

Optimizacija parametara ručnog laserskog zavarivanja aluminijskih legura

Šćuric, Dario

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:508704>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dario Šćuric

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl.ing.

Student:

Dario Šćuric

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad samostalno izradio koristeći znanja stečena tijekom studija i korištenjem navedene literature. Izražavam zahvalnost mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću, asistentima i ostalim članovima Zavoda za zavarene konstrukcije za pružene savjete, komentare i usmjeravanja tijekom izrade rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci tijekom cijelog razdoblja studiranja.

Dario Šćuric



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dario Šćuric** JMBAG: 0069081245

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija parametara ručnog laserskog zavarivanja aluminijskih legura**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of parameters during manual laser welding of aluminium alloys**

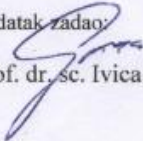
Opis zadatka:

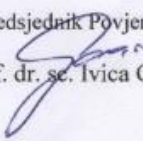
U teorijskom dijelu navesti i opisati vrste lasera koje se primjenjuju za zavarivanje tankostijenih materijala. Posebno detaljno proučiti fiber laser i navesti parametre zavarivanja. Analizirati interakciju laserske zrake i površine ovisno o vrsti i stanju osnovnog materijala. Dati pregled osnovnog koncepta ručnog zavarivanja laserom uz dodavanje dodatnog materijala, te obraditi preporuke iz norme HRN EN 1011-6.

U eksperimentalnom dijelu za zavarene spojeve s više kombinacija parametara i konfiguracija spoja provesti odgovarajuća nerazorna i razorna ispitivanja. Dobivene rezultate usporediti prema zahtjevima kvalitete u normi HRN EN ISO 13919-2, te za ispitane uzorke odrediti razinu kvalitete spoja. Zaključno, dati preporuke za pripremu i oblikovanje spoja za ručno zavarivanje aluminija fiber laserom.

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

Zadatak zadan: 26. rujna 2024. Datum predaje rada: 28. studeni 2024. Predvideni datumi obrane: 5., 6. i 9. prosinca 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. SVOJSTVA LASERA.....	2
2.1. Monokromatičnost	3
2.2. Koherentnost	4
2.3. Usmjerenost	5
2.4. Intenzitet i polarizacija.....	5
2.5. Glavni dijelovi lasera	6
3. ZAVARIVANJE LASEROM	8
3.1. Nd:YAG laseri	8
3.2. Diodni laseri	10
3.3. CO ₂ laser	12
3.4. Disk laseri	13
4. FIBER LASER	15
4.1. Interakcija laserske zrake i površine	16
4.2. Zavarivanje fiber laserom	17
4.3. Procesni parametri zavarivanja	19
4.4. Zaštitni plinovi	21
4.5. Zavarivanje uz dodavanje dodatnog materijala	23
4.6. Oprema za fiber laser zavarivanje.....	25
4.7. Primjena fiber lasera	27
5. ALUMINIJ EN AW 1050	29
6. EKSPERIMENTALNI DIO	31
6.1. Priprema za zavarivanje	31
6.2. Izvor struje	33
6.3. Dodatni materijal.....	36
6.4. Zaštitni plin	37
6.5. Postupak zavarivanja.....	37
6.6. Priprema uzoraka	43
6.7. Ispitivanje makrostrukture	47
6.8. Ispitivanje čvrstoće	51
6.9. Analiza rezultata	53
7. ZAKLJUČAK.....	54

POPIS SLIKA

Slika 1. Theodore H. Maiman i prvi laser [2]	2
Slika 2. Shema rubinskog lasera [3].....	3
Slika 3. Usporedba običnog izvora svjetlosti i LASER-a [5]	4
Slika 4. Koherentnost različitih izvora svjetlosti [6].....	5
Slika 5. Shema Nd:YAG lasera [11]	9
Slika 6. Shema diodnog lasera [11].....	11
Slika 7. Shema CO2 laser [11]	12
Slika 8. Shema disk lasera [9]	14
Slika 9. Shema fiber lasera [10]	15
Slika 10. Poprečni presjek vlakna [12].....	15
Slika 11. Interakcija laserske zrake sa osnovnim materijalom [12].....	16
Slika 12. Prag gustoće [12]	18
Slika 13. Zavarivanje taljenjem (Lijevo) i zavarivanje protaljivanjem (Desno) [12]	18
Slika 14. Dijagram ovisnosti penetracije o snazi lasera za različite brzine [14]	19
Slika 15. Skica laserskog snopa [11].....	20
Slika 16. Udaljenost žarišta od površine [12]	21
Slika 17. Dovod zaštitnog plina [12].....	22
Slika 18. Zavarivanje laserom uz dodavanje dodatnog materijala [15]	23
Slika 19. Oprema za zavarivanje fiber laserom [16].....	25
Slika 20. Presjek pištolja za lasersko zavarivanje [17]	26
Slika 21. Moguće konfiguracije pištolja za ručno zavarivanje laserom [17]	26
Slika 22. Zavarivanje karoserije automobila [19]	28
Slika 23. Proizvodi od aluminija 1050 [20]	29
Slika 24. Shema zavarivanja uzorka prema normi HRN EN 1011-6:2018 [23]	32
Slika 25. Identifikacijska pločica FANUCI 3.0 PRO GenX 1500W	33
Slika 26. FANUCI 3.0 PRO GenX 1500W [24]	33
Slika 27. FANUCI PRO dodavač žice	34
Slika 28. FANUCI PRO pištolj za zavarivanje [24]	34
Slika 29. Specifikacije dodatnog materijala EZ- MIG Al99,7 [25]	36
Slika 30. Pozicija komada	37
Slika 31. Primjer parametra za Uzorak 1	38
Slika 32. Zavarivanje fiber laserom uzorka 3	39
Slika 33. Uzorak 1	39
Slika 34. Uzorak 1 lice zavara.....	40
Slika 35. Uzorak 1 korijen zavara	40
Slika 36. Uzorak 2 lice zavara.....	41
Slika 37. Uzorak 2 korijen zavara	41
Slika 38. Uzorak 3 lice zavara.....	42
Slika 39. Uzorak 3 korijen zavara	42
Slika 40. Rezanje uzorka tračnom pilom	43
Slika 41. Izrezani uzorak 1	43
Slika 42. Stroj za brušenje i poliranje	44
Slika 43. Strojno brušenje uzorka.....	45
Slika 44. Ispoliran uzorak 1.....	46
Slika 45. Nagrizanje uzorka	46
Slika 46. Makrostrukture uzorka 1, 2 i 3	47
Slika 47. Makrostruktura uzorka	47
Slika 48. Površina pora uzorak 1	49

Slika 49. Površina pora uzorka 2.....	50
Slika 50. Površina pora uzorka 3.....	50
Slika 51. Dimenzije epruvete [27].....	51
Slika 52. Epruvete nakon ispitivanja.....	52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav aluminij EN AW 1050 [21]	30
Tablica 2. Usporedba aluminija EN AW 1050 14H sa čelikom S235JR [21, 22]	30
Tablica 3. Usporedba FANUCI fiber lasera [24]	35
Tablica 4. Parametri zavarivanja ispitnih uzoraka	38
Tablica 5. Preporuke norme HR EN ISO 13919 – 2:2021 [26]	48
Tablica 6. Usporedba poroznosti ispitanih uzoraka	49
Tablica 7. Dimenzije epruveta	51
Tablica 8. Rezultati vlačnog ispitivanja	52

POPIS JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
Tt	°C	Talište
d _B	mm	Promjer snopa na ulazu u leću
d _F	mm	Promjer žarišne točke
f	mm	Žarišna duljina leće
HB	HB	Tvrdoća po Brinellu
P	W	Snaga
v	cm/min	Brzina zavarivanja
z	mm	Položaj žarišta u odnosu na površinu materijala
λ	μm	Valna duljina laserske zrake
λ	W/mK	Toplinska vodljivost
ρ	g/cm ³	Gustoća
R _{p0,2}	MPa	Granica razvlačenja
R _M	MPa	Vlačna čvrstoća

POPIS KRATICA

CO ₂	ugljični dioksid
cw	kontinuirani laserski izvor-način rada lasera
LASER	engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MASER	engl. Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
Nd:YAG	neodimij: Itrij – Aluminij – Granat
pw	impulsni laserski izvor- način rada lasera

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je istražiti i optimizirati parametre ručnog laserskog zavarivanja aluminijskih legura, s posebnim fokusom na primjenu fiber lasera. U teorijskom dijelu analizirane su različite vrste lasera koji se koriste za zavarivanje tankostjenih materijala, te je detaljno proučen fiber laser zajedno s parametrima zavarivanja. Istražena je interakcija laserske zrake s osnovnim materijalom te su proučene preporuke norme HRN EN 1011-6:2018. U eksperimentalnom dijelu provedena su nerazorna i razorna ispitivanja na zavarenim spojevima s različitim parametrima. Dobiveni rezultati uspoređeni su sa normom HRN EN ISO 13919-2:2021, i odredila se razina kvalitete spojeva. Na temelju rezultata opisane su preporuke za pripremu i oblikovanje spojeva za ručno zavarivanje aluminijske legure fiber laserom.

Ključne riječi: aluminijske legure, zavarivanje laserom, fiber laser

SUMMARY

The objective of this thesis was to investigate and optimize the parameters of handheld laser welding of aluminum alloys, with a particular focus on the application of fiber lasers. The theoretical part analyzed various types of lasers used for welding thin-walled materials, with a detailed study of fiber lasers and their welding parameters. The interaction between the laser beam and the base material was examined, and the recommendations of the HRN EN 1011-6:2018 standard were studied. In the experimental part, non-destructive and destructive tests were conducted on welded joints with different parameters. The obtained results were compared to the HRN EN ISO 13919-2:2021 standard, and the quality level of the joints was determined. Based on the results, recommendations for the preparation and design of joints for manual aluminum welding with a fiber laser were described.

Key words: aluminum alloys, laser welding, fiber laser

1. UVOD

Lasersko zavarivanje predstavlja jednu od najnaprednijih i najpreciznijih tehnologija spajanja materijala, koja je tijekom posljednjih desetljeća pronašla široku primjenu u strojarstvu i različitim industrijskim sektorima. Glavna prednost očituje u sposobnosti koncentriranja visoke gustoće energije na malom području, što omogućuje stvaranje čvrstih, preciznih zavara uz minimalne deformacije i toplinsko opterećenje okolnog materijala. Jedna od ključnih prednosti laserskog zavarivanja je njegova fleksibilnost. Može se koristiti za spajanje različitih materijala, uključujući metale poput čelika, aluminija, titana i njihovih legura. Posebno je pogodan za zavarivanje tankostjenih materijala, gdje su tradicionalne metode zavarivanja često nedovoljno precizne ili uzrokuju prevelika toplinska oštećenja. U automobilskoj industriji, lasersko zavarivanje koristi se za izradu karoserija, šasija i drugih komponenata, omogućujući time visoku produktivnost, trajnost spojeva i smanjenje mase vozila. Fiber laseri, kao najnovija generacija laserskih sustava, donose značajne prednosti u industrijskim primjenama. Zahvaljujući visokoj energetske učinkovitosti, dugotrajnosti i prilagodljivosti, fiber laseri omogućuju zavarivanje uz minimalne troškove održavanja. Njihova mogućnost prijenosa snopa putem optičkih vlakana čini ih posebno korisnima za složene proizvodne procese, gdje je potrebna velika mobilnost i preciznost. U zrakoplovnoj industriji, lasersko zavarivanje koristi se za spajanje dijelova visoke čvrstoće i otpornosti na koroziju, poput titanskih komponenti motora i strukturnih elemenata letjelica. Sposobnost preciznog zavarivanja bez dodatne obrade spojeva ključno je za osiguranje sigurnosti i performansi zrakoplova. U medicinskoj industriji, lasersko zavarivanje omogućuje proizvodnju implantata i preciznih uređaja s minimalnim rizikom od kontaminacije. Osim preciznosti, lasersko zavarivanje nudi mogućnosti automatizacije. Korištenjem robotskih sustava, ovaj proces može se integrirati u suvremene proizvodne linije, čime se povećava produktivnost i smanjuju pogreške. To čini lasersko zavarivanje nezaobilaznom tehnologijom u modernom strojarstvu i industriji.

Unatoč brojnim prednostima, lasersko zavarivanje suočava se s izazovima poput visokih početnih troškova opreme i specifičnih zahtjeva za kontrolu procesa. Ipak, kontinuirani razvoj tehnologije, uključujući uvođenje prilagodljivih i energetski učinkovitih sustava, čini ovu metodu sve pristupačnijom i šire prihvaćenom u industrijskim aplikacijama.

2. SVOJSTVA LASERA

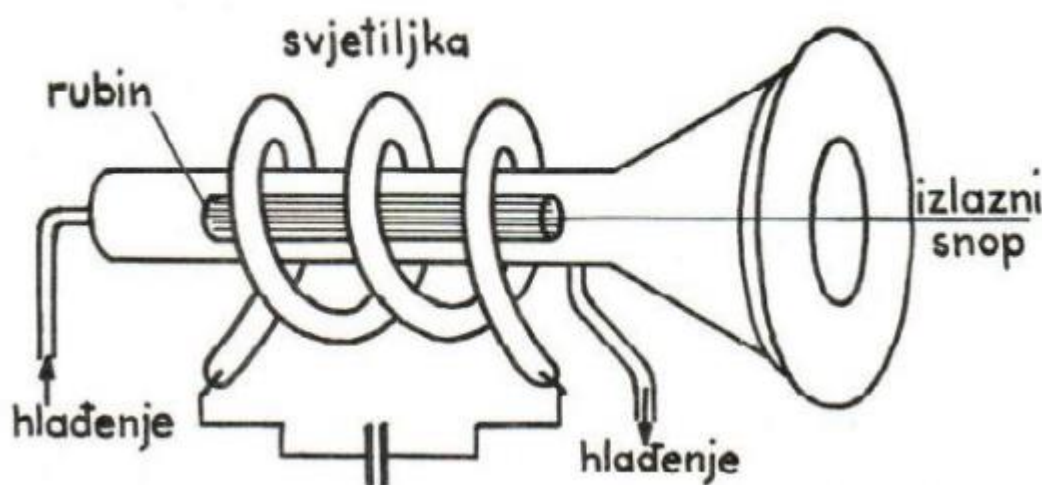
Naziv "LASER" dolazi od engleske skraćenice engl. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* što u prijevodu znači pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. Upravo ovaj proces predstavlja osnovu rada svakog generatora laserske zrake. Lasersko zračenje ima široku primjenu u industriji, vojsci, medicini i svakodnevnim uređajima kao što su printeri, DVD-i i CD-i. Zahvaljujući specifičnim svojstvima, laser se može fokusirati na vrlo malu točku, odnosno mali promjer, što rezultira visokom gustoćom energije u određenoj točki.

Otkriće i razvoj lasera rezultat je desetljeća znanstvenih istraživanja o prirodi svjetlosti i elektromagnetskih valova. Ključna prekretnica bila je teorija stimulirane emisije koju je 1917. predstavio Albert Einstein, objasnivši kako se atomi mogu potaknuti da emitiraju fotone jednake energije i faze, čime nastaje koherentna svjetlost, temeljna za rad lasera. Praktična primjena ovog otkrića ostala je neistražena sve do 1950-ih, kada je Charles Townes na Sveučilištu Columbia razvio "MASER" (engl. *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), potvrđujući da se princip stimulirane emisije može primijeniti za stvaranje koherentnih valova. Godine 1960. Theodore Maiman [Slika 1] iz Hughes Research Laboratories izradio je prvi funkcionalni laser koristeći sintetički rubin. Njegov uređaj je dokazao da se Einsteinova teorija može praktično primijeniti za proizvodnju koherentne svjetlosti. [1]



Slika 1. Theodore H. Maiman i prvi laser [2]

Theodor H. Maiman je obasjao crveni kristal rubina ručnom bljeskalicom te je tako izazvao lasersku emisiju. Rezultat toga bila je svjetlost u crvenom dijelu spektra. Na taj je način unutar jednog uređaja povezoao osnovne elemente potrebne za lasersku emisiju: rubinski kristal (aktivni medij), rezonantnu šupljinu s dva krajnja zrcala i lasersku pumpu (bljeskalicu/svjetlost). Osnovni princip rubinskog lasera prikazan je na Slika 2. Nedugo nakon otkrića rubinskog lasera, razvijeni su i plinski, poluvodički te tekući laseri. Otkriće i razvoj lasera temelje se na zakonima kvantne teorije zračenja, koji objašnjavaju ključni proces unutar aktivnog materijala lasera – stimuliranu emisiju. [1]



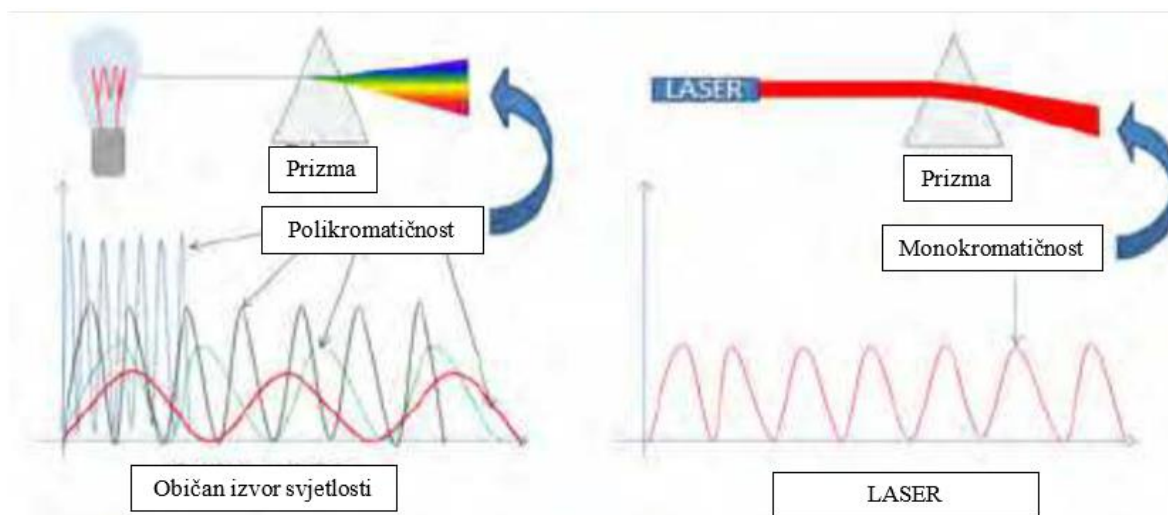
Slika 2. Shema rubinskog lasera [3]

Nakon svog izuma, laser je odmah postao jedno od najpriznatijih i najpoznatijih otkrića u fizici. Zahvaljujući svojoj snazi i naprednoj tehnologiji, laser je brzo našao primjenu u različitim područjima života.

