

# Trošenje noža industrijske rezalice za drvo

---

**Crnjac, Marko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:544617>

*Rights / Prava:* [Attribution-ShareAlike 4.0 International/Imenovanje-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Marko Crnjac**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Suzana Jakovljević , dipl. ing.

Student:

Marko Crnjac

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Suzani Jakovljević na savjetima i stručnoj pomoći pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se svim asistentima i suradnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu na pruženoj pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela ovog rada.

Zahvaljujem se firmi „C.I.A.K.-sektor ekologije“ na ustupljenim uzorcima noža koji su mi poslužili za eksperimentalni dio rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na podršci tijekom dosadašnjeg studiranja.

Marko Crnjac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Crnjac** JMBAG: **0035218428**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Trošenje noža industrijske rezalice za drvo**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wear of wood shredder blades**

Opis zadatka:

Prerađivačke industrije koriste uređaje za usitnjavanje materijala, industrijske rezalice. Industrijska rezalica za drvo je stroj za usitnjavanje drvenog materijala. Noževi su pričvršćeni za osovinu, disk ili bubanj, kod nekih izvedbi rotiraju u horizontalnoj, a kod drugih u vertikalnoj ravnini.

Prilikom usitnjavanja drva dolazi do trošenja površine reznog dijela noža na mjestu dodira noža i drva.

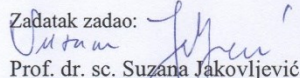
U radu je potrebno:

- 1) definirati materijale od kojih se izrađuju noževi za industrijske rezalice,
- 2) analizirati i opisati mehanizme trošenja koji se javljaju u kontaktu noža i drva,
- 3) na izabranom primjeru karakterizirati mikrostrukturu materijala izabranog noža za industrijsku rezalicu,
- 4) analizirati rezultate i dati zaključak.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:   
Prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

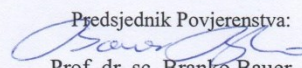
Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.  
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.  
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. INDUSTRIJSKE REZALICE .....	2
2.1. Vrste industrijskih rezalica.....	2
2.2. Jednoosovinske industrijske rezalice.....	2
2.3. Dvoosovinske rezalice.....	3
2.4. Troosovinske rezalice.....	3
2.5. Horizontalna i vertikalna čekić rezalica .....	4
2.6. Drobilica.....	4
2.7. Granulator.....	4
3. MEHANIZMI TROŠENJA PRISUTNI KOD OBRADE INDUSTRIJSKIM REZALICAMA .....	5
3.1. Trošenje.....	5
3.2. Abrazija .....	6
3.3. Umor površine.....	8
4. NOŽEVI INDUSTRIJSKIH REZALICA .....	10
4.1. Noževi za rezanje drva .....	10
4.2. Noževi za rezanje plastike.....	11
4.3. Noževi za rezanje guma i gumenih proizvoda .....	12
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	13
5.1. Rezanje noža u Laboratoriju za toplinsku obradu FSB-a.....	13
5.2. Kemijska analiza uzorka .....	15
5.3. Karakterizacija uzorka.....	16
5.4. Analiza mikrostrukture uzorka na svjetlosnom mikroskopu.....	17
5.5. Mjerenje tvrdoće površine uzorka .....	20
6. ZAKLJUČAK.....	21

---

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Jednoosovinska rezalice tvrtke Vecoplan [3].....	2
Slika 2. Troosovinska rezalica [2].....	3
Slika 3. Jedinični događaj abrazije [3] .....	6
Slika 4. Jedinični događaj umora površine [3] .....	8
Slika 5. Umor površine vidljiv na rubu noža industrijske rezalice .....	9
Slika 6. Primjer noževa za obradu plastike .....	11
Slika 7. Uzorak noža industrijske rezalice za drvo .....	13
Slika 8. Odrezani uzorak noža drobilice .....	14
Slika 9. Mikrostruktura jezgre uzorka noža, povećanje 200x .....	17
Slika 10. Mikrostruktura jezgre uzorka noža, povećanje 1000x .....	18
Slika 11. Mikrostruktura ruba noža, povećanje 200x.....	18
Slika 12. Mikrostruktura ruba noža, povećanje 500x.....	19

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Tijek eksperimentalnog dijela rada ..... 13  
Tablica 2. Prikaz rezultata kemijske analize uzorka ..... 15  
Tablica 3. Tvrdoća površine uzorka ..... 20



---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$P$	W	Snaga
$F_N$	N	Normalna sila
$F_t$	N	Tangencijalna sila
HRC	-	Tvrdoća po Rockwellu
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
HB	-	Tvrdoća po Brinellu
$t$	°C	Temperatura

---

**SAŽETAK**

Industrijska rezalica je stroj koji se koristi za usitnjavanje svih vrsta materijala. Rezalice mogu biti različitih izvedbi i veličina. Najbitniji dio svake rezalice jest nož, posebno namijenjen za određeni materijal. U prvom dijelu rada je opisana opća podjela rezalica, zatim su opisani prisutni mehanizmi trošenja kod rezanja te naposljetku podjela noževa rezalice s obzirom na materijal rezanja. U konačnici je opisan tijek eksperimentalnog dijela analize noža industrijske rezalice za drvo.

