

# Ispitivanje svojstava izotermički poboljšanih i kugličarenih zupčanika

---

**Weissenbacher, Helie**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2009**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:432854>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-15**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## DIPLOMSKI RAD

Helie Weissenbacher

Zagreb, 2009.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## DIPLOMSKI RAD

Mentor

prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Helie Weissenbacher

Zagreb, 2009.



Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno uz uporabu stečenog znanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, navedene literature te uz savjete mentora prof. dr. sc. Zdravka Schauperla.

## SAŽETAK RADA

U današnje se vrijeme izotermički poboljšani nodularni lijev upotrebljava između ostalog kao materijal za izradu zupčanika. Svojstva tog materijala moguće je dodatno poboljšati različitim površinskim tehnologijama.

Cilj ovog diplomskog rada je ispitati utjecaj temperaure izotermičkog poboljšavanja i kugličarenja površina na ponašanje zupčanika izrađenih od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva u pogonu. Izrađeno je pet zupčanika od nodularnog lijeva. Obrađeni su slijedećim tehnologijama:

- NL, toplinski neobrađeni zupčanik
- NL 380, izotermički poboljšani zupčanik na temperaturi od 380° C
- NL 240, izotermički poboljšani zupčanik na temperaturi od 240° C
- NL 380K, izotermički poboljšani zupčanik 380° C, a nakon toga kugličaren
- NL 240K, izotermički poboljšani zupčanik na 240° C, a nakon toga kugličaren.

Ispitivanje je provedeno pomoću standardiziranog **FZG** testa (**F**orschungsstelle für **Z**ahnräder und **G**etriebebau der Technischen Universität München). Kako bi se dobio bolji uvid u promjenu mikrostrukture i mehaničkih svojstava nodularnog lijeva, osim FZG testa, provedena su i ispitivanja tvrdoće površine zupčanika, mikrotvrdoće na uzorcima zuba zupčanika te metalografsko ispitivanje mikrostrukture uzoraka.

Na temelju dobivenih rezultata te stanja površine i strukture materijala nakon ispitivanja doneseni su zaključci o utjecaju ispitivanih parametara na promjenu mehaničkih svojstava zupčanika i njihovom ponašanju u pogonu.

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	7
POPIS TABLICA.....	9
POPIS OZNAKA.....	10
1. UVOD.....	11
2. NODULARNI ( ŽILAVI ) LIJEV.....	12
2.1. Mikrostruktura nodularnoga lijeva.....	12
2.2. Svojstva nodularnoga lijeva.....	13
2.3. Izotermički poboljšani nodularni lijev (ADI - Austempered Ductile Iron).....	13
2.4. Podjela izotermički poboljšanog nodularnoga lijeva.....	14
2.5. Hladna deformacija izotermički poboljšanog nodularnoga lijeva.....	15
3. FZG TEST .....	17
3.1. Opis metode.....	17
3.2. Uređaj i pribor.....	17
3.2.1. FZG ispitni uređaj.....	17
3.2.2. Ispitni zupčanici.....	19
3.2.3 Vaga za mjerenje promjene mase.....	21
3.3. Postupak izvođenja FZG testa.....	22
3.4. Ispitni uvjeti.....	23
3.5. Obrada i prikaz rezultata.....	25
3.5.1. Promjene na bokovima zuba zupčanika [5].....	26
4. PRAKTIČNI DIO.....	27
4.1. Izrada zupčanika.....	27
4.1.1. Postupak izotermičkog poboljšavanja zupčanika.....	30
4.1.2. Kugličarenje zupčanika (“shot peening”).....	32

4.2. Ispitivanje zupčanika modificiranom FZG metodom.....	33
4.3. MJERENJE TVRDOĆE .....	43
4.3.1 Brinellova metoda.....	44
4.3.2 Vickersova metoda.....	46
4.4. METALOGRAFIJA.....	49
4.4.1. Metalografsko ispitivanje uzoraka.....	50
4.4.2. Rezultati metalografskog ispitivanja.....	52
5. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	57



## POPIS SLIKA

- Slika 2.1. T-t dijagram izotermičkog poboljšavanja nodularnoga lijeva[2]
- Slika 2.2. Shematski prikaz općenitog TTT- dijagrama nodularnoga lijeva [3]
- Slika 3.1. 3D prikaz FZG uređaja s dijelovima
- Slika 3.2. Spojka s polugom za nanošenje opterećenja
- Slika 3.3. Površina boka obrađena Maagovim križnim brušenjem
- Slika 3.4. Oblik boka zuba manjeg zupčanika
- Slika 3.5. Veći ( pogonski) zupčanik s evolventnim oblikom zuba
- Slika 3.6. Montirani zupčanici na osovine
- Slika 3.7. Krivulja promjene mase [5]
- Slika 4.1.1. Mikrostruktura nodularnoga lijeva NL 60
- Slika 4.1.2. Glodalica za izradu zupčanika
- Slika 4.1.3. Izrađeni zupčanici spremni za toplinsku obradu i kugličarenje
- Slika 4.1.4. Način označavanja zupčanika
- Slika 4.1.1.1. Dijagram izotermičkog poboljšavanja na gornji bainit
- Slika 4.1.1.2. Dijagram izotermičkog poboljšavanja na donji bainit
- Slika 4.1.1.3. Izgled zupčanika nakon toplinske obrade
- Slika 4.1.2.1. Površina zupčanika nakon kugličarenja
- Slika 4.2.1. Osovine za montažu ispitnih zupčanika
- Slika 4.2.2. Električni grijač za postizanje startne temperature ulja
- Slika 4.2.3. Grafički prikaz ovisnosti gubitka mase o ukupno utrošenom radu
- Slika 4.2.4. Grafički prikaz ovisnosti gubitka mase ovisno o stupnju opterećenja
- Slika 4.2.4.1. Površina zuba NL zupčanika prije ispitivanja
- Slika 4.2.4.2. Površina zuba NL zupčanika nakon ispitivanja
- Slika 4.2.4.3. Površina zuba NI 380 zupčanika prije ispitivanja
- Slika 4.2.4.4. Površina zuba NL 380 zupčanika nakon ispitivanja
- Slika 4.2.4.5. Površina zuba NI 240 zupčanika prije ispitivanja
- Slika 4.2.4.6. Površina zuba NI 240 zupčanika nakon ispitivanja
- Slika 4.2.4.7. Površina zuba NL 380K zupčanika prije ispitivanja
- Slika 4.2.4.8. Površina zuba NL 380K zupčanika nakon ispitivanja

- Slika 4.2.4.9 Površina zuba NL240K zupčanika prije ispitivanja
- Slika 4.2.5.0. Površina zuba NL240K zupčanika nakon ispitivanja
- Slika 4.2.5.1 Oštećenje površine u obliku pittinga
- Slika 4.2.5.2 Nodule grafita kao inicijalne pukotine
- Slika 4.3.1.1. Skica Brinellove metode
- Slika 4.3.1.2. Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Brinellu
- Slika 4.3.2.1. Mjerenje tvrdoće po Vickersu
- Slika 4.3.2.2 Grafički prikaz rezultata izmjerenih mikrotvrdoća
- Slika 4.4.1.1. Pripremljeni uzorci za metalografsko ispitivanje
- Slika 4.4.1.2. Struers polirka
- Slika 4.4.2.1 Olympus svjetlosni mikroskop sa CCD kamerom
- Slika 4.4.2.2. Rubni sloj NL zupčanika, poliran
- Slika 4.4.2.3. Rubni sloj NL zupčanika, poliran i nagrižen nitalom
- Slika 4.4.2.4. Rubni sloj NL 380 zupčanika, poliran i nagrižen nitalom
- Slika 4.4.2.5. Rubni sloj NL 240 zupčanika, poliran i nagrižen nitalom
- Slika 4.4.2.6. Rubni sloj NL 380K zupčanika, poliran i nagrižen nitalom
- Slika 4.4.2.7. Rubni sloj NL 240K zupčanika, poliran i nagrižen nitalom

## **POPIS TABLICA**

Tablica 3.1. Karakteristike zupčanika [5]

Tablica 3.2. Ispitni uvjeti [5]

Tablica 3.3 Stupnjevi opterećenja [5]

Tablica 3.4. Promjene na bokovima zuba zupčanika [5]

Tablica 4.1.1. Kemijski sastav odljevaka

Tablica 4.2.1. Rezultati FZG testa

Tablica 4.3.1.1. Izmjerene tvrdoće površine zupčanika Brinellovom metodom

Tablica 4.3.2.1. Podaci izmjerenih mikrotvrdoća Vickersovom metodom na uzorcima zuba zupčanika

## POPIS OZNAKA

% C	maseni udio ugljika, %
% Si	maseni udio silicija, %
% Mn	maseni udio mangana, %
% P	maseni udio fosfora, %
% S	maseni udio sumpora, %
T	temperatura, °C
t	vrijeme, h
HB	tvrdoća po Brinellu
HV	tvrdoća po Vickersu
HRC	tvrdoća po Rockwellu

## 1. UVOD

Nodularni (žilavi) lijev je vrsta lijeva na bazi željeza čiji sastav karakterizira povišeni udio ugljika, silicija i magnezija koji omogućuje izlučivanje grafita u obliku kuglica (nodula). Danas je na tržištu nodularni lijev materijal koji je najzastupljeniji od ljevova na bazi željeza. Vrijednosti svojstava nodularnog lijeva nalaze se između svojstava čeličnog i sivog lijeva. Svojstva odljevaka od nodularnog lijeva ovise o kemijskom sastavu, postupku obrade taljevine prije ulijevanja u kalupe, uvjetima skrućivanja i naknadnoj toplinskoj obradi odljevaka.

Jedan od postupaka toplinske obrade je izotermičko poboljšavanje nodularnog lijeva. Ova metoda toplinske obrade zanimljiva je budući da se njome postižu mehanička svojstva nodularnog lijeva koja se ne mogu postići niti jednom drugom metodom. Svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva ovise o temperaturi i vremenu austenitizacije, brzini ohlađivanja, kemijskom sastavu i strukturi materijala. Perlitni nodularni lijev prije izotermičkog poboljšavanja ima perlitnu matricu s jednoliko raspoređenim nodulama grafita. Nakon toplinske obrade izotermičkim poboljšavanjem matrica se sastoji od bainita i zaostalog austenita. Zaostali austenit pridonosi visokoj žilavosti i duktilnosti, a hladnom deformacijom može se pretvoriti u austenit čime se materijalu dodatno povećava tvrdoća i čvrstoća.

Cilj ovog rada je ustanoviti razlike u mehaničkim svojstvima između pet zupčanika koji su izrađeni od perlitnog nodularnog lijeva, a zatim podvrgnuti različitim postupcima izotermičkog poboljšavanja. Neki od njih su nakon toplinske obrade izloženi i hladnoj deformaciji kugličarenjem.

Kako bi se ustanovilo ponašanje zupčanika u eksploataciji i otpornost na trošenje podvrgnut će se standardiziranom FZG testu. Ovaj se test sastoji od ispitivanja zupčanika trošenjem u ulju pod različitim stupnjevima opterećenja. Nakon svakog stupnja kontrolira se vizualno stanje boka zupčanika i mogući gubitak mase. Kako bi se dobio bolji uvid u promjenu mikrostrukture i mehaničkih svojstava nodularnog lijeva, osim FZG testa, provest će se i ispitivanje tvrdoće površine zupčanika, mikrotvrdoće na uzorcima zuba zupčanika te metalografsko ispitivanje mikrostrukture uzoraka.

## 2. NODULARNI ( ŽILAVI ) LIJEV

Zasip od specijalnog sirovog željeza tali se u elektropeći, a taljevina se legira elementima globulatorima koji pomažu izlučivanje grafita u obliku kuglica, a dodaju se neposredno prije lijevanja. Taljevina se zatim ulijeva u pješčane kalupe. Ovaj je postupak složeniji i skuplji nego za ostale lijevove. Približni kemijski sastav nodularnoga lijeva iznosi

3,2...3,8 %C

2,4...2,8 %Si

<0,5 % Mn

<0,045 % P

<0,01 % S

Kako se nebi pojavili antiglobulatori ( smetaju izlučivanje grafita u obliku kuglica), a to su Al, As, Bi, Cd, Pb, Sb, Sn, Ti, Zn, stupanj zasićenja veći je od 1 pa je ovaj lijev nadeutektičkog sastava[1]. Izlučivanje ugljika u obliku kuglica grafita postiže se dodavanjem malih količina magnezija, cerija ili itrija u taljevinu neposredno prije ulijevanja u kalup. Ukoliko rastaljeni metal sadrži prevelike količine sumpora ili sadrži neke od gore navedenih antiglobulatora, ugljik se neće izlučiti u obliku kuglica već u obliku listića i tako neće nastati nodularni već sivi lijev.

