

Utjecaj brzine rezanja i položaja žarišta na kvalitetu laserskog rezanja aluminijske legure EN AW 5754

Arih, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:896442>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**

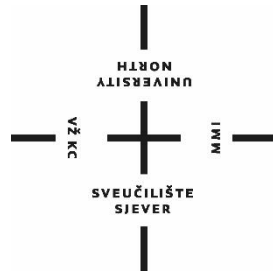


Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



DIPLOMSKI RAD br.
086/STR/2023

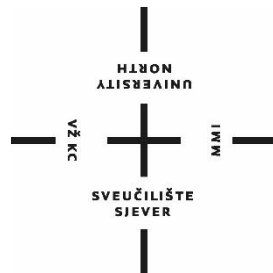
**Utjecaj brzine rezanja i položaja žarišta na
kvalitetu laserskog rezanja aluminijske
legure EN AW 5754**

Antonio Arih, 5862/336

Varaždin, srpanj 2023. godine

Varaždin, srpanj 2023. godine

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Diplomski studij strojarstvo



DIPLOMSKI RAD br.
086/STR/2023

**Utjecaj brzine rezanja i položaja žarišta na
kvalitetu laserskog rezanja aluminijske
legure EN AW 5754**

Student: Antonio Arih, 5862/336 Mentor: doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj.

Varaždin, srpanj 2023. godine

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarsvo

PRISTUPNIK Antonio Arih

JMBAG 0035207490

DATUM 20.06.2023.

KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA Utjecaj brzine rezanja i položaja žarišta na kvalitetu laserskog rezanja aluminijske legure EN AW 5754

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Influence of cutting speed and focus position on the cut quality in laser cutting of aluminium alloy EN AW 5754

MENTOR dr. sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić, predsjednica povjerenstva
2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
3. doc. dr. sc. Tanja Tomić, član povjerenstva
4. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, zamjenski član
- 5.

Zadatak diplomskog rada

BROJ 086/STR/2023

OPIS

U teoretskom dijelu diplomskog rada na osnovi podataka iz literature potrebno je opisati tehnologiju laserskog rezanja metala. U uvodnom dijelu rada definirati što je laser te kako se razvila laserska tehnologija. Nadalje, dati pregled gradnje laserskih izvora te objasniti princip rada lasera. Navesti utjecajne parametre pri laserskom rezanju te procijeniti njihov utjecaj na konačna svojstva proizvoda. Navesti vrste lasera koji se koriste za rezanje metala u suvremenoj proizvodnji te usporediti njihova svojstva i način rada.

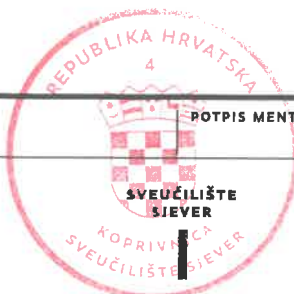
U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je definirati plan pokusa kojim će se ispitati utjecaj brzine rezanja i položaja žarišta na konačna svojstva izrezanog proizvoda pri laserskom rezanju aluminijske legure EN AW 5754 debljine 8 mm. Na izrezanim uzorcima izmjeriti dimenzije, površinsku hrapavost, te količinu troske. Provesti navedena ispitivanja i analizirati dobivene rezultate. Prema rezultatima ispitivanja preporučiti prikladne parametre i donijeti vlastiti zaključak o provedenom eksperimentu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

5.07.2023.

POTPIS MENTORA

M. Bušić



Sveučilište
SjeverIZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

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

Ja, Antonio Arih (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi diplomskog rada pod naslovom **Utjecaj brzine rezanja i položaja žarišta na kvalitetu laserskog rezanja aluminijske legure EN AW 5754** (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

ANTONIO ARIH
(vlastoručni potpis)

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

Ja, Antonio Arih (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog/diplomskog rada pod naslovom **Utjecaj brzine rezanja i položaja žarišta na kvalitetu laserskog rezanja aluminijske legure EN AW 5754** (upisati naslov) čiji sam autor.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

ANTONIO ARIH
(vlastoručni potpis)

Predgovor

Ovim putem zahvaljujem svom mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na mentorstvu te savjetima i vodstvu prilikom izrade ovog diplomskog rada. Nadalje, zahvaljujem roditeljima, djevojci, obitelji i prijateljima na pruženoj podršci, razumijevanju i strpljenju kroz cjelokupni studij. Osim toga, zahvalio bih i tvrtkama „Dekor Tvornica Rasyjete d.o.o.“ i „Izvor - KA d.o.o.“ na pruženoj tehničkoj podršci, opremi i materijalu potrebnim za izradu eksperimentalnog dijela ovog diplomskog rada.

Antonio Arih

Sažetak

Tema ovog diplomskog rada je proučavanje utjecaja dvaju parametara kod laserskog rezanja na kvalitetu rezne površine. Kao materijal ispitivanja odabrana je aluminijska legura AlMg3 (EN AW 5754) u obliku limene ploče debljine 8 mm. Aluminijske legure spadaju u teško rezljive materijale zbog svoje visoke reflektivnosti i toplinske provodnosti. Uzorci na kojima su provedena ispitna mjerenja izrezani su pomoću fiber lasera snage 10 kW. Prvi dio ovog rada daje pregled razvoja lasera kao tehnologije te osnovne pojmove i načela rada lasera. Nakon toga definirani su osnovni pojmovi i mehanizmi vezani uz tehnologiju laserskog rezanja. Drugi dio ovog rada je eksperimentalan, a u njemu su definirani svi parametri izvedenog pokusa te je opisan postupak kod pripreme uzoraka i provođenja mjerenja. Nakon toga, izmjereni podaci su obrađeni i prikazani te je analiziran utjecaj brzine rezanja i položaja žarišne točke na kvalitetu reza.

Ključne riječi: laser, lasersko rezanje, parametri, kvaliteta rezne površine

Abstract

The goal of this master's thesis is to study the influence of two laser cutting parameters on cut surface quality. AlMg3 (EN AW 5754) aluminum alloy is chosen as a sample material in form of 8 mm thick sheet. Aluminum alloys represent materials group that are hard to cut because of their high reflectivity and heat conductivity. 10 kW fiber laser cutting machine is used to cut the samples. The history of laser technology development along with key terms and principles of laser technology are described in first part of this thesis. Then, the terms and mechanisms of laser cutting technology are defined. The second, experimental, part of this thesis is where parameters of conducted experiment are defined. The details of sample preparation and conducted measurements are described. After that the data show along with analysis of cutting speed and focal point position influence on laser cut surface quality.

Keywords: laser, laser cutting, parameters, cut surface quality

Popis korištenih kratica

CNC – računalno numeričko upravljanje (eng. Computer Numerical Control)

USM – ultrazvučna obrada (eng. Ultrasonic Machining)

WJM – obrada vodenim mlazom (eng. Water Jet Machining)

AWJM – obrada abrazivnim vodenim mlazom (eng. Abrasive Water Jet Machining)

IJM – obrada mlazom leda (eng. Ice Jet Machining)

EDM – obrada elektroerozijom (eng. Electric Discharge Machining)

EBM – obrada elektronskim snopom (eng. Electron Beam Machining)

LBM – obrada laserskom zrakom (eng. Laser Beam Machining)

IBM – obrada ionskim snopom (eng. Ion Beam Machining)

PBM – obrada plazmom (eng. Plasma Beam Machining)

CHM – kemijsko glodanje (eng. Chemical Milling)

PCM – fotokemijska obrada (eng. Photochemical Machining)

ECM – elektrokemijska obrada (eng. Electrochemical Machining)

ZUT – zona utjecaja topline

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Laser kao tehnologija	5
2.1. Povijesni razvoj LASER-a.....	6
2.2. Princip rada.....	8
2.3. Komponente laserskog izvora	10
2.3.1. Izvor pumpanja	10
2.3.2. Aktivni medij	11
2.3.3. Optički rezonator	13
3. Lasersko rezanje	15
3.1. Mehanizmi rezanja	16
4. Parametri laserskog rezanja.....	18
4.1. Snaga	18
4.2. Brzina rezanja	19
4.3. Pomoćni plin.....	22
4.4. Položaj žarišta (fokus)	23
4.5. Udaljenost sapnice od radnog komada	24
4.6. Vrsta i promjer sapnice.....	25
5. Najčešći tipovi lasera za rezanje u industriji	26
5.1. CO ₂ laser	26
5.2. Impulsni Nd:YAG laser.....	27
5.3. Fiber laser	28
5.4. Usporedba lasera	29
5.5. Izvedbe strojeva.....	30
6. Eksperimentalni dio.....	33
6.1. Materijal.....	33
6.2. Stroj za lasersko rezanje - Bystronic Bystar Fiber 3015	34

6.3.	Plan pokusa.....	37
6.3.1.	Uzorci.....	37
6.3.2.	Plan rezanja	38
6.4.	Priprema rezanja	39
6.5.	Izrezivanje uzoraka.....	43
6.6.	Mjerenja.....	46
6.6.1.	Dimenzijska točnost.....	46
6.6.2.	Površinska hrapavost	49
6.6.3.	Kutnost.....	52
6.6.4.	Količina troske	54
6.7.	Analiza rezultata	56
6.7.1.	Analiza dimenzijske točnosti	56
6.7.2.	Analiza hrapavosti rezne površine	58
6.8.	Analiza kutnosti	60
6.9.	Analiza količine troske	61
7.	Zaključak.....	64
8.	Literatura	66
	Popis slika	68
	Popis tablica	71

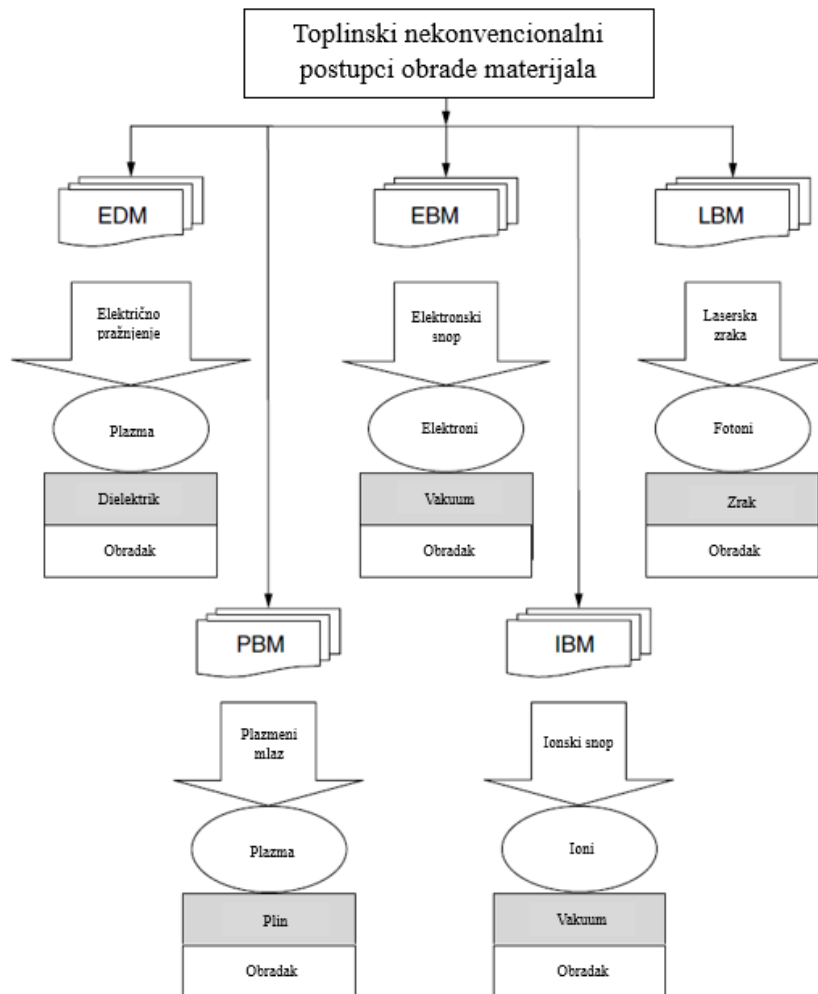
1. Uvod

Ubrzanim razvojem ljudske znanosti i tehnologije javlja se konstantna potreba za unaprjeđenjem postojećih i nalaženjem novih tehnoloških postupaka kako bi se mogli zadovoljiti sve stroži zahtjevi tržišta. Iz tog razloga, posebice u drugoj polovici 20. stoljeća, počeo je ubrzan razvoj novih postupaka obrade koji bi mogli unaprijediti ili zamijeniti postojeće. Govoreći o postupcima obrade odvajanjem čestica, prvotno je naglasak bio na automatizaciji i ubrzanju postupaka koji su doveli do razvoja modernih CNC strojeva. Ipak, koliko god napredne i poboljšane tehnologije kao što su bušenje, glodanje i tokarenje, one i dalje pripadaju tradicionalnim, odnosno konvencionalnim tehnologijama obrade. Glavno obilježje tradicionalnih tehnologija obrade jest da se alat i obradak nalaze u međusobnom direktnom kontaktu. Nadalje, osnovni princip obrade kod ovog tipa tehnologija je mehaničko odvajanje čestica materijala s obratka u obliku strugotine s ciljem postizanja traženih dimenzija i kvalitete površine. Iz tog razloga, preduvjet uspješne obrade kod konvencionalnih postupaka je da materijal alata, odnosno, rezne oštrice bude tvrdi od materijala obratka. Korištenje svih tradicionalnih tehnologija oblikovanja i obrade materijala u pravilu zahtijeva dodatnu obradu, odnosno, potrebno je kombinirati više različitih postupaka obrade kako bi se došlo do gotovog izratka [1, 2]. Tehnologije koje se nazivaju nekonvencionalnima počele su se također razvijati u drugoj polovici 20. stoljeća. Razlog tome je ubrzan razvoj novih inženjerskih materijala sa modificiranim i poboljšanim svojstvima koje je bilo teže obrađivati do tad postojećim tehnologijama. Uz to, proizvodi su počeli postajati sve kompleksniji i manji, a zahtjevi za preciznim tolerancijama i visokom kvalitetom površine sve stroži. Danas nekonvencionalni postupci obrade pronalaze sve širu primjenu u proizvodnim procesima različitih industrija. Od tradicionalnih postupaka razlikuju se u tome da nije potreban direktan kontakt alata i obratka, alat ne mora biti tvrdi od obratka kako bi se postigla obrada, a glavni utjecaj na obradivost nekog materijala više nemaju njegova mehanička, već njegova fizikalna svojstva. Također, tim postupcima moguće je postići znatno veću kvalitetu površine i uže tolerancije s vrlo malom ili nikakvom potrebom za dodatnim operacijama. Nekonvencionalni postupci obrade mogu se podijeliti na više načina, primjerice, ovisno o mehanizmu kojim se ostvaruje djelovanje na obradak, načinu prijenosa energije te vrsti energije koja se koristi. Prema vrsti korištene energije, nekonvencionalne tehnologije mogu se podijeliti na mehaničke, toplinske te kemijske i elektrokemijske [1]. Navedena podjela je prikazana u tablici 1.

Tablica 1: Podjela nekonvencionalnih tehnologija obrade prema obliku korištene energije [1]

Nekonvencionalni postupci obrade materijala	
Mehanički postupci	USM – ultrazvučna obrada (eng. Ultrasonic Machining)
	WJM – obrada vodenim mlazom (eng. Water Jet Machining)
	AWJM – obrada abrazivnim vodenim mlazom (eng. Abrasive Water Jet Machining)
	IJM – obrada mlazom leda (eng. Ice Jet Machining)
Toplinski postupci	EDM – obrada elektroerozijom (eng. Electric Discharge Machining)
	EBM – obrada elektronskim snopom (eng. Electron Beam Machining)
	LBM – obrada laserskom zrakom (eng. Laser Beam Machining)
	IBM – obrada ionskim snopom (eng. Ion Beam Machining)
	PBM – obrada plazmom (eng. Plasma Beam Machining)
Kemijski i elektrokemijski postupci	CHM – kemijsko glodanje (eng. Chemical Milling)
	PCM – fotokemijska obrada (eng. Photochemical Machining)
	ECM – elektrokemijska obrada (eng. Electrochemical Machining)

Lasersko rezanje, koje je tema ovog diplomskog rada, spada u toplinske nekonvencionalne tehnologije obrade. Mehanizam obrade materijala kod ovih tehnologija leži u taljenju ili isparavanju materijala obratka. Ovisno o tehnologiji, postoji potreba za posebnom vrstom atmosfere za prijenos medija. Kod lasersko rezanja u većini slučajeva koristi se pomoćni plin koji ima i zaštitnu funkciju, no samo rezanje moguće je ostvariti i u atmosferi običnog zraka. Na slici 1. shematski su prikazani nekonvencionalni toplinski postupci obrade uz princip djelovanja i medij koji je potreban za prijenos energije [1].



Slika 1: Toplinski nekonvencionalni postupci obrade materijala [1]

U današnje vrijeme tržište strojeva za lasersko rezanje bilježi trend rasta. Ova tehnologija pronalazi primjenu u sve više proizvodnih pogona, bilo da je riječ o manjim tvrtkama ili velikim industrijskim postrojenjima. Razlog tome je mogućnost da se laserskim rezanjem proizvedu više ili manje složeni dijelovi visoke kvalitete u vrlo kratkom vremenu bez potrebe za dodatnom obradom. Uz to, spektar materijala i debljina koje je moguće precizno rezati vrlo je velik pa ova tehnologija omogućava zadovoljavanje zahtjeva tržišta. Prema izvještaju agencije za istraživanje tržišta Fortune Business Insights, sve veća implementacija industrije 4.0 pozitivno utječe na razvoj i tržište laserskog rezanja, zbog toga se očekuje rast tržišta do 2030. godine. Neki od najznačajnijih proizvođača strojeva za lasersko rezanje u ovom trenutku su TRUMPF, FANUC Corporation, AMADA MACHINE TOOLS CO., Bystronic Laser AG, JENOPTIK AG i drugi [3].

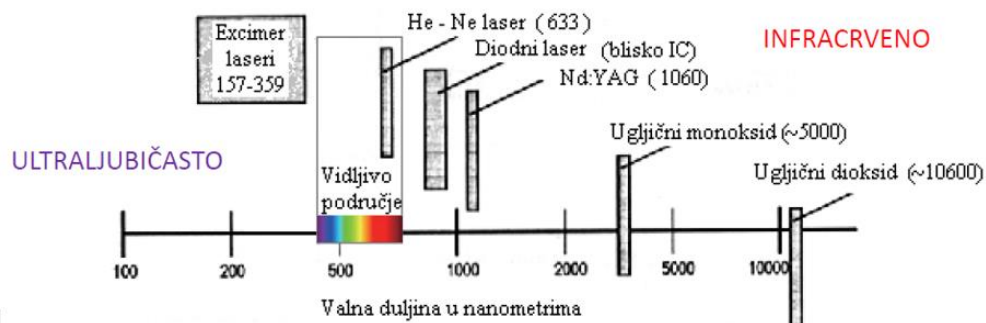
U nastavku ovog rada detaljnije je obrađena tehnologija laserskog rezanja uz prikaz razvoja ove tehnologije i vrsta strojeva za lasersko rezanje. Opisan je princip rada strojeva za lasersko rezanje uz objašnjenje najznačajnijih parametara, a uz to je opisana mogućnost rezanja najčešće korištenih tehničkih materijala. U praktičnom dijelu rada istražen je utjecaj brzine rezanja i žarišne udaljenosti na kvalitetu laserskog rezanja aluminijske legure AlMg3 (EN AW 5754).



Slika 2: Važnost i primjena lasera u modernoj industriji u konstantnom je porastu [4]

2. Laser kao tehnologija

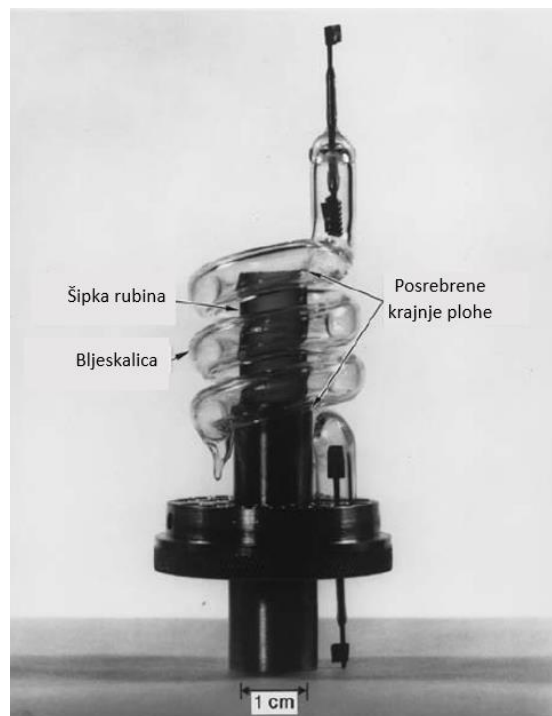
Naziv ove tehnologije zapravo predstavlja akronim naziva na engleskom jeziku Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (eng. pojačanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja). U osnovi, laser se može opisati kao uređaj koji generira svjetlost koja je koherentna, usmjerena i monokromatska. Koherentnost je svojstvo koje označava da svjetlosni valovi titraju u istoj fazi na istoj valnoj duljini. Ista valna duljina svih valova u snopu ukazuje na to da je svjetlost monokromatska, odnosno jednobojna. Osim toga, laserska svjetlost posjeduje iznimno malu divergenciju što znači da je usmjerena i može zadržati fokus na iznimno velikim udaljenostima. Laseri se mogu razlikovati po vrsti i agregatnom stanju aktivne tvari te načinu vođenja laserske zrake. Valna duljina na kojoj laser djeluje ovisi o vrsti lasera i danas postoji veliki broj varijanti od kojih samo manji dio ima industrijsku primjenu. Na slici 3 vidljiva je skala valnih duljina elektromagnetskog zračenja sa područjima djelovanja nekih od najčešće primjenjivanih tipova lasera. Posebno je označen vidljivi spektar svjetlosti koji se nalazi na valnim duljinama između 380 nm i približno 750 nm [5].



Slika 3: Neke vrste lasera s obzirom na valnu duljinu djelovanja [5]

2.1. Povijesni razvoj LASER-a

Prve ideje vezane uz budući razvoj lasera, izložio je Albert Einstein još 1916. godine kada je u svojim radovima spomenuo mogućnost da se iz atoma u pobuđenom stanju pomoću fotona može stimulirati emisija identičnih fotona. Od tog vremena, mnogi su se fizičari i inženjeri bavili tom tematikom [6]. Pedesetih godina prošlog stoljeća, više je znanstvenika sudjelovalo u svojevrsnoj „utrci“ za razvoj prvog funkcionalnog lasera. Neki od najznačajnijih bili su Charles H. Townes, Gordon Gould, Arthur Schalwow, Ali Javan i Theodore Maiman. Izum prvog funkcionalnog lasera danas se pripisuje Theodorean Maimanu. Prva laserska zraka proizvedena je 16. svibnja 1960. godine u prostorijama Hughes Research Laboratories. Kao aktivnu tvar Maiman je koristio štapić rubina. Na rubin je emitirao pulsirajuću bijelu svjetlost pomoću bljeskalice koja ga je obavijala. Krajnje plohe rubina bile su posrebrene i služile su kao zrcala. Na slici 4 prikazan je jedan od prvih Maimanovih lasera s označenim glavnim dijelovima [6].