Ključne riječi: industrijska rezalica, nož rezalice, materijal rezanja, mehanizmi trošenja, analiza noža

**SUMMARY**

The industrial shredder is a machine used for reducing the size of all kinds of material. Industrial shredders come in many different variations and sizes. The most important part of industrial shredder is the blade especially intended for a specific material. In the first part of work are described shredders in general, secondly are described wear principles during the shredding and lastly are described shredding blade categories which depend on shredding material. In the end is described working flow of a experimental part, which is about wood shredding blade analysis.

Key words: industrial shredder, blade, shredding material, wear principles, shredding blade analysis

## 1. UVOD

Industrijska rezalica je stroj čija je namjena smanjivanje veličine svih vrsta materijala. Rezalice mogu biti proizvedene u različitim veličinama i izvedbama, ovisno o namjeni. Glavne izvedbe industrijskih rezalica su: horizontalni mlin sa čekićima, vertikalni mlin sa čekićima, sporohodni smični tip rezalice sa jednom, dvije, tri ili četiri osovine, mljevilica sa jednom ili dvije osovine, granulatori, strugalice, drobilice te mlinovi za istanjivanje. Komponente industrijske rezalice su rotor, oštrice, kućište, motor, prijenosni sustav, sustav za napajanje i elektronički slop. Materijali koji se najčešće obrađuju i režu u industrijskim rezalicama su: automobilske gume, metali, olupine automobila, plastika, koža, papir, drvo i smeće. Rezalice se često koriste kako bi se materijali obradili u različite oblike i veličine kako bi se olakšala separacija istih ili kako bi se smanjili troškovi transporta materijala. Kućni otpad, radioaktivni otpad te medicinski otpad se najčešće obrađuju u posebnim centrima gdje je sustav održavanja i skladištenja materijala na višoj razini zbog moguće opasnosti za okoliš. S obzirom na tvrdoću materijala rezanja, noževi industrijskih rezalica se razlikuju. Trenutačno najveća industrijska rezalica na svijetu je Lynxs rezalica za otpadni metal snage 6,860 kW. Rezalica se nalazi u Newportu, Wales te ima pristup s ceste, željezničke pruge te mora što olakšava transport i pristup za dovedeni ili odvedeni materijal. Zanimljivi podatak je da Lynxs rezalica može izrezati 450 automobila na sat.[1]

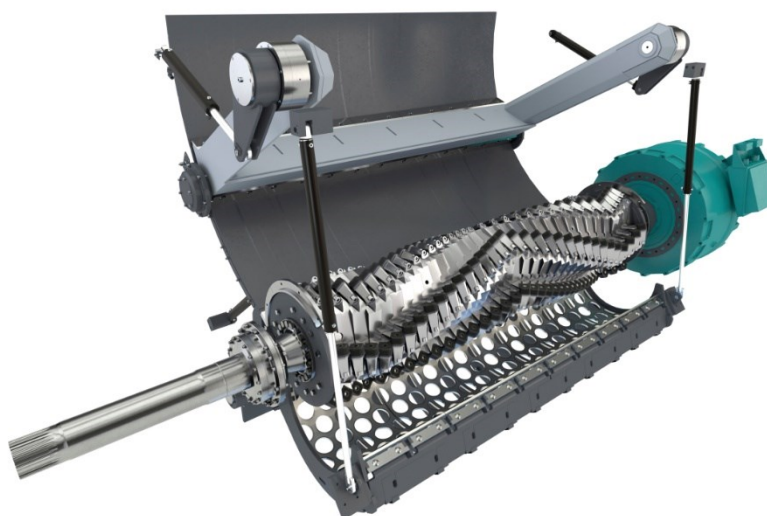
## 2. INDUSTRIJSKE REZALICE

### 2.1. Vrste industrijskih rezalica

Podjela industrijskih rezalica ovisi o materijalu rezanja. Za svaku vrstu materijala postoji određeni tip rezalice, od rezalica koje služe za rezanje papira i kartona do velikih rezalica koje mogu rezati madrace i limove. Različite vrste rezalica mogu biti pogonjene električnim i hidrauličnim motorima. Postoji širok raspon strukturalnih faktora koji uključuje broj osovina.[2]

### 2.2. Jednoosovinske industrijske rezalice

Jednoosovinske rezalice koriste se za recikliranje otpada i imaju jednu osovinu sa rotirajućim noževima, hidrauličku potisnu ploču te sito ispod potisne ploče i osovine kako bi se vršila filtracija materijala određene veličine. Osovina se rotira na niskim okretajima i reže materijal na veličinu od jednog do dva inča. Jednoosovinske rezalice koriste se kada je potrebna stalna veličina čestice i idealno je za rezanje plastičnih materijala.[2]



Slika 1. Jednoosovinska rezalice tvrtke Vecoplan [3]

