

# Usporedba postupka rezanja primjenom CO2 lasera i fiber lasera

---

**Sajko, Antonio**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*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:235:164220>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-20**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Antonio Sajko**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Miho Klaić, mag. ing.

Student:

Antonio Sajko

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svome mentoru doc. dr. sc. Mihi Klaiću na ukazanoj pomoći, utrošenom vremenu i udijeljenim savjetima prilikom izrade diplomskog rada. Veliko hvala i kolegi Luki Drobilu na korisnim savjetima i pomoći prilikom ispitivanja uzoraka.

Također se zahvaljujem tvrtci Dundo-promet d.o.o. iz Jazvina, naročito direktoru Mladenu Dunaju, kolegama Jurici Semeniću i Borisu Licitaru te ostalim zaposlenicima na ustupanju strojeva, materijala i ostalih resursa te na pruženoj pomoći i savjetima prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Posebnu zahvalu upućujem svojoj obitelji, prijateljima i kolegama na podršci i razumijevanju kroz sve godine mojeg školovanja, a naročito tijekom akademskog obrazovanja.

Antonio Sajko



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Antonio Sajko** JMBAG: 0035219126

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba postupka rezanja primjenom CO<sub>2</sub> lasera i fiber lasera**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparing the cutting process using CO<sub>2</sub> lasers and fiber lasers**

Opis zadatka:

Postupak rezanja laserom je vrlo čest i ekonomičan postupak koji se koristi za rezanje različitih vrsta materijala, uključujući metalne i nemetalne materijale. Pri tome kvaliteta obratka ovog procesa ovisi o mnogim utjecajnim faktorima od kojih se posebno ističu parametri obrade te vrsta materijala koji se obrađuje. Jedan od do sada najkorištenijih postupaka svakako je rezanje CO<sub>2</sub> laserom kojeg u posljednje vrijeme istiskuje fiber laser. Imajući to u vidu u radu je potrebno:

1. Dati literaturni pregled industrijskih lasera koji se danas koriste u proizvodnji.
2. Navesti parametre obrade koji utječu na kvalitetu obrade.
3. Na dostupnim strojevima napraviti usporedna testiranja s unaprijed dogovorenim parametrima obrade te na dobivenim uzorcima usporediti hrapavost površine.
4. Prema dobivenim rezultatima dati zaključke rada.

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

Zadatak zadan:

28. rujna 2023.

Datum predaje rada:

30. studenoga 2023.

Predviđeni datumi obrane:

4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Miho Klaić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ljiljana Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Povijest lasera .....	1
1.2. Primjena lasera .....	1
2. LASERSKO REZANJE .....	3
2.1. Lasersko rezanje taljenjem.....	4
2.2. Lasersko rezanje izgaranjem .....	5
2.3. Lasersko rezanje isparavanjem .....	6
3. PODJELA STROJEVA ZA LASERSKO REZANJE.....	8
3.1. Laseri s plinovitim medijem .....	9
3.1.1. CO <sub>2</sub> laser .....	9
3.2. Laseri s krutim medijem .....	10
3.2.1. Nd:YAG laser .....	10
3.2.2. Disk laser .....	11
3.2.3. Fiber laser.....	13
4. PARAMETRI OBRADE.....	15
4.1. Snaga lasera.....	15
4.2. Posmična brzina .....	15
4.3. Režim rada .....	16
4.4. Žarišna duljina.....	16
4.5. Položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada .....	17
4.6. Plinovi za rezanje .....	18
4.7. Izbor i veličina sapnice .....	19
4.8. Udaljenost sapnice od radnog komada.....	19
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	20
5.1. Trumpf Trulaser 3030 CO <sub>2</sub> .....	20
5.2. Trumpf Trulaser 3040 Fiber .....	23
5.3. Materijal uzoraka .....	25
5.4. Izrada programa za lasersko rezanje .....	25
5.5. Rezanje uzoraka .....	29
5.6. Ispitivanje uzoraka .....	33
5.7. Analiza rezultata .....	34
5.8. Zaključak.....	39

---

6. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	43

## POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer laserskog čišćenja kamena [2].....	2
Slika 2. Prikaz laserskog rezanja [3] .....	4
Slika 3. Lasersko rezanje taljenjem [1] .....	5
Slika 4. Lasersko rezanje izgaranjem [1] .....	6
Slika 5. Lasersko rezanje isparavanjem [1].....	7
Slika 6. Stroj za lasersko rezanje [4] .....	9
Slika 7. Prikaz CO <sub>2</sub> lasera [3].....	10
Slika 8. Prikaz Nd:YAG lasera [6].....	11
Slika 9. Prikaz disk lasera [3].....	12
Slika 10. Prinip rada fiber lasera [8] .....	13
Slika 11. Usporedba leća žarišnih duljina $f$ od 2,5 i 5 inča [9].....	17
Slika 12. Položaj žarišta [9].....	18
Slika 13. Primjer sapnice [10].....	19
Slika 14. Uzorak podijeljen na 4 segmenta .....	20
Slika 15. Trumpf TruLaser 3030 CO <sub>2</sub> [11] .....	21
Slika 16. Translacijske osi stroja [12] .....	22
Slika 17. Putanja laserske zrake [12] .....	23
Slika 18. Trumpf TruLaser 3040 Fiber [14].....	24
Slika 19. Optički kabel fiber lasera [13] .....	25
Slika 20. Prikaz uzoraka u geo formatu .....	26
Slika 21. Prikaz unosa dimenzija priprema lima.....	27
Slika 22. Radni komad smješten na pripremu lima.....	27
Slika 23. Odabir tehnologije reza .....	28
Slika 24. Redoslijed rezanja označen brojevima crvene boje .....	28
Slika 25. Slanje programa na laser u obliku LST datoteke .....	29
Slika 26. Zaslon CO <sub>2</sub> lasera s parametrima obrade .....	29
Slika 27. Položaj priprema lima s izrezanim uzorkom na radnom stolu lasera .....	30
Slika 28. Izrezani uzorci.....	31
Slika 29. Postav ispitivanja .....	33
Slika 30. Prikaz profila površine .....	34
Slika 31. Graf ovisnosti $Ra$ o posmičnoj brzini .....	36
Slika 32. Graf ovisnosti $Ra$ o posmičnoj brzini .....	37
Slika 33. Graf ovisnosti $Ra$ o posmičnoj brzini .....	38
Slika 34. Graf ovisnosti $Ra$ o posmičnoj brzini .....	39
Slika 35. Izgled gravure .....	40
Slika 36. Tragovi proboja na gornjoj površini materijala debljine 8 mm (lijevo – fiber laser, desno – CO <sub>2</sub> laser).....	40



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehnički podaci stroja [12] .....	21
Tablica 2. Tehnički podaci stroja [13] .....	23
Tablica 3. Kemijski sastav AlMg3 [15] .....	25
Tablica 4. Fizikalna svojstva AlMg3 [15].....	25
Tablica 5. Parametri za uzorke debljine 8 mm.....	31
Tablica 6. Parametri za uzorke debljine 6 mm.....	32
Tablica 7. Parametri za uzorke debljine 4 mm.....	32
Tablica 8. Parametri za uzorke debljine 2 mm.....	33
Tablica 9. Uzorci debljine 8 mm.....	35
Tablica 10. Uzorci debljine 6 mm.....	36
Tablica 11. Uzorci debljine 4 mm.....	37
Tablica 12. Uzorci debljine 2 mm.....	38

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
CO <sub>2</sub>	Ugljikov dioksid
AlMg3	Aluminijeva legura s oko 3 % magnezija kao legirnog elementa
3D	Trodimenzionalno
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
CNC	Computer Numerical Control
Nd	Neodimij
YAG	Yttrium Aluminium Garnet

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\lambda$	Mm	Valna duljina emitirane svjetlosti
$f$	inč	Žarišna duljina leće
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	Gustoća
E	MPa	Youngov modul elastičnosti
G	MPa	Modul smicanja
$\nu$	-	Poissonov faktor
$R_{p0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	Granica razvlačenja
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća
HBW	-	Tvrdoća po Brinellu ispitivana kuglicom od tvrdog metala
$\lambda$	W/mK	Toplinska vodljivost
Ra	μm	Srednje aritmetičko odstupanje mjenog profila
Rq	μm	Srednje kvadratno odstupanje mjenog profila
Rz	μm	Maksimalna visina profila

## **SAŽETAK**

Temeljna ideja ovog rada je pokazati razliku u kvaliteti reza između CO<sub>2</sub> i fiber lasera. U radu je opisan proces laserskog rezanja, prikazana je podjela strojeva za lasersko rezanje koji se koriste u proizvodnji te su navedeni parametri koji utječu na kvalitetu obrade. Eksperimentalni dio rada proveden je u tvrtci Dundo-promet d.o.o. iz Jazvina u kojoj su izrezani uzorci legure aluminija AlMg3 različitih debljina. U radu je predstavljen postupak programiranja, rezanja uzoraka te mjerenja površinske hrapavosti uređajem Alicona. Mjerenjem površinske hrapavosti reza nastoji se utvrditi koji laser je pogodniji za rezanje spomenutog materijala te kako male promjene posmične brzine utječu na kvalitetu reza.

Ključne riječi: lasersko rezanje, CO<sub>2</sub> laser, fiber laser, kvaliteta reza, posmična brzina

## **SUMMARY**

The fundamental idea of this paper is to demonstrate the difference in cutting quality between CO<sub>2</sub> and fiber lasers. The paper describes the process of laser cutting, presents the classification of laser cutting machines used in manufacturing, and outlines the parameters that influence the quality of processing. The experimental part of the study was conducted at Dundo-promet d.o.o. in Jazvine, where samples of the aluminium alloy AlMg3 with different thicknesses were cut. The paper introduces the programming process, cutting of samples and the measurement of surface roughness using an Alicona device. By measuring the surface roughness of the cuts, an attempt is made to determine which laser is more suitable for cutting the mentioned material and how small changes in the feed rate affect the quality of the cut.

Key words: laser cutting, CO<sub>2</sub> laser, fiber laser, cutting quality, feed rate

## 1. UVOD

Lasersko rezanje je postupak obrade materijala u kojem se koristi laserski snop visoke energije za izrezivanje, bušenje ili označavanje različitih vrsta materijala. Ovaj postupak ima široku primjenu u industriji, prvenstveno zbog svoje brzine i preciznosti. LASER je akronim od engleskih riječi „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, što u prijevodu znači pojačanje svjetlosti pomoću stimulirane emisije zračenja. Laser je uređaj koji generira svjetlost s posebnim svojstvima. Generirana svjetlost je monokromatska (ima jednu valnu duljinu), koherentna (valovi su iste faze) i usmjerena (ima malu divergenciju). Osnovna razlika između laserske i prirodne svjetlosti je ta da se prva može fokusirati u točku promjera manjeg od 1 mm, pri čemu se postiže velika gustoća energije. [1]

### 1.1. Povijest lasera

Gledajući u povijest još je Nikola Tesla 1893. godine konstruirao uređaj koji se sastojao od rubina na koji je usmjeravao električnu energiju koja se reflektirala od električne plohe natrag u rubin i na taj način je dobio svjetlosnu zraku tanku poput olovke, odnosno dobio je preteču laserskog snopa svjetlosti. Kasnije su mnogi znanstvenici radili na tom području, pa i sam Albert Einstein, no prvi laser je konstruirao Theodore Harold Maiman 1960., a kao aktivnu tvar koristio je kristal rubina. Laser se u industrijsku upotrebu uvodi nakon 1980. godine prvenstveno za rezanje lima, a do danas se njegova primjena proširila na mnoge materijale pa i nemetale te je postao sastavni dio u tehnologijama obrade materijala. [2]

### 1.2. Primjena lasera

Osim primjene u industriji, laseri se danas koriste u gotovo svim ljudskim djelatnostima. Vrlo značajnu ulogu su pronašli u vojnoj industriji kao daljinomjeri, označivači cilja te za stvaranje zaprečnih polja. Razvijaju se i sustavi za protuzračnu obranu koji bi se sastojali od satelita opremljenih laserima vrlo velike snage. Modulirano lasersko zračenje za prijenos podataka se koristi u telekomunikacijama. U astronautici se laseri koriste za pogon svemirskih letjelica i zrakoplova. [2]

Pojam suvremene medicine ne može se zamisliti bez upotrebe lasera. Zbog visoke preciznosti koriste se u kirurgiji te za liječenje kratkovidnosti i dalekovidnosti. U estetske svrhe, laserima se izbjeljuju zubi, uklanjaju tetovaže te neželjeni ožiljci na koži. U stomatologiji se osim za

uklanjanje zubnih naslaga, koriste i za preoblikovanje desni te za uklanjanje bakterija prilikom čišćenja zubnih kanala. [2]

Zbog monokromatskog svojstva laserske svjetlosti, laseri su iskorišteni za definiciju metra. Pomoću određenih metoda laseru se odredi valna duljina i frekvencija njegovog zračenja, a njihov umnožak daje brzinu svjetlosti. Pošto je brzina svjetlosti dogovorena vrijednosti, preko nje i definicije sekunde se dolazi do definicije metra. [2]

Lasери se još koriste i za precizna mjerenja udaljenosti, u građevinarstvu za poravnavanje terena, za čišćenje slika, skulptura i umjetnina. Primjenjuju se kod protuprovalnih alarmnih uređaja, u optičkim čitačima zvučnih zapisa, u pisačima i kopirnim uređajima te u dječjim igračkama. [2]



**Slika 1. Primjer laserskog čišćenja kamena [2]**

## 2. LASERSKO REZANJE

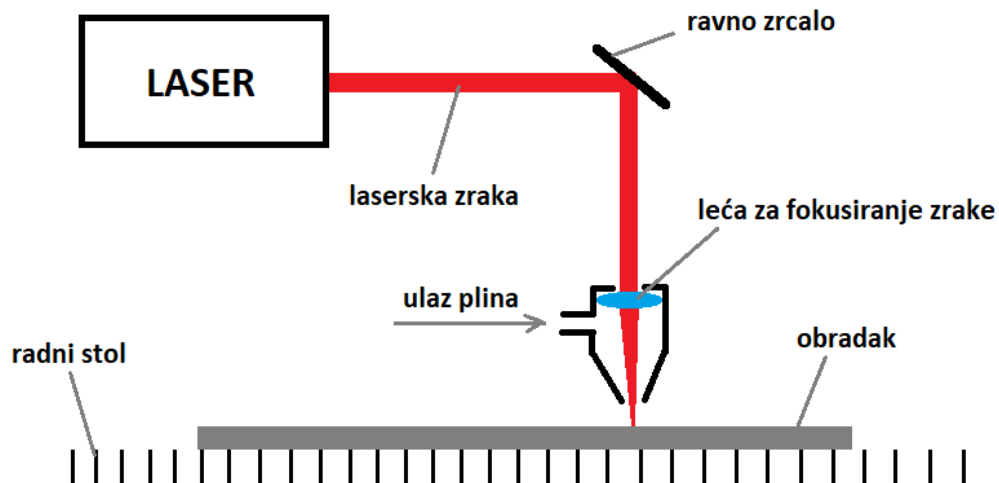
Najraširenija primjena industrijskih lasera je rezanje materijala. Zbog velikog broja prednosti u odnosu na ostale postupke rezanja, primjenjuje se u gotovo svim granama industrije, od mikroelektrike do brodogradnje. Najveće prednosti laserskog rezanja su:

- Visoka gustoća snage, odnosno mali unos topline
- Uska zona utjecaja topline
- Male deformacije radnog komada
- Velike brzine rezanja
- Visoka kvaliteta reza
- Visoka fleksibilnost
- Visoka preciznost
- Velika mogućnost automatizacije.

