

Utjecaj brzine laserskog rezanja na kvalitetu reza

Zorman, Tin

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:909771>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište
Sjever**

Diplomski rad br. 038/STR/2021

**Utjecaj brzine laserskog rezanja
na kvalitetu reza**

Tin Zorman, 1387/336D

Varaždin, srpanj 2021. godine



Sveučilište Sjever

Strojarstvo

Diplomski rad br. 038/STR/2021

Utjecaj brzine laserskog rezanja na kvalitetu reza

Student

Tin Zorman, 1387/336D

Mentor

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj.

Varaždin, srpanj 2021. godine

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Tin Zorman

JMBAG 1387/336D

DATUM 07.07.2021.

KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA Utjecaj brzine laserskog rezanja na kvalitetu reza

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Influence of laser cutting speed on cut quality

MENTOR dr. sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, predsjednik povjerenstva
2. doc. dr. sc. Matija Bušić, član povjerenstva, mentor
3. izv. prof. dr. sc. Sven Maričić, član povjerenstva
4. izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić, članica povjerenstva
5. _____

Zadatak diplomskog rada

BROJ 038/STR/2021

OPIS

U teoretskom dijelu diplomskog rada na osnovi podataka iz literature potrebno je opisati vrste i način rada lasera. Potrebno je dati pregled industrijskih laserskih sustava koji se koriste za rezanje metala. Opisati načine rezanja laserskom zrakom s obzirom na vrste odvajanja materijala. Potrebno je definirati parametre obrade važne za rad lasera. Opisati normu HRN EN ISO 9013 koja definira kvalitetu rezanja toplinskim postupcima.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je fiber laserom izrezati uzorke iz limova općeg konstrukcijskog čelika, nehrđajućeg čelika i aluminijske legure uz varijaciju brzine rezanja. Na uzorcima provesti mjerenje dimenzija, hrapavosti rezne površine i okomitosti reznog ruba. Analizirati rezultate prema dopuštenim odstupanjima kvalitete norme HRN EN ISO 9013. U zaključku je potrebno definirati utjecaj brzine rezanja na mjerene veličine i konačnu kvalitetu rezanja. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

POTPIS MENTORA

M. Bušić



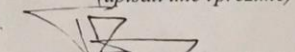
IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

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, TIN ZORMAN pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom UTJECAJ BRZINE LASERSKOG REZANJA NA KVALITETU REZA u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

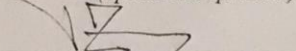

(vlastoručni potpis)

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, TIN ZORMAN neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom UTJECAJ BRZINE LASERSKOG REZANJA NA KVALITETU REZA čiji sam autor.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)


(vlastoručni potpis)

Ovom prilikom zahvaljujem se:

Mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na prenesenom znanju, savjetima i vođenju tijekom izrade diplomskog rada.

Vodstvu tvrtke PROMMING d.o.o. na razumijevanju i podršci, te svim ostalim kolegama na brojnim stručnim savjetima.

Djevojci Jeleni na pomoći i vjeri u mene.

Obitelji na neizmjernom strpljenju, savjetima i podršci bez koje ovo ne bi bilo moguće.

Sažetak

Cilj ovog rada bio je ispitati utjecaj brzine laserskog rezanja na kvalitetu samog reza. Rezani su ispitni uzorci debljine 5 mm od nekoliko vrsta metala (opći konstrukcijski čelik, nehrđajući čelik, aluminijska legura) na fiber laseru njemačkog proizvođača Trumpf. Ispitivanja odnosno mjerenja samih uzoraka provedena su na Sveučilištu Sjever u Varaždinu.

Teorijski dio rada fokusiran je na lasersko rezanje kao tehnologiju toplinskog rezanja iz skupine suvremenih proizvodnih tehnologija. Opisuje sam stroj i princip rada istog, tehnologiju laserskog rezanja, ali i daje jedan generalni uvid u suvremene proizvodne tehnologije.

Ključne riječi: nekonvencionalne tehnologije, kvaliteta, fiber, brzina rezanja, ispitivanje

Summary

The aim of this paper is to examine the influence of cutting speed on the quality of the cut itself using a fiber laser. Test samples 5 mm thick will be cut from several types of metal (construction steel, stainless steel, aluminum) on a fiber laser from the German manufacturer Trumpf. Tests and measurements of the samples themselves were conducted at the University North in Varaždin.

The theoretical part of the paper is focused on laser cutting as a processing technology by separating particles from the groups of modern production technologies. It describes the machine and the principle of operation of the same, laser cutting technology, but also gives a general insight into modern production technologies.

Keywords: unconventional technologies, fibers, cutting speed, quality, examination

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	O LASERU.....	3
2.1.	Povijest lasera.....	3
2.2.	Anatomija modernog lasera.....	4
2.2.1.	Laserska pumpa.....	5
2.2.2.	Laserski medij.....	5
2.2.3.	Optički rezonator.....	5
2.3.	Princip rada lasera.....	6
2.4.	Podjela lasera.....	9
2.4.1.	Laseri s tekućim medijem.....	9
2.4.2.	Laseri s plinskim medijem.....	9
2.4.3.	Laseri s krutim medijem.....	10
2.5.	Karakteristike laserske svjetlosti.....	11
2.5.1.	Monokromatičnost.....	11
2.5.2.	Koherentnost.....	11
2.5.3.	Usmjerenost.....	12
2.6.	Primjena lasera.....	12
3.	LASERSKO REZANJE.....	14
3.1.	Rezanje isparavanjem.....	14
3.2.	Rezanje taljenjem.....	15
3.3.	Rezanje izgaranjem.....	16
4.	PARAMETRI OBRADE.....	17
4.1.	Snaga lasera.....	17
4.2.	Žarišna duljina.....	17
4.3.	Položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada.....	17
4.4.	Brzina rezanja.....	18
4.5.	Rezni plin.....	18

5.	EKSPERIMENTALNI DIO	20
5.1.	Norma HRN EN ISO 9013:2002	20
5.1.1.	Tolerancije kuta i okomitosti	21
5.1.2.	Tolerancije dimenzija.....	22
5.1.3.	Površinska hrapavost	24
5.2.	Rezanje uzoraka	26
5.2.1.	Materijal.....	26
5.2.2.	Trumpf TruLaser fiber 3030	26
5.2.3.	Proces rezanja uzoraka.....	29
5.3.	Mjerenje i analiza uzoraka	32
5.3.1.	Dimenzije.....	32
5.3.2.	Hrapavost	35
5.3.3.	Kutnost.....	42
5.4.	Analiza rezultata.....	44
5.4.1.	Dimenzijske tolerancije i odstupanja	44
5.4.2.	Hrapavost površine	44
5.4.3.	Kutnost.....	45
6.	ZAKLJUČAK.....	46
7.	LITERATURA	47

1. UVOD

Proizvodni proces definiran je kao niz postupaka za stvaranje dobara i usluga. Cilj svakog poduzeća je ubrzati taj proces i eliminirati gubitke, smanjiti troškove. Jedan od načina za postizanje tih ciljeva je korištenje suvremenih proizvodnih tehnologija.

Iste su skup suvremenih postupaka i alata i kao takve sastavni su dio industrijske proizvodnje u poduzećima koja se trude biti konkurentna i uspješno odgovarati na izazove tržišta.

Direktna posljedica odnosno rezultat implementiranja istih u proizvodni proces prvenstveno je poboljšanje kvalitete proizvoda. Uz to, omogućena je proizvodnja izuzetno složenih geometrija te optimalno iskorištenje vremena i materijala.

Skupina suvremenih proizvodnih tehnologija obuhvaća širok spektar postupaka koji se od konvencionalnih metoda razlikuju ovisno o vrsti energije koju koriste, o osnovnom mehanizmu kojim se ostvaruje obrada, o prijenosnom mediju i izvoru energije. Primjerice, kod obrade odvajanjem čestica konvencionalnim metodama potrebno je ostvariti kontakt između alata i obratka, alat mora biti tvrdi, a osnovni mehanizam je mehaničko usitnjavanje. Nekonvencionalne metode ne zahtijevaju taj kontakt, alat ne mora biti tvrdi od obratka, a čestice se mogu odvajati topljenjem, isparavanjem, gibanjem iona ili kemijskim otapanjem. Ti mehanizmi omogućavaju vrlo tanke rezove i samim tim veću uštedu što posebno dolazi do izražaja kod obrade skupih materijala.

Dakle, skupina suvremenih proizvodnih tehnologija nosi mnogo prednosti što potvrđuje činjenica da upravo ti postupci imaju sve značajniju primjenu, a jedan od najistaknutijih postupaka je lasersko rezanje odnosno toplinska obrada korištenjem laserske zrake.

Uz to, laserska se zraka sve češće koristi i za potrebe zavarivanja. Zavareni spoj nastaje taljenjem rubova osnovnog materijala, kao i kod konvencionalnih metoda zavarivanja, a dodatni materijal koristi se vrlo rijetko. Rezultat su uski i duboki zavari te vrlo uska zona utjecaja topline.

Istaknute prednosti zavarivanja laserom su visoka produktivnost, mali unos energije pa shodno tome i manje deformacije, gotovo da nema potrebe za dodatnom obradom, a moguće je postići velike brzine zavarivanja. [1]

Korak naprijed u laserskom zavarivanju bila je i automatizacija odnosno robotizacija postupka i to ne samo iz ekonomske isplativosti već i zbog niza drugih čimbenika kojima je zajednička usmjerenost na radnika. Jednolični i fizički zahtjevni poslovi u kombinaciji s neadekvatnim uvjetima često rezultiraju ozljedama koje je moguće eliminirati upravo korištenjem robota. Uz to, jedna od najznačajnijih odlika robota je ponovljivost; svojstvo koje posebno dolazi do izražaja kod zavarivanja jer omogućava da svaki sljedeći zavareni spoj bude identičan onom prethodnom.

Evidentno je, dakle, da je širok spektar tehničkih procesa u kojima se laser primjenjuje kao primarni alat, posebno kod obrade metala. Nastavak rada fokusira se upravo na lasersko rezanje i nastoji ispitati pretpostavku da alternacija vrijednosti parametra brzine rezanja ima utjecaj na kvalitetu samog reza.

2. O LASERU

Riječ laser je akronim engleskih riječi "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" odnosno pojačanje svjetlosti s pomoću stimulirane emisije zračenja. [1]

Laserima se bavi laserska znanost ili laserska fizika, grana optike koja proučava i opisuje teoriju i primjenu ove tehnologije. Uključuje kvantnu elektroniku, lasersku konstrukciju, fiziku širenja laserske zrake, lasersku primjenu itd. Dugogodišnja istraživanja i mnogi znanstveni radovi na ovim područjima omogućili su nastanak sofisticirane opreme koja se, ovisno o izvedbi, primjenjuje u mnogim područjima; od medicine, vojne industrije i telekomunikacije do obrade metala. [2]

2.1. Povijest lasera

Počeci razvoja laserske tehnologije sežu u rane godine 20. stoljeća kada je Max Planck pronašao poveznicu između energije i frekvencije zračenja. Njegova je teorija, da se energija može zadržati ili emitirati u kvantima, nadahnula A. Einsteina koji je 1917. godine objavio rad o fotoelektričnom efektu pod nazivom "On the Quantum Theory of Radiation". [3]

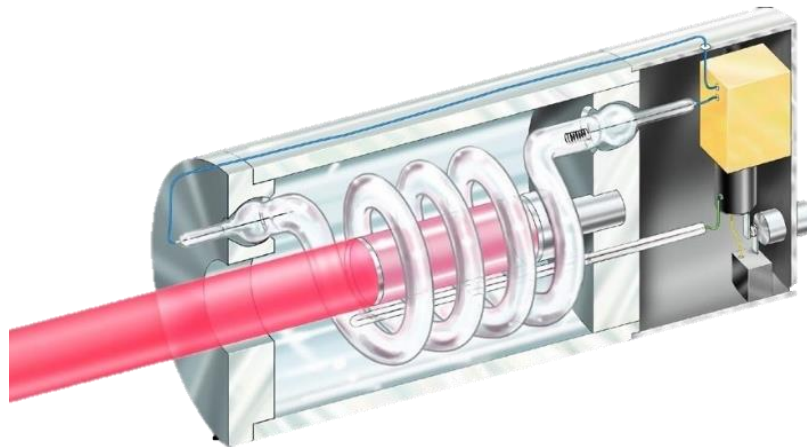
Na toj teoriji počiva rad Charlesa Townesa koji je koristeći stimulirane emisije napravio mikrovalno pojačalo koje je nazvao maser, akronim od engl. Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Preteča lasera, koja radi u drugom valnom području, je zapravo oscilator koji kao emitirajući medij koristi pare amonijaka (NH_3) s inverzijom između dviju razina energija što je rezultiralo produljenjem valne duljine. [3]

Daljnijim istraživanjima s kolegom Arturoom Schawlowom, razvijen je koncept optičkog stimulatora pomoću rezonantne šupljine optičkog zrcala čime je omogućen rast snopa svjetlosti. Kasnije su oba znanstvenika za ovaj rad dobila Nobelovu nagradu.

Ova su otkrića otvorila vrata ka daljnjem napretku tada nove tehnologije pa je tako 1960. napravljen prvi laser. Izum se pripisuje Theodoru Maimanu. [3]

Konstrukciju je izveo koristeći lampu kao izvor svjetlosne energije, koja je u formi spirale omotane oko kristala emitirala bijelu svjetlost. Crveni kristal rubina bio je u obliku štapića s posrebnim krajevima. Kombinacijom tih elemenata stvorio je sustav koji je imao aktivni medij (kristal rubina), lasersku pumpu koja emitira energiju odnosno svjetlost (lampa) i rezonantnu šupljinu u kojoj se odvijao proces laserske emisije (posrebnjeni krajevi).

Slika 2.1. shematski prikazuje navedene elemente. [3]



Slika 2.1 Shematski prikaz lasera T. Maimana, [3]

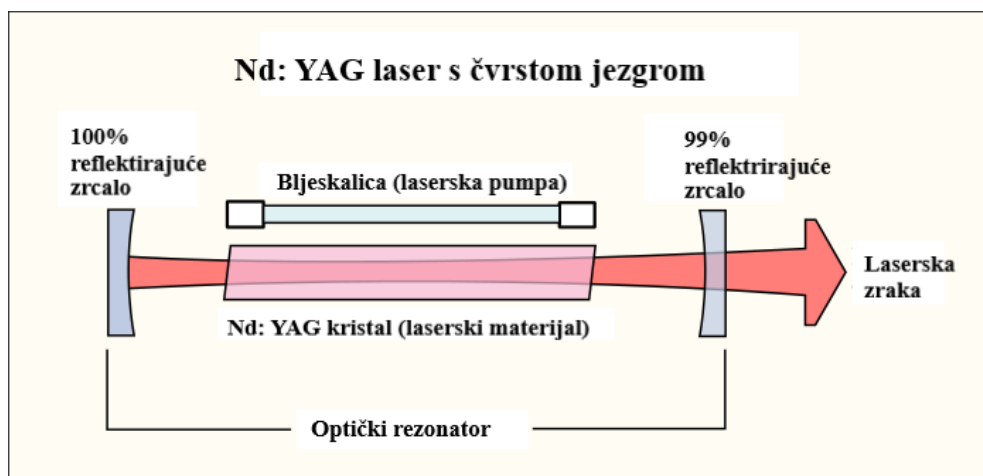
Ovaj izum bio je prekretnica, svojevrsni motiv za daljnja istraživanja iz kojih su proizašli plinski laseri, infracrveni CO₂ laser koji je danas jedan od najjačih i najčešće korištenih lasera, fiber laseri itd. [4]

2.2. Anatomija modernog lasera

Suvremeni laseri koji se koriste u industriji obrade metala imaju tri ključne komponente pomoću kojih se ostvaruje nastanak, prijenos i aplikacija energije. To su:

1. Laserska pumpa
2. Laserski medij
3. Optički rezonator.

Na slici 2.2 shematski su prikazane navedene komponente i veza između istih na primjeru lasera s čvrstom jezgrom.



Slika 2.2 Shematski prikaz osnovnih komponenti lasera, [5]

2.2.1. Laserska pumpa

Osnovni zadatak pumpe je opskrba lasera energijom potrebnom za rad i to tako da "pumpa" odnosno prevodi elektrone na višu energetska razinu obasjavanjem atoma ili molekula fotonima određene energije. [6]

Ovisno o laserskom materijalu, namjeni i izvedbi, energije se može crpiti iz bljeskalice, elektrolučne svjetiljke, kemijske reakcije ili pomoću električnog pražnjenja naboja.

Primjerice, Nd:YAG laser koristi ili lasersku diodu ili fokusirano svjetlo sa ksenon bljeskalice, a kod plinskog He-Ne laser (Helij-Neon) koristi se električno pražnjenje naboja u smjesi navedenih plinova. [6]

2.2.2. Laserski medij

Laserski ili aktivni medij je glavna komponenta koja određuje valnu duljinu rada lasera i u kojoj se pojačava laserska svjetlost svakim prolazom fotona. Pobuda se vrši laserskom pumpom čime se stvara inverzija napučenosti i započinje emitiranje fotona. [7]

Aktivni medij može biti u:

1. Kapljevitom stanju – koriste se obojena, organska otapala kod kojih je radna valna duljina određena kemijskim udjelom bojila
2. Plinovitom stanju – aktivni medij je CO₂, smjesa He-Ne, Ar i sl.
3. Krutom stanju – staklo ili kristal, kao što je bio slučaj kod prethodno spomenutog lasera T. Maimana. Predstavnik ove skupine su Nd:YAG laseri. [7]

2.2.3. Optički rezonator

Optički rezonator čine dva, paralelno postavljena zrcala različite propusnosti, vidljiva na slici 2.2. Prvo je 100% reflektirajuće i ima svrhu emitirane fotone vraćati u aktivnu sredinu čime se promiče reakcija pobuđivanja. Drugo, polupropusno ogledalo ili izlazni reflektor, djelomično odbija dio fotona s istim ciljem kao i prvo ogledalo, a propušta ostatak koji onda tvori lasersku zraku. Reflektivnost odnosno propusnost se postiže optičkim premazima, a osim rezonatora s ravnim, postoji i izvedba s konkavnim zrcalima.