### 2.3. Dvoosovinske rezalice

Kod dvoosovinskih rezalica, oštrice za rezanje su pričvršćene na obje osovine koje rotiraju jedna prema drugoj pri malim brzinama. Nastali dijelovi su veličine od jednog do pet inča. Mala brzina sprječava stvaranje čestica prašine pri procesu rezanja. Glavna namjena dvoosovinskih rezalica je obrada velikih i glomaznih materijala koje se jedino na ovaj način mogu obraditi.[2]

### 2.4. Troosovinske rezalice

Tri oštrice troosovinske rezalice rotiraju na različitim brzinama kako bi osigurale stalan tok sirovine. Odabir veličine rezanog materijala je određen sitom kroz koji materijal mora proći kako bi napustio komoru rezanja. Ako materijal još nije dovoljno malen, ponovno prolazi kroz stroj sve dok nije dovoljne veličine da prođe kroz sito.[2]



Slika 2. Troosovinska rezalica [2]

## **2.5. Horizontalna i vertikalna čekić rezalica**

Horizontalne i vertikalne čekić rezalice rade na način da izrezuju stavljeni materijal serijom ponavljajućih udaraca malih čekića. Metalni bubanj, koji sadrži čekiće montirane na osovinu, rotira brzo te time je materijal zdrobljen u male komadiće i čestice.[2]

## **2.6. Drobilica**

Drobilice stružu, sjeckaju i drobe velike komade sirovine u sitne dijelove koristeći se abrazivima ili kompresijom koja stanjuje materijal. Dva tipa drobilice su bačvasta i horizontalna drobilica. Bačvasta drobilica ima punjenje odozgo te je dizajnirana za drobljenje širokih materijala. Horizontalna drobilica ima transportnu traku i drobljenje je konzistentno i glatko. Drobilice su slične dvoosovinskim rezalicama sa dva reda oštih čeličnih rezača koji se sporo rotiraju kako bi izrezali materijal.[2]

## **2.7. Granulator**

Granulatori pretvaraju materijal u pahuljice ili granule, koje mogu biti prodane kao sirovi materijal za ponovnu proizvodnju. Granulatori imaju električni motor koji okreće rotor koji ima na sebi pričvršćene i zatvorene rezne oštrice u komori. U komori oštrice pričvršćene za rotor režu materijal u ponovno upotrebljive granule. Granulatori dolaze u širokom rasponu veličina i oblika.[2]

---

### **3. MEHANIZMI TROŠENJA PRISUTNI KOD OBRADE INDUSTRIJSKIM REZALICAMA**

#### **3.1. Trošenje**

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama.

Četiri osnovna mehanizma trošenja su [4] :

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija

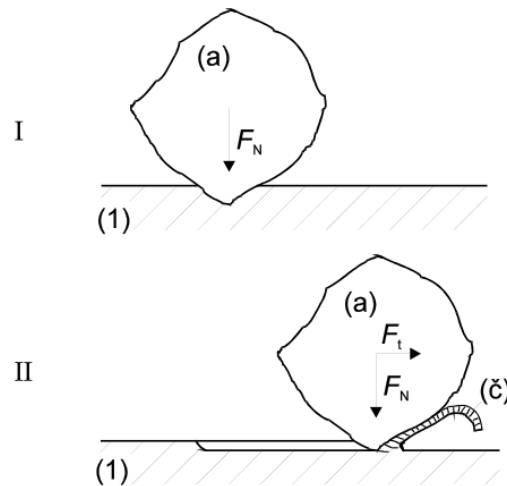
Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina.[4]

Kod obrade industrijskim rezalicama su prisutni mehanizmi trošenja abrazije i umor površine.



### 3.2. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja.[4]



Slika 3. Jedinični događaj abrazije [3]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze:

I faza - prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$ .

II faza - istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_t$ .

---

Mehanizam abrazije moguće je analizirati s nekoliko različitih gledišta [4]:

1) Ovisno o strukturi tribosustava u kome se zbiva abrazija mogu se pojaviti dva oblika abrazije:

a) Abrazija u dodiru dva tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo)

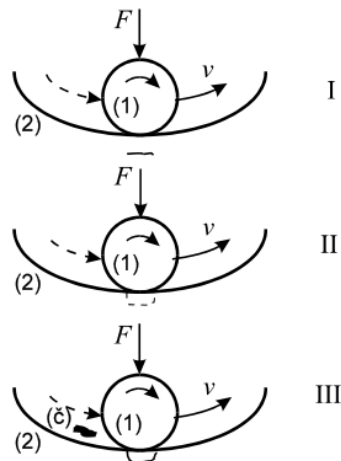
b) Abrazija u dodiru tri tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i protutijelo), te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.

Prema rezultatima više istraživanja odnošenje materijala u dodiru s tri tijela je znatno manje nego u slučaju abrazije dva tijela. Razlog tomu je što čestice abrazije samo oko 10 % vremena provode u odnošenju materijala dok se ostatak vremena kotrljaju u slobodnom međuprostoru.