2.1. Monokromatičnost

Monokromatičnost se odnosi na svojstvo laserske svjetlosti koja ima jednu frekvenciju odnosno jednu valnu duljinu, što je čini drugačijom od običnih izvora svjetlosti koji emitiraju široki spektar. Zbog ove osobine, laseri imaju vrlo usku spektarsku širinu, s minimalnim rasponom frekvencija. Međutim, stvarni čimbenici, poput spontane emisije, ograničavaju postizanje apsolutne monokromatičnosti.

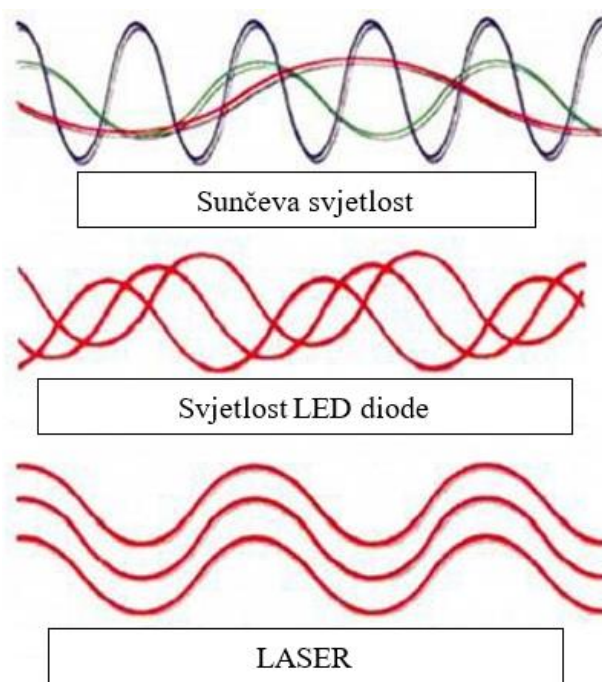
Na primjer, dok obični izvori svjetlosti mogu imati širinu spektra od oko 10^{10} Hz, laseri s dobrom kontrolom mogu postići širinu spektra od samo 500 Hz, omogućujući koherentne duljine do 600 km. Ova preciznost omogućuje laserima izvođenje eksperimenata visoke razlučivosti na većim udaljenostima. Slika 3 prikazuje usporedbu lasera i normalnog izvora svjetlosti. [4]



Slika 3. Usporedba običnog izvora svjetlosti i LASER-a [5]

2.2. Koherentnost

Koherentnost laserske svjetlosti ključna je za njezine primjene i dolazi u dva oblika: vremenska i prostorna koherentnost. Vremenska koherentnost odnosi se na konzistentnost faze svjetlosti kroz vrijeme i obično se prikazuje pomoću Michelsonova interferometra. Svjetlost iz monokromatskog izvora reflektira se o zrcala duž različitih putanja; interferencijski pruge nastaju kada je razlika u duljini putanja unutar granica koherentnog vremena. Također, prostorna koherentnost opisuje faznu usklađenost preko presjeka laserskog snopa. Ova se osobina može vidjeti pomoću Youngova eksperimenta s dvostrukim prorezom, gdje koherentni izvori svjetlosti stvaraju stabilne interferencijske pruge na ekranu. Prostorna koherentnost omogućuje laserima visoku usmjerenost, što ih čini vrlo učinkovitim za precizne zadatke u raznim primjenama. Slika 4 prikazuje usporedbu koherentnosti različitih izvora svjetlosti. [4]



Slika 4. Koherentnost različitih izvora svjetlosti [6]

2.3. Usmjerenost

Usmjerenost laserskog snopa označava sposobnost laserskih zraka da putuju u uskom, gotovo paralelnom snopu, za razliku od većine drugih izvora svjetlosti koji se brzo šire. Ova osobina proizlazi iz unutarnjeg dizajna lasera, posebno rezonatorske šupljine, koja oblikuje svjetlost u koncentrirani snop. Glavni uzrok širenja snopa je difrakcija, prirodni fenomen zbog valne prirode svjetlosti, no laseri su dizajnirani tako da minimiziraju taj učinak. Visoka usmjerenost omogućuje laserskim zrakama da ostanu koncentrirane na velikim udaljenostima, što ih čini neprocjenjivima za precizne zadatke poput geodetskih mjerenja, optičke komunikacije. Ova osobina lasera ključna je i u medicinskim zahvatima, gdje laserski snop može ciljati mala područja tkiva, kao i u industrijskom rezanju, gdje je potrebna visoka preciznost. [4]

2.4. Intenzitet i polarizacija

Laserska svjetlost ima visoki intenzitet zbog mogućnosti koncentriranja energije na malo područje. Ova karakteristika omogućuje laserima da postignu razine snage daleko veće od drugih izvora svjetlosti. Fokusiranjem laserske svjetlosti energija se može usmjeriti tako da se postignu intenziteti reda veličine $10^{12}/\text{cm}^2$. Ova visoka razina intenziteta koristi se u različitim primjenama, poput rezanja, zavarivanja i znanstvenih istraživanja, jer može izazvati nelinearne učinke u materijalima, poput ionizacije atoma ili stvaranja plazme.

Polarizacija je još jedno važno svojstvo, koje opisuje smjer oscilacije električnog polja u svjetlosnom valu. Laseri mogu proizvesti svjetlost u specifičnim stanjima polarizacije, kao što su linearna, kružna ili eliptična, koja se mogu prilagoditi prema potrebama primjene. Polarizacija je ključna u optičkim primjenama gdje je potrebno kontrolirati orijentaciju svjetlosnih valova, primjerice u optičkim vlaknima, gdje polarizirana svjetlost smanjuje izobličenja signala i poboljšava prijenos podataka. [4]

2.5. Glavni dijelovi lasera

Glavni dijelovi lasera su aktivni medij, optički rezonator i izvor pumpanja.

Aktivni medij u laseru ključna je komponenta koja omogućuje pojačanje svjetlosti putem stimulirane emisije. Ovaj medij sadrži atome ili molekule koje se mogu pobuditi na više energetske razine. Kada se ove pobuđene čestice vrata na niže energetske stanje, emitiraju fotone. U laseru je aktivni medij oblikovan tako da podržava i stimulira ovu emisiju na kontrolirani način, stvarajući koherentnu svjetlost. Različiti materijali mogu služiti kao aktivni medij, uključujući plinove, tekućine i krutine. Na primjer, u plinskim laserima često se koriste plinovi poput helija, neona ili ugljičnog dioksida. U čvrstim laserima mogu se koristiti kristali, poput neodimijem dopiranog itrij-aluminij-granata. Izbor medija utječe na valnu duljinu, izlaznu snagu i ukupnu učinkovitost lasera. Osim što generira fotone, konfiguracija aktivnog medija može se optimizirati za poboljšanje performansi, uključujući oblik, veličinu i čistoću medija. Tako aktivni medij ne samo da definira karakteristike emisije lasera nego i igra temeljnu ulogu u njegovoj učinkovitosti i primjenjivosti u različitim područjima.

Izvor pumpanja ključan je element u laserskim sustavima jer osigurava energiju potrebnu za postizanje inverzije populacije unutar aktivnog medija. Inverzija populacije nužna je za stimuliranu emisiju i kontinuirano lasersko djelovanje. Postoje dva glavna načina pumpanja: optičko i električno.

Optičko pumpanje: Ova metoda uključuje osvjetljavanje aktivnog medija snažnim izvorom svjetlosti, poput bljeskalice ili drugog lasera. Svjetlost pobuđuje atome u mediju na višu energetske razine. Optičko pumpanje učinkovito je kod lasera s krutim stanjem, zbog širokih apsorpcijskih pojasa koji omogućuju bolje upijanje svjetlosti.

Električno pumpanje: Često se koristi kod plinskih lasera i uključuje prolazak električne struje kroz plin, čime nastaje električni izboj koji pobuđuje atome na višu energetske razine.

Ova metoda učinkovita je kod CO₂ lasera, gdje struja izaziva sudare elektrona koji pobuđuju atome plina.

Metoda pumpanja odabire se prema tipu lasera, svojstvima medija i potrebama primjene, omogućujući učinkovitu prijenos energije i stabilnu inverziju populacije za optimalan izlaz lasera.

Optički rezonator temeljna je komponenta lasera, odgovorna za održavanje i pojačanje svjetlosti reflektiranjem unutar šupljine. Obično se sastoji od dvaju zrcala koja su postavljena jedno nasuprot drugome i stvaraju povratnu vezu za fotone generirane u aktivnom mediju. Zrcala mogu biti različitih vrsta, poput ravnih (Fabry-Perot), sfernih ili konfokalnih. Jedno zrcalo je obično potpuno reflektirajuće, dok je drugo djelomično reflektirajuće, omogućujući da dio svjetlosti izađe kao koherentni laserski snop. Dizajn rezonatora, uključujući zakrivljenost i razmak zrcala, značajno utječe na izlazna svojstva lasera. Na primjer, sferna zrcala fokusiraju svjetlost i smanjuju gubitke zbog difrakcije, čime povećavaju učinkovitost. Različite konfiguracije, poput simetričnih i asimetričnih rezonatora, omogućuju stabilne ili nestabilne modove. U stabilnim rezonatorima svjetlost ostaje unutar šupljine reflektirajući se između zrcala, dok nestabilni rezonatori omogućuju izlazak dijela svjetlosti, što je korisno za primjene s visokim snagama. Ova konfiguracija osigurava da se pojačavaju samo svjetlosne frekvencije i modovi specifični za rezonator, što rezultira stabilnim, koherentnim laserskim izlazom prikladnim za različite primjene. [7]

3. ZAVARIVANJE LASEROM

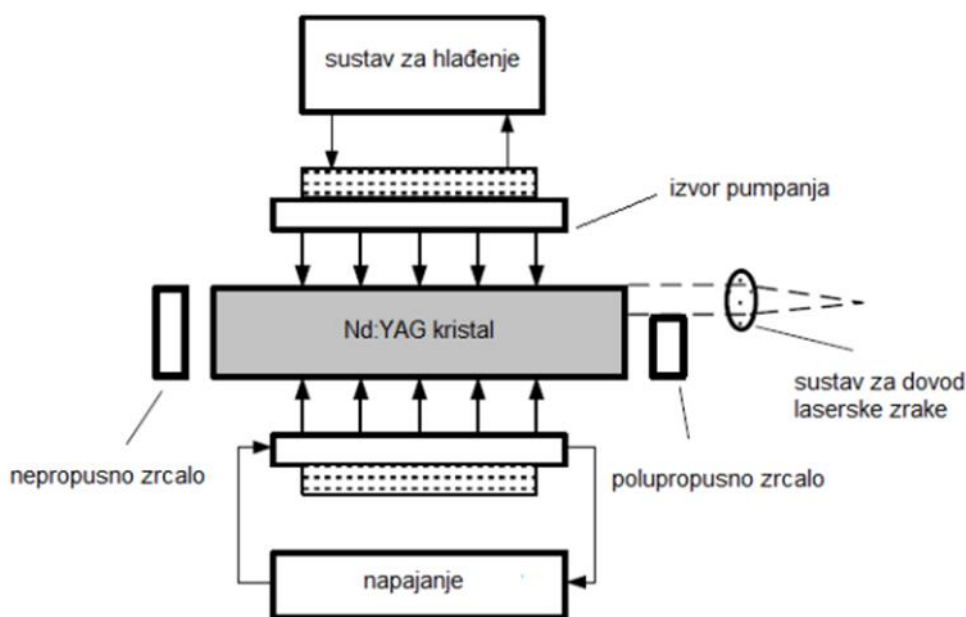
Povijest laserskog zavarivanja povezana je s napretkom u laserskoj tehnologiji i industrijskim primjenama od 1960-ih. Prvi prijedlozi o primjeni lasera za zavarivanje pojavili su se ranih 1960-ih kada je prepoznata mogućnost precizne primjene energije visoke gustoće. Do 1970-ih godina CO₂ laseri su se pokazali kao pogodni izvori za industrijsko zavarivanje, jer su omogućavali stvaranje uskih i dubokih zavara koji su bili nužni za mnoge industrijske primjene. Tijekom sljedećeg desetljeća, CO₂ laseri postali su široko rasprostranjeni u automobilskoj industriji. Do kasnih 1970-ih i ranih 1980-ih proizvođači automobila koristili su ih za zavarivanje raznih dijelova šasije i drugih komponenti koje su zahtijevale visoku preciznost. Općenito se postupci laserskog zavarivanja dijele na:

- Nd:YAG laseri
- diodni laseri
- CO₂ laseri
- disk laseri
- fiber laseri.

3.1. Nd:YAG laseri

Nd:YAG (engl. Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet) laser radi u infracrvenom području spektra. Ova valna duljina omogućuje prijenos laserskog snopa kroz optička vlakna, čime se povećava njegova svestranost, što ga čini idealnim za upotrebu u automatiziranim i robotskim sustavima. Ovi laseri dostupni su u pulsirajućem i kontinuiranom načinu rada, a svaki je prikladan za različite primjene. Pulsirajući način rada pogodan je za osjetljive materijale, osjetljive na toplinu, a kontinuirani način rada omogućuje dublju penetraciju, osobito kod materijala s visokom refleksijom površine poput aluminijskog i bakra. Jedna od glavnih prednosti Nd lasera je njegova visoka gustoća energije, koja omogućuje koncentrirano zagrijavanje malih površina. Ovo lokalizirano zagrijavanje korisno je kako za precizno zavarivanje tankih ploča, tako i za duboko prodiranje kod zavarivanja debljih materijala. Kada se koristi u načinu rada s ključanicom (engl. Key-hole), Nd laseri stvaraju uski, duboki kanal penetracije, što je ključno za postizanje zavara željene čvrstoće s minimalnim deformacijama.

Prikladnost Nd lasera za industrijsko zavarivanje dodatno je proširena njegovom sposobnošću za složene trodimenzionalne operacije zavarivanja i visokom kvalitetom snopa. Ovaj tip lasera naširoko se koristi u različitim industrijama, uključujući automobilsku, zrakoplovnu i elektroniku, zbog fleksibilnosti u proizvodnji visokokvalitetnih, izdržljivih zavara. Poboljšana stopa apsorpcije na metalnim površinama čini Nd lasere poželjnim za zavarivanje reflektivnih metala, što doprinosi njihovoj sve većoj popularnosti u primjenama koje zahtijevaju precizne, ponovljive i čiste zavare s visokom pouzdanošću i minimalnim naknadnim obradama. Na Slika 5. nalazi se shematski prikaz Nd:YAG lasera. [8, 9, 10]



Slika 5. Shema Nd:YAG lasera [11]

Karakteristike Nd:YAG lasera:

1) Valna duljina:

- 1064 nm u bliskom infracrvenom području. Ova je valna duljina prikladna za prijenos kroz optička vlakna, čime se povećava fleksibilnost u industrijskim primjenama, posebno u robotskim sustavima

2) Snaga:

- pulsirajući način rada - Snage se obično kreću između 50 i 500 W, s energijama impulsa do 20 J po pulsu. Ovaj način rada pogodan je za precizno zavarivanje tankostjenih materijala i minimiziranje toplinskog utjecaja

- kontinuirani način rada - Snage se kreću od 500 W do nekoliko kW, omogućujući dublju penetraciju i brzo zavarivanje debelostjenih metala. Često se koristi za primjene koje zahtijevaju duboke zavare, poput automobilske industrije.

3) Zaštitni plin:

- argon ili helij (preporučeni za minimalno stvaranje plazme)
- dušik ili CO₂ također se mogu koristiti, ali su manje uobičajeni zbog potencijalne reaktivnosti s određenim metalima
- brzina protoka plina obično se postavlja između 10-20 litara po minuti, ovisno o materijalu i dubini zavora, kako bi se spriječila oksidacija i održala kvaliteta zavora.

