

# Toplinska obrada čelika

---

Vrdoljak, Miro

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:989766>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-27**

Repository / Repozitorij:

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**MIRO VRDOLJAK**

**TOPLINSKA OBRADA ČELIKA**

**ZAVRŠNI RAD**

**SPLIT, 2024**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ BRODOSTROJARSTVA**

## **TOPLINSKA OBRADA ČELIKA**

**ANALIZA POVRŠINE ČVRSTOĆE KORIŠTENOG ZUPČANIK A OD  
ČELIKA U ZAPRIMLJENOM STANJU I NAKON RAZNIH  
TOPLINSKIH OBRADA**

**ZAVRŠNI RAD**

**MENTORICA:**

**Prof. dr. sc. Liane Roldo**

**STUDENT:**

**Miro Vrdoljak  
(MB: 0171279633)**

**SPLIT, 2024**

**Miro Vrdoljak**

**ANALIZA POVRŠINE ČVRSTOĆE KORIŠTENOG ZUPČANIK A OD  
ČELIKA U ZAPRIMLJENOM STANJU I NAKON RAZNIH  
TOPLINSKIH OBRADA**

**TEHNOLOGIJA MATERIJALA**

**POVJERENSTVO ZA OCJENU I OBRANU ZAVRŠNOG RADA je u  
sastavu:**

- |                        |                                   |
|------------------------|-----------------------------------|
| <b>1. Predsjednik:</b> | <b>PROF. DR. SC. NENAD VULIĆ</b>  |
| <b>2. Član:</b>        | <b>PROF. DR. SC. NIKOLA RAČIĆ</b> |
| <b>3. Mentor:</b>      | <b>PROF. DR. SC. LIANE ROLDO</b>  |

## ZAHVALE

Dosta ljudi je pridonijelo i pomoglo u izradi završnog rada i njegovom eksperimentalnom dijelu. Među njima posebno zahvaljujem ing. str. MIIMS Petru Vrvilu na rezanju i izravnavanju uzoraka.

Nadalje, zahvaljujem gospodinu Mirzadu Taliću iz AD Plastik-a na dodatnom rezanju uzoraka EDM opremom.

Veliko hvala višem predavaču Petru Ljumoviću s FESB-a na pripremi metalografskih uzoraka koji su rezultirali makro i mikrografskim slikama.

Zahvaljujem Povjerenstvu za završni rad PFST-a, prof. dr. sc. Nenadu Vuliću i prof. dr. sc. Nikoli Račiću na uloženom vremenu i predanosti u analizi i davanju povratnih informacija.

I na kraju, ali ne manje važno, zahvale mentorici prof. dr. sc. Liane Roldo na aktivnom mentorstvu, kritikama, savjetima i informacijama koje su dovele do završetka i obrane ovog rada.

## SAŽETAK

Cilj ovog rada je proučavanje utjecaja različitih postupaka toplinske obrade na tvrdoću AISI 8620 cementiranih zuba zupčanika. U ovom radu provedena je teorijska i eksperimentalna toplinska obrada glavnog zupčanika, zatim ispitivanje tvrdoće u primljenom stanju i toplinski obrađenih zuba zupčanika te mikrostrukturna analiza netretiranih zuba. U teorijskom dijelu rada opisan je glavni zupčani prijenos i njegova svojstva, te su objašnjene toplinske obrade koje su se koristile na ovome zupčaniku u eksperimentalnom dijelu rada. Također, navedeni su čelici koji se koriste za površinske toplinske obrade te je prikazano kako cementiranje utječe na površinu uzorka. Objašnjene su tvrdoće materijala i najčešće metode mjerenje tvrdoće. U eksperimentalnom dijelu provedene su toplinske obrade materijala te su nakon svake obrade uzorci podvrgnuti ispitivanju tvrdoće materijala. Rezultati mjerenja tvrdoće pokazali su da je primjena procesa toplinske obrade značajno utjecala na tvrdoću AISI 8620 zupčanika te da je toplinska obrada kaljenja u ulju ili vodi postigla tvrdoću zubaca od približno 60 HRC, s obzirom da to područje nakon cementiranja ima između 0,8 i 0,9 %C.

*Ključne riječi: glavni zupčasti prijenos, čelik, cementiranje, toplinska obrada, mjerenje tvrdoće.*

## ABSTRACT

The objective of this work is to study the effect of different heat treatment processes on the hardness of AISI 8620 carburizing gear teeth. In this study, theoretical and experimental heat treatments were performed on the main gear, followed by hardness testing of the as-received and heat-treated gear teeth, and microstructural analysis of the as-received teeth. The theoretical part of the study describes the main gear transmission, its properties and characteristics, and explains the heat treatments used on this gear in the experimental part of the study. Additionally, steels used for surface heat treatments are mentioned, and the effect of carburizing the surface of the sample is shown. The hardness of materials and the most common hardness measurement methods are explained. In the experimental part, heat treatments of the material were carried out, and after each treatment, the treated samples were subjected to hardness testing. The hardness results showed that the application of heat treatment processes had a significant effect on the hardness of AISI 8620 gear teeth. The results indicate that the heat treatment of tempering in oil or water was carried out to obtain a hardness of approximately 60 HRC in the teeth, considering that this region, after cementation, presents between 0.8 and 0.9 %C.

*Keywords: pinion maindrive transmission, steel, carburizing, heat treatment, hardness testing.*

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>2. PREGLED LITERATURE</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1. PORIVNI ZUPČANIČKI PRIJENOS</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2. ČELICI ZA POVRŠINSKE TOPLINSKE OBRADU</b> .....	<b>10</b>
<b>2.3. TOPLINSKA OBRADA</b> .....	<b>11</b>
<b>2.4. POVRŠINSKE TOPLINSKE OBRADU</b> .....	<b>14</b>
<b>2.4.1. Vrste površinskih otvrdnjavanja [4],[8],[12]</b> .....	<b>14</b>
<b>2.4.2. Cementiranje</b> .....	<b>14</b>
<b>2.5. METODE MJERENJA TVRDOĆE</b> .....	<b>16</b>
<b>3. MATERIJAL I METODE</b> .....	<b>20</b>
<b>4. REZULTATI I RASPRAVA</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1. STRUKTURA MATERIJALA</b> .....	<b>29</b>
<b>4.2. ANALIZA TVRDOĆE</b> .....	<b>31</b>
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>34</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>35</b>
<b>POPIS SLIKA</b> .....	<b>37</b>
<b>POPIS TABLICA</b> .....	<b>39</b>
<b>POPIS KRATICA</b> .....	<b>40</b>

## 1. UVOD

Čelik je jedan od najraširenijih i najvažnijih konstrukcijskih materijala, koji se koristi u raznim granama industrije za izradu alata, strojeva, brodova, automobila i raznih konstrukcija. Sam čelik ne može zadovoljiti sve uvjete koji su traženi u određenim situacijama primjene stoga se na njega primjenjuju postupci sa ciljem poboljšanja svojstava. Primjerice, mogu se provoditi toplinske obrade, koje su skup postupaka s ciljem promjene svojstava metala a koje mogu biti fizikalna, kemijska ili mehanička s kontroliranim grijanjem i hlađenjem u propisanim vremenskim intervalima na određenoj temperaturi.

Kroz kontrolirano grijanje i hlađenje, mijenja se mikrostruktura čelika te se samim time utječe na poboljšanje njegove tvrdoće, čvrstoće, žilavosti te otpornosti na trošenje te veća dugotrajnost i pouzdanost materijala.

Toplinska obrada najčešće se radi na čelicima, a omogućava postizanje svojstava skupljih i kvalitetnijih materijala od polazno jeftinijih i manje kvalitetnijih materijala.

Cilj ovog rada bio je analizirati tvrdoću zuba cementiranog zupčanika izrađenog od čelika 20NiCrMo2/AISI 8620 u stanju prijema i nakon nekoliko toplinskih obrada. Kao što je već proučavano, tvrdoća materijala opisuje njegovu sposobnost da se odupre lokaliziranoj deformaciji ili prodiranju, što značajno utječe na njegovu upotrebu u raznim tehničkim i inženjerskim aplikacijama.

U teoretskom dijelu ovog članka obrađivane su različite tehnike ispitivanja tvrdoće, uključujući Brinellovu, Rockwellovu i Vickersovu metodu, koje omogućuju precizno određivanje tvrdoće, čime se procjenjuje kvaliteta materijala i njegova otpornost na opterećenja u radnim uvjetima. Dodatno su obrađene glavne toplinske obrade metala i prijenos preko zupčanika.

Toplinska obrada i mjerenje tvrdoće obavljani su na Pomorskom fakultetu u Splitu, a analiza mikrostrukture čelika prevedena je na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu.

Analizom rezultata ispitivanja uspoređeni su dobiveni rezultati ispitivanja tvrdoće za svaku pojedinu toplinsku obradu, koji su uspoređeni sa početnim stanjem glavnog zupčastog prijenosa te su potom izvedeni zaključci.



## 2. PREGLED LITERATURE

### 2.1. PORIVNI ZUPČANIČKI PRIJENOS

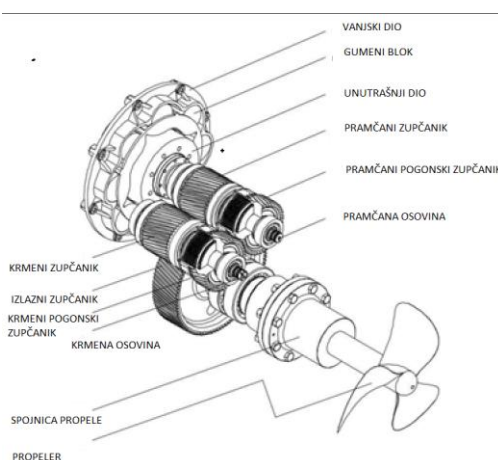
Glavni zupčani prijenos predstavlja ključan dio pogonskog sklopa vozila ili broda, odgovoran za prijenos snage motora na kotače ili brodski vijak (slika 1). Općenito, sastoji se od zupčanika koji je smješten na izlaznoj strani, zupčanika sa ulazne strane te ulaznog i izlaznog vratila [1]. Zupčanik preuzima snagu od motora preko pogonskog vratila pri nekoj brzini vrtnje. Zupčanički prijenos pretvara okretni moment motora pri nekoj brzini vrtnje u okretni moment potreban za vrtnju kotača ili broskog vijka pri nekoj drugoj ili istoj brzini vrtnje [2]. Slika 2 prikazuje detalje primjera konusnog zupčanika vozila koji povezuje diferencijal i mjenjač te primjer pogonskih kotača.

