

# Analiza uzorka loma T vijka sustava za pričvršćivanje željezničkih pragova SKL 14

---

Merkač-Hudopisk, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:829698>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-16**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



DIPLOMSKI RAD br. 014/STR/2020

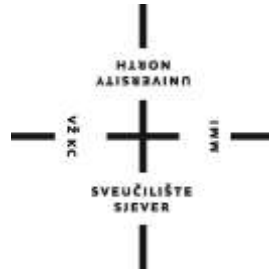
**ANALIZA UZROKA LOMA T VIJKA SUSTAVA  
ZA PRIČVRŠĆIVANJE ŽELJEZNIČKIH  
PRAGOVA SKL 14**

Ivan Merkač-Hudopisk

Varaždin, rujan 2020.

**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**

**Studij Strojstvo**



DIPLOMSKI RAD br. 014/STR/2020

**ANALIZA UZROKA LOMA T VIJKA SUSTAVA  
ZA PRIČVRŠĆIVANJE ŽELJEZNIČKIH  
PRAGOVA SKL 14**

Student:

Ivan Merkač-Hudopisk, 0917/336D

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Sanja Šolić

Varaždin, rujan 2020.

## Popis korištenih oznaka

OZNAKA	OPIS OZNAKE	MJERNA JEDINICA
Re	Vlačna čvrstoća	MPa
Rm	Granica razvlačenja	MPa
A	Produljenje	%
d	Promjer	mm
t	Debljina	mm
S <sub>k</sub>	Stupanj zakaljenosti	-
H <sub>KALJENO</sub>	Tvrdoća kaljenja	-
H <sub>max</sub>	Maksimalna postiziva tvrdoća	-
ϑ <sub>p</sub>	Temperatura popuštanja	%
σ	Naprezanje	MPa
ε	Istezanje	mm/mm
n	Index loma svjetlosti	-
α	Polukut zraka svjetla s lećom objektiva	°
NA	Numerička apertura	-
λ	Valna duljina svjetlosti	nm
M	Povećanje	x
e	Dimenzija koja se razaznaje u objektivu	μm
F	Sila	N
d	Srednja vrijednost dijagonale baze piramide otisnute u materijalu	mm <sup>2</sup>

## Sažetak

Cilj ovog diplomskog rada bio je napraviti ispitivanje vijaka i matica koji su došli sa pragova željezničkih pruga hrvatskih željeznica zbog toga što je došlo do njihova pucanja i oštećenja.

U teoretskom dijelu ukratko su opisani čelici, proizvodnja čelika te je poseban naglasak na skupinu čelika za poboljšavanje. Isto tako opisane su toplinske obrade poput poboljšavanja, žarenja za redukciju zaostalih naprezanja, površinskog kaljenja, umora materijala i na kraju teorijskog dijela opisani su postupci analize uzorka te ispitivanje tvrdoće materijala.

U eksperimentalnom dijelu prikazani su rezultati koji su dobiveni metalografskom i graktografskom analizom dobivenih uzoraka. U sklopu navedenih analiza napravljena je analiza mikrostrukture svjetlosnim i skenirajućim elektronskim mikroskopom te analiza prijelomnih površina stereo mikroskopom. Također, napravljeno je i ispitivanje mikrotvrdoće Vickerso-ovom metodom s ciljem dobivanja potpunih podataka o stanju i kvaliteti donesenih uzoraka.

**Ključne riječi:** konstrukcijski čelici; toplinska obrada čelika; metalografija; mjerenje tvrdoće, analiza mikrostrukture

## **Summary**

The aim of this paper is to examine the bolts and nuts that came from sleepers of the Croatian railways because of their cracking and damage.

The theoretical part briefly describes steels, steel production and special emphasis is on the group of steels for improvement. Also are described heat treatments such as improvement, annealing to reduce residual stresses, surface hardening, material fatigue and on the end of the theoretical part are described sample analysis procedures and hardness testing of materials.

In the experimental part, the results obtained by metallographic and fractographic analysis of the obtained samples are presented. As part of the above analyzes, the analyzes of the microstructure was performed with a light and scanning electron microscope and the analysis of fracture surfaces with a stereo microscope. Also, a microhardness test was performed by the Vickers method in order to obtain complete data on the condition and quality of the samples.

**Keywords: mild steel; heat treatments; metallography; hardness testing, microstructure analysis**

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Ivan Merkač Hudopisk

MATIČNI BROJ 0917/336D

DATUM 22.09.2020.

KOLEKCIJ Ponašanje materijala u eksploataciji

NASLOV RADA Analiza uzroka loma T vijka sustava za pričvršćivanje željezničkih pragova SKL 14

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Fracture analysis of the SKL 14 Series T bolt Rail Fastening System

MENTOR dr.sc. Sanja Šolić, dipl.ing.stroj.

ZVANJE izvanredna profesorica

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc.dr.sc. Matija Bušić - predsjednik povjerenstva

2. izv.prof.dr.sc. Sanja Šolić - mentor

3. doc.dr.sc. Zlatko Botak - član

4. doc.dr.sc. Tomislav Veliki - rezervni član

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 014/STR/2020

OPIS

Cilj diplomskog rada je napraviti analizu uzroka loma vijčanog spoja T vijka i matice sustava SKL 14 za pričvršćivanje željezničkih pragova i tračnica na željezničkoj infrastrukturi Republike Hrvatske. U teorijskom dijelu diplomskog rada potrebno je u kratko opisati čelik kao najzastupljeniji tehnički materijal današnjice te postupke proizvodnje uz detaljniji opis grupe konstrukcijskih čelika za strojogradnju podgrupa čelika za poboljšavanje. Također potrebno je opisati postupke toplinske obrade kojima se čelici za poboljšavanja najčešće podvrgavaju uz jasno navedenu svrhu i razloge. Potreban je dati i kratki osvrt na lom uslijed umora materijala uz detaljniji opis nisko cikličkog umora te opisati postupke metalografske pripreme uzoraka za analizu prijelomnih površina i uzoraka svjetlosnom i elektronskom mikroskopijom te ispitivanje mikrotrdoće metodom Vickers. U praktičnom dijelu rada potrebno je pripremiti tri reprezentativna uzorka standardnim metalografskim metodama pripreme uzoraka, ispitati prijelomnu površinu haviranog vijka na stereo mikroskopu te na skenirajućem elektronskom mikroskopu. Svjetlosnim mikroskopom analizirati mikrostrukturu tri uzorka te na istima ispitati mikrotrdoću u rubnom sloju i u jezgri vijaka. Cilj provedenih ispitivanja je dobiti potpune podatke o stanju i kvaliteti zaprimljenih uzoraka te pronaći uzrok loma vijčanog spoja.

ZADATAK URUČEN

23.09.2020.

POTRIS MENTORA

SVUČILIŠTE SJEVER

SVUČILIŠTE  
SJEVER



IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

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

Ja, IVAN HERKAC-HUDOPISK (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ANALIZA UZROKA KOHAT VILKA SUSTAVA ZA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova. PRIČVRŠIVANJE ŽELJEZNIČKIH PRAGOVA SKL 14

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Ivan Herkac  
(vlastoručni potpis)

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

Ja, IVAN HERKAC-HUDOPISK (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ANALIZA UZROKA KOHAT VILKA SUSTAVA (upisati naslov) čiji sam autor/ica. ZA PRIČVRŠIVANJE ŽELJEZNIČKIH PRAGOVA SKL 14

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Ivan Herkac



# Sadržaj

1.	Uvod.....	8
2.	Čelik.....	10
2.1	Dobivanje čelika .....	12
2.2	UIC 864-2 Čelik Q235 .....	13
2.3	AISI 1045 Čelik C45.....	14
2.4	Poboljšavanje čelika i čelici za poboljšavanje.....	16
2.5	Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja.....	20
2.6	Kovanje .....	22
3	Umor materijala .....	23
3.1	Nisko ciklički umor materijala- Low cycle fatigue .....	26
4	Ispitivanje i metalografska analiza uzoraka .....	28
4.1	Rezanje i zalijevanje uzorka .....	29
4.2	Brušenje.....	30
4.3	Poliranje.....	31
4.4	Nagrivanje.....	32
4.5	Svjetlosni mikroskop.....	33
4.6	Elektronski mikroskop .....	35
4.6.1	Skenirajući elektronski mikroskop .....	36
4.7	Mjerenje tvrdoće .....	37
4.7.1	Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće .....	37
5	Eksperimentalni dio .....	39
5.1	Spojnicica za skretnice SKL 14 za pričvršćivanje željezničkih pragova.....	43
5.2	Analiza mikrostrukture.....	47
5.3	Priprema metalografskih uzoraka .....	48
5.3.1	Brušenje.....	48
5.3.2	Poliranje .....	49
5.3.3	Nagrivanje .....	51
5.4	Pripremljeni uzorci za analizu .....	52
5.5	Analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu .....	54

5.6	Analiza mikrostrukture skenirajućim elektronskim mikroskopom.....	60
5.7	Mjerenje mikrotvrdoće.....	63
6.	Analiza rezultata i diskusija.....	64
7.	Zaključak.....	65
8.	Literatura.....	67
	Popis slika.....	70
	Popis tablica.....	71

## 1. Uvod

Mnogi znanstvenici ili inženjeri će bez obzira na svoju specijalnost biti suočeni sa problemom projektiranja koji uključuju i izbor materijala. Pravi problem je odabir pravog materijala optimalnih svojstava za određenu namjenu između tisuće dostupnih. Postoji nekoliko kriterija za donošenje konačne odluke. Prije svega je važan uvjet funkcionalnosti na temelju kojih će biti utvrđena potrebna svojstva materijala. Rijetko kad materijal posjeduje idealnu kombinaciju svojstava. Na primjer materijal visoke čvrstoće ima ograničenu istezljivost, dok materijali velike istezljivosti imaju malu čvrstoću. Sljedeće što je važno kod izbora materijala je degradacija svojstava materijala u eksploataciji. Na primjer korozija ili povišena temperatura mogu rezultirati smanjenju čvrstoće. Posljednji i isto tako vrlo važan kriterij je ekonomski, odnosno cijena gotovog proizvoda. Na primjer neki materijal može biti idealnih kombinacijskih svojstava, ali je preskup. Trošak gotovog proizvoda uključuje troškove materijala i troškove kod obrade za proizvodnju željenog oblika. Cilj je detaljnim razmatranjem prednosti i mana materijala isto kao i odgovarajućim postupkom obrade, odabrati materijal sa najvećom učinkovitosti u sva tri navedena pogleda- svojstava, geometrije i ekonomskih čimbenika da bi materijal bio idealan u svojoj funkciji bez da dođe do njegova oštećenja, pucanja i drugih negativnih čimbenika.

Ovaj diplomski rad izrađen je zbog potrebe ispitivanja vijaka i matica koji se nalaze na pragovima željezničkih pruga hrvatskih željeznica, a došlo je do njihova oštećenja i pucanja prije njihovog predviđenog vijeka trajanja što zahtjeva daljnje analize kako bi se saznalo da li se i kod ostalih vijaka i matica ugrađenih u istom projektu održavanja može očekivati slično ponašanje te pojava prijeloma.

Vijci i matice su oznake DIN 14 STV-2 i izrađeni od vrste čelika za poboljšavanje, točnije od materijala C45. Ova vrsta materijala široko je dostupna u svijetu i ima relativno nisku cijenu te isto tako i viši udio ugljika u strukturi što daje i višu tvrdoću i čvrstoću materijala.

Vijci i matice se svakodnevno proizvode i to u velikim količinama, tonama, pa se umjesto odgovarajuće vrste materijala Q235 po normi UIC-a odabrao materijal slabijih mehaničkih svojstvima što je i naposljetku rezultiralo u oštećenju i pucanju vijaka i matica. Nepravilna montaža također utječe na pojavu pucanja i oštećenja vijaka i matica.

Mehanička svojstva materijala ovise o mikrostrukturi materijala dok mikrostruktura ovisi o kemijskom sastavu materijala i tehnološkom procesu obrade proizvoda te o toplinskoj obradi materijala.

Pomoću svjetlosnog i skenirajućeg elektronskog (SEM) mikroskopa analizirana je mikrostruktura uzorka kod različitih povećanja, a prije toga su uzorci prošli kroz pojedine korake pripreme uzorka i to: rezanja, zalijeivanja, brušenja, poliranja i na kraju nagrizanja. Na kraju se je izmjerila tvrdoća pomoću Vickersove metode.

Rezultati će nakon provedenih ispitivanja biti prikazani u eksperimentalnom dijelu i biti će doneseni zaključci zašto je došlo do oštećenja i pucanja vijaka i matica.

Kao što je već spomenuto, ova vrsta čelika spada u skupinu niskolegiranih čelika za poboljšavanje i pritom bi čelik trebao imati relativno visoku granicu razvlačenja, visoku vlačnu čvrstoću, dovoljnu žilavost i visoku dinamičku izdržljivost.

Uzorci, odnosno vijci i matice ispitivali su se u Laboratoriju za Metalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Cilj ovog diplomskog rada je doći do rješenja problema zbog čega je zapravo došlo do pucanja i oštećenja vijaka i matica na pragovima željezničkih pruga.

## 2. Čelik

Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika, gdje je udio ugljika najviše 2%, a ostalo je željezo te prateći i legirni elementi. U čeliku su također prisutne razne nečistoće, odnosno kemijski elementi pratioci. Čelik je u današnje vrijeme jedan od najvažnijih tehničkih materijala kako u proizvodnji tako i u primjeni. Svjetska proizvodnja čelika je veća od 900 milijuna tona, što je više od 50% od ukupne proizvodnje svih tehničkih materijala, a deset puta više od mase svih proizvedenih metala i njihovih legura. Svaki čelični poluproizvod prolazi obradu deformiranjem, i to prije svega valjanje, ali i postupke poput kovanja, prešanja, izvlačenja itd. [1]

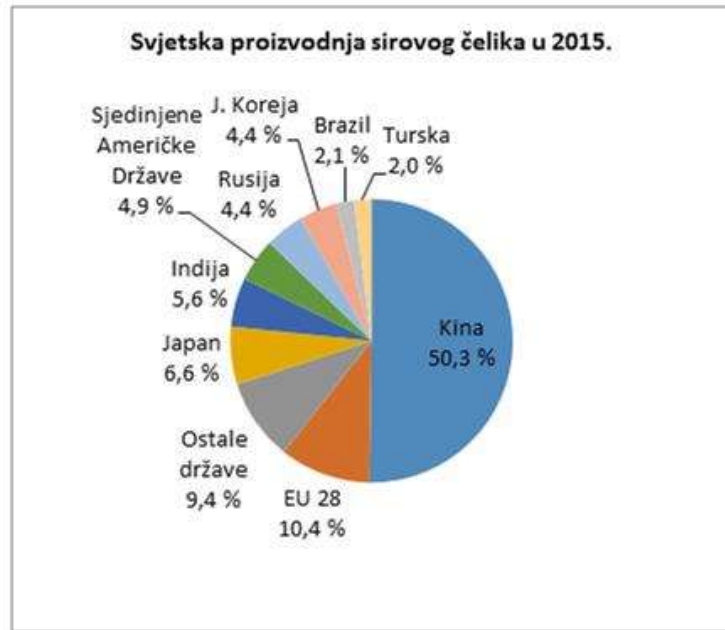
Najčešći poluproizvodi čelika su:

- limovi
- cijevi
- trake
- profili
- šipke itd.[1]

U svijetu se najviše čelika proizvodi u Kini, pa slijede Japan, Njemačka i SAD. Na Afričkom kontinentu je vrlo slaba proizvodnja čelika, i do 20 kg po stanovniku. U Hrvatskoj je 1990. godine proizvedeno 480 000 tona, a 2010. godine samo 95 000 tona, što je vrlo malo, približno 22 kg po stanovniku. [2] Na slikama 1. i 2. prikazani su čelični vijci i matice te dijagram svjetske proizvodnje sirovog čelika u 2015. godini.



Slika 1. Čelični vijci i matice [3]



Slika 2. Svjetska proizvodnja sirovog čelika u 2015. godini [4]

Čelik ima optimalnu kombinaciju različitih svojstava poput čvrstoće, rezljivosti, oblikovljivosti, žilavosti, uz relativno povoljnu cijenu proizvodnje. [1]

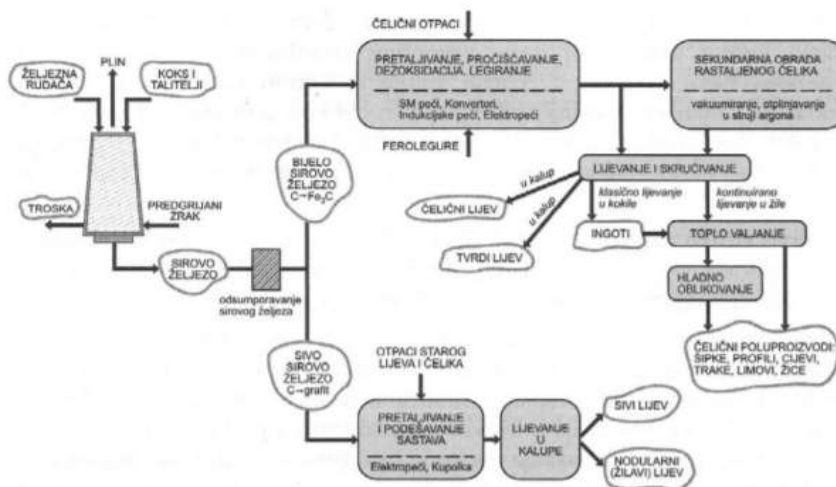
Čelici se karakteriziraju mnogim svojstvima poput mikrostrukture, kemijskog sastava, proizvodnje, oblika i stanja, primjene itd. Prema tipu mikrostrukture, čelici mogu biti: feritni, perlitni, feritno-perlitni, martenzitni, bainitni, austenitni, ledeburitni itd. Što se tiče kemijskog sastava, čelici mogu biti zajamčenog ili nezajamčenog sastava, ugljični ili legirani jednostruko ili višestruko niskolegirani ili visokolegirani. Proizvode se postupcima elektropretaljivanja, kisikovim konverterima, sekundarnom metalurškom obradom, pretaljivanjem pod troskom itd. Najčešći oblici čeličnih proizvoda su: šipke, trake, cijevi i limovi. Stanja u kojima pojedina vrsta čelika može biti pri isporuci su: hladno-valjano, hladno-vučeno, ljušteno, brušeno, kovano, polirano, toplinski obrađeno itd. [1]

Dvije osnovne skupine čelika su: konstrukcijski čelici i alatni čelici. Konstrukcijski čelici se upotrebljavaju za opću namjenu i to za zavarene konstrukcije i strojne elemente poput zupčanika, osovina, vijaka, matica itd. Alatni čelici se upotrebljavaju za izradu alata za toplo i hladno oblikovanje metala, mjernih i drugih alata. [1]

Istaknuta svojstva čelika su: granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, dinamička izdržljivost, žilavost kod niskih temperatura, otpornost na trošenje, oblikovljivost, rezljivost itd. [1]

## 2.1 Dobivanje čelika

Proces proizvodnje čelika počinje u visokoj peći gdje se željezna ruda oslobađa od kisika i to procesima redukcije. Redukcijska sredstva su koks i nafta, kao nosioci ugljika. Redukcija rudača odvija se u visokoj peći pomoću ugljika iz koksa. Reducirano željezo je u dodiru s vapnencom, kremenom, koksom, zrakom i židom peći pa je otopilo određene količine ugljika, nečistoća (P i S) te pratećih elemenata (Mn i Si). Nakon toga iz visoke peći izlazi bijelo ili sivo sirovo željezo s visokim masenim udjelom ugljika (od 2 do 4%), fosfora i sumpora te ostalih primjesa (od 6 do 10%). Kod skrućivanja taljevine iz visoke peći ovisno o brzini hlađenja i ovisno o masenom udjelu Si ili Mn nastaje bijelo ili sivo sirovo željezo. Bijelo sirovo željezo je osnovna sirovina za proizvodnju čelika, dok se sivo sirovo željezo koristi za sive lijevove. Bijelo sirovo željezo ima svijetlu boju, jer je ugljik najčešće vezan u cementitu zbog bržeg skrućivanja i višeg masenog udjela cementatora (Mn). Od ukupne proizvodnje sirovog željeza gotovo 90% se prerađuje u čelik. Pretalijavanje sirovog željeza se vrši zbog toga što je sirovo željezo tehnički neuporabivo zbog krhkosti koja je posljedica visokog udjela fosfora i ugljika. Postupkom pretalijavanja dolazi do smanjenja nečistoća, pratećih elemenata i ugljika u čeliku na razinu koja odgovara traženom kemijskom sastavu čelika. Ovaj postupak se naziva pročišćavanje i provodi se u konvertorima ili drugim pećima za pretalijavanje. Ugljik u peći se upuhivanjem zraka ili kisika veže u CO ili CO<sub>2</sub>, dok se ostali elementi vežu u okside i odstranjuju. Taljevina je proizvod pročišćavanja. Nakon pročišćavanja taline slijedi proces dezoksidacije. Dezoksidacija je postupak otklanjanja kisika u proizvodnji čelika i zasniva se na djelovanju elemenata koji imaju nešto veći afinitet prema kisiku od željeza. Tijekom proizvodnje čelik dolazi u dodir s dušikom i kisikom i pri povišenim temperaturama može otopiti velike količine ovih plinova. Čelici se u finalne proizvode oblikuju hladnim valjanjem, toplim valjanjem, kovanjem i izvlačenjem. [1] Na slici 3. prikazan je shematski prikaz dobivanja čelika i željeznih lijevova.