Upravo se velikom brzinom rezanja i nepotrebnom naknadnom obradom obratka zbog visoke kvalitete reza mogu nadoknaditi glavni nedostaci tehnologije rezanja laserom, a to su ponajprije visoki investicijski troškovi i nizak stupanj iskoristivosti energije. [1]

Lasersko rezanje je nekonvencionalan postupak obrade materijala bez rezne oštrice pri kojem alat (laserska zraka) nije tvrđi od obratka, a između alata i obratka nema mehaničkih sila. Na produktivnost postupka rezanja laserom ne utječu mehanička svojstva materijala kao što su tvrdoća, čvrstoća i žilavost, već na nju značajan utjecaj imaju fizikalna svojstva poput električne i toplinske vodljivosti. Lasersko rezanje može zamijeniti postupke obrade poput bušenja i probijanja. Primjena lasera u rezanju čeličnih i aluminijskih limova uvelike štedi energiju i postiže veću preciznost u uspoređi s postupkom rezanja plazmom. Mogu se izrađivati provrti jako malih dimenzija te postići visoka kvaliteta površine reza. Velika prednost lasera u odnosu na mehaničke tipove obrade su manje strukturne i kemijske promjene na obratku. Unatoč brojnim dobrim stranama, lasersko rezanje se ne može primjenjivati kod ploča većih debljina. Sama obrada laserom temelji se na primjeni koncentrirane energije fotona koja se fokusira na malu površinu materijala, uzrokujući lokalno zagrijavanje i topljenje i/ili isparavanje materijala. Uz fokusiranu lasersku zraku koristi se i plin koji otpuhuje rastaljeni materijal iz zone taljenja. Ovisno je li taj plin inerten ili aktivan, lasersko rezanje se dijeli na rezanje taljenjem, izgaranjem ili isparavanjem.[3]

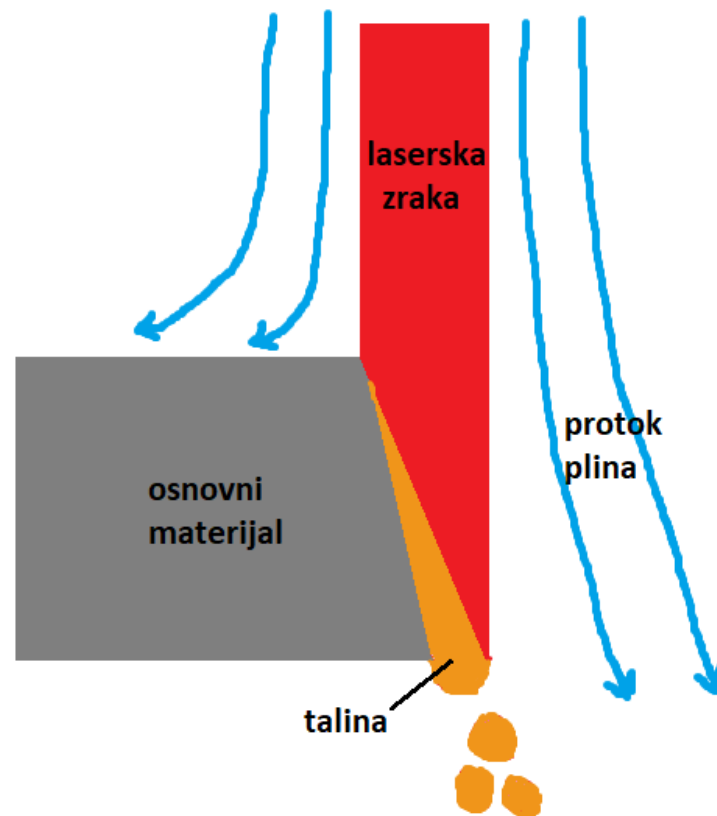




Slika 2. Prikaz laserskog rezanja [3]

## 2.1. Lasersko rezanje taljenjem

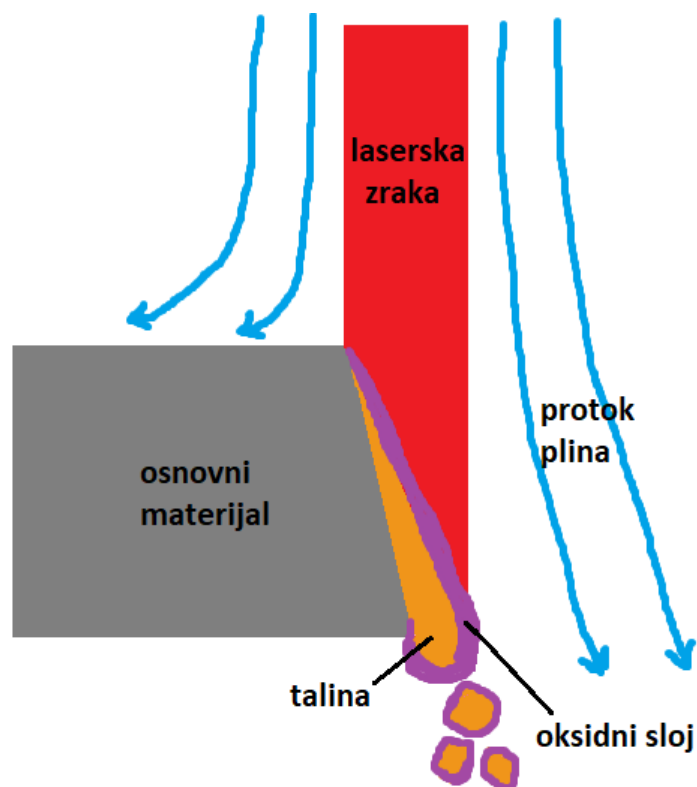
Proces laserskog rezanja taljenjem temelji se na taljenju materijala obratka pomoću laserske zrake, a zatim se mlazom inertnog plina taj rastaljeni materijal otpuhuje iz zone taljenja. Kao inertni plin koristi se dušik ili argon, a osim navedene primarne funkcije također služi kao zaštitna atmosfera te štiti lasersku sapnicu od prskanja rastaljenog materijala. Tlak plina najčešće se kreće oko 3 bara, a može ići i do 30 bara kada se radi o rezanju pod visokim tlakom koje daje visoku kvalitetu površine reza. Lasersko rezanje taljenjem zahtijeva manje energije nego rezanje isparavanjem. Primjenjivo je kod svih metala, ponajprije kod nehrđajućih i visokolegirajućih čelika, aluminijevih i titan legura, ali i kod nemetala koji se tale. Pozitivne strane ove obrade su visoka kvaliteta površine reza, uz koju otpornost te površine na koroziju ostaje nepromijenjena u donosu na osnovni materijal. S druge strane, mane su relativno male posmične brzine u odnosu na postupak rezanja s aktivnim plinom te pojava srha na rubovima reza koji se može spriječiti ako se inertni plin dovodi pod tlakom većim od 10 bara. [1, 3]



Slika 3. Lasersko rezanje taljenjem [1]

## 2.2. Lasersko rezanje izgaranjem

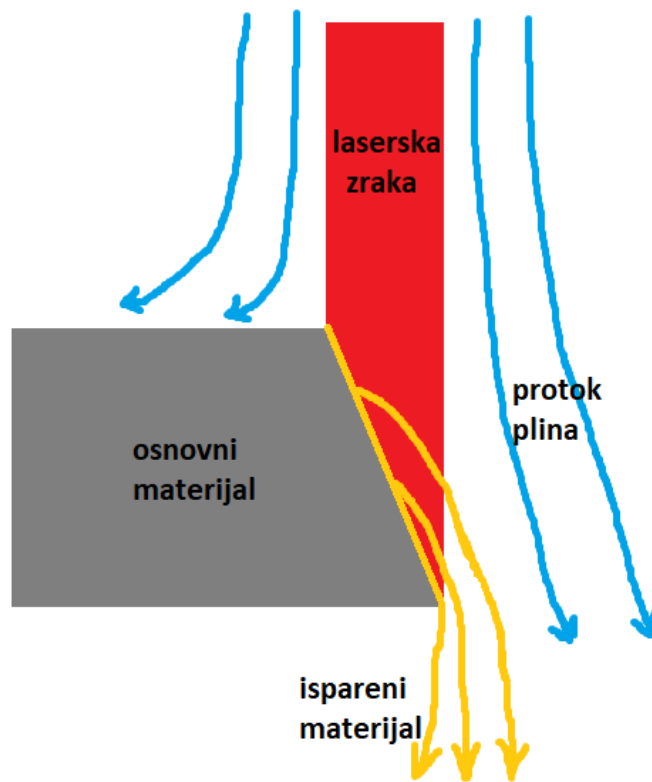
Kod laserskog rezanja izgaranjem kao dodatni izvor topline koristi se egzotermna reakcija plina za rezanje i radnog komada. Njome se dodaje energija procesu rezanja pa se mogu postići dvostruko veće brzine rezanja u odnosu na rezanje taljenjem. Laserska zraka uspostavlja i stabilizira izgaranje u rezu, dok pomoćni plin otpuhuje rastaljeni materijal iz zone rezanja te štiti optiku lasera. Pomoćni aktivni plin za rezanje je kisik ili mješavina bogata kisikom. Površina reza je oksidirana, ali taj sloj oksida se lako uklanja kod konstrukcijskih čelika. Kod nehrđajućih čelika dolazi do problema zaostajanja troske na donjem rubu reza koja se teže uklanja, a razlog te viskozne troske je nikal koji teško oksidira. Osim kod čelika, ovaj način rezanja s kisikom se pokazao vrlo dobar kod titana i njegovih legura, ali je površina reza osjetljiva na pukotine. [1]



Slika 4. Lasersko rezanje izgaranjem [1]

### 2.3. Lasersko rezanje isparavanjem

Do procesa rezanja isparavanjem dolazi kada laserski snop zagrije i ispari materijal u zoni reza koji se onda uz pomoć plina za rezanje izbacuje iz te zone da bi se izbjegla kondenzacija materijala u već formiranom rezu. Lasersko rezanje isparavanjem koristi se kod materijala koji se ne tale, poput drva, akrila, papira, kože i nekih polimera. Plin za rezanje je najčešće zrak ili dušik, a za posebne primjene i argon. Od sva tri spomenuta načina, ovaj način rezanja je najsporija metoda kad se radi o rezanju metala, ali je prikladna za obradu složenih pozicija s uskim tolerancijskim područjem. [1, 3]



Slika 5. Lasersko rezanje isparavanjem [1]

### 3. PODJELA STROJEVA ZA LASERSKO REZANJE

Osnovni dijelovi laserskog stroja su:

- Izvor laserske svjetlosti s odgovarajućim regulacijskim sustavom
- Laserska glava – laserske zrake od izvora putuju kroz optički sustav za vođenje do laserske glave koja te zrake fokusira u malu točku. U lasersku glavu se uvodi ranije spomenuti pomoćni plin za rezanje koji struji ispod leće prema otvoru sapnice te štiti leće od dima i prskanja taline.
- Posmični prigroni X, Y i Z osi za kretanje laserske glave – omogućavaju gibanje generirane laserske točke na obratku po zadanoj putanji.
- Sustav za hlađenje – koji održava konstantnu temperaturu stroja i stabilnu lasersku zraku. Prilikom dugotrajnog rada stroja dolazi do njegovog zagrijavanja što utječe na njegovu ispravnost rada, dugotrajnost i točnost pozicioniranja.
- Obradni stol – pri obradi laserom obradni stolovi su u obliku rešetki ili ravne ploče s puno praznina i šupljina kako bi se omogućio dobar protok zraka ispod obratka i, samim time, bolja kvaliteta reza uz smanjenje mogućnosti nastanka naslaga na donjoj strani obratka. Postoje izvedbe strojeva s pomičnim stolovima koji omogućavaju dodatna kretanja, ali većinom su nepomični.
- CNC upravljački sustav – služi za upravljanje CNC strojem. Njime se upravlja brojnim parametrima procesa kao što su posmična brzina i putanja alata, izlazna snaga laserskog snopa te hlađenje sustava. [3]

Strojevi za lasersko rezanje, skraćeno laseri, razlikuju se prema vrsti aktivnog materijala koji služi za pojačavanje svjetlosti, a najčešće se dijele na lasere s plinovitim i lasere s krutim medijem. Značajka svakog lasera je valna duljina emitirane svjetlosti  $\lambda$ . Ona je funkcija razlike energetskih stanja atoma odnosno molekula aktivnog medija. [1]



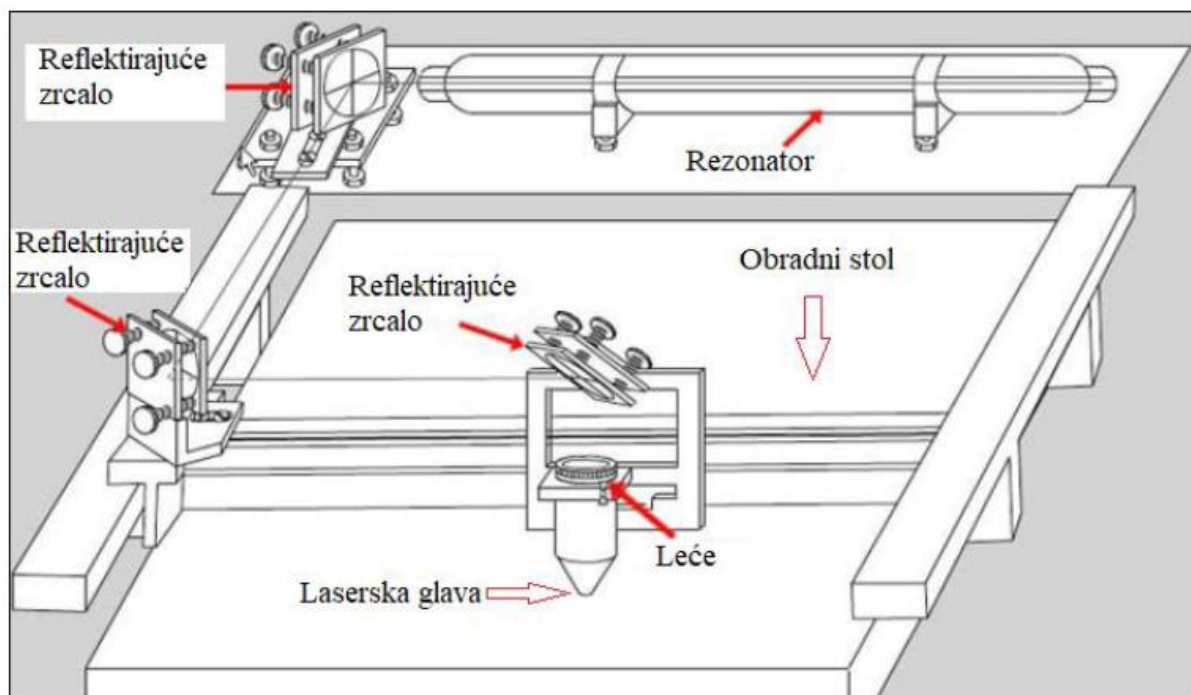
Slika 6. Stroj za lasersko rezanje [4]