U odnosu na uzajamni položaj osi zupčanika, uključujući i vratila na koja su zupčanici postavljeni, zupčani prijenosnici dijele se na: prijenosnike s paralelnim osima, prijenosnike s osima koje se sijeku, prijenosnike s mimosmjernim osima i suosne prijenosnike [2].

O zahtijevanim položajima osi ovisi vrsta (oblik tijela i linije bokova) zupčanika:

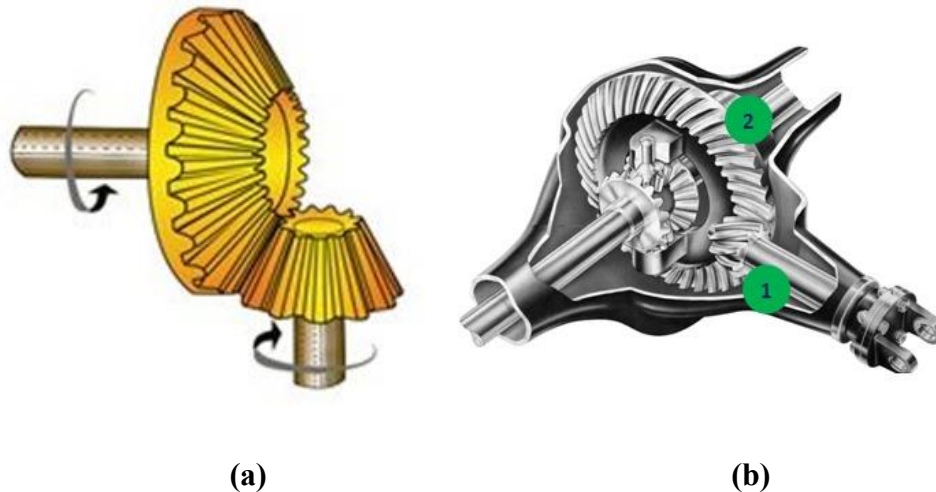
- (a) paralelne osi vratila – cilindrični zupčanici s ravnim ili kosim zubima (čelnici),
- (b) osi vratila koje se sijeku – stožasti zupčanici s ravnim i kosim zubima (stožnici),
- (c) mimosmjerne osi vratila – cilindrični zupčanici sa zakrivljenim zubima (vijčanici), stožasti zupčanici sa zakrivljenim zubima (hipoidni zupčanici) i puž s pužnim kolom (pužnici),
- (d) suosna vratila – harmonijski prijenosnici i planetarni prijenosnici [2].

Prema obliku tijela zupčanika razlikuje se nekoliko tipova kao što su: ravni, kosi, spiralni, pomaknuti, strelasti i lučni [2].



**Slika 1. Primjer broskog porivnog sustava sa zupčaničkim prijenosnikom.**

Izvor: Prilagođeno prema [1]



**Slika 2. (a) primjer spojnog konusnog zupčanika, (b) primjer prijenosnog sustava vozila. [<https://www.howacarworks.com/basics/how-the-transmission-works>]: 1 – Pogonski zupčanik pričvršćen na kraj prijenosnog vratila koji prenosi gibanje iz mjenjača i 2 – Tanjurasti zupčanik – namijenjen za promjenu smjera gibanja vratila prijenosnika**

U ovom završnom radu, proučava se glavni prijenos namijenjen kamionima i terenskim vozilima. Mjenjač glavnog pogona sa zupčanikom u ovim vozilima projektiran je za rukovanje teškim teretima i neravnim terenima, što ih čini pouzdanima za vožnju po cesti i izvan nje (slika 3). Na slici 4 detaljno je prikazan cilindrični zupčanik s kosim zubima. Uvjeti u kojima se koriste ova vozila zahtijevaju visoke standarde za izdržljivost i performanse, stoga je zupčanik izrađen od čeličnih legura velike čvrstoće kao što je čelik 20NiCrMo2 / AISI 8620, koji je podvrgnut dodatnim preciznim toplinskim obradama kao što su cementiranje, kaljenje i popuštanje kako bi se osigurala maksimalna izdržljivost i otpornost na habanje [3].



**Slika 3. Prikaz glavnog zupčastog prijenosa [<https://jeepest.com/gb/transmission-ckw352353/778-pinion-maindrive-transmission-gmc.html>]**



**Slika 4. Gornji prikaz unutarnjeg i vanjskog oboda zupčanika**

## **2.2. ČELICI ZA POVRŠINSKE TOPLINSKE OBRADU**

Čelik se obično definira kao legura željeza i željeznog karbida, gdje udio ugljika varira između par stotih dijelova postotka do oko 2% s dodatkom mangana općenito između 0,2 i 0,9%. Ostali legirani elementi mogu ukupno iznositi do 5% mase u niskolegiranim čelicima te više od 5% u srednjelegiranim čelicima. Kod alatnih čelika i nehrđajućih čelika ponekad i više od 30% mase su legirni elementi. Čelici mogu imati širok raspon svojstava ovisno o njihovom sastavu, fazama i prisutnim mikro komponentama, koje pak ovise o toplinskoj obradi [4].

Zupčanici su strojni dijelovi čija je svrha prijenos snage i gibanja (vrtnje) s vratila na vratilo. Najčešći materijal koji se koristi za izradu zupčanika je čelik, a ovisno o potrebi, zahtjevima, temperaturi te drugim faktorima koriste se različite vrste čelika. Najčešći čelici koji se koriste za izradu zupčanika su: ugljični čelik (niskougljični, srednjeugljični i visokougljični) i legirani čelici. Toplinska obrada ovisi o čelicima. Na primjer, niskougljični čelici se cementiraju, a srednje i visokougljični čelici su kale ili nitiraju [3],[5].

AISI 8620 / 20NiCrMo2 (po standardu EN 10084: 2008) čelik često se koristi za proizvodnju zupčanika i glavnih zupčastih prijenosa. Odlikuje ga izvrsna kovljivost i zavarljivost, visoka žilavost, te poprilično dobra obradivost, a kako bi se postigla trajnost, tvrdoća i otpornost na habanje potrebno ga je toplinski obraditi. S obzirom na činjenicu da AISI 8620 čelik pripada skupini niskougljičnih (0,2% C) i niskolegiranih (oko 1,2% masenog udjela legirajućih elemenata) čelika zbog svojih specifičnih svojstava i sposobnosti za površinsko kaljenje cementiranjem i karbonitriranjem dosta se koristi u inženjerstvu i industriji. Nakon cementiranja, površinski sloj čelika ima maseni sadržaj ugljika od 0,8 do 0,9%, te se kali i poboljšava, što rezultira martenzitom visoke otpornosti na trošenje [3],[6].

U normaliziranom (često izvornom) stanju relativno nizak sadržaj ugljika čelika AISI 8620 čini ga idealnim za strojnu obradu. Legirajući elementi kao što su nikal, molibden i krom omogućuju stvrdnjavanje čvrste otopine i stvaranje karbida koji poboljšavaju mehaničku čvrstoću i tvrdoću nakon cementiranja. Kombinacija niske tvrdoće unutrašnje strukture i visoke tvrdoće površinskog sloja čini AISI 8620 idealnim za primjenu u komponentama koje podliježu udarcima, trenju i habanju, kao što su zupčanici, osovine, vratila, ležajevi i drugi dijelovi koji zahtijevaju visoku izdržljivost i preciznost [7]. Kemijski sastav prikazan je u tablici 1.

**Tablica 1. Kemijski sastav čelik AISI 8620**

<b>Element</b>	<b>Sadržaj (%)</b>
<b>Željezo, Fe</b>	96.895-98.02
<b>Mangan, Mn</b>	0.700-0.900
<b>Nikla, Ni</b>	0.400-0.700
<b>Krom, Cr</b>	0.400-0.600
<b>Ugljik, C</b>	0.180-0.230
<b>Silicij, Si</b>	0.150-0.350
<b>Molibden, Mo</b>	0.150-0.250
<b>Sumpor, S</b>	≤ 0.0400
<b>Fosfor, P</b>	≤ 0.0350

Izvor: MatWeb – Material Property Data

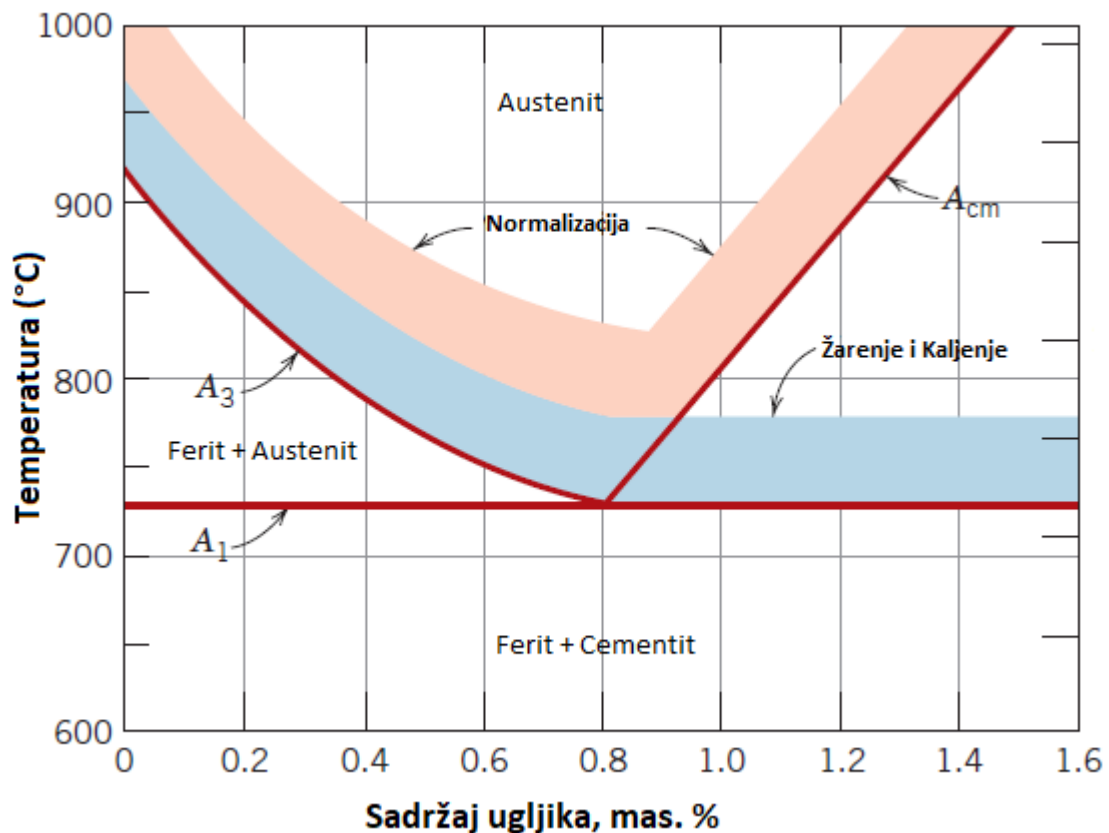
(<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ddb18ff0327347ceb2cc59fc0d761295&ckck=1>)

### 2.3. TOPLINSKA OBRADA

Pod toplinskom obradom podrazumijeva se skup postupaka čiji je cilj promjena svojstava metala (kemijska, mehanička i fizikalna) grijanjem i hlađenjem u kontroliranim uvjetima na određenim temperaturama i tijekom određenog vremena [8].