Također, u optički rezonator moguće je ubaciti dodatke poput filtera, apsorbera i modulatora čime je moguće utjecati na određene parametre poput radne valne duljine lasera. [8]

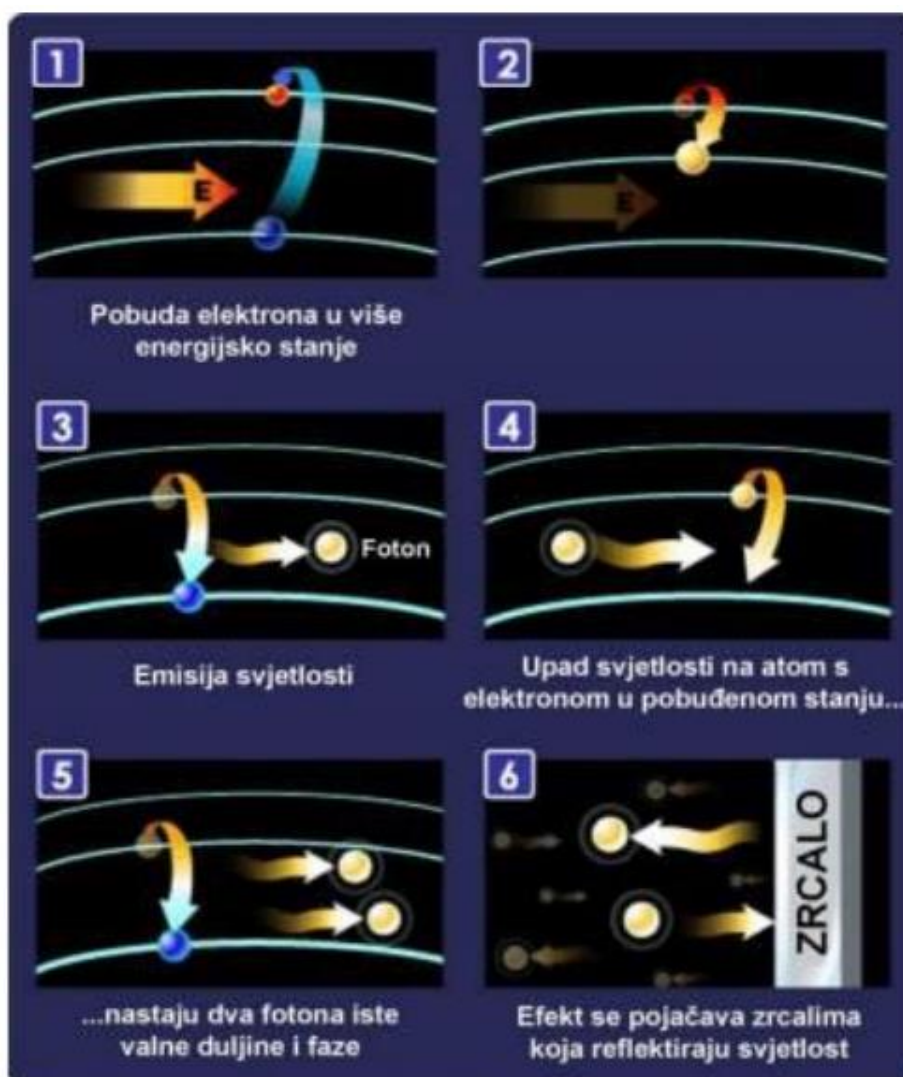
2.3. Princip rada lasera

Temeljni procesi važni za iniciranje laserske zrake su inverzija napučenosti te spontana i stimulirana emisija na razini atoma i molekula. A. Einstein svojim je radom predvidio i objasnio proces spontane i stimulirane emisije davne 1917. godine. Ustanovio je da kada se izdvojeni atom vrati iz pobuđenog u osnovno stanje, emitira foton odnosno svjetlosnu česticu i to je nazvao spontana emisija.

Kad se u neposrednoj blizini nađe veći broj atoma u stanju pobude, a koji su postigli inverziju napučenosti, oni počinju emitirati svjetlosne čestice u svim smjerovima, nekontrolirano.

Međutim, ako se takvi atomi stimuliraju energijom odnosno usmjerenim fotonima, koji imaju određenu valnu duljinu i fazu, isti će potaknuti atome na emisiju fotona koji će se kretati u istom smjeru, imati istu frekvenciju i fazu kao i ti stimulirajući, upadni fotoni što je vidljivo na slici 2.3.

Takvo se ponašanje atoma naziva koherentno zračenje. [3, 9]

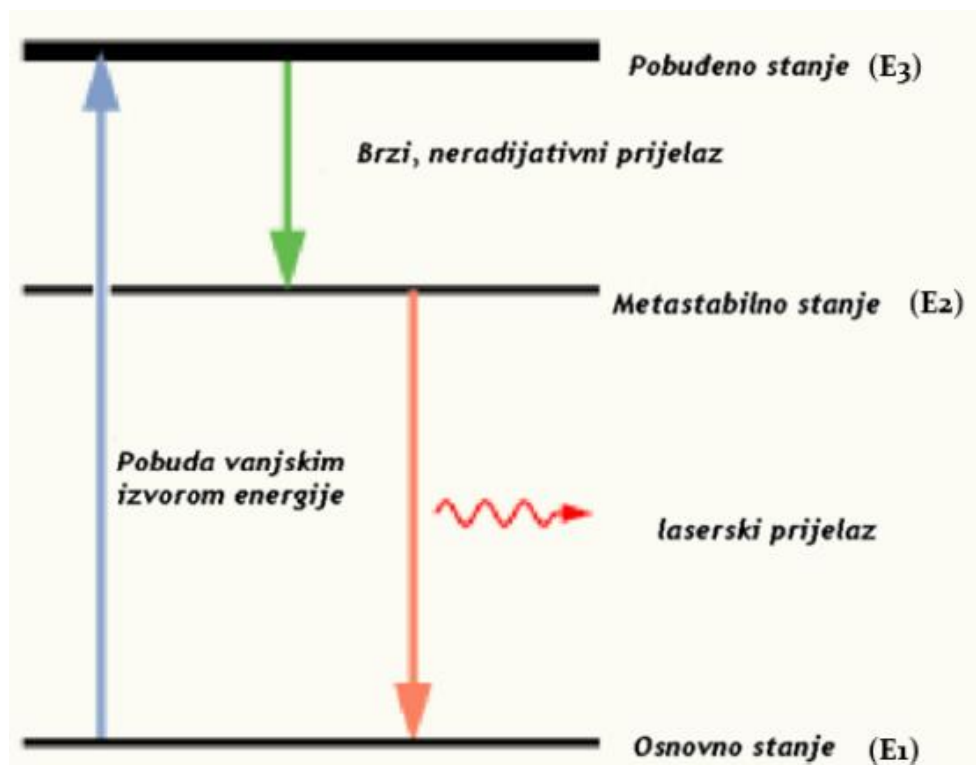


Slika 2.3 Princip pobude atoma i rada lasera, [9]

Taj proces pobude i "združivanja" atoma vrši se u aktivnom mediju gdje ga vraća zrcalo, glavna komponenta optičkog rezonatora, čime se postiže pojačanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja.

To gibanje fotona kroz glavni medij, odnosno između zrcala, zapravo povećava ukupni broj fotona zbog stimulirane emisije te ubrzo nastaje velik broj čestica jednakih svojstava što je preduvjet za nastanak laserske zrake. Propusno zrcalo na jednom kraju optičkog rezonatora propušta dio tih fotona i oni formiraju koncentriran i snažan svjetlosni snop.

Još jedan uvjet koji se mora zadovoljiti da bi nastao laserski svjetlosni snop je da stimulirana emisija prevlada nad apsorpcijom i spontanom emisijom emitiranja što se postiže inverzijom napučenosti atoma. Drugim riječima, broj atoma u stanju pobude mora biti veći od broja atoma u osnovnom stanju. To je teško, gotovo nemoguće postići u sustavu s dvije energetske razine, ali je izvedivo u sustavima s tri ili četiri kad se inverzija napučenosti postiže ili smanjenjem napučenosti stanja niže energetske razine ili povećanjem napučenosti stanja više energetske razine. [9]

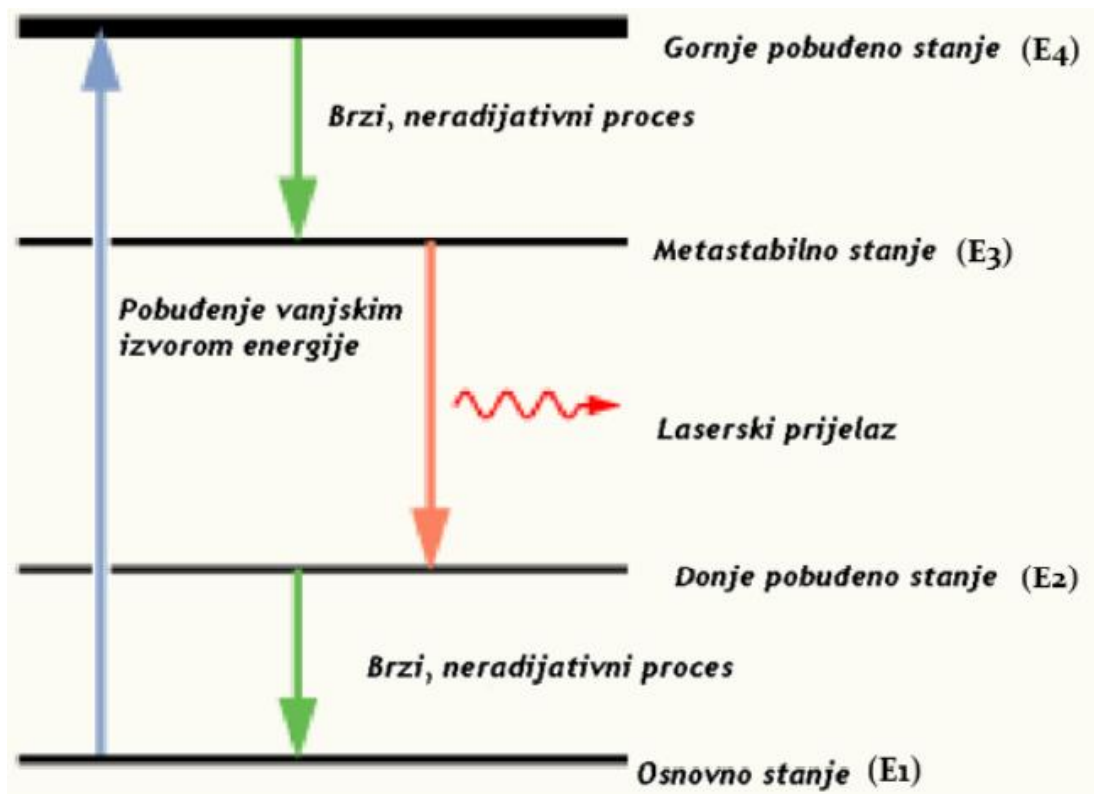


Slika 2.4 Inverzija napučenosti u sustavu s tri razine, [9]

Slika 2.4. prikazuje sustav s tri razine gdje je u početku najveći broj atoma u osnovnom stanju (E₁). Pobudom vanjskim izvorom energije atomi skaču na višu energetsku razinu (E₃), gdje ostaju vrlo kratko i prelaze na nižu, metastabilnu razinu (E₂). Pobuda mora biti dovoljno snažna jer to omogućava da nakon nekog vremena više od polovice atoma bude u stanju E₂ čime je postignuta

inverzija napučenosti između razina E2 i E1 odnosno stvoren je preduvjet za nastanak svjetlosnog snopa koji nastaje pri prijelazu s razine E2 na E1. [9]

Glavni nedostatak ovakvog sustava je činjenica da razina E1 nije prazna na što se može utjecati dodavanjem još jedne energetske razine.



Slika 2.5 Inverzija napučenosti u sustavu s četiri energetske razine, [9]

Na slici 2.5 shematski je prikazan sustav s četiri energetske razine kod kojeg se inverzija napučenosti postiže između razina E3 i E2.

Razina donjeg pobuđenog stanja (E2) se vrlo brzo prazni čime je olakšano održavanje inverzne napučenosti i takav sustav ne zahtijeva veliku snagu pumpanja kao sustav s tri razine. [9]

2.4. Podjela lasera

Sa strojarskog gledišta, laseri su strojevi za obradu metala koje je moguće klasificirati prema nekoliko kriterija. Jedna od najčešće korištenih podjela je s obzirom na korišteni aktivni odnosno laserski medij. Pa se tako razlikuju:

1. Laseri s tekućim medijem
2. Laseri s plinskim medijem
3. Laseri s krutim medijem. [1]

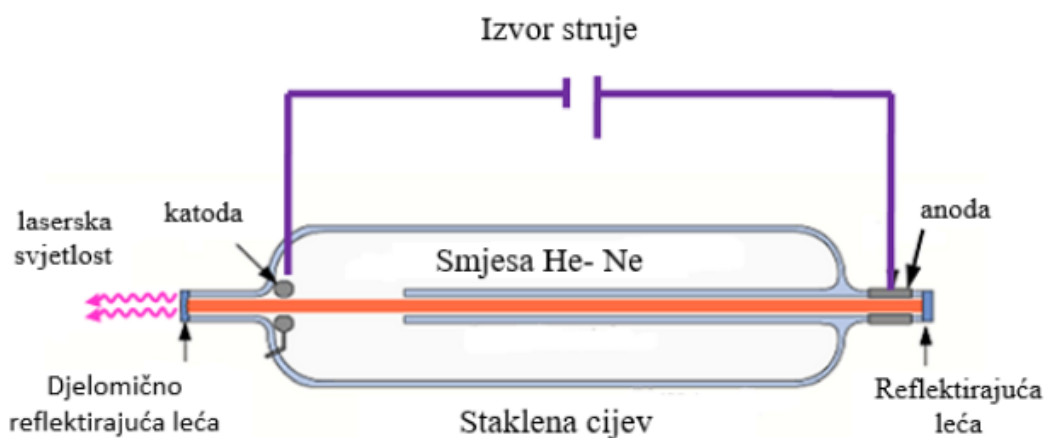
2.4.1. Laseri s tekućim medijem

Tekućine imaju svojstva koje pogoduje korištenju kod izrade laserskih medija; dozvoljavaju izmjenu koncentracije aktivnih iona i jednostavnije ih je hladiti nego primjerice kruti medij. Mana tekućih medija je veliki koeficijent termičke dilatacije i varijabilni indeks loma što za posljedicu ima manju kvalitetu lasera odnosno laserske zrake.

Često se nazivaju i obojeni laseri (eng. dye) jer koriste fluorescentne organske boje. [3]

2.4.2. Laseri s plinskim medijem

Lasери iz ove skupine dijele se na atomske (He-Ne), ionske (Ar, Kr), kemijske i molekulske (CO₂, N₂). Glavna komponenta je cijev ispunjena stlačenim plinom ili plinskom smjesom sa zrcalima na krajevima čime je stvorena rezonantna šupljina. Pobuđeno stanje medija proizlazi iz sudara s elektronima u plinskom izboju, odnosno prolaskom struje dolazi do sudaranja elektrona s atomima ili molekulama. [3] Radi se o relativno jeftinim laserima često korištenima za mjerenja udaljenosti ili spektroskopiju.



Slika 2.6 Cijev He-Ne lasera, [10]

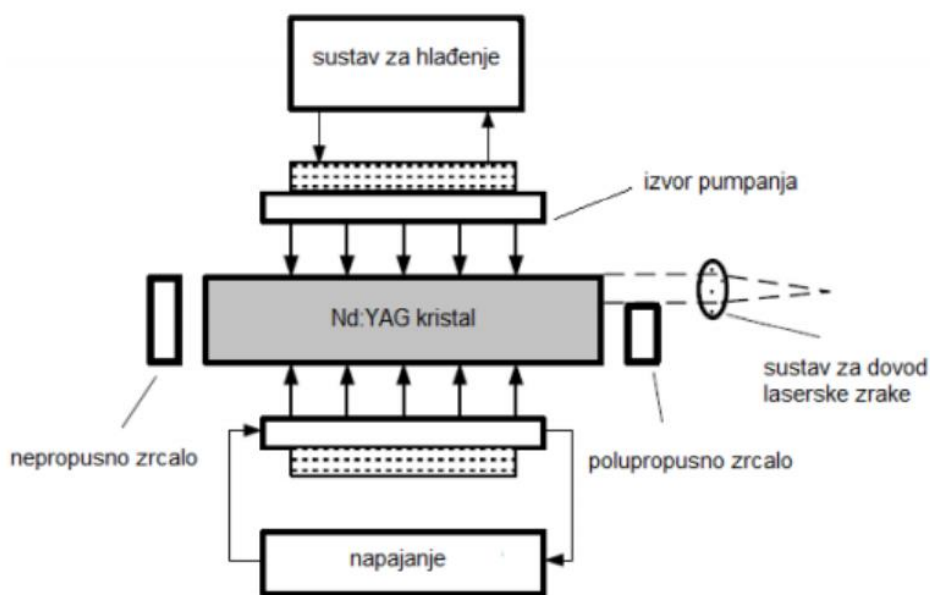
Na slici 2.6 je prikazana cijev He-Ne lasera koja sadrži istoimenu smjesu plinova pod niskim tlakom. Za pobudu neona koristi se helij, bez kojeg bi atomi neona ostali na nižoj energetskej razini i time bili neučinkoviti. Na krajevima vidljive su elektrode koje dovode visoki napon pomoću kojeg se stvaraju elektroni koji sudaranjem s plinskom smjesom oslobađaju energiju i atomi prelaze u pobuđeno stanje.