Slika 4: Jedan od prvih lasera napravljenih od strane Theodorea Maimana sa šipkom rubina kao aktivnom tvari [6]

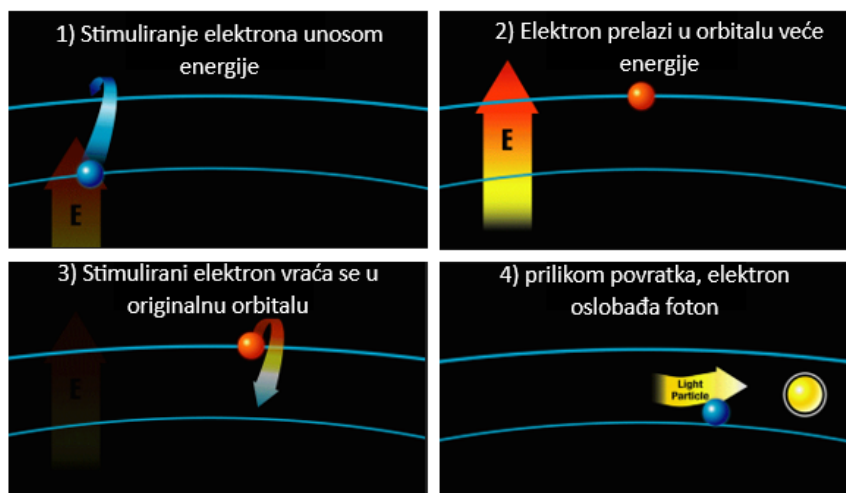
Nakon objave Maimanovg otkrića na tiskovnoj konferenciji u lipnju 1960. godine, unatoč sumnji nekih članova znanstvene zajednice, njegovi konkurenti Gould i Schawlow uspješno su izgradili funkcionalne lasere sa šipkom rubina samo na osnovi fotografija iz tiska [6]. Sam akronim LASER, skovao je Gould godinu dana prije Maimanovog otkrića. Nakon lasera s šipkom rubina, ubrzao se razvoj uređaja koji koriste druge vrste aktivnog medija, pa je tako već iste godine Ali Javan sa svojim suradnicima Williamom Bennetom i Donaldom Herriottom razvio prvi plinski He-Ne laser. Prvi diodni laser, odnosno, poluvodički laser predstavio je Robert Hall 1962. godine, aktivna tvar je bila dioda na bazi galija i arsena (GaAs). Poznata je izreka iz vremena pojave prvih lasera kako je riječ o „rješenju u potrazi za problemom“. Ubrzo nakon razvoja prvih funkcionalnih prototipova, počele su nastajati tvrtke koje su se bavile s razvojem i usavršavanjem laserske tehnologije. U potrazi za novim mogućim primjenama, znanstvenici i inženjeri unosili su nova poboljšanja u lasersku tehnologiju, a to je proces koji traje i danas [6].



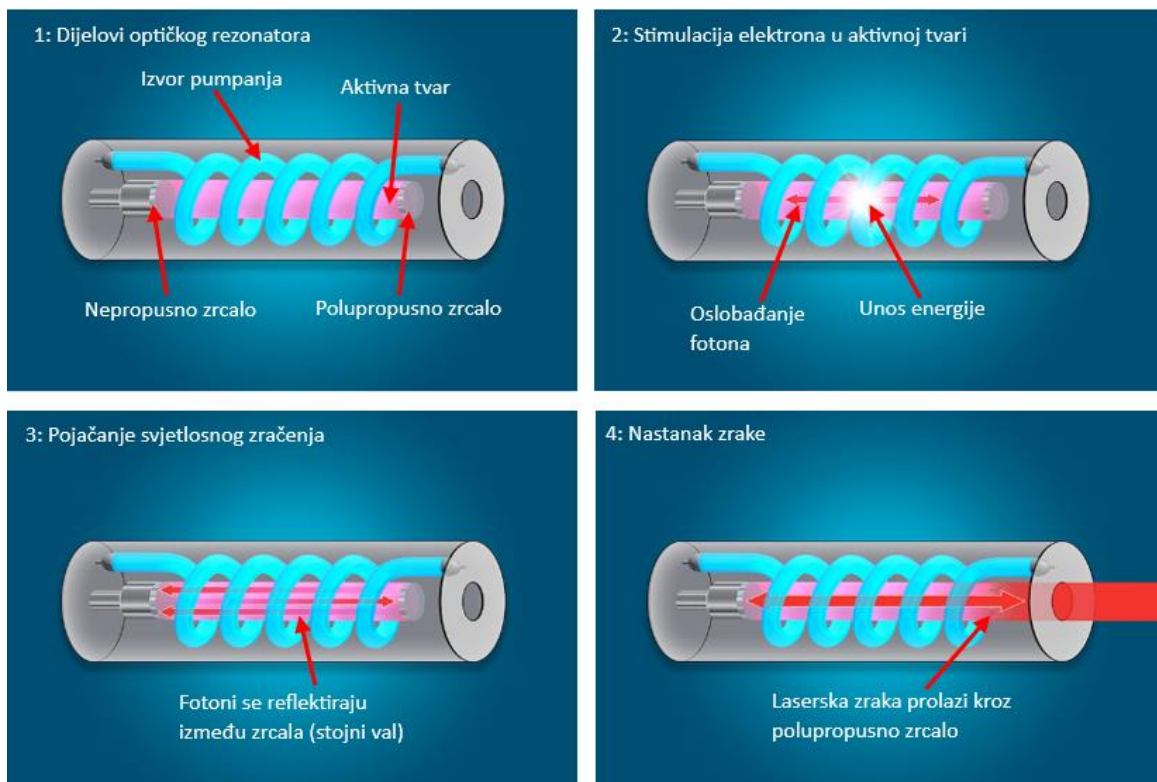
Slika 5: fotografija Theodorea Maimana s jednim od prvih lasera snimljena na press konferencija na kojoj je predstavio svoje otkriće [6]

2.2. Princip rada

Princip rada lasera temeljen je na kvantnom svojstvu atoma da zrače i apsorbiraju fotone, odnosno svjetlosne čestice. Za pobudu laserske zrake koristi se aktivni laserski medij koji služi kao izvor atoma. Unosom dodatne energije pomoću električne struje ili svjetlosti, elektroni se stimuliraju i dovode na višu energijsku razinu pri čemu „skaču“ u orbitalu više energije. Taj postupak naziva se optičko ili električno pumpanje. Nakon toga stimulirani elektroni se spontano ili uz pomoć dodatne stimulacije vraćaju u svoju prvobitnu orbitalu pri čemu dolazi do oslobađanja fotona. Valna duljina svjetlosti ovisi o energiji oslobođenoj prilikom skoka elektrona nazad u originalnu orbitalu [7]. Optički rezonator koristi se za pojačanje nastale svjetlosti. S jedne strane aktivnog medija nalazi se nepropusno, a s druge polupropusno zrcalo prilagođeno odgovarajućoj valnoj duljini svjetlosti. Oslobođeni fotoni reflektiraju se od nepropusnog zrcala natrag u aktivnu tvar uslijed čega stimuliraju emisiju novih, gotovo identičnih, fotona. Na taj način njihov broj i energija rastu, a između zrcala nastaje stojni val. Kada energija fotona dovoljno poraste, zraka velike energije prolazi kroz polupropusno zrcalo [5, 7].



Slika 6: Stimulirana emisija svjetlosti [7]



Slika 7: Nastanak laserske zrake[7]

Kao što je ranije navedeno, lasere je moguće podijeliti prema vrsti aktivne tvari, odnosno medija koji se koristi unutar optičkog rezonatora za pobudu zrake. O tome ovisi valna duljina svjetlosti koju laser generira, način „vođenja“ zrake i druge karakteristike uređaja poput načina pobude zrake, vrsta optike za fokusiranje zrake, kvalitete zrake i materijala optičkih komponenti. Osim toga, vrsta laserskog izvora, zajedno sa snagom zrake koju generira utječu na investicijske troškove prilikom uvođenja laserske tehnologije u proizvodni proces [5].

2.3. Komponente laserskog izvora

Osnovne komponente laserskog izvora mogu se svesti na izvor energije koji se još naziva i izvor pumpanja (eng. pump source), aktivni medij (eng. gain medium/laser medium) i optički rezonator (eng. optical resonator). Ovi dijelovi zajedno čine laserski oscilator (eng. laser oscillator). Uz navedeno, u sustav je moguće dodati jednu ili više razina pojačanja laserske zrake pomoću laserskog pojačala (eng. laser amplifier) [8].

2.3.1. Izvor pumpanja

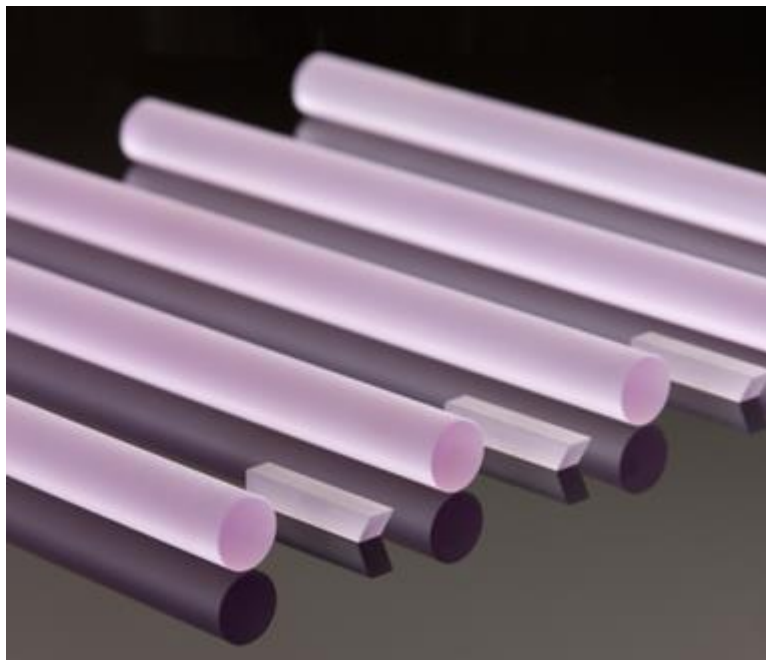
Izvor pumpanja (eng. pump source) komponenta je koja služi kao izvor energije lasera, a zadaća joj je da pomoću dovođenja svjetlosti aktivnom mediju izaziva pobudu elektrona kako je opisano u prethodnom poglavlju. Odabir prikladnog izvora pumpanja ovisi o vrsti aktivnog medija koji se koristi. Kod lasera s krutim medijem neki od najčešće korištenih izvora pumpanja su bljeskalice, elektrolučne svjetiljke i laserske diode. U tom slučaju riječ je o optičkim pumpama. Kod poluvodičkih lasera najzastupljenije je električno pumpanje iako i oni u nekim slučajevima mogu biti optički pumpani. Plinski laseri poput CO₂ lasera koriste električno pražnjenje u smjesi plinova kao izvor pumpanja. Fiber laseri koji spadaju u najsuvremeniji tip laserske tehnologije koriste poluvodičke diode. Obično se koriste jednostruko emitirajuće (eng. single emitter) diode, no u novije vrijeme na tržištu postaje dominantnije korištenje višestruko emitirajućih (eng. multi emitter) dioda. [5, 8, 9] U slučaju višestruko emitirajućih dioda, više dioda povezano je u seriju, a pomoću mikro-optičkih komponenti njihova energija fokusira se u optičko vlakno dopirano ionima rijetkih zemnih metala poput iterbija (Yb) koje predstavlja aktivni medij [9].



Slika 8: Diodni izvor pumpanja sa svjetlošću valne duljine 976 nm izlazne snage 300W [9]

2.3.2. Aktivni medij

Aktivni medij (eng. gain medium/laser medium) predstavlja tvar unutar koje, uslijed dovođenja energije pumpanjem, dolazi do stimulirane emisije zračenja. Drugim riječima, aktivni medij nalazi se unutar optičkog rezonatora i služi za pojačanje energije snopa svjetlosti koji prolazi kroz njega. Osim pojačanja, unutar njega se kompenziraju gubici energije nastali refleksijom svjetlosti unutar rezonatora pa iz tog razloga i proizlazi naziv „aktivni“ za razliku od ostalih optičkih komponenti unutar rezonatora koje su pasivne. Pojedini medij također se može koristiti i u laserskom pojačalu koje kao zasebna komponenta dolazi nakon laserskog izvora [10]. Theodore Maiman u svom laseru koristio je štapićasti kristal rubina kao aktivni medij. Danas postoji veliki broj različitih tvari koje se koriste u tu svrhu. One se razlikuju po agregatnom stanju i fizikalnim svojstvima, a o vrsti aktivne tvari ovisi i vrsta izvora pumpanja i način vođenja zrake od izvora te izlazne karakteristike lasera kao što su maksimalna ostvariva snaga i valna duljina svjetlosti. U tablici 2 navedeni su neki od najčešće korištenih aktivnih medija [10].



Slika 9: Nd:YAG (Itrij–Aluminij–Granat dopiran Neodimijem) u obliku monokristalnih štapića [11]

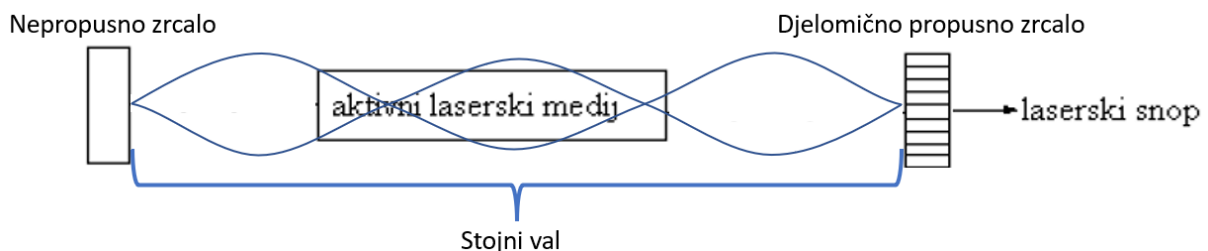
Tablica 2: Najznačajnije vrste laserskih aktivnih medija [10]

Vrsta aktivnog medija	Primjeri	Način pumpanja
Kruti mediji (kristali i stakla)	<ul style="list-style-type: none"> • Nd:YAG (Itrij–Aluminij–Granat dopiran Neodimijem) • Yb:YAG (Itrbij–Aluminij–Granat dopiran Itrbijem) • Er:YAG (Itrij–Aluminij–Granat dopiran Erbijem) • Staklena optička vlakna dopirana plemenitim zemnim ionima 	Optičko pumpanje (lampe, bljeskalice, diode)
Plinoviti medij	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ (Ugljikov dioksid) • He – Ne (Helij - Neon) • Mješavine plinova za Excimer lasere: ArF (Argon fluorid), KrF (Kripton fluorid), XeBr (Ksenon bromid), XeCl (Ksenon klorid) 	Električno pražnjenje naboja
Poluvodiči	<ul style="list-style-type: none"> • Laserske diode od različitih materijala: Galijev arsenid, Indij–Galij arsenid, Galijev nitrid 	Direktno električnom strujom
Tekući medij [12]	<ul style="list-style-type: none"> • Organske otopine bojila: kumarin, rodamin piridin, stilben, itd. 	Optičko pumpanje
Ostali mediji: Kemijski, Nuklearno pumpani, ondulatori kod lasera sa slobodnim elektronima		

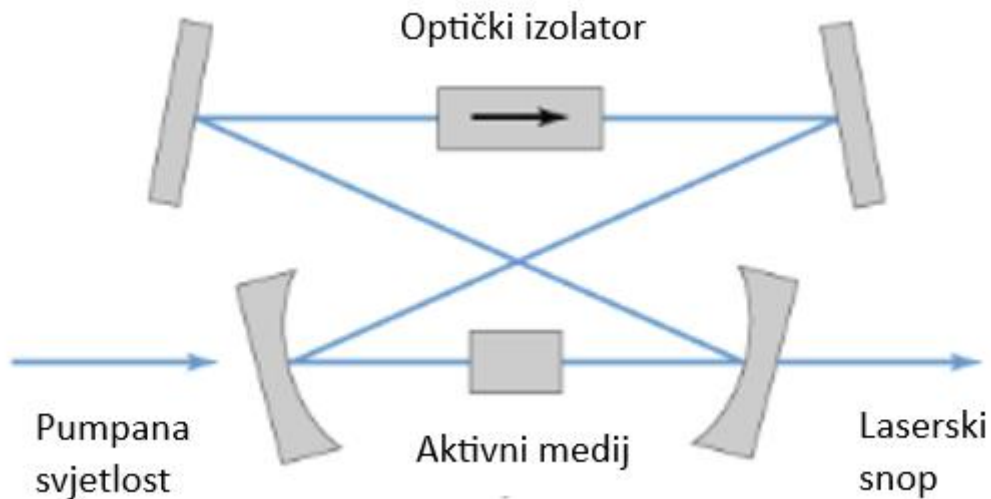
Važno je napomenuti da kruti laserski mediji osim u obliku kristala mogu biti i u obliku keramika. Prvobitno su korišteni samo monokristali jer bi se kod polikristalne strukture javljao lom svjetlosti na granicama zrna, no razvojem keramika i tehnika njihove proizvodnje (sinteriranje u vakuumu) omogućeno je da se raspored kristala u polikristalnoj strukturi može kontrolirati, a porozitet bude sveden na minimum. U tom slučaju, gubitci zbog loma svjetlosti svedeni su na razinu sličnu onoj kod monokristala. Kao materijal za keramičke medije se koristi Nd:YAG, Yb:YAG i drugi materijali. Neke od prednosti keramičkih krutih izvora nad monokristalima su manja cijena, mogućnost prilagodbe oblika i kombiniranje zona sa različitim svojstvima (različito dopirane zone u istom mediju) [13].

2.3.3. Optički rezonator

Optički rezonator u osnovi je sklop koji omogućava da generirana zraka svjetlosti cirkulira po nekoj zatvorenoj putanji. Optički rezonator je komponenta koja ima nekoliko različitih primjena, no u ovom slučaju riječ je o laserskom optičkom rezonatoru. Laserski optički rezonator predstavlja šupljinu koja sadrži aktivni medij u svojem središtu i optičke komponente koje reflektiraju zraku svjetlosti na način da ona prolazi kroz taj aktivni medij. Optički rezonator najčešće se javlja u dvije izvedbe. Prva sadrži dva ili više zrcala od kojih jedno djelomično propusno, na taj način dio svjetlosti izlazi iz rezonatora kao laserska zraka dok se dio nastavlja reflektirati unutar rezonatora. U drugoj izvedbi, zraka svjetlosti se ne reflektira između zrcala kroz prostor već biva vođena pomoću optičkog vlakna. Takva izvedba je karakteristična za fiber lasere. Kod nekih tipova fiber lasera, optički rezonator može biti u mješovitoj izvedbi odnosno kombinacija zrcala i optičkog vlakna. Nadalje, optički rezonator sa zrcalima može biti linearne ili prstenaste izvedbe. Linearni rezonator najjednostavnija je vrsta optičkog rezonatora. Svjetlost se reflektira između dva zrcala prilikom čega nastaje stojni val [14]. Stojni val u osnovi predstavlja val u kojem dolazi do superpozicije, odnosno zbrajanja dvaju valova koji imaju jednaku frekvenciju i amplitudu, a suprotan smjer širenja [15]. Kod prstenastih rezonatora svjetlost se reflektira u krug između više zrcala. Budući da se u tom slučaju svjetlost može reflektirati u dva smjera, koriste se optički izolatori kako bi se osiguralo kretanje zrake samo u jednom smjeru. Ove dvije izvedbe optičkog rezonatora prikazane su na slikama 10 i 11.



Slika 10: Linearni optički rezonator [5]



Slika 11: Prstenasta izvedba laserskog rezonatora: optički izolator sprječava povrat zrake [14]

Kao što je već spomenuto, kod fiber lasera optički rezonator izveden uz pomoć optičkih vlakana dopiranih rijetkim zemljanim ionima koja provode svjetlosni val. Optičko vlakno izvedeno je u više namotaja, a na krajevima se nalaze Braggove rešetke. Braggove rešetke ponašaju se kao zrcala koja reflektiraju svjetlost one valne duljine koja zadovoljava Braggov zakon. Drugim riječima, pomoću geometrije reflektivne površine rešetke moguće je regulirati koja valna duljina svjetlosti će biti reflektirana. Rešetka na izlaznom kraju optičkog vlakna u rezonatoru djelomično je propusna pa se manji dio svjetlosti reflektira u suprotnom smjeru kroz optičko vlakno, a dio izlazi kao laserska zraka. Namotaji optičkog vlakna javljaju se u različitim duljinama koje se mogu kretati od nekoliko metara, do nekoliko kilometara što omogućava da fiber laseri mogu postići vrlo velike izlazne snage [9]. Rezonator fiber lasera shematski prikazan je na slici 10.



Slika 12: Shematski prikaz rezonatora fiber lasera [9]

3. Lasersko rezanje

U ovom poglavlju opisana je tehnologija laserskog rezanja. Kao što je navedeno u tablici 1 u uvodnom poglavlju obrada materijala laserskom zrakom, u što se ubraja lasersko rezanje, spada u toplinske nekonvencionalne tehnologije. Kao alat u ovom postupku koristi se laserski snop visoke gustoće snage koji potječe iz laserskog izvora te se optičkim komponentama dovodi do glave laserskog stroja. Unutar glave, laserski snop se fokusira u jednu žarišnu točku koja se, ovisno o slučaju, može nalaziti iznad, na ili ispod površine materijala koji se obrađuje. U žarišnoj točki promjer laserske zrake je najmanji što osigurava najveću gustoću snage. Gustoća snage definirana je kao omjer snage i površine presjeka laserskog snopa [5].

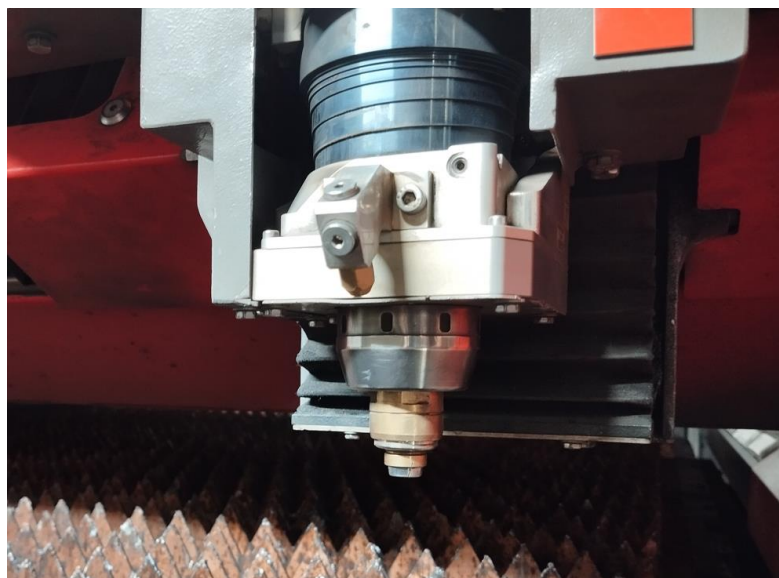
$$q = \frac{P}{A_f} \left[\frac{W}{\text{cm}^2} \right] \quad (1)$$

q – gustoća snage

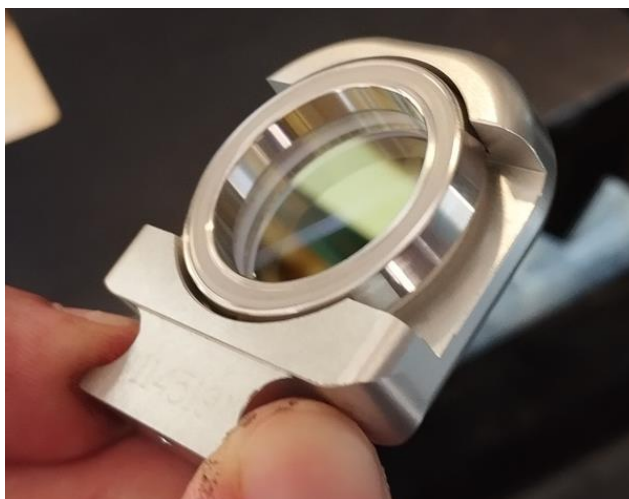
P – snaga

A_f – površina presjeka laserskog snopa u žarištu

Promjer laserskog snopa u žarišnoj točki može iznositi između 0,2 i 1 mm, a za fokusiranje se koristi fokusna optika u obliku leća ili zrcala. Interakcijom tako fokusiranog laserskog snopa sa materijalom, ostvaruje se lasersko rezanje nekim od ili kombinacijom mehanizama isparavanja, taljenja i izgaranja materijala [5].



