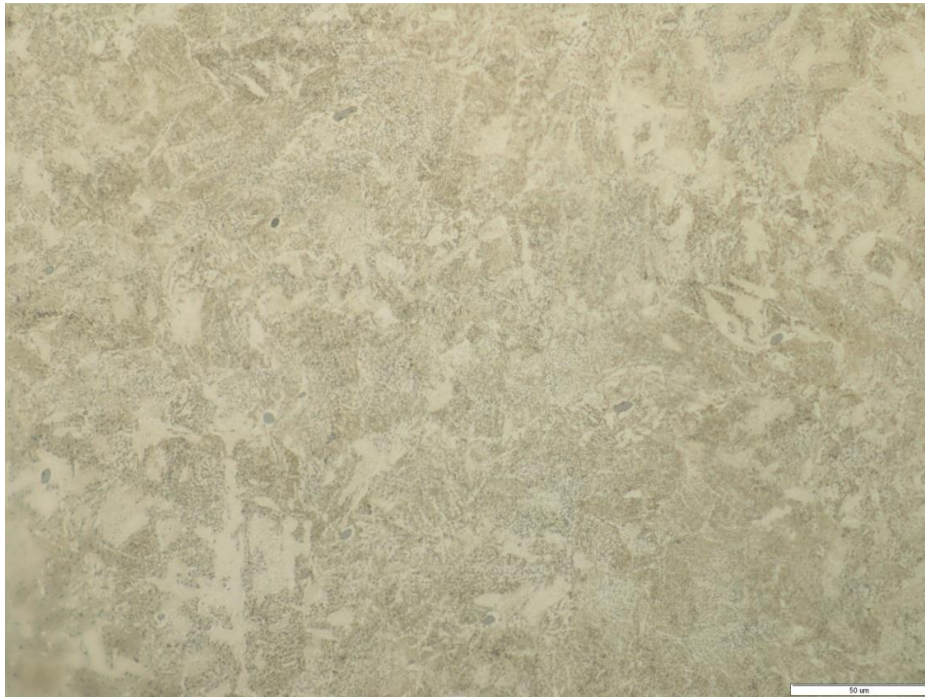
Nakon poliranja uzorci su nagriženi u Nitalu. U nagriženom stanju jasno se vidi izgled mikrostrukture, odnosno kristalna struktura materijala.



**Slika 26. Nagrižena površina uzorka, uzdužni presjek**



**Slika 27. Nagrižena površina uzorka uz veće povećanje, uzdužni presjek**



**Slika 28. Nagrižena površina uzorka, poprečni presjek**



**Slika 29. Nagrižena površina uzorka uz veće povećanje, poprečni presjek**

Na slikama 26 do 29 prikazana je površina uzorka nakon nagrizanja gledana na uzdužnom i poprečnom presjeku.

Mikrostruktura materijala sastoji se u potpunosti od martenzita. Nema prisutnih karbida. Mjestimice se vide uključci manganovog sulfida.



#### 4.4.2.3. Određivanje veličine kristalnog zrna

Na fotografiji mikrostrukture u nagriženom stanju, slika 30., određena je veličina kristalnog zrna. Korištena je metoda usporedbe. Početna fotografija dovedena je u odgovarajući format i uspoređena s referentnim slikama mikrostrukture.

Na slici 31 prikazana je ista mikrostruktura uzorka s naglašenim granicama zrna, pri povećanju 200x.

Usporedbom s referentnim slikama mikrostrukture može se zaključiti da veličina zrna, određena po normi ASTM E 112, iznosi oko 7.