### 2.1. Mikrostruktura nodularnoga lijeva

Mikrostruktura nodularnoga lijeva sastoji se od željezne osnove i grafita u obliku kuglica (nodula). Mikrostruktura željezne osnove može biti:

- a) feritna ( mala čvrstoća, veća istezljivost )
- b) perlitna ( veća čvrstoća, manja istezljivost )
- c) austenitna
- d) feritno-perlitna [ 1 ]

Mikrostrukturu možemo ustanoviti metalografskim ispitivanjem, tj. brušenjem, poliranjem i nagrizanjem u nitalu.

## 2.2. Svojstva nodularnoga lijeva

Nodularni lijev ima bolja svojstva od sivog, ali slabija od čeličnoga lijeva. Karakteriziraju ga sljedeća svojstva :

- visoka dinamička izdržljivost i vlačna čvrstoća
- visok modul elastičnosti
- može se zavarivati
- dobro se obrađuje odvajanjem čestica
- dobra ležišna svojstva [ 1 ].

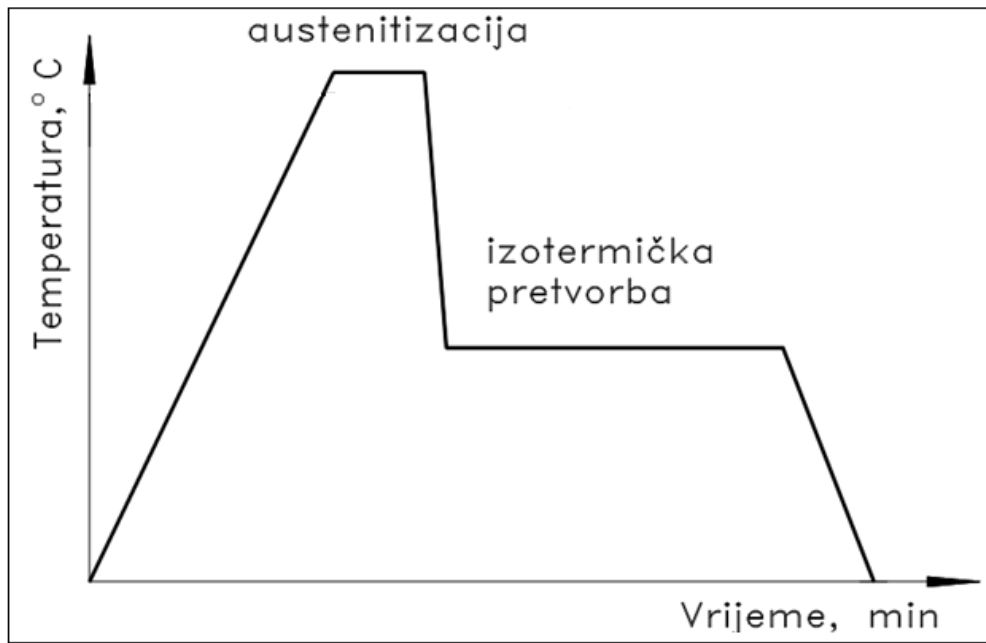
Legiranjem nodularnoga lijeva postižu se posebna svojstva, otpornost na djelovanje agresivnih medija i vatrootpornost kod austenitnih vrsta .

## 2.3. Izotermički poboljšani nodularni lijev (ADI - Austempered Ductile Iron)

Izotermički poboljšani nodularni lijev je relativno nova vrsta lijeva sa visokom čvrstoćom, istežljivošću, žilavosti, a otporan je na trošenje i dinamički izdržljiv. Odljevci nodularnog lijeva austenitiziraju na temperaturi od 900° C, a zatim se hlade između 200 – 400° C gdje dolazi do izotermičke pretvorbe austenita u donji ili gornji bainit. Primjenjuje se za izradu: **zupčanika**, rotora, pumpi, bregastih i koljenastih osovina i sličnih strojnih dijelova [1].

Izotermički poboljšani nodularni lijev zapravo je skupina materijala kojima se svojstva mogu varirati u širem rasponu pravilnim izborom varijabli toplinske obrade i kemijskog sastava. Glavne teškoće u proizvodnji izotermički poboljšanog nodularnog lijeva su velika osjetljivost proizvodnog postupka, ograničenost kapaciteta za toplinsku obradu te visoka cijena uređaja i opreme.

Na slici 2.1. prikazan je T-t dijagram izotermičkog poboljšavanja čelika.



Slika 2.1. T-t dijagram izotermičkog poboljšavanja nodularnoga lijeva[2]

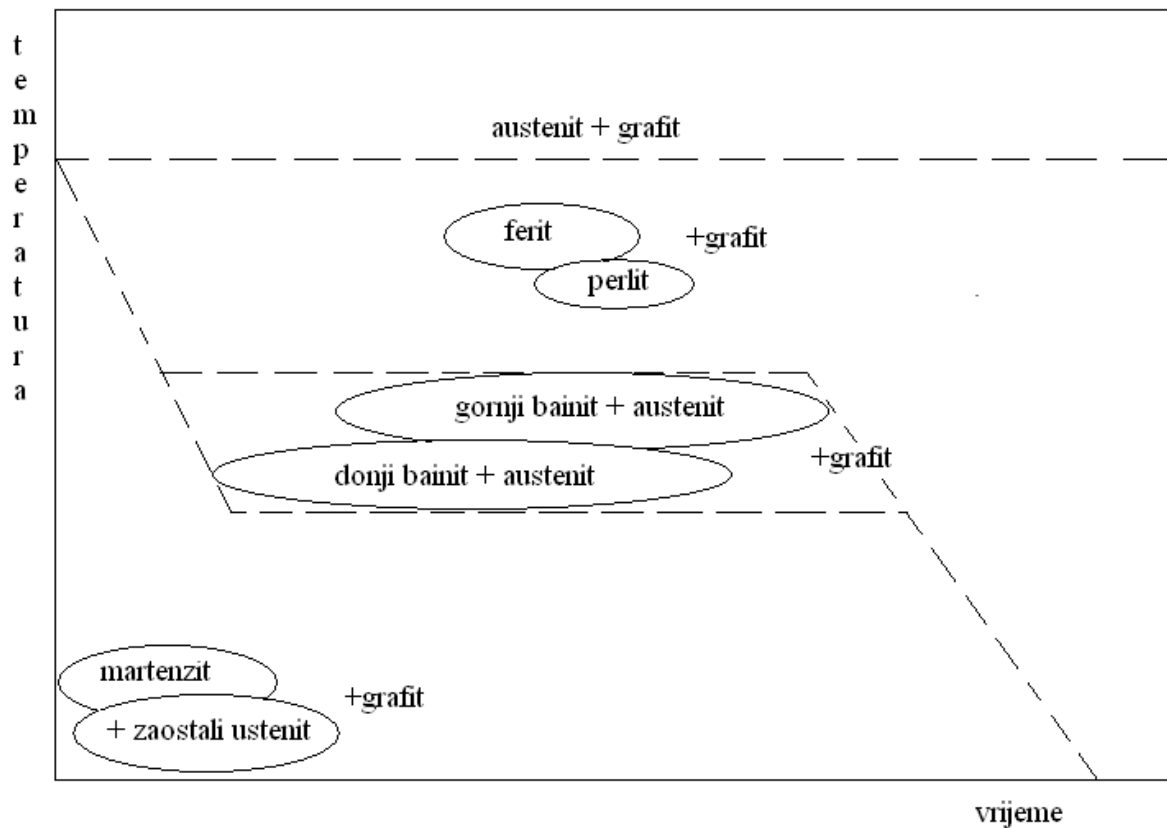
## 2.4. Podjela izotermički poboljšanog nodularnoga lijeva

Najveći utjecaj na strukturu izotermički poboljšanog nodularnog lijeva imaju temperatura i trajanje izotermičke transformacije. Prema temperaturi izotermičke pretvorbe ADI se dijele u dvije skupine:

- ADI pri niskim temperaturama izotermičke transformacije, između 200 i 350° C, gdje je struktura donji bainit te zaostali austenit,
- ADI pri višim temperaturama izotermičke transformacije, između 350 i 500° C, gdje je struktura gornji bainit i zaostali austenit.

Shematski prikaz općenitog TTT-dijagrama nodularnoga lijeva prikazan je na slici 2.2.





Slika 2.2. Shematski prikaz općenitog TTT- dijagrama nodularnoga lijeva [3]

Donji bainit prikladan je ponajprije za zupčanike i druge slične strojne dijelove kod kojih se traži otpornost na visoka tlačna opterećenja. Gornji bainit ima visoku žilavost i veliku dinamičku izdržljivost.

## 2.5. Hladna deformacija izotermički poboljšanog nodularnoga lijeva

Hladna plastična deformacija polikristalnoga metala uzrokuje veće promjene njegovih fizičkih, mehaničkih i kemijskih svojstava. Sve ove promjene znatno utječu na odvijanje samog procesa plastične deformacije. Ne smije se zaboraviti da plastična deformacija nastupa tek onda kada opterećenje prekorači granicu razvlačenja materijala.

S povećanjem stupnja plastične deformacije dolazi do povećanja vlačne čvrstoće i tvrdoće. Povećanje vlačne čvrstoće veoma je intenzivno u početnim stadijima deformacije, a pri daljnjem povećanju stupnja deformacije intenzivnost opada. Do povećanja vlačne čvrstoće i uopće mehaničkih svojstava dolazi zbog povećanja otpora gibanju dislokacija.

Nakon izotermičkog poboljšavanja nodularnoga lijeva matrica materijala sastoji se od bainita i zaostalog austenita. Hladnom deformacijom izotermički poboljšanog nodularnoga lijeva zaostali austenit može se pretvoriti u martenzit. Na taj način moguće je dodatno povećati tvrdoću površine, a time i otpornost na trošenje. Tako nastale tlačne napetosti u površinskom sloju povisuju dinamičku izdržljivost. Jedna od metoda za hladnu deformaciju je sačmarenje[2].

### 3. FZG TEST

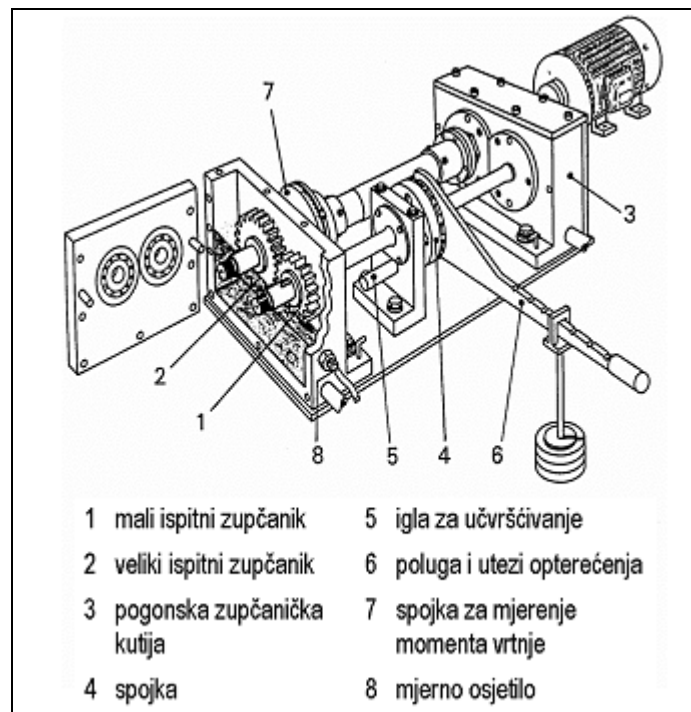
#### 3.1. Opis metode

Metoda se koristi za ocjenjivanje relativne sposobnosti nošenja opterećenja i svojstava sprečavanja trošenja različitih tipova maziva za zupčanike (mineralna i sintetička ulja, hidrauličke tekućine, ATF- tekućine i hipoidna ulja). U ispitivanom mazivu radi definirani zupčanički par kod konstantnog broja okretaja i utvrđene početne temperature maziva. Opterećenje bokova zuba stupnjevito se povećava sve dok ne dođe do zaribavanja na zubima odnosno dok gubitak mase zupčanika ne bude veći za 10 mg od prosječnog gubitka mase u prethodnim stupnjevima opterećenja. Taj stupanj opterećenja naziva se stupanj štetnog opterećenja, a navodi se u različitim specifikacijama ovisno o namjeni maziva [4].

#### 3.2. Uređaj i pribor

##### 3.2.1. FZG ispitni uređaj

FZG ispitni uređaj prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. 3D prikaz FZG uređaja s dijelovima

FZG zupčanički probni stol je ispitni uređaj sa zupčanicima koji imaju vanjsko ozubljenje, a osni razmak im je 91,5 mm. Veliki i mali ispitni zupčanik povezani su s dvije torzijske osovine. Jedna od osovine podijeljena je u dva dijela gdje se nalazi spojka na koju se uz pomoć poluga nanosi opterećenje (slika 3.2.).