Kod plinskih lasera važno je spomenuti i CO₂ laser koji koristi molekule ugljikova dioksida kao plinski medij. Daljnja klasifikacija svrstava ga u molekularne lasere. Za pobudu se koristi električni izboj te optičko, kemijsko i toplinsko pumpanje. Značajne prednosti ovog sustava su velika snaga, brzina postupka i visoka kvaliteta pa se koristi u obradi metala, posebno za rezanje, medicini i vojnoj industriji. [3]

2.4.3. Laseri s krutim medijem

Kod izrade aktivnog medija koriste se stakla i kristali, tijela koja apsorbiraju svjetlost, ali je ne emitiraju. Dodavanjem iona plemenitih ili prijelaznih metala omogućava se luminiscencija. Prvi laser bio je već spomenuti rubinski laser s posrebrenim rubovima.

U skupinu lasera s krutim medijem spadaju i Nd:YAG laseri (Y₃Al₅O₁₂) koji imaju značajnu ulogu u industriji. Koriste štapić itrij-aluminij-granata s atomima neodimija koji čine aktivni medij (Nd³⁺). Ti štapići su najčešće dugi nekoliko stotina milimetara, s promjerom od svega nekoliko milimetara. Alternativna izvedba uključuje korištenje itrija (Yb) umjesto neodimija pa se takav laser zove Yb:YAG. Za pobudu se koristi ksenonska ili kriptomaska bljeskalica. Shematski prikaz navedenog vidljiv je na slici 2.7. [3]



Slika 2.7 Shematski prikaz Nd:YAG lasera, [11]

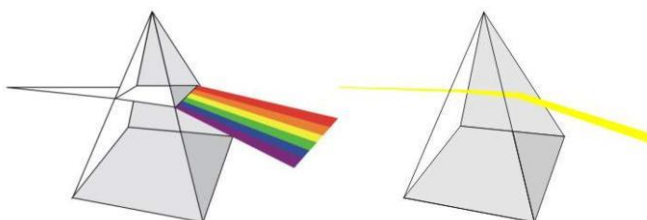
2.5. Karakteristike laserske svjetlosti

Svjetlost koju generira laser, za razliku od obične svjetlosti, ima nekoliko specifičnih svojstava:

1. Monokromatska
2. Usmjerena
3. Koherentna. [1]

2.5.1. Monokromatičnost

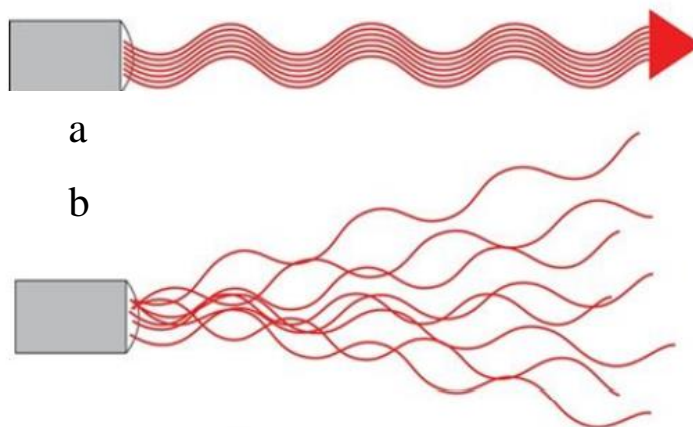
Monokromatski svjetlosni snop sadrži jednu valnu duljinu. To je svojstvo koje se najbolje očituje prolaskom monokromatskog svjetla kroz prizmu pri čemu zadržava boju odnosno ne razlaže se na više njih za razliku od običnog, bijelog svjetla. Navedena razlika prikazana je na slici 2.8.



Slika 2.8 Bijela i monokromatska svjetlost kroz prizmu, [12]

2.5.2. Koherentnost

Generalno, koherencija je mjera korelacije faza između različitih točaka vala. Ekvivalentno, koherentna svjetlost je svjetlost odaslana iz koherentnih izvora u kojima se titraji pojedinih atoma vremenski i prostorno podudaraju. [13] Suprotno tome, svjetlosni izvor poput ručne svjetiljke emitira raspršenu svjetlost što je vidljivo na slici 2.9.



Slika 2.9 Koherentna (a) i raspršena svjetlost (b), [13]

2.5.3. Usmjerenost

Laserska zraka je izuzetno gusto koncentrirana što rezultira malim, gotovo nikakvim kutnim širenjem odnosno rasipanjem što nije slučaj kod, primjerice, običnog izbora svjetla koji je divergentan odnosno širi svjetlosne valove u svim smjerovima.

Posada Apolla 11 pri slijetanju na Mjesec 1971. godine je postavila nekoliko panela s visoko-reflektirajućim površinama. Znanstvenici NASA-e nedavno su uspjeli "pogoditi" jedan od tih panela i dobiti povratnu informaciju odnosno signal što znači da je laserska zraka uspješno proputovala udaljenost od Zemlje do Mjeseca što je udaljenost od oko 384 400 km. [14] Slika 2.10 prikazuje jedan od navedenih panela odnosno retro-reflektor.



Slika 2.10 Reflektivni panel na površini Mjeseca, [14]

2.6. Primjena lasera

Učinkovitost i funkcionalnost odnosno prilagodljivost neka su od najvažnijih svojstava lasera koja omogućavaju njihovu široku primjenu. Razvojem i usavršavanjem tehnologije stvaranja i primjene laserske zrake, dobivaju se uređaji koji se koriste za obavljanje kompleksnih poslova koji zahtijevaju prije svega preciznost.

Sredinom 20. stoljeća, u SAD-u je izvedena prva operacija prilikom koje je rez napravljen korištenjem laserske zrake. Danas, laserska se zraka često primjenjuje kao glavni alat u zahvatima s područja medicine poput dermatologije, estetske kirurgije, stomatologije itd. Laserom je moguće odstraniti tkivo, izbijeliti zube i otkloniti tetovažu s kože, dakle vrlo je širok spektar primjene, naravno u ovisnosti o izvedbi.

Uklanjanje dioptrije jedan je od najčešćih zahvata u oftalmologiji. Tijekom tog procesa laserska zraka prodire u oko i ispravlja oblik rožnice, a sve to bez ikakvih oštećenja na vidni organ.

Nadalje, astronomija, prirodna znanost o svemirskim tijelima i pojavama, lasere koristi dugi niz godina. Upravo pomoću laserske zrake je prvi put precizno izmjerena udaljenost između Zemlje i Mjeseca.

Telekomunikacijske tehnologije uvelike rade na korištenju lasera za prijenos informacija u svemiru s obzirom na to da mogu prenijeti veliku količinu informacija na velike udaljenosti i to u kratkom roku pošto u svemiru nema sitnih čestica u zraku poput magle, prašine i smoga koje onemogućavaju prijenos.

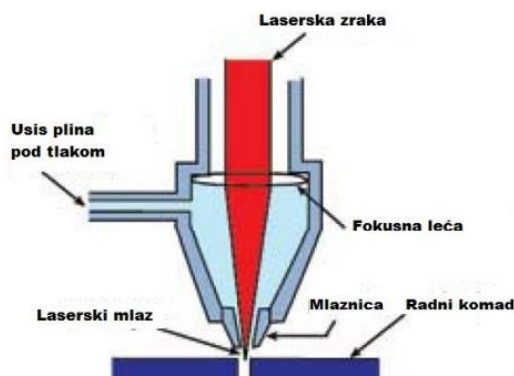
U svakodnevnom životu javlja se mnogo uređaja koji funkcioniraju koristeći lasersku zraku kao glavnu komponentu. Primjerice, podaci se na diskove (CD, DVD) zapisuju, ali i čitaju laserom, kao i bar-kodovi u trgovinama. Laserom se i vrši ispis na papir koristeći laserske pisalice.

Ipak, najznačajnija primjena je u metaloprerađivačkoj industriji gdje se osim za rezanje koriste i za zavarivanje, graviranje, bušenje itd.

Očito je, dakle, da je sveprisutna laserska zraka našla mnogo primjena pa se s pravom smatra jednim od najznačajnijih izuma modernog doba.

3. LASERSKO REZANJE

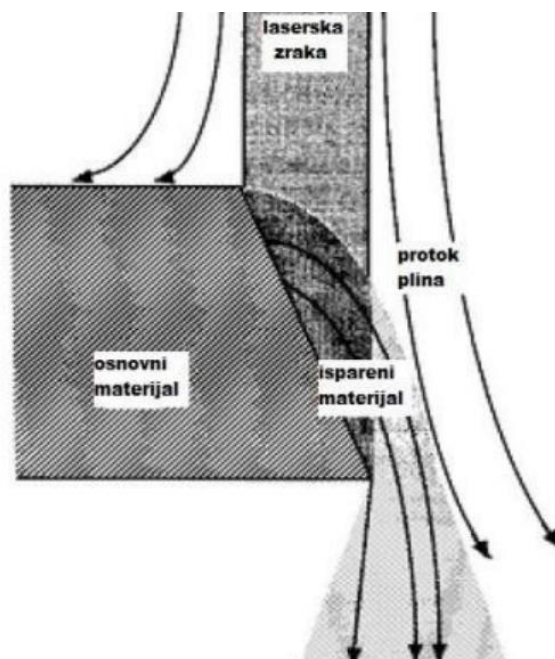
Jedna od najznačajnijih primjena laserske zrake u metaloprerađivačkoj industriji je upravo za rezanje metala. Slika 3.1 shematski prikazuje osnovni princip rezanja laserom. Rez se ostvaruje teljenjem materijala, a uz pomoć plina pod tlakom, aktivnog ili inertnog, otpuhuje se rastaljeni materijal. Osnovni mehanizmi rezanja laserom su taljenje te rezanje izgaranjem i isparavanjem. [1]



Slika 3.1 Shematski prikaz komponenti kod laserskog rezanja [15]

3.1. Rezanje isparavanjem

Rezanje isparavanjem je proces u kojem se materijal pomoću laserske zrake zagrijava iznad temperature taljenja i u konačnici isparava. Plinom, koji se upuhuje paralelno sa laserskom zrakom, se ispuhuje ispareni materijal kako se u zoni rezanja izbjegla kondenzacija materijala u formiranom rezu.



Slika 3.2 Lasersko rezanje isparavanjem, [16]

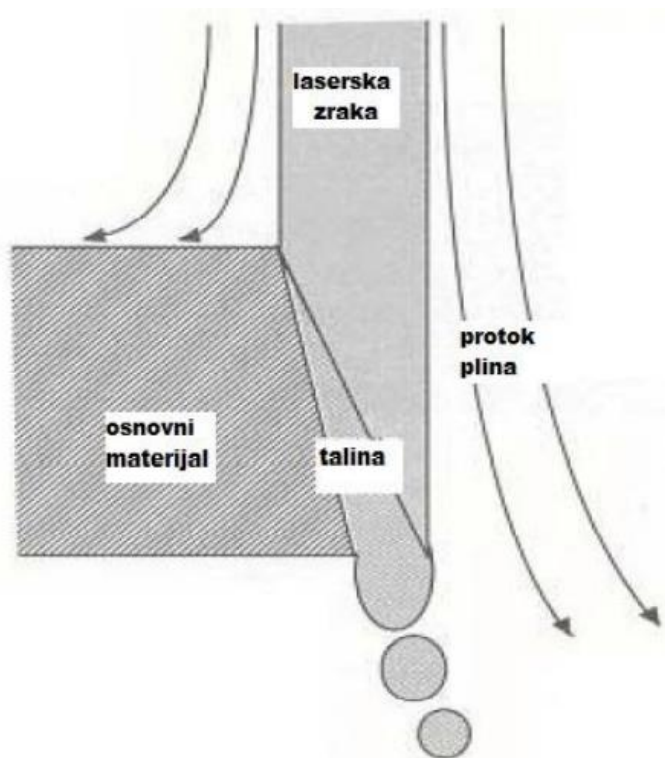
Ovaj mehanizam često se koristi kod rezanja akrila, polimera, drva, papira, kože i sl. Parametri za proces obrade određuju se na temelju termičkih svojstava materijala. Moguće je koristiti ga i kod rezanja metala, a posebno je prikladan za obradu kompleksnih geometrija s uskim tolerancijskim područjem, no negativna strana je to što se radi o najsporijem mehanizmu laserskog rezanja. [16]

3.2. Rezanje taljenjem

Bazira se na zagrijavanju materijala na temperaturu taljenja u zarezu korištenjem laserske zrake i ispuhivanju mlazom inertnog plina, najčešće N ili Ar, pod visokim tlakom. Cilj plinskog mlaza je otpuhivati talinu iz reza i štititi istu od vanjskih nečistoća. Ovakav proces zahtjeva manji unos energije nego primjerice rezanje isparavanjem.

Primjenjuje se kod svih metalnih materijala, posebno kod nehrđajućih čelika, Al i Ti legura itd. Ovim se mehanizmom postiže rez visoke kvalitete, a materijal oko mjesta rezanja zadržava istu postojanost na koroziju.

Negativne strane su relativno male brzine u usporedbi s postupcima rezanja aktivnim plinom i pojava srha na rubovima reza, no to se može otkloniti povišenjem tlaka inertnog plina na vrijednosti više od 10 bara. [16]

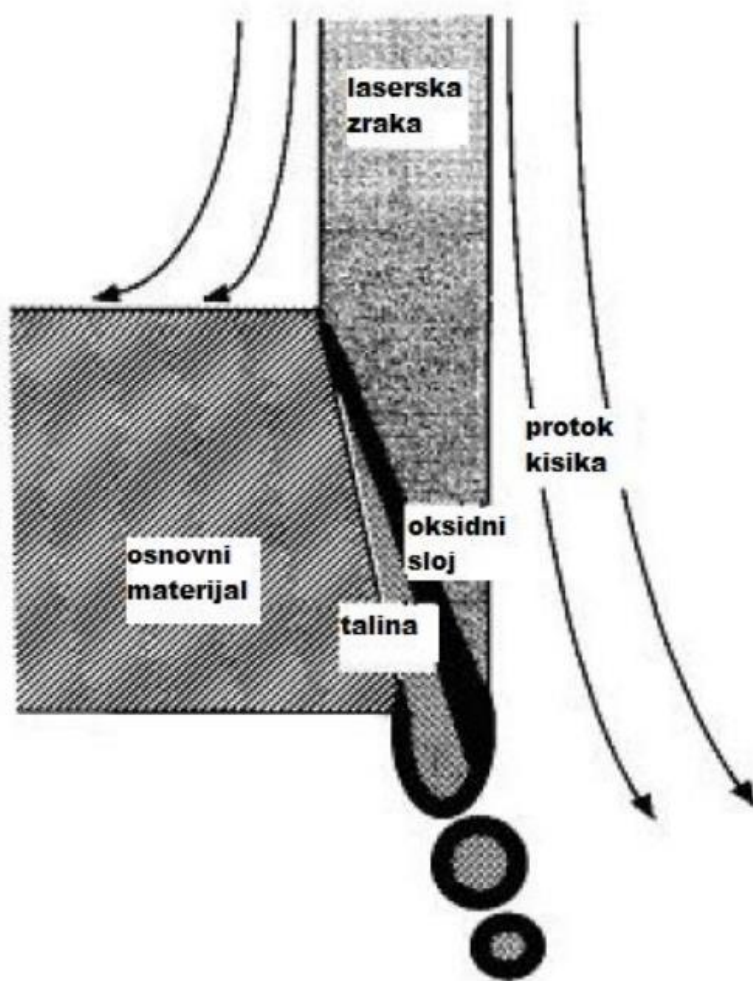


Slika 3.3 Lasersko rezanje isparavanjem, [16]

3.3. Rezanje izgaranjem

Često se naziva i lasersko rezanje kisikom koji se koristi kao pomoćni plin. Za ovaj je mehanizam rezanja karakteristično da zraka grije materijal u prisutnosti kisika i time potiče egzotermnu oksidaciju materijala. To znači da je omogućen dodatni unos topline što rezultira većim brzinama rezanja u usporedbi s primjerice rezanjem inertnim plinom. Zraka lasera uspostavlja i stabilizira izgaranje u reznom području, a pomoćni plin otpuhuje rastaljeni materijal i štiti optiku lasera. [16]

Primjenjivo je nelegirane i niskolegirane čelike. Oksidni sloj u zoni reza smanjuje viskoznost i površinsku napetost taline čime je pojednostavljeno ispuhivanje iste.



Slika 3.4 Lasersko rezanje izgaranjem, [16]

4. PARAMETRI OBRADE

Kao i kod svakog drugog proizvodnog postupka, tako i kod laserskog rezanja postoji nekoliko utjecajnih faktora odnosno parametara koji definiraju ponašanje stroja, a samim time i konačni rezultat odnosno proizvod. Isti se najčešće mijenjaju odnosno prilagođavaju kako bi se proces ubrzao, optimizirala potrošnja materijala ili poboljšala kvaliteta reza.