**Slika 30. Fotografija mikrostrukture na kojoj je određena veličina zrna**



**Slika 31. Određivanje veličine zrna**

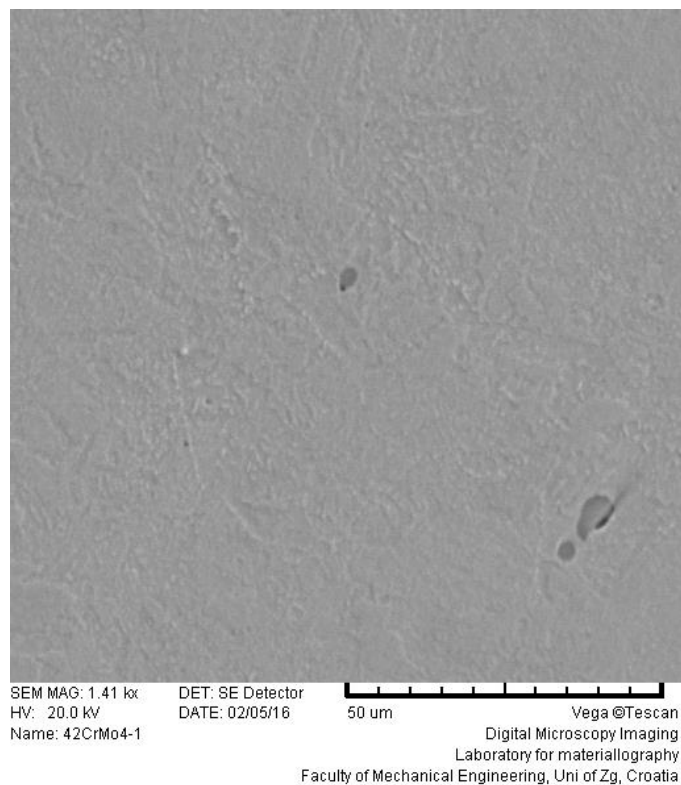


#### 4.4.2.4. Analiza mikrostrukture na elektronskom mikroskopu

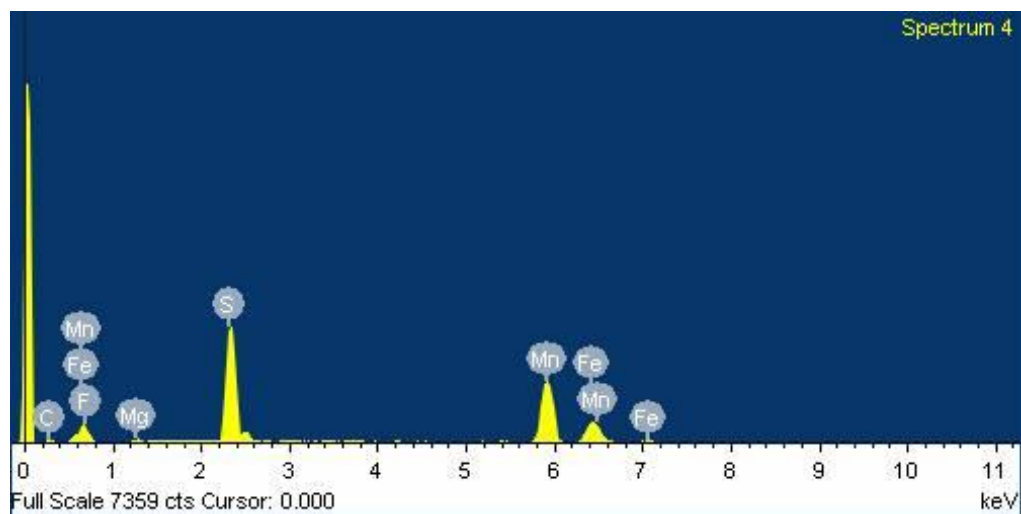
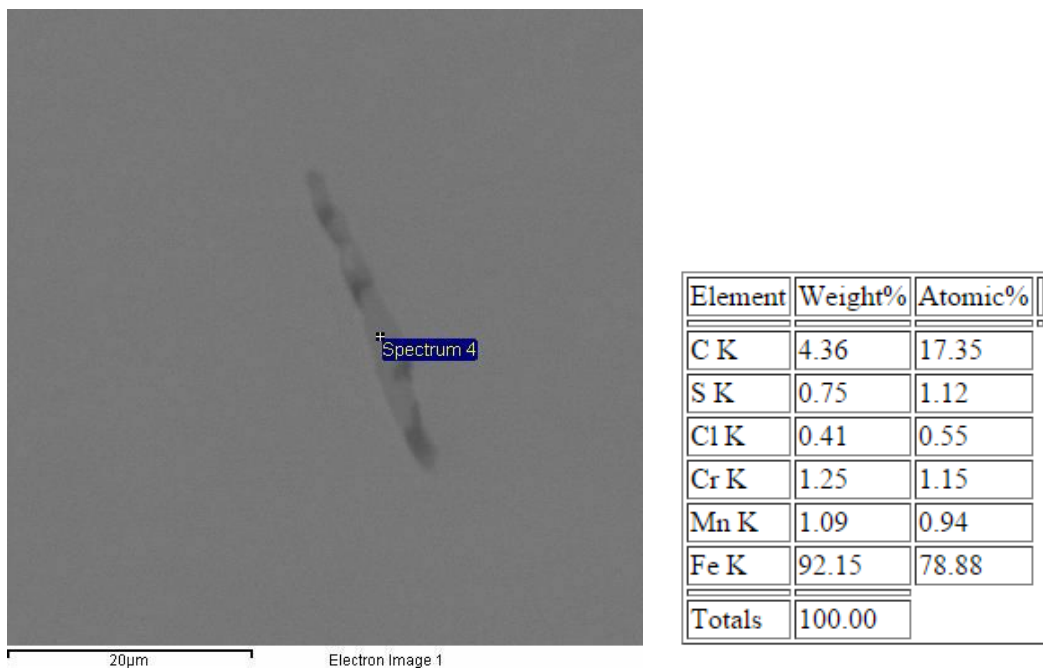
Analiza je provedena na pretražnom elektronskom mikroskopu (SEM) u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uzorak se smješta u komoru mikroskopa te se pravilnim pomicanjem fokusiranog snopa elektrona po površini uzorka formulira slika. Koristi se za proučavanje strukture te uz pomoć EDS detektora, za određivanje kemijskog sastava materijala.