4) Sastav materijala

- ioni neodimija (Nd³⁺) zamjenjuju oko 0,5 % - 1,5 % itrijevim ionima u YAG kristalu
- Kod metala poput visokolegiranih čelika ili aluminijskih legura, sastavi variraju, s uobičajenim legirnim elementima (npr. krom za nehrđajući čelik ili silicij za aluminij) radi optimizacije zavarljivosti i čvrstoće.

5) Brzine zavarivanja

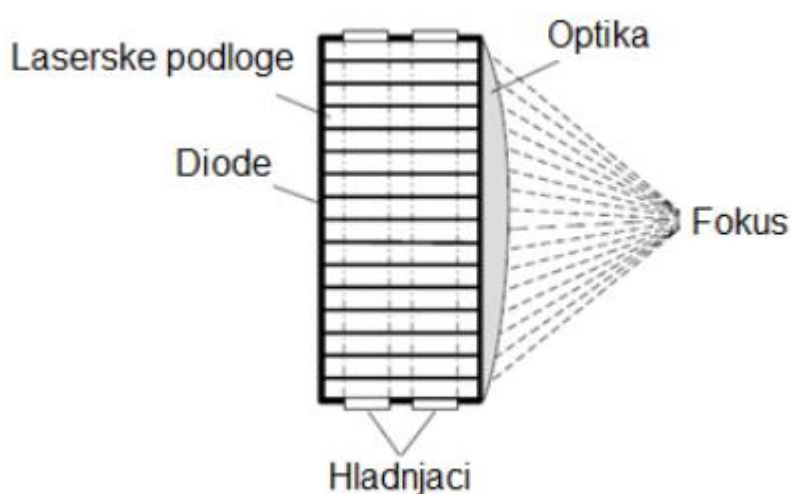
- tankostjeni materijali: Kod preciznog zavarivanja manjih debljina materijala, brzina zavarivanja može doseći i do 500 mm/min ili više
- debelostjeni materijali: Kod zavarivanja većih debljina materijala ili u primjenama gdje je potrebna duboka penetracija, brzine se obično kreću između 100 i 300 mm/min.

3.2. Diodni laseri

Diodni laseri, poznati i kao poluvodički laseri, izrazito su učinkoviti laseri koji se često koriste u raznim područjima primjene, od telekomunikacija do industrijske obrade. Njihova kompaktna veličina, učinkovitost i raspon valnih duljina čine ih jedinstvenima i prilagodljivima. Za razliku od tradicionalnih plinskih ili krutih lasera, diodni laseri koriste poluvodički materijal, poput galij arsenida (GaAs), koji emitira svjetlost u bliskom infracrvenom području, obično između 800 i 1000 nm. Osnovna struktura diodnog lasera uključuje p-n spoj, koji se dobiva dodavanjem nečistoća u različite dijelove poluvodiča kako bi se stvorila područja s viškom elektrona (n-tip) i područja s viškom šupljina (p-tip). Kada se primijeni električna struja, elektroni se kreću

prema p-regiji i kombiniraju sa šupljinama, oslobađajući energiju u obliku fotona – proces poznat kao elektroluminiscencija.

Emitirani fotoni stimuliraju dodatna emitiranja, stvarajući koherentan snop svjetlosti putem stimulirane emisije. Diodni laseri često koriste hetero strukture – višeslojne poluvodičke slojeve s različitim energetske jazovima kako bi zadržali elektrone i šupljine u uskom području, povećavajući učinkovitost. Nadalje, Braggovi reflektori, sastavljeni od slojeva materijala s različitim indeksom loma, postavljeni su s obje strane aktivnog područja kako bi tvorili optičku šupljinu. Ti reflektori djeluju kao ogledala koja pojačavaju svjetlost reflektirajući je kroz sredstvo za pojačavanje. Naširoko korišteni zbog svoje preciznosti, kompaktnosti i visoke kvalitete snopa. U medicinskom području koriste se u postupcima poput fotokoagulacije i laserske kirurgije. U industriji se visoke snage koriste za zavarivanje, rezanje i tretiranje površina, zahvaljujući svojoj sposobnosti da usmjere visoko intenzivni snop na određena područja. Laseri male snage, koji se često koriste u primjenama poput laserskih pokazivača i skenera bar kodova, emitiraju nekoliko mW snage. Laseri za zavarivanje, mogu postići izlaz do nekoliko kW. Njihova učinkovitost je zapažena, s efikasnošću priključivanja većom od 40 %, što ih čini jednim od energetske najefikasnijih tipova lasera. Sustavi hlađenja su potrebni za održavanje optimalne performanse u primjenama visokih snaga; ovi sustavi uključuju pasivno hlađenje za primjene niske snage te aktivno hlađenje, poput sustava s vodom, za primjene veće snage. Na Slika 6 prikazan je shematski prikaz diodnih lasera. [8, 9, 10]

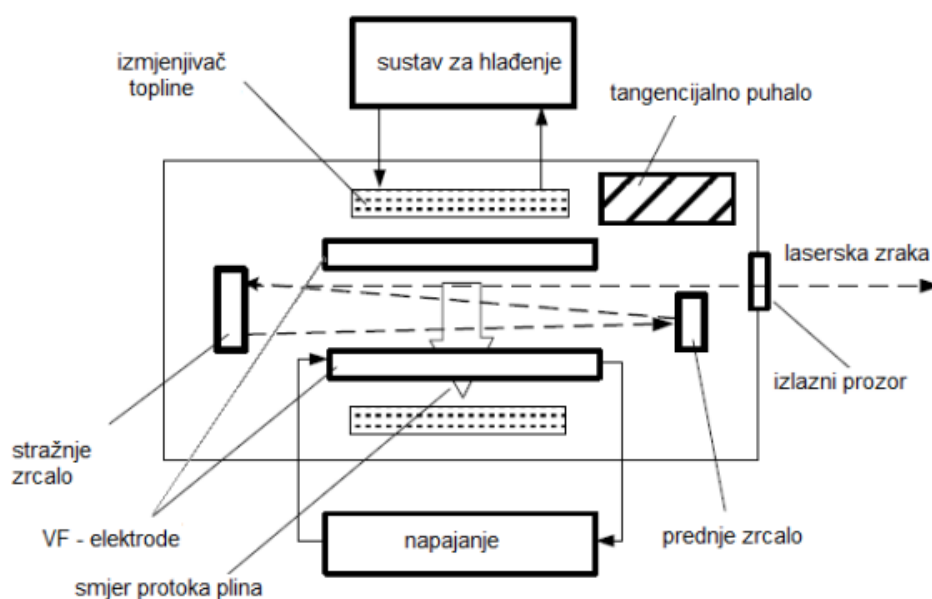


Slika 6. Shema diodnog lasera [11]

3.3. CO₂ laser

CO₂ lasersko zavarivanje izuzetno je učinkovita i često korištena tehnika u industrijskoj proizvodnji, cijenjena zbog sposobnosti stvaranja čvrstih, dubokih i preciznih zavara. Koristeći ugljični dioksid kao laserski medij, ovaj proces zavarivanja osobito je učinkovit u teškim industrijskim primjenama gdje su potrebni visoka snaga i veća penetracija.

Djeluje tako da utječe električno na mješavinu plinova, uglavnom sastavljenu od ugljičnog dioksida, dušika i helija. Prolaskom električne struje kroz ovu plinsku mješavinu CO₂ molekule postaju uzbuđene i emitiraju fotone u infracrvenom spektru, s valnom duljinom od 10,6 mikrometara. Svjetlost se potom pojačava unutar optičke šupljine sastavljene od zrcala, stvarajući snažan laserski snop. Ovaj snop se, uz pomoć zrcala, usmjerava prema radnom materijalu kako bi se generirala intenzivna toplina koja topi i spaja materijale duž linije zavara. Zbog duže valne duljine, CO₂ laseri nisu kompatibilni s optičkim vlaknima, pa koriste zrcalne sustave za usmjeravanje snopa. Za zaštitu zavara od oksidacije često se koristi zaštitni plin, poput helija, argona ili dušika, čime se osigurava visoka kvaliteta zavara. Na Slika 7 je prikazan princip rada lasera. [9,10]



Slika 7. Shema CO₂ laser [11]

Karakteristike CO₂ lasera:

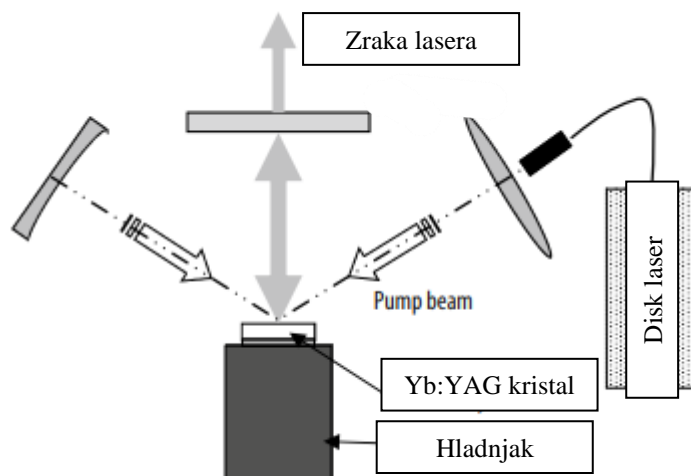
- valna duljina - CO₂ laseri emitiraju svjetlost na valnoj duljini od 10600 nm, što omogućuje učinkovito prenošenje energije i duboko prodiranje u materijal
- raspon snage - CO₂ laseri dostupni su u rasponu snaga, od nekoliko vata za precizne radove do desetaka kilovata za zahtjevne industrijske primjene. Laseri niže snage prikladni su za precizno zavarivanje, dok su snažniji modeli idealni za zavarivanje debljih metalnih dijelova
- zaštitni plin - Uobičajeno korišteni zaštitni plinovi uključuju helij, argon i dušik. Helij se često preferira jer smanjuje stvaranje plazme, omogućujući dublju penetraciju, dok su argon i dušik ekonomičniji, ali zahtijevaju prilagodbe za održavanje kvalitete zavara.

Visoka energetska učinkovitost CO₂ lasera omogućuje ekonomično korištenje u industrijskim primjenama. Sposobnost postizanja duboke penetracije čini ih idealnim za zavarivanje većih debljina materijala gdje je potrebna veća zahtijevana čvrstoća zavara. Stabilnost i konzistentnost laserskog snopa omogućuju pouzdane rezultate u automatiziranim proizvodnim linijama, a troškovna učinkovitost čini ih isplativom opcijom za visokoučinkovite primjene. U automobilskoj industriji koristi se za zavarivanje dijelova kao što su dijelovi šasija i karoserijske ploče, pružajući brzo i točno zavarivanje. U zrakoplovnoj industriji se koriste za spajanje kritičnih komponenti izrađenih od visoko otpornih legura. CO₂ lasersko zavarivanje također se koristi u elektronici za precizno spajanje malih komponenti i u proizvodnji teške opreme gdje je potrebna dugotrajna čvrstoća zavara. [10]

3.4. Disk laseri

Disk lasersko zavarivanje visoko je precizna tehnika koja koristi tanki disk Ytterbijem sa itrij-aluminij garnetom (Yb) kao laserski medij. Upravo ovo zavarivanje proizvodi zrake visoke kvalitete s minimalnom toplinskom distorzijom, što ga čini idealnim za zahtjevne zadatke u industrijama poput automobilske, zrakoplovne i proizvodnje elektronike.

Medij za pojačavanje je tanki disk Yb kristala, obično promjera oko 15 mm i debljine 0,2 mm. Disk je montiran na hladnjak koji učinkovito odvodi toplinu, održavajući stabilnu temperaturu kroz cijeli laser (Slika 8). Ova struktura diska minimizira termalno lećanje (izobličenje uzrokovano toplinskim nakupljanjem), omogućujući laseru da zadrži visoku kvalitetu snopa čak i pri velikim izlaznim snagama.



Slika 8. Shema disk lasera [9]

Disk se pobuđuje diodnim laserima visoke učinkovitosti koji fokusiraju svjetlost na tanki disk. Zbog minimalne debljine, disk samo djelomično apsorbira svjetlost u jednom prolazu, pa se pomoću sustava ogledala svjetlost usmjerava kroz disk nekoliko puta radi maksimalne apsorpcije i učinkovitosti konverzije energije. Svjetlost se zatim pojačava kroz stimuliranu emisiju, stvarajući koherentan laserski snop izvrsnog fokusa. Disk laseri mogu isporučiti velike izlazne snage, obično od nekoliko stotina vata do nekoliko kW, što ih čini prikladnima za precizno zavarivanje uz veliku penetraciju. [9]

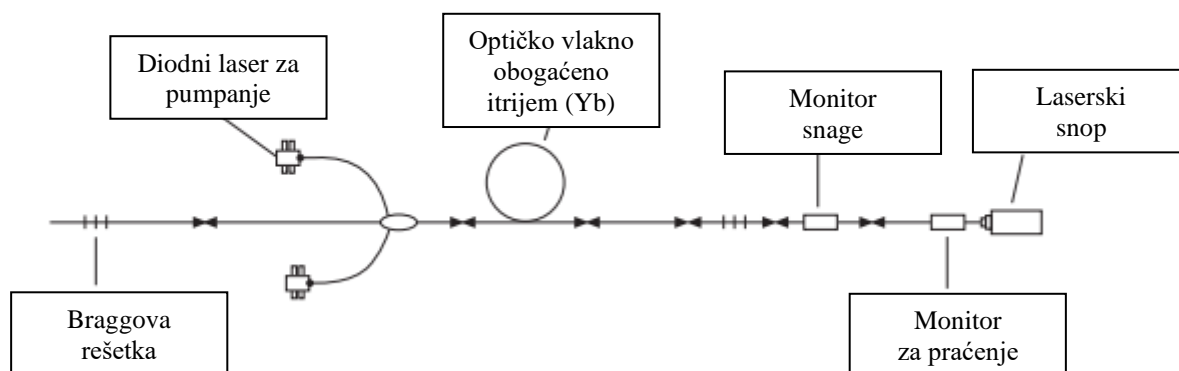
Karakteristike disk lasera:

- valna duljina - disk laseri obično emitiraju svjetlost na oko 1.030 nm, što se lako apsorbira kod metala, omogućujući učinkovito zavarivanje raznih vrsta metala, uključujući čelik, aluminij i titan
- kvaliteta snopa - disk laseri proizvode kvalitetan snop s minimalnom divergencijom, omogućujući precizno fokusiranje, što ih čini pogodnima za male, složene zavare i primjene koje zahtijevaju visoku preciznost
- raspon snage - disk laseri mogu isporučiti snage od nekoliko vata do nekoliko kilovata, omogućujući fleksibilnost u primjenama, od mikro-zavarivanja tankih ploča do zavarivanja debljih ploča uz punu penetraciju
- sustav hlađenja - disk laseri koriste sustav hlađenja koji održava stražnju stranu diska na stabilnoj temperaturi, omogućujući kontinuirani rad bez značajnih toplinskih izobličenja.

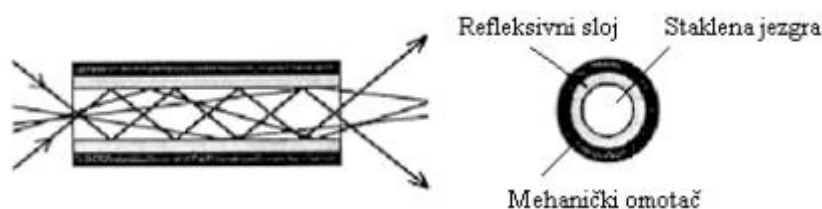
4. FIBER LASER

Fiber laseri su vrlo učinkoviti tipovi lasera koji su stekli veliku popularnost u industrijskim primjenama, uključujući lasersko zavarivanje. Nastanak i razvoj fiber lasera usko je povezano s napretkom tehnologije optičkih vlakana, koja je započela 1960-ih godina. U početku, fiber laseri korišteni su prvenstveno za primjene niske snage, poput optičkih pojačivača. Međutim, početkom 2000-ih godina, uvođenjem laserskih izvora veće snage, počinje njihova široka primjena u industrijskom zavarivanju.