Prije spominjanja vrsta toplinske obrade kojoj je čelik podvrgnut, potrebno je označiti granice faza. Ugljični čelici i niskolegirani čelici obično se austenitiziraju na temperaturama koje proizvode jednofazni austenit. To znači da se čelik mora zagrijati iznad A3 ili Acm temperature [9]. Slika 5 prikazuje dio faznog dijagrama željezo-željezni karbid. Horizontalna linija na eutektoidnoj temperaturi, A1, najniža je kritična temperatura ispod koje će se, pod ravnotežnim uvjetima, sav austenit transformirati u feritnu i cementitnu fazu.

Fazne granice,  $A_3$  i  $A_{cm}$ , predstavljaju gornje kritične temperaturne linije. Za temperature i sastave iznad ovih granica postoji samo austenitna faza [8].



Slika 5. Fazni dijagram željezo-željezni karbid, koji pokazuje raspon temperature toplinske obrade za ugljične čelike

Izvor: Prilagođeno prema [8].

Potpuno žarenje (*full annealing*) je postupak toplinske obrade metala koji uključuje zagrijavanje materijala na visoku temperaturu, zadržavanje na toj temperaturi određeno vrijeme i kontrolirana niska brzina hlađenja. Ovaj proces ima za cilj izmjenu mikrostrukture čelika, smanjenje tvrdoće i zaostalih napreznja, to povećanje duktilnosti materijala kako bi se postigli određeni skupovi svojstava koja se zahtijevaju za specifične primjene [8],[10].

Normalizacija je postupak toplinske obrade metala koji se koristi za postizanje uniformne i stabilne strukture materijala. Ovaj proces se obično primjenjuje na čelik ili legure čelika. Normalizacija se provodi zagrijavanjem materijala na određenu temperaturu iznad točke austenitizacije, zatim zadržavanjem na toj temperaturi i na kraju hlađenjem na zraku [11].

Kaljenje je postupak toplinske obrade metala koji se koristi za poboljšanje tvrdoće i čvrstoće materijala. Ovaj postupak uključuje zagrijavanje metala na visoke temperature, zadržavanje na toj temperaturi kako bi se postigla homogena struktura, a zatim brzo hlađenje u mediju za hlađenje poput vode, ulja ili zraka [11].

Opći postupak kaljenja čelika uključuje tri koraka [9]:

1. Austenitizacija: čelik se zagrijava kako bi se formirao austenit (obično 100% austenita, ali ne i uvijek). Temperature austenitizacije variraju s udjelom ugljika i legiranih elemenata u sastavu čelika.

2. Gašenje: vrući čelik se brzo hladi uranjanjem u ulje, u vodu, u zraku i druge (tablica2).

3. Popuštanje: čelik se zagrijava na nisku temperaturu kako bi se uklonila krhkost.

**Tablica 2: Relativne brzine hlađenja u različitim medijima za kaljenje [12]**

<b>Rashladni medij</b>	<b>Brzina hlađenja od 717 do 550 °C u odnosu na vodu na 18°C</b>
<b>Voda na 25°C</b>	0,72
<b>Voda na 18°C</b>	1,00
<b>Voda na 0°C</b>	1,06
<b>Vodena otopina, 10% NaCl</b>	1,96
<b>Vodena otopina, 10% NaOH</b>	2,06
<b>Glicerin</b>	0,20
<b>Emulzija 10% ulja u vodi</b>	0,11
<b>Otopina sapuna</b>	0,077
<b>Zrak</b>	0,028
<b>Vakuum</b>	0,011

Popuštanje je postupak toplinske obrade čelika koji se uvijek provodi nakon kaljenja kako bi se smanjile unutarnje napetosti, poboljšala žilavost i stabilnost materijala. Popuštanjem nakon kaljenja smanjuje se tvrdoća, čvrstoća i granica elastičnosti, a povećavaju se žilavost i rastezljivost [11].

## 2.4. POVRŠINSKE TOPLINSKE OBRADNE

Površinsko otvrdnjavanje, uglavnom toplinskom obradom, koristi se za promjenu površinskih svojstava i proširenje upotrebe određenih materijala, uglavnom čelika, stvarajući kombinacije svojstava koje nije lako postići na druge načine. Stoga se određeni dijelovi mogu proizvesti od čelika s niskim ili srednjim udjelom ugljika za dobro oblikovanje a sama površina očvrstnuti konačnom toplinskom obradom. Površinsko otvrdnjavanje također smanjuje iskrivljenje i eliminira pucanje koje može pratiti otvrdnjavanje, posebno u dijelovima velikih presjeka [12].

Toplinska obrada može se kombinirati s kemijskom, fizikalnom i mehaničkom obradom kako bi se postigla željena svojstva materijala, a time i proizvoda.

U širokoj primjeni površinsko otvrdnjavanje metalnog obratka je prikladnije nego potpuno otvrdnjavanje [8].

### 2.4.1. Vrste površinskih otvrdnjavanja [4],[8],[12]

- Termokemijske toplinske obrade (toplinske obrade s ciljem promjene kemijskog sastava površine metala):
  - Cementiranje – povećavanje sadržaja ugljika (C) u površinskom sloju obratka;
  - Nitiranje – povećavanje sadržaja dušika (N) u površinskom sloju obratka;
  - Karbonitriranje – povećavanje sadržaja ugljika i dušika u površinskom sloju obratka;
  - Boriranje – povećavanje sadržaj bora (B) u površinskom sloju obratka i dr.
- Površinsko kaljenje – termička obrada kojom se kali samo površinski sloj obratka, dok se struktura po dubini ne mijenja.
- Metalizacija - tehnika nanošenja metalnih premaza na površinu predmeta. Metalne prevlake mogu biti dekorativne, zaštitne ili funkcionalne.

### 2.4.2. Cementiranje

Cementiranje čelika ili karburizacija je proces termo kemijske toplinske obrade s ciljem promjene sastava površine metala. Cementiranjem se poboljšavaju svojstva površine čeličnih dijelova povećanjem sadržaja ugljika što rezultira povećanom tvrdoćom i otpornošću na habanje, dok niskougljična jezgra materijala ostaje žilava i otporna na udarce. Niskougljični čelici koriste se za cementiranje zbog njihove sposobnosti za duboku karburizaciju pri čemu zadržavaju žilavost jezgre te uglavnom sadrže od 0,1 do 0,2% ugljika.

Nakon pougljičavanja rubnog sloja, bilo to krutim, tekućim ili plinovitim sredstvima izvodi se proces kaljenja i nisko-temperaturno popuštanja s ciljem dobivanja tvrdog martenzita (između 0,8 i 0,9% ugljika) na površini materijala [8],[11].

Proces cementiranja [4],[13]:

- Priprema uzorka čelika

Prije cementiranja dijelove koje obrađujemo potrebno je temeljito očistiti kako bi se uklonila sva prljavština i oksidi koji bi mogli umanjiti učinke difuzije ugljika.

- Metode cementiranja

- Plinska sredstva

U ovoj metodi, dijelovi se smještaju u peći koje se zagrijavaju na temperaturu između 850°C i 950°C u rasponu od 1 do 50 sati, dok su izloženi plinovima bogatim ugljikom kao što su metan, etan ili propan. Plin se raspada na površini čelika, omogućujući ugljiku da difuzijom prodire u metal.

- Kruta sredstva

U ovoj metodi kruto sredstvo koje se koristi je najčešće drveni ugljen s dodatkom barijeva karbonata. Dijelovi su poredani u čeličnoj kutiji ispunjenoj granulatom i međusobno razmaknuti. Kao brtvilo kutije se koristi glina. Cijeli uložak se postavi u peć te se zagrijava na određenu temperaturu. Dubina prodora ugljika u čelik ovisna je o trajanju: nakon 1 sata u peći ugljik prodre 0,3mm. Metoda cementiranja uz granulate je najstarija i najjeftinija metoda cementiranja.

- Tekuća sredstva.

U ovoj metodi dijelovi se uranjaju u rastaljene soli koje sadrže ugljik kao što su natrijev ili barijev klorid. Ovisno o željenim rezultatima biraju se soli različite vrijednosti. Zbog otrovnosti ove metode cementiranja potrebne su dodatne mjere opreza za zaštitu zdravlja i okoliša stoga se one najmanje koriste kod cementiranja čelika.

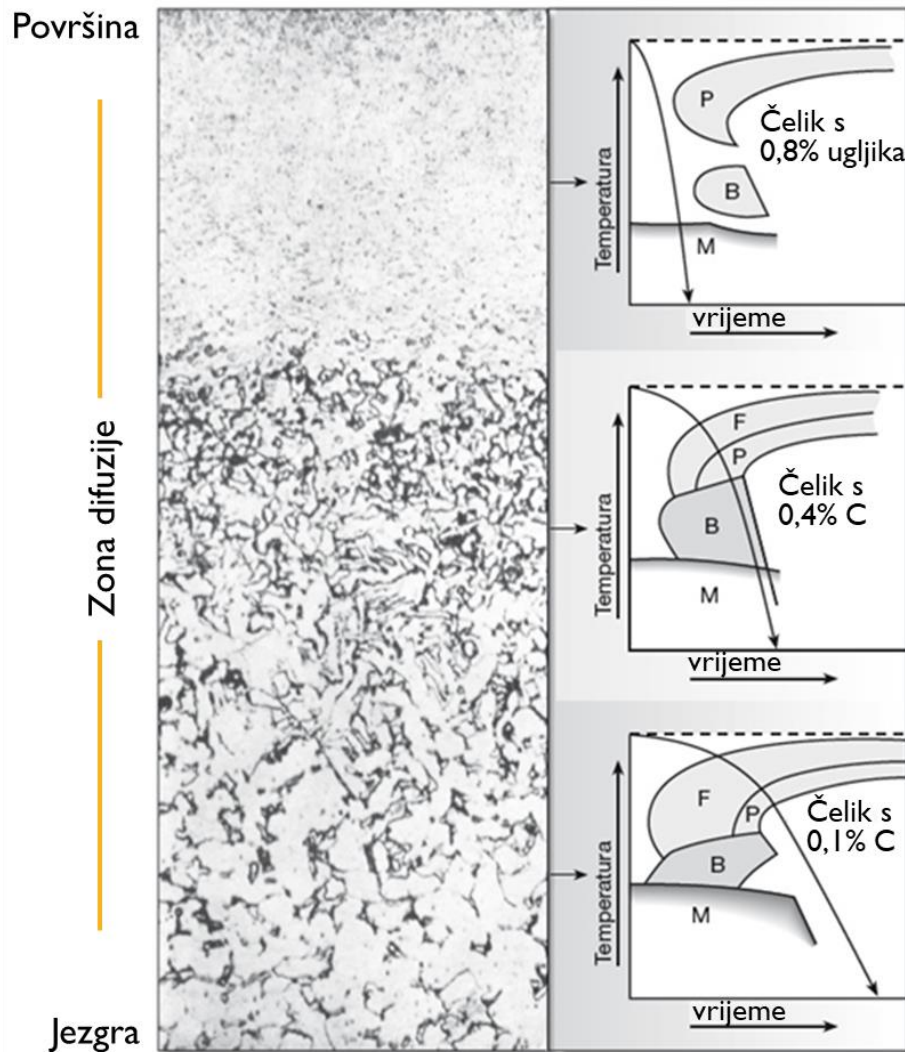
- Kaljenje:

Kako bi se postigla maksimalna tvrdoća površine dijela koji je cementiranjem potrebno je izvesti proces kaljenja. Kaljenjem se postiže maksimalna tvrdoća obrađenog uzorka, a postiže se uranjanjem u vodu, ulje ili neku specijalnu tekućinu. Brzo hlađenje uzrokuje stvaranje martenzita, što povećava tvrdoću površine čelika.

Nakon kaljenja obrađeni uzorak potrebno je ponovno zagrijati na nižu temperaturu između (150 i 200°C) kako bi se smanjila zaostala naprezanja i povećala žilavost (popuštanje) [14].



Slika 6 prikazuje shematski prikaz krivulja kontinuirane temperaturne transformacije - CCT dijagram (*Continuous Cooling Transformation Diagram*) za svaki kemijski sastav, sa superponiranom primijenjenom krivuljom hlađenja. Mikrostruktura cementiranog i kaljenog obratka varira od površine (gornji dio slike 6) ka unutrašnjosti (jezgra) iz dva razloga: (1) udio ugljika se smanjuje (2) kao i brzina hlađenja [14].



**Slika 6. Shema mikrostrukture i dijagrami kontinuiranog hlađenja za cementirani čelik s 0,1% masenog udjela ugljika.**

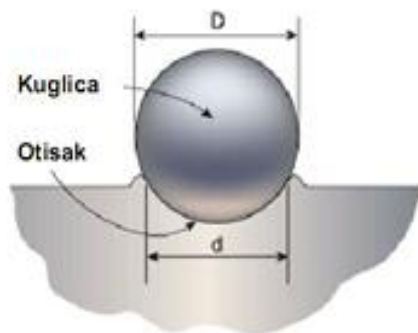
Izvor: Prilagođeno prema [14].

## 2.5. METODE MJERENJA TVRDOĆE

Tvrdoća materijala je mehaničko svojstvo koje opisuje otpornost materijala na lokaliziranu deformaciju, ogrebotine, abraziju ili penetraciju. Što je veća tvrdoća, materijal je otporniji na trošenje [15].

Postoji nekoliko metoda mjerenja tvrdoće materijala, no sve mjere veličinu ili dubinu otiska napravljenog pritiskom utiskivača (koji uzrokuje lokalnu plastičnu deformaciju) na površini materijala primjenom sile. Površina prije ispitivanja mora biti glatka i ravna kako bi se ostavio točan otisak i kako bi se mogao očitati promjer/dubina. Najčešće korištene metode mjerenja tvrdoće su Brinell, Vickers i Rockwell [15].

Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom (HB) temelji se na mjerenju otiska koji ostavlja penetrator u obliku kugle na površini ispitivanog materijala. Penetrator je obično izrađen od čelika ili volfram karbida, a promjera su različiti (10,5 ili 2,5 mm) – slika 7. Brinellova metoda koristi se za ispitivanje tvrdoće mekših i srednje tvrdih materijala kao što su obojeni metali i konstrukcijski čelici. Prema Brinellu tvrdoća se definira kao mjera otpornost materijala koji se ispituje na prodiranje kuglice promjera  $D$ , pritisnute silom  $F$ . Tvrdoća  $HB$  je omjer između sile i površine otiska [15].



**Slika 7. Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom [11]**

Brinellova tvrdoća se izračunava pomoću sljedeće formule 1

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

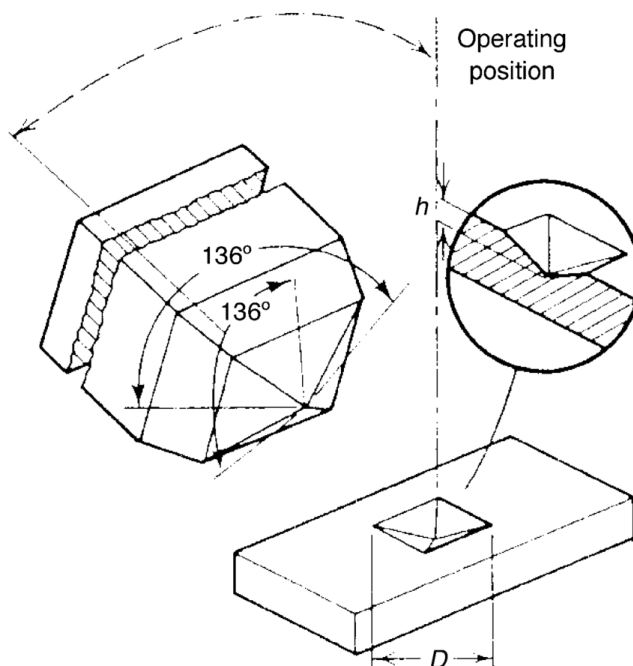
gdje je:

$F$  opterećenje (u kilopond - 1 kilopond = 9,80665 N)

$D$  promjer kugle utiskivača (mm),

$d$  promjer otiska (mm).

Vickersova metoda za ispitivanje tvrdoće koristi dijamanti penetrator u obliku piramide sa kutom od  $136^\circ$  između suprotnih strana. Koristi se za ispitivanje tvrdoće srednje tvrdih i tvrdih materijala. Tvrdoća se određuje kao otpornost materijala na utisak koji ostavi četverostrana dijamantna piramida [15].



**Slika 8. Ispitivanje tvrdoće Vickersovom metodom**  
 ([https://www.researchgate.net/publication/248357592\\_Depth-sensing\\_indentation\\_method\\_for\\_evaluation\\_of\\_efficiency\\_of\\_secondary\\_cementitious\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/248357592_Depth-sensing_indentation_method_for_evaluation_of_efficiency_of_secondary_cementitious_materials))

Vickersova tvrdoća (HV) izračunava se kao omjer primijenjene sile i površine otiska prema sljedećoj formuli 2 [15]:

$$HV = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

gdje je:

$F$  opterećenje (kp),

$d$  prosječna duljina dijagonala otiska (mm).

Ispitivanje tvrdoće po metodi Rockwell, prema ASTM E18-22 norma, koristi uređaj koji utiskuje penetrator (utiskivač) od dijamanta u obliku stožca (sferokonalni dijamant) ili kuglice od volfram karbida (ili kaljenog čelika) na površinu materijala te se mjeri dubina penetracije (ASTM E18-22) [16]. Kod svakog ispitivanja potrebno je da penetrator bude znatno tvrdi od ispitivanog materijala kako ne bi došlo do njegove deformacije prilikom ubadanja [15].

U tablici 3 opisani su penetratori (utiskivači) koji se koriste po metodi Rockwell.

**Tablica 3. Vrste penetratora koji se koriste u Rockwell metodi.**

Ukupno opterećenje	60 kg (588.4 N)	100 kg (980.7 N)	150 kg (1471 N)
<b>Penetrator</b>	Dijamantni 120°	Čelična kuglica	Dijamantni 120°
<b>Skala tvrdoće</b>	Rockwell A	Rockwell B	Rockwell C
<b>Raspon mjerenja</b>	HRA 20-88	HRB 20-100	HRC 20-70
<b>Namjena</b>	Ispitivanje na kaljenom čeliku	Ispitivanje crnih i obojenih metala	Ispitivanje na žarenom i kaljenom čeliku

Izvor: upute za mjerenje tvrdoće Rockwell EHT-CE3RN, Elephant Manufacturing.

Kako bi se uvjerali da je uređaj ispravan i da su mjerenja točna potrebno ga je ispitati umjeravanjem. Na primjer, po metodi Rockwell, ispitivanje uređaja obavlja se tako da se uzme jedan standardni blok za ispitivanje tvrdoće po metodi Rockwell (HRA, HRB, HRC) ovisno o uzorku kojeg ispitujemo te se ona postavlja na radni stol za ispitivanje. Ovisno o odabranom standardnom bloku za ispitivanje tvrdoće, a u ovom slučaju tvrdoće HRC, postavlja se odgovarajući penetrator (dijamantni) u utor za penetrator. Opterećenje namjestimo na silu koja odgovara težini mase od 150 kg te povučemo polugu za opterećenje uzorka, pričekamo 10 sekundi, nakon čega se povuče poluga za rasterećenje. Rezultat ispitivanja prikazuje se na pokazivaču mjera te njega uspoređujemo sa brojem koji je napisan na bloku koju ispitujemo. Ispitivanje se ponavlja par puta i ukoliko se brojevi poklapaju na mjerilu i na ispitivanom bloku (slika 9) ili su približno jednaki uređaj je ispravan te možemo početi sa ispitivanjem tvrdoće uzorka zupčanika [15].



**Slika 9. Primjeri standardnih blokova za ispitivanje tvrdoće po metodi Rockwell (a) 29,1HRC, (b) 46,0 HRC i (c) 64,1 HRC**

### 3. MATERIJAL I METODE

U eksperimentalnom dijelu (materijal i metode) rada želi se pokazati kako toplinske obrade materijala utječu na vrijednost izmjerene tvrdoće. Stoga su provedena ispitivanja tvrdoće na različitim uzorcima zupčanika koji su metalografskih pripremljeni te podvrgnuti različitim toplinskim obradama. Nadalje, izdvojen je uzorak u stanju prijema kako bi se provjerila makro i mikrostruktura površine zupčanika.