Na slici 32 prikazana je struktura na površini uzdužnog presjeka uzorka dobivena pretražnim elektronskim mikroskopom.

Na slici 33 prikazan je kemijski sastav dobiven uz pomoć EDS detektora iz područja označenog na slici (Spectrum 4).



**Slika 32. Struktura uzdužnog presjeka dobivena elektronskim mikroskopom**



**Slika 33. Struktura poprečnog presjeka dobivena uz pomoć EDS detektora**

#### 4.5. Statičko vlačno ispitivanje

Ispitivanje je provedeno na standardnoj proporcionalnoj kratkoj epruveti, okruglog poprečnog presjeka, prikazanoj na slici 34.



Slika 34. Epruveta za statičko vlačno ispitivanje

Podaci o dimenzijama epruvete nalaze se u tablici 4.

Tablica 4. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje

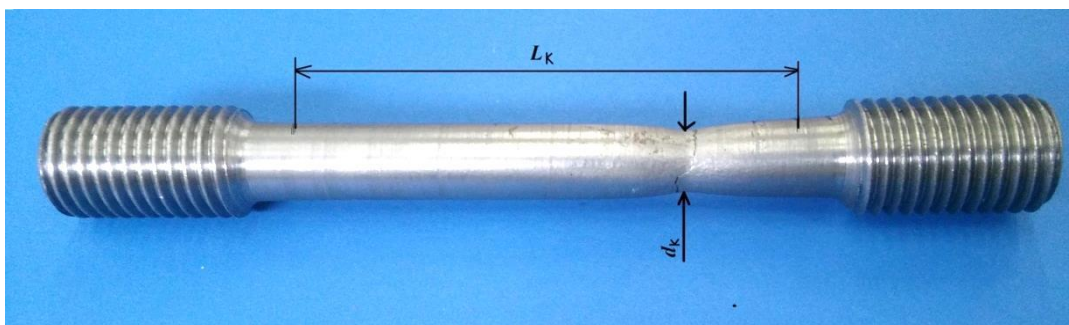
Oznaka epruvete	$d_0$ mm	$L_0$ mm	$S_0$ mm <sup>2</sup>
-	13,95	70	152,84