Slika 13: Obradna glava lasera (Bystronic Bystar Fiber 3015)

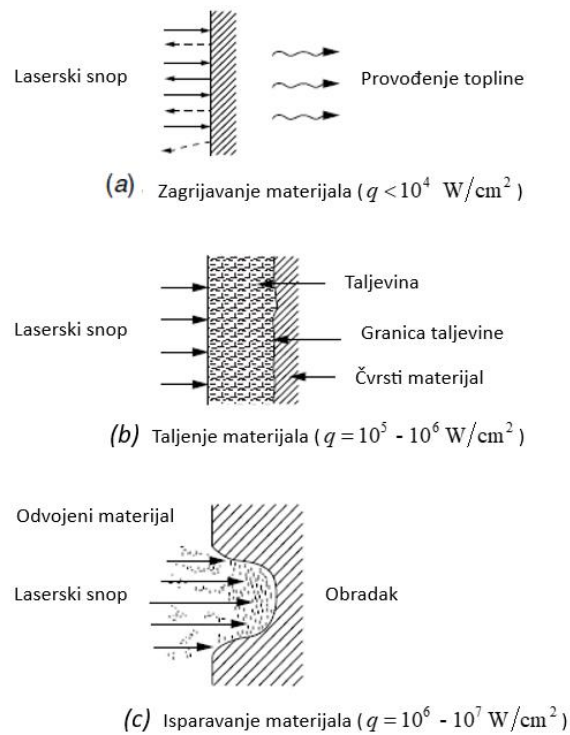


Slika 14: Izmjenjiva leća u držaču dio je fokusne optike (Senfeng SF3015G)

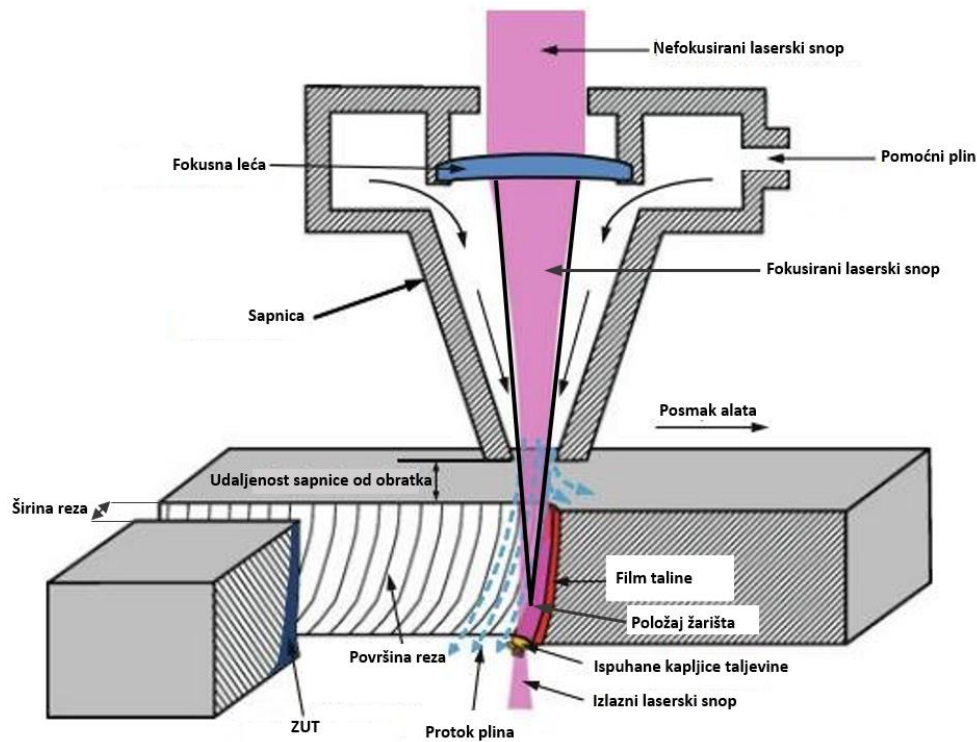
3.1. Mehanizmi rezanja

Kada laserski snop dođe u interakciju s površinom materijala, dio svjetlosne energije se reflektira dok se drugi dio apsorbira u materijal u obliku topline te se dalje prenosi mehanizmima prijenosa topline (kondukcija, konvekcija). Reflektirana energija, kao i ona koja se odvodi mehanizmima prijenosa topline, predstavlja gubitke, a da bi se rezanje laserskim snopom moglo ostvariti, gustoća dovedene snage mora biti veća od navedenih gubitaka. Manja gustoća snage potrebna je da se postigne zagrijavanje materijala. Njenim povećanjem javlja se prvo mehanizam taljenja materijala, zatim isparavanja, a kod velikih gustoća snage nastaje plazma. Iz navedenog je lako zaključiti da fizikalna svojstva poput reflektivnosti i toplinske provodnosti imaju velik utjecaj na mogućnost rezanja materijala. Materijali s velikom reflektivnošću poput aluminijske teže se i sporije režu od, primjerice ugljičnog čelika. Također, materijale visoke toplinske provodnosti poput bakra teže je rezati laserom. Vrijeme interakcije zrake s površinom također je važan faktor pa se za materijale koje je teže rezati koriste manje brzine rezanja. Općenito, mogućnost rezanja i kvaliteta rezanja ovise o parametrima i karakteristikama stroja za lasersko rezanje. Najvažniji parametri koje je potrebno definirati prilikom rezanja su snaga lasera, brzina rezanja, vrsta i tlak pomoćnog plina, položaj žarišta u odnosu na površinu obratka, udaljenost sapnice od površine obratka te promjer i vrsta sapnice. Uz navedeno, u nekim slučajevima potrebno je definirati dodatne parametre za inicijalno

„probijanje“, te frekvenciju impulsa u slučaju korištenja impulsne zrake. Najvažniji parametri biti će pobliže definirani u idućem poglavlju [1, 5].



Slika 15: Osnovni mehanizmi koji se javljaju prilikom interakcije laserskog snopa s materijalom [1, 5]



Slika 16: Shematski prikaz postupka laserskog rezanja [16]

4. Parametri laserskog rezanja

Kako bi postupak laserskog rezanja bio uspješan i kako bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta rezne površine potrebno je korištenje odgovarajućih procesnih parametara. Odabir odgovarajućih parametara ovisi o osobinama generiranog laserskog snopa kao što su valna duljina, gustoća energije te raspodjela energije po presjeku fokusiranog laserskog snopa odnosno kvaliteti laserskog snopa. Drugim riječima, za odabir optimalnih procesnih parametara važno je koja je vrsta lasera u pitanju. Njihov ispravan odabir ima direktan utjecaj na kvalitetu rezne površine. Parametri se u pravilu definiraju prije početka rezanja, no po potrebi, iskusni operater može ovisno o situaciji unositi izmjene i prilikom samog procesa rezanja [17]. Najvažniji parametri поближе su opisani u nastavku ovog poglavlja.

4.1. Snaga

Jedno od najvažnijih svojstava stroja za lasersko rezanje je njegova maksimalna snaga koja se označava s P [W]. Osim vrste lasera, odnosno valne duljine svjetlosti laserskog snopa, snaga lasera je najvažnije svojstvo koje utječe na to koje je materijale i koje debljine pojedinih materijala neki laser može rezati. Snaga lasera predstavlja energiju koju laserski izvor generira u jedinici vremena, a snaga podijeljena s površinom presjeka snopa daje gustoću energije. Što je gustoća energije u žarišnoj točki snopa veća, unos topline u materijal je brži što omogućava veće brzine rezanja i bolju kvalitetu reza. Ipak, potrebno je voditi računa o tome da ovisno o debljini i vrsti materijala, prevelika snaga može kao posljedicu imati veliku širinu reza i veću količinu troske, odnosno cundera. Veća snaga također omogućava rezanje materijala većih debljina kao i rezanje visoko reflektivnih materijala [17]. Usporedba utjecaja maksimalne snage između dvaju fiber lasera prikazana je u tablici 3.

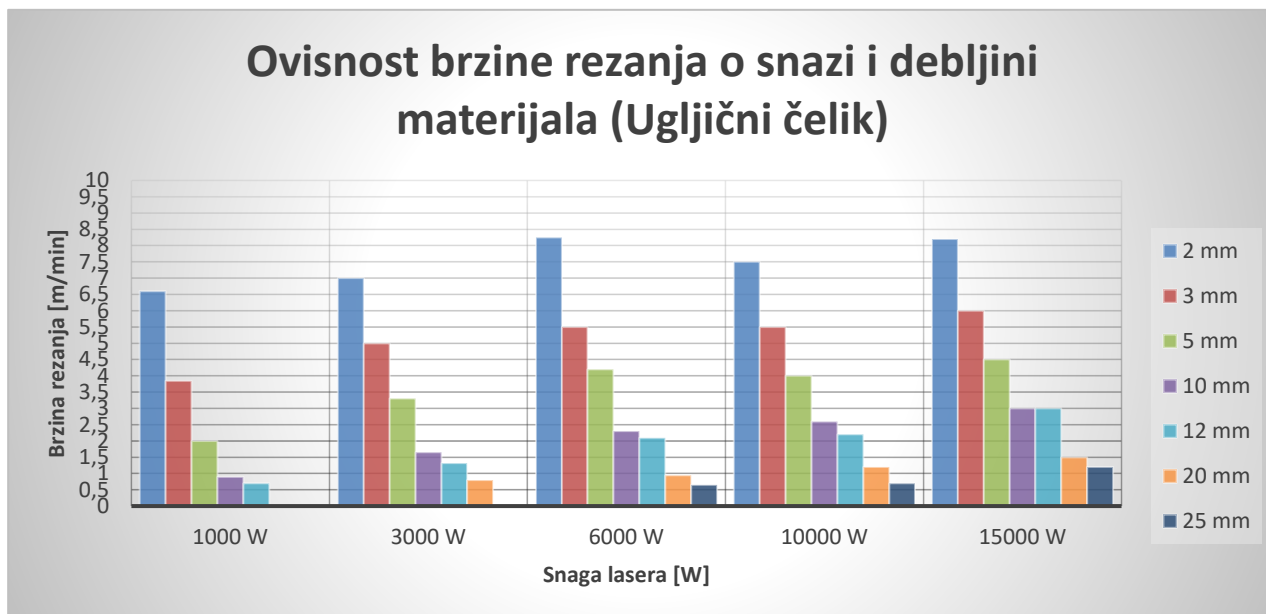
Tablica 3: Usporedba maksimalnih debljina rezanja između dva fiber lasera različitih snaga

Materijal	Senfeng	Bystronic Bystar	Maksimalna debljina
	SF3015G (3 kW)	Fiber 3015 (10 kW)	
Ugljični čelik	20 mm	25 mm - 30 mm	
Nehrdajući čelik	12 mm	30 mm	
Aluminij	8 mm	30 mm	
Bakar i njegove legure	6 mm	15 mm	

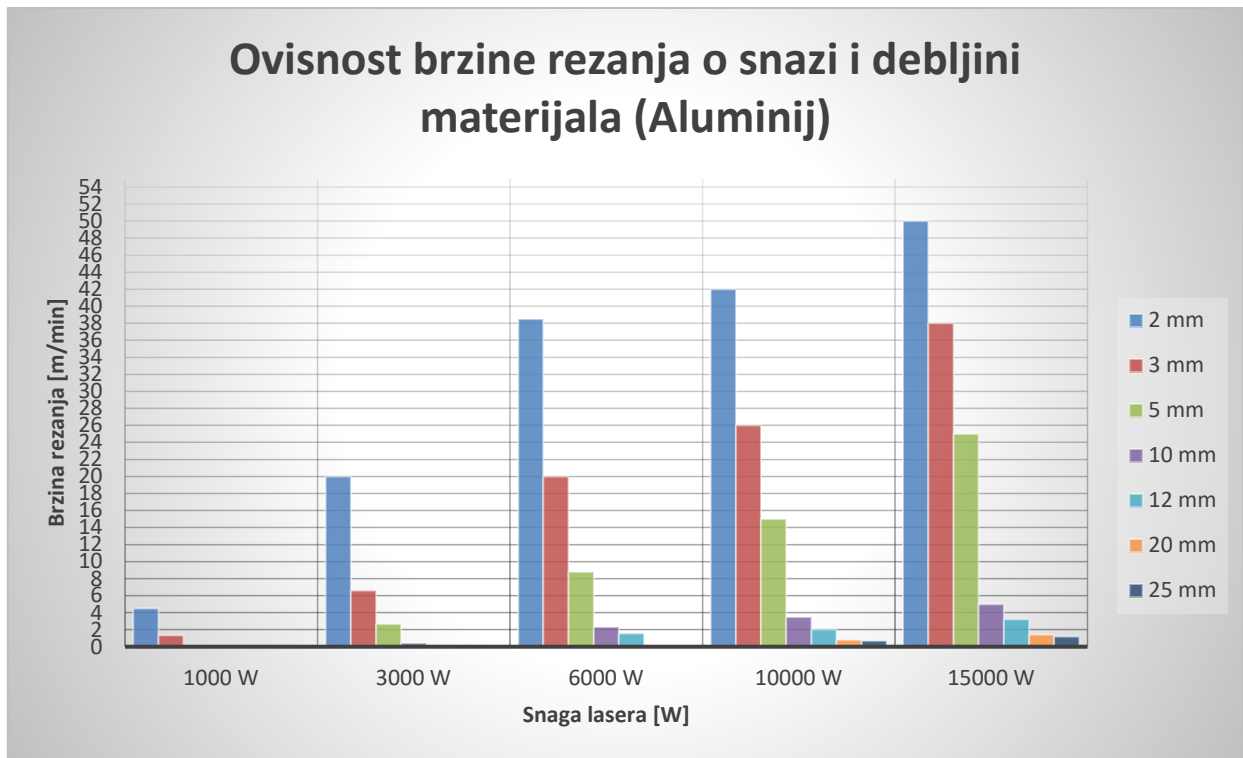
4.2. Brzina rezanja

Brzina rezanja koja se označava s v [mm/min] drugi je parametar koji ima značajan utjecaj na kvalitetu rezne površine. Posmak se na većini modernih strojeva ostvaruje relativnim gibanjem obradne glave u odnosu na radni komad koji miruje iako postoje i izvedbe strojeva kod kojih miruje obradna glava dok se gibanje ostvaruje pomicanjem radnog komada. S obzirom na to, maksimalna brzina obradne glave ograničena je karakteristikama stroja. Ipak, kada je riječ o brzini rezanja, tada utjecaj na odabir odgovarajuće brzine ima nekoliko važnih faktora. Kako bi se ostvarilo rezanje materijala, potrebno je unijeti određenu količinu energije. Ostatak energije koji nije utrošen na ostvarivanje samog reza predstavlja gubitke koji se ostvaruju refleksijom od površine, kondukcijom kroz materijal i transmisijom. [5] Gubici zbog kondukcije su dominantni i osim o fizikalnim svojstvima materijala, ovise o vremenu za koje se laserski snop nalazi na pojedinom mjestu. Drugim riječima, što je brzina rezanja manja, gubici će biti veći, a povećanjem brzine rezanja povećava se iskorištenost energije. Kako bi se rezanje uopće moglo ostvariti, brzina rezanja mora biti usklađena s vrstom i protokom korištenog pomoćnog plina, snagom lasera i debljinom rezanog materijala. Kod rezanja većih debljina materijala, brzina rezanja se smanjuje jer je potreban veći unos energije. Također, vrsta materijala ima utjecaj jer teže rezljivi materijali zahtijevaju veći unos energije i manje brzine rezanja. Strojevi koji ostvaruju manje snage u pravilu postižu manje brzine rezanja. Ako je korištena brzina rezanja u nekom slučaju prevelika, hrapavost rezne površine biti će veća kao i količina troske. U krajnjim slučajevima rezanje neće biti moguće ostvariti i neće doći do

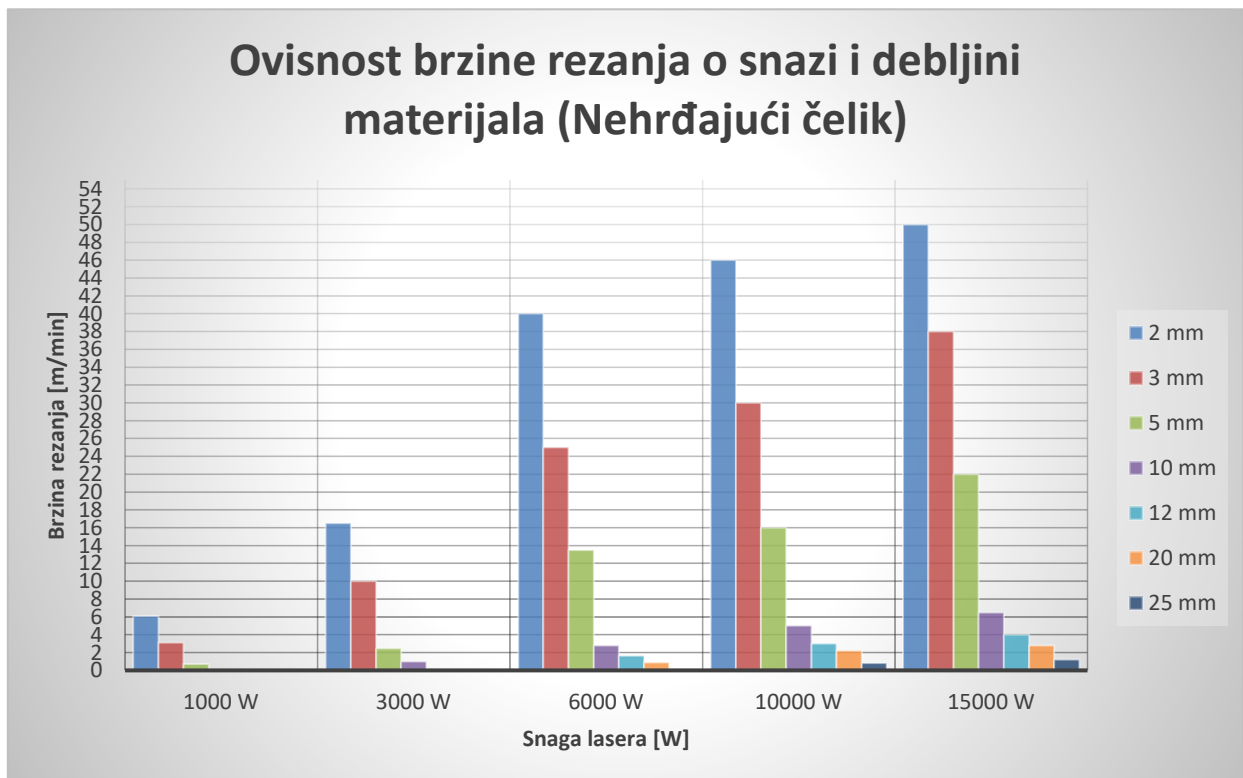
probijanja površine materijala. Pri premalim brzinama povećava se ZUT te se degradira kvaliteta rezne površine. Za ostvarivanje zadovoljavajuće kvalitete potrebno je pronaći optimalnu brzinu rezanja koja uzima u obzir sve navedene parametre [17]. Na sljedećim slikama prikazane su maksimalne brzine rezanja u ovisnosti o debljini materijala i snazi lasera za ugljični čelik, aluminij i nehrđajući čelik. Podaci se odnose na fiber lasere proizvođača IPG i orijentacijske su prirode te se mogu razlikovati kod drugih proizvođača.



Slika 17: Ovisnost brzine rezanja o snazi i debljini materijala za ugljični čelik (IGP fiber laser) [19]



Slika 19: Ovisnost brzine rezanja o snazi i debljini materijala za aluminij (IGP fiber laser) [19]



Slika 18: Ovisnost brzine rezanja o snazi i debljini materijala za nehrđajući čelik (IGP fiber laser) [19]

4.3. Pomoćni plin

Još jedan od parametara koje je važno definirati prilikom laserskog rezanja je pomoćni plin, odnosno, za svaki proces potrebno je odabrati odgovarajući plin te njegov tlak i protok. Najčešće korišteni plinovi danas su dušik i kisik, a osim toga koriste se još argon, helij i zrak. Ovisno o prirodi plina rezanje može biti uz pomoć inertnog ili aktivnog plina. Postoji više razloga zbog kojih je pomoćni plin važan. On pod tlakom struji kroz sapnicu prilikom rezanja i otpuhuje kapljice rastaljenog materijala s rezne površine, samim time štiti sapnicu i komponente fokusne optike od prskanja taline. Aktivni plin sudjeluje u egzotermnoj reakciji čime je povećan unos energije što rezultira mogućnošću rezanja većih debljina materijala. Osim navedenog, uloga plina je da sprječava nastanak plazme prilikom rezanja te svojim strujanjem hladi reznu površinu čime se smanjuje ZUT. Odabir pomoćnog plina i tlaka njegovog strujanja u sinergiji je s drugim parametrima i ima direktan utjecaj na kvalitetu reza kao i brzinu rezanja, odnosno produktivnost. Kisik je najčešće korišteni aktivni plin, a najčešće se koristi za rezanje ugljičnog i niskolegiranih čelika. Pažljivo optimizirani parametri u kombinaciji s kisikom kao pomoćnim plinom, mogu osigurati visoku kvalitetu rezne površine, no moguća je pojava troske i veće hrapavosti površine. Kisik se najčešće koristi pri manjim tlakovima (0,5 – 5 bar), a tlak se u pravilu smanjuje s povećanjem debljine rezanog materijala. Važan utjecaj ima i čistoća plina, odnosno plin veće čistoće omogućiti će veće brzine rezanja [17]. Dušik je najčešće korišteni inertni plin, a razlikuje se od kisika u tome što ne reagira s materijalom za vrijeme rezanja. Dušik se koristi pri većim tlakovima (10 – 20 bar) što omogućava bolje otpuhivanje rastaljenog materijala. Rezna površina kod rezanja dušikom nema oksida i moguće je postići visoku kvalitetu reza. Najčešće se koristi za rezanje nehrđajućih čelika, visokolegiranih čelika, aluminijevih i bakrovih legura. Razlog njegove široke primjene, između ostalog, je i njegova relativno niska cijena. Argon i helij obično se koriste za rezanje titana i njegovih legura. Komprimirani zrak također se može koristiti kao pomoćni plin, a najveća prednost mu je široka dostupnost i niska cijena [17].

4.4. Položaj žarišta (fokus)

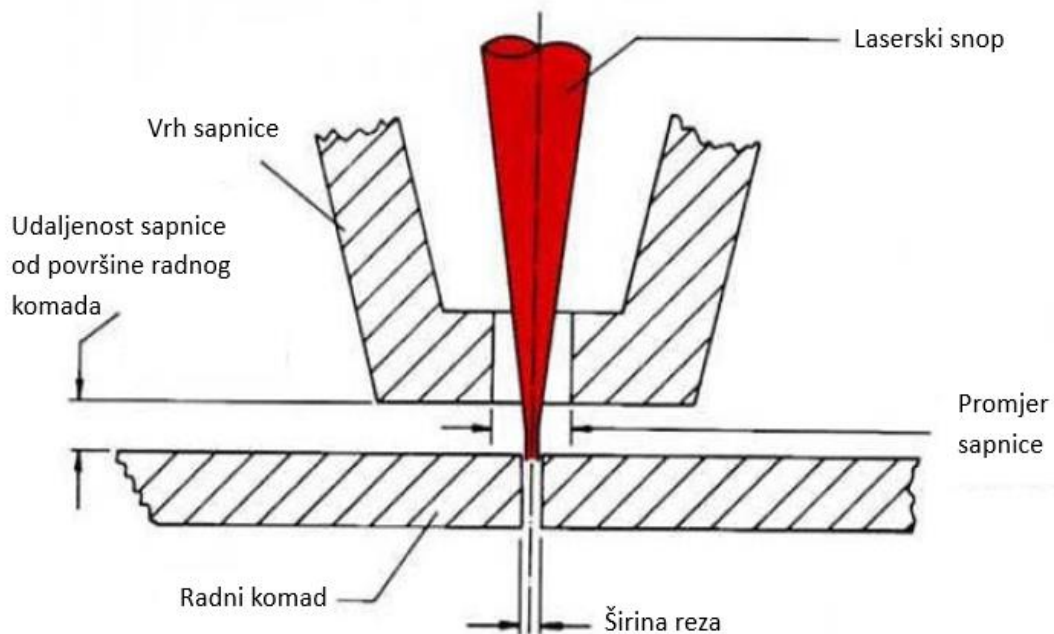
Položaj žarišta u odnosu na površinu rezanog materijala ima velik utjecaj na kvalitetu površine reza. Žarište, kao što je ranije opisano, predstavlja točku u koju je zraka fokusirana pomoću fokusne optike i u toj točki gustoća energije je najveća. U odnosu na površinu materijala, žarište se može nalaziti iznad, ispod i na samoj površini materijala. Prilikom rezanja kisikom, a ovisno o debljini materijala, fokus se postavlja u blizini gornje površine materijala, a ovisno o vrsti uređaja i drugim parametrima on može biti iznad, na površini ili do jedne trećine debljine materijala ispod površine. Ako je fokus iznad površine materijala, promjer laserskog snopa na samoj površini biti će nešto širi od samog žarišta. Prilikom rezanja inertnim plinovima, u pravilu se žarišna točka postavlja ispod površine materijala bliže donjoj površini materijala, to omogućava da veća količina pomoćnog plina ulazi u sam rez i bolje otpuhivanje taljevine. Optimalan odabir položaja žarišta ovisi o vrsti stroja, vrsti i debljini rezanog materijala te vrsti i pritisku pomoćnog plina. Ako je žarišna točka prenisko u odnosu na površinu materijala unos topline u blizini donje površine biti će veći, a rastaljeni materijal početi će teći po donjoj površini uz rub reza te će formirati kuglaste nakupine troske. Ako je položaj žarišne točke previsok, materijal pri donjoj površini može biti nedovoljno rastaljen što izaziva nakupljanje kratkih oštrih nakupina troske. U oba slučaja, kod ekstremnih odstupanja od optimuma probijanje neće moći biti ostvareno zbog nedovoljne gustoće energije [17, 18].