Neki od najznačajnijih parametara su snaga lasera, žarišna duljina, brzina rezanja i rezni plin. Uz navedene, važno je spomenuti i promjer žarišta, promjer sapnice za rezanje i udaljenost sapnice od radnog komada. [1]

4.1. Snaga lasera

Snaga lasera bitan je parametar koji je zapravo ukupna energija koju stroj emitira u obliku svjetlosnog snopa po jedinici vremena; sekundi. Omjer te snage i površine odnosno područja iznad kojeg je koncentrirana ta snaga se naziva intenzitet laserske zrake. Visoki intenzitet rezultira brzim zagrijavanjem materijala čime se sprječava daljnje širenje topline po materijalu. Taj princip omogućava rezanje materijala i utječe na kvalitetu samog reza. Uz to, intenzitet rezanja i debljina lima su proporcionalne veličine. [17]

4.2. Žarišna duljina

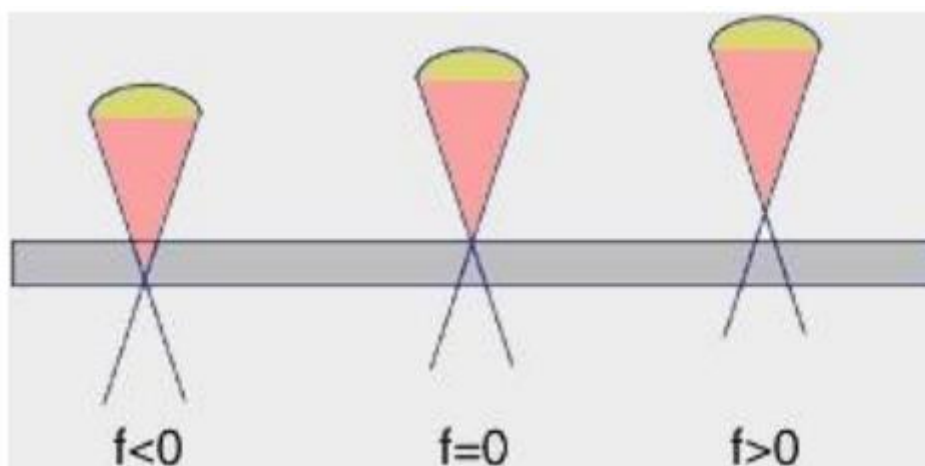
Žarišna ili fokalna duljina (oznaka f) definirana je kao udaljenost od žarišta i središta leće, a ovisi o obliku leće i materijalu od kojeg je leća napravljena. Proces laserskog rezanja zahtjeva usmjeravanje laserske zrake velike snage na izuzetno malu površinu kako bi se ostvarila visoka gustoća snage. To omogućuje rezanje materijala.

Leće manje žarišne duljine koriste se kod rezanja materijala do ~4 mm debljine, a leće veće žarišne duljine za rezanje metala pri kojima veličina fokusa mora biti barem pola debljine metala koji se reže. [17]

4.3. Položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada

Pomoću žarišne udaljenosti određuje se pozicija žarišta u materijalu što ima značajan utjecaj na kvalitetu rezanja. Žarišna udaljenost mora biti kontrolirana kako bi se osigurao optimalni rez. Razlike u materijalu također imaju utjecaj na promjenu žarišta i varijacije u obliku laserske zrake.

Optimalni položaj žarišta kod rezanja s inertnim plinom je kod donje površine obratka jer se tako ostvaruje širi rez čime je olakšano ispuhivanje taline iz zone rezanja.



Slika 4.1 Žarišna udaljenost od površine, [17]

4.4. Brzina rezanja

Kod laserskog rezanja važno je razlikovati dvije energije; energiju potrebnu za rezanje i energiju koja se rasprši u zoni rezanja. Energija iskorištena za vrijeme rezanja ne ovisi o vremenu rezanja, ali energija koja se gubi proporcionalna je vremenu koje je potrebno da se ostvari rez. Dakle, gubitak energije u zoni rezanja smanjuje se povećanjem brzine rezanja, čime se direktno pozitivno utječe na iskoristivost procesa. [17]

Najznačajniji mehanizam prijenosa odnosno gubitka energije kod laserskog rezanja je kondukcija. To je proces prijenosa topline između dva tijela ili čestica u kontaktu. Gubitak energije kondukcijom raste povećanjem debljine materijala i snižavanjem brzine rezanja.

Važno je, dakle, uskladiti brzinu rezanja s protokom plina i snagom.

Veća brzina omogućava veću produktivnost odnosno kraće trajanje procesa, ali je smanjena mogućnost penetracije.

4.5. Rezni plin

Plinovi za rezanje bitan su čimbenik u procesu laserskog rezanja zbog nekoliko funkcija koje obavljaju.

Dušik, inertni plin, otpuhuje rastaljeni materijal i time ne dopušta kapljicama da otvrdnu s donje strane reza odnosno stvore srh. Aktivni plin, primjerice kisik, dio je egzotermne reakcije s materijalom. Uz to, protok plina štiti optiku od štrcanja i onemogućava stvaranje plazme kad se koristi jaki intenzitet za rezanje debljih limova. [17]

Poznato je kako zona utjecaja topline može imati značajan utjecaj na materijal koji se nalazi u tom području pa i tu plin ima važnu ulogu jer protok istog hladi rub reza.

Više je puta utvrđeno kako izbor plina ima značajan utjecaj na produktivnost i kvalitetu procesa rezanja laserom. Plinovi koji se najčešće koriste su kisik kao aktivni plin i dušik kao inertni plin, iako nije potpuno inertni. Najveća mu je prednost cijena, a najviše se koristi kod rezanja nehrđajućih čelika, visoko-legiranih čelika i aluminija, kao što će biti slučaj i u eksperimentalnom dijelu rada.

Potpuno inertni plinovi, primjerice argon i helij, koriste se kod rezanja titana jer sprječavaju formiranje oksida i titanovih nitrida.

Kod rezanja dušikom potreban je veći tlak da može ispuhati rastaljeni materijal jer se time dobiva kvalitetan rez bez oksida. [17]

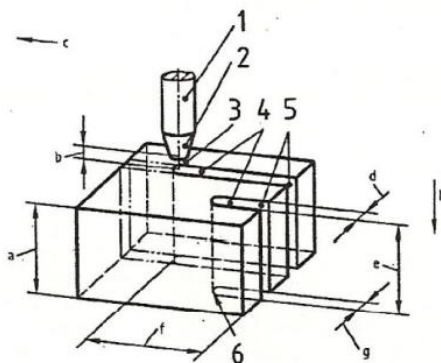
5. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ovog praktičnog dijela rada bio je primijeniti navedena teorijska znanja i ispitati utjecaj brzine laserskog rezanja na kvalitetu samog reza. Nakon rezanja ispitnih uzoraka, isti su bili podvrgnuti ispitivanjima odnosno mjerenju dimenzija, hrapavosti površine i kutnosti, a potom i klasificirani sukladno standardima kvalitete HRN EN ISO 9013:2002.

5.1. Norma HRN EN ISO 9013:2002

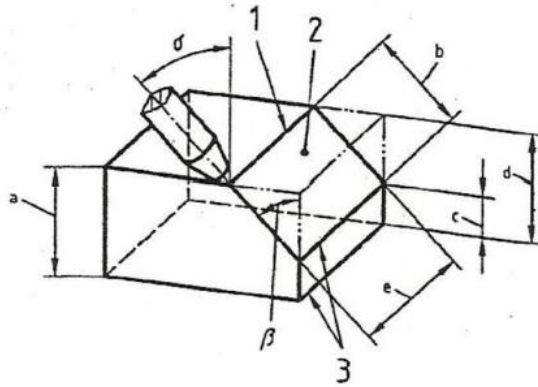
Kao referentni izvor informacija i uputa za određivanje kvalitete laserskog reza, korištena je norma HRN EN ISO 9013:2002 pod nazivom "Toplinsko rezanje - Klasifikacija rezova - Geometrijska specifikacija proizvoda i tolerancije kvalitete". To je međunarodni standard koji vrijedi za sve vrste toplinskih rezanja i te rezove klasificira prema tolerancijama odnosno dozvoljenim odstupanjima kvalitete. Uz to, uključuje i geometrijsku specifikaciju proizvoda, a kako bi ista bila primjenjiva potrebno je imati referencu prema normi HRN EN ISO 9013 u crtežima ili relevantnim dokumentima korištenim u radu. Norma se koristi za rezove odnosno limove debljine od 3 do 300 mm kod plinskog rezanja, od 1 do 150 mm kod plazma rezanja i od 0,5 do 40 mm kod laserskog rezanja. [18]

Slike 5.1 i 5.2 prikazuju dijelove obratka i stroja u samom procesu rezanja te gotovi obradak i vezane pojmove.



- | | |
|---------------------------------|---|
| 1 – Gorionik | a – Debljina radnog komada |
| 2 – Sapnica | b – Udaljenost sapnice od radnog komada |
| 3 – Zraka/Plamen/Električni luk | c – Smjer napredovanja rezanja |
| 4 – Širina reza | d – Širina gornjeg reza |
| 5 – Početak reza | e – Debljina reza |
| 6 – Kraj reza | f – Duljina reza |
| | g – Širina donjeg reza |
| | h – Smjer rezanja |

Slika 5.1 Pojmovi vezani uz proces laserskog rezanja, [18]



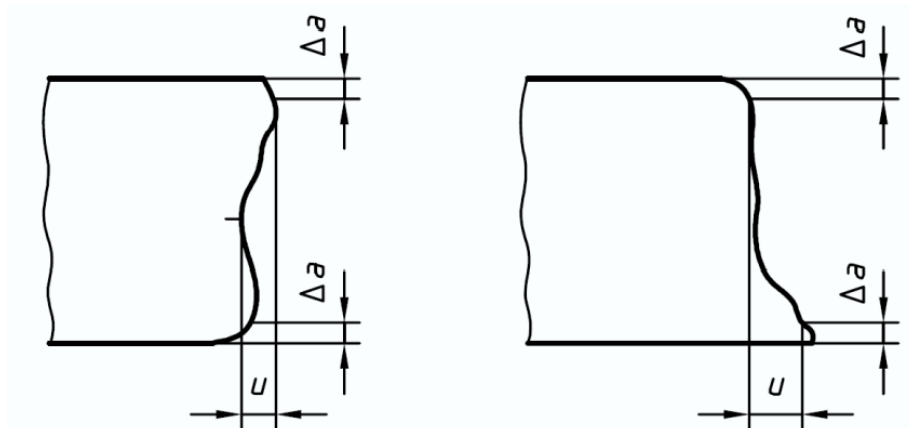
- 1 – Gornji rub reza
- 2 – Površina reza
- 3 – Donji rub reza

- a – Debljina radnog komada
- b – Debljina reza (prva mogućnost)
- c – Visina grla žlijeba/debljina reza (prva mogućnost)
- d – Debljina reza (druga mogućnost)
- e – Duljina reza

Slika 5.2 Gotov radni komad s odgovarajućim izrazima, [18]

5.1.1. Tolerancije kuta i okomitosti

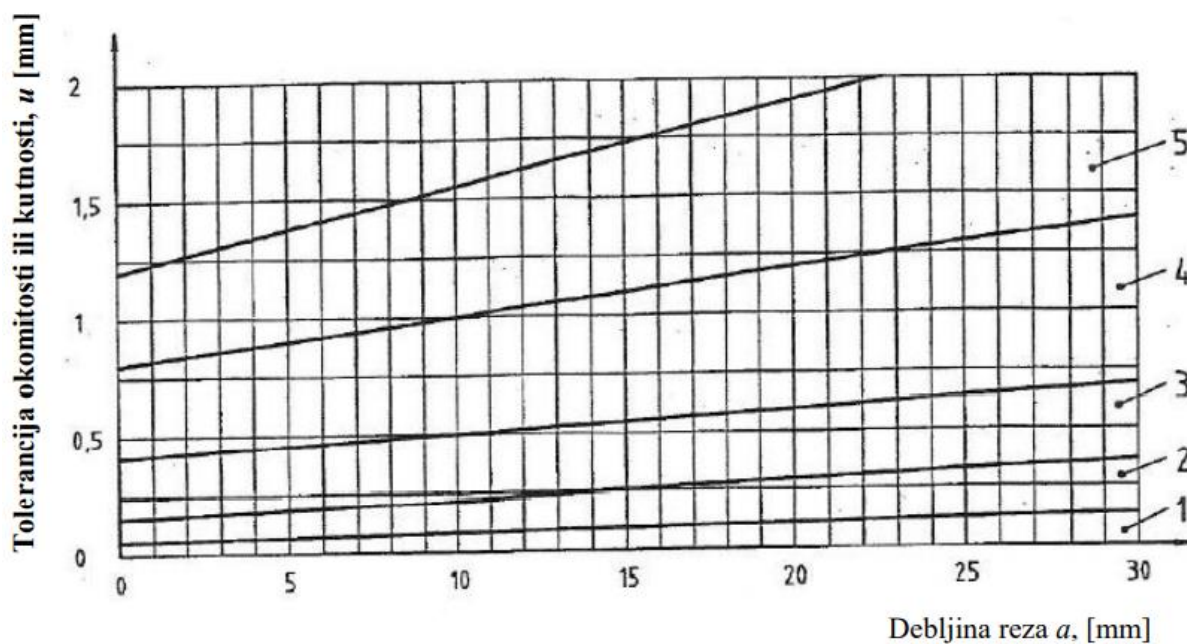
Udaljenost između dva pravca (tangente) kojima je obuhvaćena površina reza, unutar kuta namještanja (npr. 90° u slučaju vertikalnih rezova) označava se oznakom u . Tolerancije kuta ili okomitosti ne uključuje samo okomitost nego i odstupanje od ravnosti. Slika 5.3 pokazuje maksimalna odstupanja unutar klase tolerancije gdje “ Δa ” označava smanjenje debljine a “ u ” toleranciju okomitosti ili kutnosti.



Slika 5.3 Tolerancije kutnosti i okomitosti, [18]

Tablica 1 Rasponi tolerancija okomitosti prema klasama, [18]

Klasa	Tolerancija okomitosti u , mm
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,4 + 0,01a$
4	$0,8 + 0,02a$
5	$1,2 + 0,035a$



Slika 5.4 Tolerancije okomitosti ili kutnosti do debljine 30 mm, [18]

5.1.2. Tolerancije dimenzija

Dimenzije na nacrtima smatraju se nominalnima, dok se stvarne dimenzije utvrđuju na čistim površinama reza. Granična odstupanja navedena u tablicama 2. i 3. će se primjenjivati na dimenzije bez oznake tolerancija, gdje je napravljena referenca prema ovom međunarodnom standardu ili prema drugim dokumentima.

Kod laserskog rezanja, tolerancije dimenzija ovise o geometriji radnog komada, kao i o obradama koje prethode rezanju. Granična odstupanja kvalitete površine reza (tolerancije okomitosti ili kutnosti) su obrađena odvojeno od graničnih odstupanja za dimenzionalne tolerancije radnog komada kako bi se naglasili različiti utjecaji na obradak. [18]

Tablica 2 Granična odstupanja za nominalne tolerancija dimenzija – klasa 1, [18]

Debljina radnog komada, mm	Nominalne dimenzije							
	> 0 < 3	≥ 3 < 10	≥ 10 < 35	≥ 35 < 125	≥125<3 15	≥315< 1000	≥1000 <2000	≥2000< 4000
	Granična odstupanja							
> 0 ≤ 1	± 0,04	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,2	± 0,3	± 0,3	± 0,3
> 1 ≤ 3,15	± 0,1	± 0,2	± 0,2	± 0,3	± 0,3	± 0,4	± 0,4	± 0,4
> 3,15 ≤ 6,3	± 0,3	± 0,3	± 0,4	± 0,4	± 0,5	± 0,5	± 0,5	± 0,6
> 6,3 ≤ 10	-	± 0,5	± 0,6	± 0,6	± 0,7	± 0,7	± 0,7	± 0,8
> 10 ≤ 50	-	± 0,6	± 0,7	± 0,7	± 0,8	± 1	± 1,6	± 2,5
> 50 ≤ 100	-	-	± 1,3	± 1,3	± 1,4	± 1,7	± 2,2	± 3,1
> 100 ≤ 150	-	-	± 1,9	± 2	± 2,1	± 2,3	± 2,9	± 3,8
> 150 ≤ 200	-	-	± 2,6	± 2,7	± 2,7	± 3	± 3,6	± 4,5
> 200 ≤ 250	-	-	-	-	-	± 3,7	± 4,2	± 5,2
> 250 ≤ 300	-	-	-	-	-	± 4,4	± 4,9	± 5,9

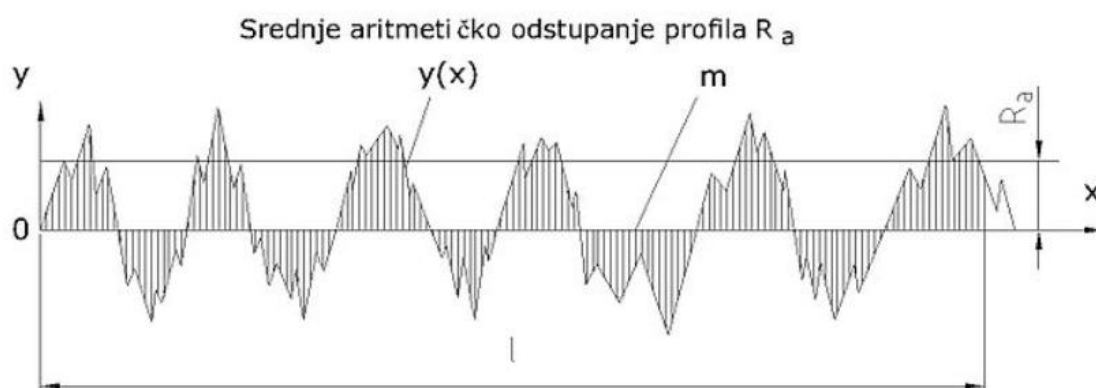
Tablica 3 Granična odstupanja za nominalne tolerancija dimenzija – klasa 2, [18]

Debljina radnog komada, mm	Nominalne dimenzije							
	> 0 < 3	≥ 3 < 10	≥ 10 < 35	≥ 35 < 125	≥125 < 315	≥315< 1000	≥1000 <2000	≥2000< 4000
	Granična odstupanja							
> 0 ≤ 1	± 0,1	± 0,3	± 0,4	± 0,5	± 0,7	± 0,8	± 0,9	± 0,9
> 1 ≤ 3,15	± 0,2	± 0,4	± 0,5	± 0,7	± 0,8	± 0,9	± 1	± 1,1
> 3,15 ≤ 6,3	± 0,5	± 0,7	± 0,8	± 0,9	± 1,1	± 1,2	± 1,3	± 1,3
> 6,3 ≤ 10	-	± 1	± 1,1	± 1,3	± 1,4	± 1,5	± 1,6	± 1,7
> 10 ≤ 50	-	± 1,8	± 1,8	± 1,8	± 1,9	± 2,3	± 3	± 4,2
> 50 ≤ 100	-	-	± 2,5	± 2,5	± 2,6	± 3	± 3,7	± 4,9
> 100 ≤ 150	-	-	± 3,2	± 3,3	± 3,4	± 3,7	± 4,4	± 5,7
> 150 ≤ 200	-	-	± 4	± 4	± 4,1	± 4,5	± 5,2	± 6,4
> 200 ≤ 250	-	-	-	-	-	± 5,2	± 5,9	± 7,2
> 250 ≤ 300	-	-	-	-	-	± 6	± 6,7	± 7,9

5.1.3. Površinska hrapavost

Površinska hrapavost su mikro-geometrijske nepravilnosti na površini elementa koje su dimenzijski značajno manje od promatrane površine, a nastale su tijekom postupka obrade ili uslijed drugih utjecaja. Veličina pomoću koje se u strojarskoj praksi najčešće procjenjuje hrapavost površine je srednje aritmetičko odstupanje profila R_a , koje je jednako aritmetičkoj vrijednosti visine profila neravnina na mjernoj duljini l , prikazano na slici 5.5.