Slika 3.2. Spojka s polugom za nanošenje opterećenja

Jedna polovica osovine može se učvrstiti iglom za učvršćivanje na postolje dok se drugi dio osovine može zakrenuti pomoću poluge i utega te time zupčanički par opteretiti određenim momentom. U prva dva stupnja opterećenja same poluge svojom težinom unose moment, a poslije ovisno o stupnju ispitivanja na polugu se dodaju nosač utega i utezi za opterećivanje.

### 3.2.2. Ispitni zupčanici

Za normirani FZG test postoje točno zadane dimenzije i geometrija zupčanika koje su prikazane u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Karakteristike zupčanika [5]

	OZNAKA	VRIJEDNOST	JEDINICA
OSNI RAZMAK	a	91,5	mm
KORISNA ŠIRINA ZUBA	b	20	mm
PROMJER DIOBENE KRUŽNICE	$d_{w1}$	73,2	mm
	$d_{w2}$	109,8	mm
PROMJER TJEMENE KRUŽNICE	$d_{a1}$	88,8	mm
	$d_{a2}$	112,5	mm
MODUL	m	4,5	mm
BROJ ZUBA	$Z_1$	16	
	$Z_2$	24	
POMAK PROFILA	$x_1$	0,8532	
	$x_2$	-0,5	
ZAHVATNI KUT	$\alpha$	20	°
MATERIJAL	20MnCr5		
TOPLINSKA OBRADA	POVRŠINSKO KALJENJE		

Zupčanici su izrađeni od čelika 20MnCr5 i zakaljeni su do dubine od 0,6 do 0,8 mm na tvrdoću 60 do 62 HRC. Manji zupčanik obrađen je Maagovim križnim brušenjem za lakše vizualno kontroliranje stanja površine nakon pojedinoga stupnja opterećenja (slika 3.3.).



Slika 3.3. Površina boka obrađena Maagovim križnim brušenjem

Manji zupčanik ima velik pomak profila s ciljem postizanja zašiljenosti zuba i velike brzine klizanja što za rezultat ima veliku osjetljivost na zaribavanje (slika 3.4.).



Slika 3.4. Oblik boka zuba manjeg zupčanika

Veći zupčanik koji je ujedno i pogonski ima evolventni bok zuba i prikazan je na slici 3.5. Svaki zupčanički par može se upotrijebiti za ispitivanje istog maziva dva puta i to s prednjim i stražnjim bokom kao opterećenom stranom.



Slika 3.5. Veći ( pogonski) zupčanik s evolventnim oblikom zuba

### **3.2.3 Vaga za mjerenje promjene mase**

Vaga za mjerenje promjena mase zupčanika između stupnjeva opterećenja mora biti nosivosti najmanje 1300 mg i mjerne pogreške najviše  $\pm 1$  mg.

### 3.3. Postupak izvođenja FZG testa

Prije ispitivanja ispitno se kućište kao i zupčanici pažljivo čiste prikladnim otapalom, a bokovi se kontroliraju vizualnom metodom. Nakon toga se svaki od zupčanika, veliki i mali, pojedinačno važu kako bismo nakon trošenja mogli ustanoviti eventualni gubitak mase. Veliki zupčanik montira se na pogonsku osovinu bez spojke, a manji na osovinu sa spojkom (slika 3.6.).



Slika 3.6. Montirani zupčanici na osovine

Nakon ugradnje ispitnog zupčaničkog para ulije se ulje za ispitivanje u ispitno kućište do osovina. Kućište se zatvori poklopcem i osigura vijcima te se pokrene motor u trajanju od 15 minuta po svakom stupnju opterećenja. Nakon isteka vremena motor se zaustavlja i prvo se očitava temperatura ulja na termometru. Ispitni zupčanički par se demontira i višekratno



čisti u prikladnom otapalu. Radi skraćivanja postupka dozvoljeno je da se zupčanički par demontira i važe tek nakon 4. stupnja opterećenja s obzirom na to da se ne očekuju promjene u izgledu boka zuba i gubitak mase zupčanika.

Veliki i mali zupčanik pojedinačno se važu za utvrđivanje gubitka mase u mg. Bokovi zuba pregledavaju se prostim okom i utvrđuju se eventualne promjene u izgledu bokova. Vrsta, položaj i veličina promjene na bokovima zuba bilježi se, odnosno utvrđuje fotografijom, mjerenjem hrapavosti ili kontrastnim otiskom.

Ispitivanje se nastavlja do uključivo dvanaestog stupnja opterećenja ukoliko ranije nije došlo do zaribavanja.

### 3.4. Ispitni uvjeti

Ispitni uvjeti nalaze se u tablici 3.2., a stupnjevi opterećenja u tablici 3.3.

Tablica 3.2. Ispitni uvjeti [5]

BROJ OKRETAJA MALOG ZUPČANIK	oko 2170 okr./min.
PODMAZIVANJE	URANJANJEM
TEMPERATURA ULJA NA POČETKU SVAKOG STUPNJA	90 +/-3 °C
KOLIČINA UPOTREBLJENOG ULJA	cca. 1,5 l
TRAJANJE ISPITIVANJA PO STUPNJU	cca. 15 min.

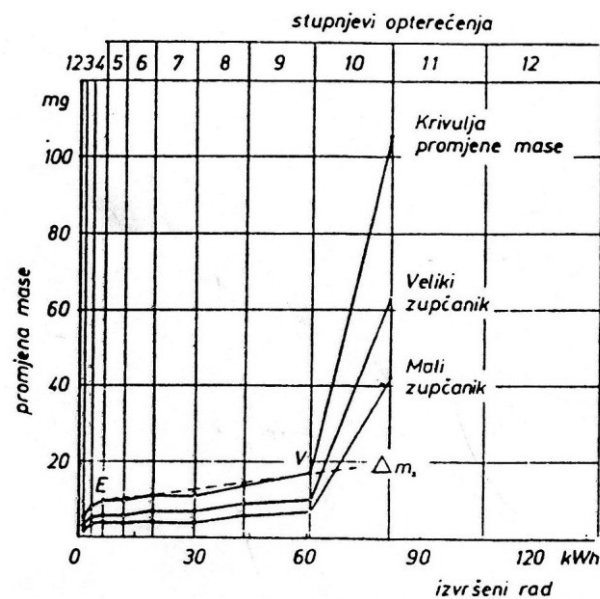
Broj okretaja manjeg zupčanika ovisi o odabranoj brzini vrtnje većeg zupčanika koji je pogonski. Uređaj ima mogućnost odabira brzine vrtnje između 1500 i 3000 okr./min. U standardnom FZG testu ona je normirana na 1500 okr./min., a uzmemo li u obzir prijenosni omjer dolazimo do gore navedene brzine vrtnje manjeg zupčanika od 2170 okr./min. Početna temperatura ulja od 90 +/- 3°C postiže se ugrađenim grijačem kojeg regulira regulacijski termometar. Porast temperature ulja kod viših stupnjeva opterećenja ničim nije ograničen.

Tablica 3.3. Stupnjevi opterećenja [5]

STUPANJ OPTEREĆENJA	OKRETNI MOMENT NA MALOM ZUPČANIKU [Nm]	NORMALNA SILA NA ZUBU [N]	UKUPNO PRENESENI RAD DO KRAJA STUPNJA OPTEREĆENJA [kWh]
1	3.3	99	0.19
2	13.7	407	0.97
3	35.3	1044	2.96
4	60.8	1800	6.43
5	94.1	2786	11.8
6	135.3	4007	19.5
7	183.4	5435	29.9
8	239.3	7080	43.5
9	302.0	8949	60.8
10	372.6	11029	82.0
11	450.1	13342	107.7
12	534.5	15826	138.1

### 3.5. Obrada i prikaz rezultata

Rezultati promjene mase i posebna opažanja u izgledu bokova ispitnih zupčanika unose se u ispitni izvještaj. Promjene mase velikog i malog zupčanika kao i njihov zbroj od početka ispitivanja do kraja svakog stupnja opterećenja unose se u dijagram na ordinatu kojem je na apscisi suma izvršenog rada u kWh. Mjerne točke spajaju se pravolinijski, a krivulja koju dobijemo naziva se krivulja promjene mase. Na slici 3.7. prikazan je primjer takvoga dijagrama.



Slika 3.7. Krivulja promjene mase [5]

Slovom E označena je točka krivulje promjene mase koja odgovara sumi promjene mase malog i velikog zupčanika nakon četvrtog opterećenja. Slovom V označena je točka krivulje promjene mase u kojoj se krivulja naglo lomi prema gore. Krivulja promjene mase naglo se lomi ispred stupnja opterećenja u kojem je suma promjene mase malog i velikog zupčanika najmanje 10 mg veća od prosjeka suma promjene mase u prethodnim stupnjevima opterećenja. Točka V označava početak stupnja štetnog opterećenja i s tim stupnjem test završava. Nastupi li npr. skok u desetom stupnju opterećenja u izvještaju se navodi: “Stupanj štetnog opterećenja 10” [5].

### 3.5.1. Promjene na bokovima zuba zupčanika

U tablici 3.4. prikazane su tipične promjene na bokovima zuba koje se uočavaju kod FZG ispitivanja.

Tablica 3.4. Promjene na bokovima zuba [5]

STUPNJEVI OŠTEĆENJA	KRATAK OPIS
ZAGLAĐIVANJE	Zaglađivanje se uočava prostim okom kao vidno smanjenje mikroudubina zadane hrapavosti tj. polako nestaje uzorak brušenja.
ZAREZIVANJE	Zarezi se pojavljuju kao fine crtice u smjeru klizanja na bokovima zuba.
BRAZDANJE	Brazde idu u istom smjeru kao i zarezi, a pojavljuju se kao slabe, srednje i jake brazde pojedinačno i u zonama. Dubina im je veća od zareza.
ZARIBAVANJE	Zaribavanje se pojavljuje kao fine crte, trake ili zone preko čitave širine zuba. Područje ima mat izgled, a hrapavost je osjetno veća od hrapavosti brušenja.

## 4. PRAKTIČNI DIO

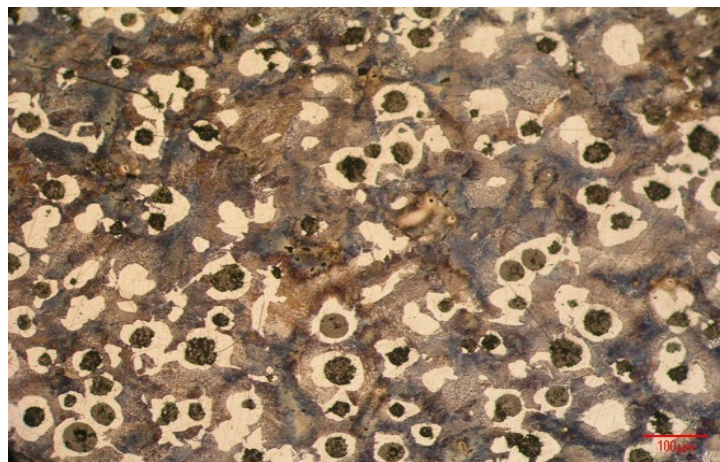
### 4.1. Izrada zupčanika

Odljevci za izradu zupčanika izliveni su u ljevaonici “Brodosplit - Tvornica diesel motora d.o.o.” prema “Tundishcover” postupku. Kemijski sastav nodularnoga lijeva NL60 prikazan je u tablici 4.1.

Tablica 4.1.1. Kemijski sastav odljevaka

C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Fe
3,57%	2,49%	0,113%	0,029%	0,007%	0,4%	0,057%	ostalo

Analizirana je i mikrostruktura svih pet odljevaka za izradu zupčanika i nisu utvrđene značajne razlike. Na slici 4.1. je prikazana mikrostruktura odljevaka za izradu zupčanika.



Slika 4.1.1. Mikrostruktura nodularnoga lijeva NL 60

Mikrostruktura odljevaka NL60 za izradu zupčanika sastoji se od nodula grafita u perlitnoj matrici s feritnim područjima oko nodula.

Zupčanici su izrađeni “FFAUTER” metodom, odvalnim glodanjem na glodalici “ÄLMHULTS BRUK AB. ÄLMHULT”, švedske proizvodnje (slika 4.2.).



Slika 4.1.2. Glodalica za izradu zupčanika

Izrađeno je pet zupčanika od kojih su četiri namijenjena za toplinsku obradu izotermičkim poboljšavanjem. Dva od ta četiri idu još na daljnju obradu kugličarenjem. Svi zupčanici su označeni sljedećim oznakama:

- NL, toplinski neobrađen zupčanik
- NL 380, izotermički poboljššan zupčanik na temperaturi od 380° C
- NL 240, izotermički poboljššan zupčanik na temperaturi od 240° C
- NL 380K, izotermički poboljššan zupčanik 380° C, a nakon toga kugličaren
- NL 240K, izotermički poboljššan zupčanik na 240° C, a nakon toga kugličaren.