Slika 20: Utjecaj položaja žarišta na kvalitetu rezne površine [18]

4.5. Udaljenost sapnice od radnog komada

Udaljenost sapnice od radnog komada utječe na način na koji pomoćni plin struji i dolazi u kontakt s radnim komadom. Prevelika udaljenost sapnice od površine materijala može uzrokovati turbulencije i neravnomjernu raspodjelu tlaka što ima negativan utjecaj na kvalitetu reza. Najčešće se koristi udaljenost sapnice od površine materijala koja je manja od promjera korištene sapnice, a najčešće iznosi do 1 mm. Značajne promjene tlaka između sapnice i reza imaju negativan utjecaj na sposobnost plina da otpuhuje taljevinu [5, 17].



Slika 21: Geometrija sapnice [17]

4.6. Vrsta i promjer sapnice

Promjeri sapnica kod laserskog rezanja obično variraju između 0,5 i 3 mm. Uloga sapnice je da usmjerava i definira izlazni mlaz pomoćnog plina što ima utjecaj na tlak mlaza plina na površini materijala. Na taj način se sprječava i pojava turbulencija u taljevini unutar reza. Odgovarajući promjer sapnice ovisi o debljini materijala i tlaku pomoćnog plina, a njen oblik ovisi o vrsti materijala i mehanizmu rezanja kao i o samom stroju. Promjer sapnice u pravilu je veći od širine reza.



Slika 22: Primjer sapnice (Bystronic Bystar Fiber 3015)



Slika 23: Sapnice različitih vrsta i promjera (Senfeng SF3015G)

5. Najčešći tipovi lasera za rezanje u industriji

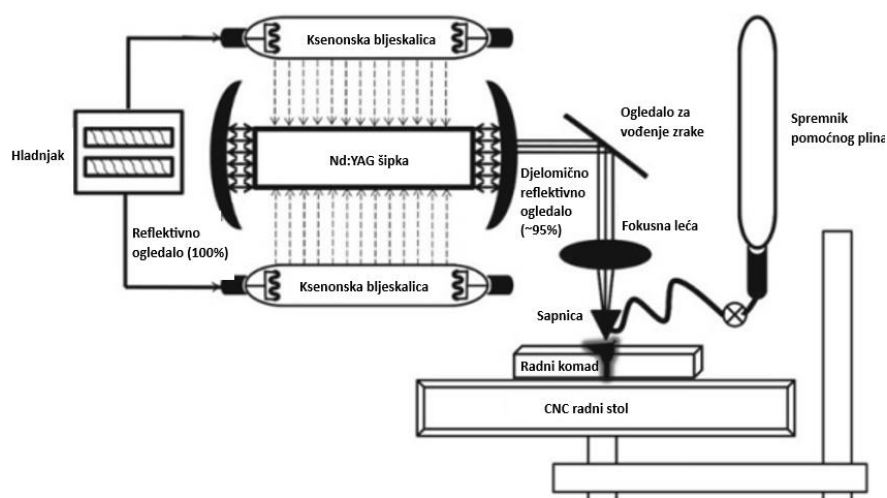
U ovom poglavlju dan je opis i usporedba triju izvedbi laserskih uređaja koje se najčešće koriste za rezanje. Kao što je ranije navedeno, laserski uređaji razlikuju se prije svega po vrsti aktivnog medija koji se nalazi u laserskom izvoru. Kada je riječ o tehnologiji laserskog rezanja najzastupljeniji su CO₂ plinski laseri, Fiber laseri i Nd:YAG laseri s čvrstim kristalnim medijem.

5.1. CO₂ laser

CO₂ laseri spadaju u lasere s plinovitim aktivnim medijem koji se sastoji od mješavine plinova CO₂, N₂ i He. Laserski snop u aktivnom mediju pobuđuje se električnim pražnjenjem naboja, a karakteristična valna duljina snopa je $\lambda = 10600 \text{ nm}$. Snage ovih lasera za industrijsku primjenu kreću se u rasponu od 1 W do 50 kW. Vođenje zrake od izvora do obradne glave kod CO₂ lasera izvedeno je pomoću sustava zrcala i leća, razlog tome je valna duljina svjetlosti koja nije pogodna za vođenje optičkim vlaknom. Posljedica vođenja zrake sustavom zrcala je smanjena mobilnost obradne glave te veći troškovi održavanja. Općenito, kod CO₂ lasera troše se plinovi, a potrebno je održavanje i sustava vođenja zrake, budući da zraka između zrcala putuje kroz prostor, nečistoće u sustavu mogu uzrokovati pad kvalitete laserskog snopa. Reflektivne optičke komponente izrađuju se od metala, a transmisivne od cinkova selenida (ZnSe) ili galijeva arsenida (GaAs) [5]. U usporedbi s dugim tipovima lasera, CO₂ laseri imaju relativno malu iskoristivost energije koja varira oko 10%. Ovakvi strojevi pogodni su za rezanje velikog spektra materijala što uključuje ugljični čelik i neke aluminijske legure te nemetalne materijale kao što su polimeri, staklo, papir, tkanina i drvo. Glavna prednost ovih laserskih sustava leži u sposobnosti rezanja nemetalnih materijala te u relativno niskim investicijskim troškovima, u odnosu na fiber i Nd:YAG lasere. Najveći nedostaci su u načinu vođenja zrake i manjoj iskoristivosti [20].

5.2. Impulsni Nd:YAG laser

Kao što je vidljivo iz tablice 2, Nd:YAG laser posjeduje kristal Itrij – Aluminijski – Granat koji je dopiran neodimijevim atomima što znači da je uglavnom 0,5% do 3% atoma itrija zamijenjeno atomima neodimija. Laseri s kristalnim aktivnim medijem prvi su tip lasera koji su proizvedeni i Nd:YAG laseri javljaju se u ranoj fazi razvoja laserske tehnologije. Karakteristična valna duljina Nd:YAG lasera iznosi $\lambda = 1064 \text{ nm}$ što spada u infracrveno područje [21], [5]. Ovi laseri posjeduju prosječnu izlaznu snagu zrake od oko 100 W. Kristalni aktivni medij je obično u obliku šipke promjera 2 do 8 mm, a duljine 20 do 200 mm [5]. Prema izvoru pumpanja Nd:YAG laser može biti diodni u kom slučaju se koriste laserske diode koje emitiraju svjetlost valne duljine 808 nm u rezonator. U drugom slučaju Nd:YAG laser može biti pumpan pomoću lampi ili bljeskalica. Laserski snop moguće je voditi pomoću optičkog vlakna sa kvarcnom jezgrom [5]. U impulsnoj izvedbi Nd:YAG laseri koriste se u industriji za rezanje, označavanje i zavarivanje. Ovi laseri posjeduju visoku kvalitetu laserskog snopa. Iako posjeduju relativno male prosječne snage zrake Nd:YAG laseri u impulsnoj izvedbi pogodni su za rezanje metala debljina iznad 2 mm zbog velikih vršnih snaga impulsa. Nadalje, pogodni su za rezanje visoko reflektirajućih materijala zbog čega pronalaze primjenu u mikromehanici i kod rezanja elektroničkih komponenti, a osim toga pogodni su za rezanje i nekih nemetalnih materijala [5, 21, 22]. U novije vrijeme, šipkasti kristali sve češće se zamjenjuju kristalima u obliku diska što omogućava postizanje većih izlaznih snaga Nd:YAG lasera pa tako neki od njih mogu postići kontinuiranu izlaznu snagu u iznosu više od 10 kW [21].



Slika 24: Shematski prikaz mogućeg izvedbe Nd:YAG lasera [22]

5.3. Fiber laser

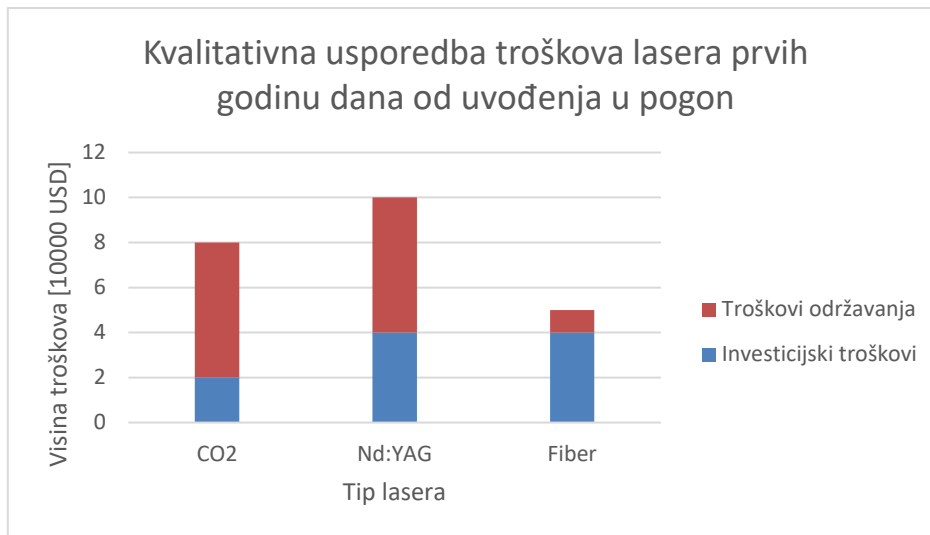
Fiber laseri ubrajaju se u lasere s krutim aktivnim medijem. Kao što je ranije navedeno, kao izvor pumpanja koriste laserske diode koje emitiraju svjetlost valnih duljina između 915 i 980 nm. Kao aktivni medij koristi se optičko vlakno dopirano rijetkim zemljanim ionima što je detaljnije opisano u drugom poglavlju ovog rada. Najvažnije karakteristike fiber lasera za lasersko rezanje su velike izlazne snage i visoka kvaliteta zrake [5, 9]. Monolitički („vlakno do vlakna“) dizajn fiber lasera osigurava sustav koji u pravilu nije potrebno održavati što osigurava dugotrajan vijek trajanja fiber lasera i operativne troškove znatno niže od CO₂ lasera. Primjerice, fokusirani laserski snop fiber lasera od 2 kW posjeduje gustoću snage koja je pet puta veća od one koju posjeduje fokusirani laserski snop CO₂ lasera izlazne snage 4 kW [23]. Znatno manja valna duljina svjetlosti od one kod CO₂ lasera omogućava veću apsorpciju u materijal. Ova svojstva zajedno doprinose znatno većim brzinama rezanja od drugih tipova lasera. Tipične izlazne snage fiber lasera kreću se do 50 kW, a iskoristivost energije veća je od 30% što ih čini energetske efikasnijima od drugih tipova lasera. Osim toga, njihov vrlo kompaktan dizajn omogućava da zauzimaju manje prostora te nisu osjetljivi na uvjete u radnoj okolini što omogućava lakšu integraciju u proizvodne pogone različitih tipova i veličina [5]. Sumirano, neke od prednosti fiber lasera naspram CO₂ lasera su: veće brzine rezanja bez gubitka kvalitete reza pri manjim snagama, nije potrebno zagrijavanje sustava kod paljenja stroja što donosi vremenske uštede, nije potrebno gotovo nikakvo održavanje, a kvaliteta i centriranost zrake znatno manje su podložni vanjskim utjecajima. Fiber laseri pogodni su za rezanje velikog spektra vrsta i debljina metalnih materijala što uključuje i materijale s prevlakama. Posebice su pogodni za rezanje teže rezljivih materijala poput aluminijevih i bakrenih legura [23]. Na primjer, fiber laser snage 10 kW može rezati aluminijski lim do 30 mm debljine, a bakar do 15 mm debljine.

5.4. Usporedba lasera

U slijedećoj tablici napravljena je pregledna usporedba triju opisanih tipova lasera prema nekim od njihovih najvažnijih svojstava.

Tablica 4: Usporedba karakteristika lasera [5, 9]

Tip lasera	CO ₂	Nd:YAG	Fiber
Aktivni medij	Mješavina plinova	Kristal	Dopirano optičko vlakno
Način uzbuđivanja	Električno pražnjenje naboja	Bljeskalice i lampe	Laserske diode
Valne duljine (λ) [nm]	10600	1064	960 – 1640 nm
Snaga [W]	100 - 50000	100-50000	500 – 50000
Vođenje zrake	Zrcala	Zrcala ili optičko vlakno	Optičko vlakno
Materijali za rezanje	<ul style="list-style-type: none"> Metali (čelik, nehrđajući čelik, aluminij, titan) Nemetali (drvo, polimeri, staklo, keramika, koža) Kompozitni materijali (ugljična vlakna) 	<ul style="list-style-type: none"> Metali (čelik, nehrđajući čelik, aluminij, titan) Neki nemetali 	<ul style="list-style-type: none"> Metali (čelik, nehrđajući čelik, aluminij, titan, bakar, mjed) Kompozitni materijali (ugljična vlakna)



Slika 25: Kvalitativna usporedba troškova lasera [24, 25]

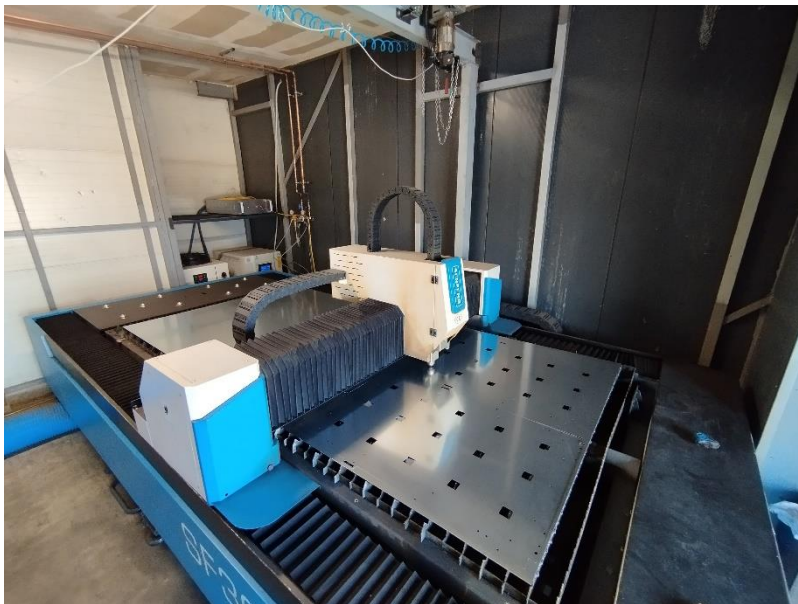
Na slici 18 prikazan je graf koji prikazuje kvalitativnu usporedbu troškova laserskih sustava, konkretno, investicijskih troškova i troškova održavanja prvih godinu dana od uvođenja u proizvodni pogon. Iz grafa je vidljivo kako CO₂ laseri u pravilu posjeduju najmanje investicijske troškove, no veće troškove održavanja. Investicijski troškovi Nd:YAG i Fiber lasera su slični no dok fiber laseri imaju iznimno male troškove održavanja, Nd:YAG i CO₂ laseri posjeduju znatno veće troškove održavanja, pa se može zaključiti da dugoročno fiber laseri predstavljaju najmanji trošak.

5.5. Izvedbe strojeva

Strojevi za lasersko rezanje najčešće se javljaju u dvije izvedbe, a to su CNC sustavi ili robotizirani sustavi. S obzirom na način vođenja zrake, za robotizaciju su pogodni uglavnom laseri koji vođenje zrake imaju izvedeno pomoću optičkih vlakana što omogućuje fleksibilno gibanje obradne glave. Posmak se ostvaruje gibanjem radnog komada što je danas rjeđe ili gibanjem obradne glave. Ovisno o vrsti sustava obradna glava može imati 3 do 5 stupnjeva slobode ili može biti ugrađena na robota. Strojevi za lasersko rezanje mogu biti otvorenog ili zatvorenog tipa. A glavne komponente kao što su izvor, sustav hlađenja i sustav upravljanja mogu biti integrirani u stroj ili izdvojeni.



Slika 26: Robotski sustav za lasersko rezanje [26]



Slika 27: Fiber laser otvorenog tipa u CNC izvedbi s tri osi (Senfeng SF3015G)



Slika 28: Fiber laser zatvorenog tipa u CNC izvedbi s tri osi (Bystronic Bystar Fiber 3015)



Slika 29: Sustav hlađenja i laserski izvor izdvojeni od stroja (Senfeng SF3015G)



Slika 30: Sustav hlađenja lasera Bystronic Bystar Fiber 3015 izdvojen je od stroja dok su izvor i ostale komponente integrirane

6. Eksperimentalni dio

Eksperiment je proveden s ciljem utvrđivanja na koji način promjena parametara utječe na kvalitetu rezne površine. Proučavani parametri bili su položaj žarišne točke (fokus) laserskog snopa i brzina rezanja. Postupak pokusa sastojao se od rezanja devet uzoraka iz istog materijala pomoću stroja za lasersko rezanje. Nakon toga, provedena su mjerenja četiriju varijabli, a to su: dimenzijska točnost, hrapavost rezne površine, kutnost te količina troske odnosno cundera. Mjerenja su provedena pomoću mjerne opreme u laboratoriju te analizom fotografija pomoću programa za obradu slike. Nakon provedenih mjerenja prikupljeni podaci su obrađeni i analizirani.

6.1. Materijal

Kao materijal za uzorke korištena je aluminijska legura AlMg3 odnosno EN AW 5754. Ova aluminijska legura iz serije 5xxx jedna je od najčešće korištenih aluminijskih legura na tržištu. Poluproizvodi ove legure izrađuju se tehnologijama valjanja, ekstruzije i kovanja. Kao najvažniji legirni element sadrži magnezij (Mg), a uz to sadrži manje udjele željeza (Fe), silicija (Si), mangana (Mn), kroma (Cr) te ostale legirne elemente u manjim udjelima. Široku primjenu pronalazi zbog dobrih mehaničkih svojstava, dobre oblikovljivosti u hladnom stanju i odlične otpornosti na koroziju i u morskim uvjetima kao i mogućnosti mehaničkog očvrnuća. U tablici 5 prikazan je kemijski sastav, a u tablici 6 najvažnija fizikalna svojstva ove legure. Mehanička svojstva ovise o stanju očvrnuća [27].

Tablica 5: Kemijski sastav EN AW 5754 [27]

Kemijski sastav EN AW 5754									
Element	Al	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Cu	Ostalo
Maseni udio [%]	94,2 - 97,4	2,6 – 3,6	0,5	0,4	0,4	0,2	0,15	0,1	0,15

Tablica 6: Najvažnija fizikalna svojstva aluminijske legure EN AW 5754 [27]

Svojstvo	Iznos
Gustoća	2,66 g/cm ³
Talište	600 °C
Modul elastičnosti	68 GPa
Toplinska vodljivost	147 W/mK

6.2. Stroj za lasersko rezanje - Bystronic Bystar Fiber 3015

Za izrezivanje uzoraka korišten je stroj Bystronic Bystar Fiber 3015 koji je dio strojnog parka tvrtke „Dekor Tvornica Rasvjete d.o.o.“ u Zaboku . Riječ je o stroju za lasersko rezanje zatvorenog tipa s fiber laserskim izvorom snage 10 kW. Najvažnije tehničke karakteristike stroja navedene su u tablici 7.

Tablica 7: Tehničke karakteristike stroja [28]

Bystar Fiber 3015	
Duljina	11900 mm
Širina	5700 mm
Visina	3200 mm
Težina	11000 kg
Nominalna dimenzija ploče (X - os)	3000 mm
Nominalna dimenzija ploče (Y - os)	1500 mm
Rezno područje (X - os)	3100 mm
Rezno područje (Y - os)	1580 mm
Rezno područje (Z - os)	100 mm
Maksimalna simultana brzina pozicioniranja	170 m/min
Preciznost detekcije ruba ploče	± 0,5 mm
Maksimalna težina ploče	1100 kg

Stroj posjeduje zatvoreni radni prostor s odgovarajućim zaštitnim staklom koje pruža zaštitu od eventualne refleksije laserske zrake i omogućava siguran rad i praćenje procesa. Uz to posjeduje „Detection Eye“ tehnologiju koja služi za detektiranje ruba ploče te njenih dimenzija i kuta zakreta što omogućava kraća vremena pripreme. Opremljen je sustavom za automatsku izmjenu sapnice te s dva izmjenjiva radna stola. To omogućava visok stupanj automatizacije procesa.

Ovaj stroj još je opremljen dodatnim paletnim sustavom „By Trans Cross“ koji omogućava automatsko stavljanje ploča na radni stol te automatsko skidanje obradaka. Mogućnosti rezanja materijala navedene su u tablici 8 [28].

Tablica 8: Mogućnosti rezanja pojedinih materijala Bystronic Bystar Fiber 3015 - 10 kW [28]

Materijal	Max. debljina rezanja
Čelik	30 mm
Nehrđajući čelik	30 mm
Aluminij	30 mm
Mjed	15 mm
Bakar	15 mm



Slika 31: Bystronic Bystar Fiber 3015 u pogonu tvrtke Dekor tvornica rasvjete d.o.o.



Slika 32: Radni prostor i radna glava stroja



Slika 33: ByTrans Cross paletni sustav i drugi izmjenjivi radni stol



Slika 34: Stroj u radu - pogled kroz zaštitno staklo

6.3. Plan pokusa

Kao mjerilo kvalitete reza razmatraju se četiri varijable: dimenzijska točnost, hrapavost, kutnost rezne površine i količina troske na donjem dijelu rezne površine. Za svaku varijablu provode se najmanje tri mjerenja na različitim mjestima na uzorku. Parametri čiji utjecaj se promatra su brzina rezanja i položaj žarišne točke, odnosno fokus, a svaki parametar mijenja se na tri razine. Osnovne vrijednosti parametara odabrane su prema parametrima za pojedine materijale i njihove debljine koji su unaprijed definirani od strane proizvođača stroja. Nakon izrezivanja uzorka osnovnim parametrima, oni se mijenjaju za $\pm 25\%$. Kako bi se koristile sve moguće kombinacije parametara ukupno mora biti 9 uzoraka. Parametri koji se ne mijenjaju u sklopu ovog pokusa ostaju u osnovnom iznosu kako su definirani. Nakon izrezivanja uzorka mjerenja se provode u laboratoriju Sveučilišta Sjever i uz pomoć programa za obradu slike ImageJ.