Slika 3. Shematski prikaz dobivanja čelika i željeznih lijevova [1]

## 2.2 UIC 864-2 Čelik Q235

Čelik oznake Q235 je čelik koji pripada niskougljičnim čelicima za cementiranje. Maseni udio ugljika propisan normom može biti najviše 0,17%, a od legirnih elemenata sadrži silicij, mangan, te nečistoće fosfor i sumpor. U tablicama 1., 2. i 3. prikazani su kemijski sastav, mehanička svojstva i mogući režimi toplinske obrade čelika Q235.

Tablica 1. Kemijski sastav čelika Q235. [5]

	Min	Nominalno	Max
C%	-	-	0,17
Si%	-	-	0,30
Mn%	0,35	-	0,80
P%	-	0.035	-
S%	-	0,03	-

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika Q235. [5]

Vlačna čvrstoća, $R_e$ , MPa	231
Granica Razvlačenja, $R_m$ , MPa	154
Istezljivost, $A$ , %	56
Brinellova tvrdoća, HBS	235-268
Rockwellova tvrdoća, HRC	30

Tablica 3. Mogući režimi toplinske obrade čelika Q235. [5]

Žarenje	+
Kaljenje	+
Gašenje	+
Normalizacija	+



### 2.3 AISI 1045 Čelik C45

Čelik oznake C45 je srednje ugljični čelik koji spada u skupinu čelika za poboljšavanje. Ova vrsta čelika ima dobra vlačna svojstva i svojstva obradivosti te dobar omjer mehaničkih svojstava i cijene proizvodnje, tj. dostupnosti. C45 čelik se isporučuje u vruće valjanom ili povremeno u normaliziranom stanju. Raspon vlačne čvrstoće je između 570 i 700 MPa, dok je raspon tvrdoće prema Brinellu u žarenom stanju između 170 i 210 HBS.

U tablicama 4., 5., 6. i 7. prikazani su kemijski sastav, mehanička svojstva u kaljenom stanju, mehanička svojstva u normaliziranom stanju u ovisnosti o dimenzijama grede i temperatura za pojedine obrade čelika C45.

Tablica 4. Kemijski sastav čelika C45. [6]

C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	P, %	S, %	Cr, %	Mo, %
0,43-0,5	max 0,4	0,5-0,8	max 0,4	max 0,045	max 0,045	max 0,4	max 0,1

Tablica 5. Mehanička svojstva u kaljenom stanju čelika C45. [6]

Promjer $d_2$ , mm	Debljina $t$ , mm	Granica tečenja $R_e$ , MPa	Vlačna čvrstoća $R_m$ , MPa	Kontrakcija, Z, %
<16	<8	min 490	700-850	min 35
<17-40	<8<=20	min 430	650-800	min 40
<41-100	<20<=60	min 370	630-780	min 45

Tablica 6. Mehanička svojstva u normaliziranom stanju čelika C45 u ovisnosti o dimenzijama grede. [6]

Promjer $d_2$ , mm	Debljina $t$ , mm	Granica tečenja $R_e$ , MPa	Vlačna čvrstoća $R_m$ , MPa	Kontrakcija, Z, %
<16	<16	min 390	min 620	min 14
<17-100	<16<=100	min 305	min 305	min 16
<101-250	<100<=250	min 275	min 560	min 16

Tablica 7. Temperatura za pojedine obrade za čelik C45. [6]

Kovanje ili vruće valjanje	850-1100 °C
Normalizacija	840-880 °C / zrak
Žarenje	680-710 °C / peć
Kaljenje	820-860 °C / voda, ulje
Kaljenje	550-660 °C / zrak

Čelik C45 se primjenjuje u raznim primjenama koje zahtijevaju višu čvrstoću i nosivost te za izradu vijaka, klipnjača, torzijskih batova, zupčanika, šipki itd. [6] Na slici 4. prikazane su šipke od čelika C45.



Slika 4. Šipke od C45 čelika [7]

## 2.4 Poboljšavanje čelika i čelici za poboljšavanje

Poboljšavanje čelika je postupak toplinske obrade čelika koji se sastoji od:

- kaljenja i
- visoko-temperaturnog popuštanja.

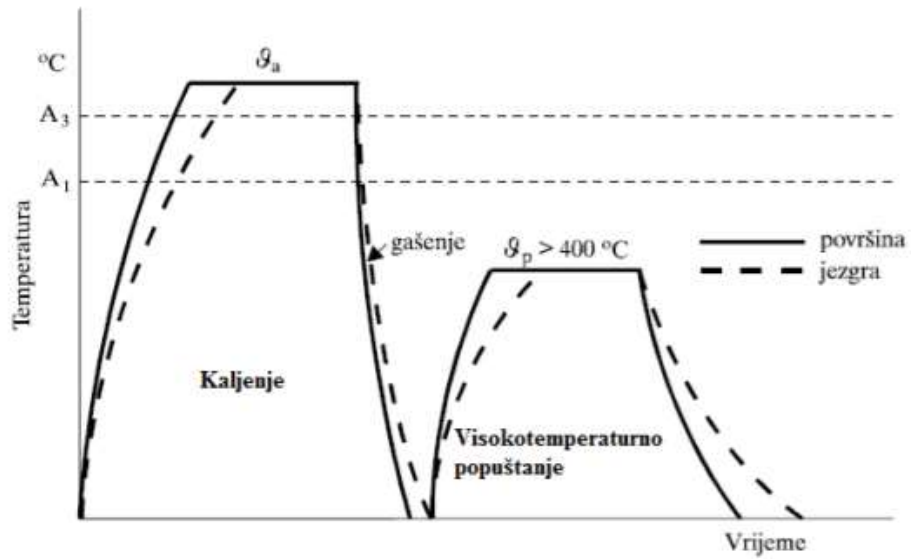
Visokotemperaturno popuštanje provodi se na temperaturi iznad 400°C. Kaljenje je postupak toplinske obrade koji se provodi s ciljem postizanja što više tvrdoće na površini i što jednoličnije raspodjele tvrdoće po poprečnom presjeku predmeta tj. cilj je da se neki predmet zakali i prokali. [8]

Zakaljivost je svojstvo čelika da se postigne što viša tvrdoća na površini. Zakaljivost ovisi o masenom udjelu ugljika u čeliku. Udio ugljika koji ostaje u karbidima ne utječe na zakaljivost, međutim loše utječe na prokaljivost. Ako se želi postići maksimalna tvrdoća, čelik je potrebno gasiti brzinom iznad nadkritične linije ohlađivanja i to s temperature austenitizacije. Legirni elementi ne utječu na zakaljivost čelika.

Prokaljivost je svojstvo čelika da se gašenjem s temperature austenitizacije postigne što jednoličnija tvrdoća na poprečnom presjeku. Za razliku od zakaljivosti koje ovisi samo o masenom udjelu ugljika, na prokaljivost osim ugljika utječe i udio legirnih elemenata. Prokaljivost će biti bolja ako postoji veća brzina gašenja i predmet koji se kali je manjih dimenzija. Na prokaljenost utječu dimenzije predmeta, a i intenzitet gašenja. „Gornja kritična brzina gašenja“ je linija iznad koje tvrdoća više ne može rasti. Važno je još spomenuti da je stupanj odnosno mjera prokaljenosti  $S_K$ , omjer između tvrdoće kaljenja na mjestu presjeka i maksimalno postizive tvrdoće za čelik. [8]

Na prokaljivost utječe udio legirnih elemenata i veličina austenitnog zrna. [9]

Veća žilavost čelika se postiže optimiranjem temperature visokotemperaturnog popuštanja u ovisnosti o kombinaciji svojstava koju želimo postići. Kod popuštanja može se pojaviti krhkost popuštanja. Krhkost popuštanja je pojava smanjenja žilavosti nakon popuštanja nekih vrsta čelika u temperaturnom rasponu od 325 pa do 400°C te se ugrijavanje u ovom području izbjegava. Postoji i način da se krhkost popuštanja smanji kod čelika koji su legirani s manganom i kromom, a to je moguće brzim hlađenjem s temperature popuštanja. Temperatura popuštanja se može odrediti iz dijagrama ovisno o traženim svojstvima nakon poboljšavanja. Na slici 5. prikazan je tehnološki dijagram postupka poboljšavanja čelika. [10]



Slika 5. Postupak poboljšavanja čelika [10]

Čelici za poboljšavanje su čelici koji sadrže od 0,3 do 0,6% ugljika. Maseni udio nečistoća (sumpora i fosfora) je manji od 0,035%. Ova vrsta čelika ima homogenu mikrostrukturu i mali udio nemetalnih uključaka. Čelici za poboljšavanje pripadaju skupini nelegiranih ili niskolegiranih konstrukcijskih čelika koji nastoje postići odgovarajuću granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću, žilavost i dinamičku izdržljivost. [1; 11] Na slici 6. prikazana je mikrostruktura visokopopuštenog martenzita.



Slika 6. Mikrostruktura poboljšanog čelika- visokopušteni martenzit [11]

Pravilnim odabirom visoko-temperaturnog popuštanja moguće je postići optimalnu kombinaciju žilavosti i vlačne čvrstoće srednjeg i visoko-ugljičnog martenzita. Za razliku od visokog, niskim popuštanjem se postižu više vrijednosti granice razvlačenja, ali bez obzira na to proizvod i dalje ostaje krhak. Najveća vrijednost granice razvlačenja koje čelici za poboljšavanje mogu postići je 1200 MPa pri temperaturi popuštanja iznad 500°C, (najčešće 550-680°C). [11]

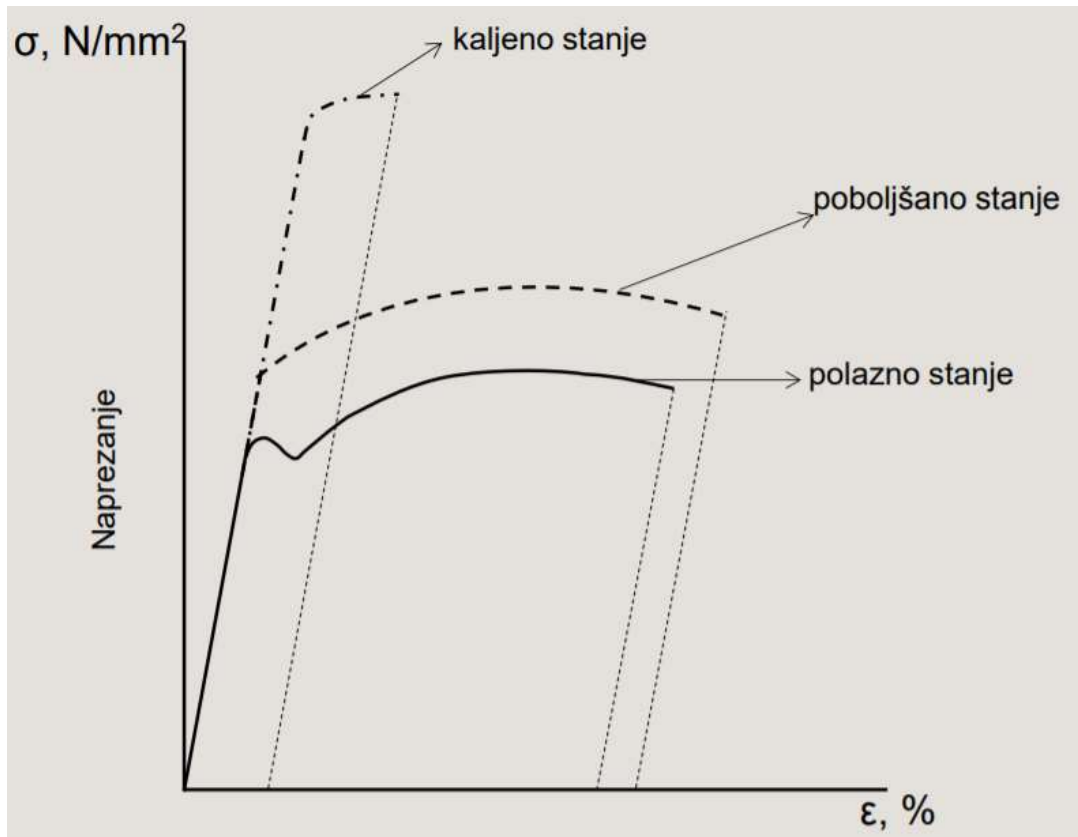
Na slici 7. prikazana je tablica s najčešće korištenim čelicima za poboljšavanje. Čelici za poboljšavanje najčešće se obrađuju odvajanjem čestica u mekožarenom stanju.

Vlačna čvrstoća se povećava s porastom ugljika, ali se smanjuje žilavost. [11]

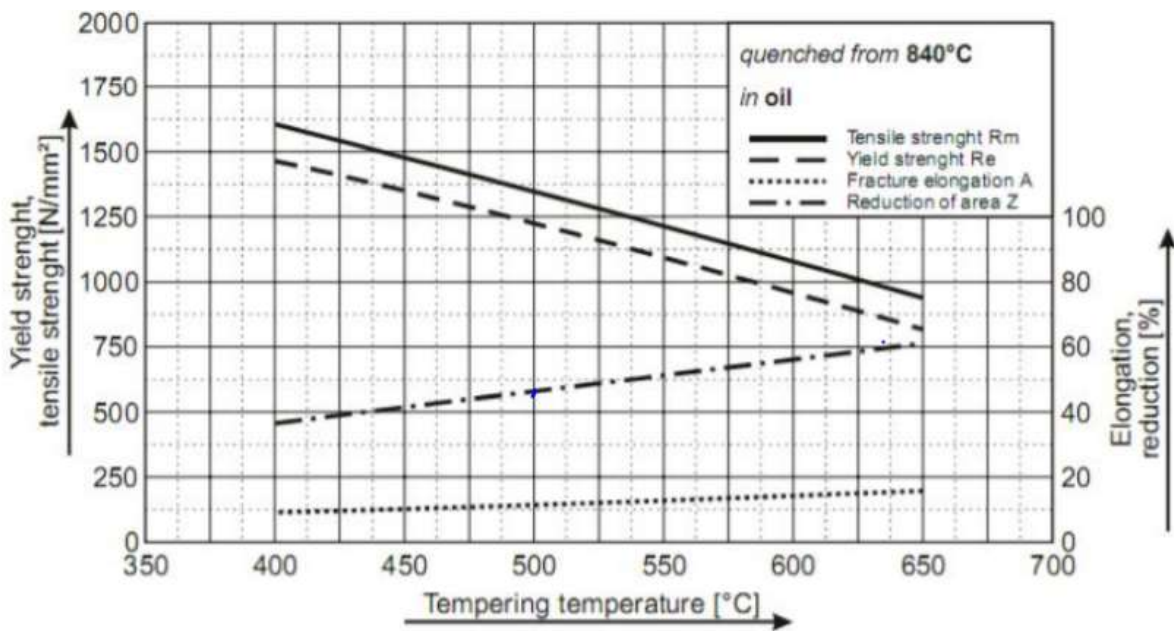
Oznaka čelika		Sastav "ostalo" %	Stanje meko žareno HB <sub>max</sub>	Promjer proizvoda 16-40 mm*				Promjer proizvoda 160-250 mm*				Toplinska obradba, °C/hlađenje	
DIN 17006	HRN			R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup>	R <sub>p0.2</sub> , N/mm <sup>2</sup> , min.	A <sub>5</sub> , %	KV, J, min.	R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup>	R <sub>p0.2</sub> , N/mm <sup>2</sup> , min.	A <sub>5</sub> , %	KV, J, min.	Kaljenje	Popuštanje
C35 Ck35	Č1330 Č1331	-	172	580-730	365	19	41					840-870 voda	550-660 zrak, peč
C45 Ck45	Č1530 Č1531	-	206	660-810	410	16	27					820-850 voda	550-660 zrak, peč
C60 Ck60	Č1630 Č1631	-	243	780-930	490	13	-					800-830 voda	550-660 zrak, peč
28 Mn 6	Č3135		223	690-840	490	15	48					830-860 voda, ulje	550-660 ulje
34 Cr 4	Č4130		217	780-930	590	14	48					840-870 voda, ulje	540-680 ulje
25 CrMo 4	Č4730	0,2 Mo	217	780-930	590	14	55					850-880 ulje	540-680 zrak, peč
34 CrMo 4	Č4731	0,2 Mo	217	880-1080	665	12	50	690-840	460	15	48	840-870 ulje	540-680 zrak, peč
42 CrMo 4	Č4732	0,2 Mo	217	980-1180	765	11	41	740-890	510	14	41	830-860 ulje	540-680 zrak, peč
30 CrMoV 9	Č4734	0,2 Mo 0,15 V	248	1230-1430	1030	9	34	880-1080	685	12	48	850-880 ulje	540-680 zrak, peč
50 CrV 4	Č4830	0,15 V	235	980-1180	785	10	34	780-930	590	13	34	830-860 ulje	540-680 zrak
36 CrNiMo 4	Č5430	1 Ni 0,2 Mo	217	980-1180	785	11	41	740-890	540	14	48	830-860 ulje	540-680 zrak
30 CrNiMo 8	Č5432	2 Ni 0,4 Mo	248	1230-1430	1030	9	34	880-1080	685	12	48	830-860 ulje	540-680 zrak

Slika 7. Čelici za poboljšavanje [11]

Nelegirani čelici za poboljšavanje se primjenjuju kod izrade strojnih dijelova kao na primjer manje opterećenih zupčanika, osovina generatora, sidrenih vijaka, strojnih vretena, svornjaka itd. Za razliku od nelegiranih čelika, legirani čelici za poboljšavanje se primjenjuju kod izrade strojnih dijelova koji su pod većim opterećenjem kao na primjer bregastih osovina, koljenastih osovina, osovina s unutarnjim izgaranjem, visokopterećenih zupčanika, lančanika dizala itd. [11] Na slici 8. prikazan je dijagram naprezanja i deformacija u polaznom stanju, poboljšanom stanju i u kaljenom stanju, dok je na slici 9. prikazan kvalitativni dijagram poboljšavanja čelika.