### 3.1. Laseri s plinovitim medijem

#### 3.1.1. CO<sub>2</sub> laser

CO<sub>2</sub> laser je plinski laser koji kao aktivni medij koristi ugljikov dioksid. Glavni dio ove vrste lasera je rezonator. To je staklena cijev ispunjena plinskom smjesom koja se općenito sastoji od ugljikovog dioksida, dušika, vodika, helija i ostalih aditiva. Na krajevima te cijevi nalaze se dva para zrcala od kojih je jedno potpuno reflektirajuće, a drugo omogućuje djelomični prolaz svjetlosti. Molekule dušika u cijevi se izlažu visokom naponu te postaju uzbuđene, odnosno prelaze u više energetske stanje. One zatim uzbuđuju molekule ugljikovog dioksida na način da im sudarom elektrona predaju energiju. Naknadnim prijelazom molekula CO<sub>2</sub> iz višeg u niže energetske stanje dolazi do emisije fotona što rezultira stvaranjem laserske zrake. Sudarajući se s atomima helija nakon emisije fotona, molekule CO<sub>2</sub> se vraćaju u svoje početno energetske stanje i spremne su za ponovni ciklus. Da bi se spomenuti proces mogao odvijati potreban je tlak od 0,1 do 0,25 bara. Višak energije koji se ne može iskoristiti za stvaranje laserske zrake pretvara se u toplinu koja se odvodi iz sustava. Prolaskom kroz rezonator, svjetlost se reflektira od zrcala i vraća u aktivni medij što dovodi do interferencije valova, odnosno algebarskog zbrajanja dva ili više valova. Ovaj se postupak ponavlja sve dok intenzitet svjetlosti ne bude dovoljno visok da prođe kroz djelomično reflektirajuće zrcalo. Proizvedena laserska zraka se nalazi u infracrvenom području svjetlosnog spektra i nije vidljiva ljudskom oku. Učinkovitost CO<sub>2</sub> lasera je vrlo visoka, čak i do 20 %, što znači da se 20 % uložene energije emitira u obliku laserske zrake, što je puno više od ostalih lasera.

Mogu raditi u pulsirajućem i kontinuiranom načinu rada i mogu imati veliku izlaznu snagu što im omogućuje primjenu kod rezanja, bušenja i zavarivanja metalnih materijala. [3, 5]



Slika 7. Prikaz CO<sub>2</sub> lasera [3]

### 3.2. Laseri s krutim medijem

Za razliku od plinskih lasera, čiji je aktivni medij u plinovitom stanju, laseri s krutim medijem koriste aktivni medij u obliku kristala. Također, mogu raditi u pulsirajućem i kontinuiranom načinu rada.

#### 3.2.1. Nd:YAG laser

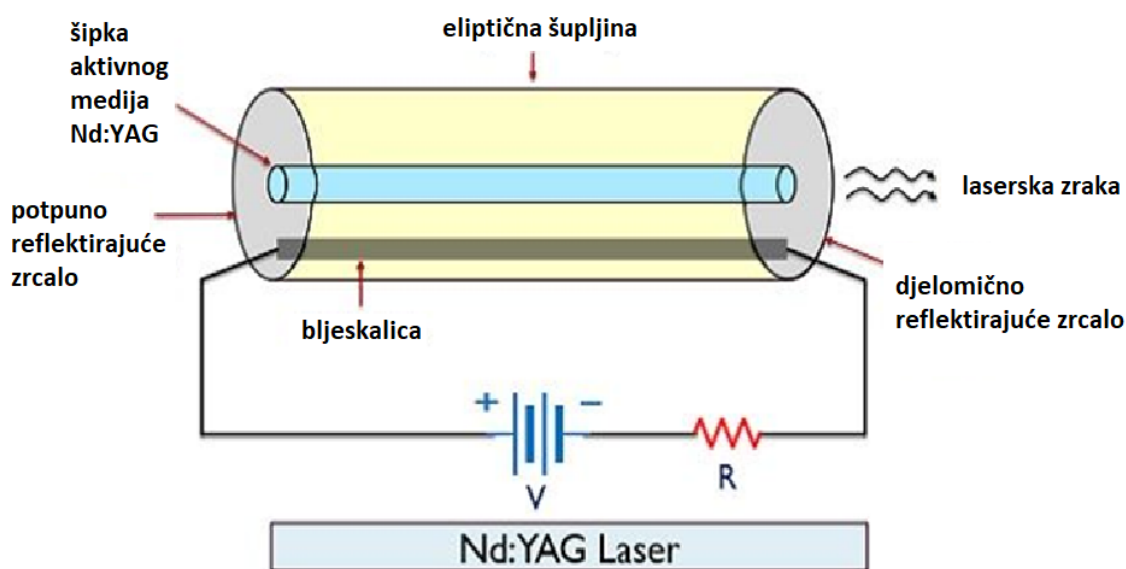
Tri osnovne komponente od kojih se sastoji ova vrsta lasera su izvor svjetlosti, aktivni medij i optički rezonator. Oni generiraju lasersku svjetlost u infracrvenom području spektra. Rad Nd:YAG lasera zasniva se na populacijskoj inverziji, a to je stanje u kojem je broj pobuđenih atoma veći od broja nepobuđenih. Svjetlost se aktivnom mediju dovodi preko izvora svjetlosti kao što su bljeskalice i laserske diode. Bljeskalica je lampa s električnim lukom koja je dizajnirana da provodi vrlo intenzivnu nekoherentnu bijelu svjetlost punog spektra, vrlo kratkog trajanja. Danas su, zbog svoje visoke učinkovitosti i niske cijene, laserske diode zamijenile u prošlosti većinom korištene bljeskalice. [3]

Itrij Aluminij Granat (Yttrium Aluminium Garnet) je sintetički kristalni materijal koji čini aktivni medij ove vrste lasera. Spomenuti je materijal dopiran kemijskim elementom

neodimijem (Nd) čiji su ioni nižeg energetskeg stanja pa bivaju uzbuđeni na više stanje, čime se osigurava djelotvorna aktivnost u aktivnom mediju. [3]

Optički rezonator Nd:YAG lasera je kristal smješten između dva zrcala koja su posrebrana ili optički obložena. Jedno zrcalo je posrebrano ili obloženo potpuno, dok je drugo djelomično te će se svjetlost u potpunosti reflektirati od potpunog, a ono zrcalo koje je posrebrano ili obloženo djelomično će veći dio svjetlosti reflektirati, a jedan dio će proći kroz njega i tako stvoriti lasersku zraku. [3]

Princip rada ovih lasera zasniva se na četverostupanjskom laserskom sustavu, a to znači da su u lasersko djelovanje uključena četiri energetska stanja. Do stimulirane emisije zračenja, odnosno oslobađanja zračenja u obliku fotona, dolazi kada se elektroni neodimijskih iona vraćaju s viših energetskeg stanja u početno. U najvišim energetskeg stanjima zadržavaju se jako kratko, a u njih dolaze nakon što izvor svjetlosti, već spomenuta laserska dioda ili bljeskalica, preda energiju aktivnom mediju odnosno Nd:YAG kristalu. Glavni problem je zagrijavanje tog aktivnog medija, stoga je potrebno hlađenje, no rashladno sredstvo koje teče uzduž aktivnog medija uzrokuje divergentnost laserske zrake što smanjuje njezinu kvalitetu smanjenjem dostupne gustoće snage u fokusiranoj laserskoj zraci. [3]



Slika 8. Prikaz Nd:YAG lasera [6]

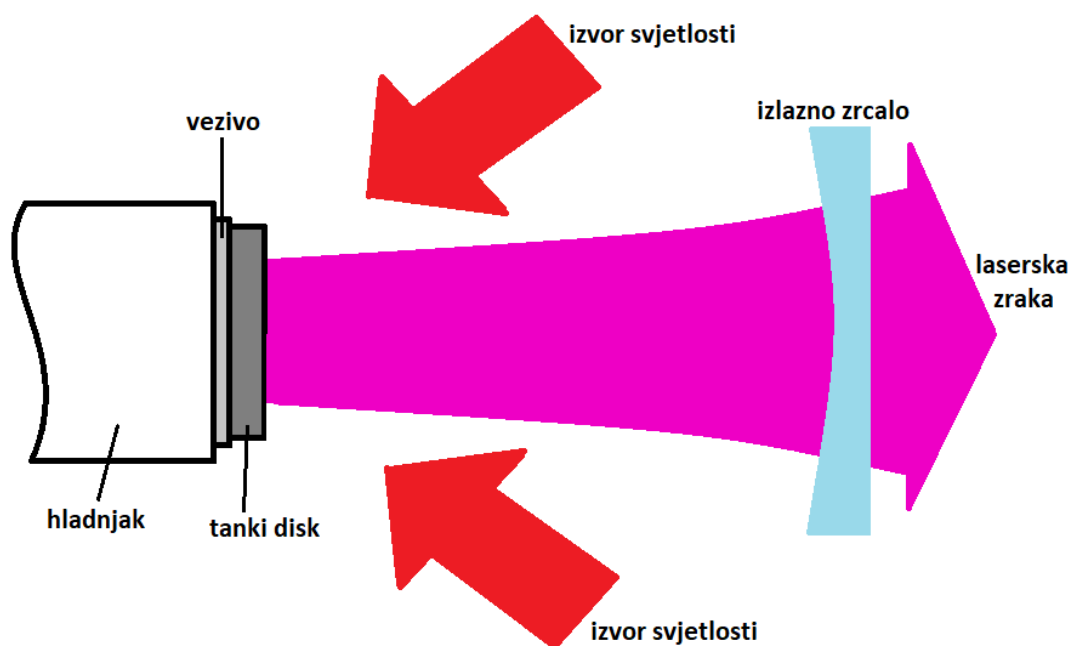
### 3.2.2. Disk laser

Disk laseri su laseri s čvrstim aktivnim medijem koji se sastoje od izvora svjetlosti, tankog diska od itrij-aluminijevog granatnog kristala, toplinskog spremnika i zrcala. Aktivni medij



proizvodi zraku vrlo slične valne duljine svjetlosti kao i Nd:YAG laser, ali je oblik korištenog kristala potpuno različit. Nastojeći izbjeći glavni nedostatak Nd:YAG lasera, a to je divergiranost zrake, disk laseri umjesto kristalne šipke, koja ima mali omjer površine i volumena, kao aktivni medij koriste kristalni disk debljine od 100 do 200  $\mu\text{m}$  i promjera nekoliko milimetara. Budući da se radi o disku vrlo male debljine, njegov omjer površine i volumena je veoma visok što u kontaktu s velikim spremnikom topline omogućava vrlo dobro hlađenje aktivnog medija. Uz promjer izvora svjetlosti, koji se koristi za napajanje kristala, puno veći od debljine diska i spomenuto dobro hlađenje, osigurana je minimalna divergiranost laserske zrake i njezina visoka kvaliteta. [3]

Laser ove vrste može se koristiti cijelo vrijeme konstantnim intenzitetom bez obzira na razinu snage jer se razina snage generirane laserske zrake može regulirati podešavanjem snage izvora i površine diska koji se osvjetljava, čime se dodatno poboljšava kvaliteta reza. Aksijalna laserska zraka dobivena u disk laseru može dati izlazni snop svjetlosti vrlo visoke kvalitete. [3]



Slika 9. Prikaz disk lasera [3]

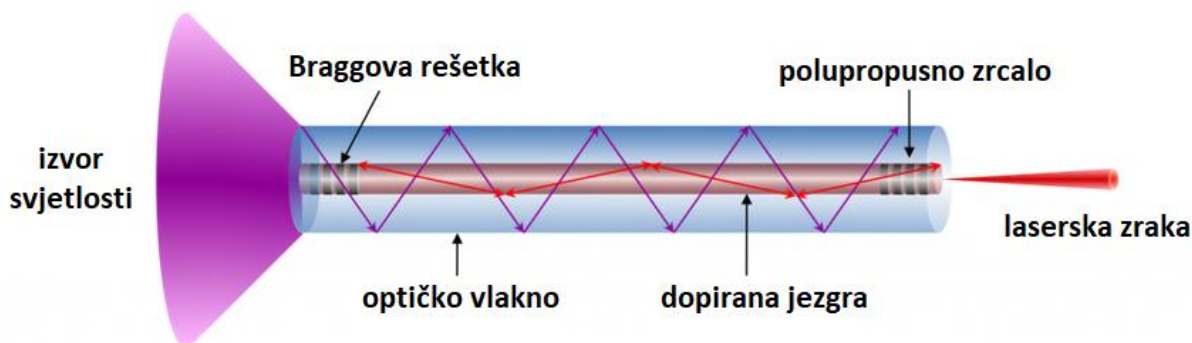
Iako mala debljina diska omogućuje vrlo učinkovito hlađenje, što je velika prednost, ona sa sobom donosi i negativnu stranu, a to je da se samo mali dio generirane svjetlosti pojačava dok prolazi kroz disk. Kako bi se povećao taj udio pojačanja, a samim time i učinkovitost, disk se na stražnjem dijelu oblaže s reflektirajućom površinom koja djeluje kao stražnje zrcalo

u laserskom rezonatoru. To omogućava da svjetlost prođe kroz disk mnogo puta (oko 16 puta), čime se povećava intenzitet svjetlosti. Tako se mogu postići iznosi snage do 1 kW, a ako su potrebe za snagom veće moguće je kombinirati više jedinica diska. Neke od prednosti disk lasera nad Nd:YAG laserom su:

- Moguće je povećati gustoću snage u točki pri istoj izlaznoj snazi koristeći manje promjere fokusa.
- Veća udaljenost sapnice od obratka može se koristiti za postizanje veće žarišne duljine uz dobivanje iste veličine točke.
- Za istu udaljenost sapnice od materijala može se koristiti manji promjer leće, koje su lakše i dostupnije.
- Gustoća snage potrebne za obradu materijala može se postići nižim snagama lasera, čime se smanjuje ukupni unos topline.
- Nekoliko dobavljača je nedavno predstavilo disk lasere s razinama snage u rasponu od nekoliko stotina vata do nekoliko kilovata. Takvi visokokvalitetni laseri mogu se koristiti za rezanje, zavarivanje i druge primjene obrade materijala. [3]

### 3.2.3. Fiber laser

Fiber laseri su laseri velike snage koji se sastoje od obogaćenih optičkih vlakana i poluvodičkih dioda. Kao izvor svjetlosti koriste poluvodičke diode, a emitirana laserska zraka je sadržana u optičkim vlaknima i putuje kroz fleksibilan kabel. Aktivna vlakna su specijalna optička vlakna izrađena od silicija i germanija te dopirana različitim kemijskim elementima. Pošto ta vlakna rade na principu totalne refleksije i odlično reflektiraju svjetlost koja se propagira kroz vlakno, to daje mogućnost da se cijeli laserski rezonator napravi od optičke komponente kao što je Braggova rešetka. Ona se nalazi direktno u dopiranom optičkom vlaknu i zamjenjuje zrcala tako da propušta određene valne duljine, a druge zaustavlja. [3, 7]



Slika 10. Prinip rada fiber lasera [8]

S obzirom na vrstu elementa kojim je dopirano optičko vlakno, proizvedena laserska zraka je određene valne duljine:

- Neodimij – 780 do 1100 nm
- Iterbij – 1000 do 1100 nm
- Praseodimij – 1300 nm
- Erbij – 1460 do 1640 nm
- Tulij – 1900 do 2500 nm
- Holmij – 2025 do 2200 nm
- Disprozij – 2600 do 3400 nm.