6.3.1. Uzorci

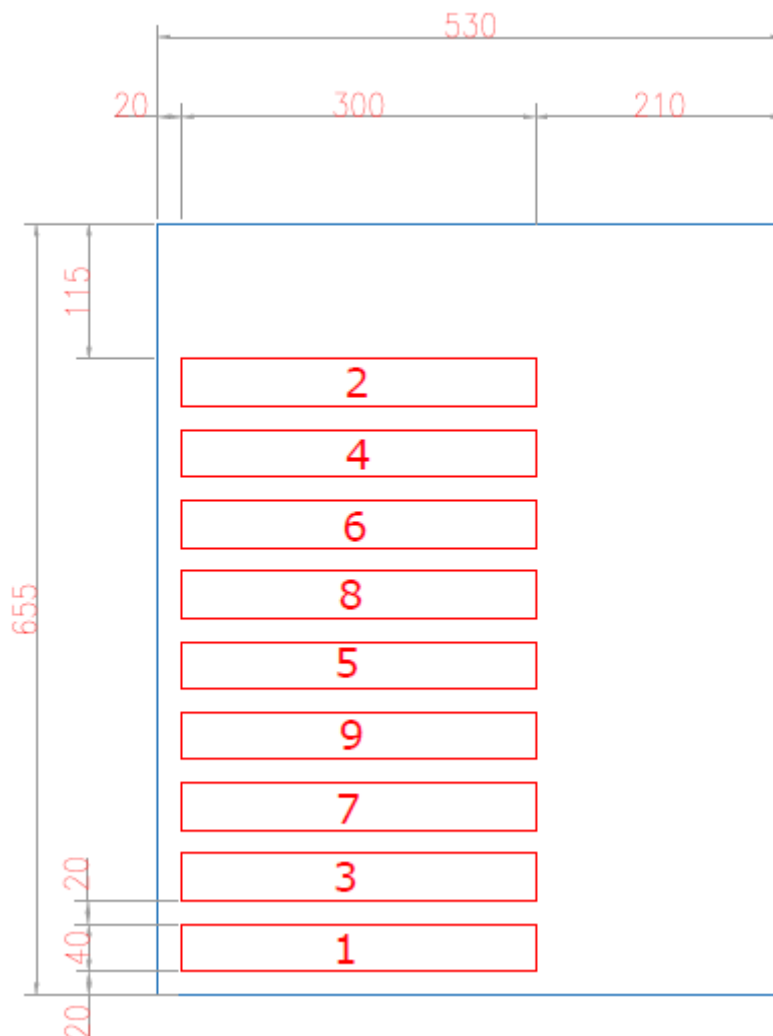
Uzorci su definirani kao pločice nominalnih dimenzija 40 x 300 mm koje se izrezuju iz 8 mm debelog lima aluminijske legure AlMg3 (EN AW 5754) koja je opisana ranije u poglavlju. Crtež uzorka je prikazan na slici 35. Na svaki uzorak laserom je ugravirana njegova brožčana oznaka (brojevi od 1 do 9). Ulaz zrake na uzorcima se nalazi na jednom od kutova kako nebi utjecao na kvalitetu rezne površine.



Slika 35: Uzorak

6.3.2. Plan rezanja

Ploča iz koje se izrezuju uzorci ima dimenzije 530 x 655 mm. Uzorci su na ploči posloženi na način da udaljenost od ruba ploče i između samih uzoraka bude 20 mm. Redoslijed rezanja također je takav da se osigura odvođenje topline s dijela ploče gdje je izrezan pojedini uzorak. Plan rezanja osmišljen je na taj način kako bi se izbjegle eventualne deformacije materijala zbog pretjeranog unosa topline te kako bi se izbjegla eventualna oštećenja na rubu ploče koja bi mogla utjecati na kvalitetu reza. Crtež plana rezanja prikazan je na slici 36. Uzorci su prikazani crvenom bojom i numerirani redoslijedom kojim se izrezuju, a plavom bojom je ucrtan rub ploče.



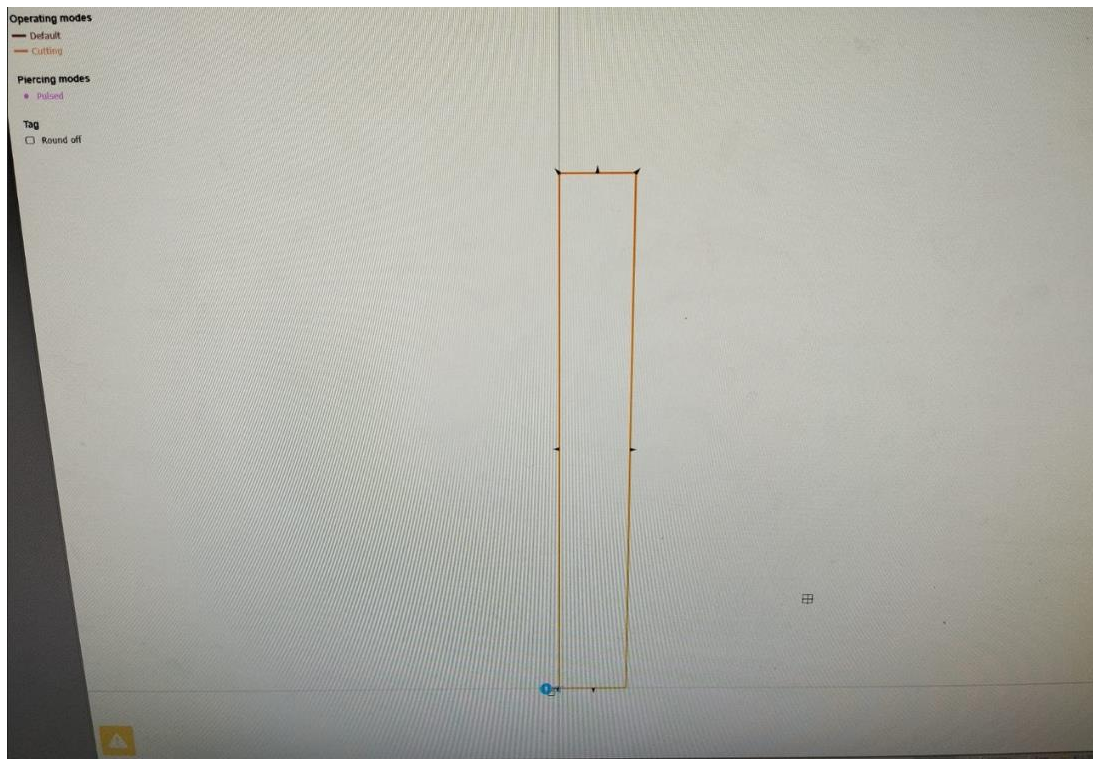
Slika 36: Crtež plana rezanja

Tablica 10 u podpoglavlju 6.5 prikazuje plan rezanja uzoraka s pridruženim promjenama parametara. Položaj žarišta označen je slovom „f“, a brzina rezanja slovom „v“.

6.4. Priprema rezanja

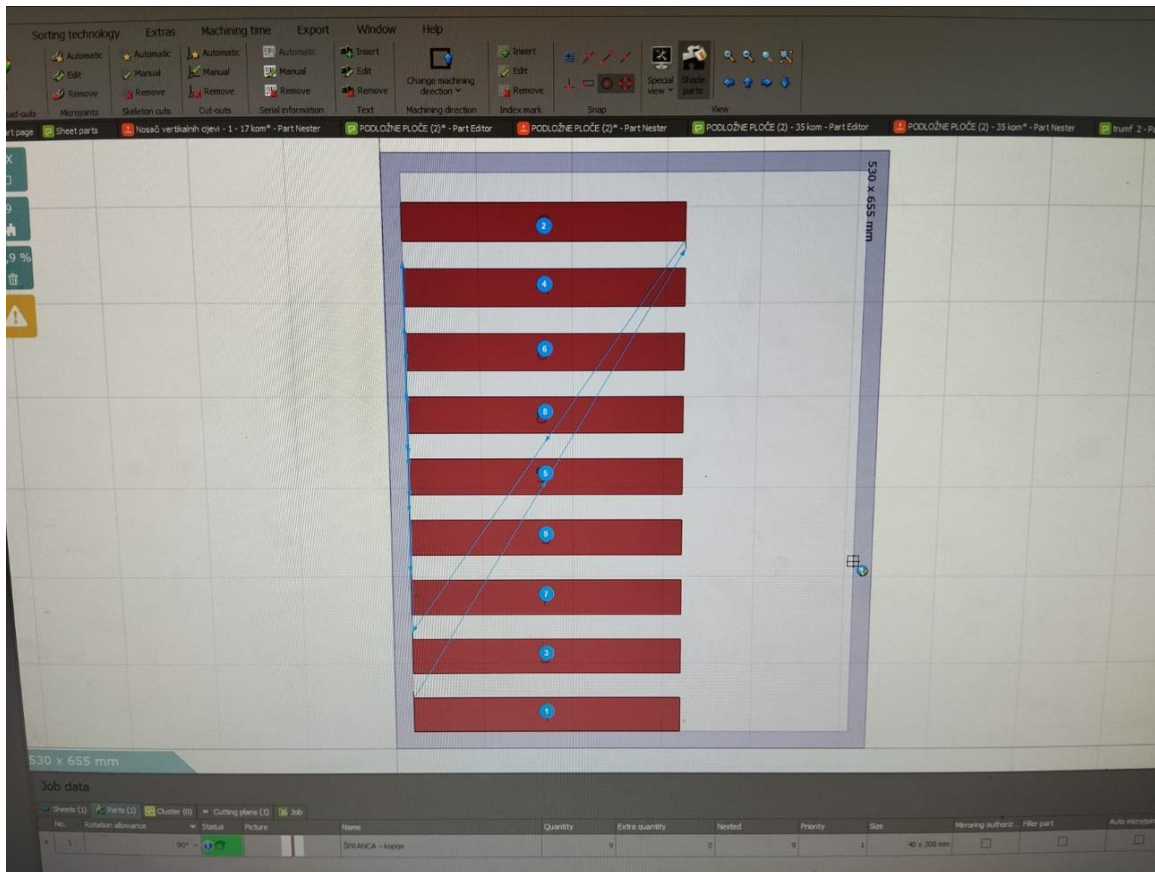
Nakon što je definiran detaljan plan pokusa napravljena je priprema rezanja. Postupak pripreme opisan je u nastavku.

I. Definiranje geometrije uzoraka: Crtež geometrije uzoraka napravljen je prethodno pomoću programskog paketa AutoCAD. Nacrtna geometrija učitana je u programu BySoft koji služi za smještanje geometrija za lasersko rezanje na radnu ploču (eng. nesting), definiranje parametara rezanja, definiranje redoslijeda rezanja i simulaciju rezanja. Osim toga program omogućava manje izmjene pred sam početak rezanja kao što je dodavanje radijusa, raznih vrsta oslobođenja i slično. U ovom dijelu također se definira i položaj i izgled ulaza zrake. Geometrija uzorka s definiranim položajem ulaza zrake prikazana je na slici 37.

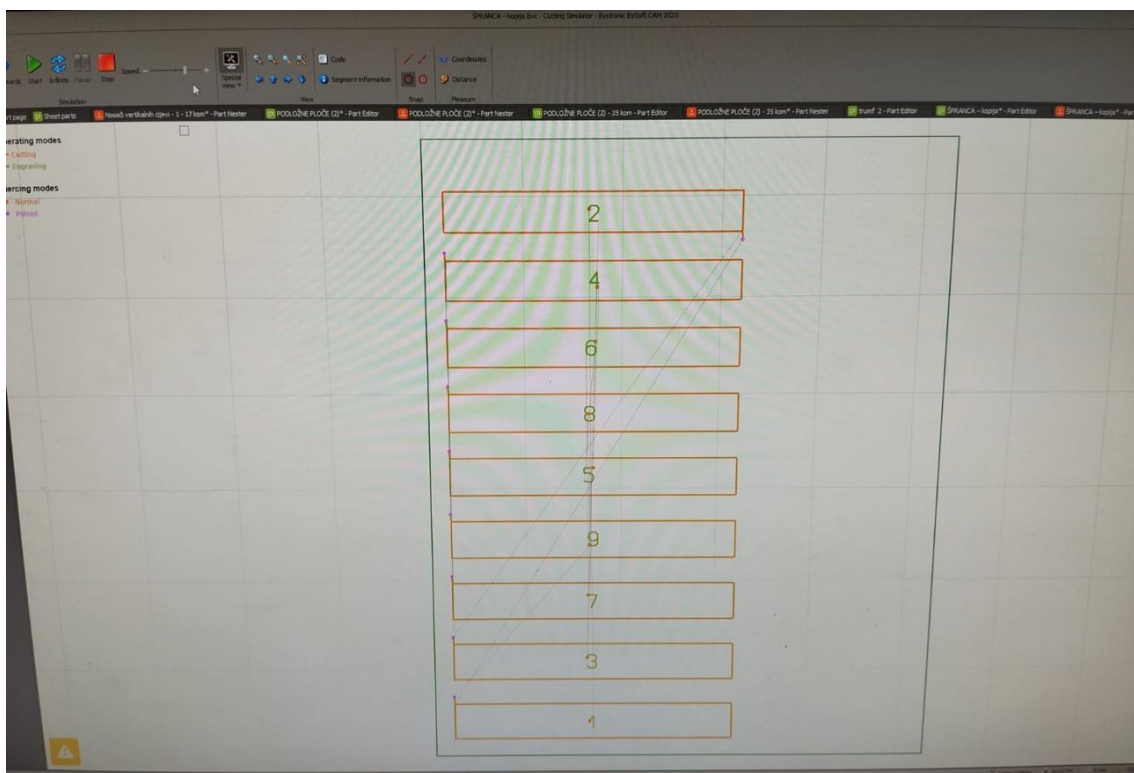


Slika 37: Definirana geometrija uzorka i položaj ulaza zrake u programu BySoft

II. Definiranje dimenzija radne ploče i smještanje uzoraka (nesting): U ovom koraku uzorci su smješteni na ploču kojoj su definirane unaprijed izmjerene dimenzije. Definirana je željena udaljenost od ruba ploče (20 mm) kao i potrebna udaljenost između uzoraka (20 mm). Nakon što su definirani potrebni parametri program uzorke smješta na ploču automatski. Kad su uzorci smješteni na ploču prilagođen je redoslijed rezanja u skladu s planom pokusa. Na uzorke su, također, dodane brojčane oznake na koje su primijenjeni parametri za graviranje. Nakon toga, provedena je simulacija rezanja. Navedeno je prikazano na slikama 38 i 39.

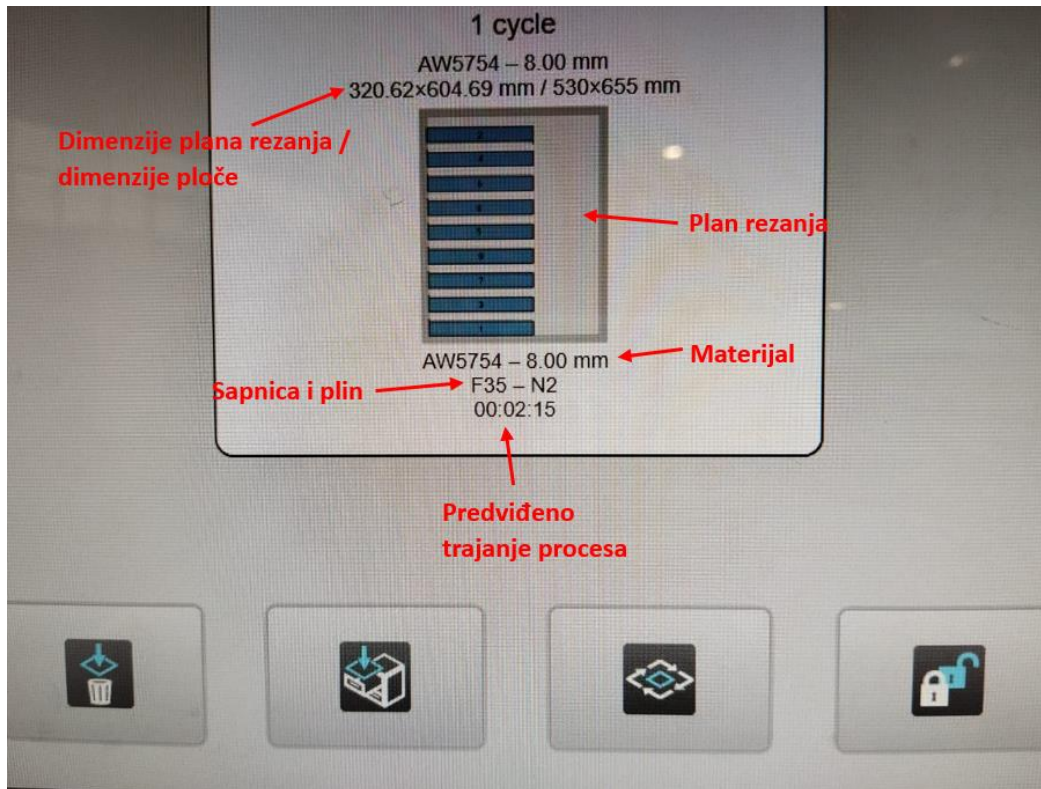


Slika 38: Geometrija uzoraka posložena na ploču s definiranim redoslijedom rezanja



Slika 39: Uspješno provedena simulacija u BySoftu - narančasto označava rezanje, zeleno graviranje

III. Rezanje uzoraka uz promjene parametara: Nakon što je sve definirano program rezanja se pohranjuje i otvara na upravljačkom računalu lasera. Prije toga na radni stol lasera postavlja se ploča iz koje se izrezuju uzorci. Na slici 40. prikazan je program rezanja učitani na upravljačkom računalu lasera. Prikazan je plan rezanja te osnovni podaci o procesu.



Slika 40: Program rezanja učitani na radnom računalu lasera

Nakon što je ploča na odgovarajućem mjestu i stavljena je odgovarajuća sapnica može se započeti s rezanjem. Program je namješten tako da se zaustavi nakon svakog pojedinog izrezanog uzorka kako bi se mogli promijeniti parametri.



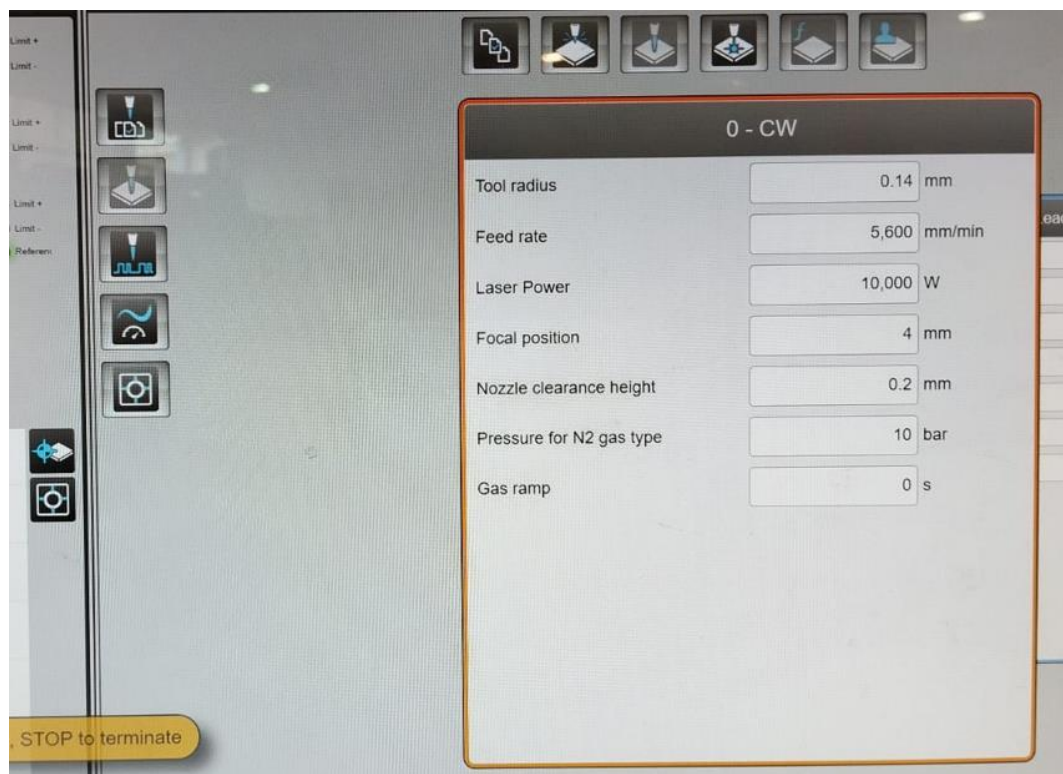
Slika 41: Ploča na radnom stolu

6.5. Izrezivanje uzoraka

Prvi uzorak izrezan je korištenjem nominalnih parametara koji su unaprijed definirani u programu lasera. Nominalni parametri prikazani su u tablici 9, a na slici 42 vidljivo je kako su oni prikazani na sučelju radnog računala lasera. Oznaka 0 – CW označava da se uzorci režu kontinuiranim laserskim snopom (eng. continuous wave). Važno je napomenuti da se parametar položaja žarišta kod ovog stroja za lasersko rezanje unosi kao pozitivna vrijednost iako se žarište tada nalazi 4 mm ispod površine obratka što se razlikuje od prikaza u literaturi i drugim strojevima gdje se položaj žarišta ispod površine materijala definira negativnim brojevima.

Tablica 9: Nominalni parametri procesa rezanja

Parametar	Iznos
Promjer zrake	0,14 mm
Brzina rezanja	5600 mm/min
Snaga	10000 W
Položaj žarišta	4 mm (ispod površine obratka)
Udaljenost sapnice od obratka	0,2 mm
Tlak dušika	10 bar



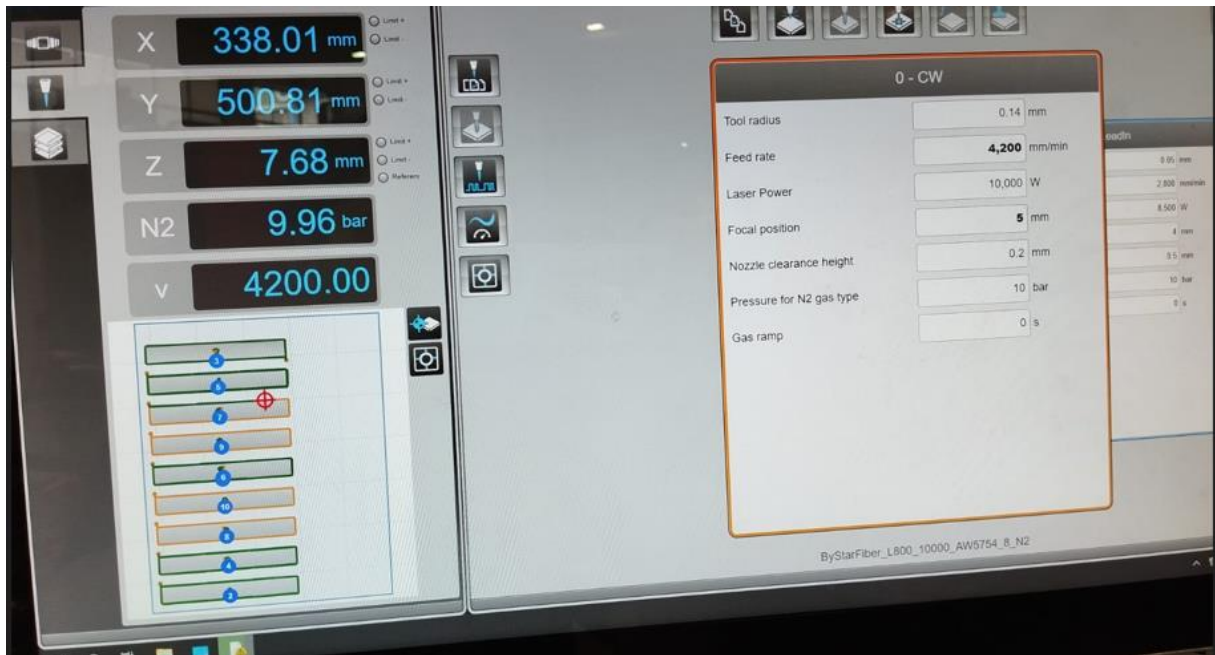
Slika 42: Početni parametri na sučelju radnog računala lasera

U tablici 10 prikazani su parametri koji su definirani u skladu s planom pokusa ta temelju nominalnih parametara i pridruženi pojedinim uzorcima.