Označena je i srednja linija m , koja siječe profil tako da je u granicama referentne duljine l zbroj kvadrata udaljenosti y svih točaka profila od srednje linije jednak minimumu. [18, 19]



Slika 5.5 Procjenjivanje hrapavosti površine, [19]

Navedeni se izraz može zapisati na sljedeći način:

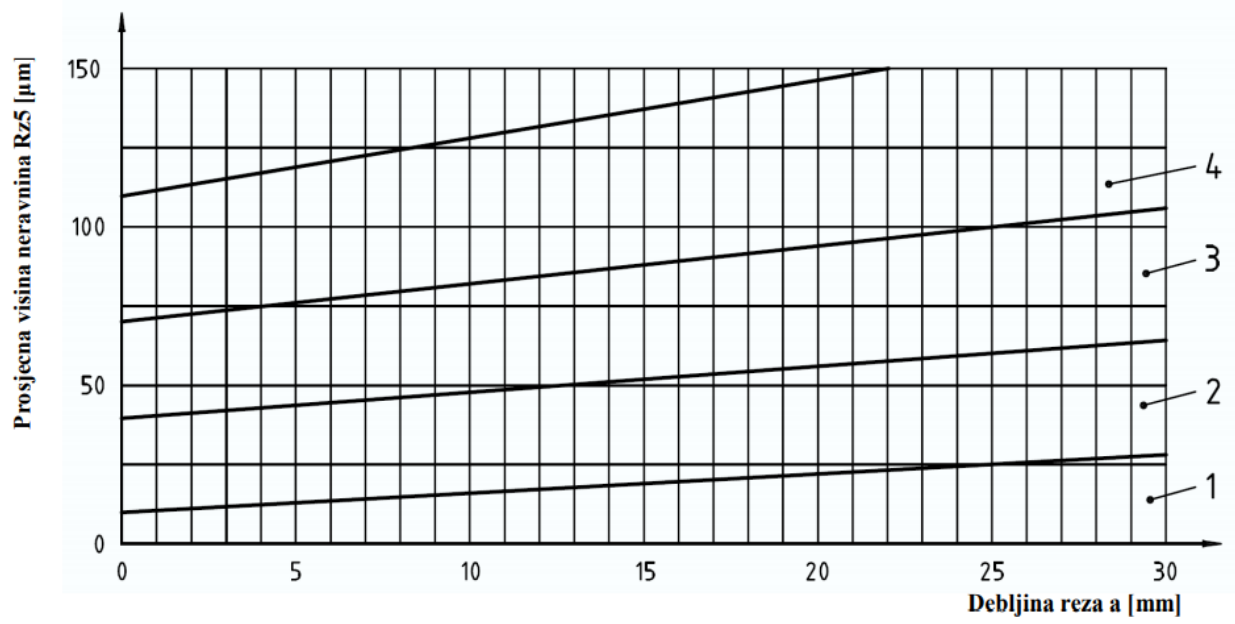
$$R_a = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}, \quad [19]$$

gdje je: R_a , μm - srednja visina neravnina, y_i – visina i -tog najvišeg vrha, n – broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine l .

Prema [18], postoje 4 klase u koje se uzorci svrstavaju prema hrapavosti, a prikazani su u tablici 4.

Tablica 4 Rasponi tolerancije hrapavosti $Rz5$, [18]

Klasa	Hrapavost $Rz5$, μm
1	$10 + (0,6a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$
4	$110 + (1,8a \text{ mm})$



Slika 5.6 Tolerancije hrapavosti, rezni komad do 30 mm, [18]

5.2. Rezanje uzoraka

Ispitni uzorci rezani su iz nekoliko vrsta materijala na fiber laseru njemačkog proizvođača Trumpf. Na taj se način postiže diferentnost rezultata odnosno vidljiv je utjecaj kemijskog sastava i određenog parametra na kvalitetu reza.

5.2.1. Materijal

Korišteni materijali su nehrđajući čelik oznake AISI 304, konstrukcijski čelik S235JR te aluminijska legura EN AW 5083. Debljina korištenih limova je 5 mm.

Tablicama 5 – 7 prikazan je kemijski sastav korištenih materijala.

Tablica 5 Kemijski sastav konstrukcijskog čelika, [20]

Materijal, oznaka	% C	% Mn	% P	% S
konstrukcijski čelik, S235JR	≤ 0,17	≤ 1,40	≤ 0,05	≤ 0,05

Tablica 6 Kemijski sastav nehrđajućeg čelika, [21]

Materijal	% C	% Cr	% Mn	% Ni	% P	% S	% Si
nehrđajući čelik, AISI 304	≤ 0,07	18 - 20	≤ 2	8 - 10,5	≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 1

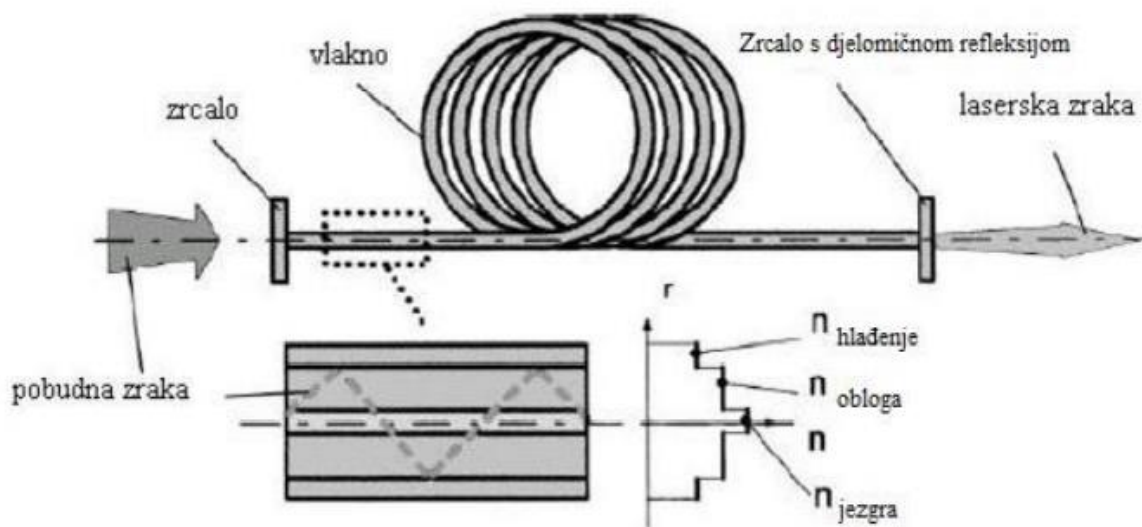
Tablica 7 Kemijski sastav aluminijske legure, [22]

Materijal	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ti	% Cr
Al. legura, EN AW 5083	0,4	0,4	0,1	0,4 – 1	4 – 4,9	0,25	0,15	0,05 – 0,25

5.2.2. Trumpf TruLaser fiber 3030

Navedeni stroj, renomiranog njemačkog proizvođača Trumpf, spada u kategoriju fiber lasera. Iako se svrstavaju u kategoriju lasera s krutim medijem, fiber laseri se po mnogočemu razlikuju od konvencionalnih, optički pumpanih poluvodičkih lasera. Imaju veću električnu učinkovitost nego primjerice konvencionalni laseri s krutim medijem i postižu veću optičku kvalitetu laserske zrake.

Fiber laseri koriste jednostruko emitirajuće poluvodičke diode kao svjetlosni izvor. Emitirana zraka je sadržana u specijalnim optičkim vlaknima i putuje kroz izoliran i fleksibilan kabel. [3] Aktivna vlakna, najčešće izrađena od germanija ili silicija, obogaćena su rijetkim zemljanim ionima što im omogućava stvaranje oštre svjetlosti iz vrlo male jezgre. Promjera su od nekoliko mikrometara do više milimetara i duljine i do više kilometara u određenim slučajevima. [3] Struktura im je nalik zrcalu na oba kraja koja tvore rezonantnu šupljinu u kojoj laserska zraka oscilira. Shematski prikaz fiber lasera, kao i slika samog stroja prikazani su slikama 5.7 i 5.8.



Slika 5.7 Shematski prikaz građe fiber lasera, [3]



Slika 5.8 Trumpf fiber laser i upravljačka jedinica, [23]

Fiber laseri su obično manjih dimenzija i lakši od tradicionalnih lasera odnosno zauzimaju manje radnog prostora. Za razliku od konvencionalnih lasera, koji mogu biti osjetljivi zbog preciznog poravnanja zrcala, fiber laseri su čvršći te manje osjetljivi na radnu okolinu i uvjete u kojima se koriste. [3]

U tablici 8 su prikazane osnovne specifikacije stroja koje je važno istaknuti jer, generalno govoreći, pokazuju radne mogućnosti stroja.

Tablica 8 Specifikacije korištenog stroja Trumpf TruLaser 3030, [24]

TRUMPF TruLaser Fiber 3030	
DIMENZIJE STROJA	
dužina	9300 mm
širina	4700 mm
visina	2280 mm
MASA STROJA	7650 kg
RADNI RASPON	
X os	3000 mm
Y os	1500 mm
MAKSIMALNA SNAGA LASERA	3000 W

MAKSIMALNE DEBLJINE LIMOVA	
opći konstrukcijski čelik	20 mm
nehrđajući čelik	15 mm
aluminij	15 mm
MAKSIMALNA BRZINA POZICIONIRANJA	
x/y os	60 m/min
dijagonalno/simultano obje osi	85 m/min
UPRAVLJAČKA JEDINICA	
TRUMPF CNC/SIEMENS SINUMERIK 840D	

5.2.3. Proces rezanja uzoraka

Ideja je bila koristiti približno jednake parametre za sva rezanja kako bi do izražaja došao utjecaj brzine; jedinog parametra koji se mijenja.

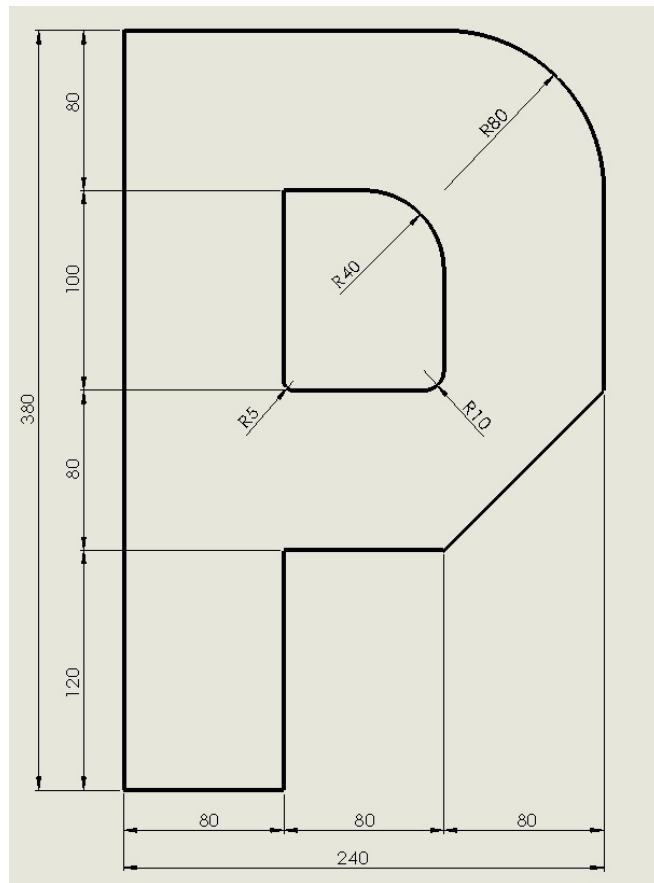
Prvo rezanje svakog materijala odrađeno je sa 60% maksimalne brzine stroja, a sljedeća dva sa 30% odnosno 90%. Osim brzine, bilo je potrebno i promijeniti promjer sapnice kako bi se postigao odgovarajući tlak i protok zaštitnog plina i time uopće ostvario rez obzirom da, kako je spomenuto, parametri nisu optimizirani za svako rezanje.

U tablici 9 navedeni su svi ključni parametri lasera korišteni u procesu rezanja.

Tablica 9 Parametri rezanja

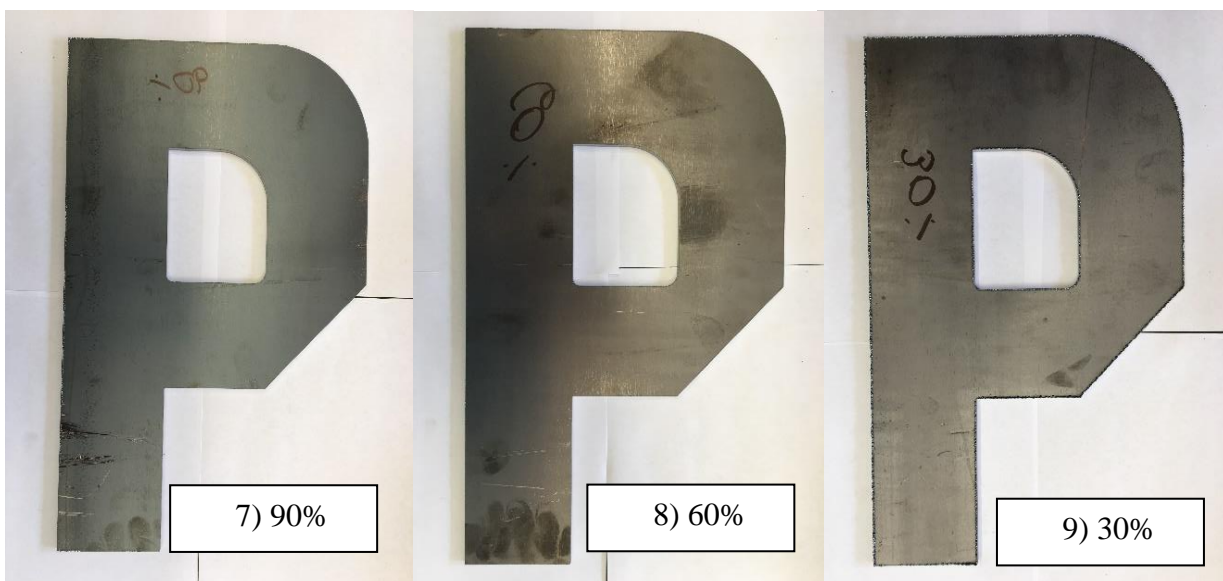
	tlak plina (N ₂), bar	snaga, W	brzina rezanja, mm/min	žarišna udaljenost, mm	promjer sapnice, mm
Al – 1 (90%)	11,9	3000	2070	6,5	2,3
Al – 2 (60%)	12	3000	1380	6,5	2,3
Al – 3 (30%)	11,9	3000	690	6,5	2,3
Rf – 4 (90%)	18	3000	1980	-4	2,3
Rf – 5 (60%)	18	3000	1320	-4	2,3
Rf – 6 (30%)	18	3000	660	-4	2,3
Č – 7 (90%)	16,8	3000	1800	-3,59	2,7
Č – 8 (60%)	16,7	3000	1200	-3,59	2,7
Č – 9 (30%)	16,7	3000	600	-3,59	2,7

Oblik i dimenzije rezanih uzoraka prikazani su na slici 5.9.