Širok spektar emitiranih valnih duljina omogućuje i vrlo široko područje primjene fiber lasera kao što su ponajprije lasersko rezanje, a zatim i markiranje, graviranje, čišćenje površina, bušenje te zavarivanje. [8]

Ovaj jedinstveni i najnapredniji laserski sustav nadmašuje karakteristike prije spomenutih tradicionalnih laserskih tehnologija. Glavne karakteristike fiber laser su: kompaktna veličina, jednostavno održavanje, veliko iskorištenje električne energije, dugovječni rad diode i kvalitetna laserska zraka bez obzira o snazi lasera. Dostupni su u širokom rasponu snage, od 20 W do 50 kW, s iskorištenjem energije preko 30 %. Omogućavaju preciznije rezanje od ostalih izvedbi lasera jer ne dolazi do promjene kvalitete laserske zrake bez obzira rade li na 10 % ili 100 % radne snage. Valna duljina laserske zrake je takva da je vrlo dobro apsorbirana od strane metala što omogućava veću kvalitetu reza. Još jedna prednost su dugačka i tanka vlakna koja vrlo dobro odvođe toplinu. Fiber laseri ne koriste zrcala ili optiku za poravnanje i namještanje što pojednostavljuje integraciju optičkih lasera u proizvodnji medicinskih i drugih laserskih sustava. Tipično su manji i lakši od tradicionalnih lasera te zauzimaju manje radnog prostora, čvršći su i manje osjetljivi na radnu okolinu i uvjete u kojima se koriste. [3, 7]

## 4. PARAMETRI OBRADE

Postoji velik broj parametara kod postupka rezanja laserom, a najvažniji su:

- Snaga lasera
- Posmična brzina
- Režim rada
- Žarišna duljina
- Položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada
- Plinovi za rezanje
- Izbor i veličina sapnice
- Udaljenost sapnice od radnog komada

Svi ovi parametri su promjenjivi, ali se većina odabire automatski ovisno o vrsti i debljini materijala. U nastavku je ukratko opisan svaki od navedenih parametara. [1]

### 4.1. Snaga lasera

Snaga lasera ponajprije je određena debljinom i tipom obratka. Smanjenjem snage postiže se visoka točnost na složenim radnim komadima ili vrlo malim dijelovima. Ona utječe na brzinu rezanja i dubinu prodora. Viša snaga omogućuje brže rezanje, ali ako je previsoka može uzrokovati deformaciju materijala. [3]

### 4.2. Posmična brzina

Energija korištena za lasersko rezanje se dijeli na dva dijela, energiju potrebnu da se napravi rez i gubitke energije u zoni rezanja. Prva je neovisna o vremenu rezanja, a druga je proporcionalna vremenu potrebnom da se ostvari rez. Povećanje posmične brzine smanjuje vrijeme obrade, a samim time i gubitke energije u zoni rezanja čime se povećava iskoristivost procesa. Najznačajniji gubitak u zoni rezanja za većinu metala ostvaruje se kondukcijom, a raste povećanjem debljine materijala i snižavanjem posmične brzine. [3]

Posmična brzina mora biti usklađena s protokom plina za rezanje i snagom. Porastom posmične brzine raste pojava crta na rubu reza dok je s druge strane jako smanjena penetracija. Male posmične brzine rezultiraju povećanom oksidacijom na rubovima reza pri

korištenju kisika kao plina za rezanje, a to umanjuje kvalitetu reza i povećava zonu utjecaja topline. U pravilu je posmična brzina obrnuto proporcionalna debljini materijala, a brzina i snaga se moraju reducirati kada se režu oštri kutovi da se spriječi oksidacija. Pri odabiru posmične brzine rezanja definiraju se dvije brzine, a to su maksimalna posmična brzina, koja je definirana kao najveća brzina koja daje rez koji je bez srha, ali s povećanom hrapavošću, i optimalna posmična brzina, koja daje rez bez srha s dobrom hrapavošću i iznosi oko 65 % ili dvije trećine maksimalne. [3]

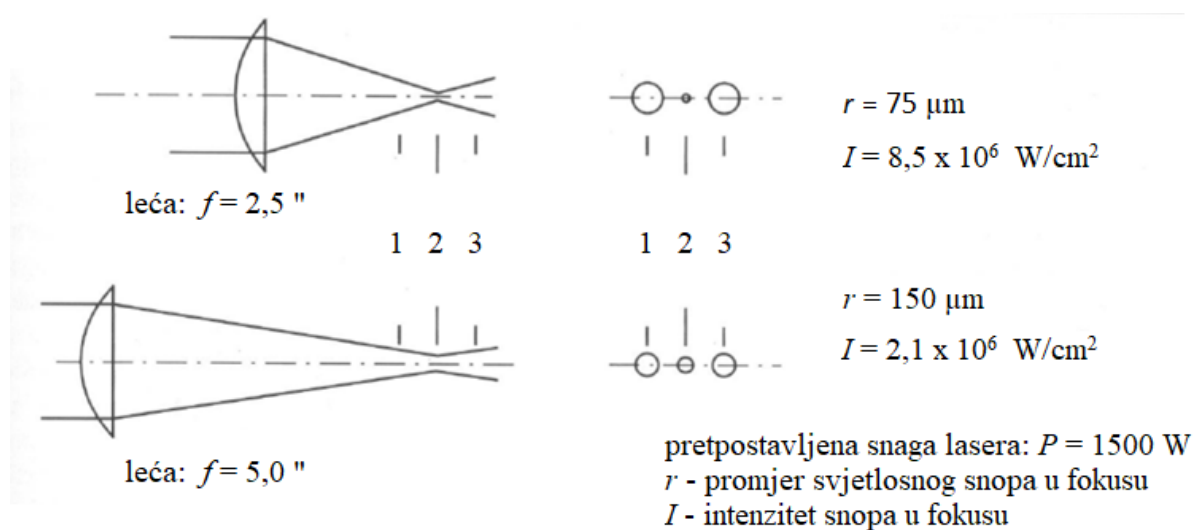
Cilj odabira parametra posmične brzine je dobiti što bolju kvalitetu površine reza sa što većom brzinom rezanja, a najčešće se posmične brzine određuju eksperimentalno.

### 4.3. Režim rada

Govoreći o režimu rada razlikuje se kontinuirani i impulsni ili pulsirajući režim, a oba mogu postići visoki intenzitet rezanja. Dubina penetracije zrake u materijal određena je dvjema snagama, ovisno o režimu rada. Kod impulsnog režima radi se o vršnoj snazi impulsa, dok je u kontinuiranom načinu rada riječ o prosječnoj snazi. Zbog mogućnosti postizanja većih posmičnih brzina s većom prosječnom snagom, kod debljih i glatkih obradaka preferira se kontinuirana laserska zraka, no kvaliteta reza ugrožena je smanjenom učinkovitošću ispuhivanja rastaljenog ili isparenog materijala. Za precizna rezanja koriste se impulsne zrake niže energije. Potrebno zagrijavanje se ostvaruje visokom vršnom snagom u kratkim intervalima, a efektivnije ispuhivanje taline ili isparenog materijala, kojim se ostvaruje bolja kvaliteta reza, omogućuje sporije odvijanje procesa nižom prosječnom snagom. [3]

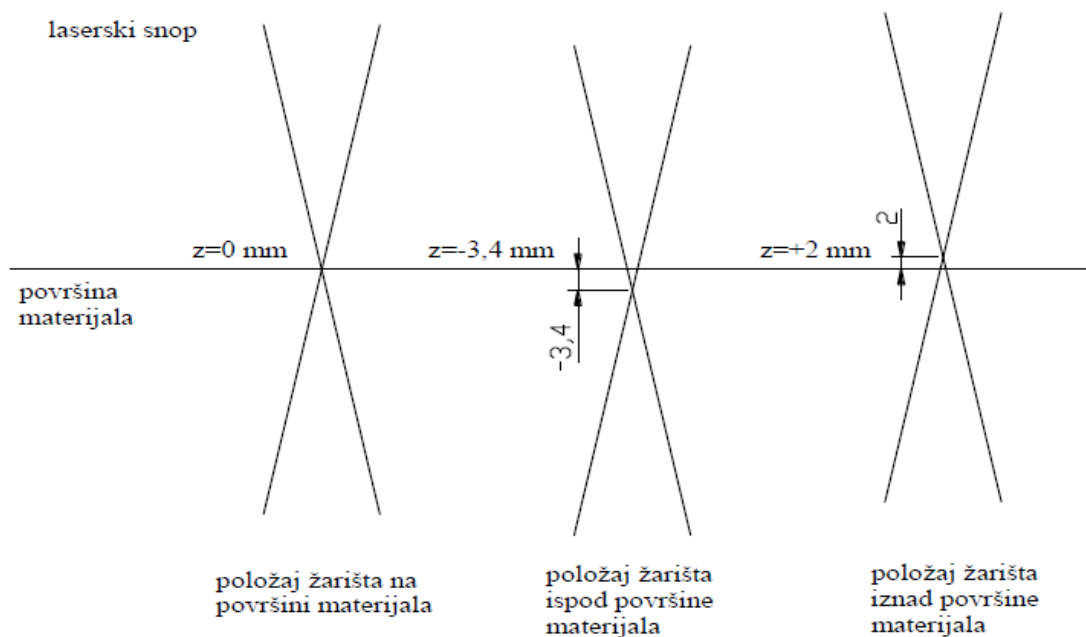
### 4.4. Žarišna duljina

Žarišna duljina leće  $f$  definira promjer žarišta odnosno fokusa. Leća s kraćom žarišnom duljinom fokusira snop na manji promjer žarišta, što daje veću gustoću snage. Za rezanje se najčešće upotrebljavaju leće žarišnih duljina 5 inča, koje se koriste za rezanje tankih obradaka, i 7,5 inča za obradu debljih. Pri tom treba imati na umu već spomenuto, a to je da se pri obradi debljih obradaka s lećom veće žarišne duljine smanjuje gustoća snage i posmična brzina u odnosu na leću manje žarišne duljine, ako se koristi jednaka snaga lasera u oba slučaja. Odabir leće s odgovarajućom žarišnom duljinom se temelji na debljini materijala koji će se u većini slučajeva rezati. [3]

Slika 11. Usporedba leća žarišnih duljina  $f$  od 2,5 i 5 inča [9]

#### 4.5. Položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada

Značajnu ulogu kod laserskog rezanja ima i položaj žarišta u odnosu na radni komad. Na kvalitetu reza utječe svaki pomak od neke zadane vrijednosti. Kako bi se ti pomaci spriječili, koriste se senzori za kontrolu položaja žarišta u odnosu na površinu radnog komada. Prilikom rezanja s inertnim plinom potrebno je ostvariti širi rez kako bi se olakšalo ispuhivanje taline iz zone rezanja pa je u tom slučaju optimalni položaj žarišta kod donje površine materijala. Svaka promjena debljine obratka znači i promjenu položaja žarišta ili fokusa, stoga je za debljine do 6 mm optimalni položaj fokusa na površini obrađivanog materijala, a kod debljina većih od 8 mm iznad njegove površine. Ako je položaj žarišta pozicioniran previše ispod ili previsoko od površine izratka, gustoća zrake padne ispod razine pri kojoj je moguće rezanje. [3]



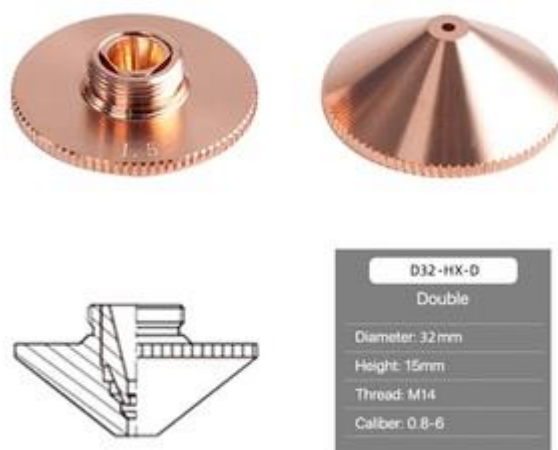
Slika 12. Položaj žarišta [9]

#### 4.6. Plinovi za rezanje

Na kvalitetu procesa laserskog rezanja i njegovu produktivnost velik utjecaj ima i izbor plina za rezanje. Razlikuju se inertni i aktivni plinovi. Plinovi za rezanje imaju više funkcija za vrijeme rezanja, a to su: inertni plin otpuhuje rastaljeni materijal ne dopuštajući pojavu srha s donje strane reza, aktivni plin sudjeluje u egzotermnoj reakciji s materijalom, oni sprečavaju da se formira plazma dok se režu deblje sekcije s jakim intenzitetom, protokom plina štiti se optički sustav lasera od štrcanja te hlade rub reza čime se smanjuje zona utjecaja topline. Najčešće korišteni aktivni plin je kisik, a inertni dušik, koji nije potpuno inertan, koristi se zbog svoje niske cijene i to posebice kod rezanja nehrđajućih i visokolegiranih čelika, aluminija i nikla. Glavni problem kod rezanja s inertnim plinom je formiranje srha s donje strane reza što se može izbjeći većim tlakom plina. Potreban je tlak od 10 do 20 bara da bi plin u potpunosti ispuhao rastaljeni materijal iz reza. Za specijalne primjene poput rezanja titana koriste se potpuno inertni plinovi argon ili helij da bi se spriječilo formiranje oksida i titanovih nitrida. Za rezanje mekih i niskolegiranih čelika najčešće se koristi kisik kojim se mogu postići veće brzine rezanja zbog nastanka egzotermne reakcije koja doprinosi unosu topline. Tlak kisika je u rasponu od 0,5 do 5 bara, a povećanjem debljine materijala potreban je veći tlak da se izbjegne gorenje. [3]