Tablica 10: Definirani parametri pridruženi pojedinim uzorcima

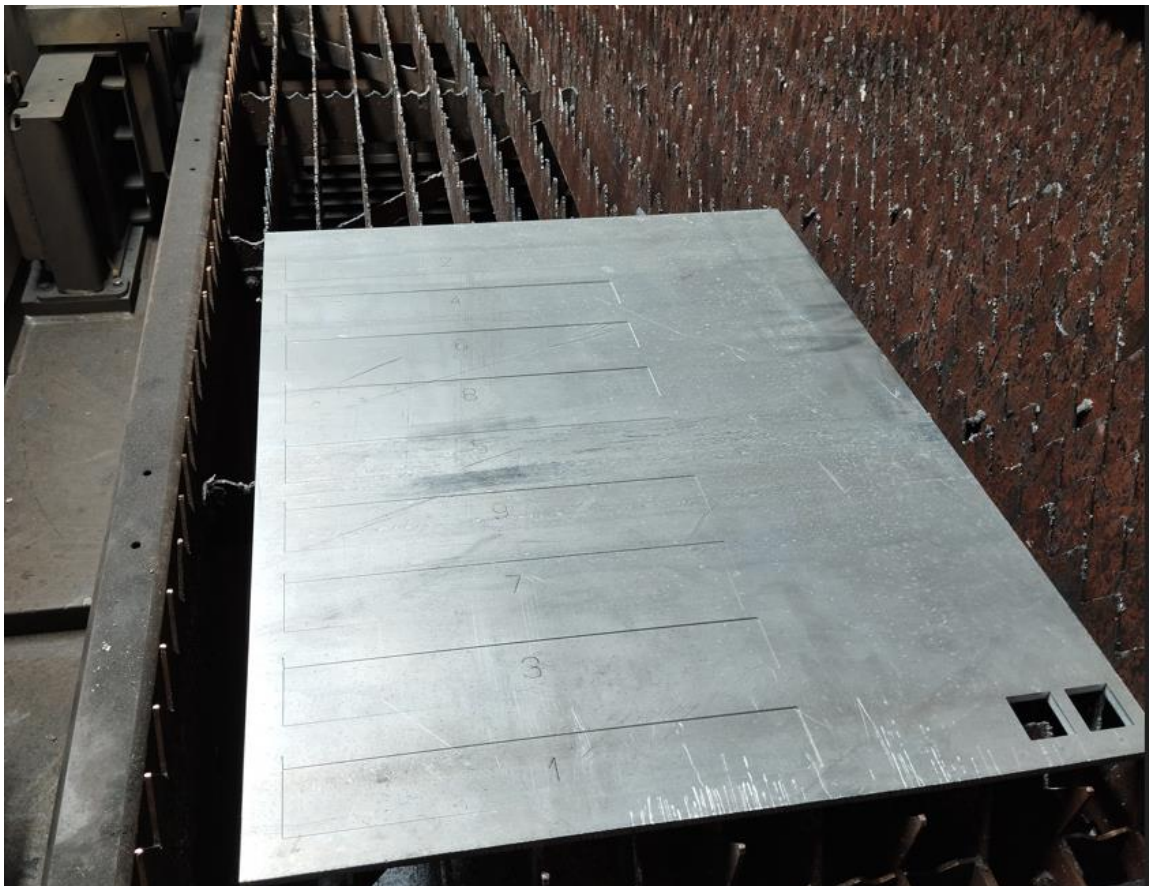
Izrezivanje uzoraka		
Parametar		
Uzorak	Brzina rezanja v [mm/min]	Fokus f [mm]
1	$x = 5600$	$y = -4$
2	$x+25\% = 7000$	$y = -4$
3	$x-25\% = 4200$	$y = -4$
4	$x = 5600$	$y+25\% = -5$
5	$x+25\% = 7000$	$y+25\% = -5$
6	$x-25\% = 4200$	$y+25\% = -5$
7	$x = 5600$	$y-25\% = -3$
8	$x+25\% = 7000$	$y-25\% = -3$
9	$x-25\% = 4200$	$y-25\% = -3$

Uzorci su rezani redosljedom koji je definiran u planu pokusa. Nakon izrezivanja svakog uzorka program je zaustavljen i parametri su promijenjeni u skladu s oznakom uzorka. Na slici 43 prikazano je sučelje radnog računala u trenutku rezanja uzorka 6. U donjem lijevom uglu vidljivo je da su uzorci koji su već izrezani konturirani zeleno. Vidljivo je da su brojevi uzoraka u procesu rezanja počinju od broja 2 jer radno računalo brojem 1 označava plan rezanja općenito. Crveni križić označava mjesto na kojem se u tom trenutku nalazi zraka na planu rezanja. Na prikazu parametara vidljivo je da su promijenjeni parametri istaknuti debljim fontom. Iznad plana rezanja moguće je pratiti koordinatni položaj radne glave lasera, tlak i brzinu rezanja u svakom trenutku rezanja.



Slika 43: Sučelje radnog računala u trenutku rezanja uzorka 6

Na slici 44 prikazana je radna ploča s izrezanim uzorcima koji još nisu izvađeni iz ploče.



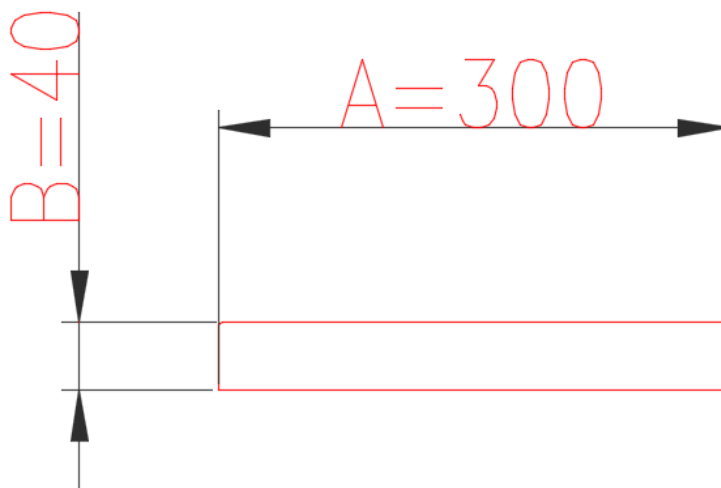
Slika 44: Izrezani uzorci neposredno nakon rezanja

6.6. Mjerenja

Nakon što su uzorci izrezani mjerenja su provedena u laboratoriju Sveučilišta Sjever gdje su mjerene dimenzije uzoraka za utvrđivanje odstupanja od nominalnih te hrapavost rezne površine. U laboratoriju su, također, pod svjetlosnim mikroskopom napravljene fotografije rezne površine pomoću kojih su naknadno u programu za obradu slike ImageJ napravljena mjerenja kutnosti te određivanje količine troske na pojedinim uzorcima.

6.6.1. Dimenzijska točnost

U svrhu određivanja dimenzijske točnosti provedena su mjerenja dužine i širine uzoraka. Mjerenja obiju dimenzija su provedena analognim mikrometrom odgovarajućeg raspona. Na svakom uzorku provedena su po tri mjerenja na tri različita mjesta. Pri tome je bilježeno odstupanje od nominalnih dimenzija. Nominalna širina uzorka iznosi 40 mm, a na slici 45 označena je slovom „B“, nominalna dužina uzorka iznosi 300 mm i označena je slovom „A“.



Slika 45: Nominalne dimenzije uzorka

Prva mjerena dimenzija je širina B mjerena mikrometrom mjernog područja od 25 do 50 mm s rezolucijom od 0,01 mm. Na tri mjesta na uzorku provedena su po tri mjerenja, a srednje vrijednosti mjerenja dane su u tablici 11, a srednje vrijednosti odstupanja od nominalne dimenzije za svako od mjesta mjerenja prikazane su u tablici 12.

Tablica 11: Aritmetičke sredine izmjerenih vrijednosti širine B

Aritmetičke sredine izmjerenih vrijednosti širine B [mm]			
Mjesto mjerenja	D	E	F
Uzorak			
1	39,958	39,985	39,970
2	39,970	39,970	39,930
3	39,957	39,990	40,023
4	40,042	39,972	39,960
5	39,953	39,970	39,950
6	39,953	39,958	39,957
7	39,977	40,063	40,088
8	39,978	40,050	39,973
9	40,002	39,995	39,995

Tablica 12: Aritmetičke sredine odstupanja od nominalne vrijednosti širine B

Aritmetičke sredine odstupanja od nominalne vrijednosti širine B [mm]			
Mjesto mjerenja	D	E	F
Uzorak			
1	-0,042	-0,015	-0,030
2	-0,030	-0,030	-0,070
3	-0,043	-0,010	0,023
4	0,042	-0,028	-0,040
5	-0,047	-0,030	-0,050
6	-0,047	-0,042	-0,043
7	-0,023	0,063	0,088
8	-0,022	0,050	-0,027
9	0,002	-0,005	-0,005

U tablici 13 prikazane su vrijednosti ukupnog srednjeg odstupanja za svaki uzorak. Podaci su poredani po apsolutnoj vrijednosti odstupanja od najvećeg prema najmanjem.

Tablica 13: Vrijednosti ukupnog srednjeg odstupanja od nominalne širine ΔB_{sr} za uzorke poredane po apsolutnoj vrijednosti od najviše do najniže

Uzorak	Srednje odstupanje ΔB_{sr} [mm]	Apsolutna vrijednost srednjeg odstupanja $ \Delta B_{sr} $ [mm]
6	-0,044	0,044
2	-0,043	0,043
7	0,043	0,043
5	-0,042	0,042
1	-0,029	0,029
3	-0,010	0,010
4	-0,009	0,009
9	-0,003	0,003
8	0,001	0,001

Nakon mjerenja širine uzoraka, provedeno je mjerenje duljine uzoraka A. Na svakom uzorku provedena su tri mjerenja na različitim mjestima, a izmjerene vrijednosti su prikazane u tablici 14. U tablici 15 dane su srednje vrijednosti odstupanja od nominalne dimenzije za svaki uzorak, a kao i u prethodnom slučaju poredane su po apsolutnoj vrijednosti od najveće do najmanje.

Tablica 14: Aritmetičke sredine izmjerenih vrijednosti duljine A

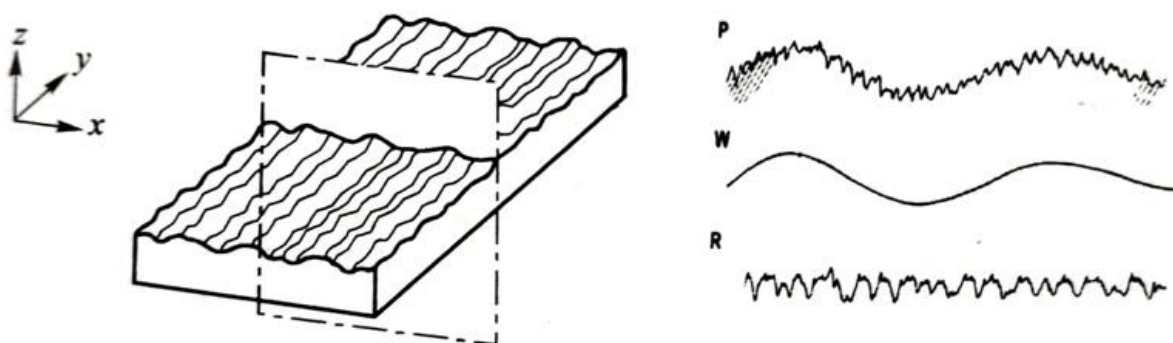
Mjerenje Uzorak	Izmjerene vrijednosti duljine A [mm]		
	1	2	3
1	299,880	299,910	299,910
2	299,885	299,850	299,200
3	299,910	299,880	299,950
4	299,930	299,910	299,830
5	300,060	300,040	300,020
6	299,930	299,870	299,830
7	299,850	299,830	299,880
8	299,840	299,830	299,970
9	299,890	299,900	299,870

Tablica 15: Vrijednosti ukupnog srednjeg odstupanja od nominalne duljine ΔA_{sr} za uzorke poredane po apsolutnoj vrijednosti od najviše do najniže

Uzorak	Srednje odstupanje ΔA_{sr} [mm]	Apsolutna vrijednost srednjeg odstupanja $ \Delta A_{sr} $ [mm]
2	-0,355	0,355
7	-0,147	0,147
6	-0,123	0,123
8	-0,120	0,120
9	-0,113	0,113
4	-0,110	0,110
1	-0,100	0,100
3	-0,087	0,087
5	0,040	0,040

6.6.2. Površinska hrapavost

Površine nastale nekim od postupaka obrade, odnosno, tehničke površine nikada nisu savršeno glatke. One posjeduju mikrogeometrijske nepravilnosti koje su značajno manje od promatrane površine, a koje skupno čine površinsku hrapavost. U strojarskoj praksi za analizu hrapavosti koristi se profil površine koji predstavlja realnu površinu presječenu određenom ravninom. Na profilu površine moguće je mjernim instrumentima, ovisno o korištenom filteru, mjeriti hrapavost, valovitost ili karakteristike primarnog profila [29].



Slika 46: Profil površine: P - primarni profil, W - valovitost, R – hrapavost [29]

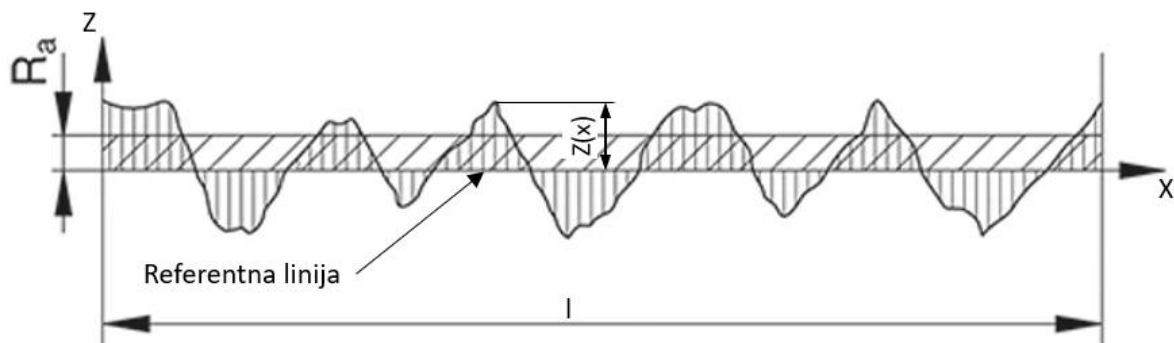
Za analizu površina u praksi najčešće se koristi srednje aritmetičko odstupanje mjenenog profila R_a . Ova veličina predstavlja srednju aritmetičku vrijednost apsolutne vrijednosti ordinate $Z(x)$ na referentnoj duljini uzorka, a opisuje se izrazom [29]:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2)$$

R_a - Srednje aritmetičko odstupanje profila [μm]

l - Referentna duljina uzorka [μm]

$Z(x)$ - Visina profila hrapavosti s obzirom na referentnu crtu [μm]



Slika 47: Srednje aritmetičko odstupanje profila R_a [30]

Za mjerenje hrapavosti rezne površine uzoraka korišten je uređaj proizvođača Ametek Taylor Hobson, model Surtronic S-100 Series. Uređajem se mjerio parametar R_a , a referentna duljina mjerenja iznosila je 4 mm. Parametri mjerenja vidljivi su na zaslonu uređaja na slici 48.



Slika 48: Mjerni uređaj Taylor Hobson S-100

Na svakom uzorku provedena su tri mjerenja na različitim dijelovima površine. Mjerenja su provedena na središnjem dijelu površine uzorka u smjeru okomitom na smjer ulaza zrake. Postupak mjerenja prikazan je na slici 49.



Slika 49: Postupak mjerenja hrapavosti površine

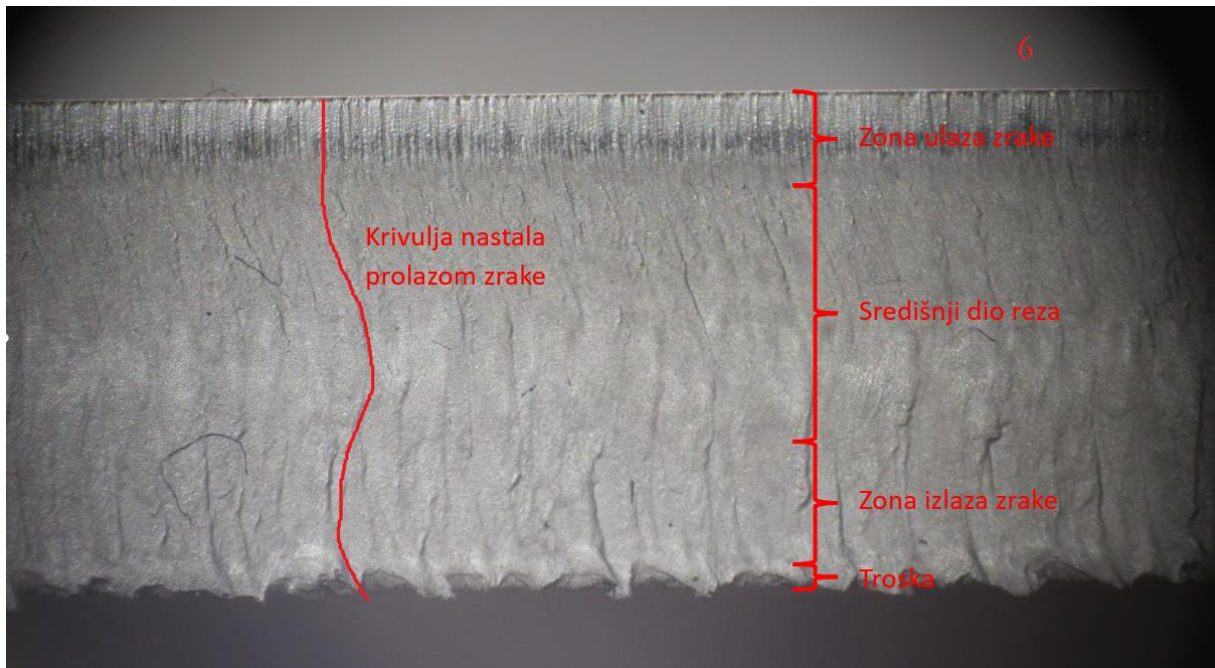
Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 16.

Tablica 16: Izmjerene vrijednosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila Ra

Izmjerene vrijednosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila Ra [μm]				
Uzorak	Mjerenje			Srednja vrijednost
	1	2	3	
1	2,6	2,9	2,3	2,60
2	2,1	2,9	1,4	2,13
3	2,8	2	2,3	2,37
4	5,7	3,3	5,6	4,87
5	3,7	4,7	4,3	4,23
6	4,1	3,2	3,7	3,67
7	2,6	3,2	4,5	3,43
8	3,2	2,3	3,2	2,90
9	5,2	4,7	6,5	5,47

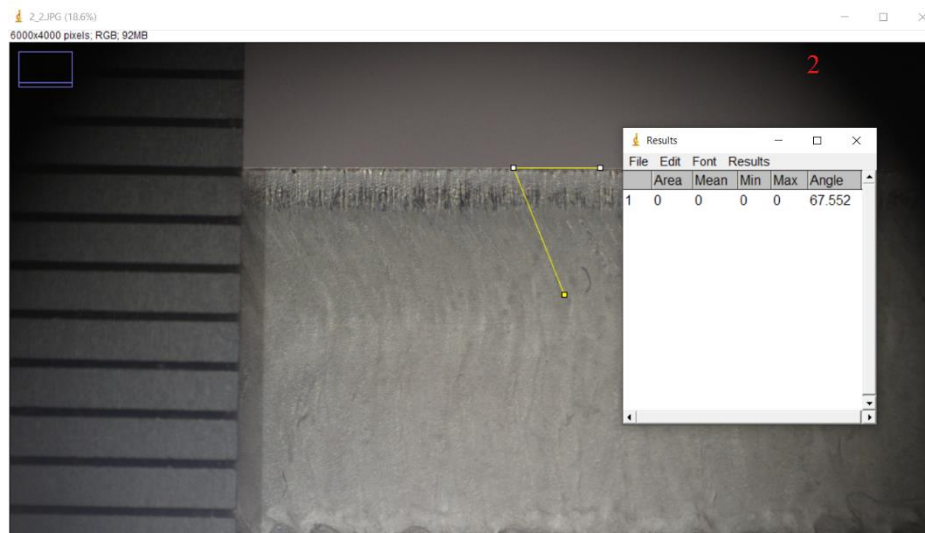
6.6.3. Kutnost

Za mjerenje kutnosti korištene su slike rezne površine uzoraka koje su napravljene pod svjetlosnim mikroskopom. Za snimanje fotografija visoke rezolucije korištena je kamera Canon EOS 200D montirana na okular mikroskopa. Na snimljenim fotografijama površine vidljive su krivulje koje nastaju prilikom prolaska laserske zrake tim dijelom površine. Površine nastale laserskim rezanjem nikada nisu savršeno okomite. Jedan od razloga su različite gustoće energije laserskog snopa po visini presjeka materijala što uzrokuje različit unos topline po debljini materijala. Nadalje utjecaj na kutnost ima i sama struktura materijala koja utječe na brzinu taljenja materijala te pomoćni plin koji otpuhuje talinu koja izlazi iz reza pod određenim kutom dok se dio filma taljevine ponovno skrućuje. Shematski je to prikazano na slici 16 u potpoglavlju 3.1 ovog rada. Na slici 50 prikazana je fotografija rezne površine jednog od uzoraka. Na njoj su označene četiri zone koje su vidljive na reznoj površini. Zona ulaza zrake nalazi se u gornjem dijelu presjeka u dijelu u kojem dolazi do probijanja materijala. Ispod zone probijanja vidljiv je središnji dio reza u kojem je najizraženija zakrivljenost linija nastalih uslijed prolaska zrake. Razlog tome je i struktura materijala. S obzirom da je korišten materijal, odnosno lim, proizveden valjanjem, većina nečistoća koje se nalaze u strukturi koncentrirana je na sredini presjeka materijala što je na slici 50 vidljivo kao svijetlije područje na sredini presjeka. Navedene nečistoće također imaju utjecaj na zakrivljenost opisanih linija. U donjem dijelu presjeka uzorka nalazi se zona izlaza zrake. Ona ima vidljivo grublju površinu jer u toj zoni laserska zraka gubi na snazi, a linije su nagnute u smjeru suprotnom od smjera rezanja uslijed ispuhivanja taljevine iz reza. Ispod zone izlaza zrake vidljiva je troska.



Slika 50: Slika rezne površine

U svrhu uspoređivanja kutnosti u ovom radu pomoću programa za obradu slike ImageJ mjeren je kut linije u gornjem dijelu središnje zone reza u odnosu na gornju horizontalnu površinu uzorka. Prikaz postupka mjerenja dan je na slici 51. Za svaki uzorak provedena su 3 mjerenja na najvidljivijim linijama, a rezultati mjerenja i srednje vrijednosti prikazane su u tablici 17.



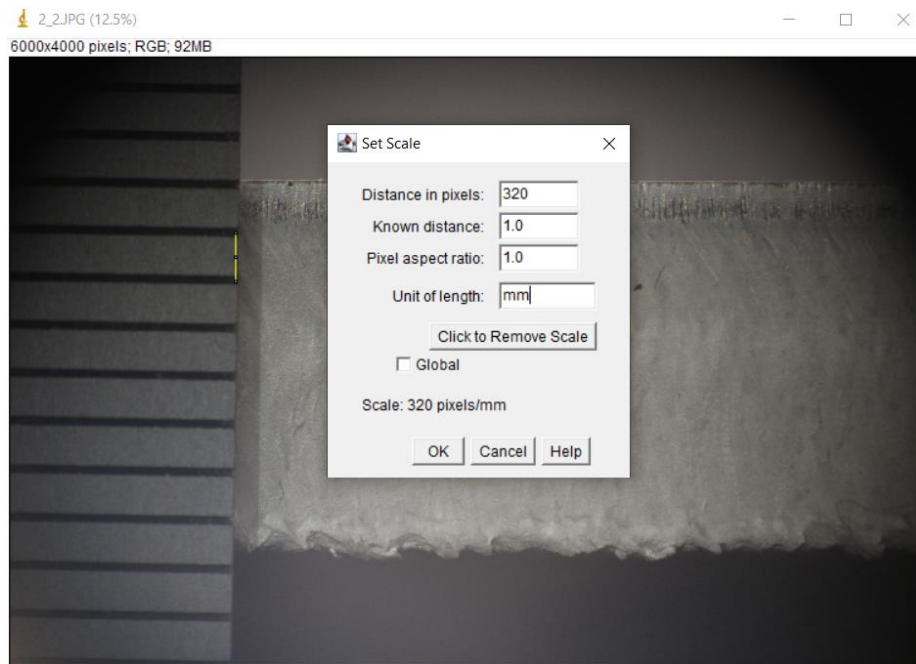
Slika 51: Postupak mjerenja kutova na reznoj površini

Tablica 17: Izmjerene vrijednosti kuta krivulja u odnosu na gornju horizontalnu površinu uzorka

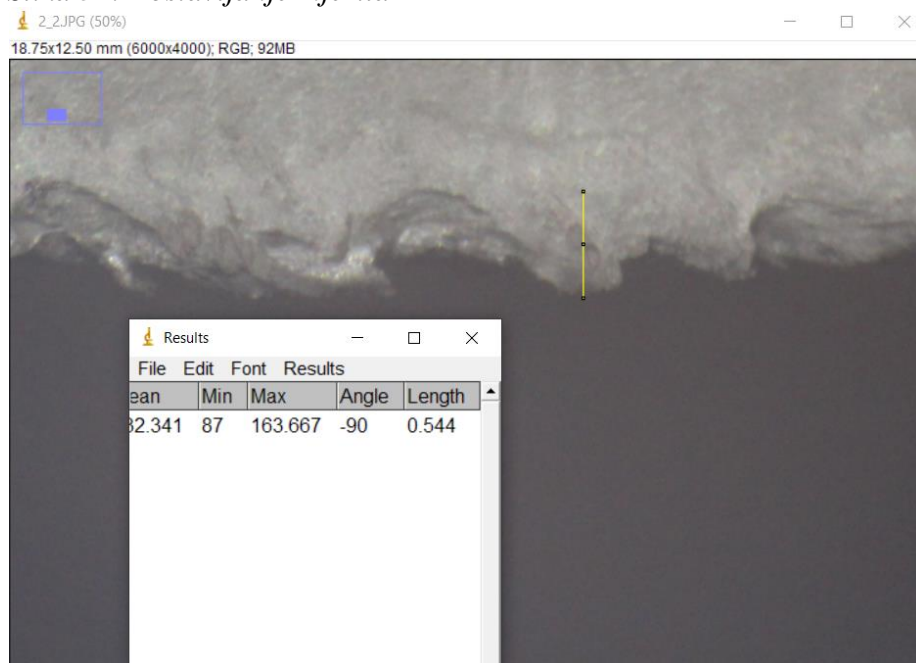
Izmjerene vrijednosti kutova [°]				
	Mjerenje			
Uzorak	1	2	3	Srednja vrijednost
1	72,90	71,97	72,22	72,36
2	67,55	75,56	71,62	71,58
3	68,79	75,71	74,52	73,01
4	70,95	69,82	71,36	70,71
5	68,27	70,52	67,98	68,92
6	69,56	68,29	74,26	70,70
7	76,58	75,96	78,24	76,93
8	75,52	77,12	79,25	77,30
9	79,14	76,48	79,08	78,23

6.6.4. Količina troske

Količina troske također je mjerena pomoću programa ImageJ. Na fotografiji svakog uzorka mjerena je visina najvećih kapljica troske na donjoj površini uzorka. Važno je napomenuti da dva uzorka nemaju kapljice koje je bilo moguće izmjeriti odnosno nemaju trosku na donjoj površini što je vidljivo u tablici 18 s rezultatima mjerenja. Postupak mjerenja sastoji se od postavljanja mjerila u programu ImageJ na osnovu mjerne skale na svakoj od fotografija. Nakon toga, preko najvećih kapljica povučena je vertikalna linija te je očitana njena duljina u mm. Postupak je prikazan je na slikama 52 i 53.