Zupčanici su prikazani na slikama 4.1.3. i 4.1.4.



Slika 4.1.3. Izrađeni zupčanici spremni za toplinsku obradu i kugličarenje

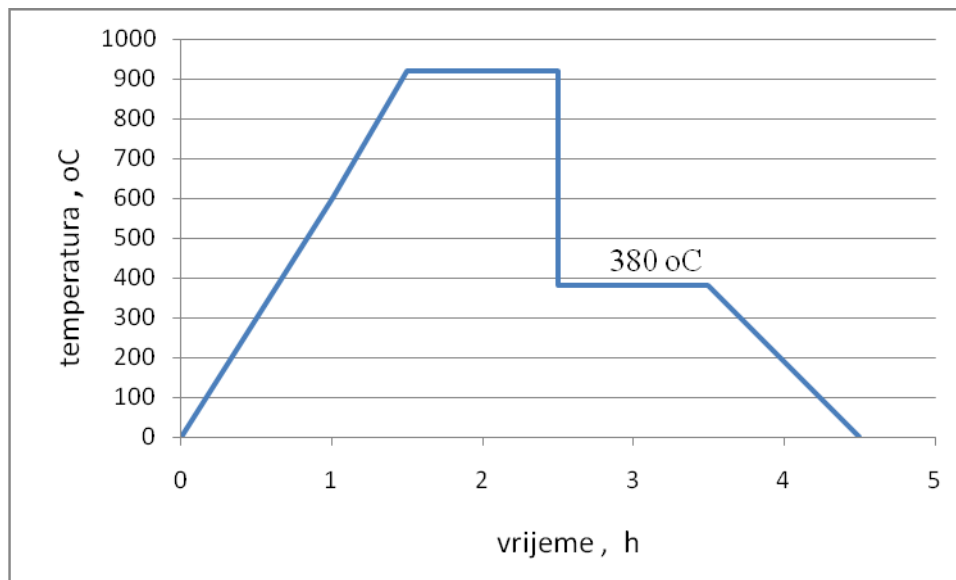


Slika 4.1.4. Način označavanja zupčanika

### 4.1.1. Postupak izotermičkog poboljšavanja zupčanika

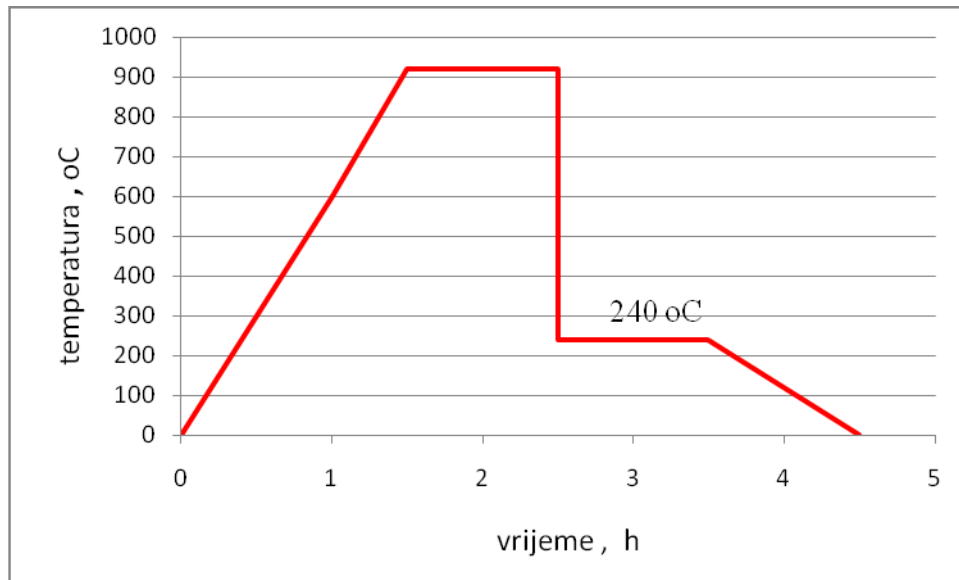
Izotermičko poboljšavanje zupčanika izvedeno je na dva temperaturna nivoa s ciljem dobivanja različite mikrostrukture samoga zupčanika. Kako je već navedeno prije, različitim temperaturnim nivoom izotermičke pretvorbe moguće je dobiti gornji ili donji bainit kao prevladavajuću mikrostrukturu zupčanika zajedno sa zaostalim austenitom.

Toplinska obrada sastoji se od ugrijavanja zupčanika na temperaturu austenitizacije od  $900^{\circ}\text{C}$ . Na toj temperaturi zupčanici ostaju jedan sat. Dva se zupčanika zatim hlade i ostavljaju u solnoj kupci na  $380^{\circ}\text{C}$  jedan sat s ciljem dobivanja gornjeg bainita kao prevladavajuće strukture. Druga dva zupčanika se s temperature austenitizacije od  $900^{\circ}\text{C}$  hlade na temperaturu od  $240^{\circ}\text{C}$  i ostavljaju jedan sat s ciljem dobivanja donjeg bainita kao prevladavajuće strukture. Dijagrami izotermičkog poboljšavanja prikazani su na slikama 4.1.1.1. i 4.1.1.2. Na slici 4.1.1.3. prikazan je izgled zupčanika nakon toplinske obrade.



Slika 4.1.1.1. Dijagram izotermičkog poboljšavanja na gornji bainit





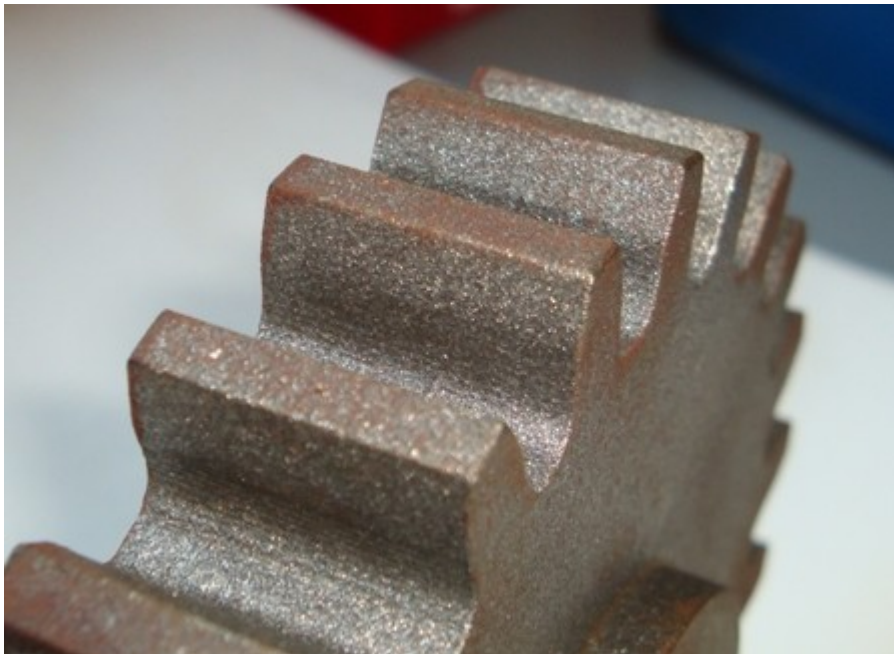
Slika 4.1.1.2. Dijagram izotermičkog poboljšavanja na donji bainit



Slika 4.1.1.3. Izgled zupčanika nakon toplinske obrade

### 4.1.2. Kugličarenje zupčanika (“shot peening”)

"Shot peening" je neabrazivni proces hladnog deformiranja površine materijala. Deformacija se ostvaruje mlazom čeličnih kuglica koje velikom brzinom udaraju u površinu. Posljedica sraza je stvaranje kratera jednoliko raspoređenih po površini čije dimenzije i hrapavost površine ovise o promjeru kuglica i dinamici postupka. Lokalnom deformacijom se u površinu materijala unose tlačna naprezanja koja zaostaju u materijalu i sprečavaju stvaranje i porast inicijalnih pukotina, a time i lom materijala. Tom tehnologijom produžuje se vijek trajanja kod čeličnih elemenata: zupčanika (do 5 puta), opruga (do 12 puta), ventila i mnogih drugih dinamički opterećenih dijelova. Primjena ove tehnologije nezaobilazna je u avioindustriji gdje se koriste aluminijski materijal. Navedenim izotermičkim poboljšanjem nodularnoga lijeva dobit će se materijal sa čvrstom i žilavom jezgrom, otpornom na udarce, a tvrdoća na površini će se osigurati "shot peening" postupkom. Kugličarenje je provedeno čeličnim kuglicama promjera 1mm, tvrdoće 43-48 HRC, pod tlakom 7 bara s mlaznicom udaljenom 90 mm od površine zupčanika. Kugličarena površina zupčanika prikazana je na slici 4.1.2.1.



Slika 4.1.2.1. Površina zupčanika nakon kugličarenja

## 4.2. Ispitivanja zupčanika modificiranom FZG metodom

FZG test prvenstveno je namijenjen ispitivanju maziva pomoću standardnoga para zupčanika i opisan je u poglavlju 4. Standardni FZG test u ocjeni kakvoće maziva koristi dvije varijable: gubitak mase samih zupčanika te njihov izgled tijekom trošenja. FZG test možemo smatrati i vizualnom gravometrijskom metodom gdje se stanje istrošenosti površine uspoređuje s promjenama prikazanim u tablici 3.4. Na taj način klasificiramo stupanj istrošenosti.

Budući da cilj našeg testiranja nije mazivo već jedan od zupčanika neki od parametara postupka i analiza rezultata su modificirani.

Tijekom izvođenja FZG testa uočeno je da gubitak mase zupčanika nije presudan za donošenje odluke kada je došlo do zaribavanja jer jednostavno ne postoji skok u trošenju, tj. gubitku mase. Manji zupčanik i njegov gubitak mase može se potpuno zanemariti u analizi rezultata jer su gubici mase koji su izmjereni manji od greške ponovljivosti vaganja. Gubitak mase nije presudan u odluci o zaribavanju jer zupčanicima nisu od istog materijala i iste tvrdoće kao u standardnom FZG testu. Ulazno stanje površine našeg ispitivanog zupčanika također nije strogo definirano već je posljedica same obrade zupčanika (odvalno glodanje, kugličarenje). U standardnom FZG testu manji zupčanik je značajan za očitavanje promjena na bokovima zuba budući da je na njemu izveden velik pomak profila, povećana brzina klizanja, a time je mnogo osjetljiviji na zaribavanje. Takvi se zupčanicima ne nalaze u realnoj eksploataciji. Zbog toga su zupčanicima za ispitivanje napravljeni prema većem zupčaniku FZG testa koji ima evolventni bok i time je prikladan za primjenu u stvarnim uvjetima.

Zbog navedenih razloga test je prilagođen na način da uz kontroliranje gubitka mase zupčanika treba dovesti u vizualno isto stanje istrošenosti boka i na taj način dobiti referentnu točku za usporedbu zupčanika. Zupčanicima se troše po stupnjevima opterećenja, vizualno se kontroliraju, važu i to do točke pojave nekog od tipa istrošenja karakterističnog za zaribavanje. U tom stupnju opterećenja prekida se ispitivanje i on se navodi kao krajnji stupanj koji je zupčanik izdržao. Očekuje se da će zupčanicima zaribati u različitim stupnjevima ispitivanja budući da imaju različita mehanička svojstva.

Prije svakog ciklusa trošenja zupčanike treba oprati u prikladnom otapalu. Zupčanici su se u ovom slučaju prali u toplom benzinu. Nakon toga sušili su se na zraku i vagali na preciznoj vagi. Vaganje je obavljeno na vagi koja važe do 1300 g s mogućnošću mjerenja do 0,001 g. Prije prve montaže zupčanike treba ugrijati na cca. 100° C kako bi se lakše montirali na osovinu. To se obavlja u peći s automatskom regulacijom temperature. Nakon ugrijavanja slijedi montaža na za to predviđene osovine (slika 4.3.1.).



Slika 4.2.1. Osovine za montažu ispitnih zupčanika

Nakon ugradnje zupčanika slijedi zatvaranje kućišta i ulijevanje ulja. Ulje se ulijeva otprilike do osovina, cca. 1,5 l. Slijedi grijanje ulja na startnu temperaturu od 90° C što obavlja električni grijač postavljen na unutrašnju stranu bočnog poklopca (slika 4.3.2).