Ispitivanje je provedeno na hidrauličkoj kidalici u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju (ZIT) u Zagrebu, prikazanoj na slici 35. Za potrebe ispitivanja na kidalici je montiran odgovarajući prihvatač za epruvete. Nakon prihvata epruvete slijedi kontinuirano opterećivanje epruvete sve do kidanja.



**Slika 35. Hidraulička kidalica WOLPERT**

Na slici 36 predočena je epruveta nakon ispitivanja koju je potrebno spojiti kako bi se izmjerila konačna mjerna duljina  $L_k$  i konačni promjer epruvete  $d_k$  koji predstavlja najuži promjer epruvete na mjestu loma.



**Slika 36. Izgled epruvete nakon statičko vlačnog ispitivanja**

Rezultati ispitivanja i dimenzije epruvete nakon završetka ispitivanja prikazani su u tablici 5.

**Tablica 5. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja i dimenzije epruvete nakon ispitivanja**

Oznaka epruvete	$R_e$ N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	$A$ %	$Z$ %	$d_k$ mm	$L_k$ mm	$S_k$ mm <sup>2</sup>
-	492	750	550	19,5	41,27	10,69	83,65	89,75

#### 4.6. Ispitivanje žilavosti

Ispitivanje udarnog loma provedeno je u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju (ZIT) u Zagrebu na Charpyjevom batu „Otto Wolpert-Werke GmbH“.

Charpyjev bat prikazan je na slici 37.

Ispitivanje se provodi s ciljem utvrđivanja ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Počinje podizanjem bata na početni položaj ( $h_1$ ) i njegovim fiksiranjem. Nakon toga se epruveta postavlja u oslonce, te nakon centriranja epruvete, otpušta se udarni bat koji udara stranu epruvete suprotnu zarezu. Zbog toga se bat nakon udarca podiže na visinu ( $h_2$ ) manju od početne, a na skali uređaja očitava se rad utrošen na lom epruvete.

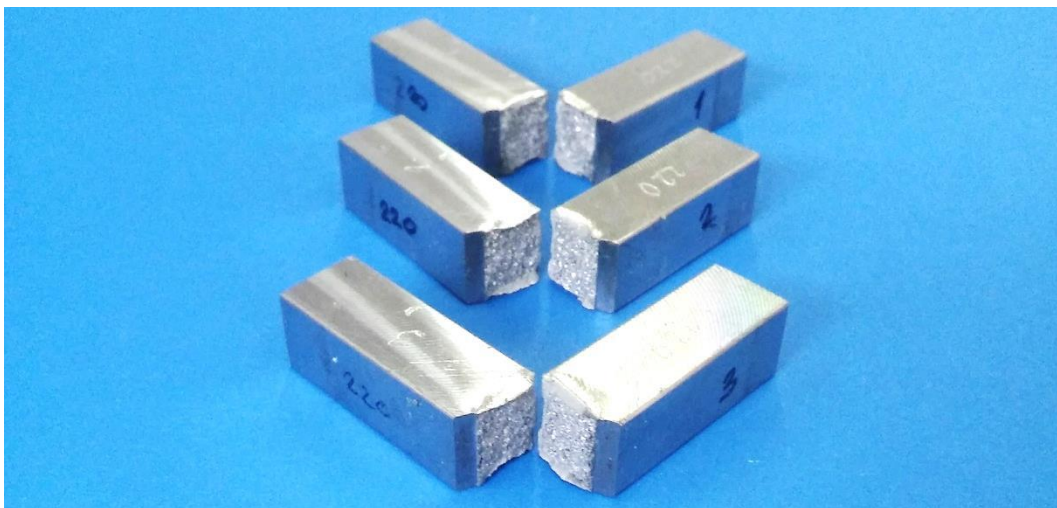
Iznos udarnog rada loma je pokazatelj „žilavosti“ ili „krhkosti“ materijala.