Fiber laseri rade na principu sličnom drugim vrstama lasera, poput čvrstih lasera, ali s bitnom razlikom u aktivnom mediju. Ovaj laser za aktivni medij koristi optičko vlakno obogaćeno itrijem (Yb). Samo vlakno djeluje kao središte za generiranje laserske svjetlosti i kao vodič koji usmjerava svjetlost. Laserska zraka generira se kada svjetlost iz izvora pumpanja, obično diodnog lasera, pobuđuje ione u vlaknu, što uzrokuje da ti ioni emitiraju koherentnu svjetlost na specifičnoj valnoj duljini (obično oko $1,07 \mu\text{m}$ za lasere obogaćene itrijem). Slika 9 prikazuje shematski prikaz osnovnih komponenti fiber lasera, a Slika 10 možemo vidjeti poprečni presjek vlakna. [8, 9, 10, 11]



Slika 9. Shema fiber lasera [10]

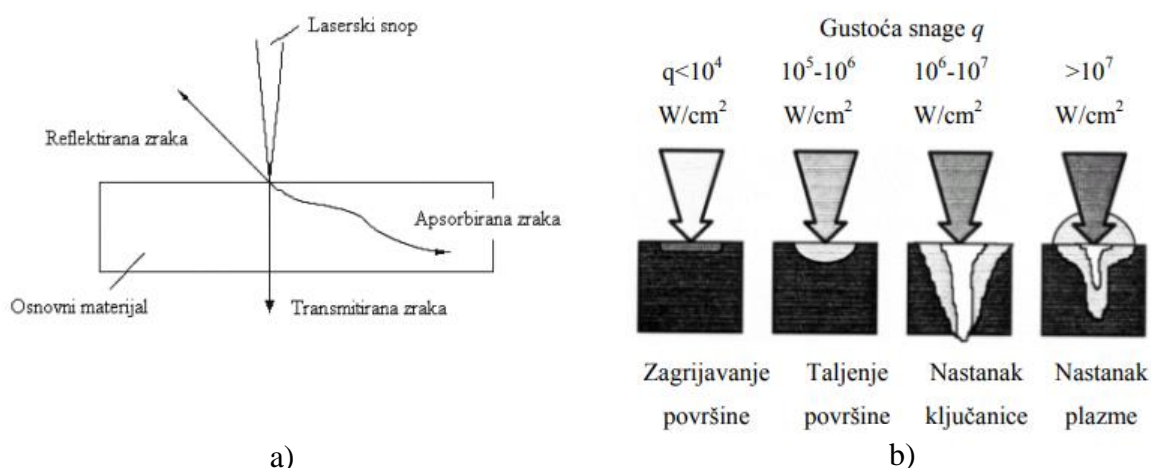


Slika 10. Poprečni presjek vlakna [12]

Jedna od glavnih prednosti fiber lasera u odnosu na druge vrste lasera, poput CO₂ ili Nd:YAG lasera, je njihova sposobnost generiranja visokokvalitetnih laserskih zraka s izvrsnom kvalitetom snopa i visokom učinkovitošću. Svjetlost se prenosi kroz fleksibilno vlakno, što je posebno korisno za primjene zavarivanja na udaljenim lokacijama.

4.1. Interakcija laserske zrake i površine

Interakcija laserskog snopa s aluminijem u procesu zavarivanja uključuje nekoliko ključnih faza: refleksiju, apsorpciju i prijenos energije (Slika 11. a). Kada laserski snop pogodi površinu aluminija, veliki dio svjetlosti se reflektira zbog visoke refleksije površine aluminija, osobito na infracrvenim valnim duljinama. Ovaj problem može se prevladati korištenjem veće snage lasera ili promjenom valne duljine kako bi se povećala apsorpcija. Preostali dio svjetlosti apsorbira aluminij, što uzrokuje zagrijavanje i taljenje materijala. Aluminij ima relativno nisku točku taljenja, što olakšava proces, no zbog refleksije treba pažljivo kontrolirati snagu lasera kako bi se postigla željena penetracija bez pretjeranog zagrijavanja. U slučaju visokih snaga, može doći do nastanka ključanice koja omogućava duboko zavarivanje. Jedan od najvećih izazova kod zavarivanja aluminija je poroznost, koja nastaje kada se plinovi zarobe u rastopljenoj kupci. To je posebno izraženo u slučaju neadekvatnog uklanjanja oksidnog sloja ili korištenja prevelike snage lasera. Za uspješno zavarivanje aluminija, potrebno je pravilno kontrolirati parametre lasera poput gustoće snage, brzine zavarivanja i trajanja impulsa, primjer utjecaja snage na materijal prikazano na Slika 11. b).



Slika 11. Interakcija laserske zrake sa osnovnim materijalom [12]

4.2. Zavarivanje fiber laserom

U laserskom zavarivanju koriste se dva osnovna načina rada: pulsno lasersko zavarivanje (engl. pulsed wave – PW) i kontinuirano lasersko zavarivanje (engl. continuous wave - CW). Oba imaju svoje specifične karakteristike, zbog kojih su pogodna za različite primjene, ovisno o materijalu i željenoj kvaliteti zavara.

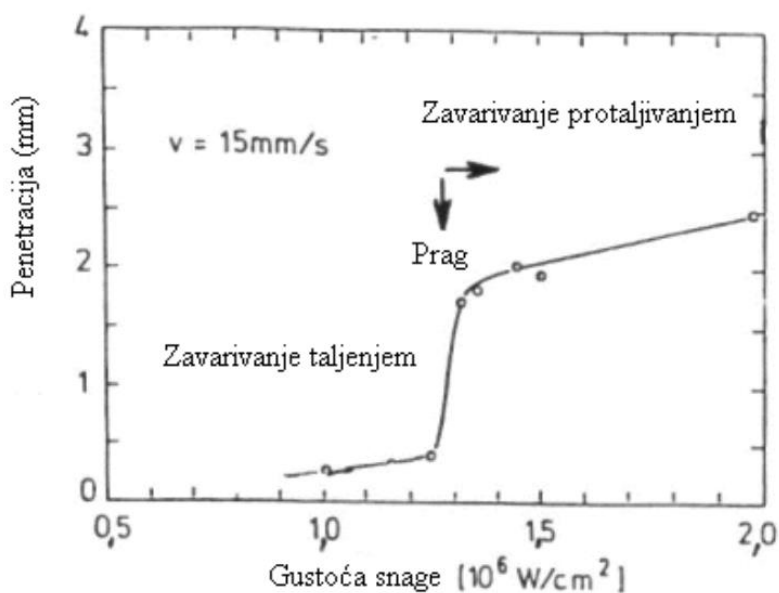
Pulsno lasersko zavarivanje uključuje emitiranje laserske svjetlosti u obliku impulsa, umjesto kontinuiranog snopa. Trajanje impulsa obično se kreće od 1 do 20 ms, a frekvencija tih impulsa može doseći i do 1 kHz. Ova metoda se često koristi kada je potrebna visoka preciznost i kada je nužno minimizirati unos topline u materijal kako bi se spriječilo izobličenje ili oštećenje komponenti osjetljivih na toplinu.

Proces funkcionira tako da se materijalu isporučuju kratki udari energije, što izaziva brzo zagrijavanje i hlađenje. Ovo brzo zagrijavanje dovodi do stvaranja taline zavara, a kasnije hlađenje učvršćuje zavar. Pulsno lasersko zavarivanje je korisno za zavarivanje s dubokom penetracijom uz minimalno izobličenje, osobito manjih debljina materijala. Energija isporučena u svakom pulsu je dovoljna za lokalno taljenje materijala, stvarajući malu zavareno područje. Međutim, jedan od izazova pulsnog laserskog zavarivanja je sklonost nastanku poroznosti. Tijekom faze hlađenja, zarobljeni plinovi mogu formirati mjehuriće, što dovodi do šupljina unutar zavara. Kontroliranje trajanja impulsa i gustoće snage može ublažiti ovaj problem utječući na brzinu skrućivanja.

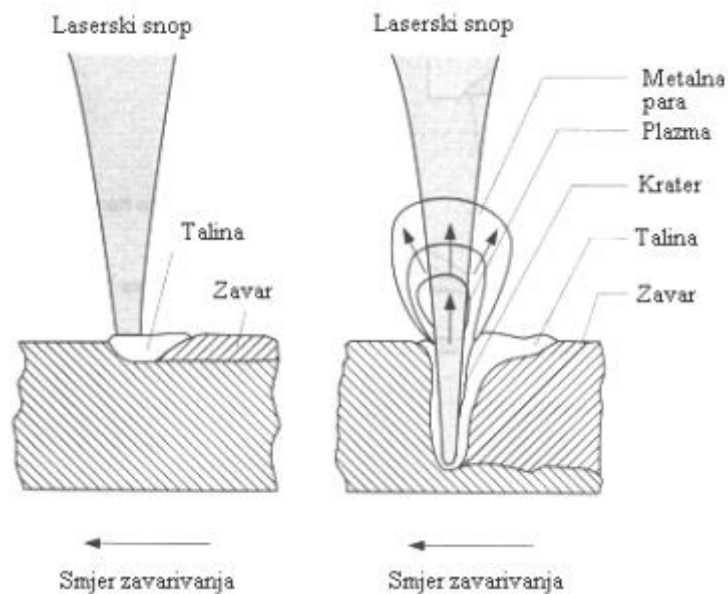
Kontinuirano lasersko zavarivanje koristi stalni, kontinuirani laserski snop koji omogućuje neprekidan protok energije u materijal. Ova metoda se obično koristi kada je potrebna dosljedna, duboka i stabilna penetracija. Kontinuirano lasersko zavarivanje posebno je učinkovito u primjenama gdje je omjer dubine i širine veliki, a stabilan i kontinuiran unos topline nužan za održavanje duboke penetracije.

Za CW lasere, izlazna snaga je kontinuirana, što rezultira stalnim protokom energije u materijal. To pomaže u postizanju dublje penetracije, osobito pri visokoj prosječnoj snazi lasera (>1 kW). Međutim, u nekim slučajevima, mogućnost zavarivanja pri nižim razinama snage je ograničena jer materijal možda neće apsorbirati dovoljno energije za postizanje duboke penetracije. Osim toga, kontinuirano lasersko zavarivanje može dovesti od većih deformacija zbog produljenog unosa topline i povezanog tempa hlađenja taline zavara, što može dovesti do stvaranja pukotina i drugih oštećenja. [13]

Također kod zavarivanja laserom razlikuje se zavarivanje taljenjem i protaljivanjem – tehnika ključanice. Kod manjih gustoća snage na površini materijala zavaruje se taljenjem, dok kod većih gustoća dolazi do protaljivanja. Granica u kojoj se prelazi iz taljenja u protaljivanje naziva se prag gustoće i on je red veličine 10^6 W/cm^2 . Slika 12 prikazuje odnos penetracije i gustoće snage, dok Slika 13 prikazuje usporedba tih dviju tehnika.



Slika 12. Prag gustoće [12]



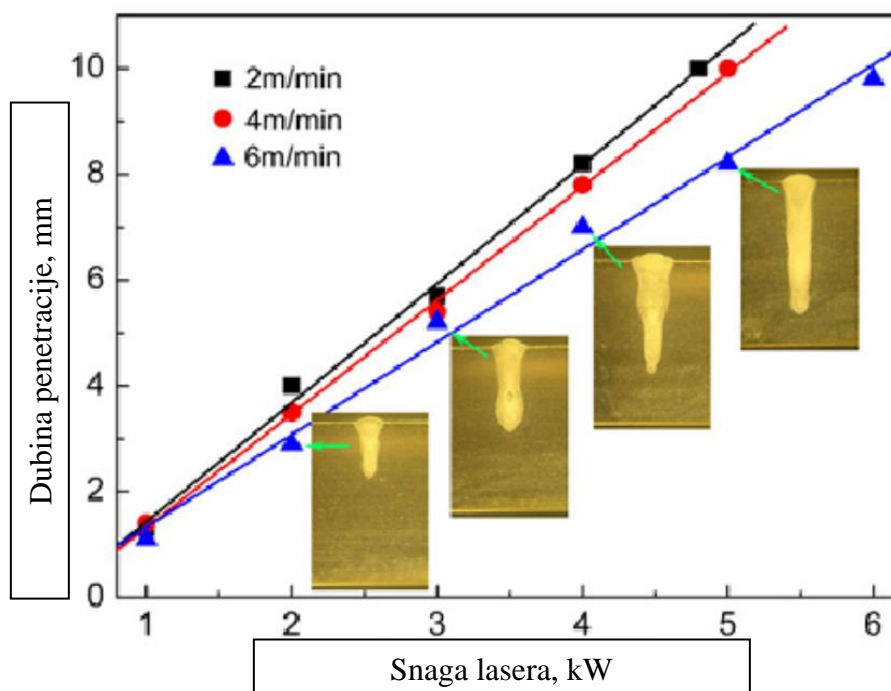
Slika 13. Zavarivanje taljenjem (Lijevo) i zavarivanje protaljivanjem (Desno) [12]

4.3. Procesni parametri zavarivanja

Najvažniji parametri kojim se upravlja zavarivanje laserom su:

- P - snaga lasera, W
- v – brzina zavarivanja, cm/min
- f – žarišna duljina leće, mm
- d_F - promjer žarišne točke, mm
- z – položaj žarišta u odnosu na površinu materijala, mm

Snaga lasera obično se kreće od 500 W do 10 kW, ovisno o primjeni i materijalu koji se zavaruje. Za precizno zavarivanje tankostjenih materijala, dovoljni su laseri s nižom snagom (500 W), koji omogućuju preciznu kontrolu unosa topline i minimalne toplinske deformacije. Za zavarivanje debelostjenih materijala ili za bržu proizvodnju koriste se laseri veće snage, Brzina zavarivanja ovisi o snazi lasera, vrsti materijala, zaštitnog plina te debljini materijala. Većom brzinom zavarivanja, a istom snagom dolazi do manjeg prodiranja u materijal, dok manjom brzinom dolazi do dublje penetracije. Slika 14 prikazuje odnos penetracije i snage lasera.



Slika 14. Dijagram ovisnosti penetracije o snazi lasera za različite brzine [14]

Mjesto na kojem snop ima svoj najmanji promjer naziva se promjer žarišne točke (d_F) i proporcionalno je u odnosu na žarišnu duljinu leće (f) što je prikazano formulom (1).

$$d_F = \frac{1.27f\lambda}{d_B} \quad (1)$$

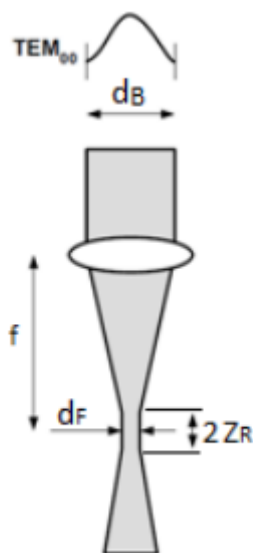
Pri čemu je:

f – žarišna duljina leće, mm

d_F - promjer žarišne točke, mm

λ – valna duljina laserske zrake, μm

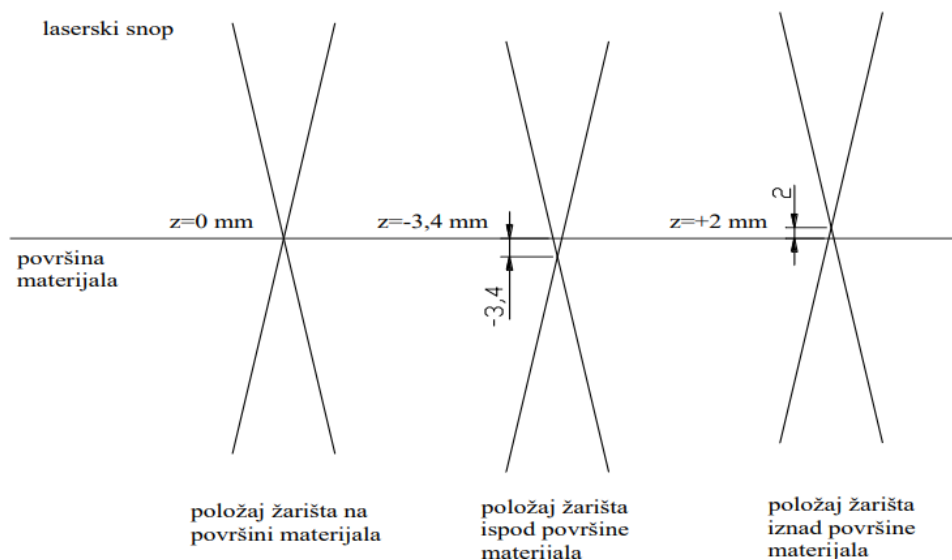
d_B - promjer snopa na ulazu u leću, mm



Slika 15. Skica laserskog snopa [11]

Položaj žarišta u odnosu na površinu materijala označava energiju koncentriranu na malom području, što omogućava visoku gustoću energije i duboku penetraciju, što je poželjno za postizanje zavara željene kvalitete. Ako je ta udaljenost prevelika, fokus se pomiče od površine materijala, što rezultira širim snopom i manjom koncentracijom energije, što može dovesti do plitke penetracije ili nedostatne fuzije. S druge strane, ako je ta udaljenost premala, snop može biti previše koncentriran, što može uzrokovati pregrijavanje, prekomjerno isparavanje materijala ili protaljivanje materijala. Optimalna udaljenost određuje se prema debljini materijala, snazi lasera i željenim karakteristikama zavara. Održavanje odgovarajuće udaljenosti osigurava da laser učinkovito apsorbira energiju u materijalu, osiguravajući željenu kvalitetu zavara s minimalnim deformacijama i kontroliranim toplinskim utjecajem. Pravilno

podešavanje z udaljenosti ključno je za postizanje željene penetracije, brzine i opće kvalitete zavara u laserskom zavarivanju (Slika 16).