Slika 4.2.2. Električni grijač za postizanje startne temperature ulja

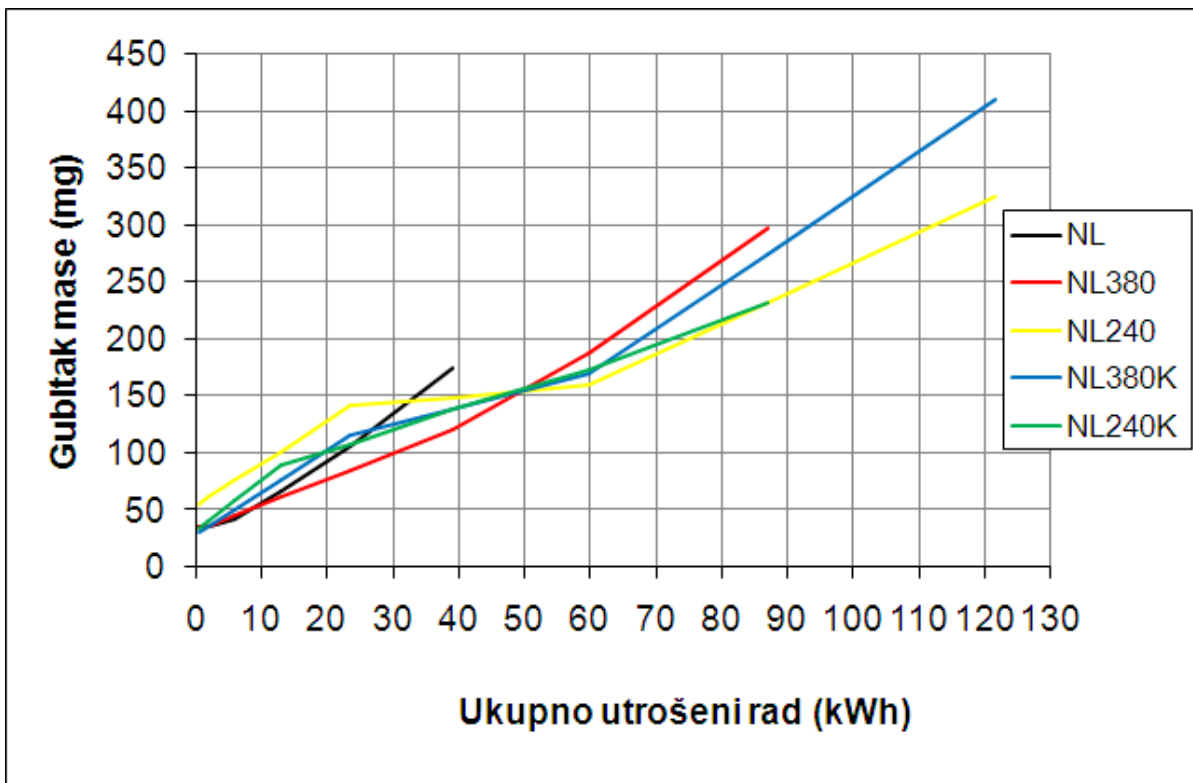
Temperaturu od 90° C konstantnom održava sklop koji informaciju o temperaturi dobiva preko termoelementa ugrađenog u kućište, a koji je u dodiru s uljem. Kada je postignuta startna temperatura stavlja se poklopac kućišta i priteže se vijcima. Stroj se pušta u rad u trajanju od 15 minuta po stupnju opterećenja.

Nakon svakog stupnja opterećenja mjeri se promjena mase većeg zupčanika i ujedno se vizualno kontrolira površina boka zuba zbog mogućih oštećenja. Svaki zupčanik se ispitivao do pojave oštećenja vidljivih golim okom. Gubici mase zupčanika i porast temperature prikazani su u tablici 4.2.1.

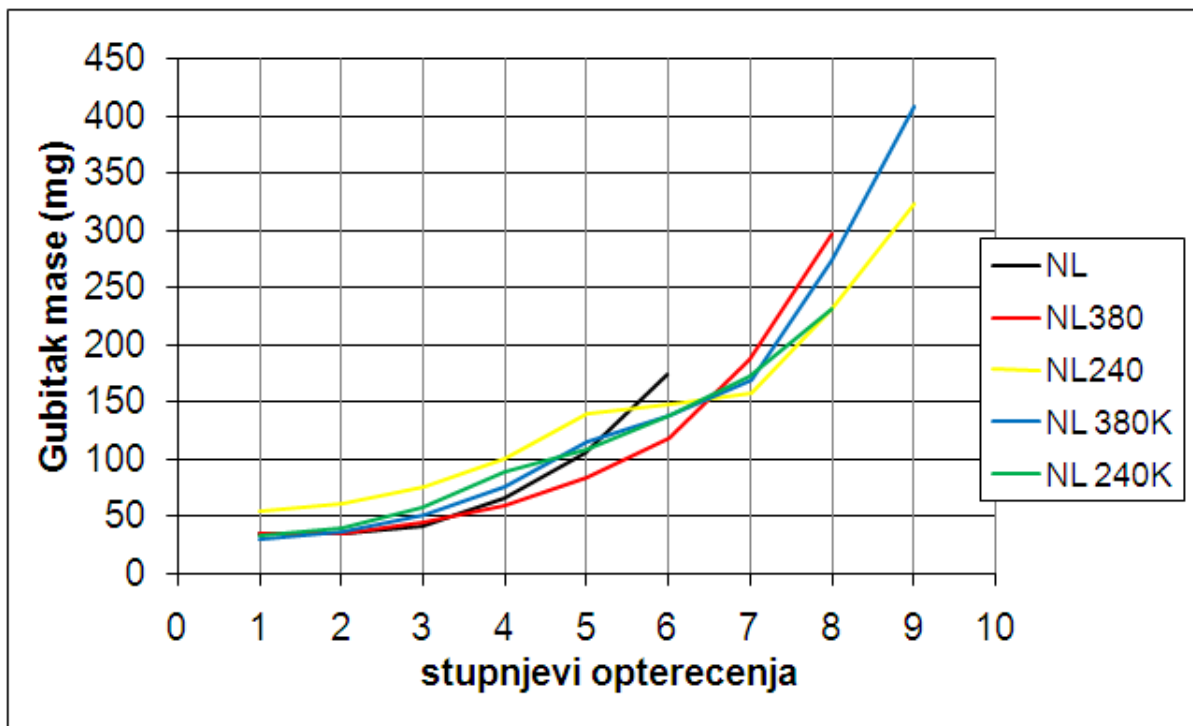
Tablica 4.2.1. Rezultati FZG testa

MATERIJAL	ULAZNA	1.STUPANJ	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
	MASA (mg)	$\Delta m$ (mg)								
NL	1149,308	35	0	7		63 95°C	70 100°C			
NL380	1137,782	36					84 100°C	67 100°C	110 110°C	
NL240	1149,941	55				86 95°C	95°C	18 110°C	110°C	165 135°C
NL380K	1140,884	30				86 97°C	100°C	53 110°C	112°C	240 125°C
NL240K	1143,630	33			56	19 95°C	30 100°C	34 110°C	60 110°C	

Rezultati su grafički prikazani na slikama 4.2.3. i 4.2.4.



Slika 4.2.3 Grafički prikaz ovisnosti gubitka mase o ukupno utrošenom radu



Slika 4.2.4 Grafički prikaz ovisnosti gubitka mase o stupnju opterećenja

Na slikama (4.2.4.1 - 4.2.5.0.) prikazane su fotografije površine zubiju svih ispitivanih zupčanika prije samog ispitivanja i nakon zadnjeg stupnja ispitivanja u kojem je površina zuba oštećena.



Slika 4.2.4.1 Površina zuba NL zupčanika prije ispitivanja



Slika 4.2.4.2. Površina zuba NL zupčanika nakon ispitivanja



Slika 4.2.4.3. Površina zuba NL 380 zupčanika prije ispitivanja



Slika 4.2.4.4. Površina zuba NL 380 zupčanika nakon ispitivanja

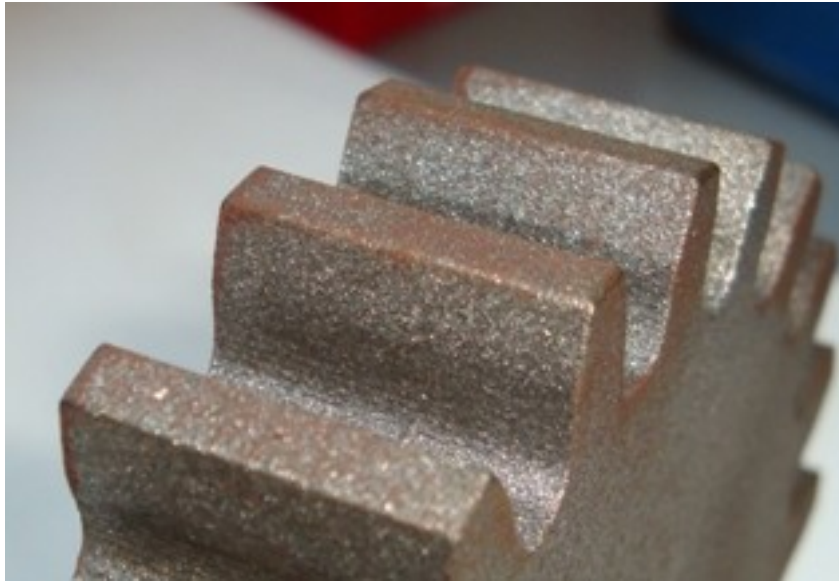




Slika 4.2.4.5 Površina zuba NL 240 zupčanika prije ispitivanja



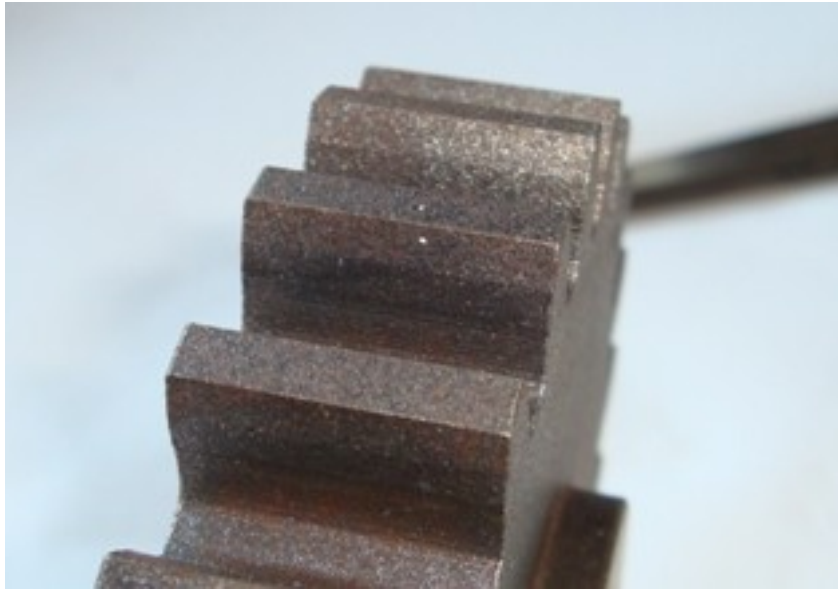
Slika 4.2.4.6 Površina zuba NL 240 zupčanika nakon ispitivanja



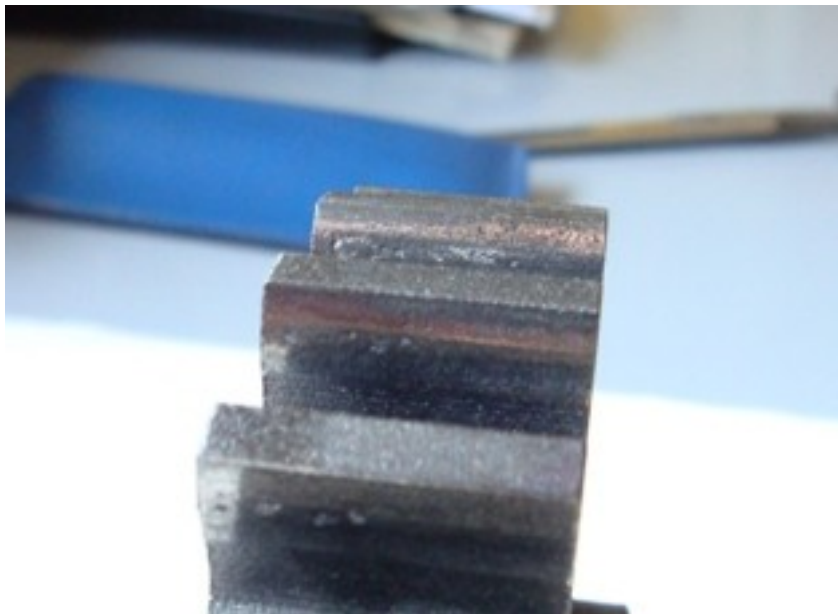
Slika 4.2.4.7. Površina zuba NL 380K zupčanika prije ispitivanja