Slika 52: Postavljanje mjerila



Slika 53: Mjerenje visine kapljica troske

Tablica 18: Rezultati mjerenja visine kapljica troske

Rezultati mjerenja visine kapljica troske [mm]							
Uzorak	Mjerenje						Srednja vrijednost
	1	2	3	4	5	6	
1	0,317	0,301	0,6	0,399	0,35	0,384	0,392
2	0,460	0,540	0,50	0,460	0,400	0,044	0,401
3	0,204	0,296	0,296	0,26	0,13	0,204	0,232
4	0,278	0,346	0,21	0,247	0,21	0,194	0,248
5	0,353	0,449	0,308	0,417	0,372	0,244	0,357
6	0,593	0,611	0,432	0,506	0,469	0,265	0,479
7	0,093	0,052	0,037	0,028	0,043	0,037	0,048
8	0	0	0	0	0	0	0,000
9	0	0	0	0	0	0	0,000

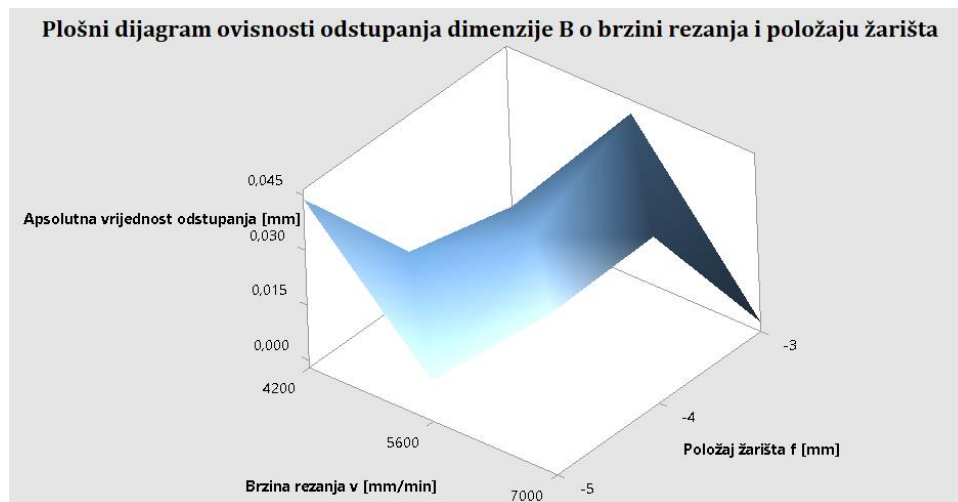
6.7. Analiza rezultata

Rezultati mjerenja prikazani u prethodnom potpoglavlju korišteni su za analizu utjecaja promjene brzine rezanja i položaja žarišta na kvalitetu laserskog rezanja. U sklopu analiza prikazani su i plošni dijagrami izrađeni u programu Minitab koji daju prikaz ovisnosti mjerenih veličina o promjenama dvaju parametara.

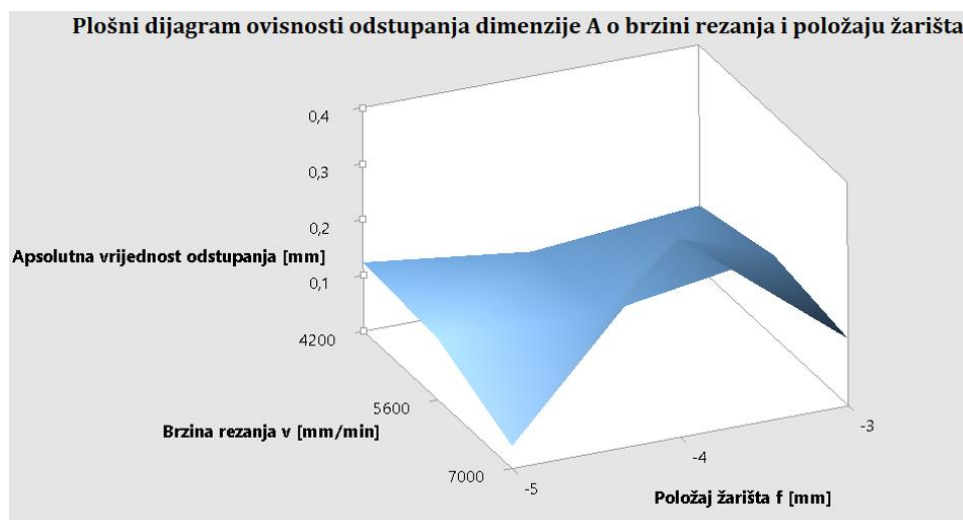
6.7.1. Analiza dimenzijske točnosti

Iz tablice 13 vidljivo je da najmanje srednje odstupanje od nominalne vrijednosti širine uzoraka ima uzorak 8 dok najveće odstupanje ima uzorak 6. Samo dva uzorka imaju pozitivnu vrijednost srednjeg odstupanja u odnosu na nominalnu dimenziju (uzorci 7 i 8) dok je kod ostalih srednje odstupanje negativno. Ni jedan uzorak nema srednje odstupanje dimenzija veće od 0,1 mm što se može smatrati zadovoljavajućim. Kod izmjerenih vrijednosti duljine najmanju apsolutnu vrijednost srednjeg odstupanja od nominalne vrijednosti ima uzorak 5, a najveću uzorak 2. Iznosi odstupanja kod mjerenja duljine veći su od odstupanja prilikom mjerenja širine. Takav rezultat je očekivan jer je kod duljih rezova potrebno očekivati veća dimenzijska odstupanja. Ako se najveće apsolutne vrijednosti odstupanja za obje dimenzije svedu na postotke vidljivo je da je maksimalno odstupanje kod obje dimenzije za približno 0,1%. Takav rezultat dokaz je visoke točnosti i ponovljivosti koju omogućuju strojevi za lasersko rezanje. S

obzirom na parametre koji su se mijenjali rezultati se razlikuju. Kod mjerenja širine, najmanja odstupanja je imao uzorak 8 koji je rezan brzinom od 7000 mm/min i položajem žarišta -3 mm od gornje površine materijala dok je kod mjerenja duljine najmanja odstupanja imao uzorak 5 koji je je rezan brzinom od 7000 mm/min, ali položajem žarišta na -5 mm od gornje površine. Rezultati mjerenja pokazuju da iako postoji utjecaj parametara na dimenzijsku točnost promjenom brzine ili fokusa s korakom od 25% u ovom pokusu nije moguće značajno utjecati na dimenzijsku točnost. Najveća odstupanja kod obiju dimenzija pokazuju uzorci 2, 7 i 6 pa se može zaključiti da su to kombinacije parametara koje daju lošiju dimenzijsku točnost u ovom slučaju. Ovi rezultati pokazuju da kod laserskog rezanja važan utjecaj ima kombinacija parametara, a ne samo pojedini parametar. Ovisnost mjerenih dimenzija o promjeni parametara prikazana je u plošnim dijagramima na slikama 54 i 55.



Slika 54: Plošni dijagram ovisnosti odstupanja dimenzije B o brzini rezanja i položaju žarišta



Slika 55: Plošni dijagram ovisnosti odstupanja dimenzije A o brzini rezanja i položaju žarišta

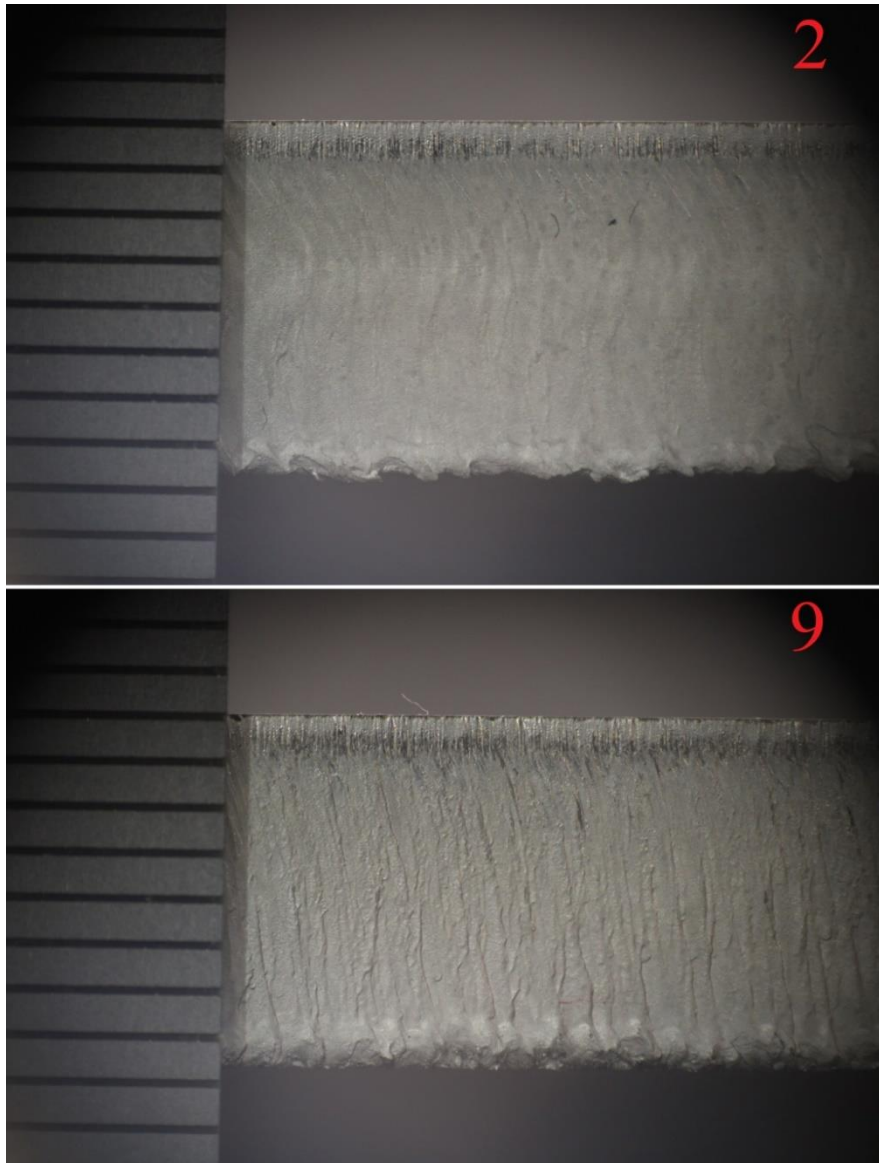
6.7.2. Analiza hrapavosti rezne površine

U tablici 19 prikazane su srednje vrijednosti izmjerene prosječne visine neravnina Ra poredane po veličini od najveće do najmanje.

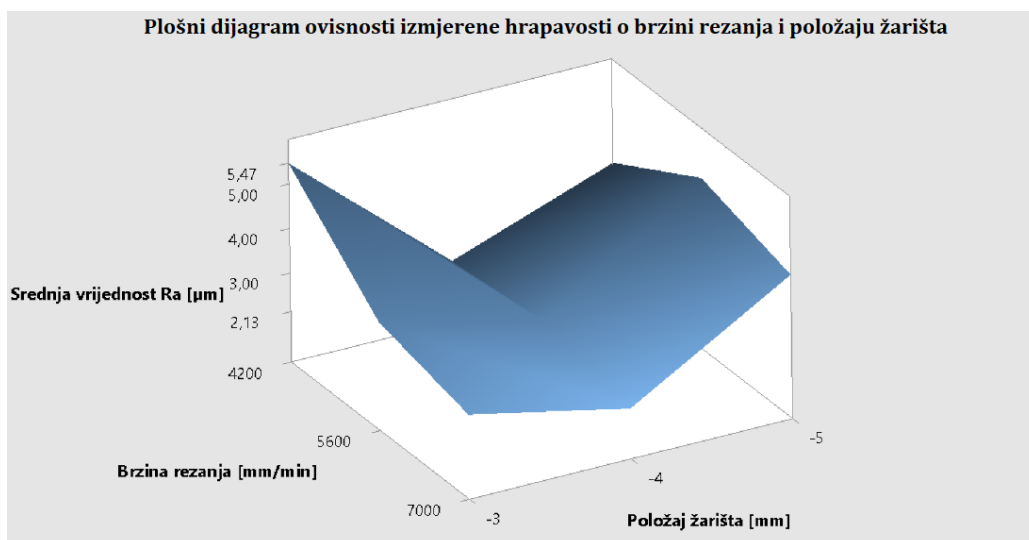
Tablica 19: Srednje vrijednosti Ra poredane od najveće prema najnižoj

Srednje vrijednosti Ra poredane po veličini	
Uzorak	Ra [μm]
9	5,47
4	4,87
5	4,23
6	3,67
7	3,43
8	2,90
1	2,60
3	2,37
2	2,13

Vidljivo je da najmanje iznose hrapavosti imaju uzorci 2, 3 i 1. Zajedničko tim uzorcima je da su svi rezani s istim položajem žarišta (-4 mm), a različitim brzinama. Nakon toga slijede uzorci 8 i 7 koji imaju položaj žarišta na -3 mm, a brzine 7000 mm/min i 5600 mm/min. Uzorci 6, 5 i 4 imaju položaj žarišta na -5 mm od površine, a uzorak 9 koji ima najveću vrijednost hrapavosti rezan je položajem žarišta na -3 mm i brzinom od 4200 mm/min. U ovim podacima vidljivo je grupiranje rezultata s obzirom na parametre. Najmanju hrapavost imaju uzorci koji imaju žarište na samoj sredini debljine materijala, odnosno na -4 mm od gornje površine. Zatim slijede dva uzorka sa žarištem na -3 mm te uzorci sa žarištem na -5 mm. Ovakvo grupiranje podataka ukazuje da položaj žarišta ima značajniji utjecaj na hrapavost rezne površine od brzine rezanja. Ovakvi rezultati su i logični s obzirom da je mjesto mjerenja približno na sredini presjeka uzoraka, položaj žarišta je mjesto gdje je gustoća energije najveća, a samim time i unos topline pa je na tom mjestu taljenje materijala najintenzivnije, a rastaljenost sigurno potpuna. Razlike u hrapavosti površine vidljive su i na fotografijama uzoraka pod mikroskopom. Na slici 56 prikazane su površine uzoraka 2 i 9. Plošni dijagram koji pokazuje ovisnost izmjerenih vrijednosti hrapavosti o promjeni parametara prikazan je na slici 57.



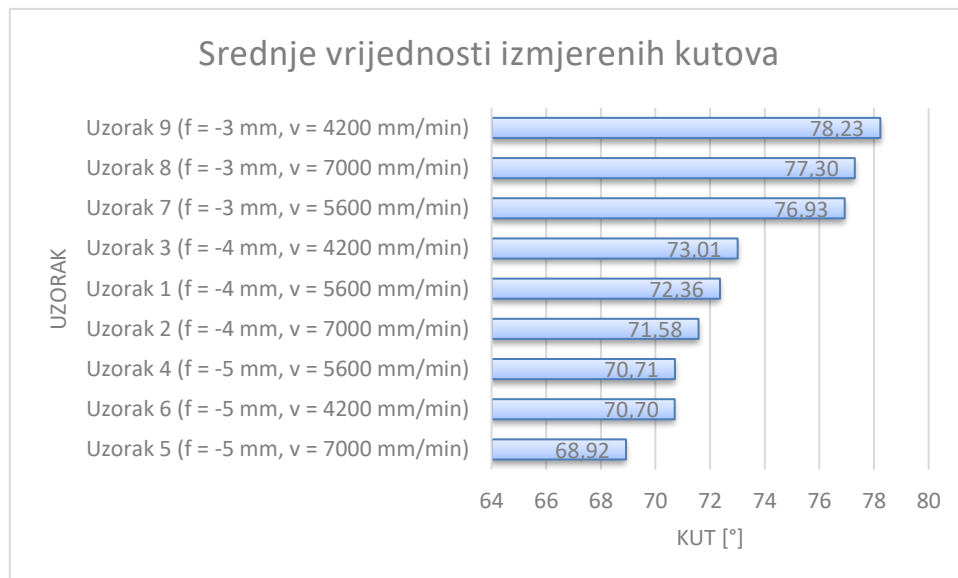
Slika 56: Površine uzoraka 2 i 9



Slika 57: Plošni dijagram ovisnosti izmjerene vrijednosti hrapavosti o brzini rezanja i položaju žarišta

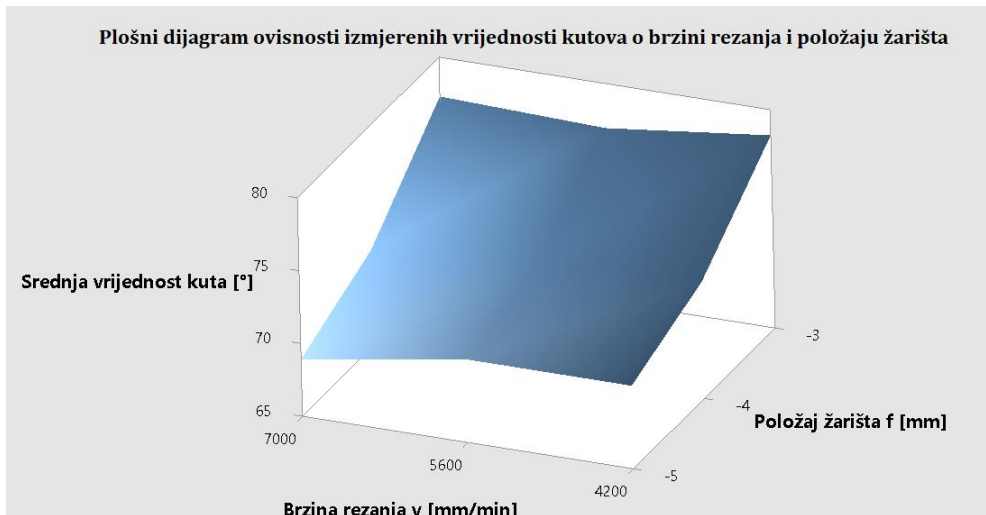
6.8. Analiza kutnosti

Očekivane vrijednosti kutova u području mjerenja nalaze se u rasponu od 60° do 89° i dobiveni rezultati su u skladu s očekivanjem. Izmjerene vrijednosti kuta linija u području mjerenja ukazuju na kutnost rezne površine, a u ovom slučaju veći iznos izmjerenog kuta ukazuje na bolju kvalitetu površine. Pogledom na dobivene srednje vrijednosti izmjerenih kutova u tablici 17 ponovno je vidljivo grupiranje rezultata s obzirom na položaj žarišta. Grupiranje rezultata dobro je vidljivo u grafu na slici 58.



Slika 58: Srednje vrijednosti izmjerenih kutova poredane po veličini

Iz grafa na slici 58 vidljivo je kako uzorci s položajem žarišta na -3 mm imaju najveće vrijednosti kutova, nakon toga slijede uzorci sa žarištem na -4 mm te na kraju uzorci sa žarištem na -5 mm. Iz prikazanog se pokazuje da položaj žarišta ima značajniji utjecaj na kutnost rezne površine od brzine rezanja. S gledišta kvalitete rezne površine, uzorci s položajem žarišta na -5 mm daju najlošije rezultate, a uzorci s položajem žarišta na -3 mm najbolje.

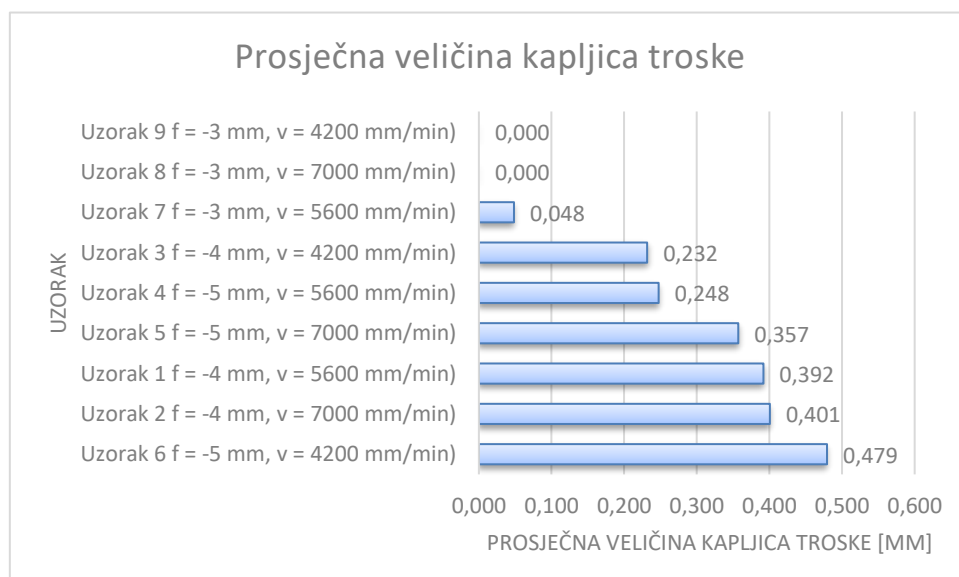


Slika 59: Plošni dijagram ovisnosti izmjerenih vrijednosti kutova o brzini rezanja i položaju žarišta

Spomenuto grupiranje rezultata jasno je vidljivo i na plošnom dijagramu na slici 59.