Slika 16. Udaljenost žarišta od površine [12]

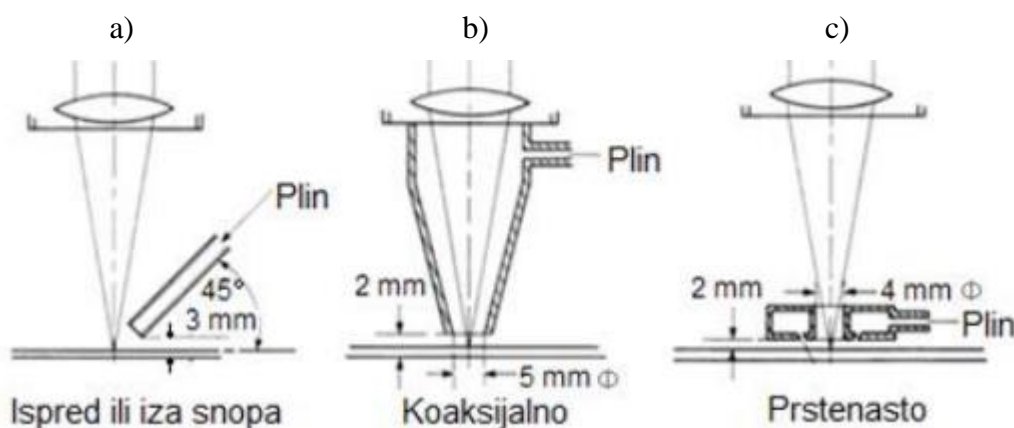
4.4. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi koriste se u laserskom zavarivanju kako bi se stvorila zaštitna atmosfera oko rastaljenog materijala i same zavarene zone. Glavna svrha zaštitnih plinova je sprečavanje oksidacije i kontaminacije materijala tijekom procesa zavarivanja, čime se osigurava visoka kvaliteta zavara. Protok plinova se izražava u l/min. Kod zavarivanja fiber laserom najčešće se koriste sljedeći plinovi:

- argon (Ar) - najčešće korišteni zaštitni plin u laserskom zavarivanju. To je inertni plin, što znači da ne reagira s rastopljenim materijalom ili laserskim snopom, te pomaže u sprječavanju oksidacije tijekom zavarivanja. Argon je posebno učinkovit za zavarivanje metala poput visokolegiranog čelika, aluminija i titana. Pruža stabilno i kontrolirano okruženje, smanjujući mogućnost nastanka pora i osiguravajući čiste zavare
- helij (He) – ponekad se koristi u kombinaciji s argonom, osobito za veće brzine zavarivanja ili za materijale koji su teže zavarljivi, kao što je bakar. Helij osigurava bolji prijenos topline od argona, što može pomoći u postizanju veće penetracije. Povećava brzinu zavarivanja i dubinu penetracije, dok u nekim primjenama omogućuje čišći zavar

- dušik (N_2) - obično se koristi za zavarivanje visokolegiranog čelika ili konstrukcijskog čelika kada oksidacija nije problem ili kada izgled površine nije kritičan. Također se može koristiti u određenim primjenama za stvaranje efekta ključanice. Dušik je relativno ekonomičniji od argona i često se koristi kada je potrebna jeftinija opcija
- ugljični dioksid (CO_2) - ponekad koristi kao zaštitni plin u zavarivanju fiber laserom za konstrukcijski čelik. Osigurava zaštitu od oksidacije. CO_2 može biti isplativiji od argona u nekim slučajevima, no zahtijeva pažljivo upravljanje jer može uzrokovati veću oksidaciju u odnosu na argon
- mješavina plinova - U nekim naprednim primjenama koristi se kombinacija plinova, poput argona i helija, ili argona i dušika, kako bi se optimizirala kvaliteta zavara, povećala penetracija ili postigao specifični učinak poput smanjenja rasprskavanja ili kontrole oksidacije.

Zaštitni plin se može dovoditi na više načina do laserske zrake. Razlikujemo dovođenje ispred ili iza laserske zrake, koaksijalno dovođenje i dovođenje prstenastom sapnicom. Usmjeravanje plina ispred snopa znači da plin izlazi iz mlaznice ispred zrake laserske zrake pod kutom od oko 45° , čime se sprječava oksidacija prije nego što laserska zraka pogodi površinu (Slika 17. a)). Ova metoda je učinkovita za tankostjene materijale ili kada je potrebna inicijalna zaštita od atmosferskih plinova. Koaksijalno usmjeravanje plina podrazumijeva da se plin isporučuje duž iste osi kao laserski snop. Plin okružuje snop, pružajući ravnomjernu zaštitu zone zavara i omogućujući duboku penetraciju i preciznu zaštitu (Slika 17. b)). Prstenasto usmjeravanje koristi prstenasti izlaz plina oko laserskog snopa, stvarajući ravnomjernu zaštitu oko cijele zavarene površine, što smanjuje oksidaciju i rasprskavanje (Slika 17.c)).



Slika 17. Dvod zaštitnog plina [12]

4.5. Zavarivanje uz dodavanje dodatnog materijala

Kod ručnog zavarivanja laserom postoji i varijanta u kojoj se dodaje dodatni materijal. Na Slika 18 prikazano je zavarivanje sa navedenom konfiguracijom.



Slika 18. Zavarivanje laserom uz dodavanje dodatnog materijala [15]

Takva metoda se razvila prvenstveno zbog svojih prednosti kao što su [15]:

- poboljšana kvaliteta spoja - žica za zavarivanje može poboljšati kvalitetu zavara ispunjavanjem praznina, osiguravajući pravilnu fuziju i smanjujući rizik od nepravilnosti u zavaru. Osim toga, dodavanje žice za zavarivanje može značajno povećati čvrstoću zavara, čineći ga pogodnim za zahtjevne primjene
- kontrolirani unos topline - žica za zavarivanje omogućava preciznu kontrolu unosa topline, što je ključno u primjenama gdje pregrijavanje može dovesti do deformacija materijala ili drugih problema
- povećana produktivnost - u nekim slučajevima, korištenje žice za zavarivanje može dovesti do većih brzina zavarivanja, čime se poboljšava produktivnost

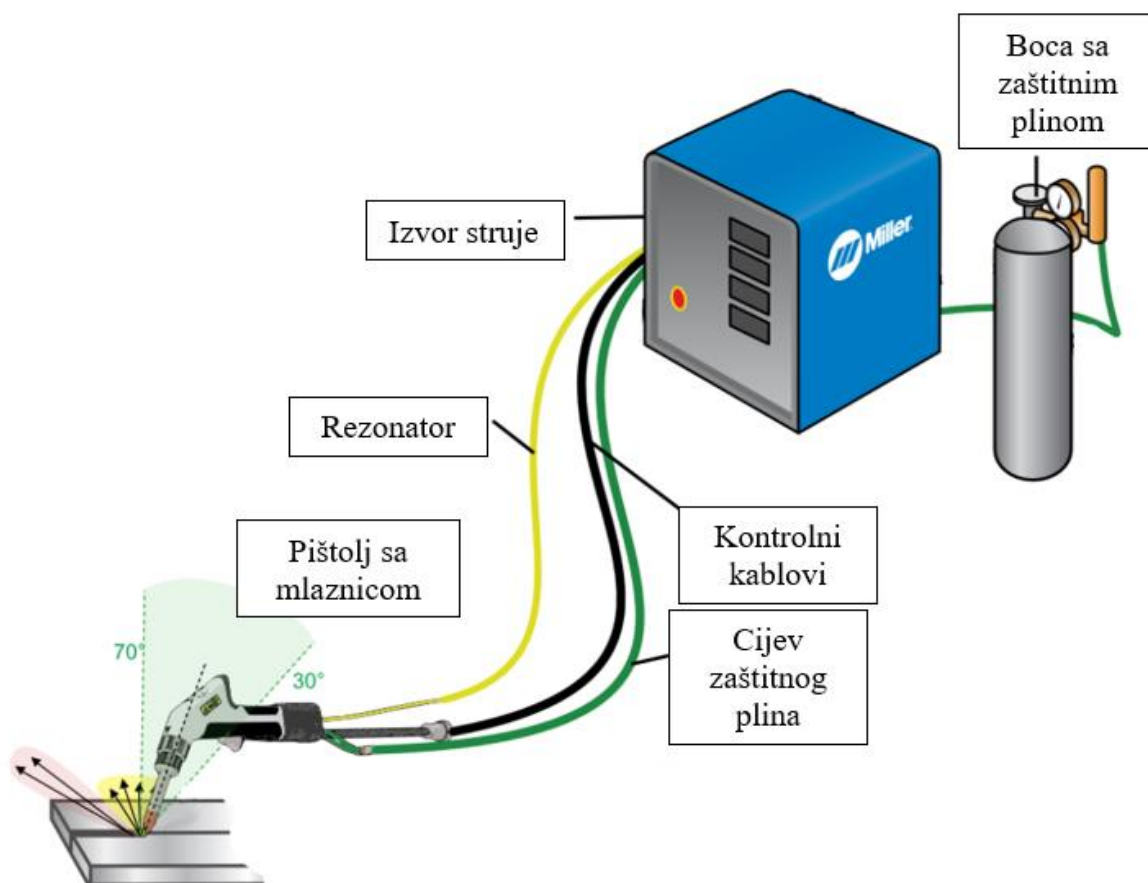
- premošćivanje praznina – kada se radi s materijalima koji imaju nepravilne ili neujednačene praznine moguće je odgovarajućom tehnikom zapuniti iste
- kompatibilnost legura - korištenje žice za zavarivanje odgovarajuće legure osigurava kompatibilnost s osnovnim materijalima, smanjujući rizik od problema s inkompatibilnošću. Omogućuje spajanje raznorodnih materijala i različitih debljina, proširujući opseg primjena za lasersko zavarivanje
- poboljšana kontrola procesa - tijekom procesa zavarivanja, žica za zavarivanje pruža zavarivačima veću kontrolu nad zavarem.

Unatoč svojim prednostima, takav način zavarivanja ima i svoje nedostatke [15]:

- kompleksnost procesa – ima više komponenti kao na primjer dodavač žice, što povećava mogućnost zastoja u proizvodnji
- cijena - cijena žice za zavarivanje i pripadajuće opreme može povećati ukupne troškove procesa zavarivanja. Stoga je važno koristiti je razborito, uzimajući u obzir omjer troškova i koristi
- otpad materijala - korištenje žice za zavarivanje može stvoriti otpad, osobito u primjenama gdje se višak žice mora odrezati
- kvaliteta zavara - vještina zavarivača i odabir parametara zavarivanja ključni su za osiguranje kvalitete zavara pri korištenju dodatnog materijala.

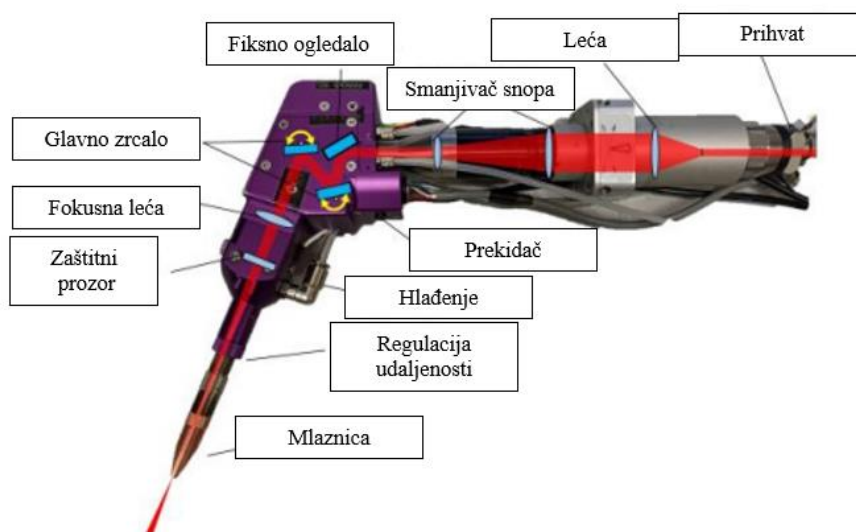
4.6. Oprema za fiber laser zavarivanje

Glavni dio opreme je izvor struje u kojem se nalazi i generator laserskog snopa, također u njemu se i kontrolira izlazna energija potrebna za proces zavarivanja. Izvor struje je povezan s optičkim vlaknima koje vodi laserski snop prema pištolju za zavarivanje. Pištolj je mjesto gdje se laserski snop fokusira i usmjerava na radni komad. Obično uključuje leće i ogledala koja fokusiraju snop na vrlo malu točku, omogućujući precizno zavarivanje. Mlaznica za zaštitni plin često je integrirana u sam pištolj za zavarivanje, štiteći zavar od oksidacije i kontaminacije stvaranjem zaštitne atmosfere oko zavara. Zaštitni plin dovodi se kroz pištolj kako bi se zaštitio rastaljeni materijal zavara od kontaminacije. Slika 19 prikazuje opremu za zavarivanje fiber laserom. [16]



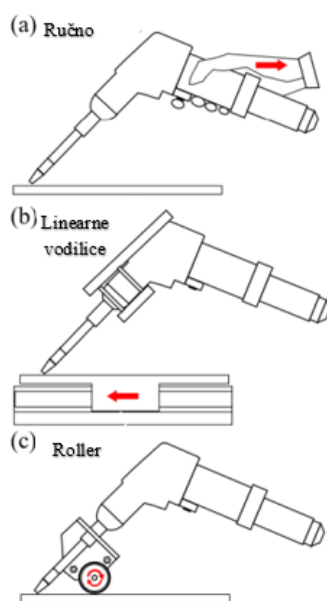
Slika 19. Oprema za zavarivanje fiber laserom [16]

Slika 20. prikazuje unutrašnjost pištolja za lasersko zavarivanje.



Slika 20. Presjek pištolja za lasersko zavarivanje [17]

Slika 21. a) prikazuje normalno ručno lasersko zavarivanje, no za još preciznije i lakše korištenje postoji i vođenje po linearnim vodilicama Slika 21. b). Moguće je i ugraditi nosač sa kotačićima (engl. Roller) koji omogućuje lakše vođenje pištolja iznad komada koji se zavaruje (Slika 21. c).



Slika 21. Moguće konfiguracije pištolja za ručno zavarivanje laserom [17]

4.7. Primjena fiber lasera

Zahvaljujućim svojim karakteristikama fiber laser se najčešće koristi u slijedećim industrijama:

- zrakoplovna industrija - konvencionalnim zavarivanjem nije moguće ostvariti složene zavare na turbinama, okvirima, lopaticama i drugim strukturnim elementima. Fiber lasersko zavarivanje omogućuje stvaranje točkastih zavara, a također se koristi za spajanje različitih materijala, poput titana, koji se ne mogu zavariti konvencionalnim tehnologijama zavarivanja
- automobilska industrija - fiber lasersko zavarivanje dovelo je do unaprjeđenja u proizvodnji automobila pružajući visoku brzinu zavarivanja i kontrolu nad procesom. Koristi se za spajanje različitih metala, poput aluminija i mekog čelika izradu dijelova motora. Osim toga, fiber lasersko zavarivanje omogućuje veću čvrstoću spoja, što osigurava trajnost automobila. Slika 22. prikazuje primjer fiber lasera na robotu tijekom zavarivanja karoserije automobila
- proizvodnja medicinskih uređaja - proizvodnja medicinskih uređaja zahtijeva izuzetnu preciznost. Fiber lasersko zavarivanje omogućuje rad na mikro razini i stvaranje složenih struktura, poput implantata. Također se može koristiti ručno za zavarivanje na specifičnim točkama bez izazivanja izobličenja
- građevina - fiber lasersko zavarivanje se koristi za spajanje strukturnih komponenata. Precizni zavari osiguravaju strukturnu cjelovitost metalnih okvira. Visoka brzina i minimalne toplinske deformacije omogućuju stvaranje visokokvalitetnih zavara
- vojska - vojna industrija također koristi fiber lasere za izradu teške opreme i robusnog oklopa. Ova vrsta laserskog zavarivanja omogućuje precizno zavarivanje ojačanje metalnih okvira, čime se osigurava strukturna stabilnost različite vojne opreme. [18]



Slika 22. Zavarivanje karoserije automobila [19]

5. ALUMINIJ EN AW 1050

Aluminij oznake EN AW 1050 pripada seriji aluminijevskih legura s vrlo visokim sadržajem aluminija (najmanje 99,5%). Ova legura poznata je po izvrsnoj otpornosti na koroziju, visokoj reflektivnosti i dobroj električnoj vodljivosti. Nije podložna toplinskoj obradi, no mehanička svojstva mogu se poboljšati postupcima hladne deformacije. Oznaka 14H označava stanje materijala nakon hladne obrade, pri čemu je materijal dodatno očvrstnut. Time se postižu bolja mehanička svojstva u usporedbi s osnovnim stanjem. EN AW 1050 14H najčešće se koristi u primjenama koje zahtijevaju malu masu, dobru oblikovnost i otpornost na oksidaciju, poput industrijskih panela, reflektora, konstrukcijskih dijelova i kućanskih aparata. Slika 23 prikazuje primjer proizvoda od aluminija. Ovo su neke od najbitnijih karakteristika:

- električna vodljivost - EN AW 1050 ima izvrsnu električnu vodljivost, što ga čini pogodnim za električne primjene, kao što su vodiči, vodovi, te razne komponente u elektroindustriji
- toplinska vodljivost - legura ima visoku toplinsku vodljivost, što je korisno u aplikacijama za prijenos topline, kao što izmjenjivači topline i hladnjaci
- otpornost na koroziju - EN AW 1050 pokazuje odličnu otpornost na koroziju, osobito u atmosferskim i kemijskim uvjetima, što ga čini idealnim za upotrebu u agresivnim okruženjima
- oblikovanje - ova legura je vrlo duktilna i lako se oblikuje u različite oblike, uključujući limove, folije i žice. Ova sposobnost omogućava široku primjenu u različitim industrijama, od proizvodnje spremnika do elektroindustrije. [20, 21]



Slika 23. Proizvodi od aluminija 1050 [20]

U tablici 1 prikazan je kemijski sastav za aluminij EN AW 1050 prema normi HRN EN 573-3:2024.