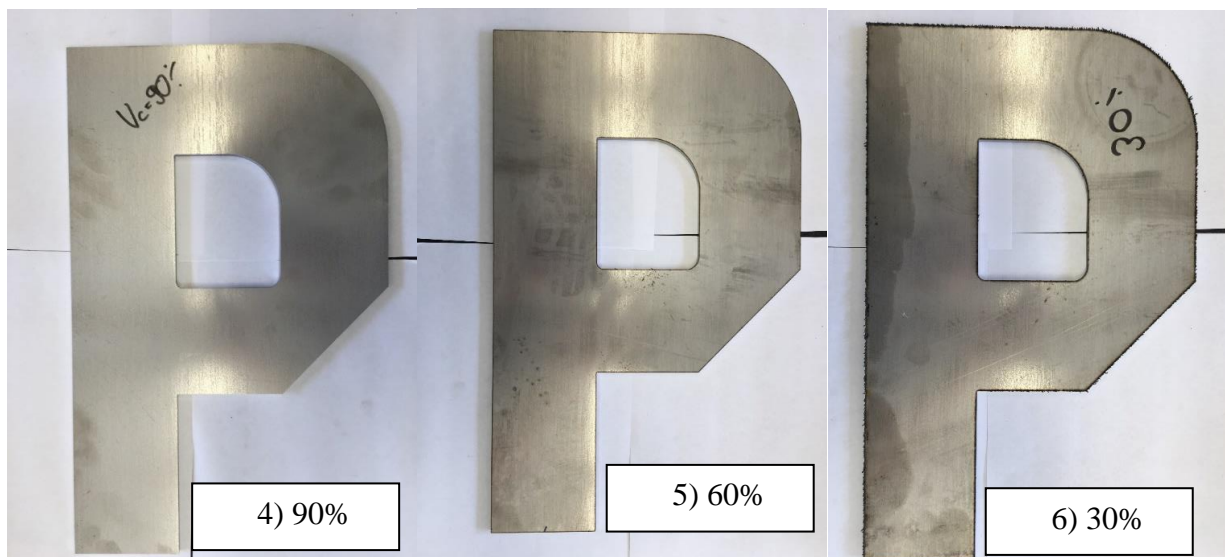


Slika 5.9 P uzorak - dimenzije

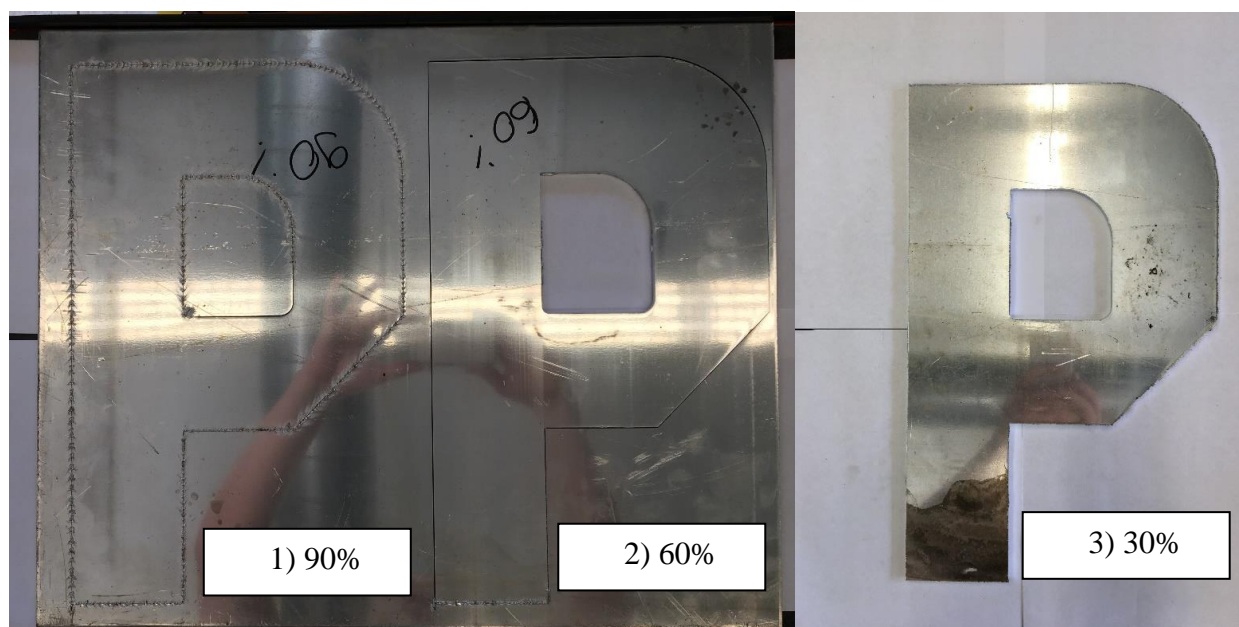
Slike 5.10, 5.11 i 5.12 prikazuju uzorke po završetku rezanja s pripadajućim brzinama i oznakama korištenim u tablici 9.



Slika 5.10 P uzorak - konstrukcijski čelik



Slika 5.12 P uzorak - nehrđajući čelik



Slika 5.11 P uzorak - aluminijeva legura

Utjecaj brzine na kvalitetu reza već je po završetku rezanja dolazio do izražaja kod određenih uzoraka.

Primjerice, kod rezanja aluminijeve legure rez je ostvaren tek s najsporijom brzinom, 30%.

U ostala dva slučaja uzorci su ostali "zavareni" za ploču pa s obzirom na to nisu mogli biti podvrgnuti mjerenjima.

Rezultati rezanja nehrđajućeg i konstrukcijskog čelika slični su međusobno, a potpuno različiti u odnosu na aluminijevu leguru.

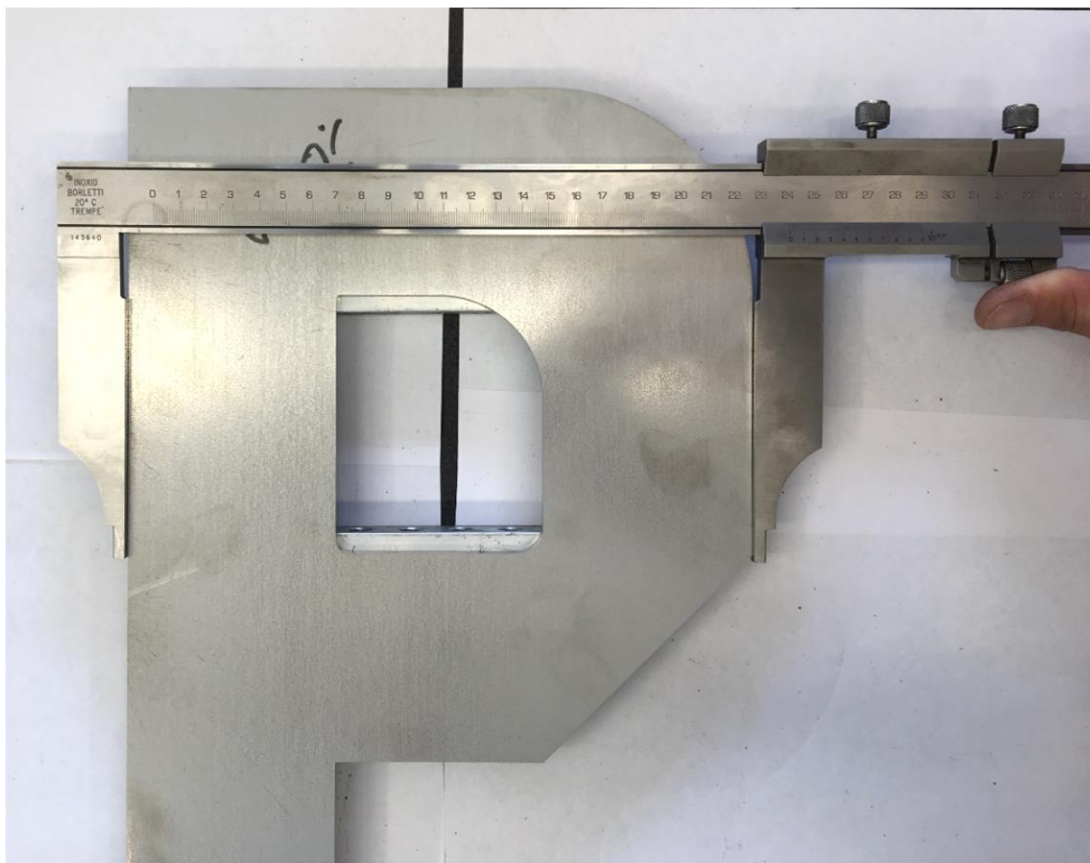
Uzorci rezani većim brzinama vidljivo su kvalitetniji od onog rezanog smanjenom brzinom gdje je primjetan značajan srh odnosno cunder s donje strane reza koji zahtjeva naknadnu obradu.

5.3. Mjerenje i analiza uzoraka

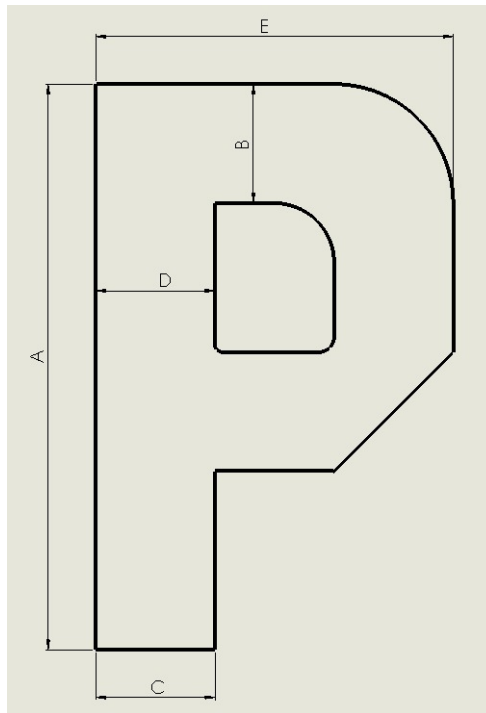
Nakon vizualne inspekcije uslijedilo je mjerenje dimenzija, površinske hrapavosti i kutnosti. Mjerenja su provedena u laboratoriju Sveučilišta Sjever korištenjem dostupnih mjernih alata. Po završetku mjerenja rezultati se uspoređuju međusobno i uzorke se klasificira odnosno svrstava u klase koje su definirane referentnom normom.

5.3.1. Dimenzije

Za mjerenje dimenzija odnosno odstupanja korišteno je pomično mjerilo mjernog područja 0-500 mm i rezolucije 0,1 mm prikazano na slici 5.13.



Slika 5.13 Mjerenje pomičnim mjerilom



Slika 5.14 P uzorak i mjerene dimenzije

Slika 5.14 prikazuje odabrane mjere koje su za svaki uzorak navedene u tablicama 10 – 16.

Tablica 10 Rezultati mjerenja dimenzija - konstrukcijski čelik - 30%

S235JR – 30%	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm	E, mm
MJERENJE 1	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0
MJERENJE 2	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0
MJERENJE 3	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0
SREDNJA VRIJEDNOST	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0

Tablica 11 Rezultati mjerenja dimenzija - konstrukcijski čelik - 60%

S235JR – 60%	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm	E, mm
MJERENJE 1	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0
MJERENJE 2	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0
MJERENJE 3	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0
SREDNJA VRIJEDNOST	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0

Tablica 12 Rezultati mjerenja dimenzija - konstrukcijski čelik - 90%

S235JR – 90%	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm	E, mm
MJERENJE 1	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0
MJERENJE 2	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0
MJERENJE 3	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0
SREDNJA VRIJEDNOST	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0

Tablica 13 Rezultati mjerenja dimenzija - aluminijska legura - 30%

Al 5083 – 30%	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm	E, mm
MJERENJE 1	379,8	80,0	79,9	80,0	239,7
MJERENJE 2	379,8	80,0	80,0	80,0	239,7
MJERENJE 3	379,8	80,0	80,0	80,1	239,8
SREDNJA VRIJEDNOST	379,8	80,0	79,97	80,03	239,73
ODSTUPANJE	-0,2	0	-0,03	+0,03	-0,27

Tablica 14 Rezultati mjerenja dimenzija - nehrđajući čelik - 30%

AISI 304 – 30%	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm	E, mm
MJERENJE 1	379,9	80,1	80,0	80,0	239,9
MJERENJE 2	380,0	80,0	80,0	80,1	239,9
MJERENJE 3	379,9	80,1	80,0	80,1	239,9
SREDNJA VRIJEDNOST	379,93	80,07	80,0	80,07	239,9
ODSTUPANJE	-0,07	+0,07	0	+0,07	-0,01

Tablica 15 Rezultati mjerenja dimenzija - nehrđajući čelik - 60%

AISI 304 – 60%	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm	E, mm
MJERENJE 1	380,0	80,1	80,0	80,1	240,0
MJERENJE 2	380,0	80,0	80,0	80,1	240,0
MJERENJE 3	380,0	80,1	80,0	80,0	240,0
SREDNJA VRIJEDNOST	380,0	80,07	80,0	80,07	240,0
ODSTUPANJE	0	+0,07	0	+0,07	0

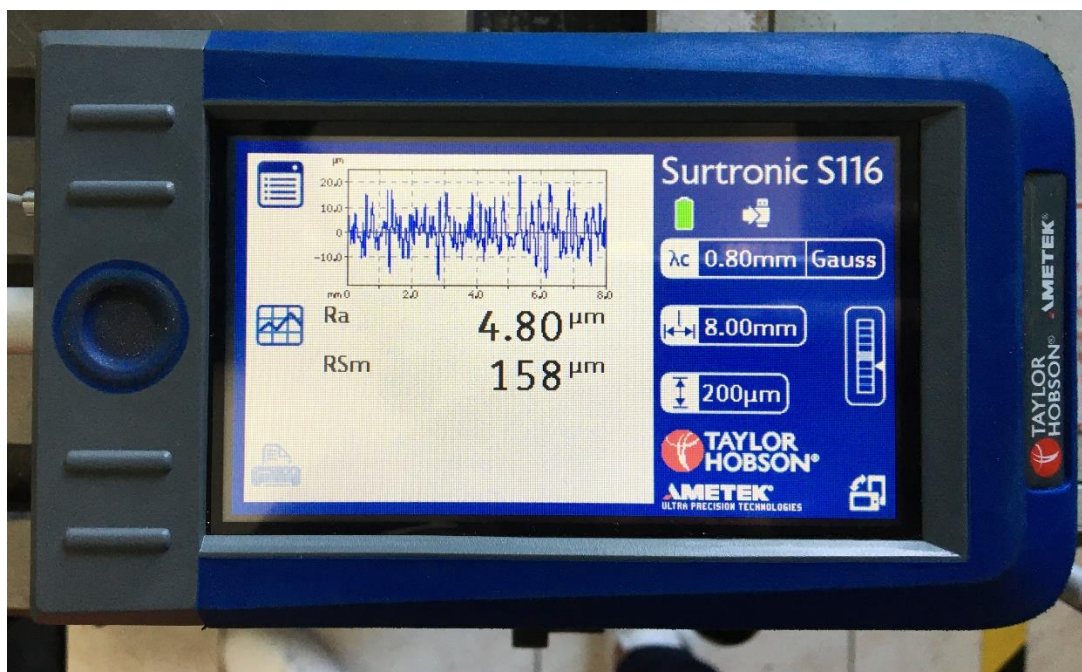
Tablica 16 Rezultati mjerenja dimenzija - nehrđajući čelik - 90%

AISI 304 – 90%	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm	E, mm
MJERENJE 1	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0
MJERENJE 2	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0
MJERENJE 3	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0
SREDNJA VRIJEDNOST	380,0	80,0	80,0	80,0	240,0

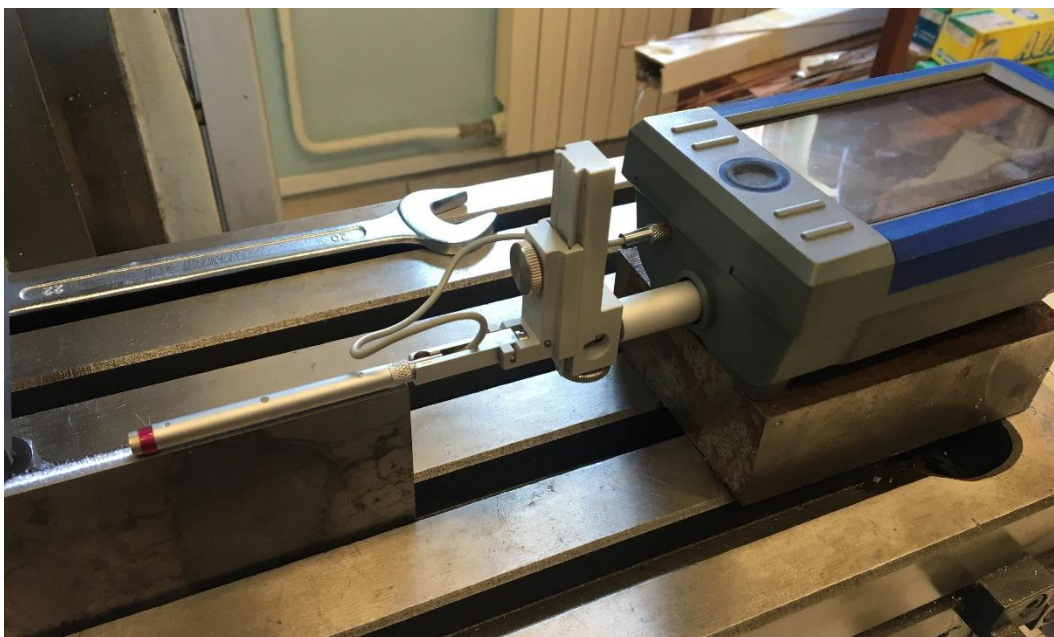
5.3.2. Hrapavost

Za mjerenje hrapavosti površine korišten je uređaj AMETEK Taylor Hobson Surtronic S-100. Mjerno područje korišteno u ovom eksperimentu iznosi 8 mm, a skala 200 μm što je vidljivo na slici 5.15. Navedeni su parametri postavljeni iskustveno.

Na svakom su uzorku provedena tri mjerenja i to u smjeru rezanja, kako je navedeno u normi.



Slika 5.15 Parametri mjerenja hrapavosti površine



Slika 5.16 Postupak mjerenja hrapavosti površine

Rezultati provedenih mjerenja prikazani su u tablicama 17 – 19.