**Slika 37. Charpyjev bat „Otto Wolpert-Werke GmbH“**

Ispitivanje je provedeno na standardnim ispitnim uzorcima dimenzija 10 x 10 x 55 mm s „V“ zarezom dubine 2 mm pri temperaturi ispitivanja od 20 °C. Epruvete su izrezane iz uzdužnog smjera s obzirom na os profila.

Na slici 38 prikazan je izgled prijelomnih površina ispitnih uzoraka. Vidljiva je svijetla površina karakteristična za krhki lom bez plastične deformacije u makro-razmjerima.



**Slika 38. Izgled prijelomnih površina epruveta nakon udarnog opterećenja**

U tablici 6 prikazani su rezultati dobiveni pri ispitivanju udarne radnje loma na 3 epruvete.

**Tablica 6. Rezultati ispitivanja žilavosti**

Oznaka epruvete	Temperatura mjerenja, °C	Žilavost, KV [J]
1	20	23
2	20	18
3	20	25
srednja vrijednost	20	22



#### 4.7. Mjerenje tvrdoće materijala

Analiza mikrotvrdoće provedena je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za materijalografiju u Zagrebu. Mikrotvrdoća pripremljenih uzoraka izmjerena je metodom po Vickersu, na mikrotvrdomjeru PMT – 3, prikazanom na slici 39.

Mikrotvrdoća je mjerena na rubnom i središnjem dijelu profila pod opterećenjem od 1,96 N (HV 0,2).



Slika 39. Mikrotvrdomjer PMT - 3

Vrijednosti mjerenja mikrotvrdoće prikazane su u tablici 7. Na svakoj površini napravljena su po 3 mjerenja.

Tablica 7. Vrijednost mikrotvrdoće HV,02

Broj mjerenja	Rub profila	Sredina profila
1.	269	253
2.	283	255
3.	278	249
srednja vrijednost	277	252

Analiza makrotvrdoće provedena je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Makrotvrdoća pripremljenih uzoraka mjerena je metodom po Vicekersu, uz pomoć tvrdomjera Zwick, prikazanom na slici 40. Mjerenje je provedeno na rubnom i središnjem dijelu profila pod opterećenjem utegom mase 10 kg, to jest silom od 98,04 N.



Slika 40. Tvrdomjer Zwick

U tablici 8 prikazani su rezultati mjerenja makrotvrdoće.

**Tablica 8. Vrijednosti makrotvrdoće HV10**

Broj mjerenja	Rub profila	Sredina profila
1.	240	232
2.	240	225
3.	240	233
srednja vrijednost	240	230



## 5. ANALIZA REZULTATA

### 5.1. Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava

Rezultati kemijske analize pokazuju da se radi o niskolegiranom čeliku s 0,47 %C.

Od legirnih elemenata u čeliku ima 1,03 %Cr i 0,17 %Mo. Osim navedenog, čelik sadrži i manje udjele elemenata poput silicija, mangana, nikla, aluminijsa i bakra koji su nedovoljnog udjela kako bi se smatrali legirnim elementima.

S obzirom na udjele ugljika i legirnih elemenata čelik se može svrstati u niskolegirane Cr-Mo čelike za poboljšavanje.

Prema sve navedenom, najbliži bi bio čeliku oznake 42CrMo4.

### 5.2. Osvrt na analizu mikrostrukture

Provedena analiza mikrostrukture na svjetlosnom i elektronskom mikroskopu pokazala je da čelik ima 100 %-tnu martenzitnu mikrostrukturu.