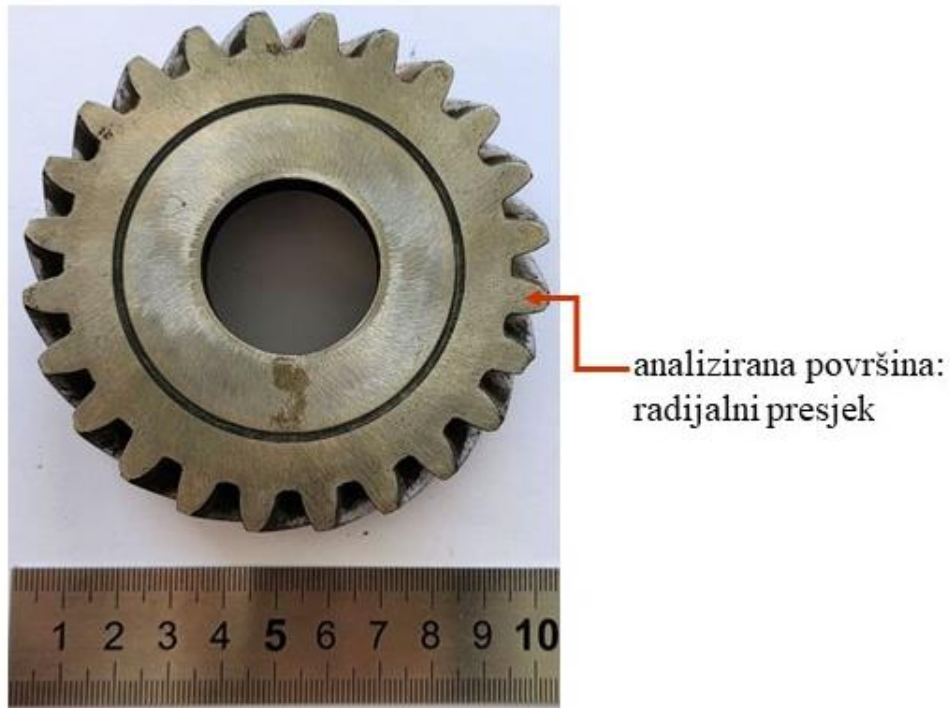
#### 3.1 MATERIJAL

Glavni zupčani prijenos (slika 10) bio je korišteno za toplinske obrade i ispitivanja tvrdoće. Radi se o kraju čeličnog vratila kao što je prikazano na slici 11.

Glavni zupčani prijenos je strojni dio koji je korišten za toplinsku obradu i ispitivanje tvrdoće u ovom završnom radu sa serijskim brojem GM2095532. Dio je automobila proizvođača GMC (General Motors Truck Company) koji proizvode kamione i terenska vozila, poznata po svojoj izdržljivosti i robusnosti.



**Slika 10. Prikaz glavnog zupčanog prijenosa prije rezanja**



Slika 11. Zupčanik - dio koji je bio korišten za studiju

## 3.2 METODE

### 3.2.1 Priprema uzoraka - rezanje

Kako bi se olakšale toplinske obrade i dobili točniji rezultati ispitivanja tvrdoće, bilo je potrebno rezati glavni zupčanik. Prvi korak obrade je odvajanje zupčanika od vratila.

Slika 12 prikazuje glavni zupčanik nakon rezanja, a slika 13 prikazuje zupčanik odvojen od vratila nakon rezanja i ravnjanja.

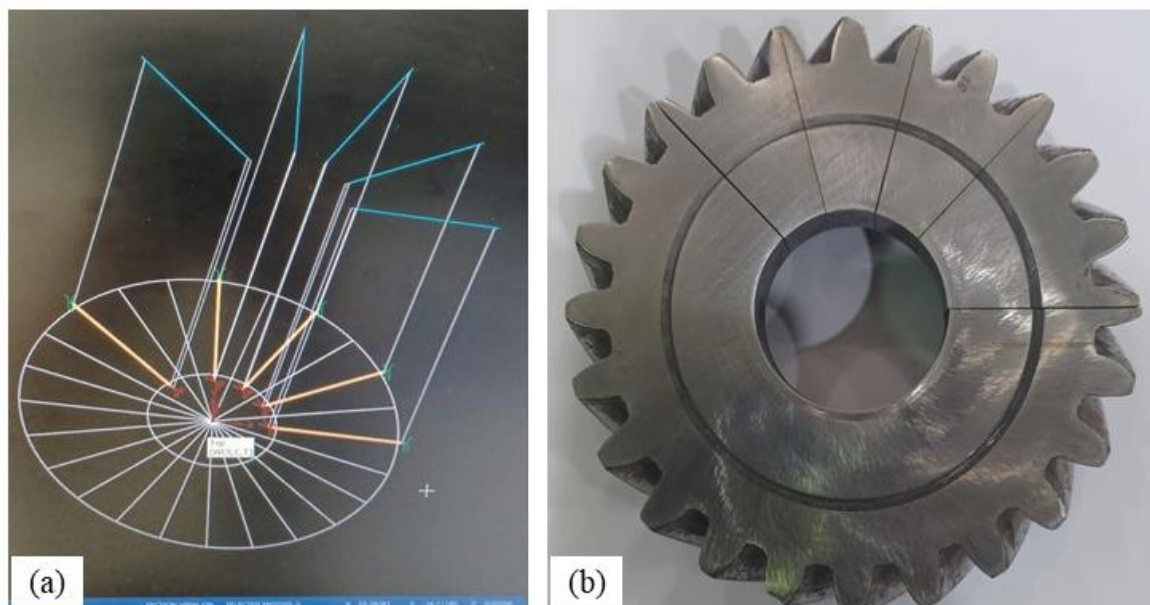


Slika 12. Glavni zupčanik nakon rezanja



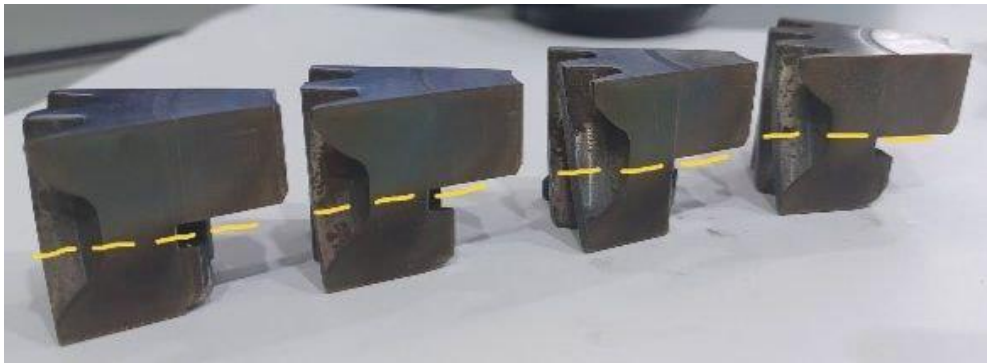
**Slika 13. Odvojeni zupčanik i vratilo nakon ravnanja**

Nakon što je zupčanik odvojen od vratila potrebno je zupčanik izrezati na više dijelova kako bi ih mogli obraditi različitim toplinskim obradama te provesti ispitivanja na njima. Slika 14a prikazuje elektroerozijsku (EDM obrada) ravninu rezanja zupčanika, a slika 14b prikazuje rezove uzoraka.



**Slika 14. (a) plan rezanja zupčanika, (b) pogled odozgo na EDM rezani zupčanik**

Kako bi mjerenja bila točna potrebno je da je uzorak ravan stoga je potrebno još jedno rezanje kao što je prikazano na slici 15.



**Slika 15. 4 uzoraka izrezana EDM-om obradu**

### **3.2.2 Priprema uzoraka – brušenje**

Brušenje je proces obrade površine metala koji uključuje upotrebu abrazivnih alata u svrhu oblikovanja, glađenja ili uklanjanja nepravilnosti s površine metala [14]. Koristi se za postizanje glatkih površina, preciznih mjera, poboljšanja tolerancija ili popravljanja površinskih nedostataka materijala. Brušenje se koristi kako bi se osigurala glatka i ravna površina za ispitivanje koja omogućuje precizno i pouzdano mjerenje tvrdoće materijala. Uz pravilno brušenje i ispitivanje tvrdoće, mogu se dobiti vrijedne informacije o svojstvima čelika i drugih materijala. Prije nego što se pristupi samom ispitivanju tvrdoće potrebno je izvršiti pripremu uzorka zupčanika. Priprema uzorka je jedan od bitnijih čimbenika za dobivanje valjanih rezultata mjerenja. Ovdje se pod pripremom uzorka podrazumijeva brušenje uzorka brusnim papirima različitih gradacija sa ciljem dobivanja što preciznijih rezultata ispitivanja tvrdoće. U narednom tekstu opisana je svaka faza pripreme uzorka.

Nakon obrađene toplinske obrade, te prije ispitivanja tvrdoće svaki uzorak zupčanika potrebno je površinski obraditi. Ispitivani uzorak čelika brusi se različitim brusnim papirima gradacije: 100, 180, 220, 300, 400. Materijal se ručno brusi u jednom smjeru papirom gradacije 100 sve dok se na materijalu ne vide ogrebotine u smjeru brušenja. Zatim se mijenja brusni papir finijim, tj. onim s višom gradacijom i zakreće se kut brušenja za 90° a proces se ponavlja sve dok se ne završi brušenje papirom gradacije 400.

### **3.2.3 Toplinska obrada**

Toplinske obrade izvršene su na uređaju proizvođača Over industrijske elektronike koji se nalazi u radionici za zavarivanje na Pomorskom Fakultetu u Splitu (slika 16). Model kontrolora peći je XMT-800 P verificiran po ISO9001 i EMC standardima. Ima maksimalnu



temperaturu zagrijavanja do 1150°C, ako okolna temperatura ne prelazi 50°C. Peć također ima i opciju vremenskog podešavanja i programe grijanja i hlađenja.

Provedene toplinske obrade bile su potpuno žarenje i normalizacija, te kaljenje u vodi i ulju nakon čega je uslijedilo popuštanje.



**Slika 16. Peć za toplinske obrade s kontrolorom XMT-808 P.**

Postupak žarenja izveden je tako da uzorak izrezanog materijala stavljamo u peć XMT- 808 P koja je postavljena na temperaturu 880°C što je ujedno i propisana temperatura za žarenje 8620 čelika. Vrijeme toplinske obrade ovisi o vremenu upijanja obratka. Konkretnije, izračun ukupnog vremena austenitizacije je da je vrijeme potrebno da se ugljični čelik zagrije približno jednako 2 minute po milimetru debljine, dok je za legirane čelike jednako 3 minute po milimetru debljine što je ujedno i materijal kojeg smo obrađivali [9]. Tako će površina i središte čelika imati jednaku temperaturu. Stoga je određeno da za debljinu našeg uzorka 13,5 milimetara vrijeme žarenja materijala u peći iznosi 40 minuta. Nakon žarenja uzorak je ostavljen da se hladi u peći na atmosferskom zraku.