Slika 8. Dijagram naprezanja i deformacija u polaznom stanju, poboljšanom stanju i u kaljenom stanju [12]



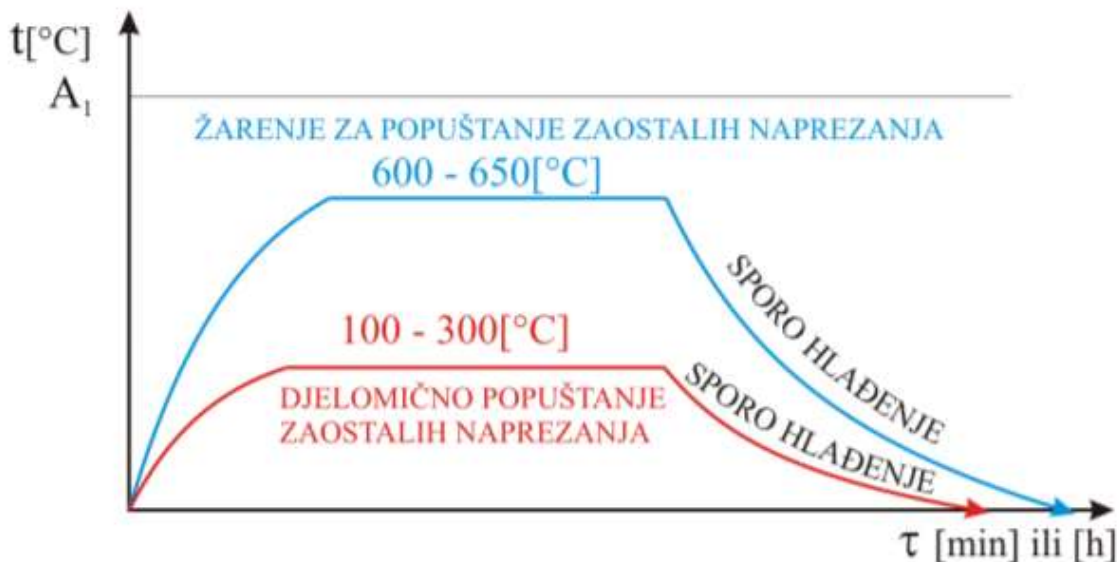
Slika 9. Kvalitativni dijagram poboljšavanja čelika [12]



## 2.5 Žarenje za redukciju zaostalih napreznaja

Žarenje za redukciju zaostalih napreznaja je postupak toplinske obrade koja se sastoji od grijanja u temperaturno područje između 400 i 650°C te sporog hlađenja s ciljem redukcije zaostalih napreznaja bez promjena mikrostrukture i ostalih mehaničkih svojstava. Izvodi se ako su u metalu zaostale unutarnje napetosti koje su posljedica gnječenja ili toplinskog djelovanja poput lijevanja, kovanja, kaljenja, zavarivanja itd. Ova napreznaja se superponiraju s vanjskim opterećenjem u eksploataciji izazvanim napreznajima, pa brže dolazi i do loma. [12; 13]

Na slici 10. prikazan je dijagram žarenja za redukciju zaostalih napreznaja.



Slika 10. Dijagram žarenja za redukciju zaostalih napreznaja [13]

Smanjenje zaostalih napreznaja nije jedini efekt ovog žarenja. Također dolazi i do:

- poboljšanja duktilnosti
- poboljšanja dimenzijske stabilnosti prilikom strojne obrade
- poboljšanja žilavosti
- difuzije vodika iz zavarenog spoja
- smanjenja sklonosti napetosnoj koroziji
- smanjenju efekta hladnog oblikovanja itd. [13]

Do sniženja zaostalih napreznja dolazi zbog smanjenja granice razvlačenja na povišenim temperaturama. Dolazi do plastične deformacije zato što su zaostala napreznja na temperaturi žarenja manja od granice razvlačenja. Na temperaturi žarenja zaostala napreznja ne nestaju u potpunosti nego padaju na vrijednost granice razvlačenja materijala. [14]

Kada se provodi žarenje za redukciju zaostalih napreznja, dolazi i do negativnih efekata. Na primjer moguće je smanjiti čvrstoću osnovnog materijala i to kod poboljšanih čelika ako bi temperatura žarenja premašila temperaturu popuštanja. Isto tako kod niskolegiranih V i Mo čelika može doći do sekundarnog povećanja tvrdoće gdje se izdvajaju karbidi i pri tome dolazi do pada žilavosti. Kod srednje legiranih čelika pri zavarivanju može doći do transformacije zaostalog austenita u martenzit. [14]

Na slici 11. prikazan je postupak toplinske obrade žarenja.



*Slika 11. Postupak toplinske obrade- žarenje [15]*



## 2.6 Kovanje

Kovanje je jedan od najraširenijih i najstarijih postupaka oblikovanja metala deformiranjem gdje se višestrukim udarnim djelovanjem primjenom tlačne sile vrši oblikovanje i postizanje željenog oblika. [16]

Postoje dva načina kovanja: ručno, udarcima čekića na nakovnju, ili strojno, udarcima bata ili malja.

Karakteristike tehnologije kovanja su:

- dobra kvaliteta površine
- velika točnost dimenzija
- vrlo visoka efektivnost
- mogućnost postizanja specifičnih fizikalnih i mehaničkih karakteristika te zahtijevnijih struktura koje se ekonomično ne mogu postići drugim tehnologijama (kao na primjer koljenasta vratila, zupčanici, ventili itd.). [16]

Postoje dvije vrste kovanja: slobodno kovanje i kovanje u ukovnjima. Zajedničko tim postupcima je što se od početnog oblika, sirovca pa do završnog oblika dolazi postepeno kroz više faza s prethodnim čitavim nizom predoperacija.

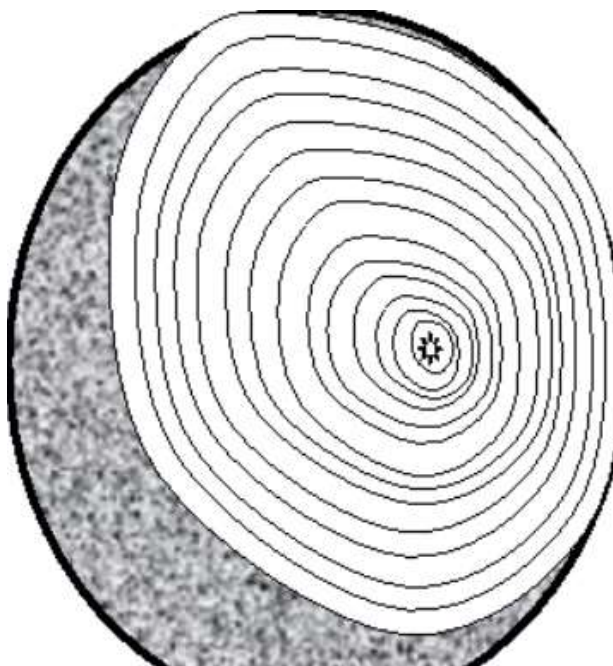
Kod slobodnog kovanja materijal slobodno teče u radijanom smjeru, pa otkivak ne postiže točne dimenzije, a ni ravne plohe, kao na primjer kod ručnog kovanja (sabijanje, raskivanje, iskivanje, kovačko probijanje i savijanje), te strojnog kovanja na batovima i na mehaničkim, vretenastim i hidrauličkim prešama. [16]

Kovanjem u ukovnju izradak se oblikuje kroz više faza gdje dolazi do prilagođavanja početnog oblika konačnom. Širenje materijala je ograničeno zbog same konstrukcije ukovnja. Postoje dvije vrste i to su kovanje u ukovnju s kanalom za vijenac i kovanje u zatvorenom ukovnju. Kod otvorenog ukovnja formira se vijenac u koji odlazi višak materijala, koji se krza i radi završna obrada, a kod zatvorenog ukovnja kuje se na gotovu geometriju te nema daljnje obrade. Kovanje u ukovnjima je vrsta kovanja namijenjena za serijsku proizvodnju poput ključeva za odvrtnje matica, vijaka, raznih ručnih alata, klipnjača, radilica automobila itd. [16]

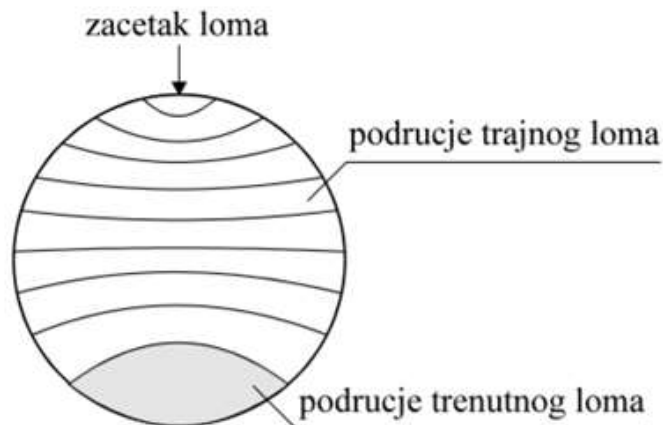
### 3 Umor materijala

Dijelovi strojeva i konstrukcija najčešće u praksi nisu napregnuti statičkim naprežanjem već dinamičkim (promjenjivim) naprežanjem. Nakon nekog vremena može doći do pojave loma usprkos tome što je konstrukcija pravilno projektirana u elastičnom području i opterećena je daleko manje od graničnog. Umor materijala je postupno razaranje materijala zbog dugotrajnog djelovanja dinamičkog (promjenjivog) naprežanja, a rezultat je prijelom strojnog dijela. Umor materijala je poznat od 19. stoljeća, a opisao ga je Wöhler. Karakteristika loma od umora materijala je ta da nema pojave vidljive plastične deformacije koja prethodi lomu niti kod žilavih materijala. Prijelomna se površina sastoji od zaglađenog svijetlog dijela s brazdama napredovanja pukotine. Brazde podsjećaju na godove drveta. Taj dio prijelomne površine je nastajao dulje vrijeme pa se i naziva područje trajnog ili postepenog loma. Drugi dio prijelomne površine je nastao u trenutku kada je nametnuto naprežanje naraslo na iznos jednak vlačnoj čvrstoći materijala zbog smanjenja nosive plohe. Taj dio prijelomne površine naziva se područje trenutnog loma i može biti hrapave, zagasite i zrnate površine. Odnos površina trajnog i trenutnog loma te njihov razmještaj na prijelomnoj površini ovisi o vrsti i intenzitetu dinamičkog naprežanja te intenzitetu koncentracije naprežanja. [17]

Na slici 12. prikazane su brazde u materijalu koje upućuju na umor materijala, dok je na slici 13. prikazan shematski prikaz prijelomne površine kod umora materijala.



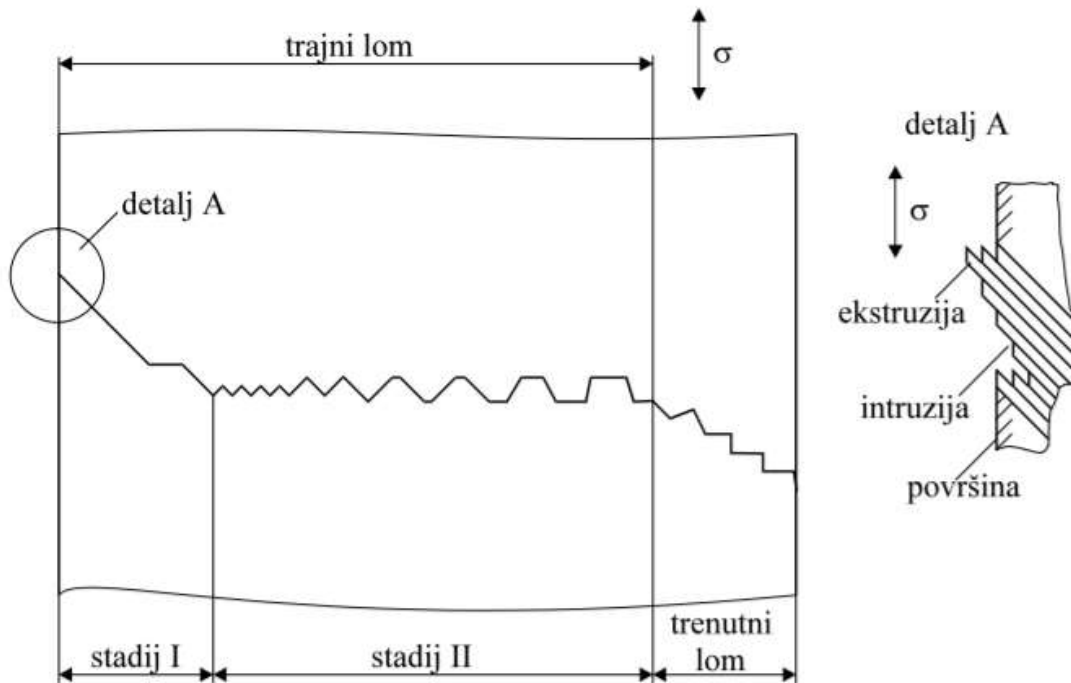
Slika 12. Pojava umora materijala (brazde) [18]



Slika 13. Shematski prikaz prijelomne površine kao posljedice umora materijala [17]

Klica loma je posljedica lokalne nehomogene deformacije kod koje dolazi do formiranja pločastih tvorevina koje tvore proklizavanjem udubine (intruzije) i izbočine (ekstruzije) po površini. Neravnine na površini, izbočine a pogotovo udubine predstavljaju koncentratore naprezanja to jest potencijalna mjesta stvaranja inicijalne pukotine. Inicijalna pukotina na površini materijala se širi s kristalnom strukturom pod kutom od približno  $45^\circ$  u odnosu na normalno naprezanje, tj. u smjeru maksimalnog smičnog naprezanja. Taj način širenja pukotine prikazan je u stadiju I na slici ispod i prisutan je kroz nekoliko kristalnih zrna. Brzina širenja pukotine u stadiju I ovisi o okolnom mediju. U sljedećem stadiju II pukotina se širi transkristalno, odnosno okomito na smjer djelovanja normalnog naprezanja i tu se pojavljuju brazde koje su posljedica izmjenjivanja „zatupljenja“ i „oštrenja“ vrha pukotine. Brzina širenja pukotine može se predočiti razmakom između brazdi. Na primjer ako se smanji nosivost presjeka, naprezanje stalno raste, brzina širenja pukotine se povećava što ima za rezultat i veći razmak između brazdi. Kada se nosivost presjeka smanji tako jako da naprezanje dostigne veličinu vlačne čvrstoće materijala dolazi do trenutnog loma. Razlika između površine trenutnog i površine trajnog loma je u tome što je površina trenutnog loma puno hrapavija od površine trajnog loma. Ovo objašnjeno iznad je za nastanak loma od umora materijala za idealnu strukturu bez prisutnih koncentatora naprezanja. [17]

Na slici 14. prikazan je shematski prikaz loma od umora materijala.



Slika 14. Shematski prikaz loma od umora materijala [17]

Koncentratori naprezanja su:

- konstrukcijskog
- tehnološkog i
- eksploatacijskog porijekla.

Koncentratori naprezanja s konstrukcijskim porijeklom najčešće se pojavljuju kod mjesta s nedovoljno velikim radijusom zaobljenosti (na primjer kod osovina, vratila s promjenjivim presjekom, utori za klin na vratilu, navoji na vijcima itd.).

Koncentratori naprezanja s tehnološkim porijeklom pojavljuju se kod postupka lijevanja (na primjer pore, uključci itd.), toplog oblikovanja (na primjer pukotine nastale kao posljedica izlučevina), postupak toplinske obrade (na primjer pukotine kao posljedica toplinske obrade) ili se radi o utorima tijekom obrade odvajanjem čestica (tokarenje, glodanje, brušenje itd.).

Koncentratori naprezanja s eksploatacijskim porijeklom nastaju kod udaraca pri montaži/demontaži i kod pojave kao na primjer napetosne korozije itd. [17]

### 3.1 Nisko ciklički umor materijala- Low cycle fatigue

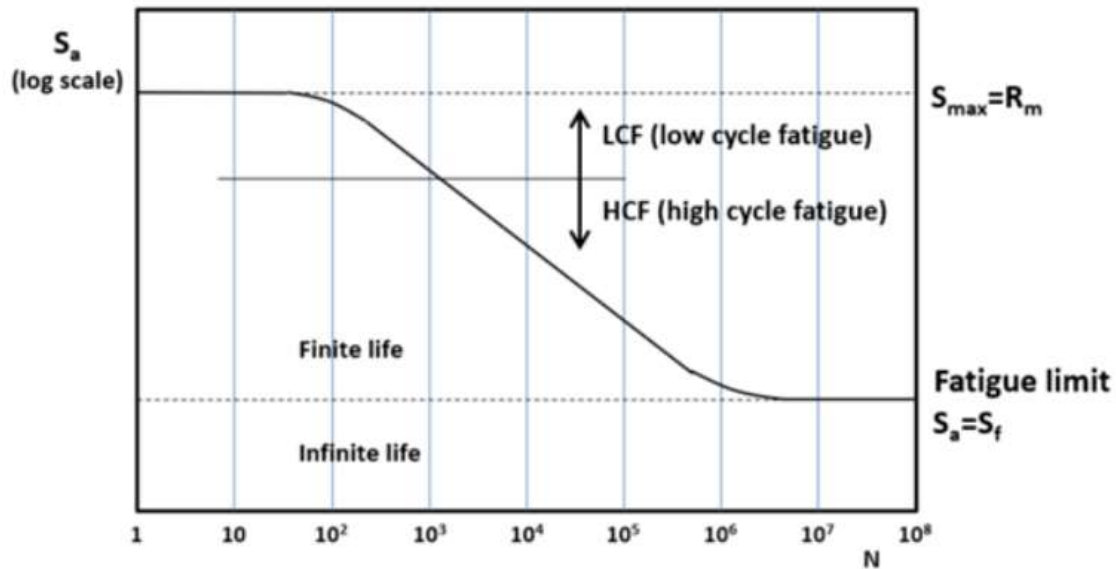
Kada su pojedini elementi izloženi relativno velikom naprezanju, otkazuju pri malom broju ciklusa i tada su podložni umoru kod malog broja ciklusa opterećenja. Nisko ciklički umor se pojavljuje i kod strukturnih elemenata koji se koriste pri relativno visokoj temperaturi. Budući da toplinska naprezanja proizlaze iz toplinskog širenja materijala, uočava se da je u tom slučaju umor rezultat cikličnog naprezanja. [19]

Čini se da većina elemenata ima nominalna ciklička elastična naprezanja, ali koncentracije naprezanja prisutne u elementima rezultiraju lokalnim cikličkim plastičnim naprezanjem. Pristup lokalnim naprezanjima razvijen je krajem 1950-ih godina kao vodeći parametar umora i pokazao se učinkovitijim u predviđanju vijeka umora pojedinih elemenata. Temelji se pod pretpostavkom da se životni vijek proveden na nukleaciji i rastu male pukotine može aproksimirati glatkim laboratorijskim uzorkom pod istom cikličkom deformacijom na mjestu inicijacije pukotine. Korištenjem ovog koncepta moguće je odrediti životni vijek umora u određenoj točki ciklički opterećenih elemenata ako je veza između lokaliziranog naprezanja u uzorku i životni vijek poznat. Ovaj odnos naprezanja i životnog vijeka predstavljen je kao krivulja deformacija nasuprot životnog vijeka umora i generira se provođenjem ispitivanja aksijalnog umora kontroliranim naprezanjem na glatkim, poliranim uzorcima materijala. Preporučuje se ispitivanje aksijalnog umora kontroliranim naprezanjem zato jer materijal u uvjetima koncentracije naprezanja može biti podjednako pod cikličkom plastičnom deformacijom kada se elementi ponašaju elastično tijekom cikličkog opterećenja. [19]

Osnovna razlika između nisko cikličkog umora u odnosu na umor uslijed velikog broja ciklusa promjenjivih naprezanja je povezana s deformacijama. Nisko ciklički umor karakterizira ponavljana plastična deformacija i to u svakom ciklusu, dok umor visokog ciklusa karakterizira elastična deformacija. Broj ciklusa do loma je vrlo nizak za umor niskog ciklusa, a nasuprot tome vrlo je visok za umor visokog ciklusa. [20]

Prijelaz između umora niskog ciklusa i umora visokog ciklusa određen je razinom naprezanja, tj. prijelazom između plastičnih i elastičnih deformacija. Ovo ukazuje da ne postoji točno određeni prijelazni životni vijek proizvoda koji iznosi  $10^3$  ciklusa, ali ovisi o duktilnosti materijala. [20]

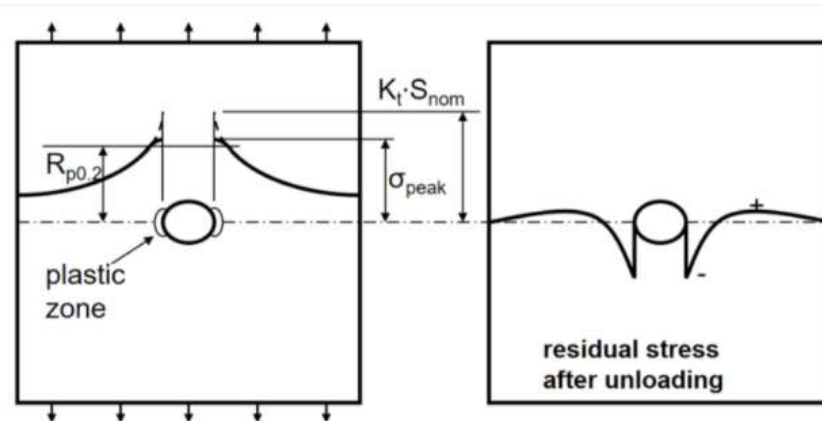
Na slici 15. prikazan je dijagram razlike umora niskog i visokog ciklusa.