Slika 4.2.4.8. Površina zuba NL 380K zupčanika nakon ispitivanja

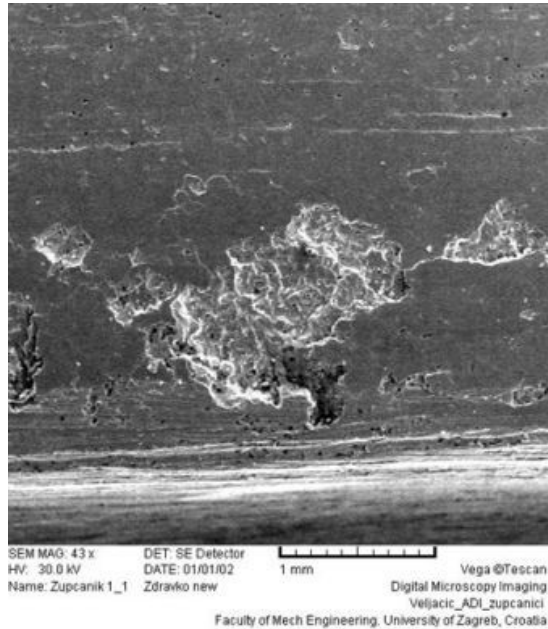


Slika 4.2.4.9 Površina zuba NL240K zupčanika prije ispitivanja

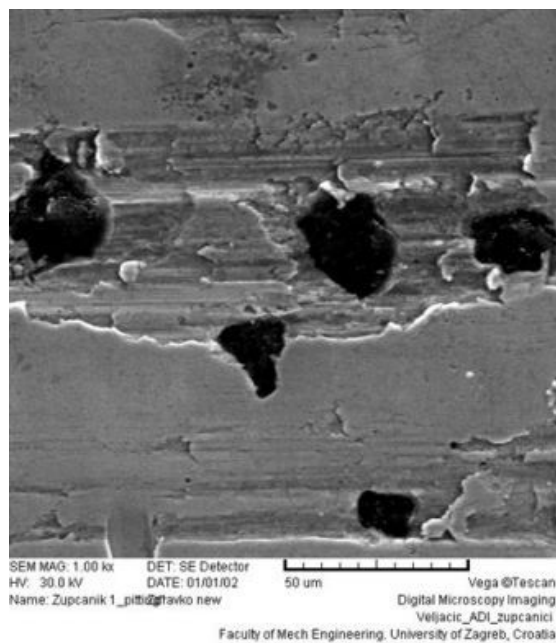


Slika 4.2.5.0. Površina zuba NL240K zupčanika nakon ispitivanja

Mjesta oštećenja analizirana su uz pomoć skening elektronskog mikroskopa TESCAN VEGA TS5136LS na visokom vakuumu uz napon od 30kV sa sekundarnim detektorom koji pokazuje topografiju površine (slike 4.2.5.1 , 4.2.5.2).



Slika 4.2.5.1 Oštećenje površine u obliku pittinga



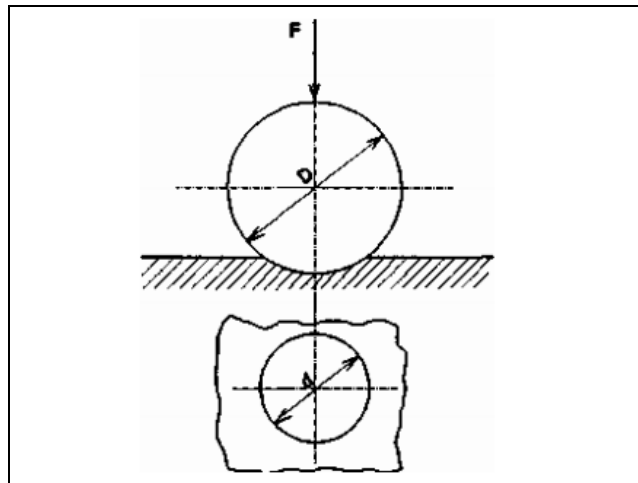
Slika 4.2.5.2 Nodule grafita kao inicijalne pukotine

### 4.3. MJERENJE TVRDOĆE

Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju drugog, znatnije tvrdog tijela. Na području mjerenja tvrdoće razvijen je čitav niz metoda ispitivanja. Važno je naglasiti da je tvrdoća u korelaciji s nekim drugim mehaničkim svojstvima. To se ponajprije odnosi na vlačnu čvrstoću, ali i na otpornost na abrazijsko trošenje. Ispitivanje tvrdoće tek neznatno oštećuje površinu ispitivanoga predmeta pa se općenito može svrstati u nerazorna ispitivanja. Uređaji za mjerenje tvrdoće, tvrdomjeri, u pravilu su jeftiniji i jednostavniji od primjerice nekih drugih uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava npr. kidalica. Osnovni princip mjerenja kod većine metoda je mjerenje veličine ili dubine otiska što ga penetrator opterećen nekom silom načini u ispitivanom materijalu. Te su metode pogodne za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala kod kojih je moguća neka plastična ( trajna ) deformacija. Za dobivanje daljnjih parametara kojima ćemo lakše usporediti izrađene zupčanike koristit će se Brinellova metoda za ispitivanje tvrdoće površine samih zupčanika te Vickersova metoda za ispitivanje mikrotvrdoće uzoraka na kojima je rađena metalografija, a uzeti su na poprečnom presjeku zuba [6].

### 4.3.1. Brinellova metoda

Kod Brinellove metode penetrator je kuglica od kaljenog čelika promjera  $D$  koja se utiskuje silom  $F$  u površinske slojeve materijala. Na slici 4.3.1.1 prikazana je skica Brinellove metode.



Slika 4.3.1.1. Skica Brinellove metode

Na taj način nastaje u ispitivanom materijalu otisak u obliku kugline kalote promjera baze “ $d$ ” i dubine “ $h$ ”. Za ispitivanje tvrdoće površine zupčanika korištena je kuglica promjera 5 mm i sila 7500 N. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu izvršeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala na Fakultetu stojarstva i brodogradnje. Uređaj za mjerenje tvrdoće prikazan je na slici 4.3.1.2.



Slika 4.3.1.2. Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Brinellu

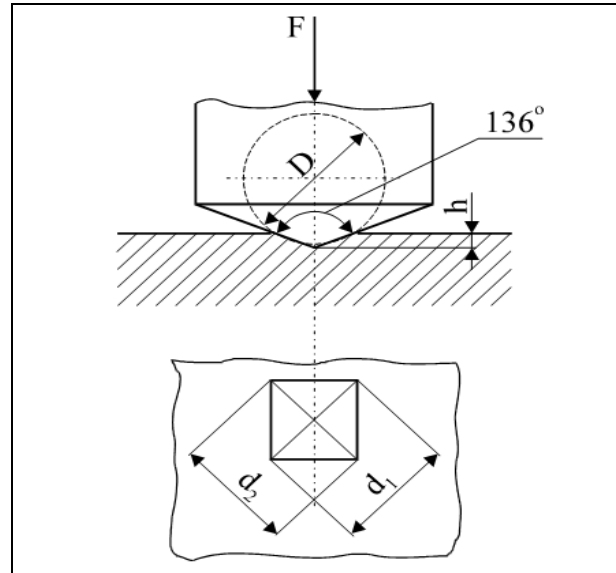
U tablici 4.3.1.1. prikazani su rezultati ispitivanja tvrdoće Brinellovom metodom.

Tablica 4.3.1.1. Izmjerene tvrdoće površine zupčanika Brinellovom metodom

TVRDOĆA PO BRINELLU HB 5/7500									
NL		NL 380		NL 240		NL 380K		NL 240K	
d [mm]	HB	d [mm]	HB	d [mm]	HB	d [mm]	HB	d [mm]	HB
1,96	239	1,88	260	1,78	292	1,62	354	1,71	317
1,95	241	1,85	269	1,80	285	1,73	309	1,72	313
1,96	241	1,88	260	1,79	288	1,67	333	1,73	309
$\bar{x}$	240		263		288		332		313

### 4.3.2. Vickersova metoda

Kod Vickersove metode uklonjena su dva osnovna nedostatka Brinellove metode: ograničenost mjerenja do 450 HB te ovisnost iznosa tvrdoće o primjenjenoj sili utiskivanja kuglice. Prvi nedostatak uklonjen je uporabom najtvrđeg materijala za penetrator, dijamanta, a drugi oblikom penetratora. To je kod Vickersove metode četverostrana piramida sa kutem od  $136^\circ$  između stranica (slika 7.3.).



Slika 4.3.2.1. Mjerenje tvrdoće po Vickersu

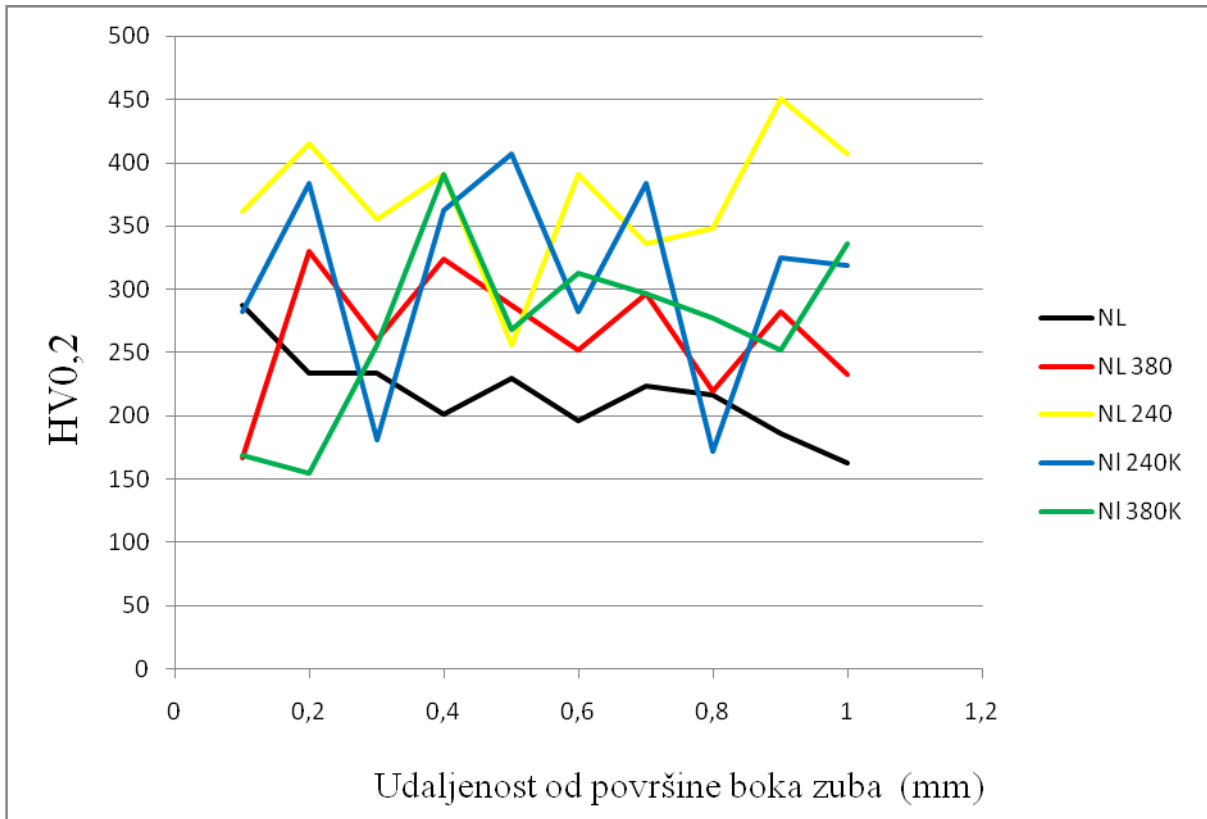
Kut od  $136^\circ$  nije odabran slučajno već se utiskivanjem penetratora tim kutem dobivaju vrijednosti tvrdoće neovisne o primjenjenoj sili. Stoga se ova metoda može koristiti i za mjerenje tvrdoće sitnih uzoraka kao što su kristalna zrna u mikrostrukturi materijala. Zbog tog svojstva ova je metoda izabrana za mjerenje mikrotvrdoće na uzorcima koji su korišteni u analizi metalografske strukture. Uzorak se zbog svojih dimenzija analizira mikroskopom na kojem je i ugrađen mikrotvrdomjer. Na taj način možemo dobiti uvid mijenja li se tvrdoća zupčanika od površine prema središtu zuba, tj. jesmo li odabranim metodama uspjeli u nastojanju da očvrstimo površinu koja bi time bila otpornija na trošenje.

Podaci koje smo dobili prikazani su u tablici 4.3.2.1. i na slici 4.3.2.2.