Tablica 1. Kemijski sastav aluminij EN AW 1050 [21]

Udio elemenata, %									
	Sicilij	Željezo	Bakar	Mangan	Magnezij	Cink	Titan	Ostalo	Aluminij
Min									99,5
Max	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,03	

Kada se govori o usporedbi aluminija i čelika, aluminij EN AW 1050 14H je pogodan za primjene gdje su potrebne mala masa, dobra otpornost na koroziju i visoka toplinska te električna vodljivost dok se čelik S235JR koristi gdje se zahtijeva veća mehanička čvrstoća i otpornost na udarce, uz napomenu da je potrebna dodatna zaštita od korozije. Usporedba tih dva materijala, odnosno njihovih mehaničkih i fizičkih svojstva prikazano je u Tablica 2.

Tablica 2. Usporedba aluminija EN AW 1050 14H sa čelikom S235JR [21, 22]

Mehanička i fizička svojstva	Vrijednost	
	Aluminij EN AW 1050 14H	Čelik S235JR
Svojstvo		
Gustoća, g/cm ³	2,71	7,85
Vlačna čvrstoća, MPa	105–145	360–510
Granica razvlačenja, MPa	≥85	≥235
Tvrdoća, HB	34	100–160
Toplinska vodljivost, W/mK	222	50
Otpornost na koroziju	Vrlo dobra	Srednja (potrebna zaštita)
Talište, °C	650	1450

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada usmjeren je na analizu kvalitete zavarenih spojeva aluminijskih legura pomoću fiber lasera. Kroz ispitivanje, istražit će se utjecaj različitih parametara zavarivanja, na konačnu kvalitetu spojeva. Za uspješno obavljanje eksperimenta potrebno je zadovoljiti standarde kvalitete prema normama HRN EN ISO 13919-2:2021 i HRN EN 1011-6:2018. Dobiveni rezultati poslužit će kao osnova za preporuke o pripremi i postavkama zavara u industrijskoj primjeni laserskog zavarivanja aluminijskih legura.

6.1. Priprema za zavarivanje

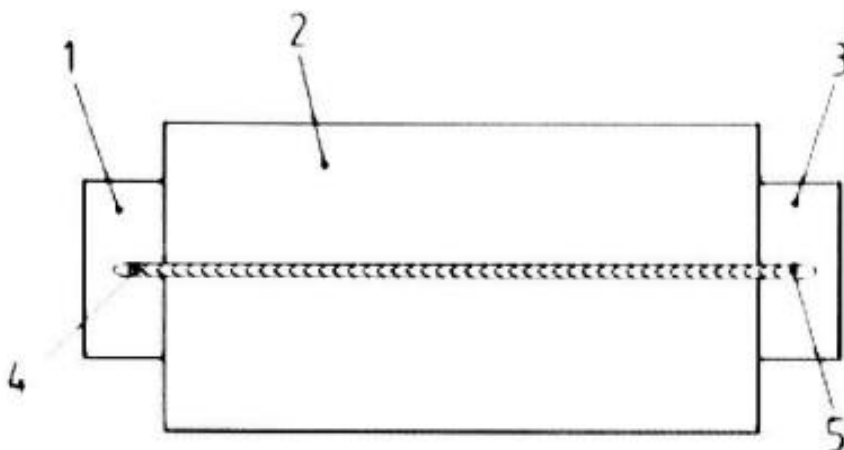
Uzorci aluminijskih legura su se za potrebe eksperimenta narezali u dimenzijama 150 mm (duljina) i 300 mm (širina) u 6 komada. Debljina osnovnog materijala iznosila je 2,5 mm.

Kako bi se provelo čim kvalitetnije zavarivanje potrebno je dobro pripremiti uzorke aluminijskih legura EN AW 1050. Priprema je bila sukladna preporukama iz norme HRN EN 1011-6:2018 [23]:

- oprema se sastoji od izvora laserskog snopa čini samo dio cjelokupne instalacije. Proces obrade laserom uglavnom uključuju mehanizirane, automatske ili robotske instalacije, dok je jedina iznimka ručna primjena lasera male snage za posebne, neindustrijske namjene. Tipična instalacija za lasersku obradu (radna stanica) obično uključuje sljedeće kategorije komponenti: izvor laserskog snopa, uređaje za vođenje, oblikovanje i fokusiranje laserskog snopa na radni komad, uređaje za stvaranje relativnog pomicanja između laserskog snopa i radnog komada, učvršćenja za držanje radnog komada, sustave za hlađenje te kontrolne sustave
- zavarivač je kvalificirani za postupke zavarivanja specificiranim prema europskoj normi. Zadužen je za rad i postavljanje opreme za lasersku obradu. Tijekom samog zavarivanja pokazuje svoje znanje o radu prema tehničkim specifikacijama postupka, te nadzoru i provjeri stroja za lasersku obradu
- koristiti dodatni materijal specificiran prema: EN ISO 14341, EN ISO 17632, EN ISO 636, EN ISO 21952, EN ISO 17634, EN ISO 14343, EN ISO 17633, EN ISO 16834, EN ISO 18276, EN ISO 24373, EN ISO 18273, EN ISO 18274
- koristiti zaštitni plin specificiran prema EN ISO 14175
- površine zavarenih spojeva moraju biti očišćene od nečistoća poput oksida, ulja, masnoće, rashladnih sredstava i boje, jer one negativno utječu na konačni rezultat.

Odabrana metoda čišćenja prilagođava se vrsti materijala, veličini komponenata i zahtjevima kvalitete te može uključivati ručno odmašćivanje otapalima, čišćenje u zatvorenim jedinicama s parama otapala ili ultrazvučnim kupkama, tretman parnim čišćenjem uz blago alkalno sredstvo, kiselinsko jetkanje uz neutralizaciju i ispiranje destiliranom vodom te sušenje, kao i mehaničko čišćenje brušenjem ili četkanjem. Ako se krajevi komponenata ne mogu obraditi, mogu se koristiti dodatne ploče prije komada i poslije koje smanjuju nakupljanje topline na krajevima materijala, pričvršćuju se stezanjem ili zavarivanjem radi postizanja dobrog toplinskog kontakta te se uklanjaju nakon zavarivanja

- uzorke koji se zavaruju potrebno je staviti na površinu prikazano kao na Slika 24. pri čemu je:
 - 1 - početni dio zaštitne ploče
 - 2 - uzorak koji se zavaruje
 - 3 - završni dio zaštitne ploče
 - 4 - početak zavara
 - 5 - završetak zavara



Slika 24. Shema zavarivanja uzorka prema normi HRN EN 1011-6:2018 [23]

6.2. Izvor struje

Sukladno prema normi HRN EN 1011-6:2018 odabrana je i oprema za fiber zavarivanje laserom, dodatni materijal i zaštitni plin. Za zavarivanje je odabran izvor struje FANUCI 3.0 PRO GenX snage 1500 W (Slika 25). Identifikacijska pločica je prikazana na Slika 26.



Slika 26. FANUCI 3.0 PRO GenX 1500W [24]



Slika 25. Identifikacijska pločica FANUCI 3.0 PRO GenX 1500W

U opremi se također nalazi dodavač sustav za dovod dodatnog materijala (Žice)(Slika 27) i pištolj za zavarivanje (Slika 28).



Slika 27. FANUCI PRO dodavač žice



Slika 28. FANUCI PRO pištolj za zavarivanje [24]

Tablica 3. prikazuje usporedbe FANUCI lasera za zavarivanje različitih snaga.

Tablica 3. Usporedba FANUCI fiber lasera [24]

Karakteristike FANUCI 3.0 fiber lasera			
	Fanuci 1000W	Fanuci 1500W	Fanuci 2000W
Snaga lasera	1000 W	1500 W	2000 W
Valna duljina lasera	1070 NM	1070 NM	1070 NM
Duljina snopa	10 m	10 m	10 m
Model rada	kontinuirano/modulirano	kontinuirano/modulirano	kontinuirano/modulirano
Pozicioniranje	crvena laserska točka	crvena laserska točka	crvena laserska točka
Napon	220 V	220 V	220 V
Potrošnja energije	5 kW	7 kW	9 kW
Frekvencija	50/60 HZ	50/60 HZ	50/60 HZ
Struja	25 A	32 A	40 A (maks.), 32 A (Raycus)
Težina glave lasera	760 g	760 g	760 g
Način rada glave lasera	Oscilacija/točka/linija	Oscilacija/točka/linija	Oscilacija/točka/linija
Fokusna duljina	150 mm	150 mm	150 mm
Brzina zavarivanja	0–160 mm/s	0–190 mm/s	0–215 mm/s
Hlađenje	Destilirana voda	Destilirana voda	Destilirana voda
Zaslon osjetljiv na dodir	PLC zaslon i upravljačka ploča	Isto kao 1000W	Isto kao 1000W
Dovod žice	Automatski dovod i povlačenje	Isto kao 1000W	Isto kao 1000W
Promjer žice	0.8 mm, 1.0 mm, 1.2 mm, 1.6 mm	Isto kao 1000W	Isto kao 1000W

6.3. Dodatni materijal

Za dodatni materijal korištena je aluminijska žica (Slika 29), promjera 1,2 mm.

EZ - MIG AI99,7		
NORME		
HRN EN ISO 18723	AWS / ASME SFA-5,10	W. Nr.
S AI 1070 / AI 99,7	~ ER1100	3,0289
SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE		
Aluminijska žica za MIG zavarivanje s visokim sadržajem aluminija. Namijenjena je za zavarivanje aluminija sličnog kemijskog sastava. Relativno mekan metal zavara odlikuju dobra istezljivost, električna vodljivost i korozijska postojanost.		
MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA		
R _{p0.2} N/mm ²	R _m N/mm ²	A ₅ %
35	80	> 35
ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE		
Al		
%	> 99,7	
ZAŠTITNI PLIN		
I1 (Ar)		
PAKIRANJE		
Promjer žice mm		Namotaj
0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0		Žica do žice (S-S)
7 kg - žičani kolut		
= +		

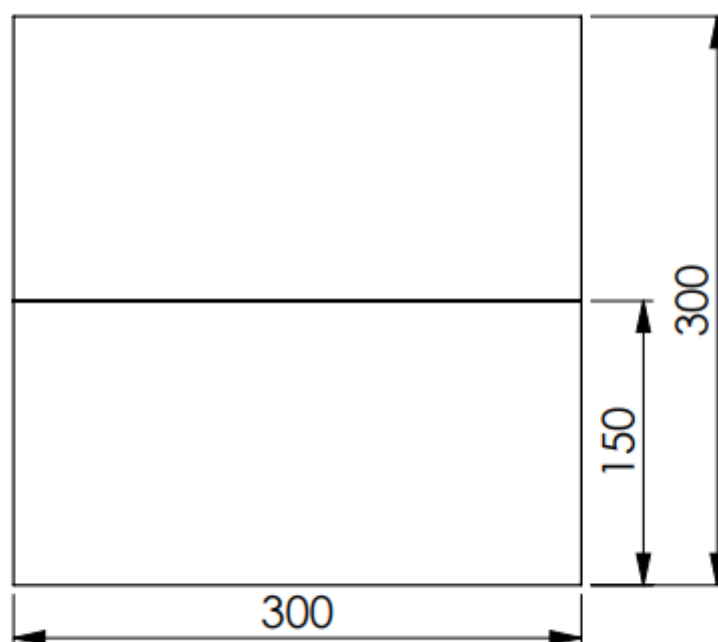
Slika 29. Specifikacije dodatnog materijala EZ- MIG AI99,7 [25]

6.4. Zaštitni plin

Kod fiber laserskog zavarivanja aluminijski koristi se zaštitni plin Argon 4.8 (čistoće 99,998%) kako bi se osigurala visoka kvaliteta zavara. Argon stvara inertnu atmosferu koja sprječava oksidaciju rastaljenog metala i nastanak poroznosti, čime poboljšava mehanička svojstva zavara. Također, pomaže u hlađenju zavarenog područja, smanjujući rizik od deformacija, te stabilizira laserski snop, omogućujući precizan i stabilan proces zavarivanja. Argon poboljšava estetski izgled zavara smanjujući površinske nedostatke poput mrlja i obojenja, a kod reflektirajućih materijala, poput aluminijski i bakra, smanjuje gubitke energije uzrokovane refleksijom.

6.5. Postupak zavarivanja

Prethodno pripremljeni radni komadi se pozicioniraju na stol kao na Slika 30.



Slika 30. Pozicija komada

Zavarivanje se odvijalo u radionici na radnom stolu uz zaštitnu opremu. Položaj zavarivanja bio je PA prema normi HRN EN ISO 6947:2019. Ukupno se zavarilo 3 uzorka, čiji parametri zavarivanja su prikazani u Tablica 4.

Tablica 4. Parametri zavarivanja ispitnih uzoraka

	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
Snaga, W	1000	900	1500
Brzina zavarivanja, mm/s	10	10	10
Brzina dodavanja žice, mm/s	13	13	13
Protok plina, l/min	5	5	5
Položaj zavarivanja	PA	PA	PA
Način rada	kontinuirano	kontinuirano	kontinuirano
Vrsta zavara	jednostrano	obostrano	obostrano

Primjer parametra za uzorak 1 prikazano je na Slika 31.



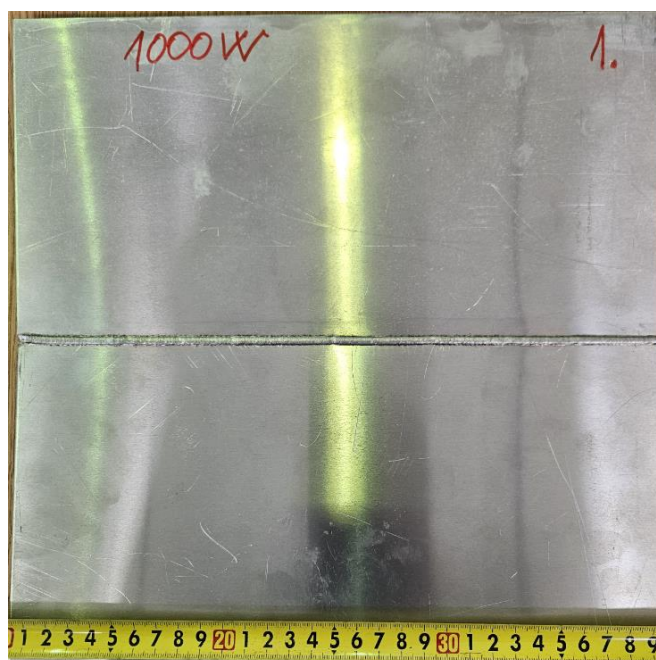
Slika 31. Primjer parametra za Uzorak 1

Slika 32. prikazuje postupak zavarivanja uzorka 3.



Slika 32. Zavarivanje fiber laserom uzorka 3

Rezultate zavarivanja za uzorak 1 prikazano je na Slika 33, Slika 34 prikazuje uvećano lice zavara, dok Slika 35 prikazuje korijen zavara.



Slika 33. Uzorak 1



Slika 34. Uzorak 1 lice zavara

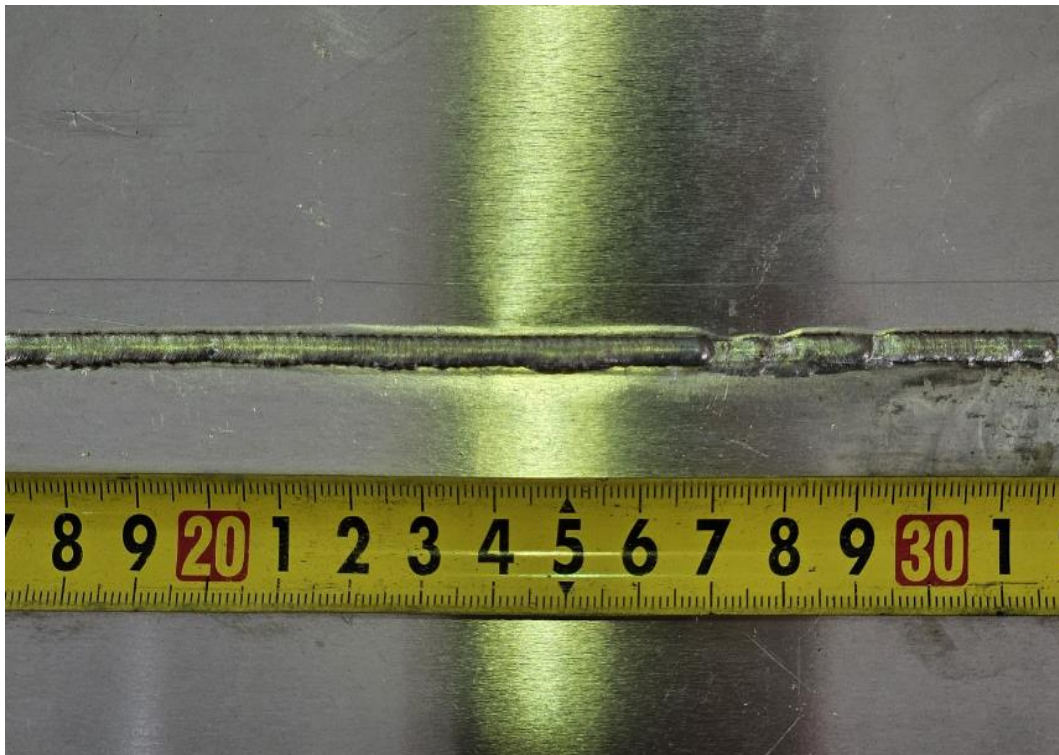


Slika 35. Uzorak 1 korijen zavara

Lice zavara drugog uzorka prikazano na Slika 36, a korijen zavara na Slika 37.