Slika 15. Dijagram razlike umora niskog i visokog ciklusa [20]

Ako nominalna razina naprezanja premašuje granicu razvlačenja u svakom ciklusu to ujedno govori da je prisutna plastična deformacija u cijelom dijelu konstrukcije. Međutim, situacija je potpuno drugačija ako je samo na malom području u materijalu prekoračena granica tečenja. U tom slučaju će se samo na tom malom dijelu pojaviti plastična deformacija. U preostalim dijelovima strukture i dalje će biti prisutna elastična deformacija jer su naprezanja manja. Tijekom otpuštanja tereta, kompletna razdioba rasteretit će se elastično što će dovesti do raspodjele naprezanja. Od tog će se trenutka daljnjim cikličkim opterećenjem materijal ponašati elastično i nastat će umor visokog ciklusa i bez ponovljene plastične deformacije. [20]

Na slici 16. prikazana je raspodjela naprezanja za vrijeme te nakon opterećenja tereta.



Slika 16. Raspodjela naprezanja za vrijeme i nakon opterećenja tereta [20]

## 4 Ispitivanje i metalografska analiza uzoraka

Kvalitetnu analizu uzoraka moguće je provesti samo ako su uzorci prethodno dobro pripremljeni. Priprema uzorka za metalografsku analizu sastoji se od:

- izrezivanja reprezentativnog uzorka iz analiziranog materijala
- zalijevanja uzorka u polimernu masu (radi lakšeg rukovanja uzorcima i boljeg prikaza rubova prilikom analize na svjetlosnom mikroskopu),
- brušenja površine uzorka (radi uklanjanja nečistoća i slojeva materijala),
- poliranja površine uzorka (radi uklanjanja tragova brušenja te postizanja čim veće kvalitete i refleksije površine)
- odmašćivanja, ispiranja i sušenja površine uzorka
- kemijskog nagrivanja površine uzorka i
- ispiranja i sušenja površine uzorka. [21; 22]

Na slici 15. prikazan je shematski prikaz pripreme i metalografskog ispitivanja uzorka.



Slika 17. Shematski prikaz pripreme i metalografskog ispitivanja uzorka [22]

#### 4.1 Rezanje i zalijevanje uzorka

Prvi korak kod pripreme uzorka je rezanje. Rezanje uzoraka je postupak prilikom kojeg se iz metalnog komada izrezuje uzorak na kojem će se provesti ispitivanje. „Prilikom rezanja uzorka ne smije doći do promjene mikrostrukture zbog povišenja temperature. Također ne smije doći do prevelike deformacije površine. Površina reza treba biti što ravnija da se olakša priprema u fazi brušenja.“[22] Uređaj za rezanje uzoraka korišten u ovom radu je Accutom 2.

Kad su se pojedini uzorci odrezali, zalili su se u polimernu masu, što je zapravo drugi postupak pripreme uzorka, i to prvenstveno radi lakšeg rukovanja uzorcima, boljeg prikaza rubova prilikom analize na svjetlosnom mikroskopu, dobivanje uniformnog oblika za automatsku pripremu na uređajima za brušenje i poliranje te daljnju obradu i analizu.

„Tvrdoća polimerne mase treba biti ista kao i tvrdoća uzorka zbog jednolike obrade. Polimerna masa u koju ulijevamo uzorke može biti plastomerna ili duromerna, a ulijevanje se može provesti na toplo ili na hladno. Masa za zalijevanje uzoraka treba imati što manju kontrakciju pri skrućivanju, što bolju otpornost na adheziju, istu otpornost na abraziju i mogućnost poliranja kao i analizirani materijal.“ [23] Uređaj za zalijevanje uzoraka u polimernu masu korišten u ovom radu je Pneumet Press.

Na slici 18. prikazan je uređaj za rezanje uzoraka- Accutom 2, dok je na slici 19. prikazan uređaj za zalijevanje uzorka u poliranu masu- Pneumet Press.



*Slika 18. Uređaj za rezanje uzoraka- Accutom 2*





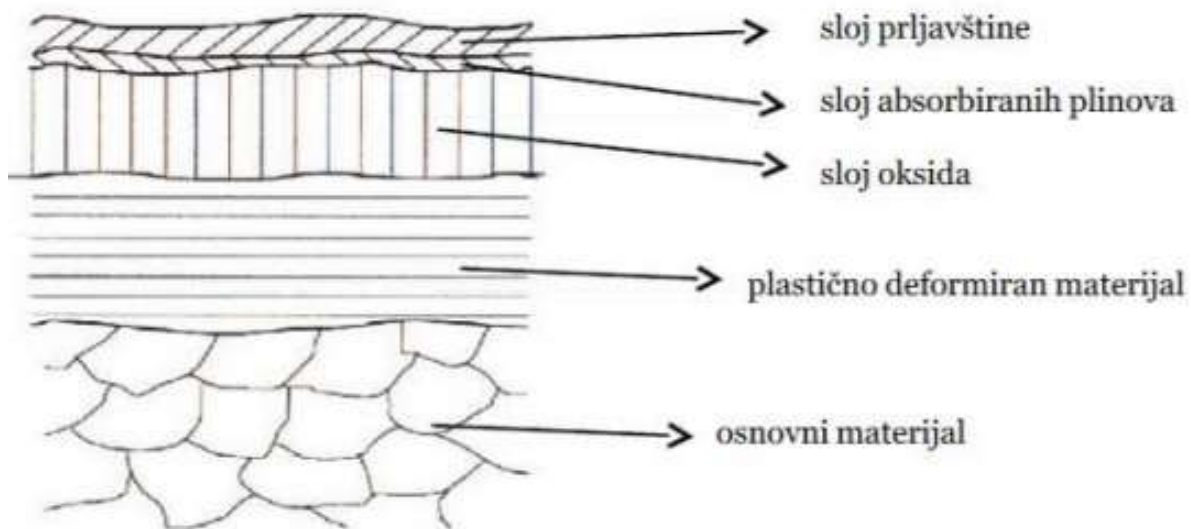
*Slika 19. Uređaj za zalijevanje uzoraka u polimernu masu- Pneumat Press*

## 4.2 Brušenje

Brušenje je treći po redu postupak pripreme uzorka koji slijedi odmah nakon rezanja. Kod svih postupaka brušenja koristi se voda za pothlađivanje i podmazivanje i brusni papir koji može biti sa najvećim („grubi“) i sve manjim abrazivima („fini“). Podloga koja se brusi uvijek mora biti suha. Brušenjem se skidaju oksidi, adsorbirani plinovi, sloj prljavštine i plastično deformirani sloj s površine metala. [23,24] Parametri koji se javljaju kod brušenja su:

- veličina abraziva
- sila
- vrijeme i
- brzina okretanja. [24]

Na slici 20. prikazani su slojevi površine prije brušenja.



Slika 20. Slojevi površine prije brušenja [22]

### 4.3 Poliranje

Poliranje je četvrti po redu postupak pripreme uzorka koji slijedi odmah nakon brušenja. Postupak poliranja provodi se korištenjem:

- tkanine
- abraziva i
- lubrikanta. [24]

Abraziv može biti  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ili dijamantna pasta i služi za premazivanje površine uzorka. Tekući lubrikant se nanosi na površinu doziran kapljično te služi za podmazivanje i hlađenje uzorka. Istovremeno je moguće polirati dva ili više uzoraka, ovisno o uređaju. Parametri koji se javljaju kod brušenja su:

- tkanina
- veličina abraziva
- sila
- vrijeme i
- brzina okretaja. [24]

Pogreške koje se mogu uočiti u poliranom stanju su nemetalni uključci, pukotine i porozitet. [24]

Na slici 21. prikazana je dijamantna pasta od 3 mikrometra.



Slika 21. Dijamanta pasta od 3 mikrometra

#### 4.4 Nagrizanje

Nagrizanje je postupak selektivnog korodiranja površine materijala s ciljem:

- uklanjanja deformiranog sloja
- dobivanje reljefne površine uslijed djelovanja sredstva na pojedine dijelove strukture (npr. faze, precipitati, granice zrna itd.) [24]

Nagrizanje je ujedno i posljednji postupak pripreme uzorka koji slijedi nakon poliranja. Kod nagrizanja vrlo je važno pravilno koristiti opasne kemikalije, odnosno kiseline. Sa njima je potrebno:

- pažljivo rukovati
- izbjegavati direktan kontakt
- ne pokušavati mirisati i
- uključiti ventilaciju. [24]

Parametri koji se javljaju kod nagrizanja su:

- sredstvo za nagrizanje (najčešće Nital) i
- vrijeme. [24]

Nital je najčešće korišteno sredstvo za nagrizanje čelika i legura na bazi Fe koje se sastoji od 2-10%  $\text{HNO}_3$  (dušične kiseline) i 90-98% etanola.

Postupak nagrizanja se može podijeliti na nekoliko vrsta:

- kemijsko nagrivanje
- elektrolitičko nagrivanje
- obojeno nagrivanje i
- termičko nagrivanje. [24]

Na slici 22 prikazano je sredstvo za nagrivanje- 3% Nital.



Slika 22. 3% Nital

#### 4.5 Svjetlosni mikroskop

Svjetlosni mikroskopi dijeli se na klasične i stereomikroskope. Mikroskopi mogu biti monokularni sa jednim okularom ili binokularni sa dva okulara. Za razliku od njih, stereomikroskopi imaju dva objektiva i dva okulara pri čemu se dobije slika istog područja pod različitim kutovima, 3D izgled površine. Mikroskop se sastoji od dvije konvergentne leće (okulara i objektiva). Okular služi za povećanje. Stvaranjem virtualne slike povećava kut gledanja. Objektiv je za razliku od okulara konvergentna leća male žarišne duljine. On daje uvećanu realnu sliku, a okular virtualnu sliku na udaljenosti od 25 cm.

Karakteristike mikroskopa su:

- povećanje
- razlučivost i
- dubinska oština.

Povećanje je odnos između veličine slike i veličine realnog predmeta. Povećanje od 1x je minimalna udaljenost na kojoj oko fokusira predmet. Ono iznosi 250 mm (koliko je predmet manji ako se gleda na udaljenosti 250 m od oka). Povećanje okulara je najčešće od 10x, dok je povećanje objektiva od 5x, 10x, 20x, 50x i 100x. [24]

Razlučivost je najmanja udaljenost između dva objekta koji su još uvijek odvojeni. Razlučivost svjetlosnog mikroskopa je ograničena valnom duljinom svjetlosti koja iznosi otprilike 0,4 μm.

Formula za izračunavanje razlučivosti je:

$$d = \frac{0.61 \cdot \lambda}{n \cdot \sin \alpha} = \frac{0.61 \cdot \lambda}{NA}$$

gdje je: -  $\lambda$  – valna duljina svjetlosti

-  $n$  – indeks loma svjetlosti (zrak 1, ulje 1,5)

-  $\alpha$  – polukut zraka svjetla s lećom objektiva (što veći, to bolja rezolucija)

- NA – numerička apertura (količina svjetla koja ulazi u objektiv) [24]

Dubinska oštrina je sposobnost objektiva da tvori oštru sliku uzorka s površinom koja je neravna. Udaljeniji objekti su oštrije što je bolja žarišna oštrina. Cilj je postići da udaljeni objekti budu jednake oštrine kao i glavni objekt.

Formula za izračunavanje dubinske oštrine je:

$$d = \frac{\lambda \cdot n}{NA^2} + \frac{n}{M \cdot NA} \cdot e$$

gdje je: - NA – numerička aperture

- M – povećanje

- e – dimenzija koja se razaznaje u objektivu [24]

Mikroskopi se dijele na mikroskope s prolaznim svjetlom i mikroskope sa reflektirajućim svjetlom. Mikroskopi sa reflektirajućim svjetlom koriste se za analizu debljih uzoraka poput metala, dok se mikroskopi sa prolaznim svjetlom koriste za analizu izrazito tankih uzoraka u medicini i biologiji. Još se svjetlosni mikroskopi dijele na uspravne i invertne. [24]

Na slici 23. prikazan je stereomikroskop.



*Slika 23. Stereomikroskop [25]*

#### **4.6 Elektronski mikroskop**

Elektronski mikroskop je mikroskop koji radi na vrlo sličnom principu kao i svjetlosni mikroskop uz mogućnost postizanja značajno većih povećanja. „Znanstveno-istraživački je instrument koji koristi zrake elektrona za istraživanje uzoraka u mikrometarskom i nanometarskom području.“ [22] Važno je da je uzorak kod elektronskog mikroskopa uvijek električki vodljiv.

Vrste elektronskih mikroskopa su:

- TEM- transmisijski elektronski mikroskop
- SEM- skenirajući elektronski mikroskop i
- SPM- skenirajući mikroskop s ticalom.

#### 4.6.1 Skenirajući elektronski mikroskop

Kod ove vrste mikroskopa snop elektrona skenira po uzorku i izaziva niz reakcija s atomima na površini koju skenira. Slika se formira pomoću elektrona koje hvataju detektori koji se nalaze u komori mikroskopa. Na SEM-u postoji termalni izvor elektrona.

Dijelovi SEM-a su:

- kolona (izvor elektrona)
- sustav za vakuum (pumpa, ventili, cijevi)
- komora s nosačem uzorka i detektorima
- stolić sa sustavom za upravljanje i prikazom slike i
- dodatna oprema- detektori. [22]

Kod SEM mikroskopa dobiju se 3D prikazi površine, oblici, dimenzije i raspored čestica i kristala. Za kvantitativnu mikroanalizu na SEM-u uzorci moraju biti mali, električki vodljivi i suhi.

Na slici 24. prikazan je SEM skenirajući elektronski mikroskop.



*Slika 24. SEM- skenirajući elektronski mikroskop [26]*

## 4.7 Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće je jedan od najraširenijih postupaka u području ispitivanja mehaničkih svojstava. Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog, znatno tvrdog materijala. Tvrdoća je nerazorna metoda ispitivanja materijala zato što se površina neznatno oštećuje. Uređaji za mjerenje tvrdoće su tvrdomjeri. Tvrdoća se određuje na osnovu otiska što ga indentor ili penetrator, opterećen silom napravi u ispitivanom materijalu. Postupci ispitivanje tvrdoće razlikuju se prema obliku i materijalu indentora:

- Brinellova metoda- kuglica od tvrdog metala
- Rockwellova metoda- dijamantni stožac s vršnim kutom  $120^\circ$  i
- Vickersova metoda- dijamantna piramida s vršnim kutom  $136^\circ$ . [22]

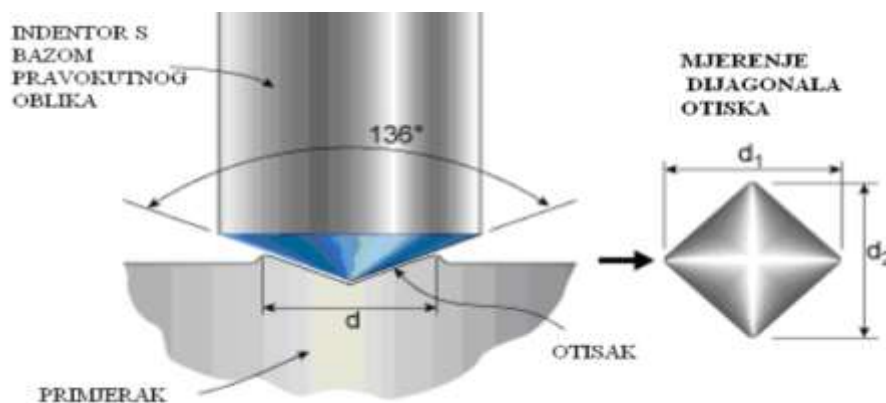
Navedene metode su vrlo pogodne za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala kod kojih je moguća plastična deformacija.

Za ispitivanje tvrdoće nije uvijek nužno izrađivati posebnu epruvetu, već samo pripremiti plohe uzoraka ili strojnog dijela koji se ispituje na odgovarajući način.

### 4.7.1 Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće

Vickersova metoda mjerenja tvrdoće se smatra univerzalnom metodom zbog toga što se pojavila poslije Brinellove i kod nje su otklonjeni nedostaci Brinellove metode. Penetrator je četverostrana dijamantna piramida s kutom između stranica od  $136^\circ$ . Primjenjuje se za meke i tvrde materijale. Debljina ispitanog uzorka ili sloja koji se ispituje treba biti najmanje  $1,5 \cdot d$ . Dijagonale u kvadratnom otisku se izmijere sa tačnošću od  $\pm 0,001$  mm. Vickersovu tvrdoću HV određuje srednja vrijednost dijagonala. [27]

Na slici 25. prikazan je indentor i otisak kod Vickersove metode.



Slika 25. Indentor i otisak kod Vickersove metode [27]



Različita su vremena opterećenja zbog toga što ovise o materijalu. Tako je na primjer za čelik, željezo i bakrene legure potrebno od 10 do 15 sekundi, za tvrde metale oko 5 sekundi, a za legure aluminija od 30 do 35 sekundi itd.

Najviše se koristi:

- makrometoda- kod opterećenja od 49 do 980 N, kod tankih slojeva
- semimikrometoda- za tanke slojeve i
- metoda mikrotvrdoće- za ispitivanje tvrdoće konstituenata (ferita, perlita); kod tih uređaja su moguća povećanja i do 1000 put jer su ugrađeni u bolje optičke mikroskope. [27]

Na slici 26 prikazane su tri razine ispitnih sila kod Vickersove metode.