Tablica 17 Rezultati mjerenja hrapavosti površine uzoraka od konstrukcijskog čelika

Ra	Č – 90%, μm	Č – 60%, μm	Č – 30%, μm
MJERENJE 1	3,1	6	8,9
MJERENJE 2	3,0	5,9	8,6
MJERENJE 3	3,2	5,8	8,8
SREDNJA VRIJEDNOST	3,1	5,9	8,7
Rz5, μm	11,47	21,1	29,58

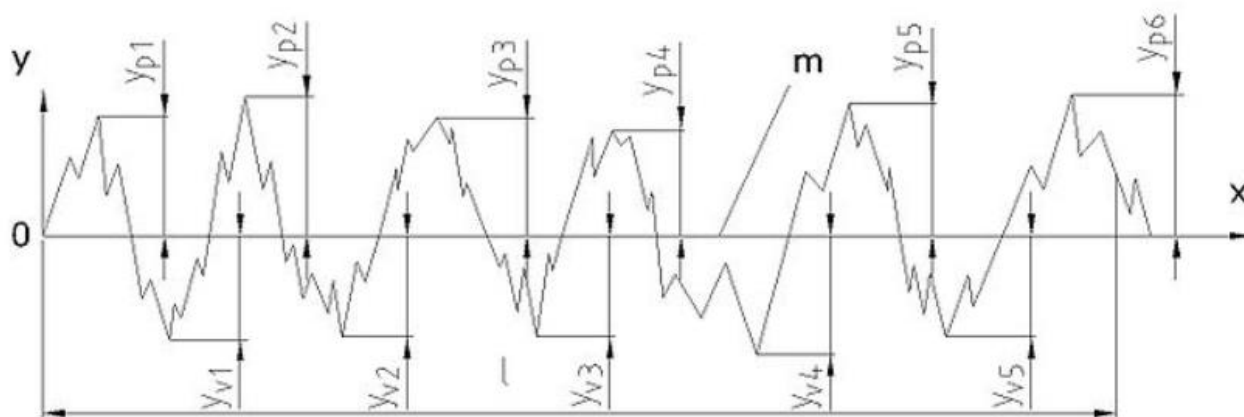
Tablica 18 Rezultati mjerenja hrapavosti površine uzoraka od aluminijske legure

Ra	Al – 30%, μm
MJERENJE 1	4,2
MJERENJE 2	4,4
MJERENJE 3	4,6
SREDNJA VRIJEDNOST	4,4
Rz5, μm	14.96

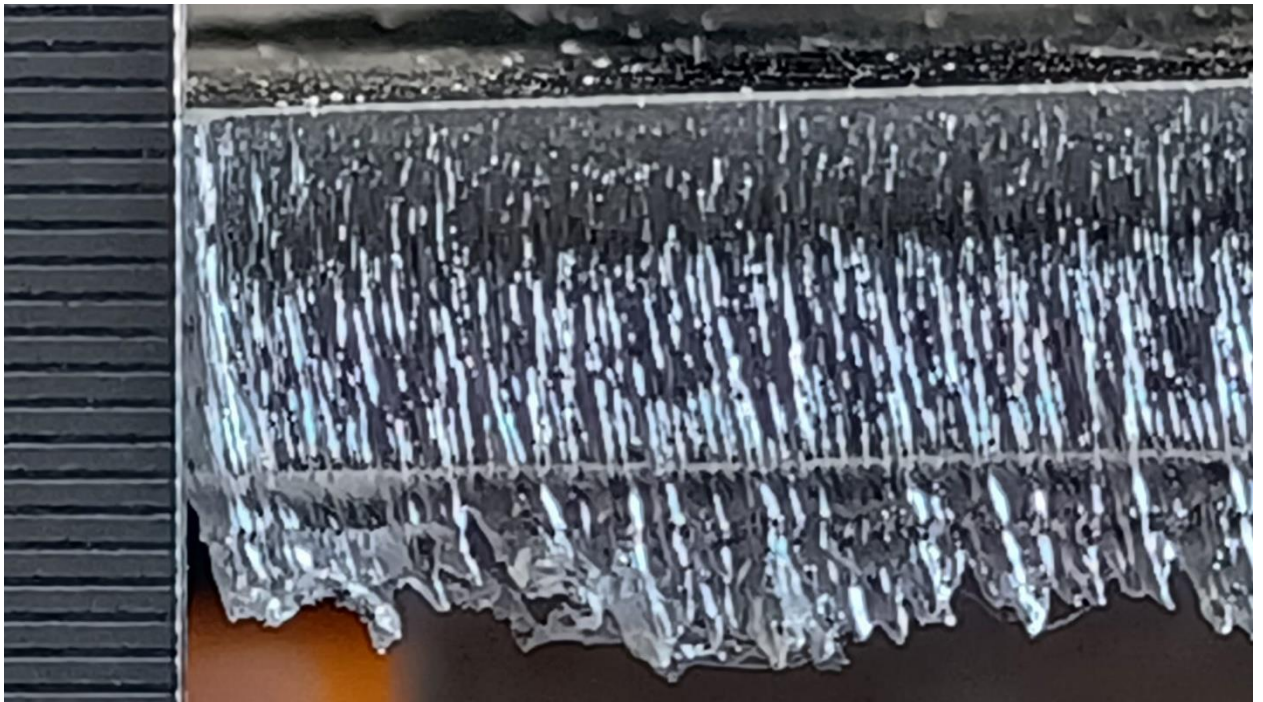
Tablica 19 Rezultati mjerenja hrapavosti površine uzorka od nehrđajućeg čelika

Ra	Rf – 90%, μm	Rf – 60%, μm	Rf – 30%, μm
MJERENJE 1	5,2	4,8	6,1
MJERENJE 2	4,5	4,5	6,7
MJERENJE 3	4,4	4,7	6,6
SREDNJA VRIJEDNOST	4,7	4,7	6,5
Rz5, μm	17,4	16,8	22,1

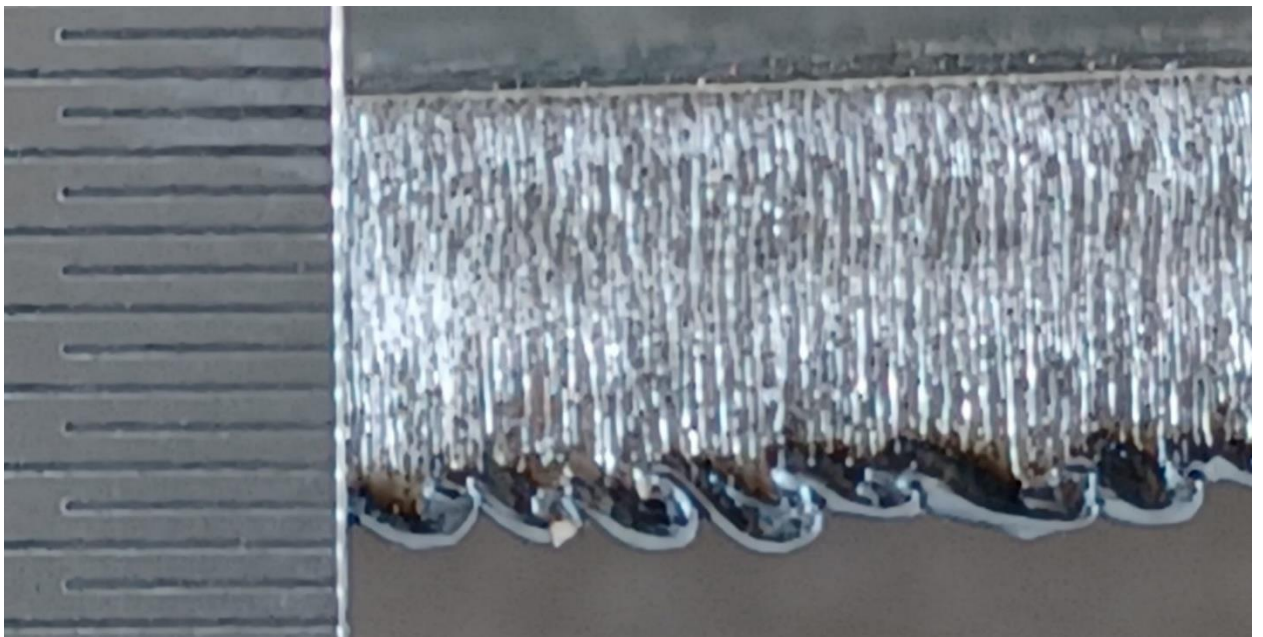
U tablice je upisan i parametar R_z5 odnosno srednja visina neravnina koja je jednaka zbroju aritmetičke sredine apsolutnih vrijednosti pet najviših vrhova i aritmetičke sredine pet najvećih dubina udolina na mjernoj duljini l. Vrijednost se povećava s referentnom duljinom, odnosno duljinom na kojoj se promatraju neravnine što je u ovom slučaju 8 mm.



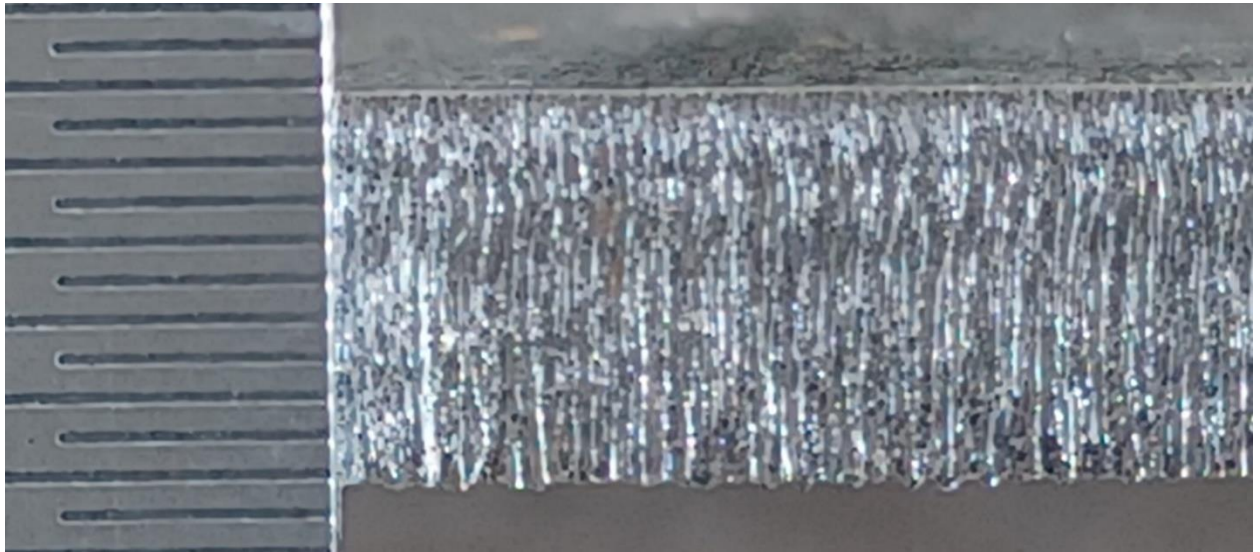
Slika 5.17 Način određivanja srednje visine neravnine Rz, [19]



Slika 5.18 Rezna površina - aluminijeva legura - 30%



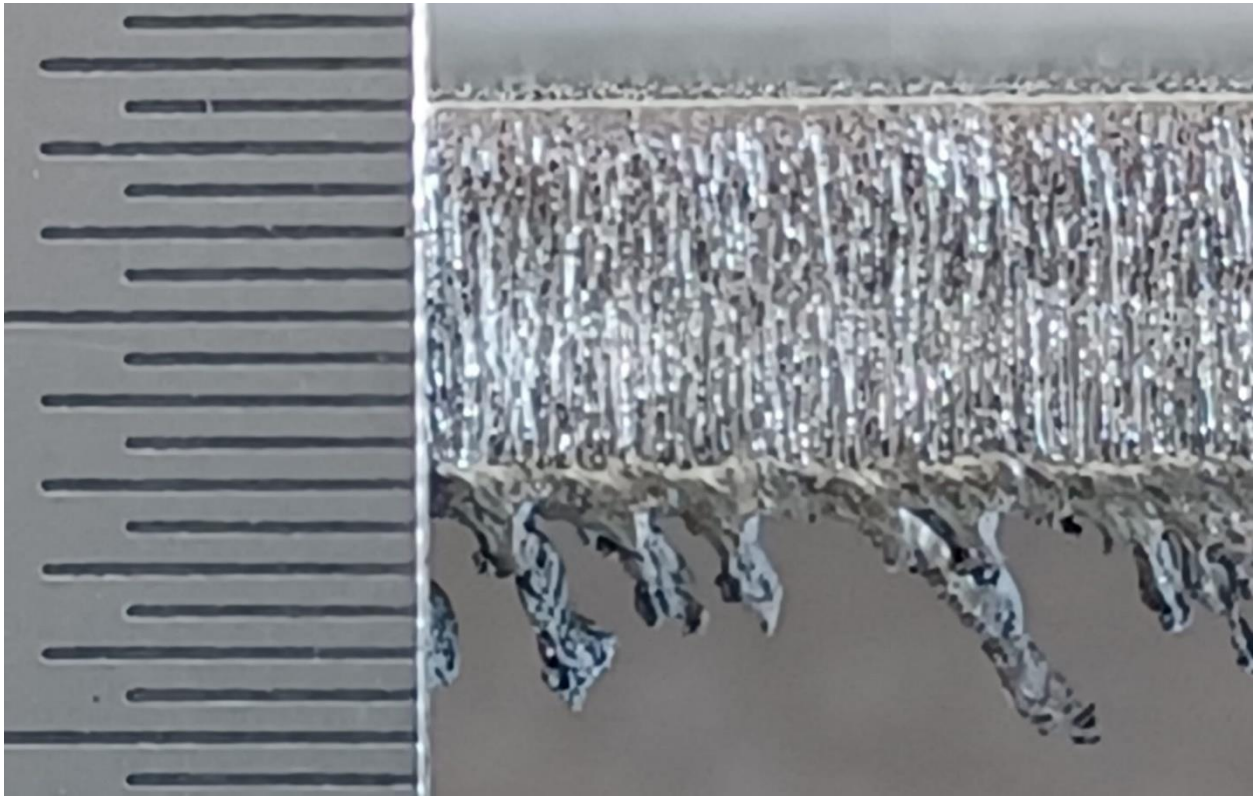
Slika 5.19 Rezna površina - konstrukcijski čelik - 30%



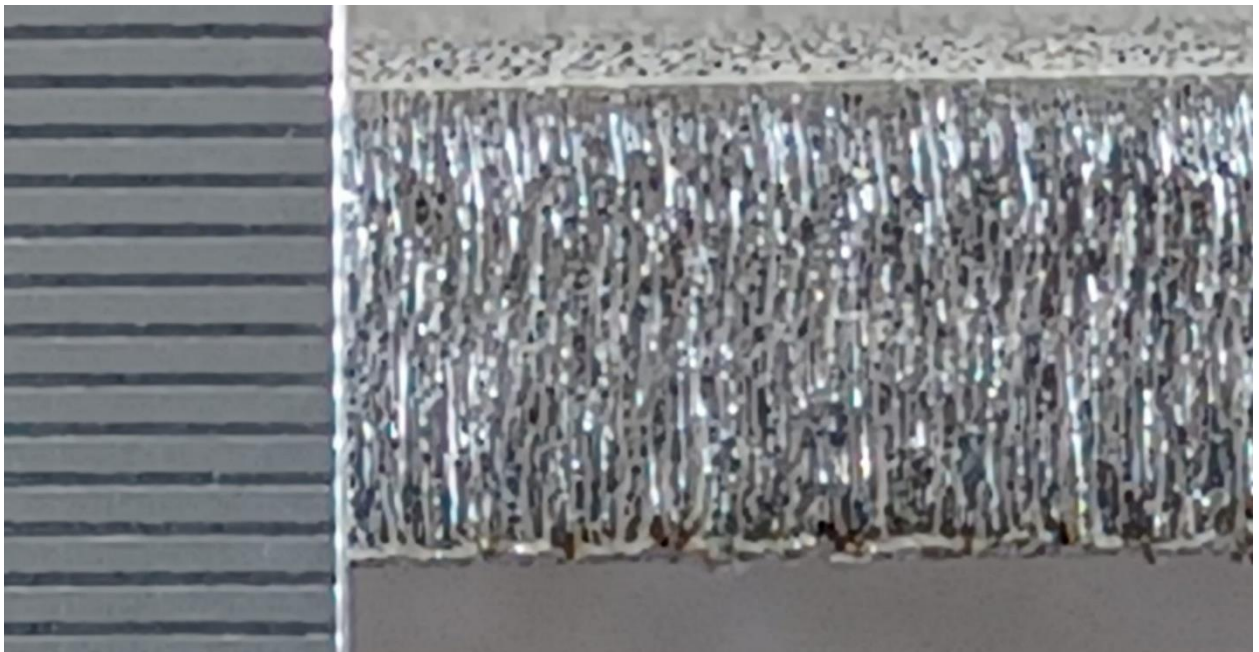
Slika 5.20 Rezna površina - konstrukcijski čelik - 60%



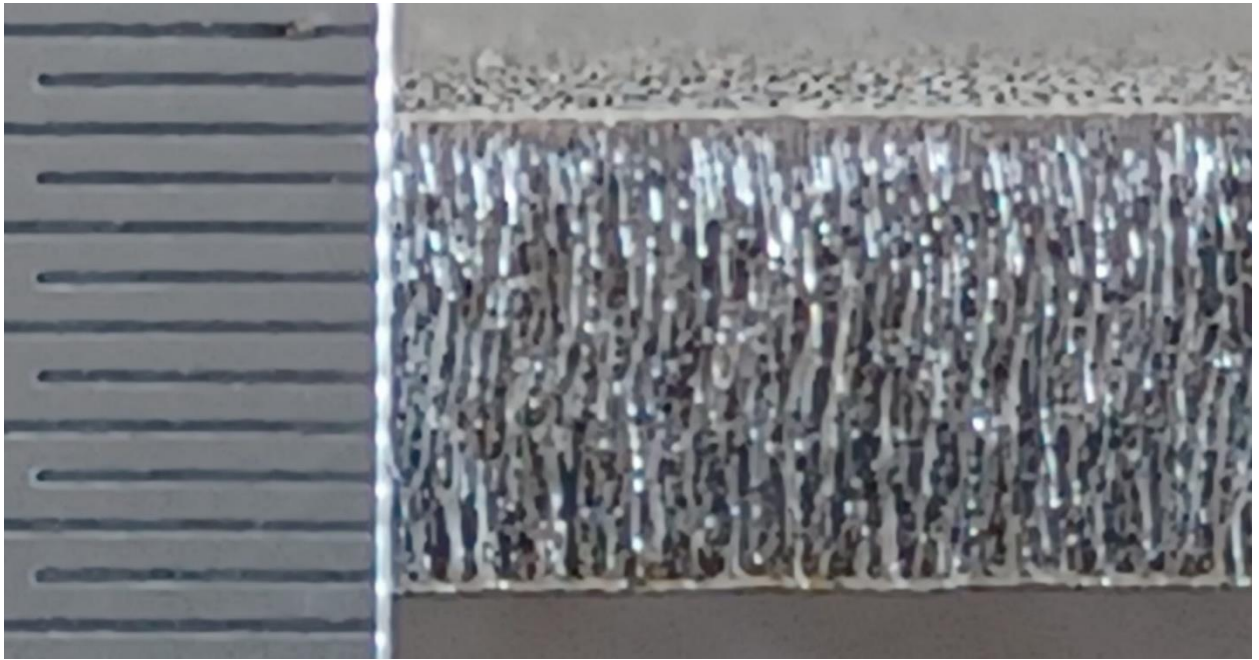
Slika 5.21 Rezna površina - konstrukcijski čelik - 90%



Slika 5.22 Rezna površina - nehrđajući čelik - 30%



Slika 5.23 Rezna površina - nehrđajući čelik - 60%



Slika 5.24 Rezna površina - nehrđajući čelik - 90%

5.3.3. Kutnost

Za mjerenje kutnosti, korišten je ručni kutomjer sa podjelom u stupnjevima i minutama prikazan na slici 5.25 Navedeni mjerni instrument ima korak 5' (minuta) i preciznost $\pm 5'$. Značajan utjecaj na pogrešku ima debljina lima odnosno relativno malo dodirno područje alata i uzorka.