Tablica 4.3.2.1. Podaci izmjerenih mikrotvrdoća Vickersovom metodom na uzorcima zuba zupčanika

NL				NL 380				NL 240				NL 380K				NL 240K			
L	D	$\Delta$	HV0,2	L	D	$\Delta$	HV0,2	L	D	$\Delta$	HV0,2	L	D	$\Delta$	HV0,2	L	D	$\Delta$	HV0,2
339	458	119	<b>287</b>	316	472	156	<b>167</b>	348	454	106	<b>362</b>	327	482	155	<b>169</b>	344	464	120	<b>282</b>
335	467	132	<b>233</b>	347	458	111	<b>330</b>	347	446	99	<b>415</b>	318	480	162	<b>155</b>	350	453	103	<b>383</b>
330	462	132	<b>233</b>	339	464	125	<b>260</b>	349	456	107	<b>355</b>	339	465	126	<b>256</b>	327	477	150	<b>181</b>
328	470	142	<b>202</b>	343	455	112	<b>324</b>	350	452	102	<b>391</b>	345	447	102	<b>391</b>	346	452	106	<b>362</b>
329	462	133	<b>230</b>	340	459	119	<b>287</b>	339	465	126	<b>256</b>	338	461	123	<b>269</b>	350	450	100	<b>407</b>
327	471	144	<b>196</b>	334	461	127	<b>252</b>	349	451	102	<b>391</b>	340	454	114	<b>313</b>	339	459	120	<b>282</b>
333	468	135	<b>223</b>	339	456	117	<b>297</b>	344	454	110	<b>336</b>	343	460	117	<b>297</b>	349	452	103	<b>383</b>
330	467	137	<b>217</b>	332	468	136	<b>220</b>	351	459	108	<b>349</b>	340	461	121	<b>278</b>	325	479	154	<b>171</b>
327	475	148	<b>186</b>	337	457	120	<b>282</b>	351	446	95	<b>451</b>	335	462	127	<b>252</b>	341	453	112	<b>324</b>
320	478	158	<b>163</b>	333	465	132	<b>233</b>	348	448	100	<b>407</b>	344	454	110	<b>336</b>	342	455	113	<b>318</b>



Slika 4.3.2.2 Grafički prikaz rezultata izmjerenih mikrotvrdoća

#### 4.4. METALOGRAFIJA

Metalografija je dio znanosti o materijalima koji se bavi razvojem i usavršavanjem postupaka izradbe uzoraka te analizom i boljim razumijevanjem mikro- i makrostrukture materijala. Na taj način dobije se bolji uvid u međusobnu povezanost dijagrama stanja metala i legura, njihove strukture i svojstava.

Danas se pojam metalografije sve više gubi i zamjenjuje ga naziv materijalografija. Razlog tome je sve veća primjena nemetalnih konstrukcijskih materijala kod kojih također postoji potreba za analizom strukture. Stoga pojam materijalografija obuhvaća analizu strukture svih materijala: metala, keramike, polimera i kompozita.

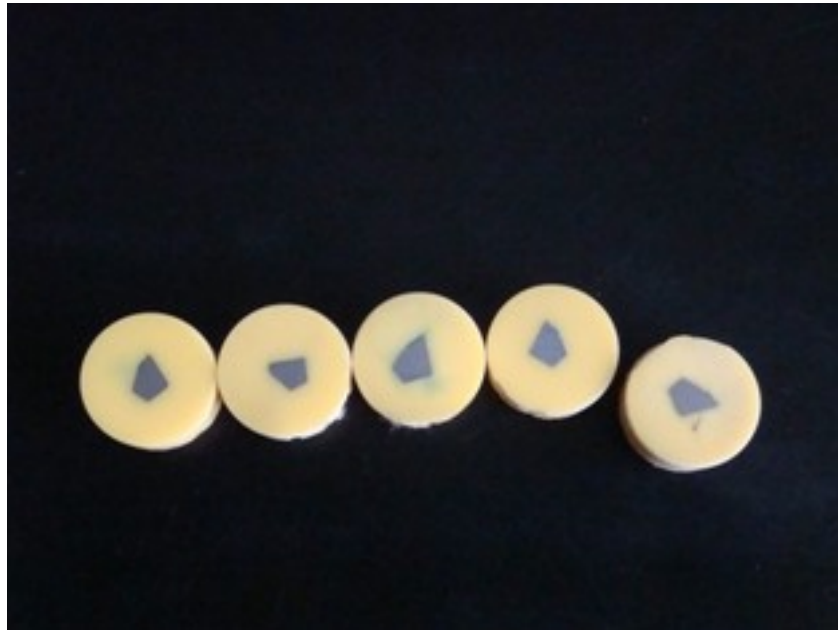
Makrostrukturu možemo analizirati povećalom odnosno stereomikroskopom, dok se mikrostruktura materijala analizira pomoću svjetlosnog ili elektronskog mikroskopa.

Postupak pripreme uzoraka obuhvaća:

- izrezivanje uzorka
- ulijevanje u polimernu masu
- brušenje
- poliranje
- nagrivanje.

#### 4.4.1. Metalografsko ispitivanje uzoraka

Izuzimanje uzoraka, priprema i metalografska analiza napravljena je u Laboratoriju za metalografiju pri Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Nakon odrezivanja zuba cjelokupnom dužinom jedna polovica uzorka zalivena je na hladno u akrilnu masu “Durofix-2 kit” (slika 4.4.1.1.).



Slika 4.4.1.1. Pripremljeni uzorci za metalografsko ispitivanje

Zatim slijedi brušenje pod vodom brusnim papirima granulacije 220, 320, 500, 800 pri 300 okr./min. Sljedeći korak je poliranje koje se izvodi u dva stupnja:

- prvi stupanj, poliranje, izvršeno dijamantnom pastom s veličinom zrna od 6 $\mu$ m u trajanju od 7 min. na podlozi PANOT-W.
- drugi stupanj, fino poliranje, izvršeno je dijamantnom pastom s veličinom zrna od 1  $\mu$ m u trajanju od 5 min. na OP-CHEM podlozi.

Stroj na kojem je obavljeno brušenje i poliranje je Struers polirka DAP-V s glavom PEDEMIN-2 (slika 4.4.1.2).



Slika 4.4.1.2. Struers polirka

Nakon brušenja i poliranja uzorci su nagriženi u 3 % nitalu.

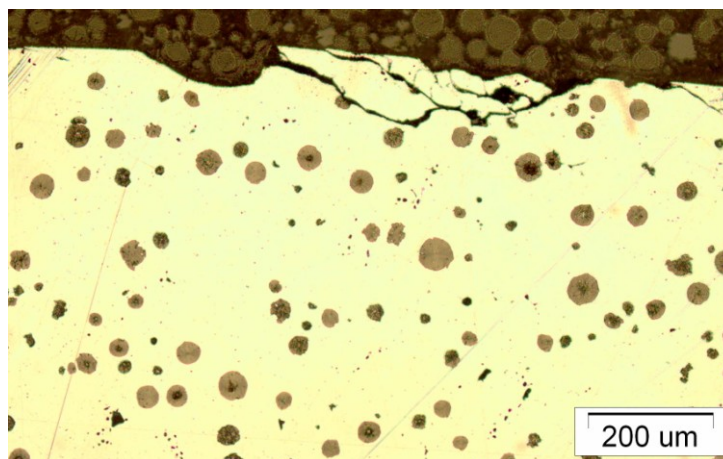
#### 4.4.2. Rezultati metalografskog ispitivanja

Analiza uzoraka obavljena je na Olympusovom svjetlosnom mikroskopu sa CCD kamerom (slika 4.4.2.1).



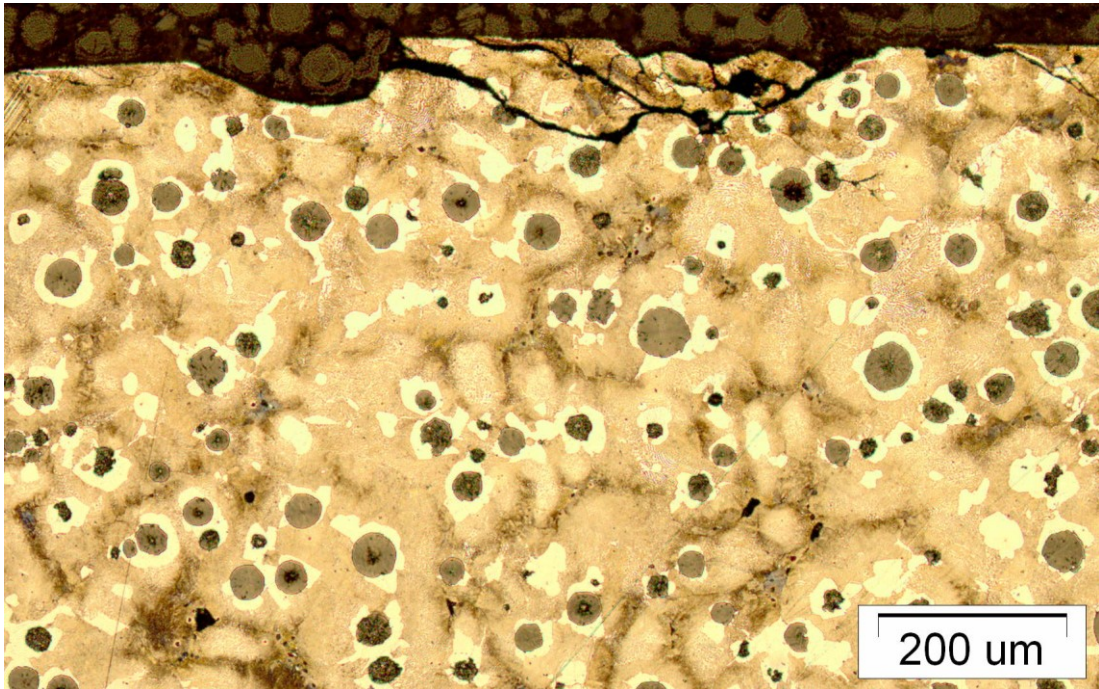
Slika 4.4.2.1 Olympus svjetlosni mikroskop sa CCD kamerom

Na slici 4.4.2.2. snimljenoj mikroskopom vidi se brušen i poliran uzorak NL zupčanika. Jasno se raspoznaje metalna matrica s pravilno raspoređenim nodulama grafita.

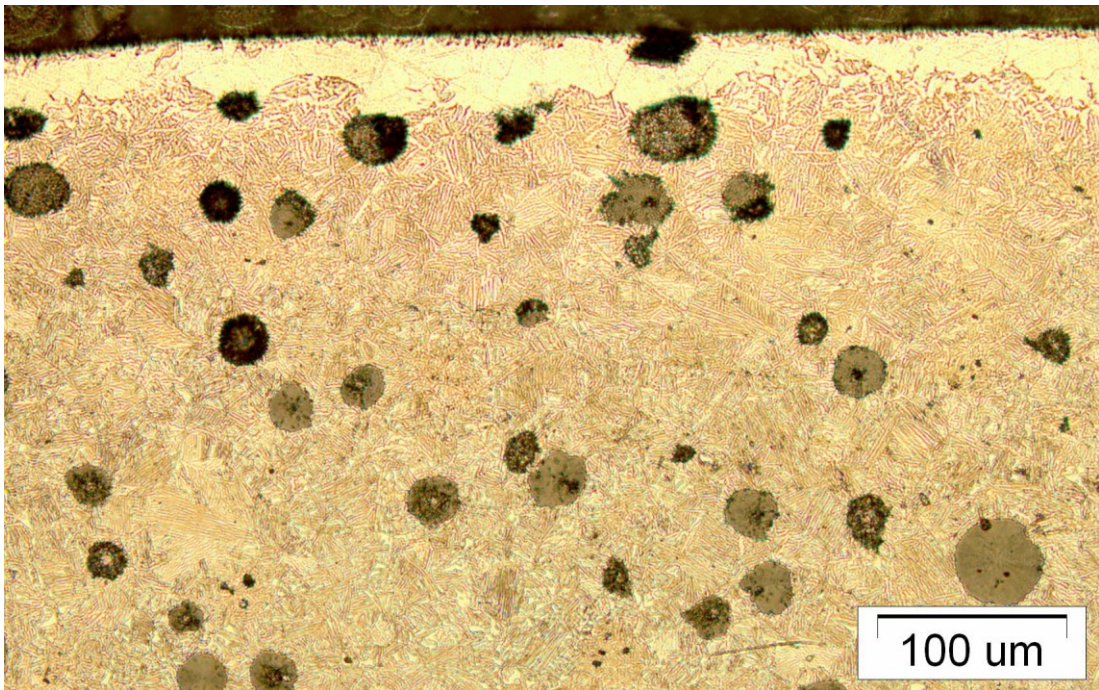


Slika 4.4.2.2. Rubni sloj NL zupčanika, poliran

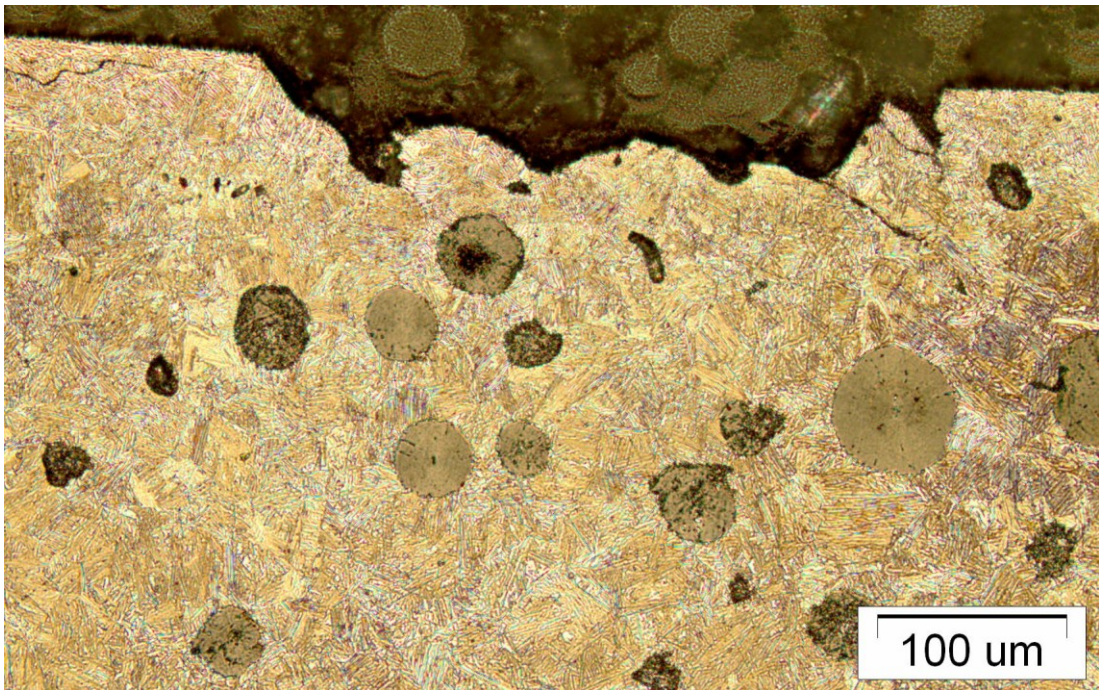
Na slikama (4.4.2.3. – 4.4.2.7.) snimljenim na svjetlosnom mikroskopu prikazane su mikrostrukture zupčanika.



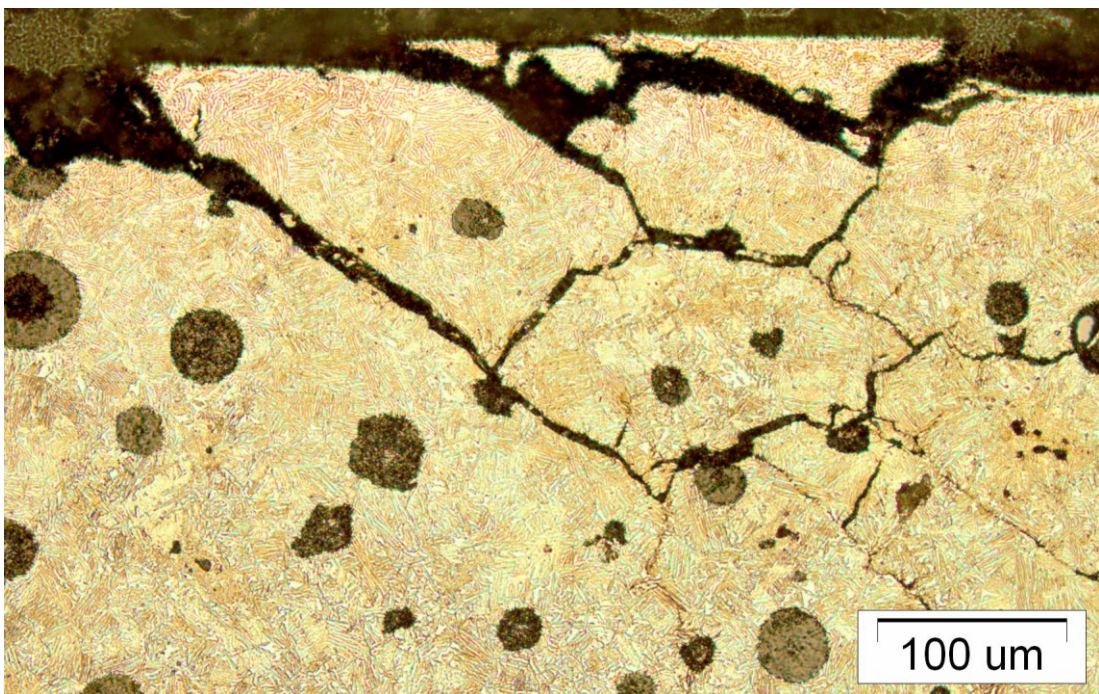
Slika 4.4.2.3. Rubni sloj NL zupčanika, poliran i nagrižen nitalom



Slika 4.4.2.4. Rubni sloj NL 380 zupčanika, poliran i nagrižen nitalom

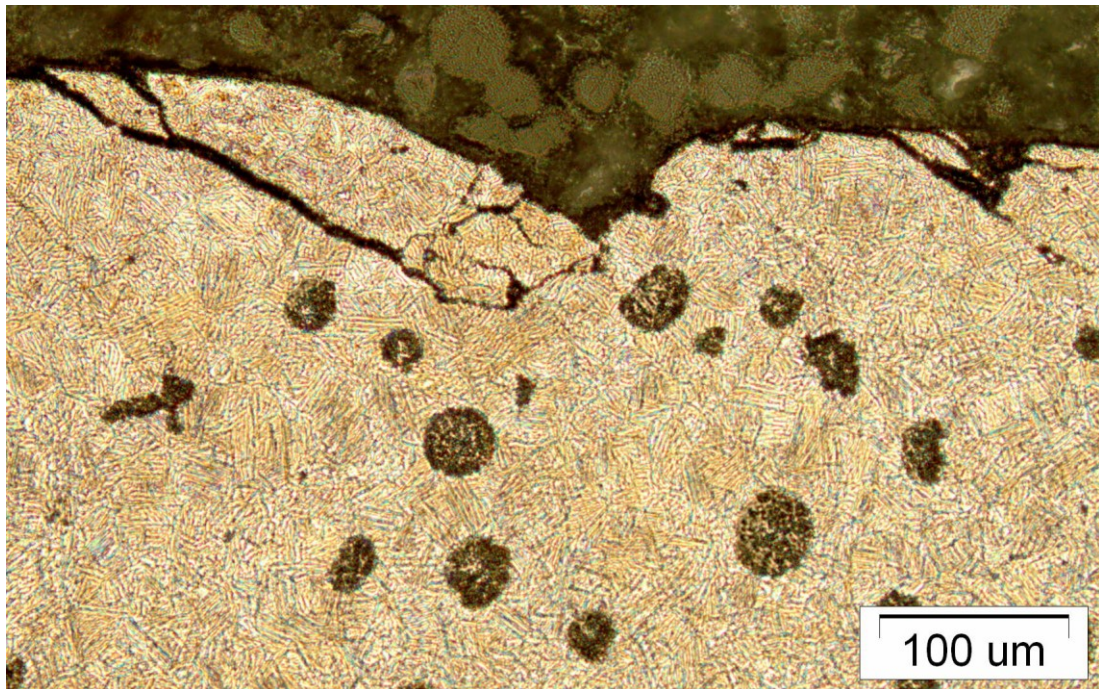


Slika 4.4.2.5. Rubni sloj NL 240 zupčanika, poliran i nagrižen nitalom



Slika 4.4.2.6. Rubni sloj NL 380K zupčanika, poliran i nagrižen nitalom





Slika 4.4.2.7. Rubni sloj NL 240K zupčanika, poliran i nagrižen nitalom

Promatrajući metalografske slike uzoraka opaža se sljedeće:

- na slici 4.4.2.3. prikazana je mikrostruktura zupčanika koji nije toplinski obrađen. Jasno se raspoznaje perlitna matrica s nodulama grafita okruženih svijetlijim poljima ferita.
- na slici 4.4.2.4. prikazana je mikrostruktura zupčanika koji je izotermički poboljšan na temperaturi od 380° C. Uočava se jednolika struktura gornjeg bainita s nodulama grafita.
- na slici 4.4.2.5. prikazana je mikrostruktura zupčanika koji je izotermički poboljšan na temperaturi od 240° C. Uočava se struktura donjeg bainita s nodulama grafita.
- na slici 4.4.2.6. prikazana je mikrostruktura zupčanika koji je izotermički poboljšan na temperaturi od 380° C, a zatim kugličaren. Uočava se jednolika struktura gornjeg bainita s nodulama grafita.
- na slici 4.4.2.7. prikazana je mikrostruktura zupčanika koji je izotermički poboljšan na temperaturi od 240° C, a zatim kugličaren. Uočava se jednolika struktura donjeg bainita s nodulama grafita.

## 5. ZAKLJUČAK

Ovim se radom eksperimentalno istraživao utjecaj izotermičkog poboljšavanja na dvije različite temperature i kugličarenja na mehanička svojstva nodularnog lijeva NL60. Pomoću modificiranog FZG testa ispitivala se otpornost na trošenje površinskih slojeva zupčanika. Nakon toga provela su se ispitivanja tvrdoće površine zupčanika i mikrotvrdoće površinskih slojeva zubiju zupčanika, a zatim je svih pet uzoraka metalografski ispitano kako bi se dobio uvid u očekivanu promjenu mikrostrukture materijala zupčanika.

Uspoređujući dobivene rezultate dolazi se do sljedećih zaključaka:

- toplinskom obradom izotermičkim poboljšavanjem promijenila se mikrostruktura materijala zupčanika u donji i gornji bainit s pripadajućim mehaničkim svojstvima. To se vidi iz izmjerenih površinskih tvrdoća, ali i iz rezultata FZG testa trošenjem. Zupčanik izotermički poboljšan na temperaturi od 240° C ima veću tvrdoću od zupčanika izotermički poboljšanog na temperaturi od 380° C što je rezultiralo zaribavanjem zupčanika u većem stupnju opterećenja. To ukazuje da mikrostruktura donjeg bainita ima veću otpornost na trošenje i time je povoljnija za izradu zupčanika.

- ispitivanjem mikrotvrdoće na bokovima zubiju od površine prema sredini ne primjećuje se značajno odstupanje mikrotvrdoće što pokazuje da se kugličarenjem nisu uspjeli postići željeni efekti očvrnuća površine zupčanika. Može se pretpostaviti da je kugličarenje izvedeno na neprikladan način tj. da neki od parametara postupka nisu bili prilagođeni materijalu. Rezultati FZG testa potvrđuju zaključke analize mikrotvrdoće s obzirom da se kod kugličarenih zupčanika nije uočio značajan skok u otpornosti na trošenje.

- na metalografskim slikama jasno se vide promjene u mikrostrukтури materijala ovisno o temperaturi izotermičkog poboljšavanja. Izotermičkim poboljšavanjem zupčanika na višoj temperaturi od 380° C mikrostruktura je gornji bainit, a s nižom temperaturom izotermičkog poboljšavanja od 240° C mikrostruktura je donji bainit. Također se može uočiti da su na mjestima oštećenja površinskog sloja ispale nodule grafita, ali i da se pukotine dalje šire od nodule do nodule. Nodule kao najmekši dijelovi površine zupčanika postaju slaba mjesta s obzirom da pod velikim pritiskom postaju inicijalna mjesta za veća oštećenja površine zuba u obliku pittinga. To se jasno vidi na snimkama elektronskim mikroskopom (slika 4.2.5.1. i 4.2.5.2.).

Izotermičkim poboljšavanjem zupčanika poboljšana su svojstva zupčanika, otpornost na trošenje i tvrdoća. Kugličarenje kao metoda očvrnuća površine nije dala željene rezultate i trebalo bi je provesti pod drugim parametrima. Površinu bi također trebalo obraditi nekom metodom kako bi se eliminirale nodule grafita iz površine jer djeluju kao inicijalne pukotine za stvaranje pittinga.

## LITERATURA

- [1] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof, Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2] M. Novosel, D. Krumes, Željezni materijali (metalografske osnove i tehnička primjena željeznih ljevova), Strojarski fakultet Slavonski Brod, Slavonski Brod, 1997.
- [3] J. F. Janowak, R. B. Gundlach, Approaching Austempered Ductile Iron Properties by Controlled Cooling in the Foundry, 1985
- [4] R. Mandaković, Klasifikacije i specifikacije maziva i srodnih proizvoda, Hrvatsko društvo za goriva i maziva, 2005
- [5] YU ISSN 0350 – 350X GOMABN 25(1-2) 71-82, Određivanje stupnja štetnog opterećenja mazivog ulja na FZG ispitnom stroju, 1986.
- [6] M. Franz, Mehanička svojstva materijala, Fakultet stojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.