#### 4.7. Izbor i veličina sapnice

Vrlo je važan pravilan izbor odgovarajuće sapnice. Vrste sapnica za određeni stroj i uporabu propisane su u podacima stroja. Iako korištenje prevelike sapnice neće izazvati veliku promjenu u kvaliteti reza, uvelike će se povećati potrošnja plina za rezanje. Korištenjem premale sapnice rez neće biti čist te će na donjem dijelu rezne površine doći do pojave srha. Kod rezanja s visokim tlakom koriste se sapnice s većim otvorom nego za standardno rezanje. [3]



Slika 13. Primjer sapnice [10]

#### 4.8. Udaljenost sapnice od radnog komada

Veliki utjecaj na kvalitetu reza ima i udaljenost sapnice od radnog komada. Vrlo je bitno optimalno podesiti razmak između sapnice i obratka te taj razmak održavati konstantnim duž cijelog reza da bi se postigla ravnomjerna širina reza. Pri samom početku rezanja pomoću taktilnog senzora odredi se položaj sapnice njezinim primicanjem dok ne dodirne površinu radnog komada i nakon toga izdizanjem na visinu rezanja. Regulacija udaljenosti sapnice od radnog komada omogućava da se pri obradi, bilo valovitih, bilo ravnih komada koji ne naliježu ravno na radni stol, sapnica uvijek nalazi na istoj udaljenosti od površine komada. [3]



## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Praktični dio ovog rada bavi se usporedbom kvalitete reza CO<sub>2</sub> i fiber lasera u ovisnosti o posmičnoj brzini. Promatrani su uzorci od legure aluminija AlMg3 različitih debljina: 2 mm, 4 mm, 6 mm i 8 mm. Svaki je uzorak dimenzija 320 x 30 mm, a sastoji se od 4 segmenta označenih brojevima od 1 do 4. Na svakom je segmentu različita posmična brzina, dok su snaga lasera i tlak plina isti za svaku debljinu neovisno o brzini i vrsti lasera.



**Slika 14. Uzorak podijeljen na 4 segmenta**

Dio vezan uz pripremu uzoraka odrađen je u tvrtci Dundo-promet d.o.o. iz Jazvina. Strojevi korišteni u pokusima su Trumpf Trulaser 3030 CO<sub>2</sub> i Trumpf Trulaser 3040 Fiber.

### 5.1. Trumpf Trulaser 3030 CO<sub>2</sub>

TC L 3030 je CNC-stroj za lasersko rezanje ravnih limova koji spada u skupinu lasera s plinovitim medijem. Kao alat koristi lasersku zraku koja od izvora do glave lasera putuje kroz sustav zrcala. Zrcala i glava lasera se nalaze na pokretnim dijelovima pa se može reći da stroj radi s „letećom optikom“. Standardno je opremljen sa sustavom mjenjača paleta te se utovar i istovar paleta mogu izvršavati paralelno s obradom.

Slika 15. Trumpf TruLaser 3030 CO<sub>2</sub> [11]

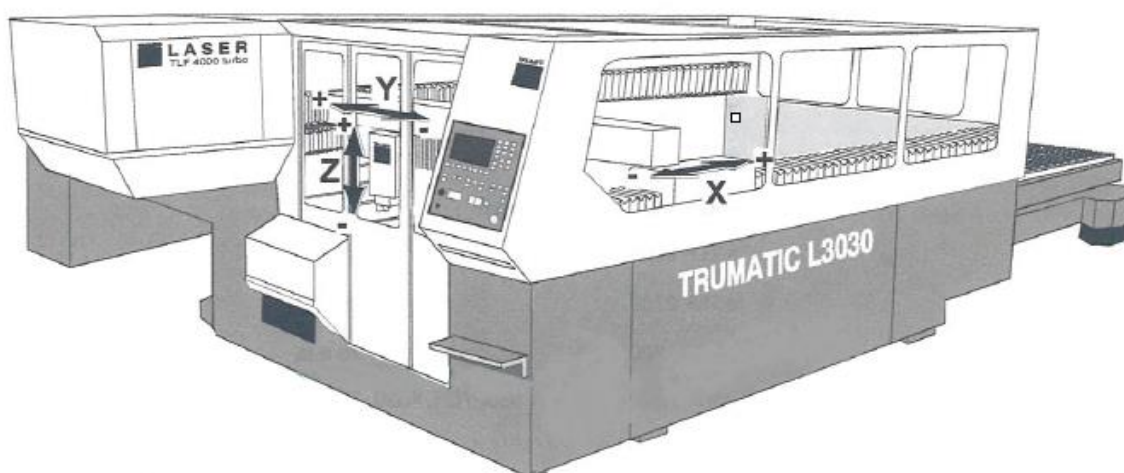
Osnovni tehnički podaci stroja navedeni su u tablici 1.

Tablica 1. Tehnički podaci stroja [12]

	TC L 3030
<b>Ukupna težina</b>	11500 kg
<b>Radno područje</b>	
U X-smjeru	3000 mm
U Y-smjeru	1500 mm
U Z-smjeru	115 mm
<b>Dimenzije stroja</b>	
Duljina	9800 mm
Širina	5300 mm
Visina	2000 mm
<b>Upravljanje</b>	SIEMENS SINUMERIK 840D
<b>Električni priključak</b>	73 kVa
<b>Vrsta pogona</b>	

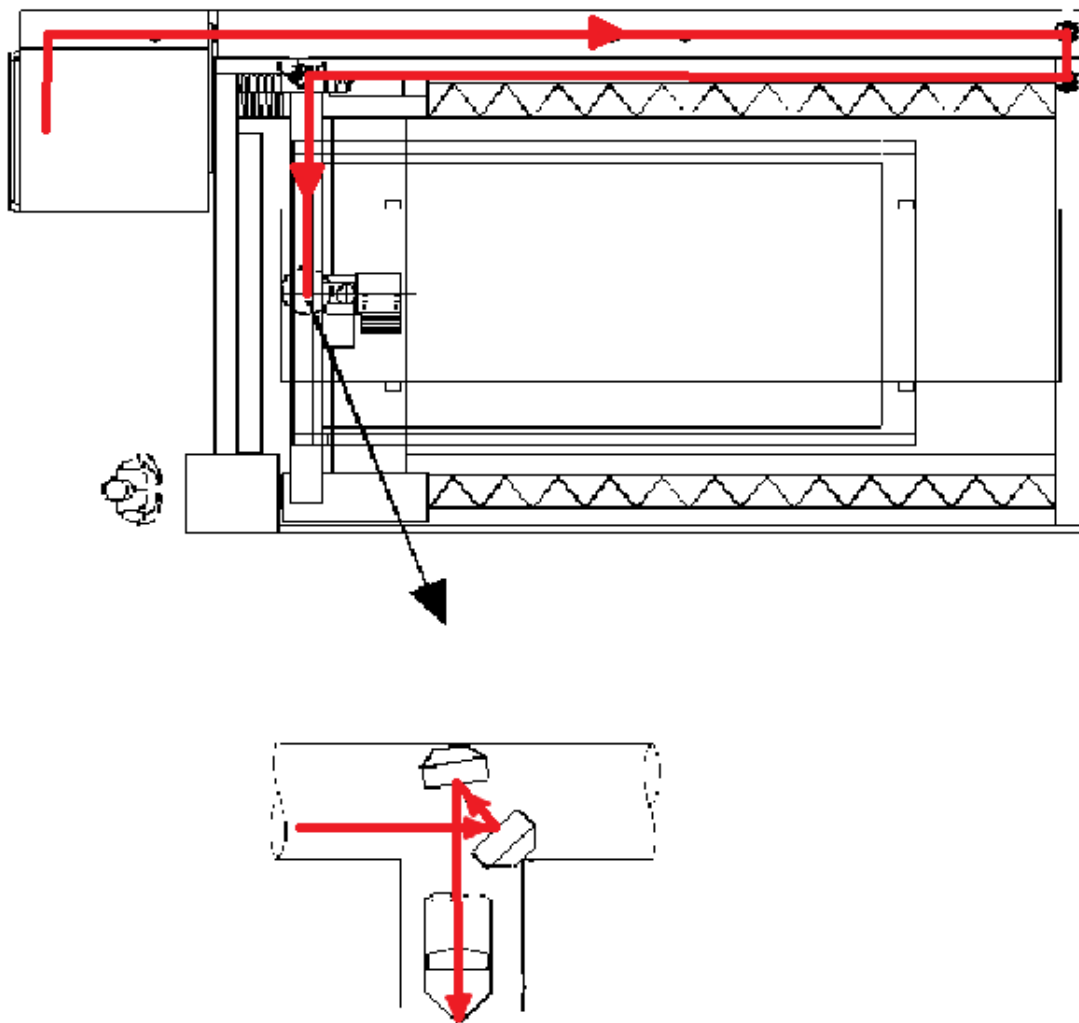
X-, Y-, Z-os	Električni servo motori
<b>Maksimalna brzina pozicioniranja simultanih osi</b>	85 m/min
<b>Točnost</b>	
Odstupanje pozicije	$\pm 0,1$ mm
Srednja točnost pozicioniranja	$\pm 0,03$ mm
<b>Maksimalna laserska snaga u kontinuiranom načinu rada</b>	3200 W
<b>Maksimalna debljina materijala</b>	20 mm

Stroj raspolaže s ukupno 3 translacijske osi.



Slika 16. Translacijske osi stroja [12]

Vođenje zrake odvija se pomoću zrcala, a njezin put od izvora laserske svjetlosti do laserske glave prikazan je na slici 17.



Slika 17. Putanja laserske zrake [12]

## 5.2. Trumpf Trulaser 3040 Fiber

Radi se o fiber laseru koji se nalazi u skupini strojeva koji za pojačavanje svjetlosti koriste aktivni medij u krutom stanju. Neke od tehničkih karakteristika stroja dane su u tablici 2.

Tablica 2. Tehnički podaci stroja [13]

		<b>TruLaser 3040 (L50)</b>
<b>Maksimalna snaga</b>	Kontinuirani način rada	4000 W
<b>Radno područje</b>	X i Y osi	4000 x 2000 mm
	Z osi	115 mm

<b>Točnost</b>	Odstupanje položaja	± 0,05 mm
<b>Upravljanje</b>	CNC	SINUMERIK 840D
<b>Dimenzije stroja</b>	Duljina	11400 mm
	Širina	6730 mm
	Visina	2400 mm
<b>Maksimalna debljina lima</b>	Čelik	20 mm
	Nehrđajući čelik	20 mm
	Aluminij	20 mm

Stroj radi na principu pokretne optike, radni predmet miruje, a rezna glava se pomiče. To pomicanje izvode servomotori s mehaničkim komponentama planetarnih reduktora i zubnih letvi sa zupčanicima. Karakterizira ga velika dinamika uz istovremenu veliku preciznost jer se pomiču samo točno definirane mase.



**Slika 18. Trumpf TruLaser 3040 Fiber [14]**

Kod fiber lasera zraka se od izvora svjetlosti do rezne glave prenosi pomoću optičkih kabela. Takav optički vodič prikazan je na slici 19, a sastoji se od kvarcnog staklenog vlakna s dva

sloja, jezgre vlakna i omotača. U jezgri vlakna se širi laserska svjetlost. Njezin promjer iznosi oko 0,1 mm. Omotač obavija jezgru vlakna i drži lasersku svjetlost u njoj. Plastični sloj ovija kvarcno stakleno vlakno i štiti ga od oštećenja. Prednosti ovakvog sustava vođenja laserske zrake su u tome što nema kompliciranih nadograđenih sustava zrcala i onečišćenja prilikom vođenja zrake, malo je mehaničkih dijelova te je omogućeno fleksibilno postavljanje laserskog uređaja. Laserska rezna glava nalazi se na kraju laserskog optičkog kabela.



Slika 19. Optički kabel fiber lasera [13]

### 5.3. Materijal uzoraka

Materijal AlMg3, odnosno EN AW-5754, ima visoka mehanička svojstva među legurama aluminija koje nisu podložne toplinskoj obradi. Pokazuje vrlo dobru otpornost na atmosfersku i morsku koroziju te je dobre zavarljivosti. U tablici 3 prikazan je kemijski sastav, a u tablici 4 fizikalna svojstva navedenog materijala.