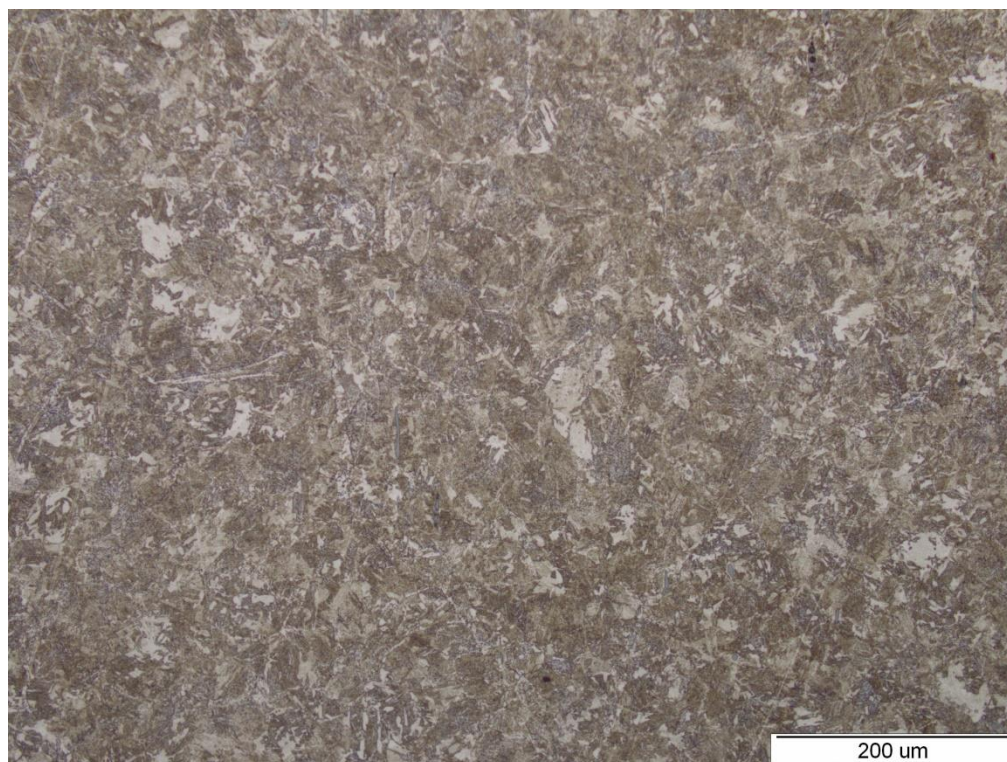
Mikrostruktura rubnog dijela ne razlikuje se značajno od mikrostrukture središnjeg dijela okruglog profila.

Veličina zrna po normi ASTM E 112, iznosi oko 7.

Mjerenjem mikrotvrdoće HV<sub>0,2</sub> na rubu i u sredini profila dobivene su relativno niske vrijednosti (277 HV<sub>0,2</sub> na rubu i 252 HV<sub>0,2</sub> u sredini).

Na temelju mikrostrukture i vrijednosti mikrotvrdoće može se zaključiti da je čelik nakon kaljenja popušten i da je mikrostruktura popušteni martenzit.

Na slikama 41 i 42 prikazana je mikrostruktura čelika.



**Slika 41. Mikrostruktura sredine**



**Slika 42. Mikrostruktura ruba**

### 5.3. Osvrt na rezultate ispitivanja mehaničkih svojstava

Rezultati dobiveni tijekom ispitivanja mehaničkih svojstava uspoređeni su s vrijednostima koje jamči proizvođač materijala te s vrijednostima koje propisuje norma EN 10083-3:2006, [11], za čelik 42CrMo4. Navedena norma propisuje tehničke uvjete isporuke za niskolegiranih čelika za kaljenje i popuštanje.

U tablici 9 prikazane su vrijednosti za granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću, istezljivost, kontrakciju, tvrdoću i žilavost.

Vrijednosti granice razvlačenja, kontrakcije, tvrdoće i žilavosti dobivene tijekom ispitivanja, niže su od vrijednosti koje jamči proizvođač, a isto tako i od vrijednosti koje propisuje navedena norma.