Za toplinsku obradu normalizacije, izrezani neobrađeni dio zupčanika smješten je u peć na temperaturu 880°C koja je propisana temperatura na kojoj se ovaj čelik normalizira. Ostavljen je u peći 40 minuta te je po završetku obrade izvađen iz peći i ostavljen da se hladi

na zraku. Za kaljenje u vodi ,novi neobrađeni uzorak je smješten u peć na 880°C te je zagrijavan 40 minuta što je propisano vrijeme i temperatura kaljenja za čelik AISI 8620 te je potom ohlađen u vodi. Naglim hlađenjem uzorka u vodi stvaraju se crni ili tamni ostaci u vodi koji su obično rezultat oksidacije i formiranja površinskih slojeva na zagrijanom metalu prilikom brzog hlađenja. Ovi crni ostaci obično su površinski i mogu se ukloniti čišćenjem ili brušenjem površine nakon postupka kaljenja.

Kaljenje u ulju ima manju brzinu hlađenja u usporedbi s vodom što rezultira manjim termičkim šokom, smanjenim zaostalim naprezanjima i manjom sklonosti pucanju ili deformacijama.

Uzorak zupčanika stavljen je u peć na temperaturu 880°C te je zagrijavan 40 minuta. Nakon zagrijavanja uzorak je izvađen iz peći te je smješten u kantu ulja gdje je kružnim pokretima hlađen 15 sekundi. Popuštanje se sastoji se od zagrijavanja čelika u ovom slučaju uzorka zupčanika na temperaturu od 260°C, gdje se uzorak zagrijava sat vremena te se polagano hladi na zraku [6].

#### **3.2.4. Ispitivanje tvrdoće**

Ispitivanje tvrdoće izvršeno je na ispitivaču tvrdoće tipa Rockwell, modela EHT-CE3RN kineskoga proizvođača Elephant Manufacturing, Jiangsu(slika 17). Uređaj za ispitivanje tvrdoće nalazi se u radionici za zavarivanje na Pomorskom fakultetu u Splitu te se sastoji od: tijela uređaja, mehanizma za opterećenje, uređaja za pokazivanje mjera, radnog stola za ispitivanje, poluge za podešavanje visine i utora za penetrator.



### **Slika 17. Uređaj za ispitivanje tvrdoće po metodi Rockwell**

Prije ispitivanja tvrdoće potrebno je uzorak za ispitivanje pravilno pripremiti. Osim pravilne pripreme pod kojom se sporazumijeva brušenje i čišćenje uzorka iznimno je važno da uzorak bude ravan te da primjena sile na površinu uzorka bude okomita i postepena kako bi ispitivanje bilo što točnije.

Uzorak zupčanika kojega se ispituje stavlja se na stol za ispitivanje te se povlači polugu za opterećenje. Nakon 10 sekundi povlačimo polugu za rasterećenje i očitavamo mjerenja sa pokaznog mjera. Na svaki uzorak koji smo toplinski obradili obavljeno je ispitivanje tvrdoće u minimalno 9 točaka počevši od zuba zupčanika pa sve do njegovog središta (slika 18).



**Slika 18. Primjer uzorka za ispitivanja tvrdoće**

### **3.2.5 Metalografija**

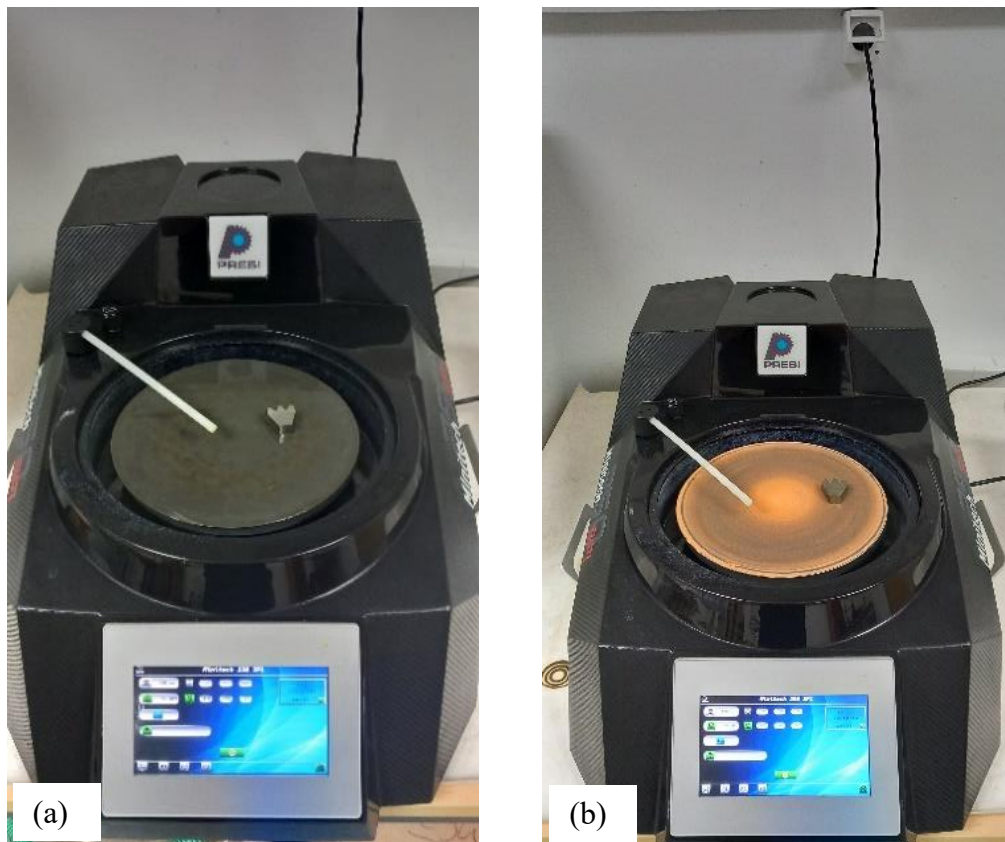
Makrografija je tehnika kojom se vizualno proučava i bilježi struktura materijala na makroskopskoj razini, odnosno na razini vidljivoj golim okom ili uz pomoć manjih povećanja. Ova tehnika omogućuje istraživanje površinskih karakteristika, oblika, dimenzija i strukturnih svojstava materijala na većim skalama uz pomoć stereo mikroskopa, za razliku od mikroskopskih struktura koje se promatraju mikroskopom [17].

Mikrografija pruža širi pogled na značajke i strukture površine materijala i korisna je u raznim industrijama i istraživačkim poljima gdje je važno detaljno ispitivanje materijala na vidljivoj makroskopskoj razini. Mikrografija je korisna tehnika za dobivanje sveobuhvatnog razumijevanja strukture materijala na mikroskopskoj razini i često je prvi korak u proučavanju mikrostrukture materijala prije prelaska na detaljniju mikroskopsku analizu [17].

Priprema uzorka zupčanika za makro i mikro strukturnu analizu [17]:

- Brušenje i poliranje uzorka izvršeno je na uređaju Minitech 250 SP1 proizvođača Presi koji se nalazi na Fakultetu elektrotehnike strojarstva i brodogradnje. Za

pripremu uzorka koristili su se brusni papiri finoće od P-100 do P-1200 te poliranje do 9 mikrona (slika 19).



**Slika 19. (a) brušenje uzorka, (b) poliranje uzorka**

- Odmaščivanje, ispiranje i sušenje površine uzorka.
- Kemijsko nagrizanje površine uzorka s 5% Nitala.

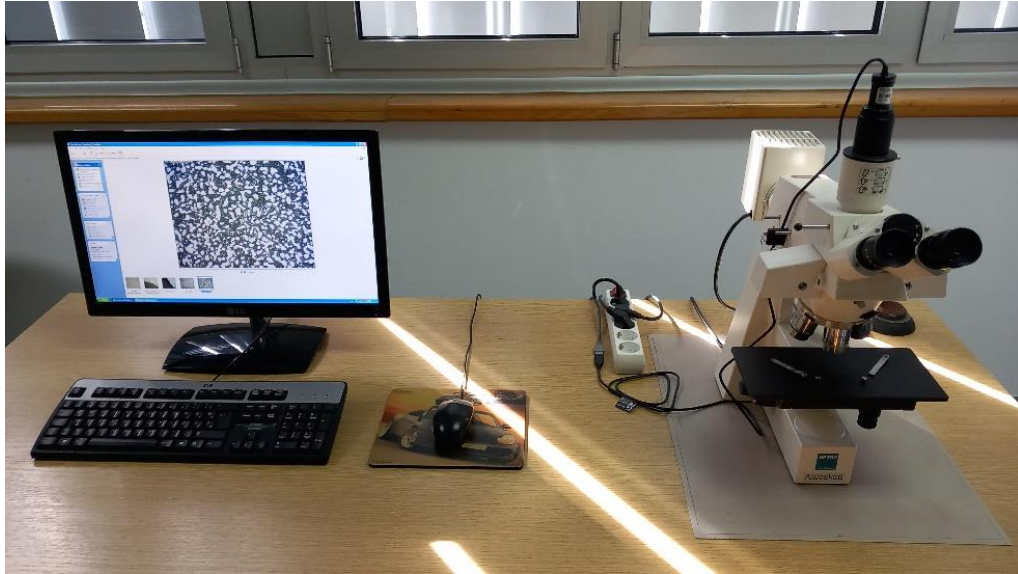
Nital je 5% otopina dušične kiseline u etilnom alkoholu i ona služi kao reagens za razvijanje strukture željezne legure. Nital je skraćenica za dušična kiselina u alkoholu te se ona nakapala na prethodno obrađen uzorak zupčanika (brušenje, poliranje, čišćenje). Nital se koristi kako bi se bolje vidjele granice zrna, faze, inkluzija ili drugih strukturnih karakteristika metala. Ovaj proces omogućuje jasnije i detaljnije snimke koje pomažu u proučavanju strukture metala golim okom ili pomoću manjeg povećanja.

- Makrografija i mikrografija čelika

Mikrografija je tehnika analize materijala koja koristi mikroskope i druge povećavajuće alate za proučavanje i dokumentiranje mikroskopskih struktura materijala. Ova tehnika omogućuje detaljno promatranje mikroskopskih svojstava, kao što su granice

zrna, faze, inkluzije, oštećenja ili druge mikrostrukturne karakteristike materijala te pruža uvid u detalje koji su presudni za razumijevanje mehaničkih, kemijskih i fizikalnih svojstava materijala. Za makro i mikroskopski snimak koristio se vertikalni svjetlosni mikroskop proizvođača Option Axioskop sa povećanjem od najmanje 50, a najviše 1000 puta.