Razina ispitnih sila $F$ , N	Oznaka tvrdoće	Prijašnji nazivi (oznake)
$F \geq 49,03$	$\geq HV5$	Vickersova metoda (makro-)
$1,961 \leq F < 49,03$	HV0,2 do $< HV5$	Vickersova metoda s malim opterećenjima (semimikro-)
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV0,01 do $< HV0,2$	Vickersova metoda mikrotvrdoće

Slika 26. Tri razine ispitnih sila kod Vickersove metode [27]

Neke prednosti Vickersove metode su:

- tvrdoća je neovisna o primijenjenoj sili
- moguće mjerenje tvrdoće vrlo tankih uzoraka
- moguće mjerenje tvrdoće i najtvrdih uzoraka
- otisak je vrlo mali pa ne oštećuje površinu itd.

Neki nedostaci Vickersove metode su:

- za mjerenje veličine otiska potreban je mjerni mikroskop
- potrebna je brižljiva priprema površine uzorka gdje se obavlja mjerenje itd.

Formula po kojoj se određuje mikrotvrdoća je:

$$HV = \frac{F \cdot 0.188}{d^2}$$

Gdje je –  $F$ , N- primjenjena sila [N]

- $d$ , mm<sup>2</sup>- srednja vrijednost dijagonala baze piramide otisnute u materijalu [22]

## 5 Eksperimentalni dio

U ovom radu napravljena je analiza tri uzorka dobivena od HŽ Infrastrukture. Uzorci su zaprimljeni u oštećenom stanju te je bilo potrebno napraviti sva ispitivanja s ciljem dobivanja informacija zašto je došlo do oštećenja i loma uzoraka obzirom da su zaprimljeni uzorci morali biti u eksploataciji još dulje vrijeme bez pojave oštećenja i loma.

Ispitivanje uzoraka napravljeno je u Laboratoriju za metalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Od tri pristigla uzorka, prva dva uzorka su samo vijci, dok je treći uzorak vijak s maticom. Vizualnom analizom uzoraka u donesenom stanju jasno je vidljivo da su uzorci puknuti i oštećeni. Dostupnim metodama potrebno je bilo utvrditi da li je materijal koji je korišten za izradu dovoljne kvalitete za ovu vrstu vijaka i matica, jesu li provedene sve potrebne toplinske obrade koje će dati optimalnu mikrostrukturu i svojstva koja se zahtijevaju prema normama, te zbog čega je došlo do puknuća i oštećenja uzoraka.

Na slikama 27., 28. i 29. prikazani su uzorci koji su došli na ispitivanje sa pragoва željezničkih pruga.



a)



b)

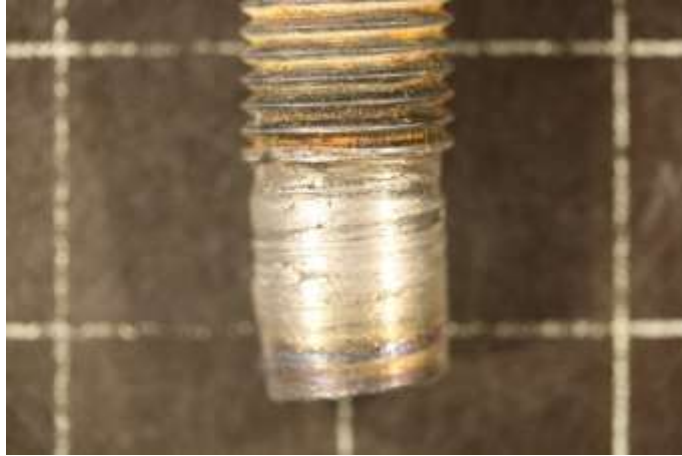


c)

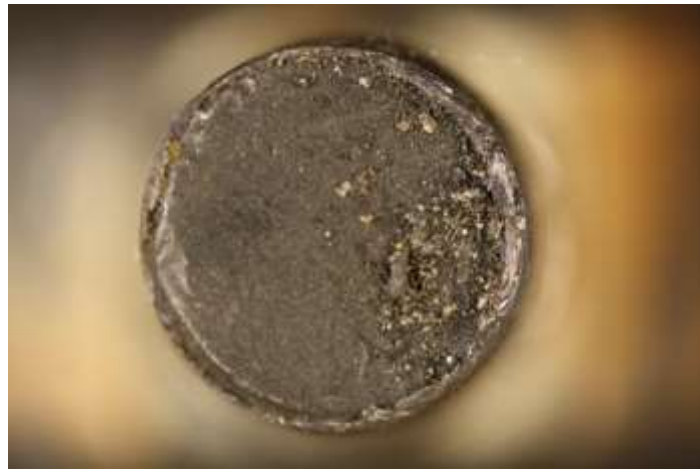
*Slika 27. Makrosnimka uzorka 1 a) uzorak 1 bočno, b) uzorak 1 prednji dio sa maticom, c) uzorak 1 stražnji dio*



a)



b)



c)

*Slika 28. Makrosnimka uzorka 2 a) uzorak 2 bočno, b) uzorak 2 bočno (uvećano), c) uzorak 2 stražnji dio*



a)



b)

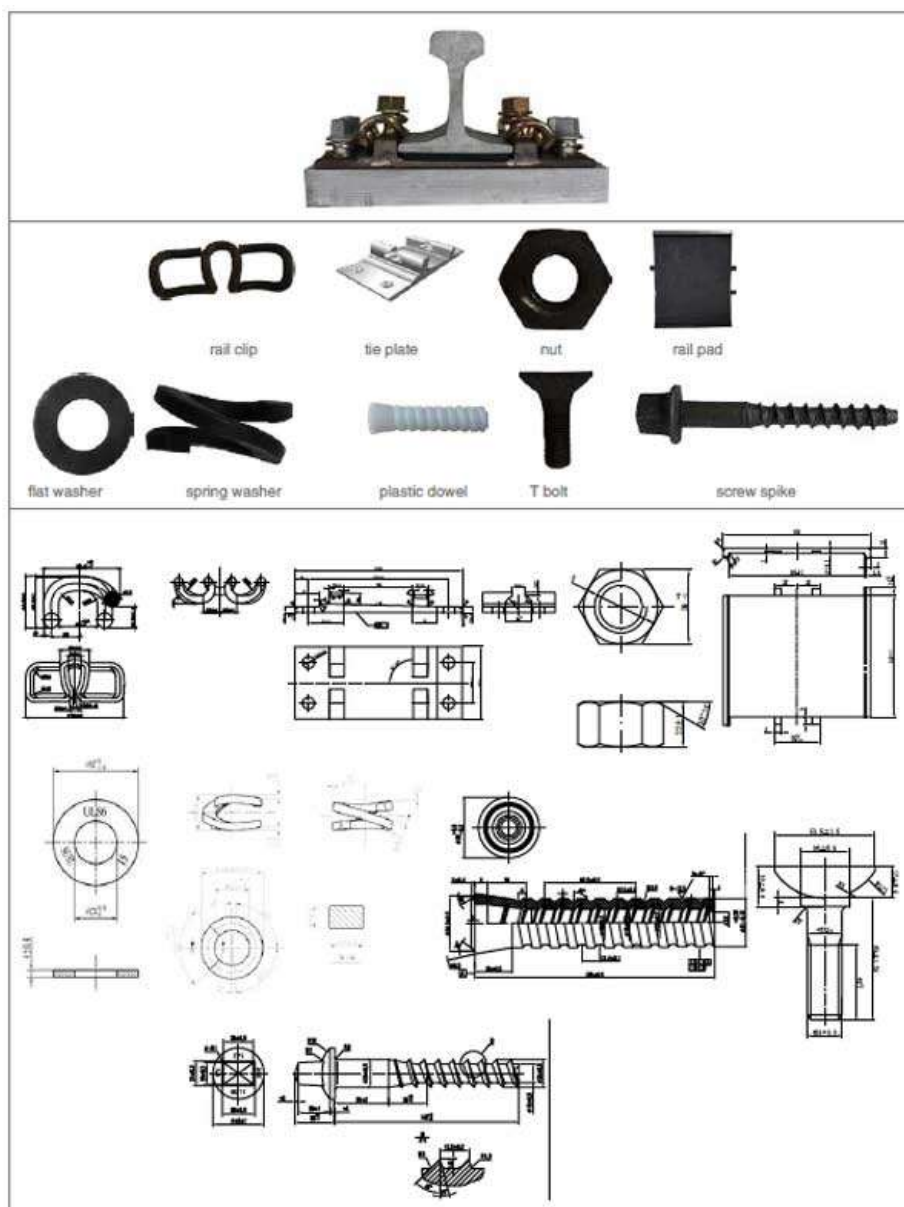


c)

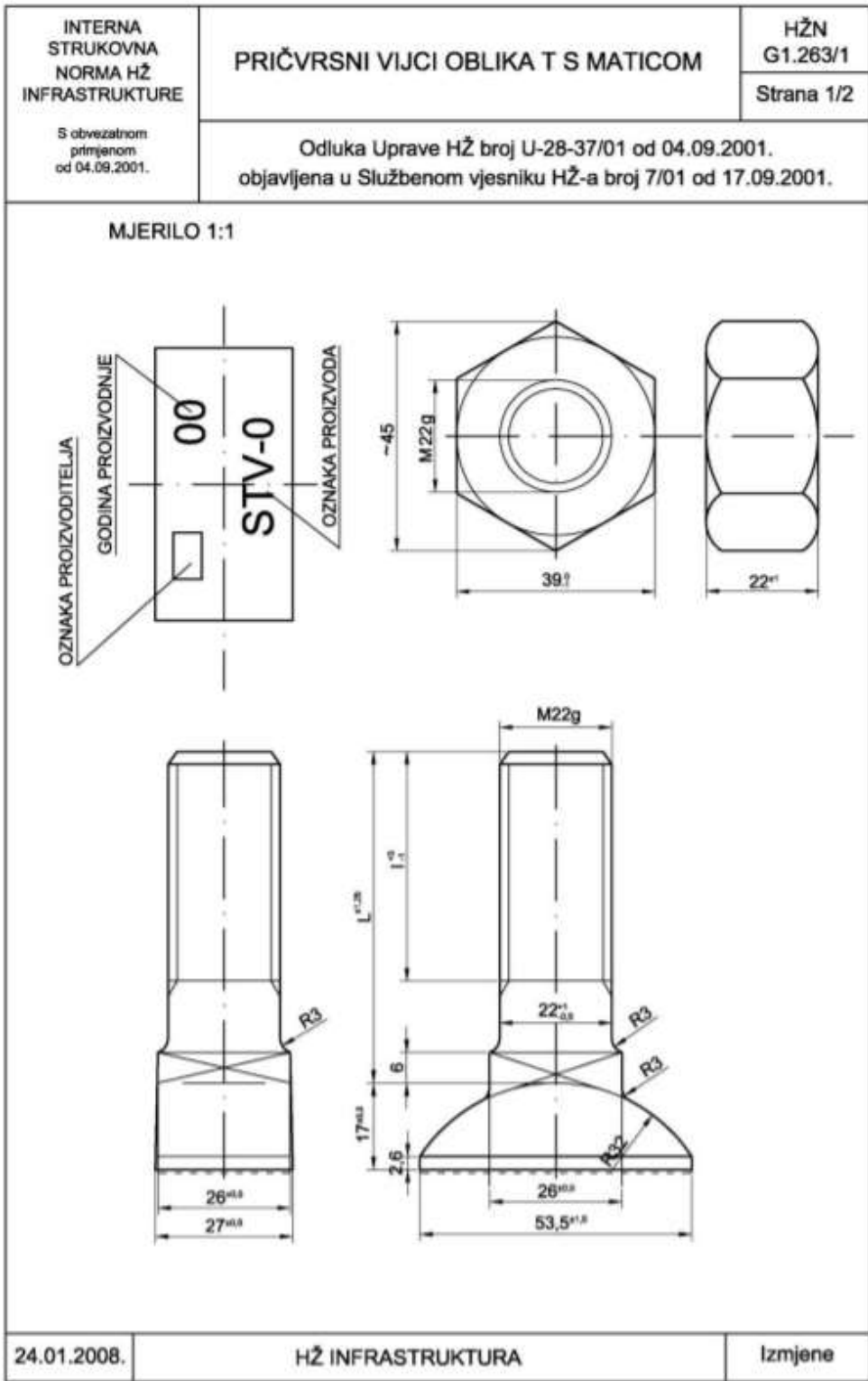
*Slika 29. Makrosnimka uzorka 3 a) Uzorak 3 bočno, b) uzorak 3 bočno (navoj), c) uzorak 3 stražnji dio*

## 5.1 Spojnica za skretnice SKL 14 za pričvršćivanje željezničkih pragova

Sustav za pričvršćivanje tračnica je skup učvršćivača koji se koriste za spajanje čeličnih tračnica i željezničkih pragova. Općenito, tračnički sustav za pričvršćivanje zahtjeva pouzdanu vezu, jednostavnu strukturu i značajke elastičnosti, apsorpcije udara i izolacije. [28] Na slici 30. prikazane su komponente SKL 14 sustava za pričvršćivanje tračnica, na slici 31. prikazan je nacrt pričvršnog vijka oblika T s maticom, dok su na slici 32. prikazane karakteristike vijka T s maticom.



Slika 30. Komponente SKL 14 sustava za pričvršćivanje tračnica [28]



Slika 31. Pričvrtni vijak oblika T s maticom [29]

OZNAKA	PRIMJENA	KAKVOĆA		I	L	MASA (kg/kom)
		STV	M			
STV-1	'K' pribor s DEPP	4,6	5	45	65	0,503
STV-2	SKL2, SKL3, SKL12	4,6	5	40	55	0,469
pocinčani STV-2	skretnice na betonskim pragovima	8,8	8	40	55	0,478
STV-3	skretnice	4,6	5	45	90	0,577

Oznaka proizvođača, godina proizvodnje i oznaka proizvoda moraju biti reljefne, visine 1 mm.

Slika 32. Karakteristike pričvrstnog vijka T s maticom [29]



Pričvrtni vijci oblika T s maticom poput STV-2 izrađeni su od materijala kakvoće sukladno Uredbi UIC 864-2 najnovijeg izdanja. [30]

UIC je međunarodna organizacija za željeznice i njezina norma 864-2 propisuje da su pričvrtni vijci oblika T s maticom poput STV-2 izrađeni od materijala Q235, C35 ili 16 Mn. Mjere su sukladno nacrtu normi hrvatskih željeznica (HŽN) 61.263/1 za tip STV-2. [30]

Minimalna zatezna čvrstoća iznosi 400 MPa, izduženje kod loma je minimalno 22% i točka popuštanja (odnosno granica razvlačenja) javlja se kod minimalno 240 MPa. [29]

STV-2 pričvrtni vijak s maticom se primjenjuje kod SKL2, SKL3, SKL12, SKL14 itd. Njegova masa iznosi 0,469 kg.

Na slici 33. prikazana je vrsta pričvrtnog vijka T s maticom- STV-2.

DIV- OZNAKA PROIZVOĐAČA



STV 2- OZNAKA PROIZVODA

14- GODINA PROIZVODNJE

Slika 33. Vrsta pričvrtnog vijka T s maticom

## 5.2 Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za metalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje UniZg. Najprije je provedeno rezanje uzoraka na manje dijelove, a nakon toga slijedilo je ulijevanje u polimernu masu. Zaliveni uzorci dalje su pripremljeni standardnim metalografskim metodama koje uključuju brušenje i poliranje uzoraka te analiziranje u poliranom stanju. Uzorcima je zatim nagrivanjem razvijena mikrostruktura te su analizirani u nagrivenom stanju. Analiza mikrostrukture provedena je na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX i na SEM- skenirajućem elektronskom mikroskopu Tescan Vega III Easyprobe.

Na slici 34. prikazan je uređaj za makro analizu pojedinih metalografskih uzoraka.



*Slika 34. Uređaj za makro analizu metalografskih uzoraka*

## 5.3 Priprema metalografskih uzoraka

### 5.3.1 Brušenje

Kod brušenja se provodilo šest koraka sa šest brusnih papira različite granulacije. Brusni papir se samo prisloni na uređaj. U prvom koraku koristio se brusni papir P126 gdje su se brusili tragovi od rezanja. Taj brusni papir je ujedno i sa najvećom granulacijom, odnosno „najgrublji“. U sljedećih pet koraka brušenja koristili su se brusni papiri sa sve manjom granulacijom pri čemu je u svakom koraku ostvarena bolja kvaliteta površine. U tablici 9. prikazane su vrste brusnih papira sa određenom brzinom okretaja u minuti.

*Tablica 8. Vrste brusnih papira sa određenom brzinom okretaja u minuti.*

Brusni papir	P160	P320	P500	P1000	P2400	P400
Okretaji/min	300	300	300	300	300	300

Vrijeme potrebno za brušenje sa određenim brusnim papirom je nekoliko minuta, dok je brzina okretanja otprilike 300 okretaja u minuti.

Nakon zadnjeg brusnog papira potrebno je uzorke prati u vodi, alkoholu te na kraju osušiti. Površina uzoraka zahtijeva daljnju pripremu s ciljem otklanjanja tragova brušenja, tj. pristupa se sljedećoj fazi- poliranje. Proizvođač uređaja za brušenje je Miniteck 233, a uređaj se naziva Presi, slika 35.

Cilj je dobiti jednoliku površinu uzorka. Na slici 36. prikazan je postupak brušenja.



*Slika 35. Uređaj za brušenje uzoraka- Presi*



*Slika 36. Priprema uzorka- brušenje*

### **5.3.2 Poliranje**

Poliranje se provodilo u dva koraka. U prvom koraku se tekućina lubrikant kapala po površini uređaja i pomoću dijamantne paste od granulacije tri mikrona se premazala površina uzorka. Prvi korak je trajao otprilike dvije do tri minute sa brzinom okretanja od 150 okretaja u minuti. Drugi korak je vrlo sličan prvome, jedino je razlika u tome što se je koristila dijamantna pasta granulacije 1  $\mu\text{m}$ . Dakle, poliranje također počinje s grubljim, a završava sa finijim abrazivnim česticama. Na kraju poliranja potrebno je uzorke oprati u sapunici kako bi se odstranila masnoća s površine, alkoholu, te na kraju osušiti. Proizvođač uređaja za poliranje je Struers.

Pogreške koje se mogu uočiti analizom uzoraka u poliranom stanju su nemetalni uključci, pukotine i porozitet.

Cilj je dobiti zrcalnu površinu, bez brazdi i oštećenja.

Na slici 37. prikazan je uređaj za poliranje uzoraka, dok je na slici 38. prikazan postupak poliranja.

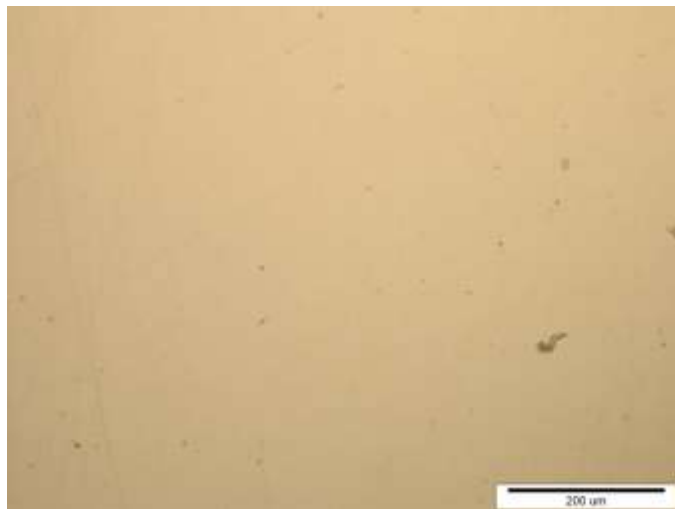


*Slika 37. Uređaj za poliranje uzoraka*



*Slika 38. Priprema uzorka- poliranje*

Na slici 39. prikazana je mikrostruktura uzorka 3 u poliranom stanju.