Osobito je nizak iznos žilavosti koja iznosi 22 J. Proizvođač jamči žilavost od 48 J, a norma propisuje minimalno 35 J.

Vlačna čvrstoća i istezljivost su niže od vrijednosti koje jamči proizvođač ali su u granicama koje propisuje norma.

**Tablica 9. Usporedba mehaničkih svojstava čelika 42CrMo4**

Dobivene vrijednosti:	$R_e$ min [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	A min [%]	Z min [%]	HV	KV min [J]
jamči proizvođač	624	832	20	65	255	48
propisuje norma	500	750 - 900	14	55	241-292	35
izmjereno	492	750	19,5	41,27	240 (rub) 230 (sredina)	22

## 6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- kemijskom analizom utvrđeno je kako sastav materijala odgovara čeliku 42CrMo4 s 0,47 %C, 1,03 %Cr i 0,17 %Mo
- čelik se nalazi u popuštenom stanju i mikrostruktura mu se sastoji od 100% popuštenog martenzita
- veličina zrna po normi ASTM E 112 iznosi oko 7
- vrijednosti svih ispitanih mehaničkih svojstava niže su od vrijednosti koje jamči proizvođač
- prema zahtjevima norme EN 10083-3:2006 koja propisuje tehničke uvjete isporuke za niskolegirane čelike za kaljenje i popuštanje, propisane vrijednosti zadovoljavaju samo vlačna čvrstoća i istežljivost.

Može se pretpostaviti, s obzirom da je kemijski sastav u granicama propisanog, da su nezadovoljavajuća mehanička svojstva čelika posljedica neodgovarajuće toplinske obrade.

Prema mehaničkim svojstvima dobivenim tijekom ispitivanja čelik bi se mogao ugraditi u proizvode koji ne zahtijevaju granicu razvlačenja veću od  $492 \text{ N/mm}^2$ , žilavost veću od 22 J i kontrakciju veću od 41 %.

## 7. LITERATURA

- [1] Inženjerski priručnik – ip4, proizvodno strojarstvo, materijali (prvi svezak) : školska knjiga 1998, 27.11.2015.
- [2] <https://bs.scribd.com/doc/288622808/Karakterizacija-materijala>, 27.11.2015.
- [3] <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/SISM/Metalografija%20Fe-C%20legura.pdf>, 27.11.2015.
- [4] Steel and its heat treatment, <https://goo.gl/8ZU39m>, 27.12.2015.
- [5] [http://www.gfos.unios.hr/portal/images/stories/studij/strucni/metalne-konstrukcije/2\\_pojmovi%20i%20ispitivanje%20svojstava.pdf](http://www.gfos.unios.hr/portal/images/stories/studij/strucni/metalne-konstrukcije/2_pojmovi%20i%20ispitivanje%20svojstava.pdf), 28.12.2015.
- [6] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1450170364-0-1-3predavanje\\_materijalii-k3.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1450170364-0-1-3predavanje_materijalii-k3.pdf), 28.12.2015.
- [7] [http://repositorij.fsb.hr/2916/1/18\\_09\\_2014\\_Zavrzni\\_rad\\_-\\_Ivan\\_Nemcic.pdf](http://repositorij.fsb.hr/2916/1/18_09_2014_Zavrzni_rad_-_Ivan_Nemcic.pdf), 29.12.2015.
- [8] [https://bib.irb.hr/datoteka/725857.Nikola\\_imunovi\\_-\\_Zavrni\\_rad.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/725857.Nikola_imunovi_-_Zavrni_rad.pdf), 29.12.2015.
- [9] <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Ispitivanje%20udarne%20radnje%20loma>, 28.12.2015.
- [10] Norma za određivanje veličine zrna ASTM E 112 (ASTM - American Society for Testing Materials)
- [11] Norma EN 10083-3:2006 (Čelici za kaljenje i popuštanje – 3. dio: tehnički uvjeti isporuke za legirane čelike)

**PRILOG:**

1. CD