### 3.3. Umor površine

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja.

Jedinični događaj umora površine prikazan je na slici 3.2 s tri faze.[4]



Slika 4. Jedinični događaj umora površine [3]

Faza I – Stvaranje mikropukotine, redovito ispod površine

Faza II – Napredovanje mikropukotine

Faza III – Ispadanje čestice trošenja, obično oblika pločice ili iverka

U prvoj fazi nastaje podpovršinska pukotina jer je najveće smično naprezanje kod koncentriranog dodira (tzv. Hertz-ovo naprezanje) uvijek ispod same površine. Ovo je tzv. faza inkubacije jer praktički nema nikakvog odvajanja čestica.

U drugoj fazi podpovršinska pukotina izbija na površinu. Od toga trenutka iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice.

U trećoj fazi jediničnog događaja umora površine dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera, što na površini ostavlja oštećenje oblika rupice. Zato se ovaj oblik trošenja uobičajeno naziva pitting (rupičenje).



**Slika 5. Umor površine vidljiv na rubu noža industrijske rezalice**

---

## 4. NOŽEVI INDUSTRIJSKIH REZALICA

Noževi industrijskih rezalica, kao i drobilice, dolaze u raznim veličinama, izvedbama te najbitnije tvrdoćama. Mnoge varijable koje utječu na učinkovitost rezača, kao što su kut rezanja, broj noževa, brzina rezanja, opterećenje.[5]

Podjela noževa industrijskih rezalica je u 3 grupe [5]:

- a) Noževi za rezanje drva
- b) Noževi za rezanje plastike
- c) Noževi za rezanje guma i gumenih proizvoda

### 4.1. Noževi za rezanje drva

Otpadna drva obuhvaćaju karton, papir, kruto drvo i šperploče. Za krhko drvo, kao što su grančice, grančice, karton, C90U (1.1535) čelik je praktična i ekonomična opcija. C90U čelik je vrsta ugljičnog alatnog čelika s dobrom otpornošću na trošenje, ali slabom plastičnošću i tvrdoćom. C90U se često koristi za izradu drvoprerađivačkih noževa i preša. S druge strane, izvedba takvog čelika nije izvanredna, što rezultira jeftinijom cijenom u usporedbi s drugim vrstama čelika za obradu drveta.[5]

Međutim, za otpadno drvo visoke čvrstoće, kao što su stabljike, šperploče i odbačeni namještaj C90U nije kompetentan. Za takva drva se koristi čelik s visokim udjelom mangana. Takav mangan čelik uglavnom se koristi za izradu čekića u rudarstvu i arhitektonskoj industriji. Njegova metalno očvrstnuta mikrostruktura može doseći 10 mm-20 mm i ostvariti tvrdoću HB500-550. Prilikom rada koji uključuje veliki okretni moment mangan čelik neće biti lako deformiran ili čak slomljen kao C90U čelik. Osim toga, visoki mangan čelik je pristupačniji u usporedbi s drugim legiranim ugljičnim čelicima.[5]

## 4.2. Noževi za rezanje plastike

U industriji plastike reciklaža je započela prilično kasno u usporedbi s područjima recikliranja starog drva, papira i kartona. Otpadna plastika može općenito biti velika mješavina s različitim aditivima i punilima. Stoga bitno je prepoznati tip plastike u ulaznoj smjesi.

Za rezanje plastike tipa ABS, PE ili PP ploče koriste se legirani ugljični čelici, kao što je 65Mn4 (1.1240) čelik za opruge, C105W2 (1.1645) ili X153CrMo12 (1.2379), u SAD-u vrlo popularan pod nazivom D2 čelik. Navedeni čelici se primjenjuju jer su visoke tvrdoće te imaju odličnu otpornost na udarce i pritisak. Također, takve oštrice se primjenjuju za niže brzine rezanja i veća opterećenja. U prosjeku takvi čelici imaju tvrdoću HRC52-55.[5]

Za rezanje plastike tipa PVC, PS, ABS ili HIPS koristi se sistem granulatora koji se sastoji od fiksnog rezača i podloške. Primjer čelika koji su pogodni za ovu kategoriju su ugljični čelik X165Cr-MoV12, čelik za opruge 65Mn4 ili brzorezni čelik HS 18-0-1. Ovi čelici moraju biti vrlo dobro otporni na abraziju, visoku temperaturu i udarce. U prosjeku njihova tvrdoća je nešto viša nego za prvu skupinu, ona iznosi HRC58-62.[5]



Slika 6. Primjer noževa za obradu plastike

### 4.3. Noževi za rezanje guma i gumenih proizvoda

U zadnje vrijeme noževi za rezanje guma i gumenih proizvoda su vrlo popularni. Ova kategorija otpada koja je prije nazivana "crnim smećem" danas postaje kategorija "crnog zlata". Trgovci i prerađivači mogu vrlo lako nabaviti stare gume po niskoj cijeni te ih u kratkom vremenu pretvoriti u vrlo kvalitetne gume. Također, reciklirana guma je i ekološki prihvatljiv materijal koji ima širok raspon uporabe.[5]

Za rezanje gumenih proizvoda se koriste noževi izrađeni od ugljičnog čelika koji na sebi imaju pričvršćene vrhove volframovog karbida. Potrebni su takvi noževi zato što je struktura automobilskih guma sačinjena od raznih vrsta metalnih ili očvrnutih vlakana koje imaju puno veću čvrstoću i tvrdoću od obične plastike, stoga je sami proces rezanja uvelike drugačiji.