*Slika 39. Mikrostruktura uzorka 3 u poliranom stanju kod povećanja od 200x*

### **5.3.3 Nagrizanje**

Površina se uzorka nagriza zbog otkrivanja mikrostrukture - kristalna zrna, njihove granice i karakteristike koje se ne mogu vidjeti u poliranom stanju. Kod nagrivanja se koriste dvije staklene posude gdje se u jednoj nalazi voda, a u drugoj otopina za nagrivanje - 3%-tna otopina Nital. Najprije je potrebno uzorak uroniti u Nital nekoliko sekundi. Ako bi uzorak bio nešto dulje u otopini za nagrivanje došlo bi do „spaljivanja“ površine uzorka. Nakon faze nagrivanja uzorak se uranja u vodu te se ispiru u alkoholu kako ne bi došlo do pojave korozije i na kraju je uzorak potrebno osušiti. Na slici 40. prikazana je oprema za nagrivanje uzorka, a na slici 41. postupak nagrivanja.



*Slika 40. Oprema za nagrivanje uzorka*

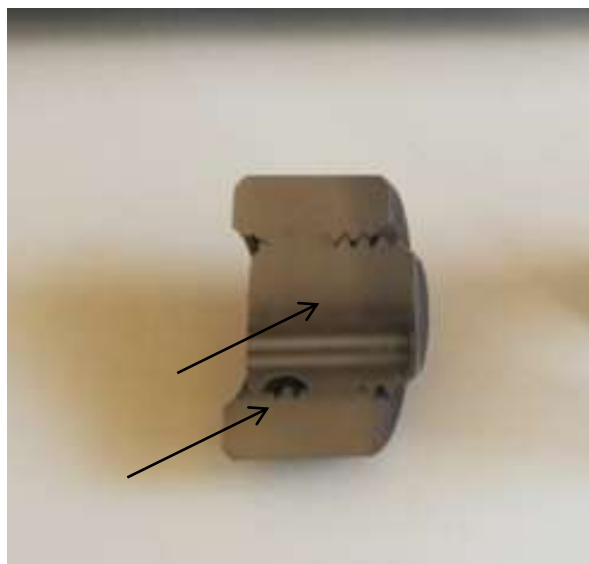




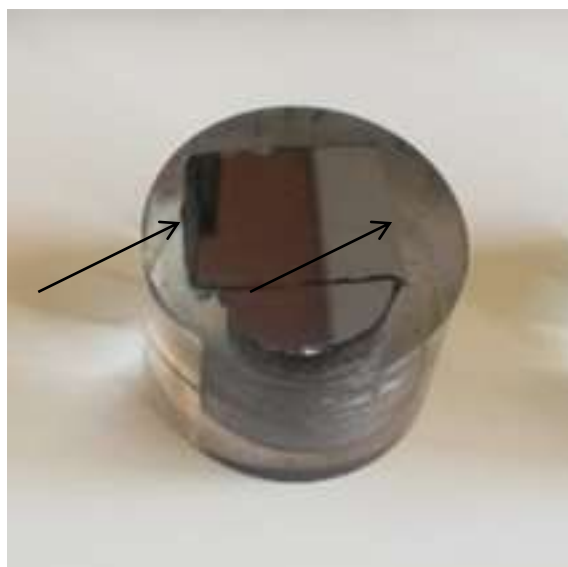
*Slika 41. Nagrizanje uzoraka*

#### **5.4 Pripremljeni uzorci za analizu**

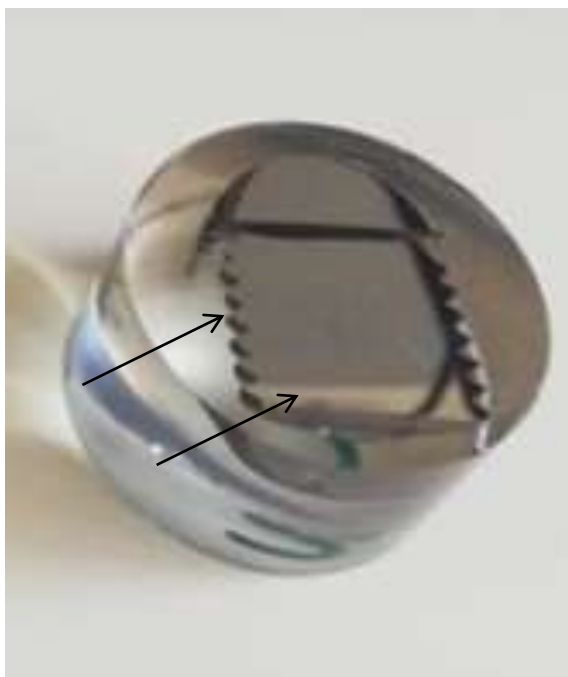
Nakon svih faza pripreme uzoraka, obloženi i pripremljeni uzorci prikazani su na slikama 42., 43. i 44. Na slikama se može uočiti da su uklonjene površinske nečistoće i gornji slojevi materijala, uklonjeni su i tragovi brušenja i postigla se visoka kvaliteta i refleksija površine. Površine su u potpunosti zrcalne, bez brazdi i bez oštećenja.



*Slika 42. Gotovi uzorak- vijak u matici*



*Slika 43. Gotovi uzorak- vijak 1*



*Slika 44. Gotovi uzorak- vijak 2*

Na slikama 42., 43. i 44. strelicama su označena karakteristična mjesta na pojedinim uzorcima koja su detaljnije analizirana svjetlosnim mikroskopom.



## 5.5 Analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu

Nakon brušenja i poliranja uzoraka slijedila je analiza mikrostrukture na svjetlosnom invertnom mikroskopu „Olympus GX51“ prikazanom na slici 45.

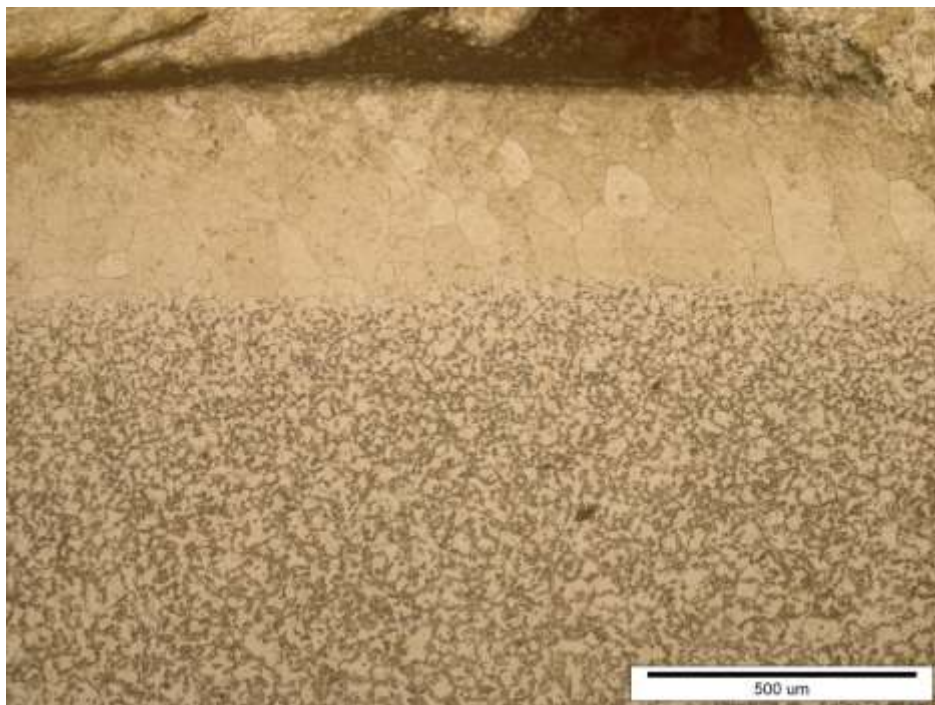
To je metalografski mikroskop i koristi se upravo u svrhu ispitivanja mikrostrukture metalnih i nemetalnih materijala. Metalografski mikroskop omogućava pregledavanje neprozirnih uzoraka, poput metala, pri vrlo velikom povećanju. Metalurški mikroskopi u sprezi s odgovarajućim programskim paketom imaju i specijalnu primjenu koja uključuje mjerenje debljine tankih prevlaka, filmova, veličine zrna te nedostataka u materijalu poput uključaka ili pukotina. [21]

Najčešća povećanja optičkog mikroskopa su: 50x, 100x, 200x, 500x i 1000x.

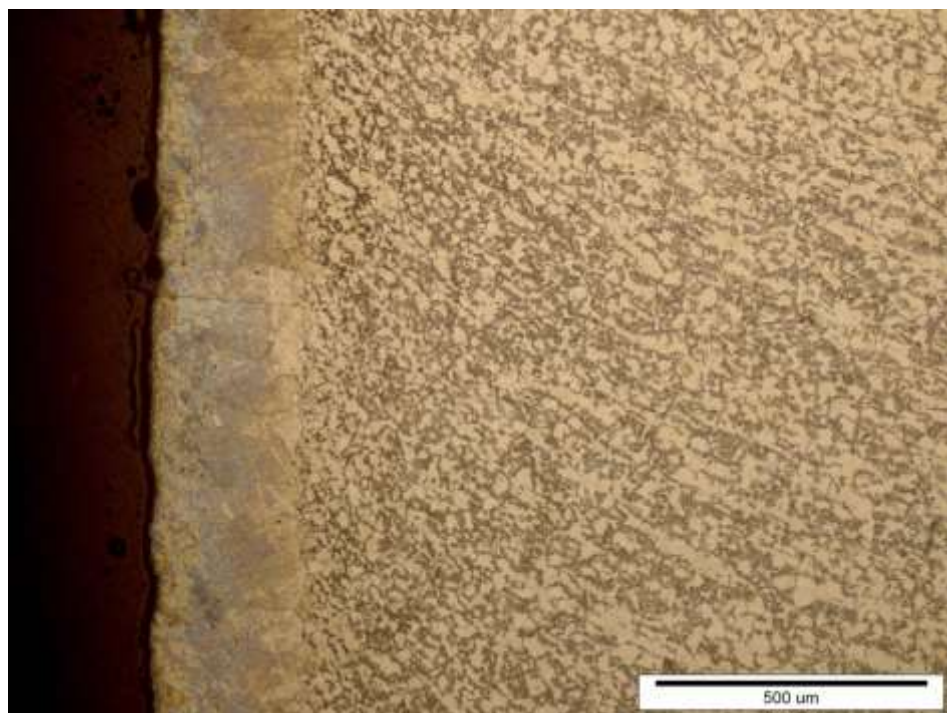


*Slika 45. Optički mikroskop „Olympus GX51“*

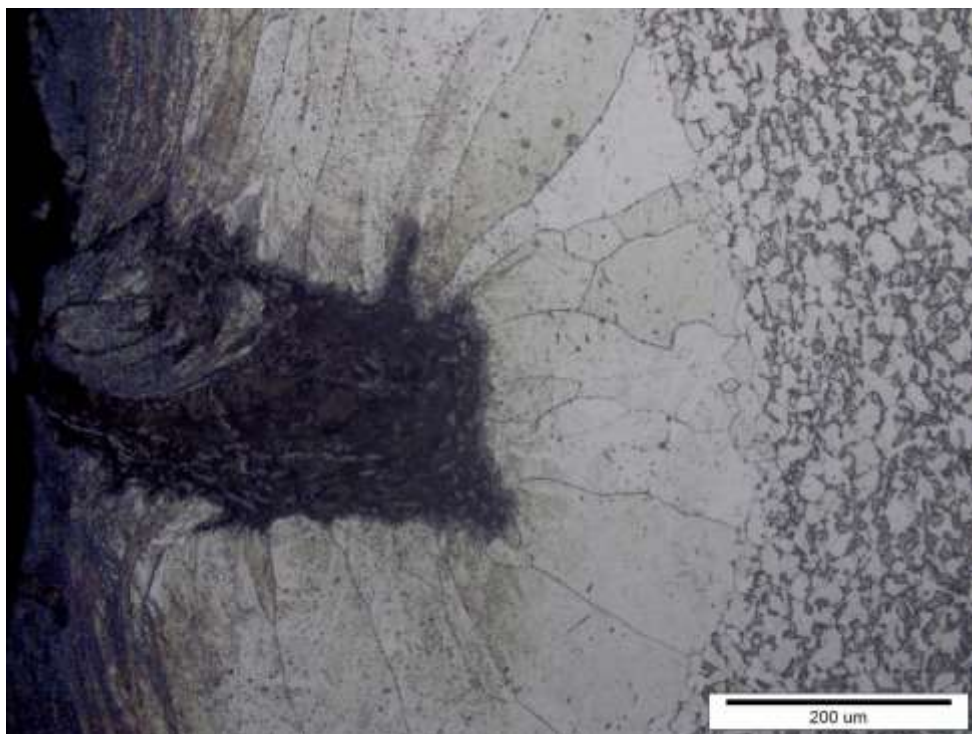
Na slikama 46., 47., 48., 49., 50., 51., 52., 53., 54., i 55. biti će prikazane mikrostrukture pojedinih uzoraka snimljenih sa optičkim mikroskopom „Olympus GX51“.



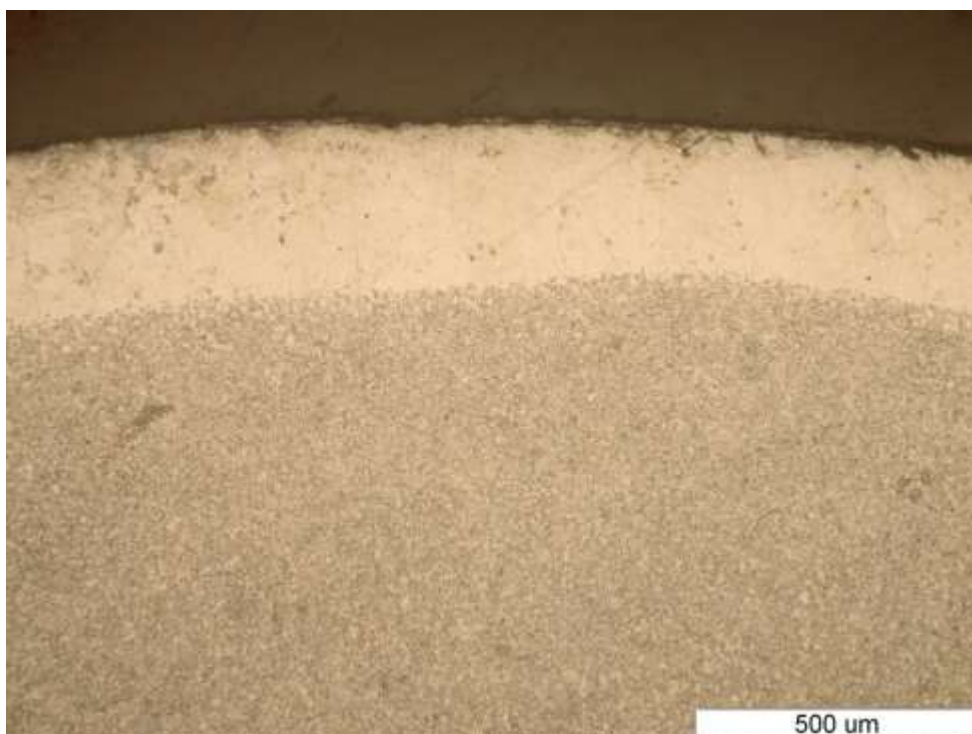
*Slika 46. Mikrostruktura uzorka 2 kod ruba pri povećanju od 100x*