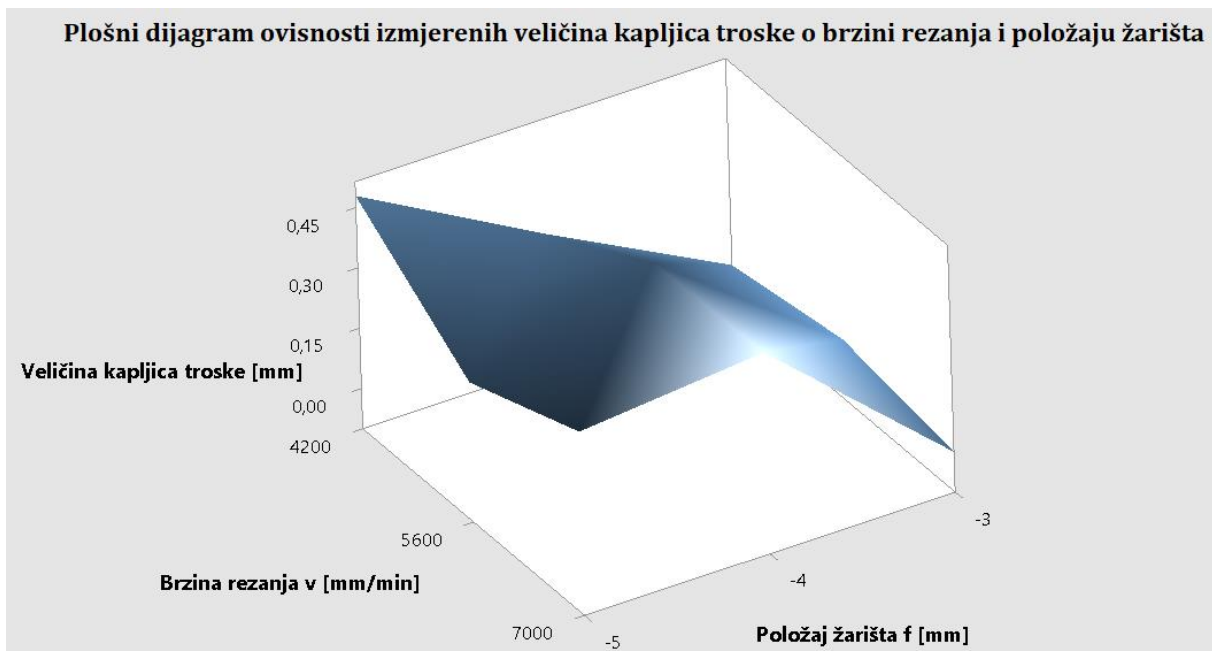
6.9. Analiza količine troske

Količina troske na donjem dijelu radnih komada dobar je indikator kvalitete kombinacije korištenih parametara. Položaj žarišta ima velik utjecaj na količinu i izgled kapljica troske što je prikazano i u potpoglavlju 4.4. Srednje vrijednosti veličine kapljica dobivene mjerenjima prikazane su u grafu na slici 60.

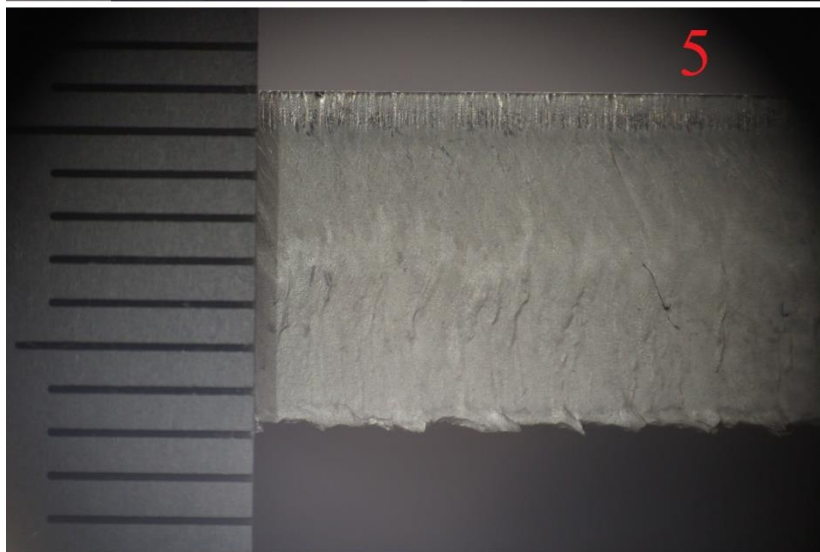
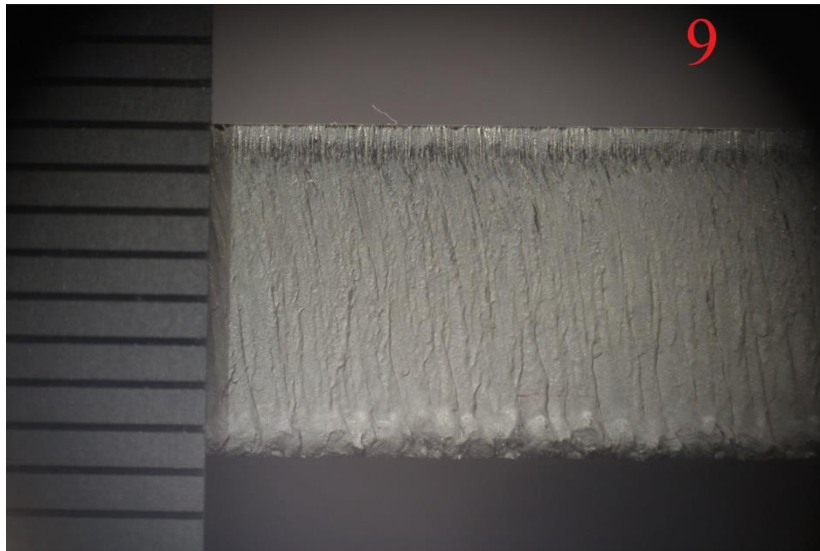


Slika 60: Prosječna veličina kapljica troske

Iz grafa je vidljivo kako najbolje rezultate daju uzorci rezani s položajem žarišta na -3 mm od gornje površine materijala. Na uzorcima 9 i 8 količina troske bila je toliko mala da ju nije bilo moguće mjeriti korištenom metodom. Može se primijetiti da su uzorak 9 koji nema troske i uzorak 6 koji prema rezultatima ima najviše troske rezani istom brzinom, dok se fokus razlikuje za 2 mm. To ukazuje da i kod količine troske položaj žarišta ima veći utjecaj od brzine rezanja. Ne treba isključiti pretpostavku da bi se sa većim promjenama brzine povećao i njen utjecaj na pojavu troske. Kod manjih brzina rezanja unos energije u materijal je veći pa je količina taljevine veća što može uzrokovati veću količinu rastaljenog materijala koji se skrućuje na dnu rezne površine. Prevelike brzine, pak, mogu uzrokovati nepotpuno taljenje materijala unutar reza što također može utjecati na pojavu troske. Ovisnost izmjerenih veličina kapljica o promjenama parametara prikazana je u grafu na slici 61.



Slika 61: Plošni dijagram ovisnosti izmjerenih veličina kapljica troske o brzini rezanja i položaju žarišta



Slika 62: Izgled reznih površina uzoraka 9, 5 i 6 - vidljiva razlika u količini troske

7. Zaključak

Lasersko rezanje spada u nekonvencionalne postupke obrade i može se smatrati relativno mladom tehnologijom. Ipak, potencijal i mogućnosti koje donosi prepoznati su ubrzo nakon pojave ove tehnologije. Strojevi za lasersko rezanje danas su vrlo važan dio proizvodnih pogona diljem svijeta, a njihove moderne inačice omogućavaju potpuno automatiziran rad i robotizaciju što je u skladu sa zahtjevima i potrebama današnje industrije. Osim što omogućavaju relativno siguran rad i relativno veliku proizvodnost, moderni strojevi za lasersko rezanje omogućuju obradu materijala koje je bilo teško rezati konvencionalnim postupcima. Dominaciju na svjetskom tržištu u području laserskog rezanja imaju CO₂ i Fiber laseri. Lasersko rezanje je tehnologija koja posjeduje mogućnost rezanja komada vrlo kompleksnih oblika u vrlo kratkom vremenu. Izradci napravljeni laserskim rezanjem često se ugrađuju u sklopove kao komponente ili koriste kao gotovi proizvodi bez dodatne obrade. Iz tog razlog, vrlo je važno da rezna površina kao i sami izrezani proizvodi posjeduju određeni stupanj kvalitete. Zahtjevi za kvalitetu izradaka nastalih tehnologijama toplinskog rezanja dani su u normi HRN EN ISO 9013:2017 „Toplinsko rezanje -- Razredba rezova -- Geometrijska specifikacija proizvoda i dopuštena odstupanja kvalitete“. Osim toga, mjerila kvalitete laserskih rezova mogu biti različita s obzirom na zahtjeve proizvoda i njihovu krajnju namjenu. Činjenica je moderni strojevi za lasersko rezanje omogućuju visoku kvalitetu reznih površina kao i visoku točnost oblika i dimenzija, a sve to uz visoku ponovljivost. Mnogo je faktora koji utječu na kvalitetu kod laserskog rezanja. Oni uključuju vrstu lasera koji se koristi, vrstu materijala i njegovu debljinu i strukturu, a osim toga i procesne parametre koji se definiraju prilikom laserskog rezanja. Najvažniji procesni parametri kod laserskog rezanja detaljnije su opisani u poglavlju 4 ovog rada. Cilj eksperimentalnog dijela ovog rada bio je ispitati utjecaj promjene dvaju parametara na kvalitetu reza. Kao promjenjivi parametri odabrani su brzina rezanja i položaj žarišta odnosno fokus dok su ostali parametri unaprijed definirani i nisu se mijenjali prilikom izrezivanja uzoraka. Kao materijal uzoraka odabrana je aluminijska legura AlMg3 (EN AW 5754) u obliku lima debljine 8 mm. Riječ je o jednoj od najčešće korištenih legura u raznim granama industrije. Važno je napomenuti da je stvarna debljina lima korištenog za ovaj pokus bila nešto manja od deklarirane i iznosila je približno 7,7 mm no to nije utjecalo na uspješnost provedbe pokusa. U sklopu pokusa izrezano je 9 pravokutnih uzoraka dimenzija 40x300 mm uz promjene brzine rezanja i položaja žarišta prema unaprijed definiranom planu. Parametri su se mijenjali za $\pm 25\%$. Nakon toga, na uzorcima su provedena mjerenja dimenzijske točnosti,

hrapavosti, kutnosti i količine troske. U sklopu kontrole dimenzijske točnosti uzoraka mjerena su odstupanja od širine i duljine uzoraka uz pomoć mikrometra. Analiza podataka pokazala je da ne postoji značajna povezanost između dimenzijske točnosti i promijene navedenih parametara. Kod svih uzoraka zabilježena su manja odstupanja od nominalnih dimenzija, a većina uzoraka imala je negativna odstupanja, odnosno stvarne dimenzije uzoraka u prosjeku su manje od nominalnih. Ipak, svi uzorci imali su dimenzijska odstupanja manja od 0,1% nominalne dimenzije što se može smatrati zadovoljavajućim. U svrhu analize hrapavosti mjereno je srednje aritmetičko odstupanje profila *Ra*. Kod mjerenja hrapavosti primjetno je grupiranje rezultata s obzirom na položaj žarišta, a najmanje iznose hrapavosti imali su uzorci s položajem žarišta na -4 mm. Kao mjerilo kutnosti korišten je kut između linija koje nastaju uslijed prolaska zrake i gornje horizontalne površine uzoraka. Kut je mjereno na fotografijama snimljenim u laboratoriju pod svjetlosnim mikroskopom uz pomoć programa za obradu slike ImageJ. Rezna površina kod laserskog rezanja obično nije savršeno vertikalna nego posjeduje određeno odstupanje od okomitosti što je uzrokovano raspodjelom topline po visini presjeka kao i samom strukturom materijala. Kod rezultata mjerenja ponovno je izraženo grupiranje rezultata s obzirom na fokus zrake što upućuje taj parametar i u ovom slučaju ima značajniji utjecaj. U svrhu mjerenja količine troske mjerene su visine kapljica troske vidljive na fotografijama uzoraka za što je također korišten program ImageJ. I u ovom slučaju rezultati su grupirani s obzirom na položaj žarišta. Iz svega navedenog moguće je zaključiti da promjena položaja žarišta za 25% ima mnogo veći utjecaj na mjerene veličine koje su uzete kao kriterij kvalitete rezne površine. Oba parametra nisu imala značajan utjecaj jedino na dimenzijsku točnost dok je kod ostalih mjerenih veličina utjecaj brzine bio manje definiran i izražen. Važno je primijetiti i da je položaj žarišta na -3 mm ispod površine materijala dao najbolje rezultate kod mjerenja kutnosti i količine troske dok je najbolje rezultate hrapavosti dao položaj žarišta na -4 mm od površine. Sve navedeno upućuje na činjenicu da je na kvalitetu rezne površine kod laserskog rezanja itekako moguće utjecati promjenom parametara. Svi parametri kod laserskog rezanja imaju manje ili više značajan utjecaj na kvalitetu reza te ih je iz tog razloga potrebno sve uzimati u obzir kod provedbe optimizacije. Zaključno, govoreći o kvaliteti kod laserskog rezanja, mogućnost poboljšanja i optimizacije procesa uvijek postoji no postavljene zahtjeve teško je ispuniti utjecajem samo na jedan ili dva parametra. S obzirom na navedeno, umjesto o optimalnim vrijednostima pojedinih parametara, kod laserskog rezanja ispravnije je govoriti o optimalnim kombinacijama vrijednosti parametara.

8. Literatura

- [1] El-Hofy, H.: Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes, McGraw-Hill, 2005.
- [2] Oke S. R., Ogunwande G. S., Onifade M., Aikulola E., Adewale E. D., Olawale O. E., Ayodele B. E., Obiko F. M. J., Bodunrin M.O.: An overview of conventional and non-conventional techniques for machining of titanium alloys, Manufacturing Review 7, 34, 2020.
- [3] <https://www.fortunebusinessinsights.com/laser-cutting-machines-market-102879> (17.4.2023.)
- [4] <https://ptlaser.com/how-does-the-automotive-industry-benefit-from-laser-cutting/> (17.4.2023.)
- [5] Bušić, M. – Lasersko rezanje i zavarivanje (Predavanje) – Suvremene proizvodne tehnologije, Sveučilište Sjever, Varaždin, akademska godina 2021./2022.
- [6] Hecht, J. (2010). Short history of Laser development. Applied optics. 49. F99-122., Optical Society of America, SAD, 2010.
- [7] <https://lasers.llnl.gov/education/how-lasers-work> (25.4.2023.)
- [8] Koechner W., Solid-State Laser Engineering, 6. izdanje, Springer, New York. SAD, 2006.
- [9] <https://www.laserlabsource.com/Solid-State-Lasers/Solid-State-Lasers/fiber-laser-basics-and-design-principles> (11.5.2023.)
- [10] https://www.rp-photonics.com/laser_gain_media.html (15.5.2023.)
- [11] https://www.scientificmaterials.com/products/nd-yag_yttrium_aluminum_garnet.php (15.5.2023.)
- [12] https://www.rp-photonics.com/free_electron_lasers.html (15.5.2023.)
- [13] https://www.rp-photonics.com/ceramic_laser_gain_media.html (15.5.2023.)
- [14] https://www.rp-photonics.com/optical_resonators.html (15.5.2023.)
- [15] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=58219> (15.5.2023.)
- [16] Abdu, H., Gadallah, M.: Modeling and optimization of laser cutting operations, 2015.
- [17] <https://cdn.thomasnet.com/ccp/30498769/185895.pdf> (31.5.2023.)
- [18] https://wewinlaser.com/how-to-determine-the-focus-position-of-laser-cutting-machine/#Focusing_Position (31.5.2023.)

- [19] <https://artizono.com/fiber-laser-cutting-thickness-speed-chart/> (2.6.2023)
- [20] Kellems K., Rodrigues C. G., Dewulf W., Duflou J. R.: Energy and Resource Efficiency of Laser Cutting Processes, Physics Procedia, Br. 56, stranice: 854-864, 2014.
- [21] <https://www.troteclaser.com/en/learn-support/helpcenter/nd-yag-laser> (31.5.2023.)
- [22] Gautam G.D., Mishra D.R.: Pulsed Nd:YAG Laser Cutting: Accuracy Improvement and Parametric Influences. Iz: Kibria G., Bhattacharyya B. (urednici) Accuracy Enhancement Technologies for Micromachining Processes, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Singapur, 2020.
- [23] <https://www.bystronic.com/usa/en-us/news/130204-co2-vs-fiber-laser> (31.5.2023.)
- [24] <https://www.laserphotonics.com/cost-comparison-fiber-laser-vs-co2-laser-high-power-cutting> (31.5.2023.)
- [25] https://laserphotonics.com/docs/Fiber_v_YAG%5B1%5D.pdf (31.5.2023.)
- [26] <https://robodk.com/blog/robotic-laser-cutting/> (31.5.2023.)
- [27] <http://hr.lksteelpipe.com/aluminium-alloy-5754> (14. 6. 2023.)
- [28] <https://www.bystronic.com/gbr/en/l/fiber-laser-cutting-by-star-fiber> (14.6.2023.)
- [29] Kraut, B: Strojarski priručnik, Sajema d.o.o., Zagreb, 2009.
- [30] https://cuttingtools.ceratizit.com/hr/hr/gospodarske-grane/tokarenje-lju_scarontenjem/korisne-informacije-i-savjeti/kvaliteta-povr_scaronine.html (14.6.2023.)

Popis slika

Slika 1: Toplinski nekonvencionalni postupci obrade materijala [1].....	3
Slika 2: Važnost i primjena lasera u modernoj industriji u konstantnom je porastu [4]	4
Slika 3: Neke vrste lasera s obzirom na valnu duljinu djelovanja [5].....	5
Slika 4: Jedan od prvih lasera napravljenih od strane Theodorea Maimana sa šipkom rubina kao aktivnom tvari [6].....	6
Slika 5: fotografija Theodorea Maimana s jednim od prvih lasera snimljena na press konferencija na kojoj je predstavio svoje otkriće [6]	7
Slika 6: Stimulirana emisija svjetlosti [7]	8
Slika 7: Nastanak laserske zrake[7].....	9
Slika 8: Diodni izvor pumpanja sa svjetlošću valne duljine 976 nm izlazne snage 300W [9]	10
Slika 9: Nd:YAG (Itrij–Aluminij-Granat dopiran Neodimijem) u obliku monokristalnih štapića [11]	11
Slika 10: Linearni optički rezonator [5]	13
Slika 11: Prstenasta izvedba laserskog rezonatora: optički izolator sprječava povrat zrake [14]	14
Slika 12: Shematski prikaz rezonatora fiber lasera [9]	14
Slika 13: Obradna glava lasera (Bystronic Bystar Fiber 3015).....	15
Slika 14: Izmjenjiva leća u držaču dio je fokusne optike (Senfeng SF3015G).....	16
Slika 15: Osnovni mehanizmi koji se javljaju prilikom interakcije laserskog snopa s materijalom [1, 5]	17
Slika 16: Shematski prikaz postupka laserskog rezanja [16]	17
Slika 17: Ovisnost brzine rezanja o snazi i debljini materijala za ugljični čelik (IGP fiber laser) [19]	20
Slika 18: Ovisnost brzine rezanja o snazi i debljini materijala za nehrđajući čelik (IGP fiber laser) [19]	21
Slika 19: Ovisnost brzine rezanja o snazi i debljini materijala za aluminij (IGP fiber laser) [19]	21
Slika 20: Utjecaj položaja žarišta na kvalitetu rezne površine [18]	23
Slika 21: Geometrija sapnice [17]	24
Slika 22: Primjer sapnice (Bystronic Bystar Fiber 3015).....	25
Slika 23: Sapnice različitih vrsta i promjera (Senfeng SF3015G)	25

Slika 24: Shematski prikaz moguće izvedbe Nd:YAG lasera [22]	27
Slika 25: Kvalitativna usporedba troškova lasera [24, 25].....	30
Slika 26: Robotski sustav za lasersko rezanje [26]	31
Slika 27: Fiber laser otvorenog tipa u CNC izvedbi s tri osi (Senfeng SF3015G)	31
Slika 28: Fiber laser zatvorenog tipa u CNC izvedbi s tri osi (Bystronic Bystar Fiber 3015). 31	
Slika 29: Sustav hlađenja i laserski izvor izdvojeni od stroja (Senfeng SF3015G).....	32
Slika 30: Sustav hlađenja lasera Bystronic Bystar Fiber 3015 izdvojen je od stroja dok su izvor i ostale komponente integrirane	32
Slika 31: Bystronic Bystar Fiber 3015 u pogonu tvrtke Dekor tvornica rasvjete d.o.o.	35
Slika 32: Radni prostor i radna glava stroja	36
Slika 33: ByTrans Cross paletni sustav i drugi izmjenjivi radni stol.....	36
Slika 34: Stroj u radu - pogled kroz zaštitno staklo	36
Slika 35: Uzorak.....	37
Slika 36: Crtež plana rezanja.....	38
Slika 37: Definirana geometrija uzorka i položaj ulaza zrake u programu BySoft.....	39
Slika 38: Geometrija uzorka posložena na ploču s definiranim redoslijedom rezanja.....	41
Slika 39: Uspješno provedena simulacija u BySoftu - narančasto označava rezanje, zeleno graviranje.....	41
Slika 40: Program rezanja učitani na radnom računalu lasera	42
Slika 41: Ploča na radnom stolu	42
Slika 42: Početni parametri na sučelju radnog računala lasera	43
Slika 43: Sučelje radnog računala u trenutku rezanja uzorka 6	45
Slika 44: Izrezani uzorci neposredno nakon rezanja	45
Slika 45: Nominalne dimenzije uzorka	46
Slika 46: Profil površine: P - primarni profil, W - valovitost, R – hrapavost [29].....	49
Slika 47: Srednje aritmetičko odstupanje profila Ra [30]	50
Slika 48: Mjerni uređaj Taylor Hobson S-100	50
Slika 49: Postupak mjerenja hrapavosti površine	51
Slika 50: Slika rezne površine	53
Slika 51: Postupak mjerenja kutova na reznoj površini	53
Slika 52: Postavljanje mjerila.....	55
Slika 53: Mjerenje visine kapljica troske	55
Slika 54: Plošni dijagram ovisnosti odstupanja dimenzije B o brzini rezanja i položaju žarišta	57

Slika 55: Plošni dijagram ovisnosti odstupanja dimenzije A o brzini rezanja i položaju žarišta	57
Slika 56: Površine uzoraka 2 i 9	59
Slika 57: Plošni dijagram ovisnosti izmjerene vrijednosti hrapavosti o brzini rezanja i položaju žarišta	59
Slika 58: Srednje vrijednosti izmjerenih kutova poredane po veličini.....	60
Slika 59: Plošni dijagram ovisnosti izmjerenih vrijednosti kutova o brzini rezanja i položaju žarišta	61
Slika 60: Prosječna veličina kapljica troske	61
Slika 61: Plošni dijagram ovisnosti izmjerenih veličina kapljica troske o brzini rezanja i položaju žarišta.....	62
Slika 62: Izgled reznih površina uzoraka 9, 5 i 6 - vidljiva razlika u količini troske.....	63

Popis tablica

Tablica 1: Podjela nekonvencionalnih tehnologija obrade prema obliku korištene energije [1]2	
Tablica 2: Najznačajnije vrste laserskih aktivnih medija [10]	12
Tablica 3: Usporedba maksimalnih debljina rezanja između dva fiber lasera različitih snaga	19
Tablica 4: Usporedba karakteristika lasera [5, 9].....	29
Tablica 5: Kemijski sastav EN AW 5754 [27].....	33
Tablica 6: Najvažnija fizikalna svojstva aluminijske legure EN AW 5754 [27].....	34
Tablica 7: Tehničke karakteristike stroja [28].....	34
Tablica 8: Mogućnosti rezanja pojedinih materijala Bystronic Bystar Fiber 3015 - 10 kW [28]	35
Tablica 9: Nominalni parametri procesa rezanja.....	43
Tablica 10: Definirani parametri pridruženi pojedinim uzorcima	44
Tablica 11: Aritmetičke sredine izmjerenih vrijednosti širine B	47
Tablica 12: Aritmetičke sredine odstupanja od nominalne vrijednosti širine B	47
Tablica 13: Vrijednosti ukupnog srednjeg odstupanja od nominalne širine ΔB_{sr} za uzorke poredane po apsolutnoj vrijednosti od najviše do najniže.....	48
Tablica 14: Aritmetičke sredine izmjerenih vrijednosti duljine A.....	48
Tablica 15: Vrijednosti ukupnog srednjeg odstupanja od nominalne duljine ΔA_{sr} za uzorke poredane po apsolutnoj vrijednosti od najviše do najniže.....	49
Tablica 16: Izmjerene vrijednosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila Ra.....	51
Tablica 17: Izmjerene vrijednosti kuta krivulja u odnosu na gornju horizontalnu površinu uzorka	54
Tablica 18: Rezultati mjerenja visine kapljica troske	56
Tablica 19: Srednje vrijednosti Ra poredane od najveće prema najnižoj	58