Tablica 3. Kemijski sastav AlMg3 [15]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,1	≤ 0,5	2,6 – 3,6	≤ 0,3	≤ 0,2	≤ 0,15	ostalo

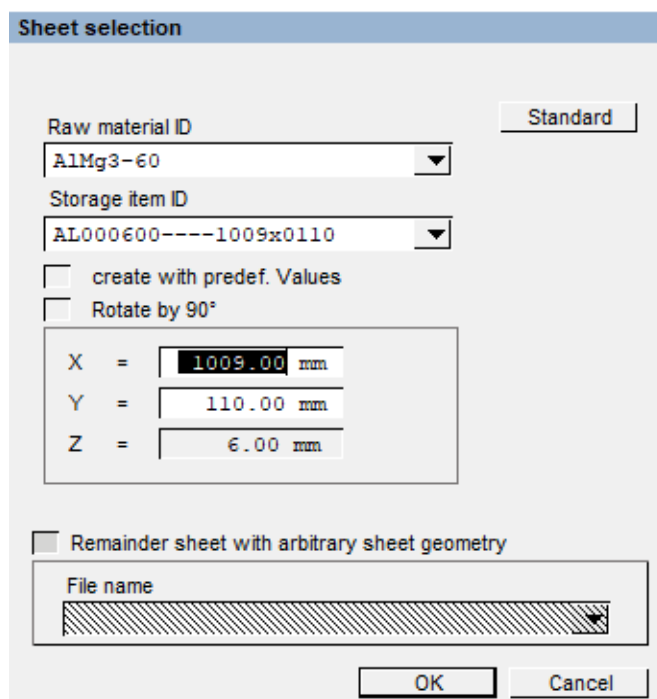
Tablica 4. Fizikalna svojstva AlMg3 [15]

$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$E$ [Mpa]	$G$ [Mpa]	$\nu$	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$HBW$	$\lambda$ [W/mK]
2,7	70500	26500	0,33	≥ 80	190-240	52	132

### 5.4. Izrada programa za lasersko rezanje

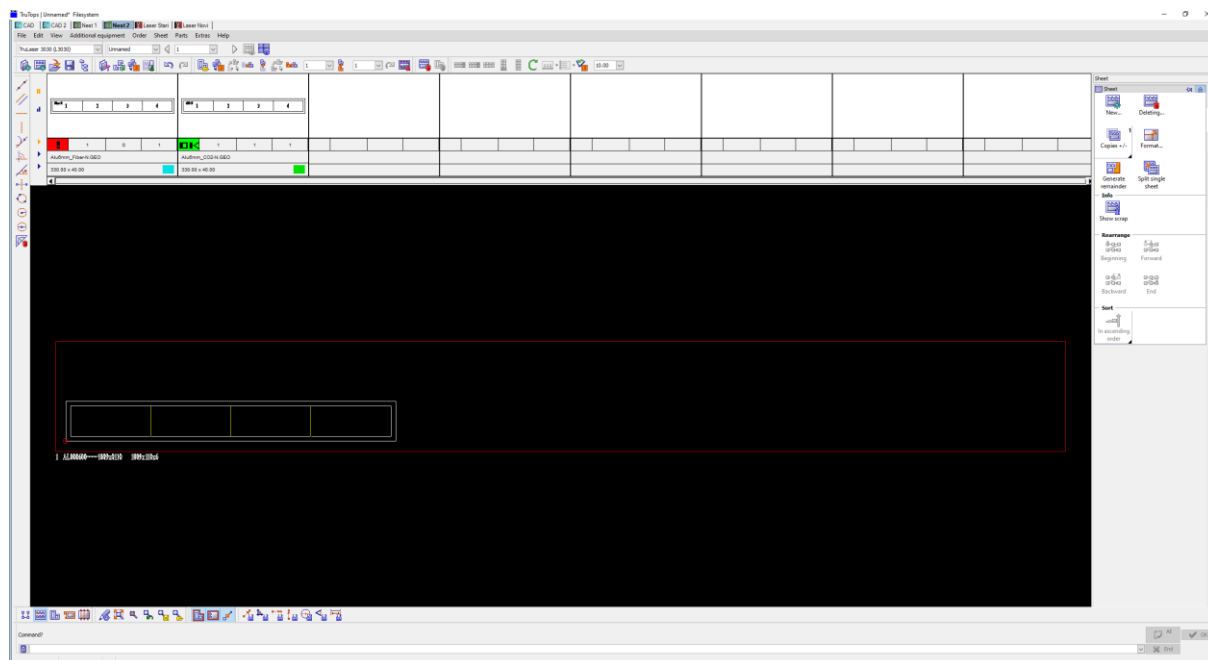
Za izradu programa korišten je software TruTops. Pošto su programi za svaki uzorak skoro isti, razlika je jedino u debljini materijala te obliku i veličini ploče lima iz koje je uzorak





Slika 21. Prikaz unosa dimenzija priprema lima

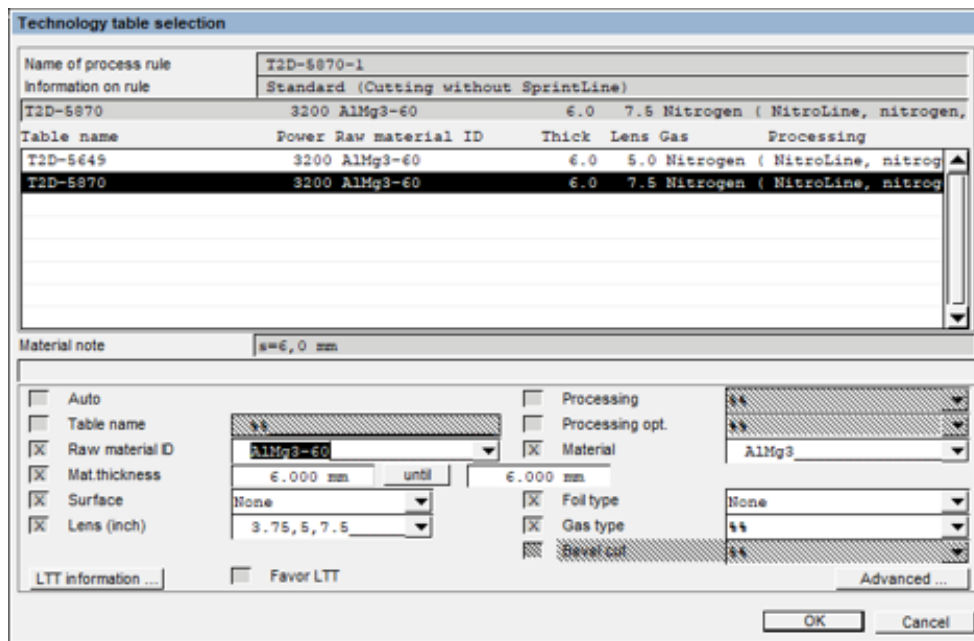
Iz mape u kojoj su spremljene datoteke u geo formatu, povlače se određeni komadi koje se zatim raspoređuje na pripremak lima.



Slika 22. Radni komad smješten na pripremku lima

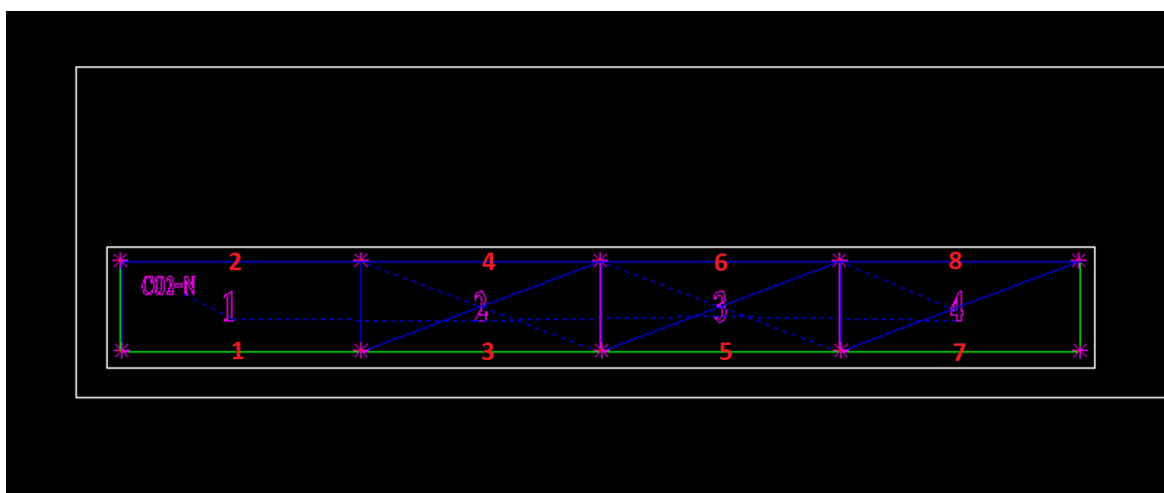


Kad je sve posloženo, pripremak lima se sprema u taf formatu. Otvara se kartica Laser, poziva se taf datoteka, odabire se tehnologija laserskog reza i kreće se u izradu samog programa. Određuje se mjesto proboja, redoslijed rezanja i brojni drugi parametri koji određuju izvršavanje programa.



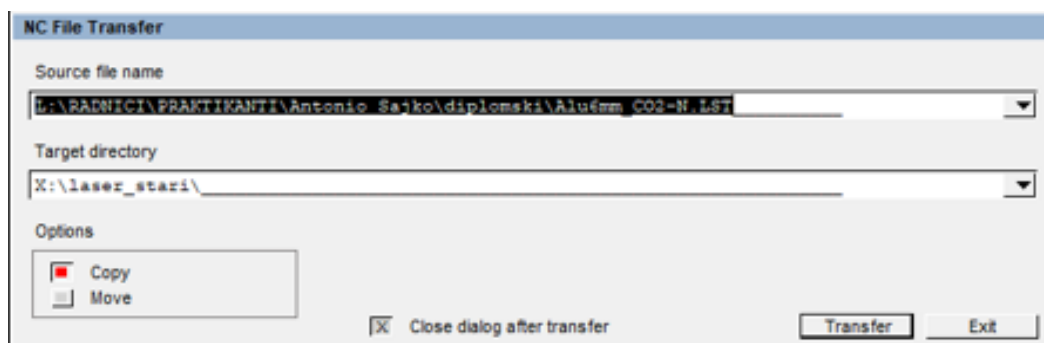
Slika 23. Odabir tehnologije reza

Pošto je svaki uzorak rezan s 4 različite posmične brzine, bilo je potrebno odrediti redoslijed izvođenja koji će operateru dati dovoljno vremena da stigne na trenutak zaustaviti stroj i promijeniti posmak. Iz tog je razloga odabran redoslijed koji je prikazan na slici 24. Nakon graviranja oznaka kreće rezanje kontura čiji je redoslijed označen crvenim brojevima od 1 do 8.



Slika 24. Redoslijed rezanja označen brojevima crvene boje

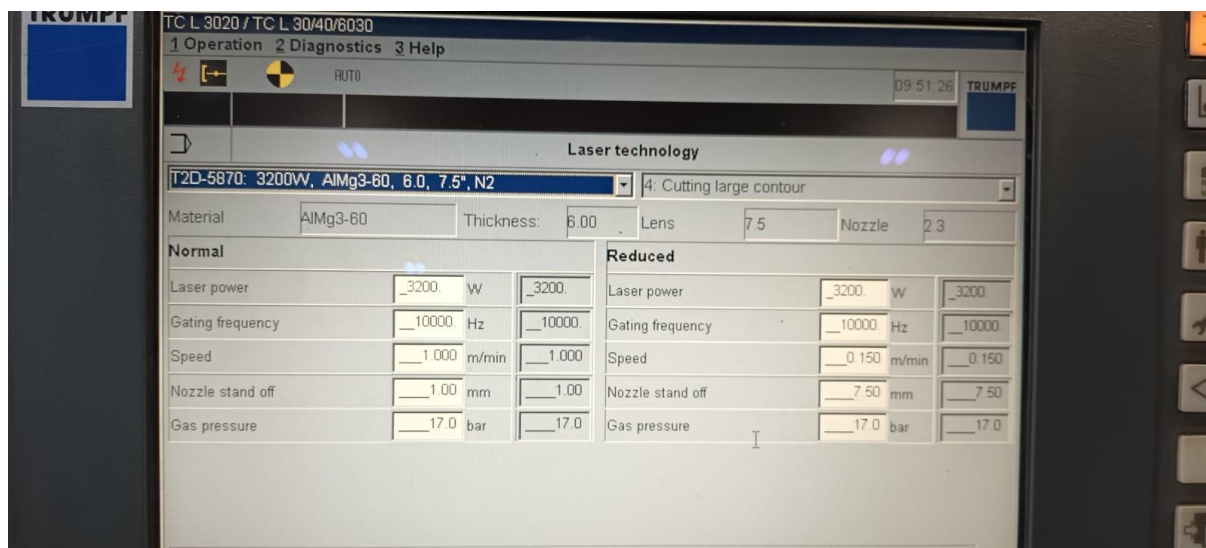
Kad je program završen, putem mreže se šalje na stroj.



Slika 25. Slanje programa na laser u obliku LST datoteke

### 5.5. Rezanje uzoraka

Svi uzorci su rezani snagom od 3200 W na oba lasera, a kao rezni plin koristio se dušik. Prvo su rezani uzorci na CO<sub>2</sub> laseru koji je manje snage te su paramteri s njega prepisani na fiber laser da bi se rezanjem s istim paramterima na oba lasera osigurala pravovaljanost uzoraka. Oba stroja za lasersko rezanje radila su u kontinuiranom režimu rada. Posmična brzina je mijenjana na način da je na početku u parametre lasera unesen iznos preporučene posmične brzine te se tijekom rezanja pomoću rotacijskog gumba podešavao željeni postotak posmaka.



Slika 26. Zaslom CO<sub>2</sub> lasera s parametrima obrade

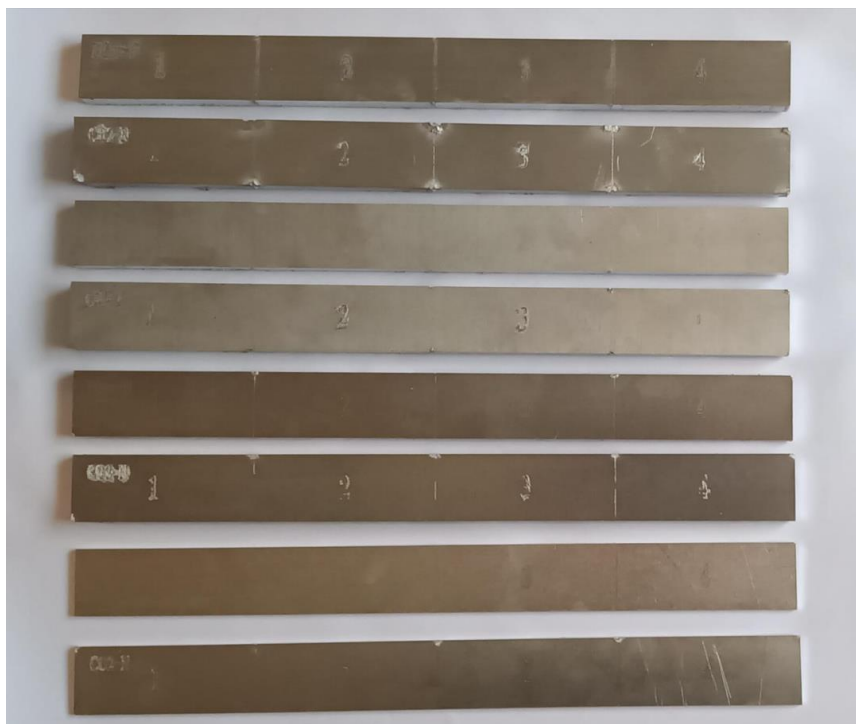
Prvo je rezana debljina od 8 mm jer je postojala sumnja da CO<sub>2</sub> laser možda neće moći rezati pri prevelikim promjenama parametara u odnosu na preporučene. Do problema je došlo već prilikom probijanja kod prvog reza. Iako je prvenstveno bilo zamišljeno da se krene s 30 % posmične brzine pa da se ona poveća na 60 %, zatim na 90 % i na kraju na 120 %, stroj je

izbacivao grešku i nije dopuštao rezanje sve dok se posmična brzina nije digla na 70 % od zadane. Stoga su svi uzorci rezani s podjelom po segmentima od 70 %, 80 %, 90 % i 100 % zadane posmične brzine. Takva podjela je zadržana na uzorcima svih debljina.