*Slika 47. Mikrostruktura uzorka 2 kod zuba navoja pri povećanju od 100x*

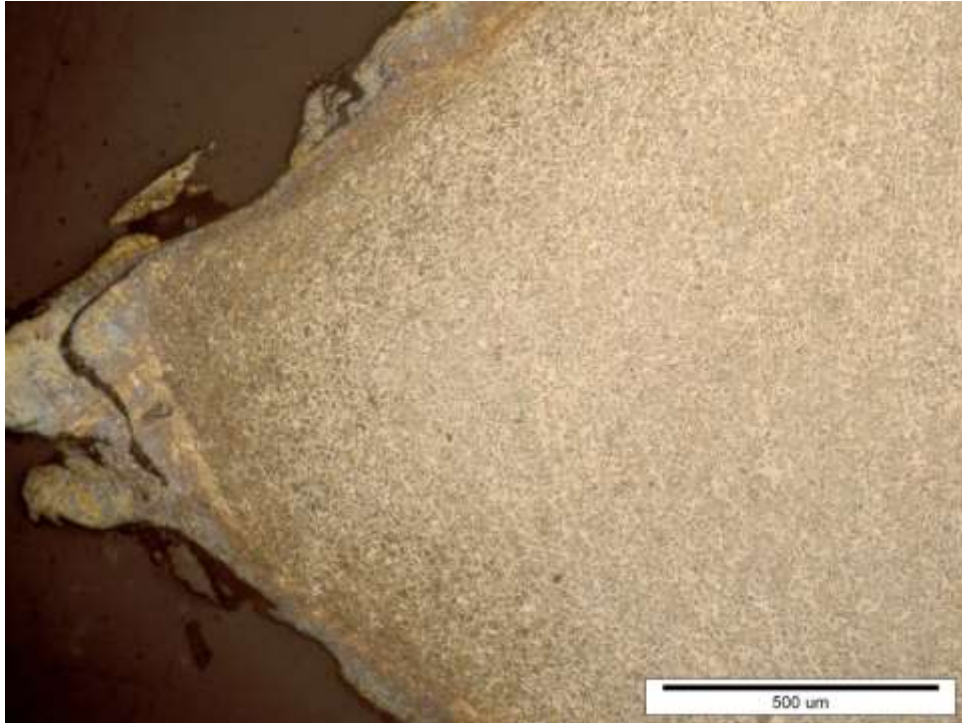


*Slika 48. Mikrostruktura uzorka 2 kod ruba pri povećanju od 200x*

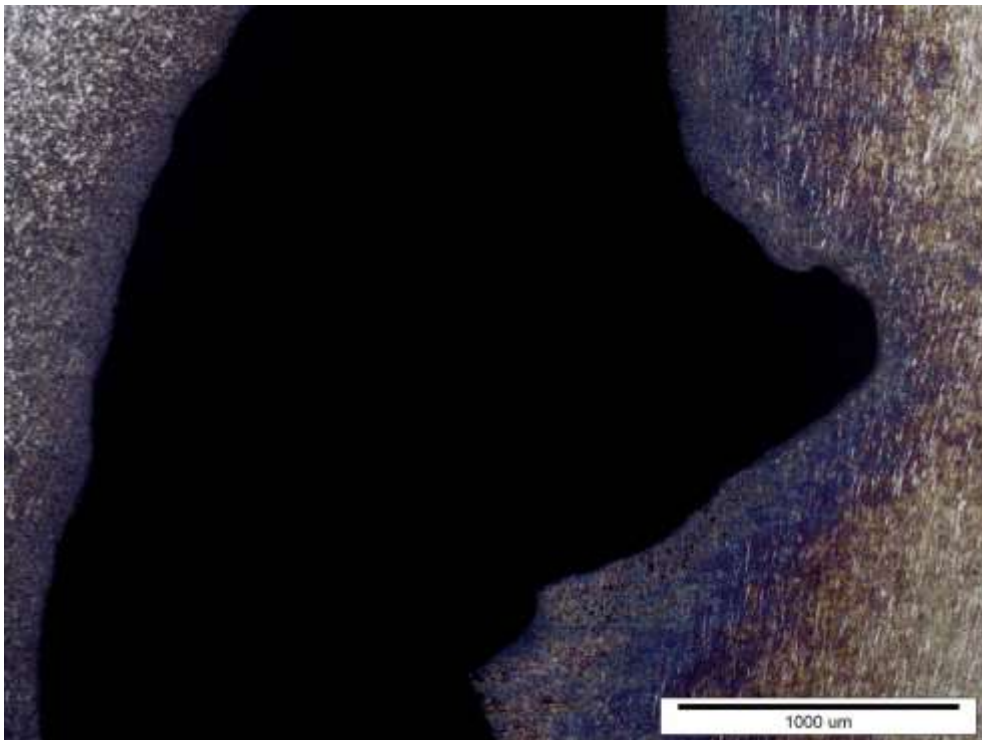


*Slika 49. Mikrostruktura uzorka 3 kod ruba pri povećanju od 100x*

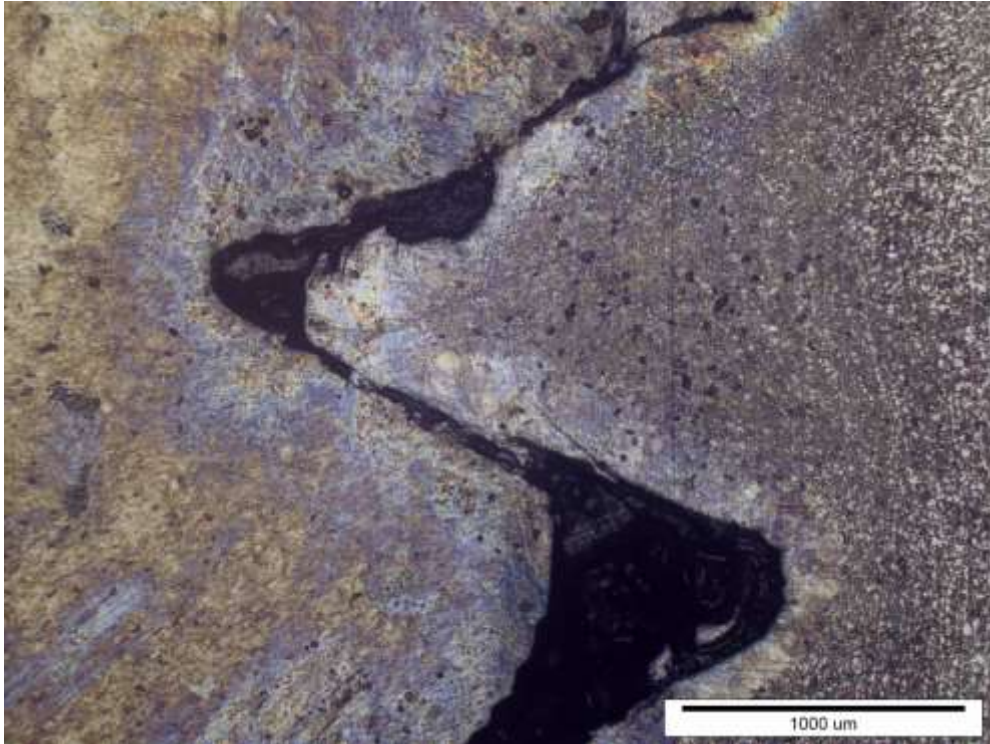




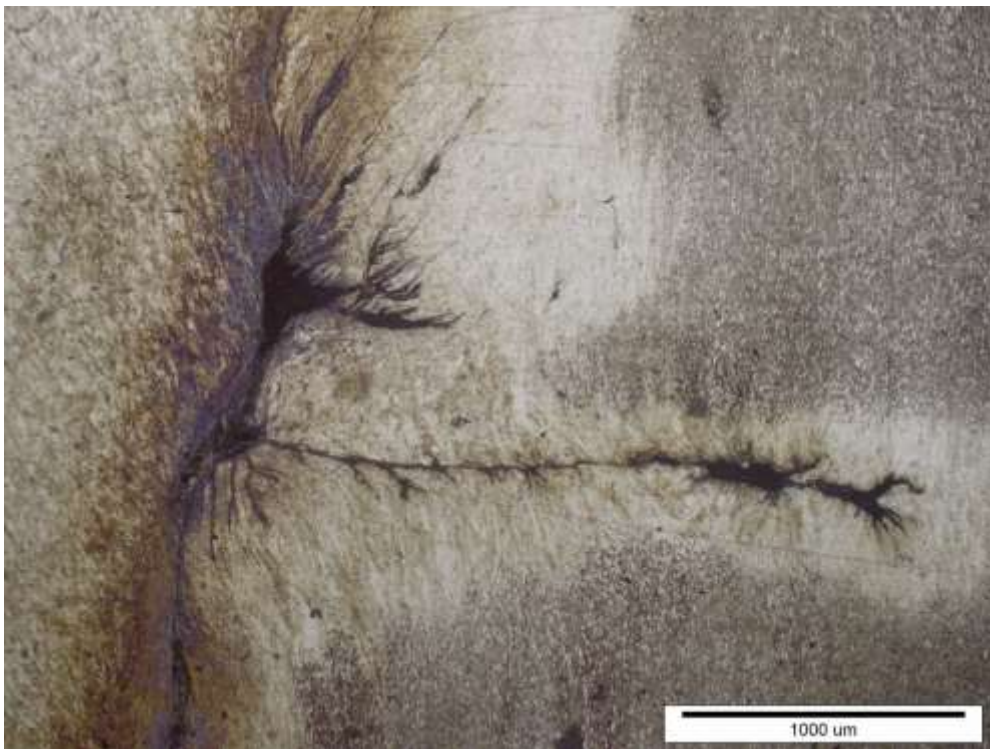
*Slika 50. Mikrostruktura uzorka 1, vijka u matici kod povećanja od 50x*



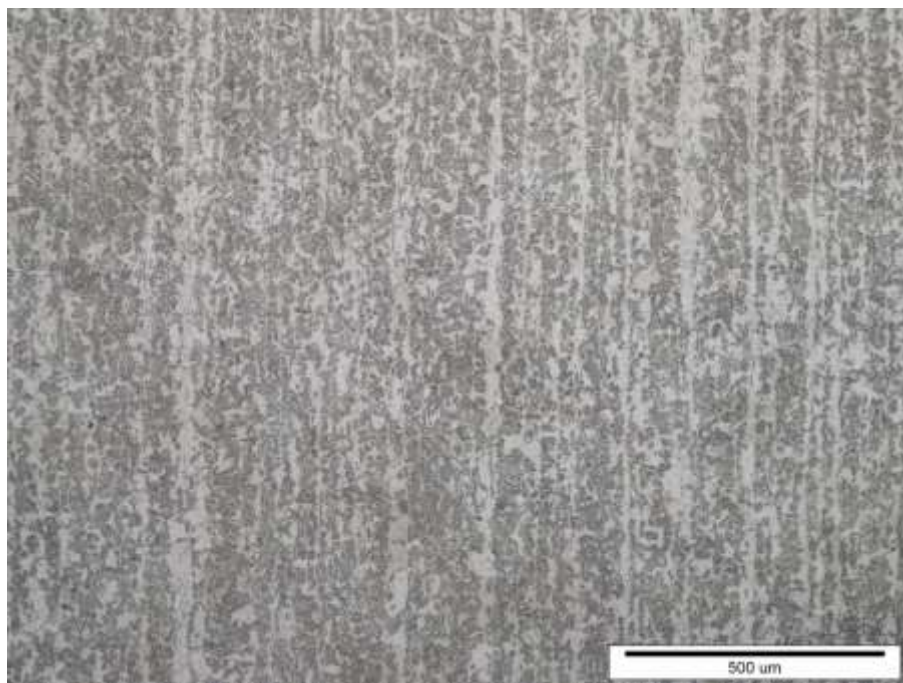
*Slika 51. Mikrostruktura uzorka 1, vijka u matici kod povećanja od 50x*



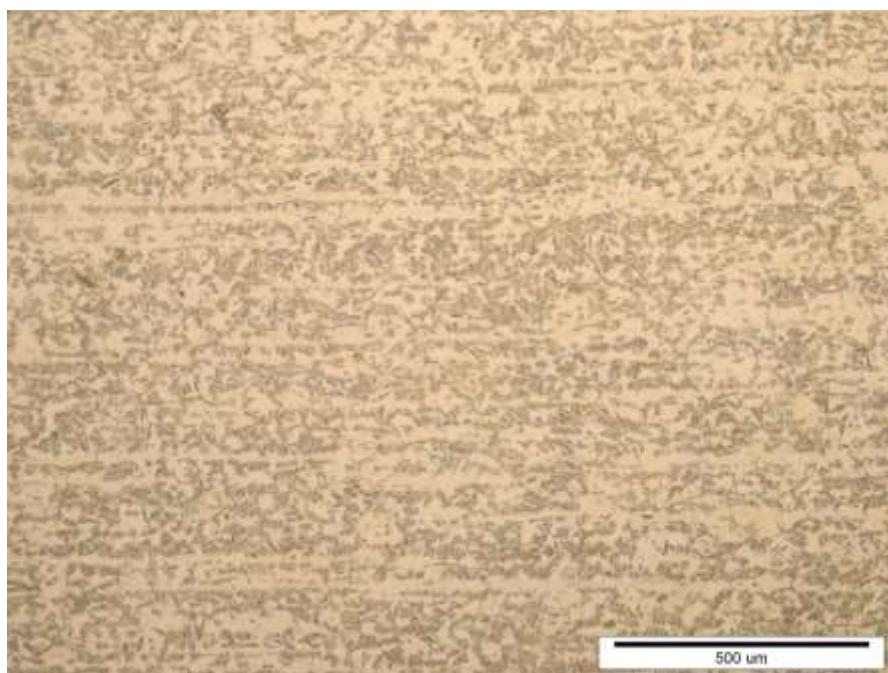
*Slika 52. Mikrostruktura uzorka 1, vijka u matici kod povećanja od 50x*



*Slika 53. Mikrostruktura uzorka 1, vijka u matici kod povećanja od 50x*



*Slika 54. Mikrostruktura uzorka 1, vijka u matici kod povećanja od 100x, jezgra*



*Slika 55. Mikrostruktura uzorka 2 kod povećanja od 100x, jezgra*



## 5.6 Analiza mikrostrukture skenirajućim elektronskim mikroskopom

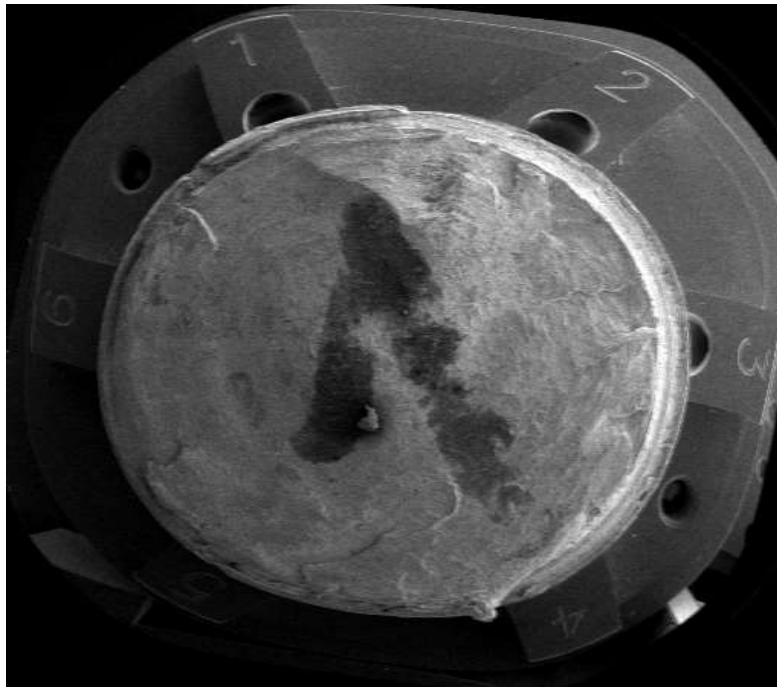
Nakon analize na svjetlosnom mikroskopu provedena je analiza na skenirajućem elektronskom mikroskopu (SEM). Osnova rada skenirajućeg elektronskog mikroskopa temelji se na pomicanju uskog, vrlo precizno fokusiranog snopa elektrona po površini uzorka koji se promatra. Slika uzorka može biti povećana i do 100 000 puta. [31]. Elektroni raspršeni s površine uzorka se „sakupljaju“ posebnim detektorima i obrađuju pomoću mikroprocesora kako bi se stvorila slika [32]. SEM koristi tri tipa detektora za sakupljanje izbijenih elektrona:

- detektor povratnog raspršenja ili BSE (eng. Back Scatter Electron)
- detektor sekundarnih elektrona ili SE (eng. Secondary Elektron) i
- energijsko disperzivni spektrometar ili EDS (eng. Energy Dispersive Spectrometer).

Analiza je provedena na elektronskom mikroskopu modela „Tescan Vega III Easyprobe“ koji je prikazan na slici 56. U analizi je korišten detektor sekundarnih elektrona (SE). Pomoću detektora sekundarnih elektrona (SE) napravljene su snimke uzoraka koje će biti prikazane na slikama 57., 58., 59. i 60.

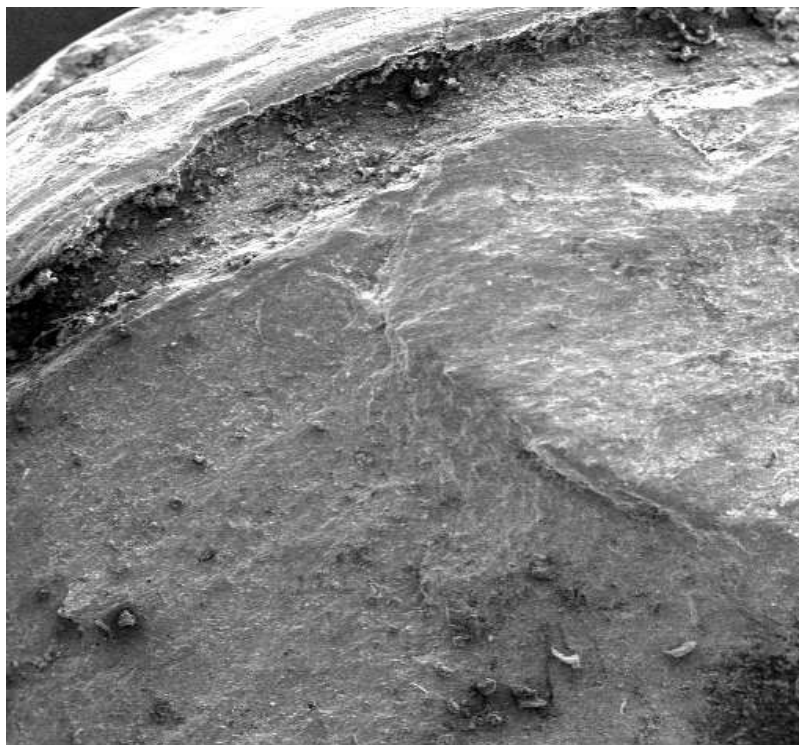


*Slika 56. Elektronski mikroskop „Tescan Vega III Easyprobe“*



SEM MAG: --- Name: 1  
DET: SE Detector DATE: 07/16/20 Vega ©Tescan  
VAC: HiVac Device: TS5136MM Digital Microscopy Imaging

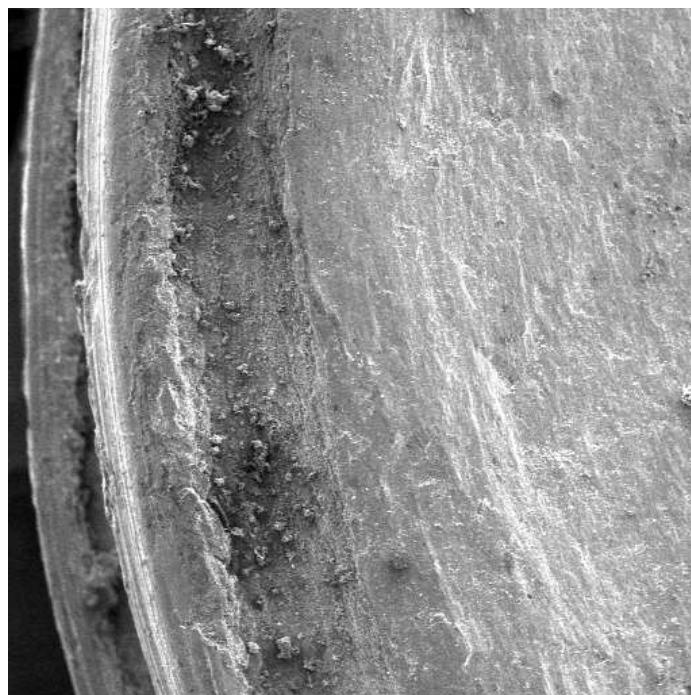
*Slika 57. Uzorak 1, prijelomna površina vijka*



SEM MAG: 35 x Name: 7  
DET: SE Detector DATE: 07/16/20 2 mm Vega ©Tescan  
VAC: HiVac Device: TS5136MM Digital Microscopy Imaging

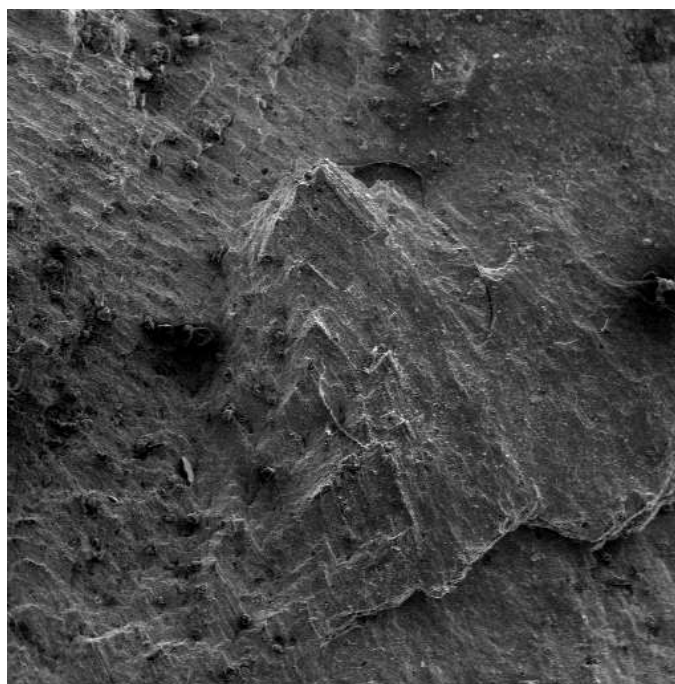
*Slika 58. Uzorak 1, detalj rubnog dijela*





SEM MAG: 41 x      Name: 9  
DET: SE Detector      DATE: 07/16/20      1 mm      Vega ©Tescan  
VAC: HiVac      Device: TS5136MM      Digital Microscopy Imaging

*Slika 59. Uzorak 1, detalj rubnog dijela*



SEM MAG: 39 x      Name: 10  
DET: SE Detector      DATE: 07/16/20      1 mm      Vega ©Tescan  
VAC: HiVac      Device: TS5136MM      Digital Microscopy Imaging

*Slika 60. Uzorak 1, sredina*

Na slikama koje su snimljene elektronskim mikroskopom „Tescan Vega III Easyprobe“ vidljiva je plastična deformacija površinskog sloja u dijelu navoja do koje je došlo radi slabijih mehaničkih svojstava u površinskom dijelu, prvenstveno razugljičenja. Analiza mikrostrukture svjetlosnim mikroskopom pokazala je da je došlo do razugljičenja na rubovima vijaka, odnosno vide se feritna zrna koja upućuju na manjak ugljika u mikrostrukтури vijka. Razugljičenje površinskog sloja u predjelu navoja je i razlog zbog kojeg je došlo do pucanja vijka. Zbog manjka ugljika u mikrostrukтури slabija su i mehanička svojstva, prvenstveno tvrdoća i čvrstoća.