Volframov karbid ima jako visoku otpornost na abraziju i visoku temperaturu za obradu tvrdih čelika poput bakra i visokougličnog čelika. Na sobnoj temperaturi ima tvrdoću HRC69-81, te može zadržati tvrdoću od HRC60 na temperaturi od 1000°C. U usporedbi s drugim materijalima, volframov karbid je relativno skuplji.[5]

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

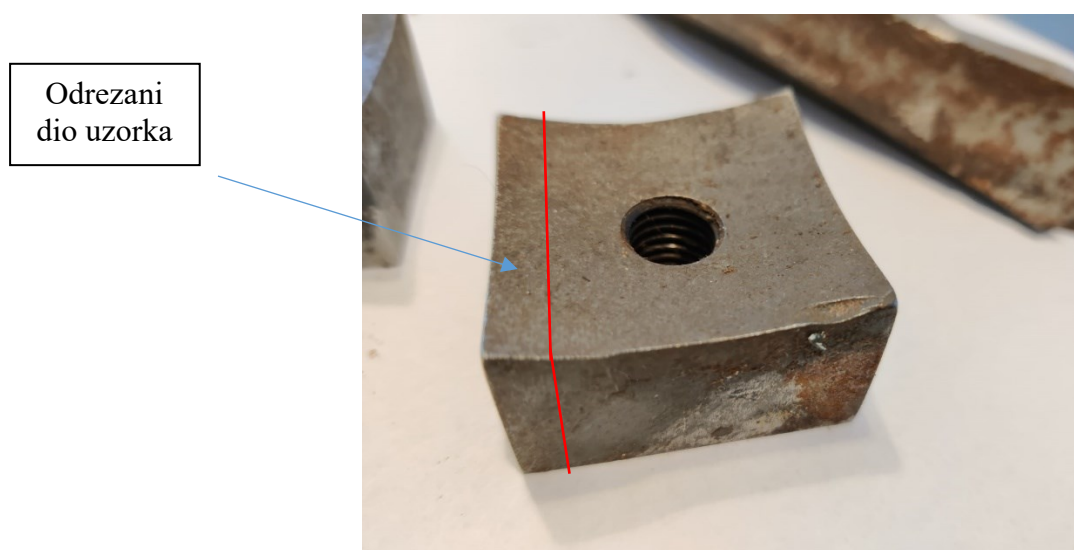
U ovom dijelu završnog rada je izvedeno ispitivanje noža industrijske rezalice za drvo. Koraci ispitivanja su prikazani u Tablici 1.

Tablica 1. Tijek eksperimentalnog dijela rada

	Koraci ispitivanja
1.	Rezanje noža u Laboratoriju za toplinsku obradu FSB-a
2.	Kemijska analiza uzorka
3.	Karakterizacija uzorka
4.	Analiza mikrostrukture uzorka na svjetlosnom mikroskopu
5.	Mjerenje tvrdoće površine uzorka

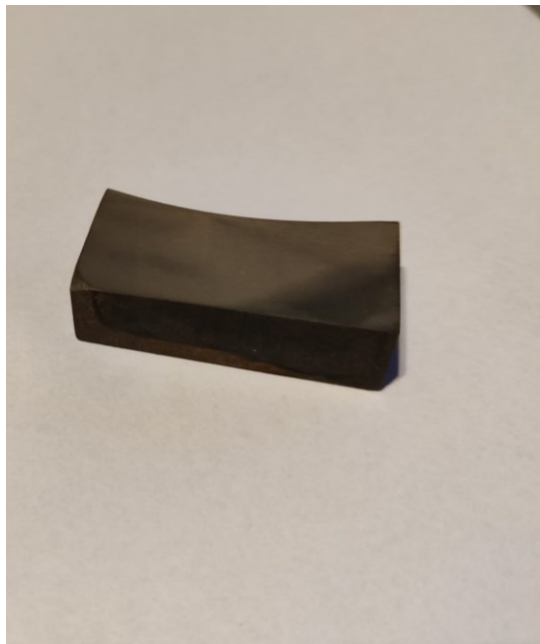
### 5.1. Rezanje noža u Laboratoriju za toplinsku obradu FSB-a

Reprezentativni dio uzorka noža industrijske rezalice za drvo je izrezan u Laboratoriju za toplinsku obradu, Fakulteta strojarstva i brodogradnje



Slika 7. Uzorak noža industrijske rezalice za drvo





**Slika 8. Odrezani uzorak noža drobilice**

## 5.2. Kemijska analiza uzorka

U Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje napravljena je kvantitativna kemijska analiza uzorka. Korištena metoda određivanja uzorka je optička emisijska spektrometrija, dok instrument koji je korišten za metodu je optički emisijski spektrometar GDS 850 A, LECO. Dobiveni rezultati ispitivanja su prikazani u Tablici 2.