Na mikroskopu se nalazi i digitalna kamera Dyno Light uz pomoć koje se uzorci snimaju i fotografije prenose na računalo. Na slici 20 nalazi se oprema korištena za mikroskopski snimak uzorka zupčanika.



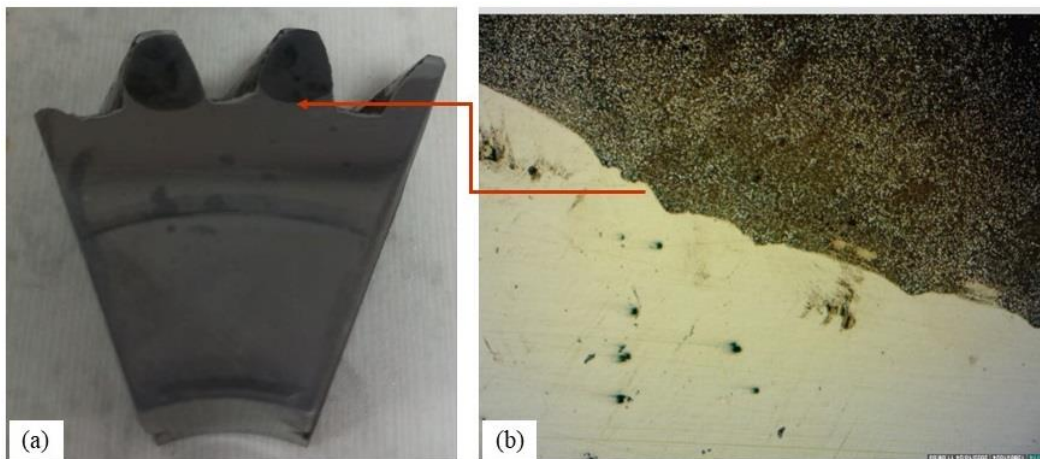
**Slika 20. Svjetlosni mikroskop za analizu mikrostrukture s priključenom kamerom i pregledom na monitoru računala**

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

Na temelju analize ispitivanja tvrdoće prikazat će se utjecaj postupaka toplinske obrade na tvrdoću materijala. Pretpostavka je da se radi o 20NiCrMo2 / AISI 8620 cementiranom čeliku.

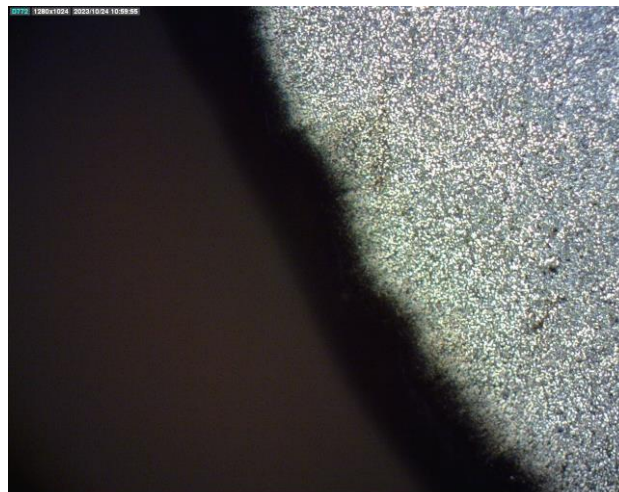
### 4.1. STRUKTURA MATERIJALA

Makroskopski i mikroskopski snimak uzorka zupčanika u primljenom stanju pokazuje detalje i stanje uzorka. Tamna boja na zubima zupčanika označava mjesto gdje se nanosio Nital (slika 21a) te u slici 21b prikazan je korijen zupčanika i rub koji odvaja tretirani dio Nitalom od ostatka zupčanika.



**Slika 21. (a) makroskopski snimak zupčanika i (b) korijen zupčanika - rub razvijene strukture**

Na slici 22 i 23 prikazan je rub i sredina tretirane površine uzorka Nitalom. Slike omogućuju promatranje makrostrukture materijala, što ukazuje na prisutnost karbida (bijele točkice) nastalih tijekom procesa cementiranja.

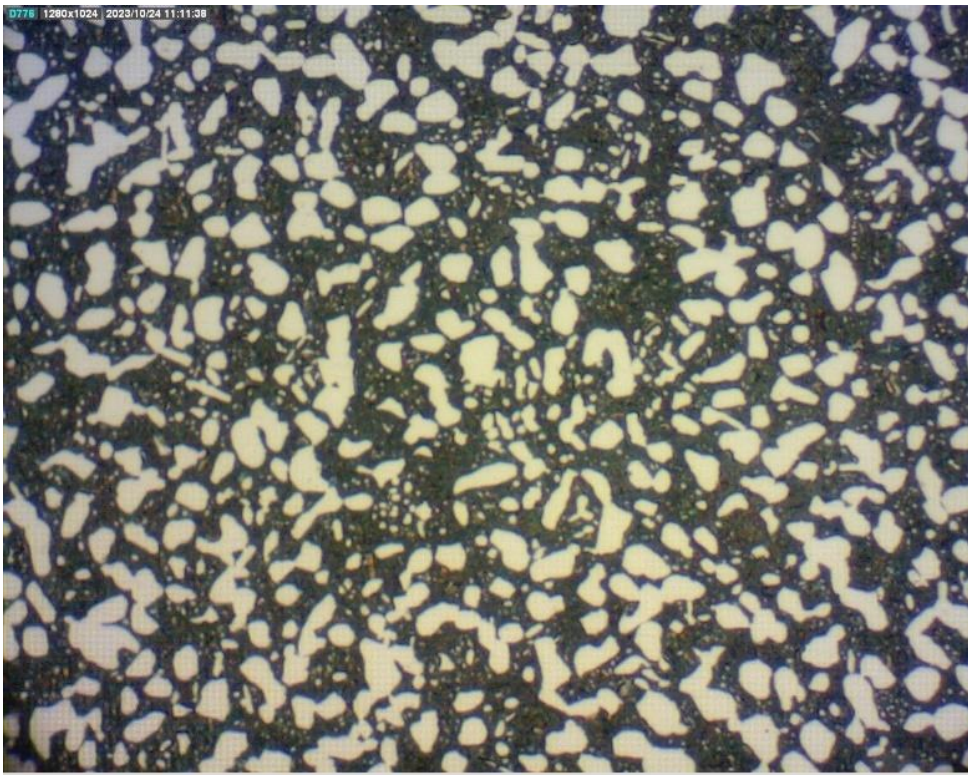


**Slika 22. Rub zuba zupčanika. Radni parametar: 50X povećanje.**



**Slika 23. Sredina zuba zupčanika. Radni parametar: 50X povećanje.**

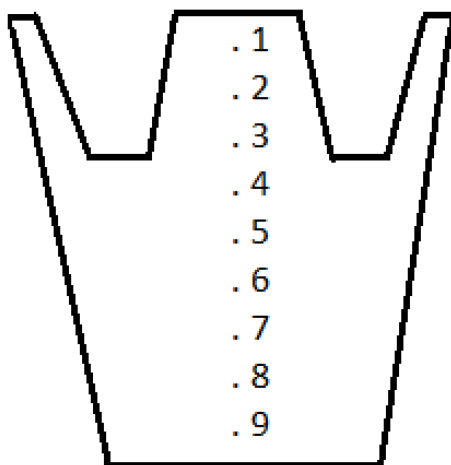
Na slici 24 prikazana je sredina uzorka zupčanika. Na mikroskopskom snimku se vide struktura (bijela područja) što ukazuje na prisutnost karbida koji pridonose tvrdoći.



**Slika 24. Sredina zuba zupčanika. Radni parametar: 500X povećanje.**

## 4.2. ANALIZA TVRDOĆE

Nakon odrađene toplinske obrade metala ispituje se tvrdoća obrađenog uzorka glavnog zupčastog prijenosa u devet različitih točaka kao što je prikazano na slici 25.



Slika 25. Shema ispitivanja tvrdoće zupčanika

Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće

	Mjesta mjerenja tvrdoće na uzorcima									
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	
Početno stanje (O)	62	61,5	61	61,5	62	60	59,5	60	60	HRC
Žarenje	98	89	84,5	84,5	85	84	84	82	82	HRB
Normalizacija	42	44,5	44,5	44	44,5	45	58	26	21	HRC
Kaljenje u vodi iz (O)	61	61	61	61	60,5	61	65	47,5	46	HRC
Kaljenje u vodi nakon normalizacije	51	50	48,5	48,5	46,5	47,5	65	65	65	HRC
Kaljenje u ulju iz (O)	62	62	63	62,5	61,5	62,5	55,5	42	41,5	HRC
Popuštanje uzorka kaljenog u vodi	45	45	45	44,5	45,5	57	34	58	58	HRC
Popuštanje normaliziranog uzorka kaljenog u vodi	42,5	43	44,5	44	44,5	45	52,5	53	53,5	HRC
Popuštanje uzorka kaljenog u ulju	45,5	44,5	44,5	44	44	56	58	57,5	57	HRC



Može se uočiti da je tvrdoća uzoraka kaljenih u vodi i ulju slična, što je posljedica kvalitete ulja za toplinsku obradu. Ova ulja su razvijena kako bi kaljeni objekti imali sličnu tvrdoću, ali s manjim zaostalim napreznjima.

Mjerenja tvrdoće također su obavljena na jezgri zupčanika, dalje od zuba, na primljenom uzorku (slika 26). Prosječna tvrdoća bila je 33 HRC, očekivana za ovu vrstu proizvoda [3].



**Slika 26. Područje (crni kvadrat) gdje je izmjerena tvrdoća**

Budući da peć nema kontroliranu atmosferu i ne omogućuje upotrebu inertnog plina kao što je argon, zbog oksidirajuće atmosfere se očekuje određena dekarburizacija i oksidacija. To je posebno uočeno na uzorku kaljenom vodom nakon normalizacije i u žarenom uzorku.

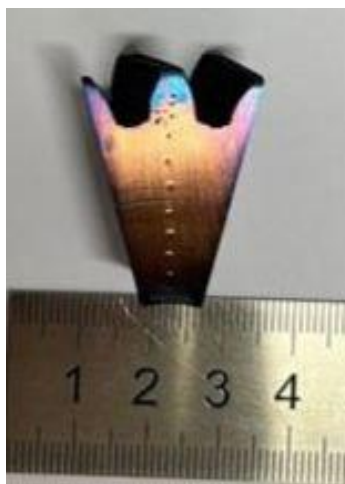
Dekarburizacija je proces gubitka ugljika s površine čelika, općenito uzrokovana reakcijom između ugljika u čeliku i oksidirajuće atmosfere na visokim temperaturama. Dekarburizacija može imati štetne učinke na tvrdoću i mehaničku otpornost površinskog sloja [18].