### 5.7 Mjerenje mikrotvrdoće

Mikrotvrdoća uzorka izmjerena je na uzorku metodom po Vickersu, uz pomoć mikro-tvrdomjera PMT-3, koji je prikazan na slici 61. Površina uzorka je kod mjerenja mikrotvrdoće bila u poliranom stanju. Provedena su četiri mjerenja u rubnom dijelu u „razugljičenom“ sloju, u korijenu navoja te četiri mjerenja u sredini, u jezgri uz opterećenje od 200 g.



Slika 61. Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće uzorka

U tablici 10. prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće u „razugljičenom“ sloju i u jezgri.

Tablica 10. Tvrdoća uzorka 2

BROJ MJERENJA	„Razugljičeni“ sloj (rub) HV 0,2	Sredina uzorka HV 0,2
1.	146	163
2.	128	188
3.	141	174
4.	118	186
<b>Srednja vrijednost:</b>	133	178

## 6. Analiza rezultata i diskusija

Po propisanoj normi UIC-a, materijal iz kojeg su vijci i matice trebali biti izrađeni je Q235. Ova vrsta čelika može sadržavati do 0,17% ugljika te je namijenjena najčešće za provođenje toplinske obrade cementiranja. Međutim, zbog vrlo skupe toplinske obrade cementiranja, a ovi vijci i matice proizvode se u velikim količinama i serijama, vijci i matice DIV 14 STV-2 proizvedeni su od materijala C45 vjerojatno zbog njegove velike dostupnosti u svijetu i niže cijene. Čelik C45 može sadržavati od 0,4 do 0,5% ugljika što kao rezultat daje dobru tvrdoću i čvrstoću čelika, u ovom slučaju vijaka i matica koji se nalaze na pragovima željezničkih pruga.

Nakon što su se uzorci odrezali, obložili, prošli korake brušenja, poliranja i nagrizanja, pomoću svjetlosnog i elektronskog mikroskopa analizirana je njihova mikrostruktura pri različitim povećanjima. Mikrostruktura uzoraka sastoji se od ferita i perlita, što se jasno vidi na slikama 46., 47., 48., 49., 50., 54. i 55.

Toplinska obrada poboljšavanja koja se sastoji od kaljenja (iznad temperature od A3 linije) i visokotemperaturnog popuštanja (iznad temperature od 400°C) specifična je obrada za ovu vrstu čelika, ali nije se provela što se jasno vidi u mikrostrukturi uzoraka. Mikrostruktura je feritno-perlitna, a nakon toplinske obrade poboljšavanja bila bi martenzitna. Ovo navedeno ukazuje da toplinska obrada poboljšavanja nije provedena.

Trakasta feritno-perlitna struktura prikazana na slikama 46., 47., 48. i 49. tijela uzoraka 2 i 3, ukazuje da je eventualno provedena toplinska obrada žarenja za redukciju zaostalih naprezanja jer temperatura eventualno provedene toplinske obrade nije prešla temperaturu rekristalizacije. Na istim uzorcima vidljivo je razugljičenje površine, odnosno smanjenje ugljika u površinskom sloju. Minimalna temperatura pri kojoj dolazi do razugljičenja je 700°C, a to je temperatura blizu temperature A1. Na temelju ovih dvaju zaključaka, jedina toplinska obrada koja se mogla provesti je žarenje za redukciju zaostalih naprezanja koja se provodi na temperaturi između 400 i 650°C zbog vidljive trakaste strukture na slikama 54. i 55. Do samog razugljičenja je vjerojatno došlo pri ugrijavanju za obradu kovanja glave vijka, koja je bila vjerojatno značajno iznad A1 temperature (u gornjem području ugrijavanja za obrade deformiranjem, a što se vrlo često radi zbog manjeg trošenja alata i manjih potrebnih sila za deformiranjem) zbog toga što se razugljičenje može pojaviti kada se čelik ugrijava minimalno na temperaturu od 700°C.

Na uzorku 1, koji je izrezan iz vijka na kojem je došlo do loma jasno je u mikrostrukturi na slici 51. vidljiv začetak pukotine karakterističnog izgleda umora materijala jer su prijelomi nastali u uvjetima prolaska kompozicije vlaka s vagonima preko vijaka. Prijelomna površina ima tipičan izgled uslijed umora materijala uz nedostatak vidljivih brazdi koje nastaju radi postupne propagacije pukotine što indicira da je do loma došlo uslijed nisko cikličkog umora. Vlak s vagonima stvara velika dinamička opterećenja na vijke koji pričvršćuju tračnice. U ovom slučaju došlo je do propagacije pukotine te je lom nastupio nakon malog broja ciklusa, a ne kao za

razliku od na primjer 100 000 ciklusa gdje je slučaj klasičnog umora materijala gdje bi se ujedno i vidjele brazde na prijelomnoj površini uzorka. Zračnost koja se je pojavila između zuba navoja vijka na koje naližež matica, slike 51. i 52., pojavila se je zbog loše montaže pri zatezanju vijaka, a zbog primjene prevelike sile koja je uzrokovala inicijaciju pukotine.

Vrijednosti izmjerene tvrdoće na rubovima i u jezgri uzoraka pokazale su da je tvrdoća površinskog sloja nešto niža od tvrdoće jezgre s vrijednostima koje odgovaraju tvrdoći ferita, a što je u skladu s razugljichenjem površinskog sloja. Izmjerena tvrdoća jezgre u skladu je s uočenom mikrostrukturom uzorka i karakteristična za feritno-perlitnu strukturu čelika C45 [33].

## 7. Zaključak

Nakon provedenih ispitivanja moguće je zaključiti da:

- vijci i matice nisu napravljeni od materijala Q235 koju propisuje norma UIC 864-2 već su napravljeni od materijala C45 što je vidljivo iz analize mikrostrukture koja je feritno-perlitna s procijenjenim omjerom ferita i perlita 35 : 65 % dok je za čelike tipa C15 namijenjene cementiranju procjena udjela ferita i perlita 15 : 85 % [34]
- toplinska obrada poboljšavanja (kaljenje iznad A3 linije i visoko-temperaturno popuštanje) za ovu vrstu materijala se nije provela što kao rezultat daje manju tvrdoću i čvrstoću pa je došlo do pucanja i oštećenja vijaka što je vidljivo u mikrostrukтури koja je mješovita feritno-perlitna, a nakon toplinske obrade poboljšavanja bila bi martenzitna
- provedena je toplinska obrada žarenja za redukciju zaostalih naprezanja na temperaturi ispod temperature A1 i ispod temperature rekristalizacije, što je vidljivo iz trakaste feritno-perlitne strukture u jezgri uzoraka, koja je karakteristična za konti lijev u proizvodnji čelika
- mikrostruktura vijaka i matica je perlitno-feritna, ali se na rubovima uzoraka uočava feritni sloj što znači da je došlo do smanjenja ugljika u površinskom sloju, odnosno razugljichenja, naknadnim ugrijavanjem za obradu materijala deformiranjem tj. vjerojatno kovanja glave vijka
- provedena je loša montaža zbog toga što je primjenom prevelike sile došlo do preskakanja navoja vijka na mjestu nalijeganja matice te je na tom mjestu nastala slaba točka koja je uzrokovala inicijaciju pukotine

- daljnja propagacija pukotine uslijed umora materijala došla je zbog prevelikog dinamičkog opterećenja prolaskom vlaka s vagonima preko tračnica pričvršćenih vijcima, prijelomna površina ukazuje na pojavu nisko cikličkog umora jer nisu uočene brazde karakteristične za dulje vrijeme propagacije pukotine
- tvrdoća rubnog sloja karakteristična je za feritnu strukturu razugličenog sloja, a izmjerenje vrijednosti u jezgri u skladu s tvrdoćom čelika C45.

Nakon analize uzoraka moguće je zaključiti kako je do loma došlo radi loše odabrane i loše provedene toplinske obrade što je rezultiralo slabijim mehaničkim svojstvima, prvenstveno manjom tvrdoćom i čvrstoćom. Uz to, previsoka temperatura i moguće predugo držanje na visokoj temperaturi u mogućoj daljnjoj fazi kovanja glave vijka, došlo je do razugličenja površinskog sloja. Također, primjenom prevelike sile u samoj montaži vijka došlo je do stvaranja slabe točke tj. koncentrata naprezanja, koji je uslijed daljnjeg dinamičkog opterećenja doveo do loma vijka.

## 8. Literatura

- [1] T. Filetin, F. Kovačević, J. Indof, SVOJSTVA I PRIMJENA MATERIJALA, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2009.
- [2] <http://www.hrvatski-fokus.hr/index.php/znanost/4961-hrvatska-ima-pravo-na-eu-ovu-kvotu-od468-000-tona-celika>, preuzeto u kolovozu 2020.
- [3] [https://www.123rf.com/photo\\_84874724\\_stock-illustration-metal-screws-steel-bolts-nuts-nails-and-rivets-isolated-on-white-vector-set-construction-steel-screw.html](https://www.123rf.com/photo_84874724_stock-illustration-metal-screws-steel-bolts-nuts-nails-and-rivets-isolated-on-white-vector-set-construction-steel-screw.html), preuzeto u kolovozu 2020.
- [4] <http://www.laser-ing.hr/blog/zastita-industrije-celika-eu/attachment/svjetska-proizvodnja-sirovog-celika-2015/>, preuzeto u kolovozu 2020.
- [5] [https://www.steel-grades.com/Steel-Grades/Structure-Steel/59/7389/GBT\\_Q235.pdf](https://www.steel-grades.com/Steel-Grades/Structure-Steel/59/7389/GBT_Q235.pdf), preuzeto u kolovozu 2020.
- [6] <http://www.qiluspecialsteel.com/hr/c45-round-bar-aisi-1045-din-1-1191-jis-s45c.html>, preuzeto u kolovozu 2020.
- [7] <https://www.dhanlaxmisteel.com/c45-round-bar-supplier-exporter.html>, preuzeto u kolovozu 2020.
- [8] Stupnišek M., Cajner F.: Osnove toplinske obradbe metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 2001.
- [9] Matijević B., 3. predavanje , TII i PT toplinska obrada, šk.god. 2015/2016.
- [10] Stupnišek M., Cajner F.: Osnove toplinske obradbe metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 2001.
- [11] Kožuh S., Specijalni čelici-skripta, Sisak, 2010.
- [12] Matijević B., 3. predavanje , TII i PT toplinska obrada, šk.god. 2015/2016.
- [13] Gabrić I., Šitić S., Materijali II, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [14] Zgurić M., Toplinska obrada zavarenih spojeva, Završni rad, Zagreb, 2015.
- [15] <https://hrv.mentorbizlist.com/4282708-annealing-of-steel-as-a-type-of-heat-treatment-metal-technology>
- [16] Juras M.: Proračun i konstrukcija alata za kovanje koljenastog vratila, završni rad, Zagreb, 2017.

- [17] Ćorić D, Alar Ž.: Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, šk. god. 2014/2015.
- [18] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/de/Umor\\_materijala.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/de/Umor_materijala.jpg), preuzeto u kolovozu 2020.
- [19] <https://www.fatec-engineering.com/2020/05/16/using-the-low-cycle-fatigue-approach-when-kt-nominal-stress-exceeds-the-yield-strength-a-fundamental-mistake/>, preuzeto u rujnu 2020.
- [20] Agrawal R., Low Cycle Fatigue Life Production, International Journal of Emerging Research and Technology, 2014.
- [21] Carević M., Istraživanje mogućnosti aluminiziranja tvrdih metala u praškastom mediju, Završni rad, Zagreb, 2019.
- [22] Bašić B., Karakterizacija vruće valjane okrugle šipke iz čelika 39NiCrMo<sub>3</sub>, Završni rad, Zagreb, 2016.
- [23] Schauperl Z.: Predavanje 1, Karakterizacija materijala, šk. god. 2013/2014.
- [24] Šolić S.: Podloge za predavanje MIMK, šk.god. 2019./2020.
- [25] <https://www.optics-pro.com/stereo-microscope/optika-stereomikroskop-slx-1-auf-und-durchlicht-20x-40x-led-bino/p,63302>, preuzeto u kolovozu 2020.
- [26] <https://www.phy.uniri.hr/hr/ustroj/29-hr/ustroj/laboratoriji/800-pretrazni-elektronski-mikroskop.html>, preuzeto u kolovozu 2020.
- [27] <http://proizvodno-strojarstvo.blogspot.com/2011/07/vickersova-metoda-ispitivanja-tvrdoce.html>
- [28] <http://www.railway-fasteners.com/skl-series-rail-fastening-system.html>
- [29] <https://www.hzinfra.hr/wp-content/uploads/2017/07/Tehnicke-specifikacije.pdf>
- [30] [http://www.railway-fastener.com/clipbolt/pro\\_show-183.html](http://www.railway-fastener.com/clipbolt/pro_show-183.html)
- [31] Pavić, D.: Rasterski elektronski mikroskop, Diplomski rad, PMF – Matematički odjel, Zagreb, 2001.
- [32] Mršić, G., Žugaj, S.: Analiza GSR čestica upotrebom elektronskog mikroskopa (SEM/EDX), stručni članak, 2007.
- [33] V. M. Matyunin et al., J. Phys.: Conf. Ser. 1399 044002, 2019

- [34] E. Duka, H. Oettel, T. Dilo: Connection Between Micro and Macro Hardness Pearlitic - Ferritic Steel, AIP Conference Proceedings 1476(1):47-51 (2012)



## Popis slika

<i>Slika 1. Čelični vijci i matice [3].....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 2. Svjetska proizvodnja sirovog čelika u 2015. godini [4] .....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 3. Shematski prikaz dobivanja čelika i željeznih lijevova [1].....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 4. Šipke od C45 čelika [7].....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 5. Postupak poboljšavanja čelika [10].....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 6. Mikrostruktura poboljšanog čelika- visokopopušteni martenzit [11] .....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 7. Čelici za poboljšavanje [11].....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 8. Dijagram naprezanja i deformacija u polaznom stanju, poboljšanom stanju i u kaljenom stanju [12].....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 9. Kvalitativni dijagram poboljšavanja čelika [12] .....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 10. Dijagram žarenja za redukciju zaostalih naprezanja [13].....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 11. Postupak toplinske obrade- žarenje [15] .....</i>	<i>21</i>
<i>Slika 12. Pojava umora materijala (brazde) [18].....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 13. Shematski prikaz prijelomne površine kao posljedice umora materijala [17] .....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 14. Shematski prikaz loma od umora materijala [17] .....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 15. Dijagram razlike umora niskog i visokog ciklusa [20].....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 16. Raspodjela naprezanja za vrijeme i nakon opterećenja tereta [20] .....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 17. Shematski prikaz pripreme i metalografskog ispitivanja uzorka [22] .....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 18. Uređaj za rezanje uzoraka- Accutom 2 .....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 19. Uređaj za zalijevanje uzoraka u polimernu masu- Pneumet Press.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 20. Slojevi površine prije brušenja [22] .....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 21. Dijamanta pasta od 3 mikrometra .....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 22. 3% Nital.....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 23. Stereomikroskop [25].....</i>	<i>35</i>
<i>Slika 24. SEM- skenirajući elektronski mikroskop [26] .....</i>	<i>36</i>
<i>Slika 25. Indentor i otisak kod Vickersove metode [27] .....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 26. Tri razine ispitnih sila kod Vickersove metode [27] .....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 27. Makrosnimka uzorka 1 a) uzorak 1 bočno, b) uzorak 1 prednji dio sa maticom, c) uzorak 1 stražnji dio .....</i>	<i>40</i>
<i>Slika 28. Makrosnimka uzorka 2 a) uzorak 2 bočno, b) uzorak 2 bočno (uvećano), c) uzorak 2 stražnji dio .....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 29. Makrosnimka uzorka 3 a) Uzorak 3 bočno, b) uzorak 3 bočno (navoj), c) uzorak 3 stražnji dio .....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 30. Komponente SKL 14 sustava za pričvršćivanje tračnica [28].....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 31. Pričvrtni vijak oblika T s maticom [29].....</i>	<i>44</i>
<i>Slika 32. Karakteristike pričvrstnog vijka T s maticom [29] .....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 33. Vrsta pričvrstnog vijka T s maticom .....</i>	<i>46</i>
<i>Slika 34. Uređaj za makro analizu metalografskih uzoraka .....</i>	<i>47</i>
<i>Slika 35. Uređaj za brušenje uzoraka- Presi .....</i>	<i>48</i>
<i>Slika 36. Priprema uzorka- brušenje.....</i>	<i>49</i>

<i>Slika 37. Uređaj za poliranje uzoraka</i> .....	50
<i>Slika 38. Priprema uzorka- poliranje</i> .....	50
<i>Slika 39. Mikrostruktura uzorka 3 u poliranom stanju kod povećanja od 200x</i> .....	51
<i>Slika 40. Oprema za nagrizanje uzoraka</i> .....	51
<i>Slika 41. Nagrizanje uzoraka</i> .....	52
<i>Slika 42. Gotovi uzorak- vijak u matici</i> .....	52
<i>Slika 43. Gotovi uzorak- vijak 1</i> .....	53
<i>Slika 44. Gotovi uzorak- vijak 2</i> .....	53
<i>Slika 45. Optički mikroskop „Olympus GX51“</i> .....	54
<i>Slika 46. Mikrostruktura uzorka 2 kod ruba pri povećanju od 100x</i> .....	55
<i>Slika 47. Mikrostruktura uzorka 2 kod zuba navoja pri povećanju od 100x</i> .....	55
<i>Slika 48. Mikrostruktura uzorka 2 kod ruba pri povećanju od 200x</i> .....	56
<i>Slika 49. Mikrostruktura uzorka 3 kod ruba pri povećanju od 100x</i> .....	56
<i>Slika 50. Mikrostruktura uzorka 1, vijka u matici kod povećanja od 50x</i> .....	57
<i>Slika 51. Mikrostruktura uzorka 1, vijka u matici kod povećanja od 50x</i> .....	57
<i>Slika 52. Mikrostruktura uzorka 1, vijka u matici kod povećanja od 50x</i> .....	58
<i>Slika 53. Mikrostruktura uzorka 1, vijka u matici kod povećanja od 50x</i> .....	58
<i>Slika 54. Mikrostruktura uzorka 1, vijka u matici kod povećanja od 100x, jezgra</i> .....	59
<i>Slika 55. Mikrostruktura uzorka 2 kod povećanja od 100x, jezgra</i> .....	59
<i>Slika 56. Elektronski mikroskop „Tescan Vega III Easyprobe“</i> .....	60
<i>Slika 57. Uzorak 1, prijelomna površina vijka</i> .....	61
<i>Slika 58. Uzorak 1, detalj rubnog dijela</i> .....	61
<i>Slika 59. Uzorak 1, detalj rubnog dijela</i> .....	62
<i>Slika 60. Uzorak 1, sredina</i> .....	62
<i>Slika 61. Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće uzorka</i> .....	63

## **Popis tablica**

<i>Tablica 1. Kemijski sastav čelika Q235. [5]</i> .....	13
<i>Tablica 2. Mehanička svojstva čelika Q235. [5]</i> .....	13
<i>Tablica 3. Mogući režimi toplinske obrade čelika Q235. [5]</i> .....	13
<i>Tablica 4. Kemijski sastav čelika C45. [6]</i> .....	14
<i>Tablica 5. Mehanička svojstva u kaljenom stanju čelika C45. [6]</i> .....	14
<i>Tablica 6. Mehanička svojstva u normaliziranom stanju čelika C45 u ovisnosti o dimenzijama gredice. [6]</i> .....	14
<i>Tablica 7. Temperatura za pojedine obrade za čelik C45. [6]</i> .....	15
<i>Tablica 9. Vrste brusnih papira sa određenom brzinom okretaja u minuti.</i> .....	48