Slika 36. Uzorak 2 lice zavara



Slika 37. Uzorak 2 korijen zavara

Lice zavara trećeg uzorka prikazano na Slika 38, a korijen zavara na Slika 39.



Slika 38. Uzorak 3 lice zavara



Slika 39. Uzorak 3 korijen zavara

6.6. Priprema uzoraka

Tračnom pilom (Slika 40) su se uzorci izrezali iz sredine zavarenih ploča. Veličina uzorka bila je 30 mm duljina i 50 mm širina (Slika 41).

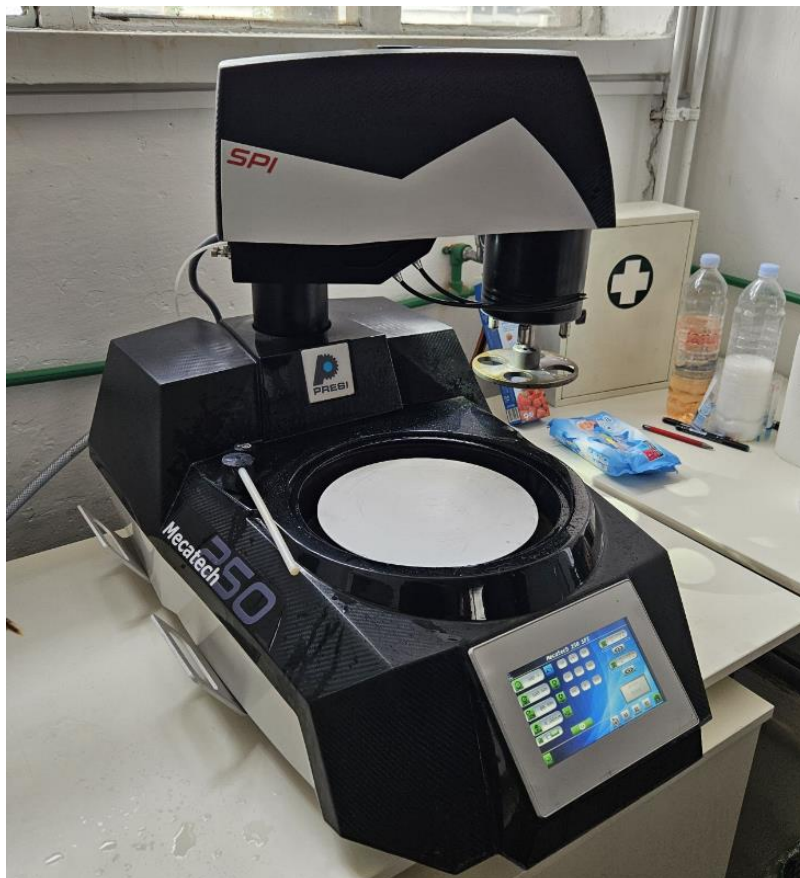


Slika 40. Rezanje uzorka tračnom pilom



Slika 41. Izrezani uzorak 1

Ispitni uzorci su zatim ručno brušeni brusnim papirima granulacijama P100, P150 i P240. Nakon toga uzorke je bilo potrebno strojno brusiti i polirati. Strojno brušenje i poliranje se odvijalo na stroju za brušenje i poliranje Mecatech 250 SPI tvrtke Presi (Slika 42).



Slika 42. Stroj za brušenje i poliranje

Prvi korak je brušenje, te je stroj podešen na sljedeće parametre:

- ručna sila pritiska
- voda kao sredstvo za podmazivanje i hlađenje
- brzina stroja 300 okretaja po minuti.

Brušenje ispitnih uzoraka provedeno je granulacijama brusnog papira:

- P80
- P320
- P600
- P1200
- P2400
- P4000

Brušenje ispitnih uzoraka sa ručnom silom pritiska prikazano je na Slika 43.



Slika 43. Strojno brušenje uzoraka

Nakon strojnog brušenja sva tri uzorka, provedeno je čišćenje ispitnih uzoraka od nečistoća i vode. Te su uzorci bili spremni za drugi korak.

Drugi korak bio je strojno poliranje, koje se odvijalo u dvije faze. Parametri prve faze poliranja:

- ručna sila pritiska
- dina tkanina za poliranje
- pasta za poliranje granulacije $3\ \mu$ – funkcija podmazivanja i hlađenja
- brzina stroja 150 okretaja po minuti.

Parametri druge faze tzv. superpoliranje:

- ručna sila pritiska
- finija tkanina za poliranje
- pasta za poliranje granulacije $0,03\ \mu$ – funkcija podmazivanja i hlađenja
- brzina stroja 150 okretaja po minuti

Rezultat uzorka 1 nakon strojnog brušenja i poliranja prikazan je na Slika 44.



Slika 44. Ispoliran uzorak 1

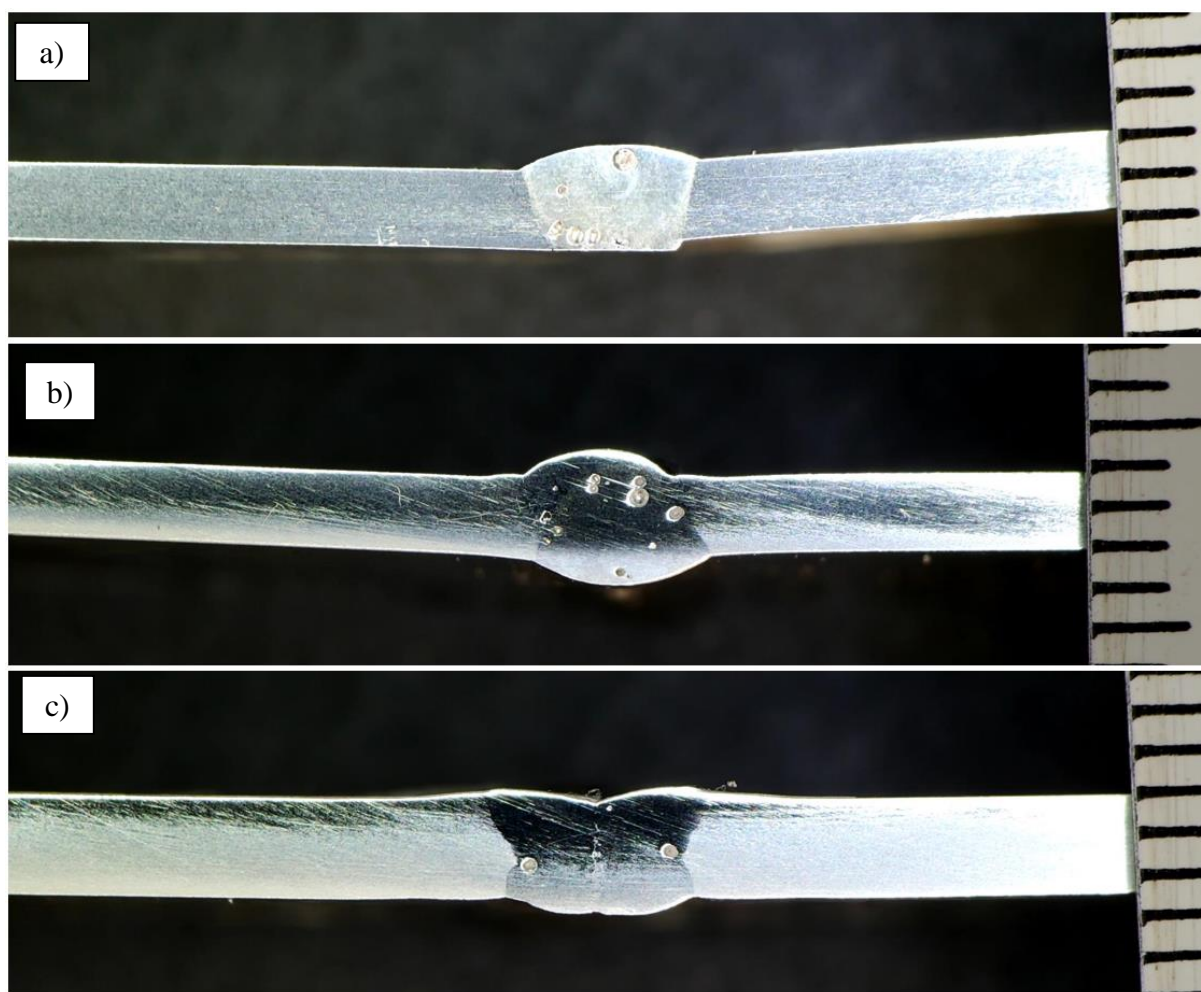
Nakon poliranja uzorci su se nagrizali u otopini klorovodične i fluorovodične kiseline (Slika 45). Polirani presjeci su se uronjeni u otopinu u prosjeku 15 sekundi svaki, te su se isprali toplom vodom kako bi se prekinula kemijska reakcija. Nakon nagrizanja ispitnih uzoraka, uzorci su spremni za ispitivanje makrostrukture.



Slika 45. Nagrizanje uzorka

6.7. Ispitivanje makrostrukture

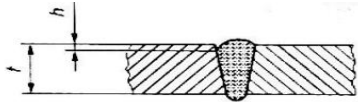
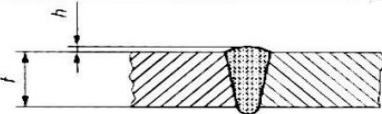
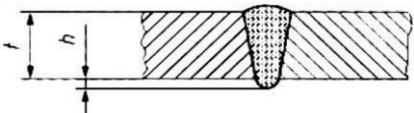
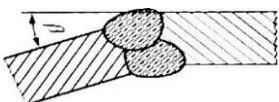
Greške koje se mogu javiti prilikom zavarivanja laserom opisane su normom HRN EN ISO 1319-2:2021. Pomoću programa ImageJ izmjerena su dimenzijska odstupanja i izmjerene greške na poprečnim presjecima zavara, odnosno na njihovim makrostrukturama. Dobiveni rezultati su uspoređeni sa navedenom normom, te se tako odredila kvaliteta zavara. Makrostruktura prvog uzorka prikazano je na Slika 46. a), drugog uzorka Slika 46. b) i trećeg uzorka Slika 46. c).



Slika 46. Makrostrukture uzoraka 1, 2 i 3

Tablica 5 prikazuje nepravilnosti koje se javljaju u ispitana tri uzorka iz norme HR EN ISO 13919 – 2:2021. [26]

Tablica 5. Preporuke norme HR EN ISO 13919 – 2:2021 [26]

Klasifikacija nepravilnosti						
Br.	Opis	Prikaz	t, mm	Razred kvalitete		
				D	C	B
1.7	Nedovoljno ispunjen zavar		$\geq 0,5$	$h \leq 0,15 t$	$h \leq 0,1 t$	$h \leq 0,05 t$
1.9	Nadvišenje lica		$\geq 0,5$	$h \leq 0,4$ mm $+ 0,4 t$	$h \leq 0,4$ mm $+ 0,3 t$	$h \leq 0,4$ mm $+ 0,2 t$
1.10	Nadvišenje korijena		$\geq 0,5$	$h \leq 0,4$ mm $+ 0,4 t$	$h \leq 0,4$ mm $+ 0,3 t$	$h \leq 0,4$ mm $+ 0,2 t$
3.2	Deformacija		$\geq 0,5$	$\beta \leq 6^\circ$	$\beta \leq 4^\circ$	$\beta \leq 2^\circ$

U makrostrukтури uzorka uspoređuju se poprečni presjeci uzoraka s nepravilnostima iz Tablica 5. Uzorak 1 ima nadvišenje lica zavara $h = 0,78$ mm, pri čemu čime se kategorizira u razred kvalitete B (maksimalna vrijednost iznosi $h = 0,9$ mm). Uočena je deformacija gdje je izmjeren kut $\beta = 5,2^\circ$, zavar se može svrstati u u razred kvalitete D ($\beta \leq 6^\circ$).

Uzorak 2 ima nepravilnosti nadvišenja lica i korijena zavara. Nadvišenje lica izmjereno $h = 0,9$ mm i kategorizira se u razred B, dok je nadvišenje korijena izmjereno $h = 0,72$ čime također pripada u razred B (maksimalna vrijednost $h = 0,9$). Uzorak 2 ima i deformaciju kojoj je izmjeren kut $\beta = 3,6^\circ$, čime se nepravilnost kategorizira u razred C ($\beta \leq 4^\circ$).

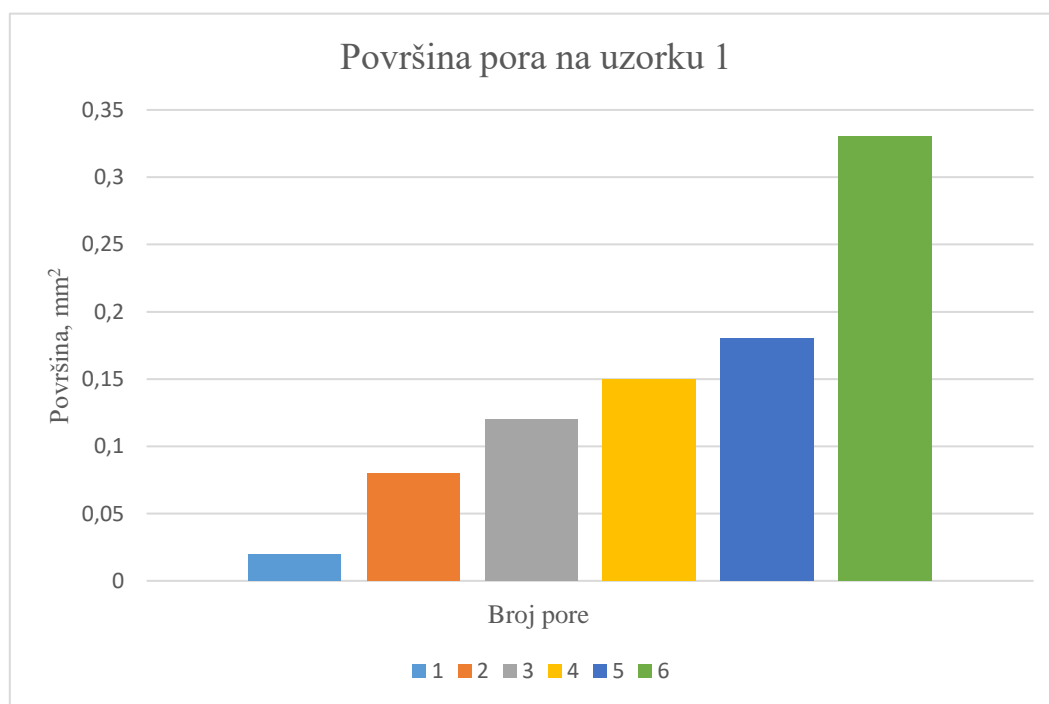
Uzorak 3 ima nadvišenje lica zavara $h = 0,20$ mm, čime se ta nepravilnost kategorizira u razred B. Izmjereno je i nadvišenje korijena zavara $h = 0,26$ mm te pripada u razred B. Uzorak 3 ima i treću nepravilnost nedovoljno ispunjenog zavara gdje je $h = 0,12$ mm i time se kategorizira u razred B (maksimalna vrijednost $h = 0,125$ mm)

Tablica 6 prikazuje usporedbu pora u poprečnom presjeku za ispitane uzorke.