Temperatura popuštanja od 260 °C nakon kaljenja u vodi i ulju pokazala je dobre rezultate. To je posebno vidljivo na vrhu zubaca zupčanika gdje je sadržaj ugljika približno 0,8% s prosječnom tvrdoćom, nakon kaljenja, od 61 HRC, a nakon popuštanja 44 HRC.

Nadalje, nakon popuštanja da se uočiti da se na površini uzorka zupčanika stvorio tanki oksidacijski sloj. Ovaj sloj može varirati u boji ovisno o temperaturi na kojoj se čelik popuštao, trajanju postupka, sastavu materijala i drugim čimbenicima.

Boje koje se mogu pojaviti na oksidacijskom sloju uključuju plavu, žutu, smeđu i čak ljubičastu nijansu. Ove boje rezultat su različitih vrsta oksida željeza koji se formiraju na površini čelika pod utjecajem temperatura i oksidacije.

Na slici 27 prikazan je uzorak zupčanika nakon popuštanja [19].



**Slika 27. Uzorak zupčanika nakon popuštanja (260°C 1 sat i zračno hlađen)**

## 5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i analiza rezultata ispitivanja tvrdoće može se zaključiti:

Od svih toplinskih obrada provedenih na uzorku mjenjača glavnog zupčanika AISI 8620, procesi kaljenja uljem i vodom pridonijeli su povećanju tvrdoće materijala, te su postignuti rezultati koji su približni tvrdoći početnog stanja uzorka. Ovo potvrđuje da je izvorni dio kaljen. Kako je korištena temperatura popuštanja od 260°C pokazala znatno smanjenje tvrdoće, pretpostavlja se da je temperatura popuštanje uzorka u originalnom stanju bila niža, vjerojatno oko 150°C. Cementirani čelici praktički ne gube tvrdoću na 150°C. Ako se može tolerirati određeno smanjenje tvrdoće, žilavost se može povećati popuštanjem na nešto višim temperaturama, do 260°C [6].

S obzirom da peć nema kontroliranu atmosferu koja koristi inertni plin, zbog oksidirajuće atmosfere učinci toplinske obrade su umanjeni te nastaje određena dekarburizacija i oksidacija čelika.

Pravilna toplinska obrada čelika AISI 8620 doprinosi povećanju tvrdoće i žilavosti materijala, te pouzdanosti i izdržljivosti glavnog zupčastog prijenosa.

Uvođenjem optimalnih parametara obrade moguće je poboljšati trajnost zupčanika, čime se smanjuju troškovi održavanja i povećava sigurnost rada u različitim industrijskim primjenama.

U budućim istraživanjima, trebalo bi se usredotočiti na daljnje proučavanje utjecaja različitih atmosfera tijekom obrade i njihovog utjecaja na konačna svojstva čelika, kao i na razvoj metoda toplinske obrade koje bi mogle dodatno poboljšati performanse glavnog zupčastog prijenosa.

## LITERATURA

- [1] Marine Transmission Intruction Manual. D-I Industrial CO., LTD. URL: [http://d-i.co.kr/eng/wp-content/uploads/sites/2/2020/10/DMT220DL\\_Manual\\_M2009N00DMT\\_200824.pdf](http://d-i.co.kr/eng/wp-content/uploads/sites/2/2020/10/DMT220DL_Manual_M2009N00DMT_200824.pdf) (pristupljeno 10. 07. 2024.).
- [2] Zupčani prijenosnici. U: Elementi Strojeva 2. Filozofski Fakultet u Rijeci. URL: <https://ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/14-ZupcaniPrijenosnici.pdf>, (pristupljeno 23. 07. 2024.).
- [3] A. K. Rakhit. Heat Treatment of Gears: A Practical Guide for Engineers, ASM International, 2000.
- [4] ASM Handbook. Heat Treating, vol. 4 ASM International, 1991.
- [5] Koji se materijali koriste za izradu zupčanika? Jingong Gear, 2022. URL: <https://ba.jingonggear.com/info/what-are-the-materials-used-to-make-gears-77787429.html> (pristupljeno 12. 08. 2024.).
- [6] H. Chandler, Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels, 2<sup>nd</sup>, Ed. ASM International, 1995.
- [7] AISI SAE 8620 Steel Properties, Chemical Composition, Equivalent, Heat Treatment. URL: <https://www.theworldmaterial.com/aisi-sae-8620-alloy-steel/>, (pristupljeno 05. 08. 2024.).
- [8] W. D. Callister Jr., D. G. Rethwisch. Materials Science and Engineering: An Introduction, 8th Ed. John Wiley & Sons, Inc., USA, 2018.
- [9] J. D. Verhoeven. Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist, ASM international, 2007.
- [10] Kako razlikovati kaljenje, normalizacije, žarenje? Abenon - Precision Metal Fabrication, 2021. URL: <https://www.anebon.com/hr/news/how-to-distinguish-quenching-tempering-normalizing-annealing/>, (pristupljeno 10. 09. 2023.).
- [11] I. Gabrić, S. Šitić. Materijali II, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [12] G. Krauss. Steels, Processing, Structure, and Performance, ASM International, 2005.
- [13] Cementiranje čelika. URL: [https://www.wikiwand.com/hr/Cementiranje\\_%C4%8Delika](https://www.wikiwand.com/hr/Cementiranje_%C4%8Delika), (pristupljeno 10. 08. 2024.).
- [14] H. Colpaert. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns - Ed. Edgard Blucher, 4. ed. revista e atualizada por COSTA E SILVA, A. L. V. São Paulo: Editora Blucher, 2008.

- [15] I. Gabrić, S. Šitić. Materijali I. Sveučilište u Splitu, Split, 2012.
- [16] ASTM E18-22: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. American Nacional Standards Institute, 2022.
- [17] Z. Simenuović. Termička obrada s ispitivanjem materijala, Svjetlost, Sarajevo, 1986.
- [18] Decarburization. In: Thermochemical Surface Engineering of Steels - Improving Materials Performance. Editors: Eric J. Mittemeijer and Marcel A. J. Somers, 2015, p. 531-532.
- [19] P. W. Blandford. Practical Blacksmithing and Metalworking. TAB Books, 1988.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer brodskoga porivnog sustava sa zupčaničkim prijenosnikom. ....	8
Slika 2. (a) primjer spojnog konusnog zupčanika, (b) primjer prijenosnog sustava vozila. [ <a href="https://www.howacarworks.com/basics/how-the-transmission-works">https://www.howacarworks.com/basics/how-the-transmission-works</a> ]: 1 – Pogonski zupčanik pričvršćen na kraj prijenosnog vratila koji prenosi gibanje iz mjenjača i 2 – Tanjurasti zupčanik – namijenjen za promjenu smjera gibanja vratila prijenosnika .....	9
Slika 3. Prikaz glavnog zupčastog prijenosa [ <a href="https://jeepest.com/gb/transmission-cckw352353/778-pinion-maindrive-transmission-gmc.html">https://jeepest.com/gb/transmission-cckw352353/778-pinion-maindrive-transmission-gmc.html</a> ] .....	9
Slika 4. Gornji prikaz unutarnjeg i vanjskog oboda zupčanika.....	10
Slika 5. Fazni dijagram željezo-željezni karbid, koji pokazuje raspon temperature toplinske obrade za ugljične čelike.....	12
Slika 6. Shema mikrostrukture i dijagrami kontinuiranog hlađenja za cementirani čelik s 0,1% masenog udjela ugljika. ....	16
Slika 7. Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom [11] .....	17
Slika 8. Ispitivanje tvrdoće Vickersovom metodom ( <a href="https://www.researchgate.net/publication/248357592_Depth-sensing_indentation_method_for_evaluation_of_efficiency_of_secondary_cementitious_materials">https://www.researchgate.net/publication/248357592_Depth-sensing_indentation_method_for_evaluation_of_efficiency_of_secondary_cementitious_materials</a> ).....	18
Slika 9. Primjeri standardnih blokova za ispitivanje tvrdoće po metodi Rockwell (a) 29,1HRC, (b) 46,0 HRC i (c) 64,1 HRC .....	19
Slika 10. Prikaz glavnog zupčanog prijenosa prije rezanja .....	20
Slika 11. Zupčanik - dio koji je bio korišten za studiju.....	21
Slika 12. Glavni zupčanik nakon rezanja .....	21
Slika 13. Odvojeni zupčanik i vratilo nakon ravnjanja.....	22
Slika 14. (a) plan rezanja zupčanika, (b) pogled odozgo na EDM rezani zupčanik.....	22
Slika 15. 4 uzoraka izrezana EDM-om obradu.....	23
Slika 16. Peć za toplinske obrade s kontrolorom XMT-808 P. ....	24
Slika 17. Uređaj za ispitivanje tvrdoće po metodi Rockwell .....	26
Slika 18. Primjer uzorka za ispitivanja tvrdoće.....	26
Slika 19. (a) brušenje uzorka, (b) poliranje uzorka .....	27

Slika 20. Svjetlosni mikroskop za analizu mikrostrukturu s priključenom kamerom i pregledom na monitoru računala .....	28
Slika 21. (a) makroskopski snimak zupčanika i (b) korijen zupčanika - rub razvijene strukture .....	29
Slika 22. Rub zuba zupčanika. Radni parametar: 50X povećanje. ....	29
Slika 23. Sredina zuba zupčanika. Radni parametar: 50X povećanje. ....	30
Slika 24. Sredina zuba zupčanika. Radni parametar: 500X povećanje. ....	30
Slika 25. Shema ispitivanja tvrdoće zupčanika .....	31
Slika 26. Područje (crni kvadrat) gdje je izmjerena tvrdoća .....	32
Slika 27. Uzorak zupčanika nakon popuštanja (260°C 1 sat i zračno hlađen) .....	33

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav čelik AISI 8620 .....	11
Tablica 2: Relativne brzine hlađenja u različitim medijima za kaljenje [12] .....	13
Tablica 3. Vrste penetratora koji se koriste u Rockwell metodi.....	19
Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće.....	31



## POPIS KRATICA

CCT (engl. <i>Continuous Cooling Transformation</i> )	kontinuirane temperaturne transformacije
HB (engl. <i>Brinell hardness</i> )	tvrdoća po metodi Brinell
HRC (engl. <i>Rockwell hardness C scale</i> )	C skala Rockwellove tvrdoće
HRB (engl. <i>Rockwell hardness B scale</i> )	B skala Rockwellove tvrdoće
HV (engl. <i>Vickers hardness</i> )	tvrdoća po metodi Vickers
GMC	<i>General Motors Truck Company</i>
kgf (engl. <i>kilogram-force</i> )	kp - kilopond