**Slika 27. Položaj priprema lima s izrezanim uzorkom na radnom stolu lasera**

Izrezana su 2 radna komada od svake debljine, jedan na CO<sub>2</sub> laseru i jedan na fiber laseru. Na jednom radnom komadu nalaze se dva uzorka, a to je ostvareno tako da su prilikom rezanja duž obje dulje strane svakog uzorka mijenjane 4 posmične brzine.



Slika 28. Izrezani uzorci

U tablicama 5, 6, 7 i 8 su za svaku debljinu uzorka prikazani parametri na oba lasera. Nastojalo se izjednačiti što više parametara, no ipak zbog različitosti načina dobivanja laserske zrake i tehnologije reza neki od parametara su morali ostati nepromijenjeni.

Tablica 5. Parametri za uzorke debljine 8 mm

Parametri	CO <sub>2</sub> laser	Fiber laser
Snaga	3200 W	3200 W
Granična frekvencija	10000 Hz	20000 Hz
Udaljenost sapnice od radnog komada	1 mm	1 mm
Sapnica	2,3	2,3
Leća	7,5 inča	7,5 inča
Tlak dušika	19 bara	19 bara
Zadna posmična brzina	0,340 m/min	0,340 m/min

Tablica 6. Parametri za uzorke debljine 6 mm

Parametri	CO <sub>2</sub> laser	Fiber laser
Snaga	3200 W	3200 W
Granična frekvencija	10000 Hz	20000 Hz
Udaljenost sapnice od radnog komada	1 mm	1 mm
Sapnica	2,3	2,3
Leća	7,5 inča	7,5 inča
Tlak dušika	17 bara	17 bara
Zadana posmična brzina	1 m/min	1 m/min

Tablica 7. Parametri za uzorke debljine 4 mm

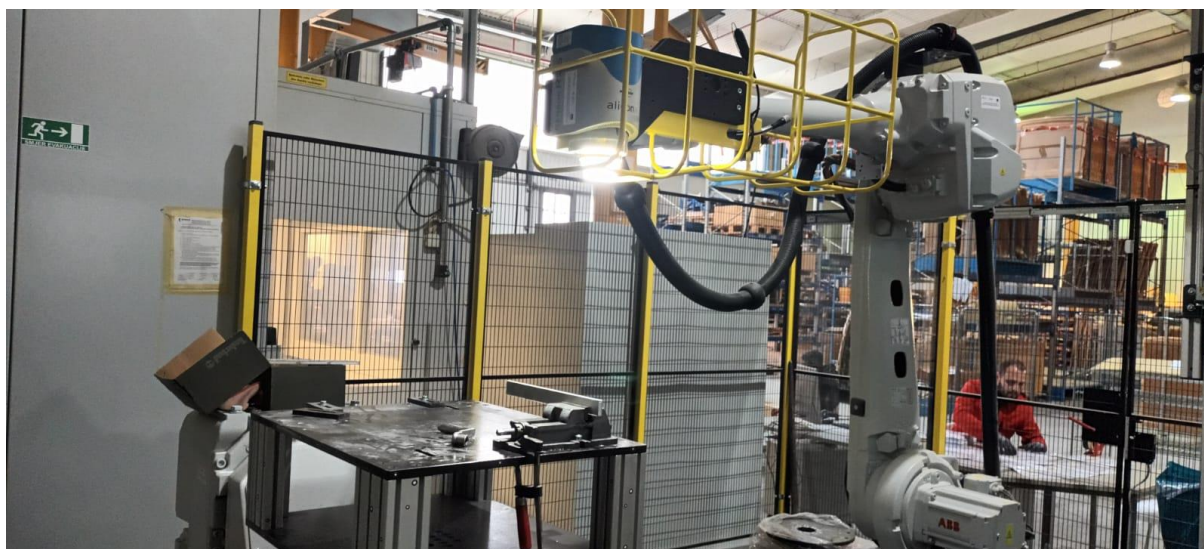
Parametri	CO <sub>2</sub> laser	Fiber laser
Snaga	3200 W	3200 W
Granična frekvencija	10000 Hz	20000 Hz
Udaljenost sapnice od radnog komada	1 mm	3 mm
Sapnica	1,7	2,0
Leća	7,5 inča	7,5 inča
Tlak dušika	14 bara	14 bara
Zadana posmična brzina	2,1 m/min	2,1 m/min

Tablica 8. Parametri za uzorke debljine 2 mm

Parametri	CO <sub>2</sub> laser	Fiber laser
Snaga	3200 W	3200 W
Granična frekvencija	10000 Hz	20000 Hz
Udaljenost sapnice od radnog komada	1 mm	2,5 mm
Sapnica	1,4	2,0
Leća	7,5 inča	7,5 inča
Tlak dušika	10 bara	10 bara
Zadana posmična brzina	5,4 m/min	5,4 m/min

### 5.6. Ispitivanje uzoraka

Uzorci su nakon rezanja podvrgnuti ispitivanju hrapavosti površine pomoću optičkog beskontaktnog senzora za mjerenje hrapavosti Alicona. Senzor je ugrađen na robot ABB 4600 pri čemu je mjerenje izvršeno s objektivom uvećanja 10 puta.

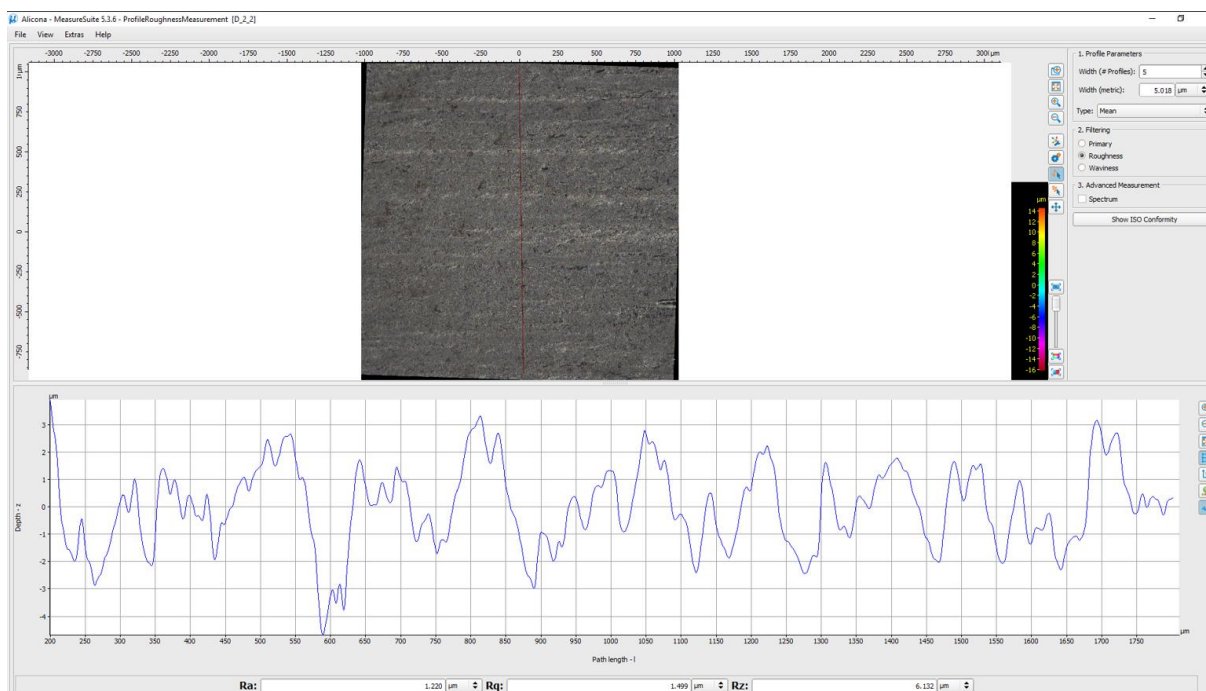


Slika 29. Postav ispitivanja

Broj izrezanih, a zatim ispitanih uzoraka nije veći jer je bilo upitno hoće li se zbog uvjeta u kojem se nalazi robotska ćelija moći provesti više ispitivanja. Kako je trenutno u fazi obnova Fakulteta strojarstva i brodogradnje, robotska ćelija u sklopu koje se nalazi i spomenuti senzor za mjerenje hrapavosti preseljena je na novu lokaciju u tvrtku Enikon u Jankomiru. Prilikom snimanja povremeno bi dolazilo do pojave vibracija uzrokovanih proizvodnjom unutar navedene kompanije pa su neka mjerenja odbačena i trebala su biti ponovljena. Na svakom segmentu svakog uzorka snimano je područje dimenzija 2 x 2 mm jer je to bilo moguće obuhvatiti jednim ciklusom snimanja. Sve više od toga je zahtijevalo više snimaka koje se naknadno spajaju u jednu sliku, no to u postojećim uvjetima nije bilo moguće ostvariti bez grešaka zbog vibracija, čak ni nakon puno ponavljanja.

## 5.7. Analiza rezultata


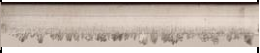














Nakon skeniranja uzorka, provedena je analiza rezultata. U tablicama 9, 10, 11 i 12 prikazane su slike uzoraka te su navedeni parametri površine očitani iz grafova dobivenih ispitivanjem. Jedan od takvih grafova prikazan je na slici 30.



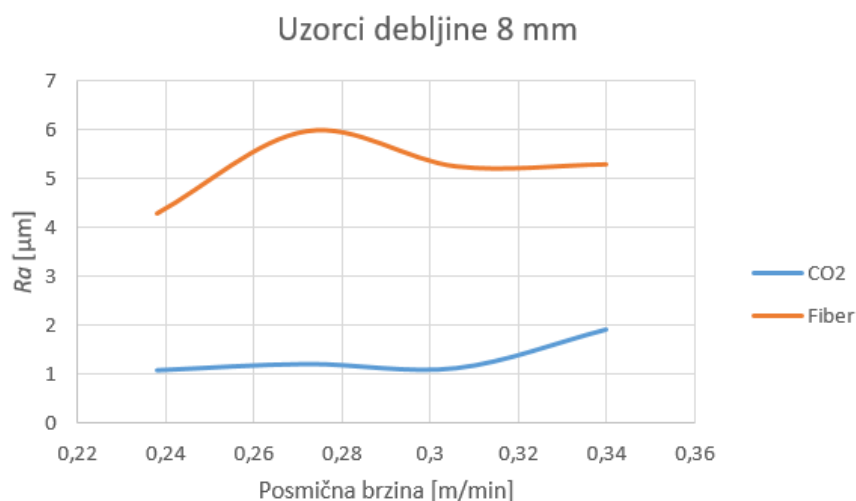
Slika 30. Prikaz profila površine

Svaka tablica odnosi se na jednu debljinu materijala.

Tablica 9. Uzorci debljine 8 mm

Posmična brzina	0,238 m/min	0,272 m/min	0,306 m/min	0,340 m/min
CO <sub>2</sub> laser				
				
	$Ra = 1,089 \mu\text{m}$ $Rq = 1,422 \mu\text{m}$ $Rz = 5,939 \mu\text{m}$	$Ra = 1,220 \mu\text{m}$ $Rq = 1,499 \mu\text{m}$ $Rz = 6,132 \mu\text{m}$	$Ra = 1,134 \mu\text{m}$ $Rq = 1,414 \mu\text{m}$ $Rz = 5,318 \mu\text{m}$	$Ra = 1,935 \mu\text{m}$ $Rq = 2,560 \mu\text{m}$ $Rz = 8,942 \mu\text{m}$
Fiber laser				
				
	$Ra = 4,282 \mu\text{m}$ $Rq = 5,985 \mu\text{m}$ $Rz = 24,246 \mu\text{m}$	$Ra = 5,976 \mu\text{m}$ $Rq = 7,559 \mu\text{m}$ $Rz = 28,993 \mu\text{m}$	$Ra = 5,250 \mu\text{m}$ $Rq = 6,667 \mu\text{m}$ $Rz = 26,285 \mu\text{m}$	$Ra = 5,293 \mu\text{m}$ $Rq = 7,092 \mu\text{m}$ $Rz = 27,034 \mu\text{m}$


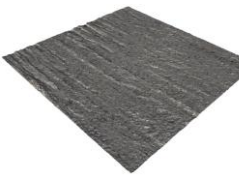


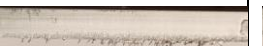















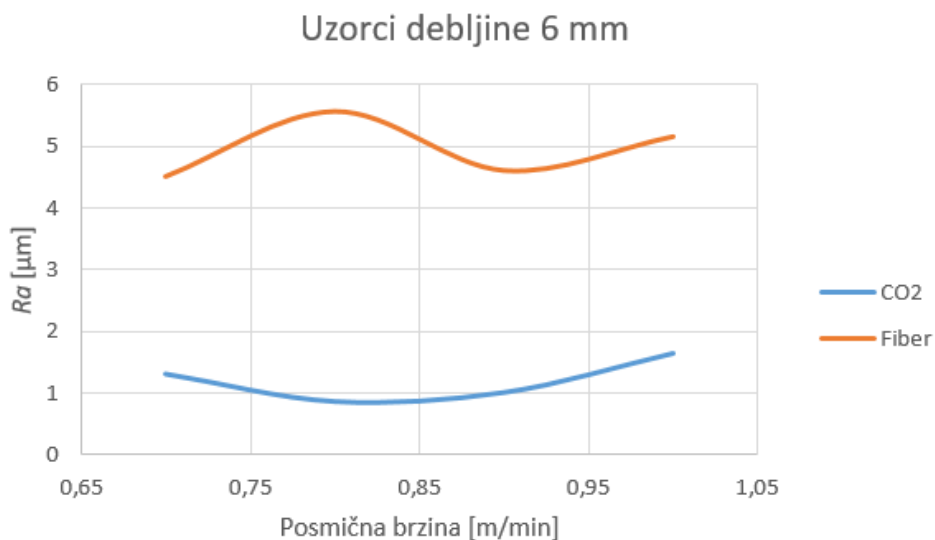
**Slika 31. Graf ovisnosti  $Ra$  o posmičnoj brzini**

Kod uzoraka debljine 8 mm u oba slučaja je najbolja kvaliteta površine ostvarena pri najmanjoj brzini. Kvaliteta reza dobivenog CO<sub>2</sub> laserom puno je bolja nego kod reza dobivenog fiber laserom, ali je srh na donjoj površini puno veći.