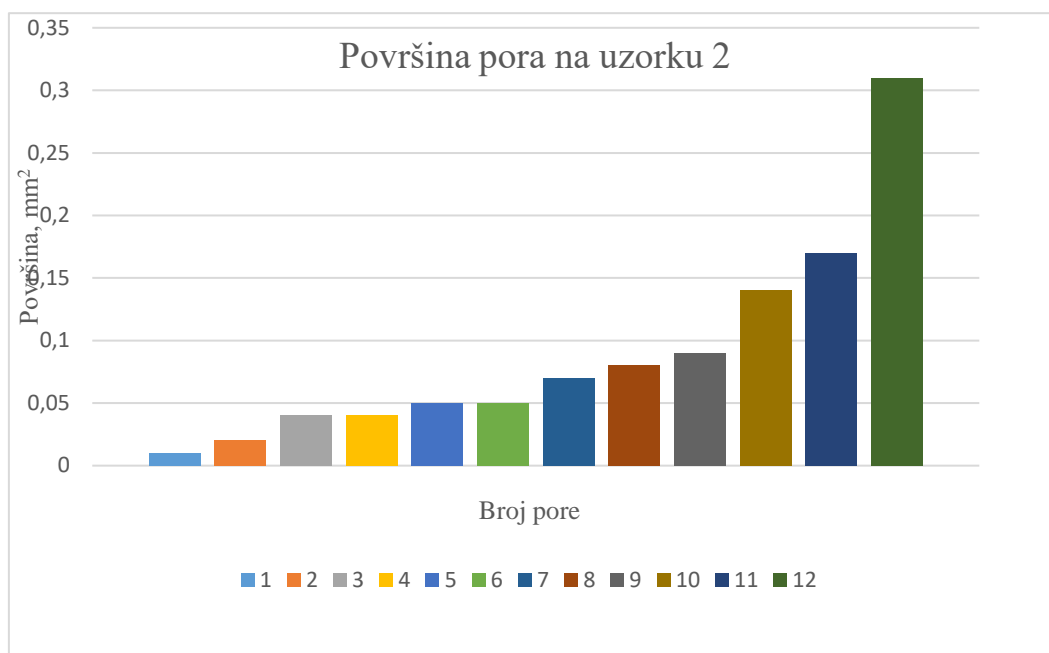
Tablica 6. Usporedba poroznosti ispitanih uzoraka

Površina pora					
	Broj pora	Ukupna površina pora, mm ²	Prosječna površina pore, mm ²	Površina poprečnog presjeka zavora, mm ²	Postotak poroznosti, %
Uzorak 1	6	0,88	0,14	14,99	5,87
Uzorak 2	12	1,07	0,09	18,9	5,66
Uzorak 3	4	0,25	0,06	13,69	1,83

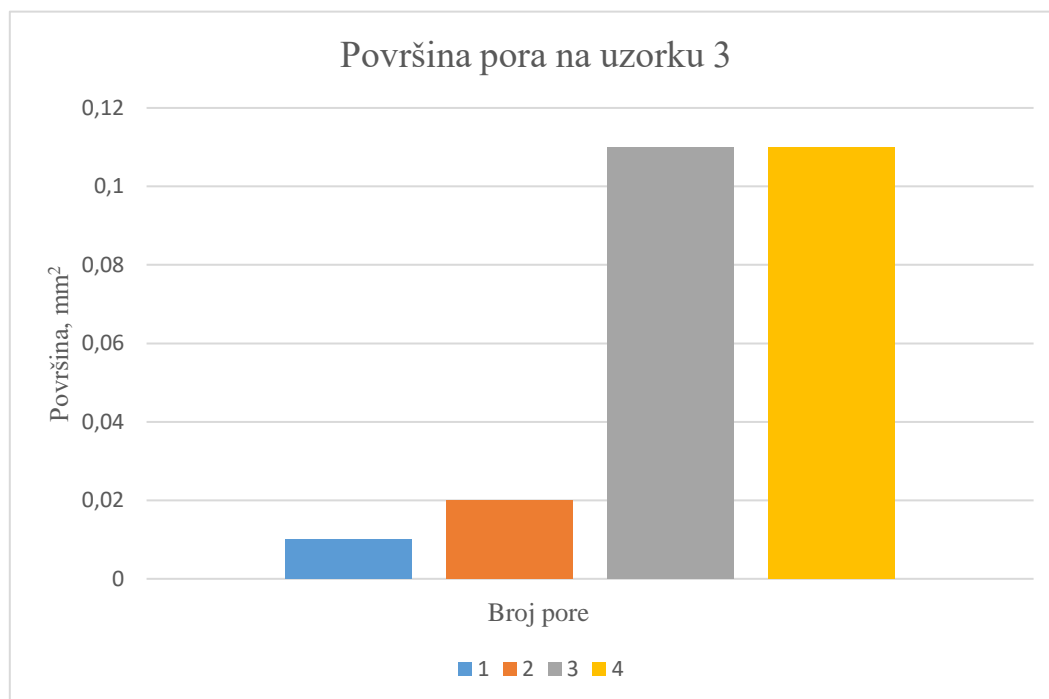
Površina najveće pore u uzorku jedan iznos 0,33 mm², u uzorku dva 0,31 mm², dok je u uzorku tri 0,11 mm². Slika 48 prikazuje usporedbu površina pora za uzorak 1, Slika 49 usporedbu površina za uzorak 2, i Slika 50 usporedbu površina za uzorak 3.



Slika 48. Površina pora uzorak 1



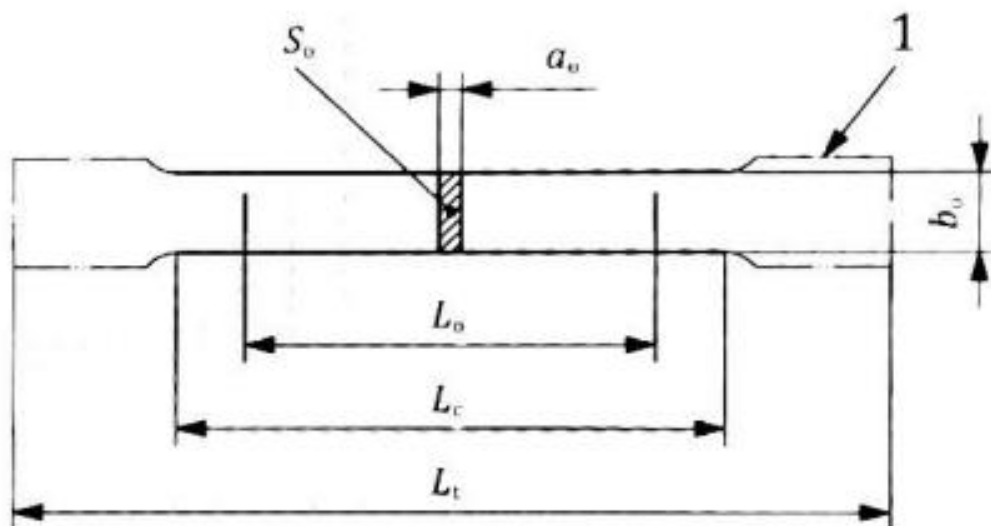
Slika 49. Površina pora uzorka 2



Slika 50. Površina pora uzorka 3

6.8. Ispitivanje čvrstoće

Uzorak 3 je odabran za ispitivanje čvrstoće te su izrezane 2 epruvete za testiranje prema normi HRN EN ISO 6892-1:2019. Dimenzije epruvete prikazane su na Slika 51.



Slika 51. Dimenzije epruvete [27]

Pri čemu je:

- a_0 – debljina epruvete, mm
- b_0 – širina tijela epruvete, mm
- S_0 – površina poprečnog presjeka, mm^2
- L_0 – početna mjerna duljina epruvete, mm
- L_c – duljina tijela epruvete, mm
- L_t – ukupna duljina epruvete, mm.

Dimenzije ispitanih epruveta prikazane su u Tablica 7.

Tablica 7. Dimenzije epruveta

a_0	b_0	S_0	L_0	L_c	L_t
2,44	25,19	61,46	50	77	290

**Slika 52. Epruvete nakon ispitivanja**

Tablica 8 prikazuje rezultate ispitivanja.

Tablica 8. Rezultati vlačnog ispitivanja

	Maksimalna sila, kN	Granica razvlačenja, kN	Vlačna čvrstoća, MPa
epruveta 1	5,368	2,00	87,33
epruveta 2	5,683	3,79	92,17

6.9. Analiza rezultata

Razlika u parametrima zavarivanja su bila snaga i vrsta zavara. Snaga zavarivanja prvog uzorka iznosila je 1000 W, drugog 900W i trećeg 1500 W. Deformacija i izobličenje odnose se na promjene oblika ili dimenzija radnog komada uzrokovane neujednačenim zagrijavanjem i hlađenjem tijekom zavarivanja. Usporedimo li dimenzije svih tri uzoraka, uočavamo kako kod uzorka 1 koji je bio jednostrano zavaren izraženije je kutno odstupanje u odnosu na uzorak 3 koji je bio obostrano zavaren. Uzorak 2 također je zavaren obostrano, no ima zanemarivo kutno odstupanje. Nadvišenje lica zavara bilo je najveće kod uzorka 2 ($h = 0,9$ mm). Nedostatak materijala (engl. undercut) primjećeno je samo na trećem uzorku. Na sva tri uzorka vidljiva je poroznost. To su sitne pore u zavaru koje nastaju zbog zarobljenih plinskih mjehurića. Prvi uzorak ima pore raspoređene tako da je jedna najveća bliže rubu lica zavara, dok su preostale bliže korijenu zavara. Kod drugog uzorka više pora je kod lica zavara i prema rubu osnovnog materijala, dok uzorak tri ima na rubovima zavara prema osnovnom materijalu. Vlačnim ispitivanjem uzorka vidljivo je kako je do loma došlo u području zone utjecaja topline. Izmjerena vlačna čvrstoća prve epruvete 87,33 MPa, a druge epruvete 92,17 MPa. Usporedbom ispitanog uzorka sa osnovnim materijalom, došlo je do redukcije čvrstoće neposredno uz zonu staljivanja što je kod zavarivanja aluminija očekivano.

Zbog visokih brzina zavarivanja ručnim laserskim zavarivanjem (često preko 2-3 metra u minuti), operater mora biti izuzetno precizan kako bi održao pravilan kut i konstantnu brzinu ruke. Greške koje se mogu dogoditi uključuju neravnomjernu penetraciju, pri kojoj promjena brzine uzrokuje varijaciju dubine zavara, što može oslabiti spoj, te pregrijavanje, posebno kod aluminija zbog njegove visoke toplinske vodljivosti, što dovodi do nepravilne distribucije topline, unutarnjih naprezanja i potencijalnih pukotina. Iako laser omogućava velike brzine zavarivanja, ljudsko oko i ruka teško mogu održati preciznost pri tolikim brzinama, što dodatno otežava rad. Vizualno, kod vrlo brzog zavarivanja aluminijskih legura mogu se primijetiti nepravilnosti na licu zavara, i lako se mogu prikriti unutarnje nepravilnosti. Upravljanje ručnim laserskim zavarivanjem zahtijeva visoku razinu vještine, gdje operater mora kontinuirano pratiti brzinu pomicanja ruke kako bi postigao kvalitetan i siguran spoj.

7. ZAKLJUČAK

Lasersko zavarivanje, a posebno primjena fiber lasera, predstavlja značajan tehnološki napredak u industrijskim procesima spajanja materijala. Fiber laseri, zbog svojih jedinstvenih svojstava poput visoke energetske učinkovitosti, preciznosti i fleksibilnosti, idealni su za primjene u zavarivanju materijala osjetljivih na toplinska oštećenja, poput aluminijskih legura. Jedna od glavnih prednosti fiber lasera u odnosu na druge vrste lasera je mogućnost prijenosa snopa putem optičkih vlakana, što omogućuje veću pokretljivost i jednostavniju integraciju u industrijske procese. Eksperimentalni dio ovog rada obuhvatio je analizu utjecaja ključnih parametara zavarivanja, poput snage lasera, brzine zavarivanja i položaja žarišta, na kvalitetu zavarenih spojeva aluminijske legure EN AW 1050. Rezultati su pokazali da je za postizanje kvalitetnih zavara ključno precizno podešavanje tih parametara. Na primjer, prevelika snaga lasera ili neadekvatan položaj žarišta mogu dovesti do pregrijavanja, poroznosti ili stvaranja pukotina, dok preniska snaga može uzrokovati plitke i zavare koji ne zadovoljavaju čvrstoću. Korištenjem argona kao zaštitnog plina spriječila se oksidacija osnovnog materijala i time se postignu zavari željene kvalitete.

Ispitivanja provedena tijekom eksperimenta potvrdila su da fiber laseri omogućuju postizanje zavarenih spojeva visoke kvalitete, uz ispunjavanje svih standarda propisanih normama HRN EN ISO 13919-2:2021 i HRN EN 1011-6:2018. Nakon ispitivanja zavarenih uzoraka moguće je zaključiti slijedeće:

Vizualne analize otkrile su greške na licu korijenu zavara, posebno kod jednostranog zavarivanja. Kao jedna od ključnih preporuka ovog rada ističe se važnost pravilne pripreme osnovnog materijala i postavki parametara zavarivanja. Uklanjanje oksidnog sloja s aluminijskih površina i pažljivo definiranje brzine zavarivanja i snage lasera mogu značajno smanjiti pojavu nedostataka poput poroznosti i pukotina.

Poroznost u zavaru nastaje zbog zarobljavanja plinskih mjehurića u samom zavaru, što je uzrokovano neadekvatnom zaštitom plinom, kontaminacijom površine, nepravilnim parametrima zavarivanja ili unutarnjim nečistoćama materijala. Sprječava se pravilnim čišćenjem, optimizacijom protoka plina i kontrolom procesa zavarivanja. Uzorak 1 imao je najveći postotak poroziteta (5,87%), uzorak 2 imao je 5,66% i uzorak 3 1,83%.

Zona utjecaja topline je relativno male širine što se može zaključiti iz mjesta loma nakon statičkog vlačnog pokusa. Dobivene vrijednosti čvrstoće sugeriraju da može doći do pada od 10% pri zavarivanju laserom što je u usporedbi s ostalim postupcima značajno bolje.

Prilagodba procesa specifičnostima materijala i zahtjevima proizvodnje omogućuje optimizaciju cijelog postupka zavarivanja. Ovaj rad pokazao je da lasersko zavarivanje, uz pravilno upravljanje parametrima, može biti izuzetno učinkovita metoda za zavarivanje aluminijskih legura. Iako postoje izazovi poput visokih početnih troškova opreme i specifičnih zahtjeva za kontrolu procesa, prednosti poput visoke produktivnosti, preciznosti i kvalitete zavara čine ovu tehnologiju nezaobilaznom u modernim industrijskim aplikacijama.

LITERATURA

- [1] Bertolotti, M.: The History of the Laser, CRC Press, Boca Raton, 2004.
- [2] Hey, T., Walters, P.: The New Quantum Universe, Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- [3] Wintergalter, D., Broz, D.: Laser u medicini i biologiji, Školska knjiga, Zagreb, 1972.
- [4] Thyagarajan, K.: Lasers : Fundamentals and Applications, Springer, Boston, 2011.
- [5] Comparison of light, www.researchgate.net/figure/Comparison-of-ordinary-light-and-laser-regarding-mono-or-polychromocity_fig6_258140573, 04.10.2024.
- [6] Monochromatic light, www.technotif.com/monochromatic-light, 28.10.2024.
- [7] Orazio, S.: Principles of Lasers, Springer, Milano, 2013.
- [8] Olsen, F. O.: Hybrid Laser-Arc Welding, Woodhead Publishing, Cambridge, 2009.
- [9] Steen, W. M., Mazumder, J.: Laser Material Processing, Springer, London, 2010.
- [10] Katayama, S.: Handbook of Laser Welding Technologies, Woodhead Publishing, Cambridge, 2013.
- [11] Pires, J. N., Loureiro, A., Bölmsjö, G.: Welding Robots, Springer, Portugal, 2006.
- [12] Kralj, S., Radošević, B., Kožuh, Z., Garašić, I.: Priručnik iz kolegija „Strojevi i oprema za zavarivanje“, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [13] Lawrence, J. R.: Advances in Laser Materials Processing, Woodhead Publishing, Cambridge, 2017.
- [14] Fiber laser, www.researchgate.net/figure/Diagrams-of-fiber-laser-welding-system-and-experimental-arrangement-a-IPG-fiber-laser_fig10_235996056, 28.10.2024
- [15] Laser welding wire, www.accteklaser.com/does-laser-welding-require-the-use-of-welding-wire, 28.10.2024.
- [16] Laser handheld system, www.centralwelding.com/blogs/new-optx-2kw-miller-handheld-laser-system, 28.10.2024.
- [17] Caprio, L., Borzoni, G., Previtali, B., Demir, A. G.: Hand-Held Laser Welding of AISI301LN, Politecnico Milano, Milano, 2023.
- [18] Fiber laser welding, www.baisonlaser.com/blog/fiber-laser-welding, 30.10.2024.
- [19] Laser welding in automobile industry, www.stylecnc.com/industry-news/industrial-fiber-laser-welding-robots-automobile-manufacturing.html, 30.10.2024
- [20] Aluminium 1050, www.nfm.co.za/product/commercial-purity-aluminium-1050, 30.10.2024.
- [21] Aluminium datasheet, www.smithmetal.com/1050a.htm, 30.10.2024.

[22] Aluminium comparison, www.askanydifference.com/hr/difference-between-steel-and-aluminum, 30.10.2024.

[23] HR EN 1011 – 6:2018, Preporuka za zavarivanje metalnih materijala – 6. dio:
Zavarivanje laserom

[24] Fanuci welding, www.fanuci.com, 01.11.2024

[25] Dodatni materijal za zavarivanje, www.ezg.hr/en/products/wires/ez-mig-al997,
31.10.2024.

[26] HR EN ISO 13919 – 2:2021, Zavareni spojevi izvedeni elektronskim snopom i laserom

[27] HRN EN ISO 6892-1:2019, Vlačno ispitivanje – 1.dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj
temperaturi