Oznaka uzorka	%										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Fe
NU	1,80-1,90	0,46	0,35	0,016	0,018	11,79	0,67	0,16	0,09	0,018	ostatak

**Tablica 2. Prikaz rezultata kemijske analize uzorka**

Nakon dobivenih rezultata kemijske analize trebalo je pronaći o kojem se materijalu radi.

Korištenjem literature [6] te Interneta ustanovljeno je da se radi o visoko legiranom alatnom čeliku DIN EN ISO 4957, klase 1.2379/X153CrMo12, u SAD-u poznatiji kao D2 čelik.

X153CrMo12 alatni čelik je visoko ugljični, visoko kromirani alatni čelik sa iznimno visokim svojstvima otpornosti na trošenje, toplinski obradljiv do HRC60-62.[7]

Ovaj čelik je jako otporan na trošenje. Općenito toplinska obrada X153CrMo12 alatnog čelika se sastoji od postupka austenitizacije na temperaturu između 1000-1050°C te zatim slijedi gašenje i najmanje 2 popuštanja.[8]

Mikrostruktura X153CrMo12 alatnog čelika se sastoji od matrice popušenog martenzita sa uključcima kromovih karbida.[9]

### 5.3. Karakterizacija uzorka

Nakon provedene kemijske analize, uzorak je bilo potrebno pripremiti za budući tijek ispitivanja.

Karakterizacija materijala je postupak pripreme uzorka koji se sastoji od slijedećih 5 dijelova [10]:

1. Izrezivanje uzorka
2. Ulijevanje uzorka u polimernu masu
3. Brušenje
4. Poliranje
5. Nagrizanje

S obzirom da je uzorak bio već izrezan na početku eksperimentalnog dijela, prvi korak je bilo ulijevanje uzorka u polimernu masu. Ulijevanje u polimernu masu je bitno za uzorke koji su nepravilnog oblika ili su neravni kako bi se stvorio uzorak pravilnih i ravnih ploha što je bitno za daljnja ispitivanja tvrdoće te analize na mikroskopu.

Nakon ulijevanja uzorka u polimernu masu, napravljeno je brušenje uzorka. Brušenje je bitno zbog uklanjanja sloja prljavštine, sloja adsorbiranih plinova i sloja oksida koji mogu utjecati na izgled mikrostrukture prilikom ispitivanja na mikroskopu. Postupak brušenja je odrađen na uređaju PRESI Minitch 233. Tijek brušenja je da se na početku koristi brusni papir s najvećim abrazivima (granulacija 120) te se postepeno mijenjaju brusni papiri dok se ne dođe do najmanjih abraziva (granulacija 4000) koji se koriste za fino brušenje.

Nakon postupka brušenja odrađeno je poliranje uzorka. Poliranje uzorka je napravljeno na uređaju Struers DAP-V. Za poliranje uzorka je potrebna tkanina, abraziv koji je najčešće dijamanta pasta promjera čestice 3  $\mu\text{m}$  i lubrikant za podmazivanje. Na kraju poliranja dobivena površina je zrcalna, bez brazdi i oštećenja.

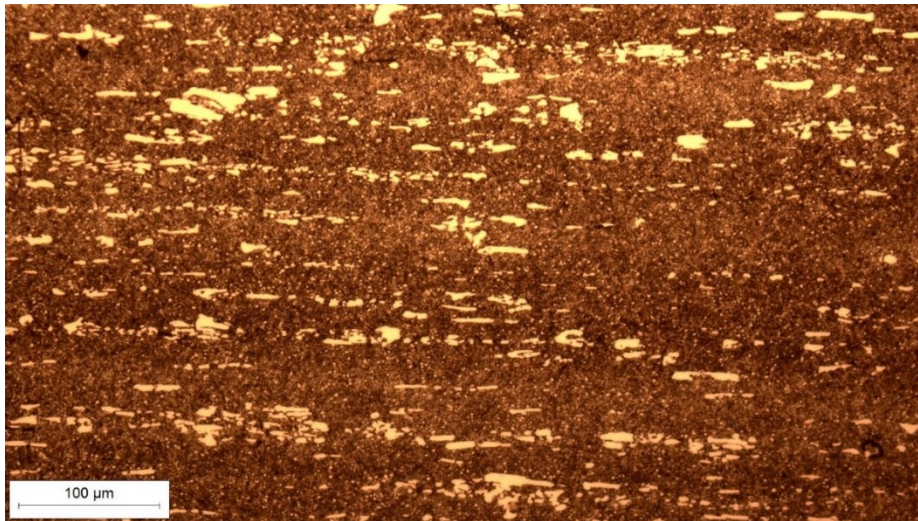
U konačnici je napravljen postupak nagrizanja uzorka. Nagrizanje uzorka je selektivno korodiranje površine materijala s ciljem uklanjanja deformiranog sloja te dobivanje reljefne površine (npr. granice zrna, faze, precipitati).[10] Za metalne uzorke se primjenjuje kemijsko nagrizanje gdje se uzorak prvo uroni u sredstvo za nagrizanje, zatim se prekida reakcija vodom te se u konačnici vrši ispiranje alkohola.