**Tablica 10. Uzorci debljine 6 mm**

Posmična brzina	0,7 m/min	0,8 m/min	0,9 m/min	1 m/min
<b>CO<sub>2</sub> laser</b>	  $Ra = 1,309 \mu\text{m}$ $Rq = 1,742 \mu\text{m}$ $Rz = 6,751 \mu\text{m}$	  $Ra = 0,869 \mu\text{m}$ $Rq = 1,144 \mu\text{m}$ $Rz = 4,765 \mu\text{m}$	  $Ra = 1,013 \mu\text{m}$ $Rq = 1,323 \mu\text{m}$ $Rz = 5,524 \mu\text{m}$	  $Ra = 1,638 \mu\text{m}$ $Rq = 2,078 \mu\text{m}$ $Rz = 9,255 \mu\text{m}$
<b>Fiber laser</b>	 	 	 	 

	$Ra = 4,499 \mu\text{m}$	$Ra = 5,556 \mu\text{m}$	$Ra = 4,597 \mu\text{m}$	$Ra = 5,148 \mu\text{m}$
	$Rq = 5,619 \mu\text{m}$	$Rq = 7,547 \mu\text{m}$	$Rq = 6,472 \mu\text{m}$	$Rq = 6,766 \mu\text{m}$
	$Rz = 21,857 \mu\text{m}$	$Rz = 28,421 \mu\text{m}$	$Rz = 26,945 \mu\text{m}$	$Rz = 28,928 \mu\text{m}$











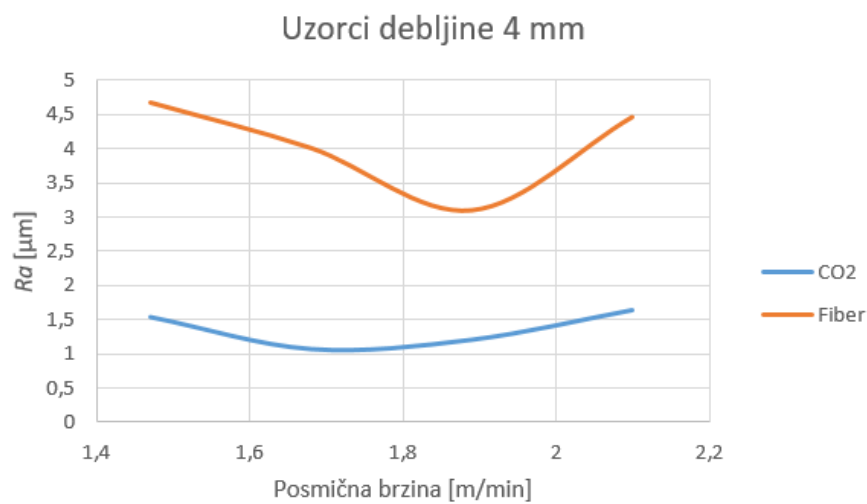
**Slika 32. Graf ovisnosti  $Ra$  o posmičnoj brzini**

Uzorci debljine 6 mm ne pokazuju značajnu promjenu u kvaliteti površine reza promjenom posmične brzine, no CO<sub>2</sub> laser je ponovno ostvario površinu manje hrapavosti, ali i izraženiji srh na donjoj površini materijala.

**Tablica 11. Uzorci debljine 4 mm**

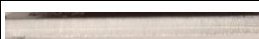
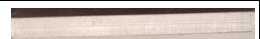
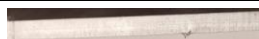
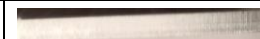
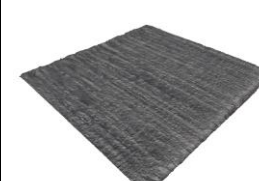


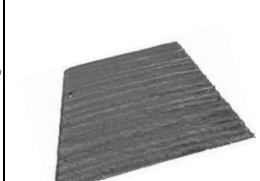
Posmična brzina	1,47 m/min	1,68 m/min	1,89 m/min	2,1 m/min
CO <sub>2</sub> laser				
	$Ra = 1,544 \mu\text{m}$	$Ra = 1,072 \mu\text{m}$	$Ra = 1,209 \mu\text{m}$	$Ra = 1,646 \mu\text{m}$
	$Rq = 1,921 \mu\text{m}$	$Rq = 1,360 \mu\text{m}$	$Rq = 1,486 \mu\text{m}$	$Rq = 2,043 \mu\text{m}$
	$Rz = 7,598 \mu\text{m}$	$Rz = 6,057 \mu\text{m}$	$Rz = 6,245 \mu\text{m}$	$Rz = 8,166 \mu\text{m}$





Fiber laser				
				
	$Ra = 4,682 \mu\text{m}$	$Ra = 4,012 \mu\text{m}$	$Ra = 3,094 \mu\text{m}$	$Ra = 4,469 \mu\text{m}$
	$Rq = 5,721 \mu\text{m}$	$Rq = 5,101 \mu\text{m}$	$Rq = 3,864 \mu\text{m}$	$Rq = 5,432 \mu\text{m}$
	$Rz = 21,859 \mu\text{m}$	$Rz = 19,987 \mu\text{m}$	$Rz = 15,394 \mu\text{m}$	$Rz = 21,990 \mu\text{m}$

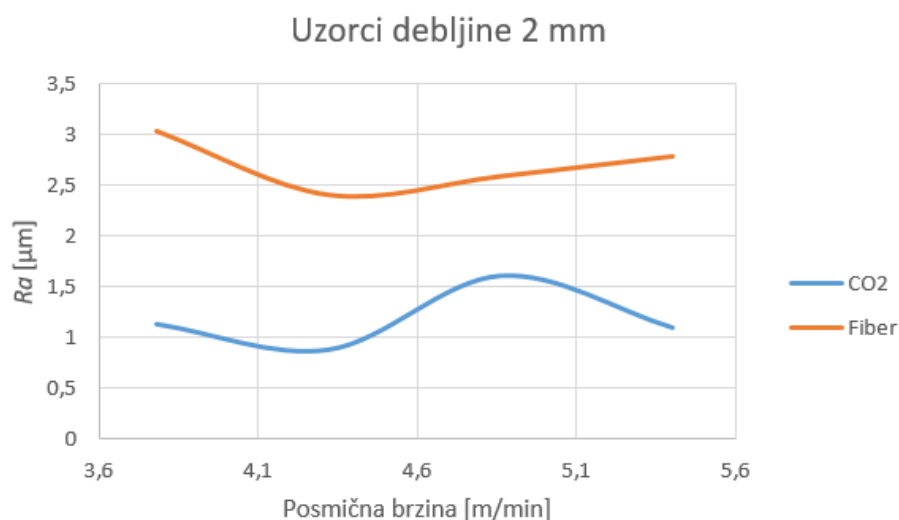
Slika 33. Graf ovisnosti  $Ra$  o posmičnoj brzini

Kod debljine od 4 mm najbolja kvaliteta je ostvarena u području brzina 1,68 m/min i 1,89 m/min, a površinska hrapavost je i dalje manja kod reza dobivenog CO<sub>2</sub> laserom dok razlika u veličini srha više nije toliko izražena.

Tablica 12. Uzorci debljine 2 mm

Posmična brzina	3,78 m/min	4,32 m/min	4,86 m/min	5,4 m/min
CO <sub>2</sub> laser				
				

	$Ra = 1,133 \mu\text{m}$ $Rq = 1,420 \mu\text{m}$ $Rz = 6,058 \mu\text{m}$	$Ra = 0,877 \mu\text{m}$ $Rq = 1,089 \mu\text{m}$ $Rz = 4,590 \mu\text{m}$	$Ra = 1,616 \mu\text{m}$ $Rq = 2,024 \mu\text{m}$ $Rz = 7,707 \mu\text{m}$	$Ra = 1,097 \mu\text{m}$ $Rq = 1,354 \mu\text{m}$ $Rz = 5,855 \mu\text{m}$
<b>Fiber laser</b>	 $Ra = 3,043 \mu\text{m}$ $Rq = 3,712 \mu\text{m}$ $Rz = 15,457 \mu\text{m}$	 $Ra = 2,414 \mu\text{m}$ $Rq = 2,977 \mu\text{m}$ $Rz = 12,503 \mu\text{m}$	 $Ra = 2,597 \mu\text{m}$ $Rq = 3,217 \mu\text{m}$ $Rz = 14,955 \mu\text{m}$	 $Ra = 2,794 \mu\text{m}$ $Rq = 3,694 \mu\text{m}$ $Rz = 18,860 \mu\text{m}$

Slika 34. Graf ovisnosti  $Ra$  o posmičnoj brzini

Prilikom rezanja uzoraka 2 mm debljine najmanja površinska hrapavost je i kod jednog i kod drugog lasera dobivena brzinom od 4,32 m/min. Gledajući rezultate oba lasera, fiber se u ovom slučaju najviše približio CO<sub>2</sub> laseru, no i dalje ostvaruje rez slabije kvalitete površine. Oba lasera su ostvarila rez bez srha na donjoj površini.

## 5.8. Zaključak

Iako se očekivalo da će površina reza nastalog na fiber laseru biti manje hrapavosti, ispitivanje u ovome radu opovrgnulo je tu pretpostavku. Kod svih debljina, rez dobiven CO<sub>2</sub>

laserom manje je površinske hrapavosti, no na donjoj površini došlo je do stvaranja većeg srha, nego kod fiber lasera. Taj srh je u proizvodnji potrebno ukloniti što povećava njezine troškove.

Iz slike 35 vidljivo je da je kod označavanja, odnosno graviranja aluminija puno ljepši izgled gravure dobiven fiber laserom.



**Slika 35. Izgled gravure**

Fiber laser lakše i bez tragova na gornjoj površini probija materijal, dok na uzorcima rezanim na CO<sub>2</sub> laseru na gornjoj površini ostaju tragovi proboja. Također, bitno je u obzir uzeti i činjenicu da su parametri brzine i snage na fiber laseru bili znatno smanjeni. Upravo je brzina rezanja fiber lasera najveća prednost u odnosu na CO<sub>2</sub> laser.



**Slika 36. Tragovi proboja na gornjoj površini materijala debljine 8 mm (lijevo – fiber laser, desno – CO<sub>2</sub> laser)**

Promatrajući promjenu kvalitete reza promjenom posmične brzine prilikom rezanja jednog uzorka, može se zaključiti da je površina reza najbolje kvalitete pri brzini od 0,238 m/min za debljinu 8 mm, odnosno 4,32 m/min kad se radi o uzorku debljine 2 mm. Na uzorku čija je debljina 6 mm, CO<sub>2</sub> laser postiže najmanju površinsku hrapavost posmičnom brzinom od 0,8 m/min, a fiber laser brzinom od 0,7 m/min. Kod uzorka debljine 4 mm najbolji rezultati u pogledu površinske hrapavosti dobiveni su posmičnom brzinom fiber lasera od 1,89 m/min te 1,68 m/min kod CO<sub>2</sub> lasera. Kod većih debljina materijala kvaliteta znatno pada povećanjem brzine iznad navedenih vrijednosti, dok je kod tanjih materijala slučaj da nema prevelikih promjena u kvaliteti bez obzira na promjenu posmične brzine.

## 6. ZAKLJUČAK

Lasersko rezanje je postupak obrade materijala u kojem se koristi laserski snop visoke energije za izrezivanje, bušenje ili označavanje različitih vrsta materijala. Zbog svoje visoke preciznosti i brzine ima široku primjenu u industriji. Bitno je u izvedbi samog postupka pravilno odrediti parametre procesa kako bi se dobio što bolji rezultat s minimalnom potrebom za naknadnom obradom. Operacije rezanja u proizvodnim pogonima najčešće se nalaze na samim počecima toka materijala kroz proizvodnju. Stoga je važno da one budu izvršene što kvalitetnije uz što manji utrošak vremena. Gledajući kroz povijest, tehnologija lasera je brzo rasla, dolaskom novih materijala i stjecanjem novih znanja razvijane su novije inačice strojeva nastojeći eliminirati mane svojih prethodnika. Metodom pokušaja i promašaja nastale su brojne vrste strojeva za lasersko rezanje, a one se razvijaju i dalje.

U ovome je radu, ispitivanjem na uzorcima legure aluminijska AlMg3 debljina 2 mm, 4 mm, 6 mm i 8 mm, dana usporedba između postupka rezanja primjenom CO<sub>2</sub> lasera i fiber lasera. Iako se prema teorijskim izvorima očekivala bolja kvaliteta rezne površine kod fiber lasera, ispitivanjem u sklopu ovog rada dokazano je da je površinska hrapavost manja kod reza nastalog na CO<sub>2</sub> laseru. Zasižno je fiber laser u prednosti ako je riječ o brzini rezanja koja za sobom povlači i produktivnost, a bolje se pokazao i kod označavanja materijala jer daje oznaku ili gravuru ljepše teksture i izgleda. Prilikom rezanja debljih materijala u slučaju kada su konture vrlo blizu jedna drugoj također se prednost stavlja na stranu fiber lasera jer će kod proboja CO<sub>2</sub> laser na gornjoj površini materijala ostaviti trag i rastaljeni materijal, što će narušiti izgled proizvoda, a moguće i uporabna svojstva. Uz spomenute prednosti, fiber laseru u prilog ide i činjenica da ostavlja manji ili gotovo nikakav srh na mjestu izlaska zrake iz materijala dok je na donjoj površini uzoraka nastalih primjenom CO<sub>2</sub> lasera srh znatno izraženiji te zahtijeva naknadno uklanjanje. Ako je iz nekog razloga pri rezanju legura aluminijska potrebno ostvariti rez što manje površinske hrapavosti, bez obzira na druge spomenute činjenice, na temelju ovog rada zasižno se predlaže upotreba CO<sub>2</sub> lasera.

## LITERATURA

- [1] Nikola Jelić, Klasifikacija nepravilnosti pri toplinskom rezanju, završni rad 2017., pristup 10.10.2023.
- [2] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser>, pristup 10.10.2023.
- [3] Sašo Nikolovski, Kvaliteta obrade pri rezanju laserom, završni rad 2018., pristup 10.10.2023.
- [4] <https://www.trgostal-lubenjak.hr/Strojevi/Stroj/21-tci-cutting---strojevi-za-rezanje-laserom%2C-vodom-i-plazmom>, pristup 10.10.2023.
- [5] [https://hr.wikipedia.org/wiki/CO2\\_laser](https://hr.wikipedia.org/wiki/CO2_laser), pristup 11.10.2023.
- [6] <https://circuitglobe.com/ndyag-laser.html>, pristup 15.10.2023.
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber\\_laser](https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_laser), pristup 15.10.2023.
- [8] <https://fractory.com/fibre-lasers-explained/>, pristup 15.10.2023.
- [9] Ivica Garašić, Lasersko zavarivanje, prezentacija s predavanja, pristup 20.10.2023.
- [10] <https://www.aliexpress.com/item/1005002310499598.html>, pristup 20.10.2023.
- [11] <https://machinehub.com/listings/256828-trumpf-trulaser-3030-2006-4-000-watt-co2-laser>, pristup 17. 11. 2023.
- [12] Upute za rad TC L 3030, TC L 4030, TC L 6030, 2005., pristup 17. 11. 2023.
- [13] Upute za uporabu TruLaser 3030 (L49) TruLaser 3040 (L50), 2016., pristup 17.11.2023.
- [14] <https://www.dax-metallform.de/?p=776>, pristup 18.11.2023.
- [15] <https://emetal.eu/hr/AW-5754/>, pristup 18.11.2023.