Slika 5.25 Ručni kutomjer korišten za mjerenje



Slika 5.26 Postupak mjerenja kutnosti

Tablice 20 – 22 prikazuju rezultate navedenih mjerenja.

Tablica 20 Rezultati mjerenja kutnosti na uzorcima od nehrđajućeg čelika

AISI 304	
30%	89°
60%	88° 30'
90%	89° 30'

Tablica 21 Rezultati mjerenja kutnosti na uzorcima od aluminijeve legure

Al 5083	
30%	88° 45'

Tablica 22 Rezultati mjerenja kutnosti na uzorcima od aluminijeve legure

S235JR	
30%	89° 30'
60%	88° 60'
90%	89° 60'

5.4. Analiza rezultata

Nakon mjerenja uslijedila je analiza rezultata i klasificiranje uzoraka.

5.4.1. Dimenzijske tolerancije i odstupanja

Po završetku mjerenja i obrade podataka, zaključeno je kako promjena brzine rezanja nije imala utjecaj na dimenzijska odstupanja na uzorcima od konstrukcijskog čelika. Prema [18], to ih svrstava u prvu klasu dimenzijskih tolerancija prikazanoj u tablici 2.

Uzorak aluminijske legure, na kojem je uspješno ostvaren rez, pokazao je određena odstupanja od nominalnih dimenzija, a ista su prikazane u tablici 13. Unatoč tome, odstupanja su dovoljno mala da se i ovaj uzorak može svrstati u prvu klasu.

Uzorci od nehrđajućeg čelika također su pokazali određena odstupanja od nominalnih dimenzija. Zanimljivo, ta su se odstupanja javljala pri nižoj (30%) i srednjoj (60%) brzini rezanja, dok se kod najveće (90%) izmjerena vrijednost poklapala sa nominalnom. Također, uzorci su svrstani u prvu klasu.

Kao zaključak nameće se činjenica kako promjena brzine kod konstrukcijskog i nehrđajućeg čelika nije imala značajno negativan utjecaj na kvalitetu reza po pitanju dimenzijskih odstupanja s obzirom na to da su svi svrstani u prvu klasu.

Jedini aluminijski uzorak svrstan je u prvu klasu prema kriteriju dimenzijskih tolerancija, no činjenica da na preostala dva nije ostvaren rez potvrđuje kako je potrebna daljnja optimizacija parametara kod rezanja navedenog materijala kako bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta i uopće ostvario rez.

5.4.2. Hrapavost površine

Tehničke površine nisu idealno glatke, već su to, mikroskopski gledano, hrapave plohe na kojima se pojavljuje niz neravnina različitih veličina, oblika i rasporeda. Posljedica tome su različite tehnologije obrade. Negativni utjecaji koje povišena hrapavost može imati su npr. ubrzavanje korozije, pojačano trenje i smanjenje dinamičke izdržljivosti. [19]

Rezultati R_z5 prikazani u tablicama 17-19 ukazuju na to da nijedan uzorak ne zadovoljava površinsku hrapavost za prvu klasu. Kao i kod dimenzijske točnosti, najbolja kvaliteta postignuta je na uzorcima rezanim iz S235JR čelika na 90% brzine, EN AW 5083 na 30%, a potom i AISI 304 na 90%.

Prateći standard koji propisuju HRN M.A0.065 i DIN ISO 1302, hrapavosti površina su podijeljene u 12 stupnjeva, prikazano na slici 5.27. Prema tome, uzorak S235JR – 90% zadovoljava stupanj hrapavosti N8, EN AW 5083 – 30% zadovoljava N9, a AISI 304 – 90% također N9.

Stupanj hrapavosti	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
R_a [μm]	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
R_z [μm]	0,1	0,1	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	200

Slika 5.27 Stupnjevi hrapavosti prema R_a i R_z , [19]

U odnosu na prethodni kriterij, dimenzijsku toleranciju, u slučaju hrapavosti površine rezultati su osjetno lošiji obzirom da ni jedan uzorak nije zadovoljio kvalitetu za prvu klasu. Dakle, brzina je imala značajan utjecaj na kvalitetu ovog parametra. Uz to, na slikama 5.18 – 5.24 je vidljivo curenje materijala ili srh odnosno cunder s donje strane reza koji na određenim uzorcima poput onog rezanog iz nehrđajućeg čelika s 30% brzine prelazi čak 3 mm.

5.4.3. Kutnost

Kutnost odnosno odstupanje od okomitosti također je značajan indikator kvalitete reza. U ovom slučaju na rezultatima je vidljivo blago raspršivanje vrijednosti čemu u prilog ide spomenuta činjenica da je mjerenje provedeno ručnim kutomjerom te da je prilikom mjerenja ostvarena mala kontaktna površina što ima utjecaj na rezultate. Uzorci od nehrđajućeg i konstrukcijskog čelika na mjerenjima su ostvarili slične rezultate odnosno mala odstupanja. Postignuta je zadovoljavajuća kvaliteta reza.

Odstupa i aluminijski uzorak, ali obzirom da je samo jedan, a rezultati su osjetljivi na mjerenja, ne može se donijeti precizni zaključak.

6. ZAKLJUČAK

Lasersko rezanje sve je češće korišteni postupak toplinske obrade metala, a brojne prednosti glavni su razlog tome.

Iako se ubraja u skupinu suvremenih proizvodnih tehnologija, temelji nastanka postavljeni su još početkom prošlog stoljeća. Kako se tehnologija ubrzo pokazala izuzetno potentnom, uslijedio je intenzivan razvoj i niz istraživanja na tom području što je rezultiralo laserskim strojevima kakvi se koriste danas.

Radi se o sofisticiranim i pouzdanim uređajima koji imaju mnoštvo primjena, ovisno o izvedbi; od izbjeljivanja zubi, do mjerenja udaljenosti među svemirskim tijelima.

Ipak, najznačajnija je primjena u metaloprerađivačkoj industriji gdje tržište nalaže da opstaju samo poduzeća koja su u mogućnosti brzo reagirati i prilagoditi se novim trendovima. U taj se dio priče uklapaju laseri; i stariji CO₂ i noviji poput fiber lasera korištenog u eksperimentalnom dijelu ovog rada ističući se svojim prednostima.

Najveću razliku u odnosu na druge postupke čine visoka preciznost, automatizacija, prilagodljivost i velika brzina obrade.

Upravo ta brzina rezanja bila je fokusna točka ovog rada.

Cilj je bio ispitati utjecaj brzine rezanja na kvalitetu reza na uzorcima jednakih dimenzija, ali od različitih materijala kako bi se naglasila različita svojstva korištenih materijala, primjerice visok stupanj reflektivnosti aluminijske površine.

Kvaliteta reza određena je mjerenjem glavnih parametara propisanih normom HRN EN ISO 9013:2002, a to su hrapavost površine, tolerancije dimenzija i kutnost odnosno okomitost reza.

Po završetku mjerenja i obrade podataka postalo je evidentno kako rezultat odnosno kvaliteta reza uvelike ovisi o korištenom materijalu i zadanim parametrima, u ovom slučaju prvenstveno o brzini. Rezultati mjerenja pokazali su kako većina uzoraka zadovoljava prvorazredne standarde kvalitete kod primjerice dimenzijske kontrole odnosno da se uzorci mogu ubrojiti u prvu klasu. Iz toga proizlazi i drugi zaključak koji potvrđuje navedenu glavnu prednost laserske tehnologije, a to je preciznost izvedbe.

Ipak, u nekim je slučajevima promjena brzine imala značajan, negativan utjecaj na obradak što je vidljivo na rezultatima mjerenja površinske hrapavosti.

Prema tome, unatoč mnogim prednostima i sposobnosti laserske tehnologije, svakako je potrebno optimizirati parametre i prilagoditi ih potrebama i traženim razinama kvalitete kako bi se uvijek postigli najbolji rezultati, a proizvodni proces izvodio neometano.

7. LITERATURA

- [1] Bušić, Matija – Lasersko rezanje i zavarivanje – Suvremene proizvodne tehnologije, Sveučilište Sjever, Varaždin, ak. god. 2020./2021. [Predavanje]
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_science, (10.06.2021.)
- [3] Silfast, Wiliam, Laser Fundamentals, Cambridge University Press, 2012.
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/Laser>, (10.06.2021.)
- [5] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/hr/6/63/Laser_1.png, (15.06.2021.)
- [6] https://www.rp-photonics.com/optical_pumping.html, (15.06.2021.)
- [7] Bernik, A. i Stipetić I., Laserske zrake u strojnoj industriji, Tehnički glasnik (2011.)
- [8] https://www.rp-photonics.com/optical_resonators.html, (15.06.2021.)
- [9] http://eskola.hfd.hr/clanci/50_godina_lasera_Natasa_Vujicic.pdf
- [10] <http://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/heliumneonlaser.html>, (22.06.2021.)
- [11] <https://circuitglobe.com/ndyag-laser.html>, (22.06.2021.)
- [12] <http://www.lampotech.co.uk/Documents/SO%20Spectral.htm>, (25.06.2021.)
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Coherence_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Coherence_(physics)), (25.06.2021.)
- [14] <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/laser-beams-reflected-between-earth-and-moon-boost-science/>
- [15] <https://www.laser-ing.hr/blog/lasersko-rezanje-prednosti-i-karakteristike/>
- [16] Petring, Dirk, LIA Guide to High Power Laser Cutting, 2001.
- [17] Ion, John, Laser Processing of Engineering Materials, 2005.
- [18] HRN EN ISO 9013: Toplinsko rezanje – Razredba rezova – Geometrijska specifikacija proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće (ISO 9013:2002; EN ISO 9013:2002)
- [19] Kraut, Bojan, Strojarski priručnik, 1988.
- [20] <http://hr.lksteelpipe.com/news/a-brief-guide-of-s235-series-non-alloy-structu-18858793.html>, (05.07.2021.)
- [21] <http://www.serto-bel.hr/inox-opcenito/kemijski-sastav-nehrdjajucih-celika-inoxa.html>, (05.07.2021.)
- [22] <http://ba.zyaluminumsheet.com/aluminum-sheet/30mm-sheet-aluminum-5083.html>, (05.07.2021.)
- [23] <https://promming.hr/en/home/>, (30.06.2021.)
- [24] https://www.trumpf.com/en_INT/products/machines-systems/2d-laser-cutting-machines/trulaser-3030-fiber-3040-fiber-3060-fiber/, (01.07.2021.)

Popis slika

Slika 2.1 Shematski prikaz lasera T. Maimana, [3].....	4
Slika 2.2 Shematski prikaz osnovnih komponenti lasera, [5].....	4
Slika 2.3 Princip pobude atoma i rada lasera, [9].....	6
Slika 2.4 Inverzija napučenosti u sustavu s tri razine, [9].....	7
Slika 2.5 Inverzija napučenosti u sustavu s četiri energetske razine, [9].....	8
Slika 2.6 Cijev He-Ne lasera, [10].....	9
Slika 2.7 Shematski prikaz Nd:YAG lasera, [11].....	10
Slika 2.8 Bijela i monokromatska svjetlost kroz prizmu, [12].....	11
Slika 2.9 Koherentna (a) i raspršena svjetlost (b), [13].....	11
Slika 2.10 Reflektivni panel na površini Mjeseca, [14].....	12
Slika 3.1 Shematski prikaz komponenti kod laserskog rezanja [15].....	14
Slika 3.2 Lasersko rezanje isparavanjem, [16].....	14
Slika 3.3 Lasersko rezanje isparavanjem, [16].....	15
Slika 3.4 Lasersko rezanje izgaranjem, [16].....	16
Slika 4.1 Žarišna udaljenost od površine, [17].....	18
Slika 5.1 Pojmovi vezani uz proces laserskog rezanja, [18].....	20
Slika 5.2 Gotov radni komad s odgovarajućim izrazima, [18].....	21
Slika 5.3 Tolerancije kutnosti i okomitosti, [18].....	21
Slika 5.4 Tolerancije okomitosti ili kutnosti do debljine 30 mm, [18].....	22
Slika 5.5 Procjenjivanje hrapavosti površine, [19].....	24
Slika 5.6 Tolerancije hrapavosti, rezni komad do 30 mm, [18].....	25
Slika 5.7 Shematski prikaz građe fiber lasera, [3].....	27
Slika 5.8 Trumpf fiber laser i upravljačka jedinica, [23].....	28
Slika 5.9 P uzorak - dimenzije.....	30
Slika 5.10 P uzorak - konstrukcijski čelik.....	30
Slika 5.11 P uzorak - aluminijska legura.....	31
Slika 5.12 P uzorak - nehrđajući čelik.....	31
Slika 5.13 Mjerenje pomičnim mjerilom.....	32
Slika 5.14 P uzorak i mjerene dimenzije.....	33
Slika 5.15 Parametri mjerenja hrapavosti površine.....	35
Slika 5.16 Postupak mjerenja hrapavosti površine.....	36
Slika 5.17 Način određivanja srednje visine neravnine Rz, [19].....	37
Slika 5.18 Rezna površina - aluminijska legura - 30%.....	38

Slika 5.19 Rezna površina - konstrukcijski čelik - 30%	38
Slika 5.20 Rezna površina - konstrukcijski čelik - 60%	39
Slika 5.21 Rezna površina - konstrukcijski čelik - 90%	39
Slika 5.22 Rezna površina - nehrđajući čelik - 30%	40
Slika 5.23 Rezna površina - nehrđajući čelik - 60%	40
Slika 5.24 Rezna površina - nehrđajući čelik - 90%	41
Slika 5.25 Ručni kutomjer korišten za mjerenje.....	42
Slika 5.26 Postupak mjerenja kutnosti	42
Slika 5.27 Stupnjevi hrapavosti prema Ra i Rz, [19]	45

Popis tablica

Tablica 1 Rasponi tolerancija okomitosti prema klasama, [18]	22
Tablica 2 Granična odstupanja za nominalne tolerancija dimenzija – klasa 1, [18]	23
Tablica 3 Granična odstupanja za nominalne tolerancija dimenzija – klasa 2, [18]	23
Tablica 4 Rasponi tolerancije hrapavosti Rz5, [18].....	24
Tablica 5 Kemijski sastav konstrukcijskog čelika, [20]	26
Tablica 6 Kemijski sastav nehrđajućeg čelika, [21]	26
Tablica 7 Kemijski sastav aluminijske legure, [22]	26
Tablica 8 Specifikacije korištenog stroja Trumpf TruLaser 3030, [24]	28
Tablica 9 Parametri rezanja	29
Tablica 10 Rezultati mjerenja dimenzija - konstrukcijski čelik - 30%	33
Tablica 11 Rezultati mjerenja dimenzija - konstrukcijski čelik - 60%	33
Tablica 12 Rezultati mjerenja dimenzija - konstrukcijski čelik - 90%	34
Tablica 13 Rezultati mjerenja dimenzija - aluminijska legura - 30%	34
Tablica 14 Rezultati mjerenja dimenzija - nehrđajući čelik - 30%	34
Tablica 15 Rezultati mjerenja dimenzija - nehrđajući čelik - 60%	34
Tablica 16 Rezultati mjerenja dimenzija - nehrđajući čelik - 90%	35
Tablica 17 Rezultati mjerenja hrapavosti površine uzorka od konstrukcijskog čelika.....	36
Tablica 18 Rezultati mjerenja hrapavosti površine uzorka od aluminijske legure	36
Tablica 19 Rezultati mjerenja hrapavosti površine uzorka od nehrđajućeg čelika	37
Tablica 20 Rezultati mjerenja kutnosti na uzorcima od nehrđajućeg čelika	43
Tablica 21 Rezultati mjerenja kutnosti na uzorcima od aluminijske legure	43
Tablica 22 Rezultati mjerenja kutnosti na uzorcima od aluminijske legure	43