#### 5.4. Analiza mikrostrukture uzorka na svjetlosnom mikroskopu

Uređaj koji je korišten za pregled mikrostrukture je svjetlosni mikroskop Olympus GX51.

Uzorak noža je analiziran pod povećanjima od 200x, 500x i 1000x.

Mikrostruktura uzorka je prikazana na sljedećim slikama:

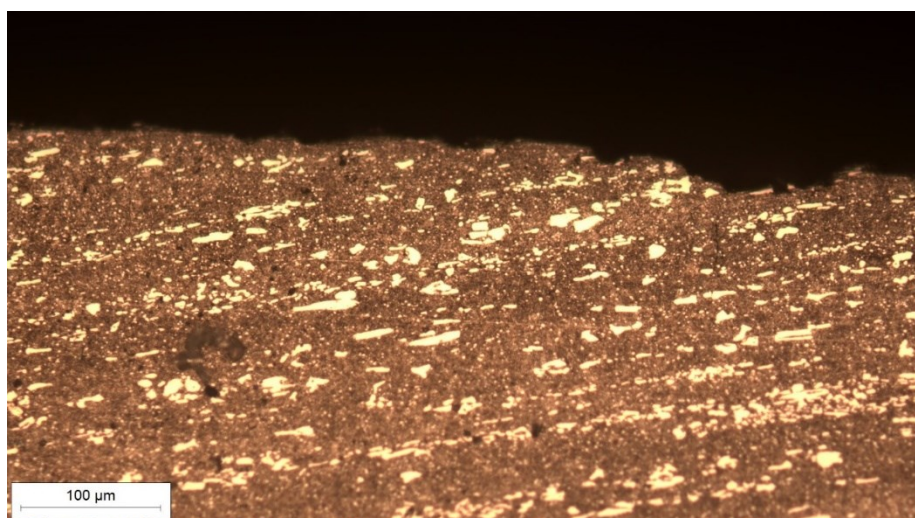


**Slika 9. Mikrostruktura jezgre uzorka noža, povećanje 200x**

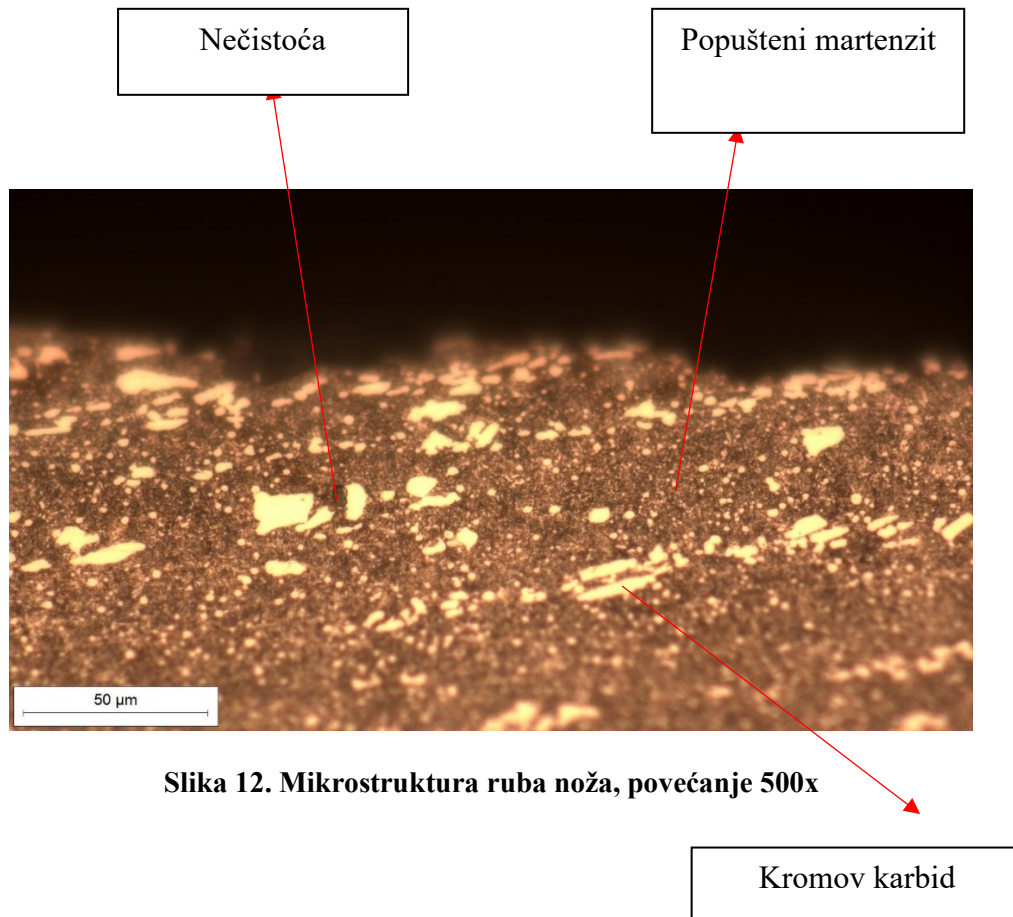


**Slika 10. Mikrostruktura jezgre uzorka noža, povećanje 1000x**

Mikrostruktura noža rezalice prikazanog na slici 10. sastoji se od kromovih karbida (bijełe čestice) koji se nalaze u matrici popuštenog martenzita.



**Slika 11. Mikrostruktura ruba noža, povećanje 200x**



Slika 12. Mikrostruktura ruba noža, povećanje 500x

Mikrostruktura noža rezalice prikazanog na slici 12. također se sastoji od kromovih karbida (bijele čestice) koji se nalaze u matrici popušenog martenzita. Također su vidljive nečistoće koje su na nekim mjestima izražene zbog nagrivanja materijala.

### 5.5. Mjerenje tvrdoće površine uzorka

Završni korak eksperimentalnog dijela je bilo utvrđivanje tvrdoće površine uzorka noža. Tvrdoću je bilo bitno izmjeriti kako bi se ustanovilo da li taj nož sadrži svojstva koja su propisana od strane proizvođača. Konkretno, za X153CrMo12 alatni čelik propisana tvrdoća površine je 748HV1. [6]

Ispitivanje tvrdoće po Vickersu (HV1) je provedeno u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Za mjerenje tvrdoće je korišten uređaj Indentec ZHV  $\mu$ -ST. Ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN ISO 6507-1.

Vrijednosti tvrdoće površine uzorka su prikazane u Tablici 3.

**Tablica 3. Tvrdoća površine uzorka**

Broj mjerenja	Tvrdoća, HV1
1	668
2	677
3	694
4	683
5	677
<b>Prosječna tvrdoća</b>	<b>680</b>

Nakon provedenog ispitivanja ustanovljeno je da je prosječna tvrdoća površine uzorka 680HV1, što je prihvatljiva vrijednost za materijal te ulazi u interval dopuštene tvrdoće.

---

## **6. ZAKLJUČAK**

- Prema ispitivanjima provedenom na uzorku noža industrijske rezalice za drvo dobivena su ova saznanja:
- Kemijskom analizom ustanovljeno je da se radi o visoko legiranom alatnom čeliku DIN EN ISO 4957, klase 1.2379/X153CrMo12, u SAD-u poznatiji kao D2 čelik.
- X153CrMo12 alatni čelik je visoko ugljični, visoko kromirani alatni čelik sa iznimno visokim svojstvima otpornosti na trošenje. Njegova odlična svojstva ga čine jednim od najkorištenijih i najpopularnijih izbora legure za izvedbu noža rezalice.
- Mikrostruktura X153CrMo12 alatnog čelika za hladni rad se sastoji od popuštenog martenzita sa uključcima kromovih karbida.
- Prosječna tvrdoća površine uzorka iznosi 680HV1, što je prihvatljiva vrijednost tvrdoće za taj materijal.



---

**LITERATURA**

- [1] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Industrijska\\_rezalica](https://hr.wikipedia.org/wiki/Industrijska_rezalica), 28.11.2021.
- [2] <https://www.iqsdirectory.com/articles/shredder/industrial-shredder.html>, 28.11.2021
- [3] [https://www.zkg.de/en/artikel/zkg\\_VEZ\\_3200\\_Single-shaft\\_pre-shredder\\_with\\_high\\_throughput\\_capacity\\_3239342.html](https://www.zkg.de/en/artikel/zkg_VEZ_3200_Single-shaft_pre-shredder_with_high_throughput_capacity_3239342.html), 29.11.2021.
- [4] Grilec, Krešimir; Ivušić, Vinko; Tribologija, autorizirana predavanja; Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 2011.
- [5] <https://www.meetyoucarbide.com/how-to-choose-the-suitable-material-for-cutting-knife-blade-of-industrial-shredders/>, 06.12.2021.
- [6] <https://www.meusburger.com/EN/GB/material-grades/12379-steel-for-through-hardening>, 06.12.2021.
- [7] <http://www.astmsteel.com/product/d2-tool-steel-1-2379-x153crmo12-skd11/>, 12.12.2021.
- [8] <https://industeel.arcelormittal.com/fichier/ds-tool-d2/>, 12.12.2021.
- [9] 1972 ASM American Society for Metals Handbook 8th Edition Vol 7 Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, 12.12.2021.
- [10] Bilješke s predavanja predmeta "Karakterizacija materijala", FSB, 2018.

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc