

# Primjena Taguchi temeljene sive relacijske analize za optimiziranje laserskog zavarivanja

---

**Marjanović, Vinko**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:123603>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

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



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**PRIMJENA TAGUCHI TEMELJENE SIVE RELACIJSKE  
ANALIZE ZA OPTIMIZIRANJE LASERSKOG ZAVARIVANJA**

Rijeka, svibanj 2023.

Vinko Marjanović

0069078622

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

PRIMJENA TAGUCHI TEMELJENE SIVE RELACIJSKE  
ANALIZE ZA OPTIMIZIRANJE LASERSKOG ZAVARIVANJA

Mentor: prof. dr. sc. Goran Cukor

Rijeka, svibanj 2023.

Vinko Marjanović  
0069078622

## **IZJAVA**

U skladu s *Pravilnikom o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija* Tehničkog fakulteta u Rijeci, izjavljujem da ja, Vinko Marjanović, student Tehničkog fakulteta u Rijeci, kao autor diplomskog rada naslova "Primjena Taguchi temeljene sive relacijske analize za optimiziranje laserskog zavarivanja" sam samostalno izradio rad pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Gorana Cukora u razdoblju od 10. siječnja do 3. svibnja 2023.

## ZAHVALA

Ovim putem želim se zahvaliti prof. dr. sc. Goranu Cukoru na nesebičnoj podršci, velikoj pomoći pri izradi i prije svega na ukazanom povjerenju čime je ispunio očekivanja uloge mentora. Njegovo znanje i iskustvo itekako su pomogli u izradi diplomskog rada, te da nije bilo istih izrada bi bila daleko teža.

Zahvaljujem se prije svega obitelji, prijateljima i poznicama na razumijevanju, motivaciji i podršci tijekom cijelog studija.

Rijeka, svibanj 2023.

---

Vinko Marjanović

0069078622

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 15. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za industrijsko inženjerstvo i menadžment**  
Predmet: **Napredni proizvodni postupci**  
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD


Pristupnik: **Vinko Marjanović (0069078622)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**  
Modul: **Tehnološko informatičko inženjerstvo**

Zadatak: **Primjena Taguchi temeljene sive relacijske analize za optimiziranje laserskog zavarivanja / Application of Taguchi based gray relational analysis to optimize laser welding**

**Opis zadatka:**

Objasniti princip rada lasera, opisati dijelove lasera i vrste industrijskih lasera, opisati postupak laserskog zavarivanja, njegove prednosti i nedostatke u usporedbi s ostalim postupcima zavarivanja. Optimizirati parametre laserskog zavarivanja čelika P92 korištenjem Taguchi temeljene sive relacijske analize.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Goran Cukor

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



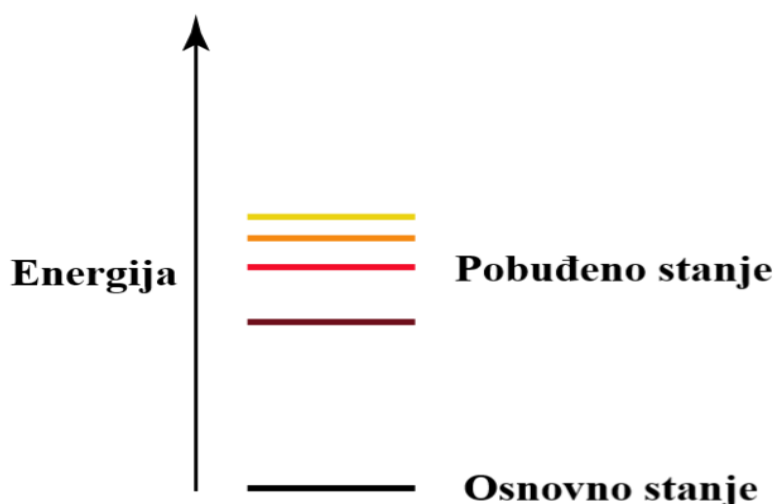
Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Vrste lasera.....	4
2.1. Laseri s čvrstom jezgrom.....	5
2.1.1. Rubinski laseri .....	6
2.1.2. Nd:Yag i Nd:staklo laseri.....	8
2.1.3. Nd:YLF laser .....	10
2.2. Atomske plinske laseri .....	11
2.2.1. Helij-neon laser.....	12
2.2.2. Argonski ionski laser .....	14
2.2.3. Kriptonski ionski laser .....	16
2.3. Molekularni plinski laseri .....	18
2.3.1. CO <sub>2</sub> laser .....	18
2.3.3. Dušikov laser .....	19
3. Optimizacija laserskog zavarivanja Taguchi sivom relacijskom analizom .....	22
3.1. Lasersko zavarivanje.....	22
3.1.1. Uloga zaštitnog plina pri laserskom zavarivanju .....	24
3.2. Uvod u optimizaciju laserskog zavarivanja .....	25
3.3. Eksperimentalni dio .....	28
3.3.1. Eksperimenti laserskog zavarivanja.....	28
3.3.2. Optimizacija parametara laserskog zavarivanja.....	29
3.3.3. Rezultati optimizacije .....	32
3.4. Analiza varijanci ANOVA metodom.....	38
3.5. Toplinska obrada zavarenog spoja laserom .....	39
3.6. Ispitivanje zavarenih spojeva laserom .....	40
4. Opasnosti korištenja lasera .....	43
5. Zaključak.....	46
6. Literatura.....	47
POPIS SLIKA.....	48
POPIS TABLICA .....	49
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI .....	50
SUMMARY AND KEY WORDS.....	51

## 1. Uvod

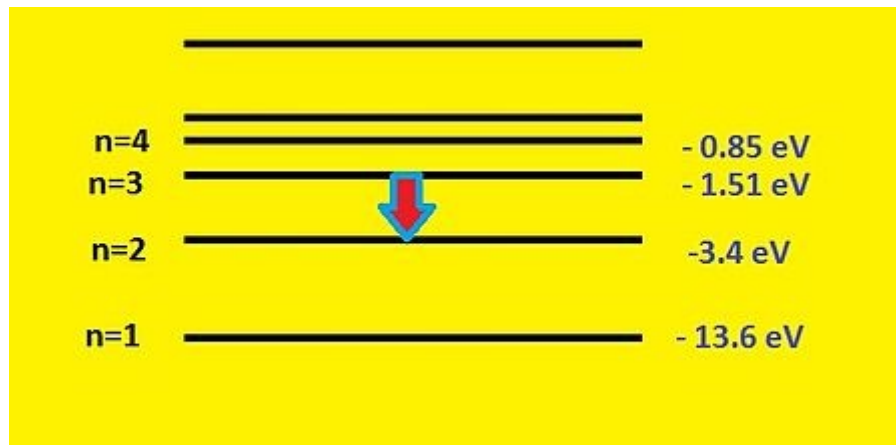
Laser (akronim od engl. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*: pojačanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja) je uređaj za stvaranje i pojačavanje koherentnog elektromagnetskog, najčešće monokromatskog, usko usmjerenog zračenja. Osniva se na kvantnim pojavama pri prijenosu energije zračenjem. Izmjena energije zračenja s atomima ili molekulama aktivnoga medija u laseru (plin, kristal, plazma), umjesto apsorpcijom i spontanom emisijom zračenja, odvija se stimuliranom emisijom. To se zbiva kada se na atom ili molekulu u pobuđenom stanju, to jest u stanju u kojem su elektroni na višoj energetskej razini, djeluje dodatnim izvorom energije (na primjer bijelom svjetlošću ili elektromagnetskim poljem). Time broj atoma u pobuđenom stanju  $N_2$  postaje veći od broja atoma u nepobuđenom stanju  $N_1$ , što se naziva inverzija napućenosti ili inverzija populacije. Svako elektronsko stanje definirano je jedinstvenim rasporedom elektrona. Elektronsko stanje koje ima najnižu energiju, naziva se osnovno stanje. Ostala stanja, pobuđena stanja, obično jako kratko traju. Ta stanja, emitiranjem fotona ili vibracijskom relaksacijom, prelaze u osnovno stanje. Kada je elektron u osnovnom stanju, kaže se da je i atom u osnovnom stanju. Za prijelaz u pobuđeno stanje fizikalno je nevažno kojim je putem i načinom dovedena energija, dok kod prijelaza iz pobuđenog u nepobuđeno stanje nastaje kvantni skok, to jest emisija fotona kojima energija odgovara razlici energetskih razina.



Slika 1.1. Energijske razine elektrona [1]



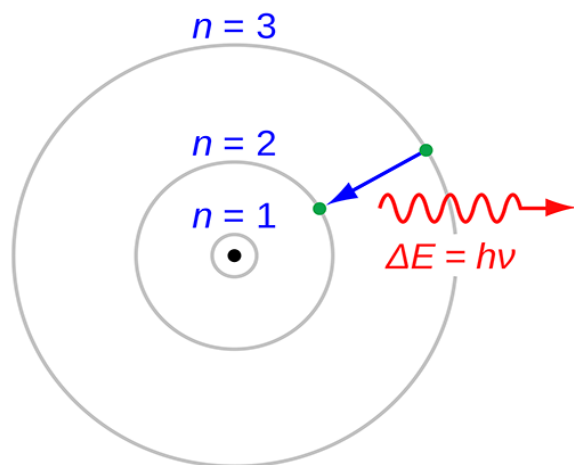
Uvjet je za stimuliranu emisiju, odnosno za rad lasera, je veći broj atoma u pobuđenom stanju od broja atoma u nepobuđenom stanju,  $N_2 > N_1$ . Time se dobiva monokromatsko elektromagnetsko zračenje uskoga paralelnog snopa praktički identičnih fotona i velike gustoće energije po širini spektralne linije.



Slika 1.2. Dijagram energijskih razina elektrona u vodikovom atomu [2]

To znači da za razliku od svjetlosti koju emitiraju uobičajeni izvori, kao što su žarulje, laserska je svjetlost redovito gotovo monokromatična, to jest samo jedne valne duljine (boje) i usmjerena je u uskom snopu. Snop je koherentan, što znači da su elektromagnetski valovi međusobno u istoj fazi i šire se u istom smjeru.

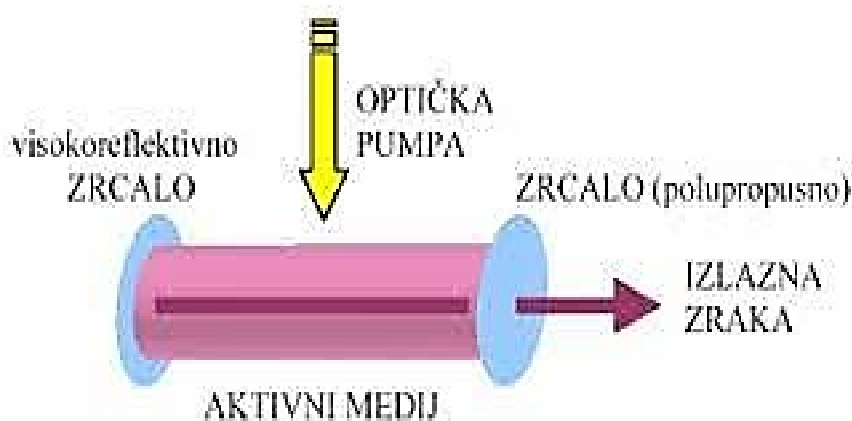
Prvi čovjek koji uspio dobiti laserski snop svjetlosti u svojim istraživanjima jest Nikola Tesla 1893. konstruirajući uređaj koji se sastojao od rubina na koji je usmjeravao električnu energiju, a ona se reflektirala od električne plohe natrag u rubin. Time je dobio laserski snop svjetlosti tanak poput olovke. Stimuliranu energiju zračenja u svojim radovima je previdio i Albert Einstein 1917. Naime, bilo je potrebno 40-ak godina da se teorija sprovede u praksu, odnosno da Theodore Harold Maiman 1960. konstruira prvi laser kojemu je aktivna tvar bio rubin stimuliran pomoću bijele svjetlosti. Zatim su slijedile i druge varijante poput plinskog, poluvodičkog, kemijskog lasera itd.



*Slika 1.3. Smanjenje energijske razine rezultira zračenjem[3]*

## 2. Vrste lasera

Kako bi se bolje razumio način rada lasera, primjena u svakodnevnom životu te prednosti i nedostaci navodi se kratka podjela najosnovnijih lasera. Laser je uređaj koji se sastoji od aktivnog medija, energije za pobuđivanje medija (optičko pumpanje), 100 % reflektirajućeg zrcala, 99 % reflektirajućeg zrcala i laserske zrake.



Slika 2.1. Osnovni dijelovi lasera [4]

Jednostavnost lasera može se razumjeti razmatranjem svjetla svijeće. Obično goruća svijeća zrači svjetlo u svim smjerovima, pa stoga zrake gađaju različite predmete jednako ako su jednako udaljeni od svijeće. Laser uzima svjetlost koja bi inače bila emitirana u svim smjerovima, poput svijeće i koncentrira tu svjetlost u jednom smjeru. Dakle, ako bi svjetlost koja zrači u svim smjerovima iz svijeće bila koncentrirana u jedan snop (zraku) promjera zjenice oka (otprilike 3 mm) i ako bi stajali na udaljenosti od 1 m od svijeće, tada bi intenzitet svjetlosti bio 1000000 puta svjetliji od svjetlosti koja se inače vidi kako zrači iz svijeće! To je u biti temeljni koncept rada lasera. Međutim, svijeća nije takva vrsta medija koji proizvodi pojačanje pa su potrebni posebni uvjeti unutar laserskog medija za pojavu amplifikacije (pojačanja), odnosno sposobnost uzimanja svjetlosti koja bi normalno zračila iz izvora u svim smjerovima i koncentriranje te svjetlosti u zraku koja putuje u jednom smjeru. Ovi posebni uvjeti, i mediji unutar kojih se proizvode, bit će detaljnije opisani u ovom radu.

Glavna podjela, odnosno naglasak podjele jest zapravo na aktivnom mediju gore spomenutom. Aktivni medij može biti u čvrstom ili plinovitom stanju. Glavna podjela lasera je na:

- kemijski laser,
- plinski laser,
- poluvodički laseri,
- laseri s čvrstom jezgrom,
- laseri s parama metala,
- ostale vrste lasera.

## **2.1. Laseri s čvrstom jezgrom**

Određene vrste čvrstog materijala imaju izvrsna svojstva medija za lasersko pojačanje. Općenito se sastoje od kristalnih ili staklenih materijala u koje se ugrađuju specifični atomi ioni koji djeluju kao vrsta lasera. Domaćinski materijali moraju biti prirodno prozirni na valnoj duljini lasera kako bi se spriječila apsorpcija laserskog svjetla razvijenog unutar radnog medija. Također moraju imati odgovarajuća mehanička, električna, toplinska i optička svojstva koja će omogućiti laseru djelovanje pod nizom uvjeta okoline. Laserski mediji nazivaju se dopantni ioni jer su "dopirani" ili urasli u materijal domaćina, obično u obliku dvostruko ili trostruko ioniziranih atoma dok se integriraju i isprepliću unutar domaćina tijekom procesa urasta. Ioni su odabrani zbog svojih specifičnih svojstava zračenja kada su dopirani u materijal domaćina. Loše optičke kvalitete glavnog uređaja mogu dovesti do izobličenja i raspršenja zraka laserskog svjetla. Loša mehanička i toplinska svojstva mogu dovesti do deformacije ili lomljenja materijala prilikom apsorpcije velike količine energije tijekom procesa pumpanja. Također, mora biti moguće razumno uzgojiti materijal domaćina veličine s ionima dopanta ugrađenim u materijal. Kao što je upravo spomenuto, materijali domaćini spadaju u dvije kategorije: kristalne krutine i stakla. Kristalne čvrste tvari sastoje se od regularnih nizova materijala raspoređenih u jedinične ćelije koje su točno pravilno raspoređene u odnosu na svoje susjede. Na primjer, u laserskom kristalu titanovog safira ( $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ ) materijal domaćin sastojao bi se od jedinične ćelije koja se sastoji od dva atoma aluminijska i tri atoma kisika. Dopantni ioni bi tada zamijenili jednu od ovih jediničnih ćelija u intervalima od svakih 5-10 jediničnih ćelija u obliku  $\text{Ti}_2\text{O}_3$ . Kristalni domaćini općenito

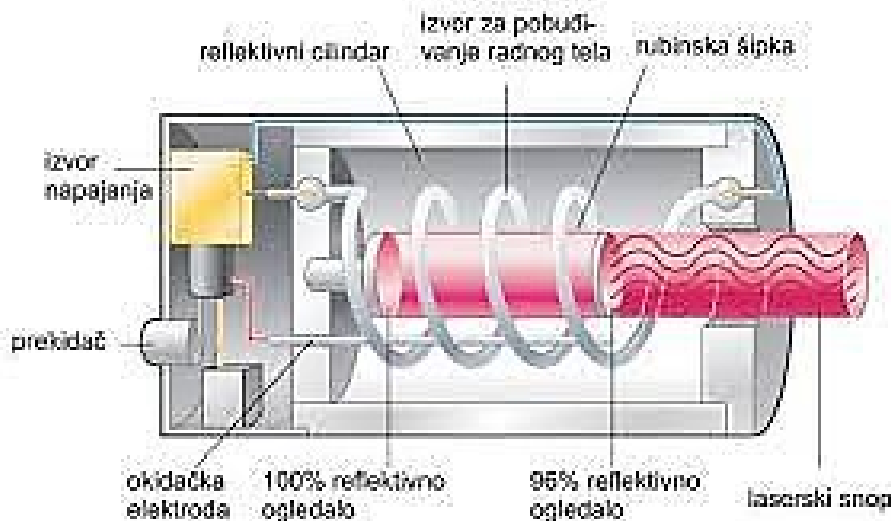
imaju visoku toplinsku vodljivost, ali su ograničeni kada je u pitanju veličina, obično su reda veličine 0,1 m duljine i 10 mm u promjeru. Stakleni matični materijali sadrže male nepravilne strukturne jedinice koje su nasumično orijentirane i stoga općenito proizvode djelomično nehomogeno širenje laserske zrake. Stakla imaju dobre optičke kvalitete, ali loša toplinska svojstva i stoga ne dopuštaju brzo odvođenje topline. Oni ne mogu biti proizvedeni u velikim veličinama.

Dodatna tvar mora imati povoljna radijativna svojstva koja uključuju dugo podizanje gornjeg laserskog nivoa kao i povoljan pojas apsorpcije tako da se svjetlo pumpe može učinkovito apsorbirati u medij. Životni vijek gornje laserske razine u rasponu od nekoliko mikro sekundi do nekoliko mili sekundi je poželjan kako bi se akumulirala velika populacija tijekom procesa pumpanja.

Laseri s čvrstom jezgrom koriste optičko pumpanje za stvaranje inverzije populacije u gornjoj razini lasera koje može biti ili bljeskalicom ili laserskom zrakom. Pumpanje svjetiljkom može biti učinkovito ako se apsorpcijske vrpce dopantnih iona pojavljuju u širokom rasponu valnih duljina kako bi se omogućilo veće iskorištenje širokopojasnog zračenja iz bljeskalice. Lasersko pumpanje kao što je s argon ionskim laserom je učinkovito u slučaju pružanja visokog intenziteta pumpanja potrebnog za proizvodnju zaključanog načina rada ultrakratkog optičkog pulsa u šupljini više zrcalnog rezonatora. U novije vrijeme poluvodički diodni laseri zamjenjuju svjetiljke gdje god je to moguće budući da su vrlo učinkoviti i dugotrajni izvori pumpanja. Međutim, njihove valne duljine pumpanja moraju se moći uskladiti s apsorpcijom trake dopanta kako bi bili učinkoviti.

### 2.1.1. Rubinski laseri

Rubinski laser bio je prvi laser. Radi u impulsnom načinu rada na 694,3 nm sa širinom linije emisije od 0,53 nm. Rubinska laserska šipka sastoji se od safirnog kristala ( $Al_2O_3$ ) s ionima kroma (Cr) dopiranim u tipičnoj koncentraciji od 0,05 % prema težini. Pri ovoj koncentraciji ima otprilike  $10^{25}$  Cr iona po kubnom metru. Rubinski laser obično se pumpa svjetiljkom s trajanjem impulsa od djelića milisekunde do nekoliko milisekundi. Laser također može biti upravljani Q-sklopkom. Apsorpcijske trake pumpanja pojavljuju se na 400 nm i 550 nm s približnom širinom pojasa od 50 nm na privremenoj valnoj duljini i dobro se slažu sa spektrom zračenja ksenonskih bljeskalica.



Slika 2.2. Dijelovi rubinskog lasera [5]

Kad bi bilo moguće pumpati ovaj čvrsti medij bez šupljina na optičkom rezonatoru, a zatim iznenada vratiti šupljinu na mjesto izlaza laserske zrake, bilo bi moguće upravljati laserom s najvećim mogućim pojačanjem i tako postići veći izlaz energije. Naravno, to bi bilo samo privremeno: izlaz lasera bi bio u obliku divovskog impulsa, budući da je pojačanje daleko iznad uvjeta stabilnog. Zapravo, takav se proces može provesti. Tehnika je poznata pod nazivom "Q-switching" što u prijevodu znači promjena energije lasera, iz razloga jer se sa "Q" označava pohranjena energija u rezonatoru.

Tablica 2.1. Karakteristike rubinskog lasera

Rubinski laser	
Valna duljina	694,3 nm
Životni vijek gornje laserske razine	3 ms
Gustoća dopinga	0,05 % po težini
Toplinska vodljivost laserskog štapića	42 W/mK pri 300 K
Toplinski koeficijent širenja	$5.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Metoda pumpanja	bljeskalica
Izlazna snaga lasera	do 100 J po impulsu
Mod	jednostruki ili višestruki

Jedna od najvažnijih primjena rubinskog lasera je holografija. Zbog svoje vrlo visoke energije impulsa i razumne duljine koherencije, visoko snažna verzija rubinskog lasera može se koristiti za snimanje holograma velikog volumena u jednom laserskom impulsu. Snimanje

takvih holograma puno je teže s drugim, slabijim laserima jer se mora koristiti više impulsa. Rubinski laseri koriste se u osiguravanju takvih svojstava plazme kao što su elektronska gustoća i temperatura. Također se koriste prilikom otklanjanja tetovaža ili njege kože s viškom melanina.

### 2.1.2. Nd:Yag i Nd:staklo laseri

Nd ion kada se dopira u čvrsti kristal domaćina proizvodi najjaču emisiju zračenja na valnoj duljini nešto većoj od 1  $\mu\text{m}$ . Dva materijala najčešće korištena kao domaćini za ovaj laserski ion su itrij aluminij granat (YAG) i staklo. Kada se dopira YAG ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ), Nd:YAG kristal proizvodi laserski izlaz prvenstveno na 1,064  $\mu\text{m}$ ; kada se dopira staklo, Nd:staklo proizvodi laserski izlaz na valnim duljinama od 1,054 do 1,062  $\mu\text{m}$  ovisno o vrsti stakla koja se koristi.

Nd laser radi na principu 4-stupanjskog sustava i posljedično ima puno manji gubitak energije pumpanja nego rubinski laser. Gornja razina lasera ima relativno dug životni vijek (oko 230  $\mu\text{s}$  za YAG i oko 320  $\mu\text{s}$  za staklo), tako da populacija može biti akumulirana u relativno dugom periodu tijekom procesa pumpanja. Ovi laseri mogu biti pumpani sa svjetiljkom ili drugim laserom. U novije vrijeme se koristi i metoda s diodom koja je dovela do razvoja mnogo složenijih lasera.

Nd:YAG kristal ima dobra optička svojstva i visoku toplinsku provodljivost, što mu omogućuje da proizvodi laserske zrake s ponavljanjem do 100 Hz.



*Slika 2.3. Kristalni štapići Nd:Yag [6]*

Dužina kristalnog štapića ograničena je na 100 mm i dijametra 12 mm, što posljedično limitira i snagu lasera. Koncentracije dopinga za Nd:Yag kristale obično su 0,725 % po težini, što je približno  $1,4 \times 10^{26}$  atoma po kubnom metru.

Kod lasera Nd čija je jezgra staklo, proizvedeni su veliki komadi jezgre lasera. Štapovi do dužine 2 m i 0,075 m promjera i diskovi do 0,9 m u promjeru debljine 0,05 m su uspješno korišteni. Jezgre u obliku diskova od stakla korištene su prilikom dobivanja impulsa od nekoliko kJ. Nedostatak ovih lasera jest slaba toplinska provodljivost što za posljedicu ima nižu frekvenciju slanja impulsa.

Određeni proizvođači su razvili laser pumpan diodom. "GaAs" diodski laser ima idealnu amplitudu za  $\text{Nd}^{3+}$  ion u području od 0,8  $\mu\text{m}$ . Mnoge vrste ovih lasera su u zelenom području vidljivog spektra boja.

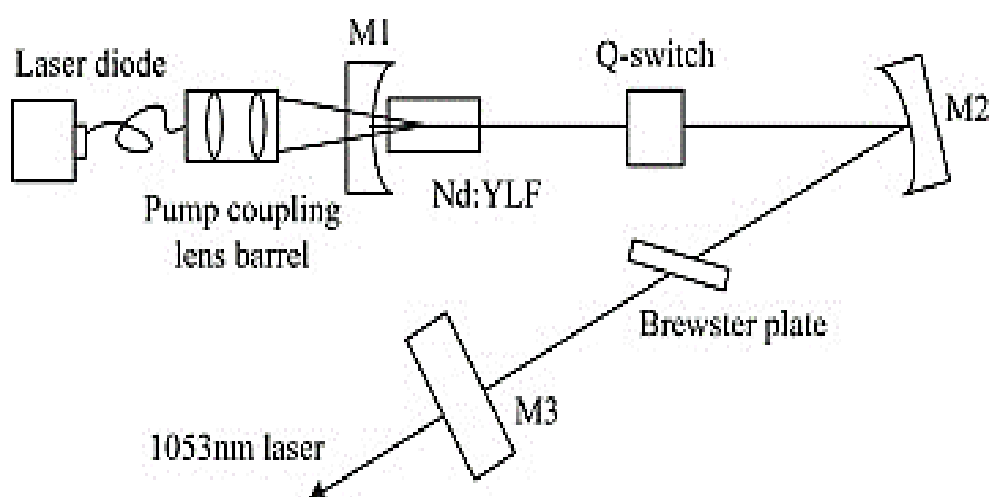


Tablica 2.2. Usporedba karakteristika Nd:YAG i Nd:staklo lasera

	Nd:Yag	Nd:staklo
Valna duljina	1,064 $\mu\text{m}$	1,054-1,064 $\mu\text{m}$
Životni vijek gornje laserske razine	230 ms	290-340 ms
Gustoća dopinga	$1.4 \cdot 10^{26}/\text{m}^3$	$4.6 \cdot 10^{26}/\text{m}^3$
Toplinska vodljivost laserskog štapića		1 W/mK
Toplinski koeficijent širenja	$7,7-8,2 \cdot 10^{-6}/\text{K}$	$8,5-14 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
Metoda pumpanja	bljeskalica ili laser	bljeskalica ili laser
Izlazna snaga lasera	1 J po impulsu	do 10 kJ po impulsu
Mod	jednostruki ili višestruki	jednostruki ili višestruki

### 2.1.3. Nd:YLF laser

Neodijum dopirani litij iritij fluorid ( $\text{Nd:LiYF}_4$ ) koji se češće piše samo kao Nd:YLF, ima prednosti u odnosu na Nd:YAG prilikom diodnog pumpanja iz razloga što mu viša laserska razina ima približno duplo duži životni ciklus. Pošto su diodni laseri ograničeni sa snagom, duže vrijeme pumpanja omogućuje duplo veću pohranu energije u odnosu na Nd:YAG pri jednom impulsu. Nd:YLF laser je dostupan u komercijalnoj upotrebi s valnom duljinom od 1,047  $\mu\text{m}$  ili 1,053  $\mu\text{m}$ ; ili s podvostručenom frekvencijom (533 nm); ili trostrukom frekvencijom (351 nm).



Slika 2.4. Shema Nd:YLF lasera

Ova vrsta lasera jako je slična po karakteristikama Nd:YAG laseru, ali verzija s dvostruko povećanom frekvencijom je veoma privlačna kao izvor optičkog pumpanja za titanij-safirske lasere.

*Tablica 2.3. Karakteristike Nd:YLF lasera*

Nd:YLF	
Valna duljina	1,047 i 1,053 $\mu\text{m}$
Životni vijek gornje laserske razine	480 ms
Gustoća dopinga	1 % Nd
Toplinska vodljivost laserskog štapića	6 W/mK
Toplinski koeficijent širenja	$8 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
Metoda pumpanja	bljeskalica ili laserska dioda
Izlazna snaga lasera	50 W ili 80 W
Mod	višestruki

## 2.2. Atomski plinski laseri

Atomski plinski laseri, uključujući lasere niskog stupnja ionizacije, bili su među prvim otkrivenim laserima. Karakteristično imaju uske diskretne laserske valne duljine u širokom rasponu valnih duljina od 200 nm do 5  $\mu\text{m}$ . Iako dostupne valne duljine ne pokrivaju cijeli spektar, ova vrsta lasera ima više odvojenih vidljivih laserskih prijelaza od bilo koje druge vrste. Poluvodički laseri brzo postaju dostupniji u vidljivom spektralnom području i stoga se koriste u mnogim područjima u kojima je prije dominirao atomski plinski laser. Mnoge vrste atomskih plinskih lasera normalno postoje kao plinovi na sobnoj temperaturi, no također mnogi drugi moraju biti ionizirani za proizvodnju lasera u ioniziranim energetske razinama atoma. Također, postoje mnogi atomski i ionski plinski laseri u kojima sadržaji moraju biti ispareni da bi se proizvelo plinovito stanje unutar kojeg električna struja proizvodi do laserske pojave. Dva najčešća primjera za to su He-Cd laser, u kojem se Cd mora zagrijati na temperaturu od približno 300 °C da adekvatno ispari kadmij i laser na bakrenoj pari (CVL) u kojem se bakar mora zagrijati na temperaturu od približno 1500 °C. Postoji mnogo vidljivih atomskih plinskih lasera; međutim, budući da njihova propusnost dominirana Dopplerovim širenjem, frekvencije lasera za određeni laserski prijelaz može pokriti raspon od samo oko  $3 \times 10^9$  Hz (Dopplerova širina). Dakle, za vidljive laserske valne duljine u kojoj je frekvencija reda veličine  $5 \times 10^{14}$  Hz propusnost pojačanja pokriva manje od  $10^{-5}$  frekvencijskog spektra. Postoji 1500-2000 prijavljenih laserskih prijelaza, dakle 99 % frekvencijskog polja između

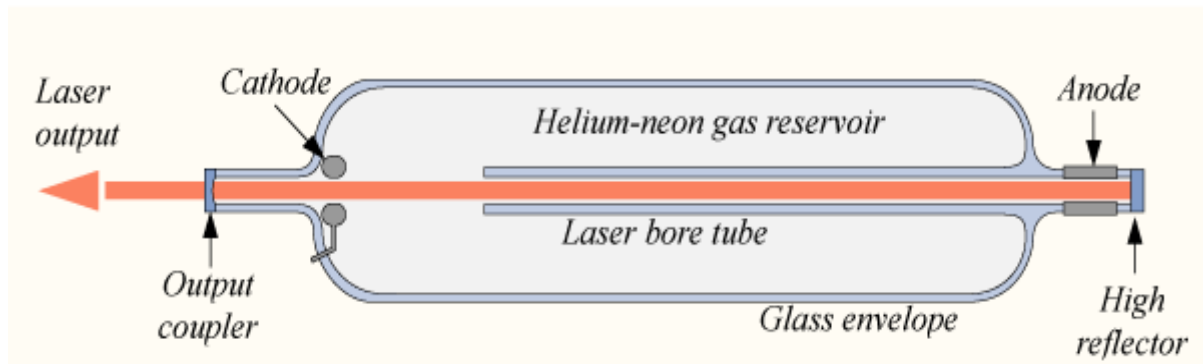
200 nm i 5  $\mu\text{m}$  ne bi bilo pokriveno niti jednim poznatim atomskim plinskim laserima. Međutim, uske frekvencijske širine pojasa ovih lasera imaju prednost u korištenju.

Atomski plinski laseri proizvode se primjenom napona između dvije elektrode na suprotnim krajevima laserskog medija za pojačanje koji je instaliran unutar dugog cilindra koji sadrži atomske vrste u obliku niskotlačnog plina reda od 0,1 do 1 kPa. Obično je razlog što je optimalni tlak plina toliko nizak to što je temperatura elektrona inverzno proporcionalna tlaku plina i izravno proporcionalna primijenjenom naponu između elektroda. Stoga su visoke temperature elektrona potrebne za pobuđivanje visoke razine energije plinskih lasera. Kada se napon primjeni na elektrode medija za lasersko pojačanje, dolazi do električnog pražnjenja koje se provodi kroz plin, što uzrokuje strujanje električne energije unutar cijevi za pražnjenje, baš kao što se vidi na neonskom natpisu (reklami). Ova struja se uspostavlja ionizacijom nekih atoma da bi se proizveli slobodni elektroni unutar cijevi za pražnjenje koji putuju od katode (negativna elektrode) do anode (pozitivna elektroda). Dok elektroni putuju kroz cijev, sudaraju se s atomima i ponekad pobude te atome na više energetske razine, od kojih zrače natrag na niže energetske razine. Ako postoje odgovarajući omjeri životnog vijeka između gornjeg i donjeg laserskog nivoa, tada dolazi do inverzije populacije i stoga će doći do pojačanja na prijelazu zračenja između te dvije razine.

### 2.2.1. Helij-neon laser

Helij-neon laser bio je jedan od prvih lasera ikada razvijenih i još uvijek je jedan od najraširenijih korištenih lasera. Laseri nemaju ozbiljnijih problema i imaju iznimno dug djelotvorni životni vijek. Rade u niskotlačnoj mješavini plinova helija i neona, a laserski prijelazi se događaju unutar neutralnih atomskih vrsta. Najčešća valna duljina je 632,8 nm u crvenom dijelu spektra. Dodatne valne duljine postale su dostupne posljednjih godina: u zelenom spektru na 543,5 nm, u žutom na 594 nm, narančasta na 612 nm i infracrvena na 1,523  $\mu\text{m}$ . Postoji mnogo drugih valnih duljina lasera, ali nemaju svoju značajnu primjenu. Ova vrsta lasera generalno proizvodi snagu u rasponu od 0,5 W do 50 mW u crvenom području, te puno manje snage u ostalim područjima. Laseri djeluju s konstantnim valom i imaju vrlo stabilan tihi izlaz. Kompletna konstrukcija lasera je tipično duljine od 0,15 m do 0,5 m. Uobičajeno je da ovi laseri imaju životni vijek i do 50 000 sati.

Mješavina plinova helija i neona (približno 15 % neona ) je postavljena u staklenoj tubi koja se sastoji anodnog područja gdje se nalazi visokonaponska elektroda i katodnog područja u kojem se nalazi velika aluminijska katoda. Idealni plinski tlak je od 0,48 do 0,65 kPa s omjerom He : Ne = 5 : 1. Posljedično, otvor pražnjenja od 1,5 mm bi imao idealni tlak od 0,33 kPa.



Slika 2.5. Dijelovi He-Ne lasera [7]

Također smješteni u području anode i katode nalaze se interno ugrađena laserska zrcala koja čine optičku šupljinu. Ako se želi polariziran izlaz iz lasera, Brewster-ov kutni prozor također je umetnut u lasersku šupljinu unutar bilo kojeg anodnog ili katodnog područja cijevi. Za napajanje je potrebna posebna napojna jedinica kako bi ostvarila pražnjenje potrebna za pobudu lasera na gornju razinu. Napajanje općenito zahtijeva visoki napon do 1000 V i struju pražnjenja od nekoliko do desetak mili ampera. Za proizvodnju početne ionizacije koristi se veći početni napon unutar pražnjenja; tipično se primjenjuje ovaj početni napon unutar cijevi za pražnjenje samo nekoliko mikro sekundi (ili manje) nakon što je startna sklopka uključena.

Tablica 2.4. Karakteristike He-Ne lasera

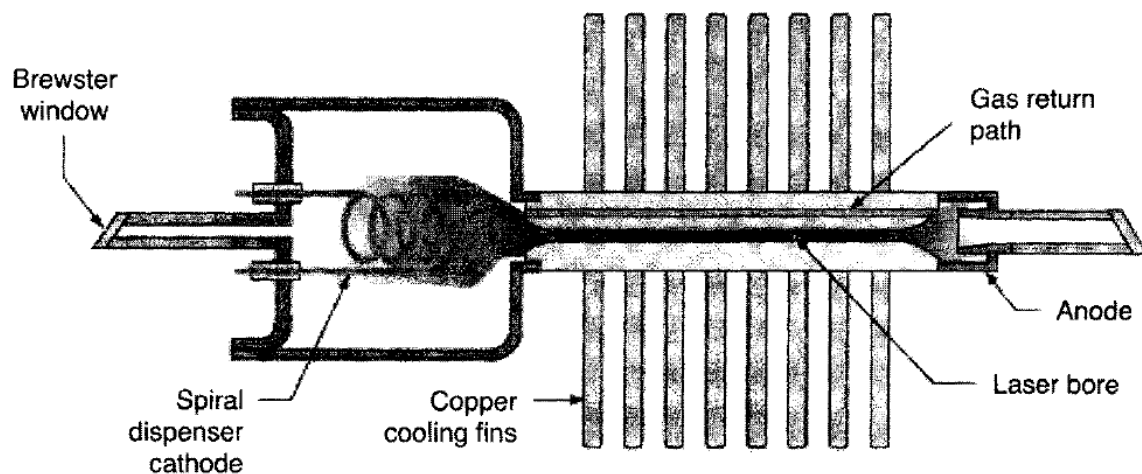
He-Ne laser	
Valna duljina	632,8 nm
Životni vijek gornje laserske razine	$3 \cdot 10^{-8}$ s
Omjer plinova u smjesi	He : Ne = 5 : 1
Tlak plina	0,33 kPa
Temperatura plina	400 K
Metoda pumpanja	električno pražnjenje
Izlazna snaga lasera	0,5 - 100 mW

Primjene za helij-neonski laser uključuju interferometriju, laserski ispis, čitanje bar koda te kao referentne zrake za pokazivanje i usmjerenje. U interferometriji, He-Ne laser daje vrlo stabilnu referentnu zraku s jednim transverzalnim snopom potrebnim za prepoznavanje optičkih svojstava materijala kao što je glatkoća površine. U laserskom ispisu, dobro karakterizirana zraka se koristi kao izvor pisanja na fotoosjetljivom materijalu za pružanje detaljnih uzoraka ispisa. Većina današnjih trgovina koriste He-Ne laser kao skenere za naplatu ili čitanje inventara kako bi očitali digitalno kodirane bar kodove koji se nalaze na proizvodima. Primjena u pozicioniranju uključuje referentne zrake za poravnanje kanalizacijskih cijevi, trodimenzionalni pravi kut referentne zrake u građevinarstvu, referentne zrake za izmjeru i sprave za nišanjenje kod oružja. Laser od 1,523  $\mu\text{m}$  koristi se za mjerenje prijenosne linije s optičkim vlaknima, koje imaju minimalne gubitke u tom području valne duljine.

### 2.2.2. Argonski ionski laser

Argonski ionski laser jedan je od vrste lasera s plemenitim plinovima koji rade u vidljivom i ultraljubičastom spektru. Povijesno su ti laseri bili poznati kao ionski laseri. Drugi laseri, poput He-Cd lasera, također rade u ioniziranom sadržaju atoma, ali se najčešće nazivaju laseri s parama metala. Dakle, ionski laseri prvenstveno se sastoje od lasera koji rade u ioniziranom sadržaju plemenitih plinova argona, kriptona i ksenona. Laseri uključuju elektronsku ekscitaciju koja nastaje kada se elektroni plazme unutar plinskog pražnjenja sudare s laserskim sadržajem.

Argon ionski laser može pružiti približno 25 vidljivih raspona valnih duljina od 408,9 do 686,1 nm i više od 10 ultraljubičastih valnih duljina u rasponu od 275 do 363,8 nm. Valne duljine kratke 229 nm također se proizvode unutar šupljine udvostručenjem frekvencije vidljivog argonskog ionskog lasera. U vidljivom spektralnom području, dostupne su snage do 100 W, s izlazom koncentriranim na nekoliko jakih linija (uključujući prijelaz od 488,0 nm i 514,5 nm). Laseri rade na tlaku plina argona od približno 0,013 kPa. Cijevi za pražnjenje imaju radni životni vijek koji se kreće od 2000 do 5000 sati. Visoke struje pražnjenja i nizak tlak plina dovodi do vrlo visoke temperature elektrona plazme, stvarajući značajnu količinu topline. Stoga ovi laseri imaju potrebu za značajnim hlađenjem, što je u većini slučajeva izvedeno vodenim hlađenjem. Laseri su također opremljeni s aksijalnim magnetskim poljem za sprječavanje preranog izlaska elektrona iz područja pojačanja (pumpanja) i sudaranja sa stijenkom cijevi za pražnjenje (učinak koji bi proizveo dodatnu neželjenu toplinu).



Slika 2.6. Konstrukcija argonskog lasera

Argonski ionski laseri rade u visoko temperaturnim plazma cijevima s otvorom promjera od 1 do 2 mm i duljine u rasponu od 0,1 m do približno 1,8 m. Područje provrta je razdvojeno, budući da su diskovi provrta od volframa vodljivi i stoga bi samo jedan dodir volframa s provrtom uzrokovao električnu struju da se provede kroz volfram prije nego kroz pražnjenje. Vrućina je odvedena od provrta potpornim bakrenim prstenom. Osiguranje za izjednačenje tlaka plina u svakom području cijevi osigurava se rupama za povrat plina u vanjskom području bakrenih prstenova. Serija volframovih diskova s provrtom ugrađena je unutar aluminijske keramičke ovojnice koja je okružena vodenim štitom u kombinaciji s

magnetskom zavojnicom. Magnet stvara magnetsko polje u smjeru struje pražnjenja koja usporava kretanje elektrona prema stijenci cijevi, budući da sudaranje sa stijenkom dovodi do neželjenog zagrijavanja i erozije provrta. Grijana katoda je namijenjena za učinkovito zračenje elektrona u pražnjenju. Plazma cijevi ove vrste dizajnirane su za rad s temperaturom provrta od oko 1000 °C, koje su posljedica vrlo visokih ulaznih snaga potrebnih za učinkovito djelovanje lasera.

*Tablica 2.5. Karakteristike argonskog lasera*

Argonski ionski laser	
Valna duljina	488 nm, 514,5 nm
Životni vijek gornje laserske razine	100 ns
Omjer plinova u smjesi	
Tlak plina	0,013 kPa ili manje
Temperatura plina	1200 °C
Metoda pumpanja	električno pražnjenje
Izlazna snaga lasera	100 mW do 50 W

Argonski laseri također su vrlo učinkoviti u pumpanju kod titan safirskog lasera. Valne duljine lasera su u području apsorpcije oba lasera materijala visoke gustoće. Visoki intenzitet argonskog lasera te plave i zelene valne duljine čine ga prikladnim za korištenje u pisacima. Laser se može fokusirati na malu točku i visoki intenzitet velike brzine skeniranja za potrebe ispisa.

Komercijalni argonski laseri općenito se proizvode u tri veličine: velike snage, laseri velikog okvira i srednje snage, vodom hlađeni laseri malog okvira i zrakom hlađeni laseri male snage. Laseri velikog okvira nude snage do 100 W na nekoliko valnih duljina i čak 10 W na jakom prijelazu na 514,5 nm. Ovi laseri zahtijevaju ulaznu snagu od 60 kW ili više i vodeno hlađenje pri protoku od 25 l/min. Laseri su otprilike 2 m dugački i imaju zasebno napajanje.

### 2.2.3. Kriptonski ionski laser

Kriptonski ionski laser nalikuje argonskom ionskom laseru po rasporedu energetske razine, a samim time i rad lasera je sličan. Zapravo, kriptonski laseri se uglavnom izrađuju zamjenom plina argona plinom kriptonom u istoj cijevi za pražnjenje. Optimalni tlak plina malo je drugačiji i, naravno, laserska zrcala moraju se promijeniti kako bi se uzela u obzir valna

duljina i pojačanje (pumpanje) kriptonskog lasera. Razlog korištenja kriptonskog lasera je taj što nudi različite valne duljine lasera u odnosu na argon laser. Te valne duljine se kreću od 406,7 do 676,4 nm, s dominantnim izlazom lasera na 406,7, 413,1, 530,9, 568,2, 647,1 i 676,4 nm. Najjači prijelaz događa se u crvenom području na 676,4 nm. Ovi laseri stoga nude širi spektar valnih duljina za upravljanje većim snagama u vidljivom spektru od argonskih lasera. Neki proizvođači nude laser s mješavinom plinova argona i kriptona, koji daje snažniji prijelaz plave i zelene boje argona kao i snažni prijelaz crvene boje kriptona. Takvi laseri se često koriste za višebojne zaslone.

Argonski i kriptonski ionski laseri koriste se prvenstveno za fototerapiju oka, izvor pojačanja kod čvrstih lasera, kao laserski pisači, kod stanične citometrije i stereolitografije. Fototerapija oka uključuje otapanje malih kapilara koje se razvijaju u očima kod ljudi s dijabetesom. Ukoliko se te kapilare ne uklone pacijent može oslijepiti. One se pojavljuju blizu foto osjetljive površine oka, na mrežnici. Da bi se uklonile kapilare, liječnik na njih usmjerava argonski laser kroz očnu leću. Plavo i zelene valne duljine visoko se apsorbiraju putem kapilara te ih posljedično laser razgrađuje, ali ih ne upijaju prozirna područja kroz koje putuje laserski snop prije no stigne do kapilara.

Stanična citometrija uključuje korištenje laserskog svjetla za brojanje različitih vrsta živih stanica. Laserska zraka se usmjerava u tekući uzorak materijala koji sadrži stanice koje treba prebrojati, a raspršena svjetlost koja se detektira kada stanica prolazi kroz područje iluminacije se zatim registrira na detektoru i broji.

Stereolitografija je tehnika koja generira trodimenzionalne uzorke bilo kojeg objekta koji se može opisati računalnom grafikom. S ovom tehnikom, sloj UV-osjetljive tekuće plastike stavlja se u komoru. UV lasersko svjetlo se zatim koristi za ozračivanje tankog sloja plastike na površini tekućine. Plastika se stvrdne na mjestu gdje se zrači tekućina, a zatim drugi tanki sloj plastike se izlije na prethodni sloj. Ovaj sloj se zatim ozračuje da osigura dodatne bolje karakteristike u pogledu čvrstoće modela. Nakon mnogo slojeva, učvršćeni plastični model je potpuno razvijen i može se izvaditi iz nestvrdnute tekućine. Takvi se modeli koriste u razvoju prototipova, počevši od automobilske industrije do izrade bočica parfema. Prednosti ove tehnike uključuju mogućnost trenutne provjere tolerancija dijelova koji se trebaju sklopiti i da se uzme u obzir konkretni dizajn proizvoda u masovnoj proizvodnji.

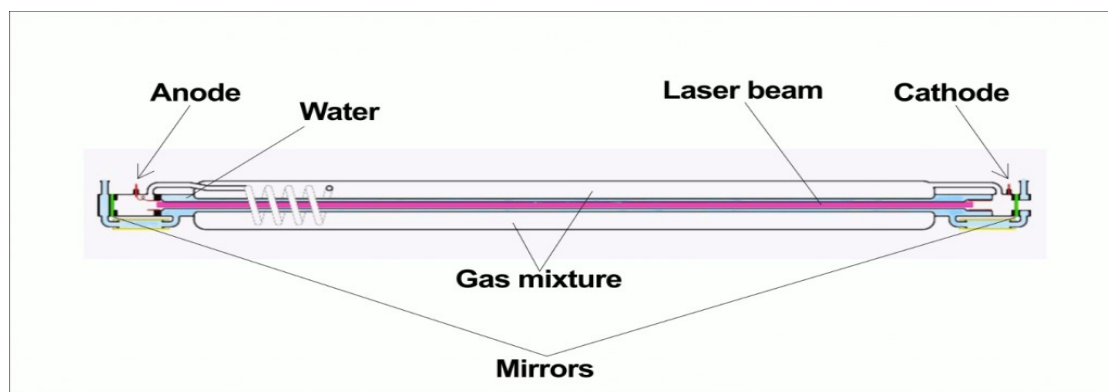


## 2.3. Molekularni plinski laseri

Molekularni plinski laseri spadaju u dvije opće kategorije. To su srednje i daleko infracrveni laseri, koji se javljaju na rotacijsko-vibracijskim prijelazima ili na čistim rotacijskim prijelazima. Također postoje i laseri koji se javljaju na elektroničkim prijelazima molekula, kao što su dušični laser i excimer laser. Laser s ugljikovim dioksidom djeluje na rotacijsko-vibracijskim prijelazima i vjerojatno je najpoznatiji od svih infracrvenih molekularnih lasera. Može djelovati pri vrlo visokim tlakovima jer su energije gornjih laserskih razina puno bliže osnovnom stanju molekule CO<sub>2</sub> nego što su energije gornjih laserskih razina atomskih lasera i tako temperatura elektrona može biti puno niža, čime se omogućuje viši radni tlak plina. Ovi laseri obično imaju vrlo kratke izlazne impulse čija trajanja se kreću od nekoliko nano sekundi do nekoliko desetaka nano sekundi. Plinska komora za pražnjenje i pulser električne ekscitacije dizajnirani su tako da imaju vrlo niske induktivnosti kako bi se omogućila brza električna pobuda na laserskim razinama.

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

Laser s ugljičnim dioksidom jedan je od najmoćnijih i najučinkovitijih lasera koji postoje. Djeluje u srednjem infracrvenom području na rotacijsko-vibracijskim prijelazima u područjima valne duljine 10,6 μm i 9,4 μm. Javlja se impulsni i kontinuirani laserski izlaz u nekoliko različitih vrsta plinskog pražnjenja u smjesi ugljikovog dioksida, dušika i helija, obično s omjerom CO<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> od oko 0,8 : 1 i s nešto više helija nego N<sub>2</sub>. Ovi laseri proizvode snage veće od 100 kW i impulsne energije od čak 10 kJ. Dobitak se javlja na nizu rotacijsko-vibracijskih prijelaza kojima dominira ili Dopplerovo širenje ili širenje tlaka, ovisno o tlaku plina. Jedan od najkorisnijih CO<sub>2</sub> lasera za primjenu materijala je kontinuirana inačica s duljinom šupljine od 1-2 m koja proizvodi jedan ili više kilovata snage.



Slika 2.7. Konstrukcija CO<sub>2</sub> lasera

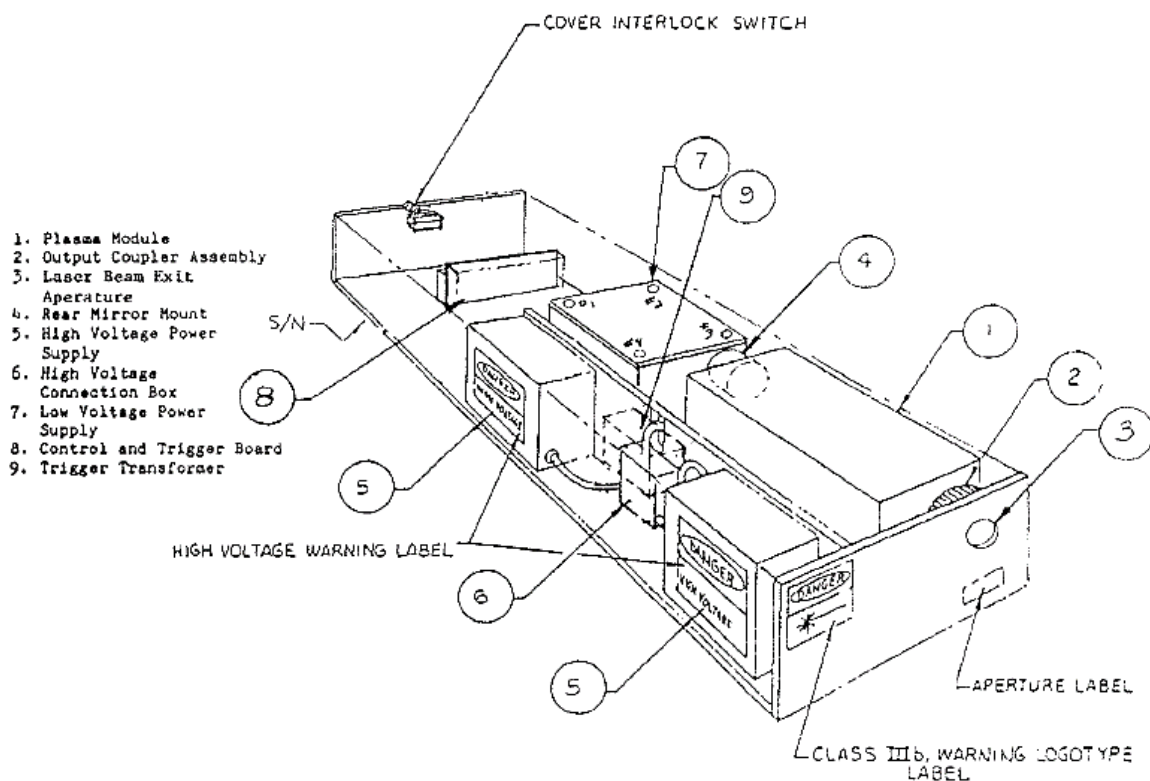
Vjerojatno najznačajnije područje u kojem se CO<sub>2</sub> laser najčešće koristi je područje obrade materijala. To uključuje rezanje, bušenje, uklanjanje materijala, taljenje, zavarivanje, oblaganje, otvrdnjavanje i tako dalje. Drugo glavno područje je u medicinskim primjenama, gdje se koristi za rezanje i kauterizaciju. Prednost korištenja lasera za ove primjene je u tome što se vrlo intenzivan izvor grijanja može primijeniti na vrlo malo područje.

Tablica 2.6. Karakteristike CO<sub>2</sub> lasera

CO <sub>2</sub> laser	
Valna duljina	10,6 μm
Životni vijek gornje laserske razine	4 s
Omjer plinova u smjesi	CO <sub>2</sub> : N <sub>2</sub> = 0,8 : 1 plus He
Tlak plina	6,6-101 kPa
Temperatura plina	1200 °C
Metoda pumpanja	električna pobuda
Izlazna snaga lasera	1-10000 W

### 2.3.3. Dušikov laser

Pulsirajući molekularni laser je laser električnog pražnjenja koji proizvodi ultraljubičastu zraku lasera na valnoj duljini od 337,1 nm. Ovaj laser djeluje na promjeni elektronske ili vibracijske energije. Najveća izlazna snaga ovog lasera je 100 kW u vremenskom trajanju od 10 ns te ima energiju pulsa od oko 100 mJ. Radi pri uvjetima rada gdje je N<sub>2</sub> tlaka od 2,65 do 101 kPa zatočenog u kućištu pri brzinama ponavljanja od 200 Hz. Laser ima visoko pojačanje i zbog toga proizvodi multi mod koji može poslužiti kao optička pumpa te je tu vjerojatno i najčešće primijenjen.



Slika 2.8. Prikaz dušikovog lasera s osnovnim dijelovima sklopa

Laser se obično pobuđuje s poprečnim pumpnim rasporedom u visokoj tlačnoj komori slično CO<sub>2</sub> laserima. Kratak vijek trajanja gornje laserske razine od 40 ns zahtijeva izuzetno brz tok pumpanja, koji se uglavnom odvija preko direktnog pumpanja iz osnovnog stanja N<sub>2</sub>. Donja laserska razina ima mnogo duži vijek trajanja od 10 μs i tako je laser samotempirajućeg tipa sličan laseru na bakrenoj pari. Trajanje laserskog izlaza kreće se od 2 do 20 ns. Visokoenergetski laserski puls može se proizvesti korištenjem šupljine vrlo niske refleksije, iako se zrcalo visokog reflektiranja obično koristi kao stražnje zrcalo s 4 % reflektirajućim prednjim ogledalom. Ravna ogledala su prikladna u ovom slučaju jer se samo nekoliko prolaza snopa događa unutar medija pojačanja. Dakle, difrakcijski gubici i gubici namještanja nisu jako važni.

Tablica 2.7. Karakteristike dušikovog lasera

N <sub>2</sub> laser	
Valna duljina	337,1 nm
Životni vijek gornje laserske razine	40 ns
Omjer plinova u smjesi	
Tlak plina	2,65-101 kPa
Temperatura plina	300 K
Metoda pumpanja	električno pražnjenje
Izlazna snaga lasera	do 100 kW

Dušikovi laseri se koriste primarno za pumpanje kompaktnih lasera za bojanje. Mogu se proizvoditi u relativno malim veličinama i imaju zabrtvljeno kućište lasera koje traje dosta dugo. Mogu se kombinirati sa sustavom lasera za bojanje koji uključuje difrakcijsku rešetku koja pruža mogućnost pulsirajućeg laserskog izlaza preko čitavog vidljivog spektra.

### 3. Optimizacija laserskog zavarivanja Taguchi sivom relacijskom analizom

#### 3.1. Lasersko zavarivanje

Lasersko zavarivanje u industrijskoj proizvodnji u stalnom je porastu. Razvojem novijih tehnologija, primjenom posebnih materijala te stalnim napretkom u znanosti, lasersko zavarivanje s vremenom je postajalo sve učestalije. U gotovo svim granama industrije, od mikroelektronike do brodogradnje, a posebno u automobilskoj industriji mogu se iskoristiti glavne prednosti ove tehnologije koje pak druge tehnologije ili ne posjeduju ili ne u tolikoj mjeri. Neke od tih prednosti su:

- visoka gustoća snage odnosno mali unos topline,
- uska zona utjecaja topline,
- male deformacije,
- velika brzina zavarivanja,
- visoka kvaliteta spoja,
- pristup s jedne strane,
- minimalna količina šljake (gotovo da je nema),
- visoka fleksibilnost.

Glavni nedostaci poput visokih investicijskih troškova i povećanih troškova pripreme spoja mogu se nadoknaditi velikom brzinom zavarivanja i nepotrebnom naknadnom obradom spoja koja je posljedica malih deformacija radnog komada nakon zavarivanja i visoke kvalitete spoja. Navedene prednosti omogućuju zavarivanje tankostjenih i laganih konstrukcija te zavarivanje dijelova obrađenih na mjeru, koji nakon zavarivanja idu direktno u eksploataciju. Efekti porasta produktivnosti postižu se samo onda kada je konstrukcija prilagođena laserskom zavarivanju, kada ne postoje problemi pri uključivanju u proces proizvodnje i kada su ispunjeni zahtjevi za preciznom pripremom spoja i preciznim vođenjem laserskog snopa. Visoka gustoća snage kod laserskog zavarivanja omogućuje zavarivanje s malim unosom topline u materijal, čime je spriječena toplinska dilatacija materijala. Velike brzine ohlađivanja, kod zavarivanja čelika, dovode do velikog porasta tvrdoće u području zavarenog spoja. Pokazalo se da s time povezano jako očvršnuće u odnosu na osnovni materijal, ne djeluje bezuvjetno negativno na mehanička svojstva zavarenog spoja. To je posljedica uske zone utjecaja topline, malih dimenzija zavara i sitno zrnate mikrostrukture. Time se lasersko zavarivanje značajno razgraničuje od konvencionalnih postupaka zavarivanja. Granica dobre

zavarljivosti nelegiranih konstrukcijskih čelika konvencionalnim postupcima zavarivanja iznosi 0,22 % ugljika u kemijskom sastavu, što približno odgovara tvrdoći 350 HV u zavarenom spoju. Ukoliko je stanje naprežanja u zavarenom spoju povoljno (nema ukrućenja konstrukcije), pri laserskom zavarivanju mogu se dobiti zavari bez pukotina i kod sadržaja ugljika u čeliku 0,6 %, a tvrdoća može iznositi od 650 do 700 HV. Ali tada se ne može sa sigurnošću tvrditi da su postignuta dovoljna mehanička svojstva čvrstoće i žilavosti, već ih je potrebno za pojedinu konstrukciju, oblik spoja, odnosno debljinu i vrstu materijala, eksperimentalno odrediti i optimiranjem parametara poboljšati, što predstavlja neistraženo područje.



*Slika 3.1. Lasersko zavarivanje tankostjenih ploča od aluminija [8]*

Kvaliteta zavarenog spoja prvo se određuje radiografijom, metalografijom, ispitivanjem tvrdoće, statičkim vlačnim pokusom i ispitivanjem udarne radnje loma, međutim za dinamički opterećene konstrukcije rezultati navedenih ispitivanja nisu dovoljni, odnosno na temelju njih nije moguće predvidjeti ponašanje zavarenog spoja pri dinamičkom opterećenju. Danas su dostupni samo malobrojni podaci o dinamičkom ponašanju laserskih zavarenih spojeva od čelika s povećanim sadržajem ugljika.

Zaštitni plin ima značajnu ulogu pri laserskom zavarivanju i ispunjava slijedeće zadatke: štiti talinu i zonu utjecaja topline od utjecaja atmosfere, utječe na oblik zavara i štiti optiku od metalnih para i kapljica nastalih štrcanjem. Upotreba plinskih mješavina pri Nd:YAG laserskom zavarivanju, baziranih na argonu s dodatkom ugljik dioksida i/ili kisika, umjesto konvencionalnih zaštitnih plinova (argon, helij, dušik), može povećati unos energije u materijal, pa tako i penetraciju i brzinu zavarivanja, odnosno utjecati na geometrijska i mehanička svojstva zavarenog spoja. Lasersko zavarivanje čelika s povećanim sadržajem ugljika uz upotrebu navedenih plinskih mješavina nije dovoljno istraženo, a podaci o geometrijskim i mehaničkim svojstvima, a posebno dinamičkim u potpunosti nedostaju. Pokusi s mješavinama pokazali su se prikladnim za istraživanje odnosno matematičko modeliranje utjecaja mješavina zaštitnih plinova u zavarivanju. Sveukupni cilj ovog rada je razjasniti koliko su prikladne plinske mješavine na bazi argona s dodatkom ugljik-dioksida i/ili kisika za zavarivanje čelika s povećanim sadržajem ugljika korištenjem Nd:YAG lasera.

### 3.1.1. Uloga zaštitnog plina pri laserskom zavarivanju

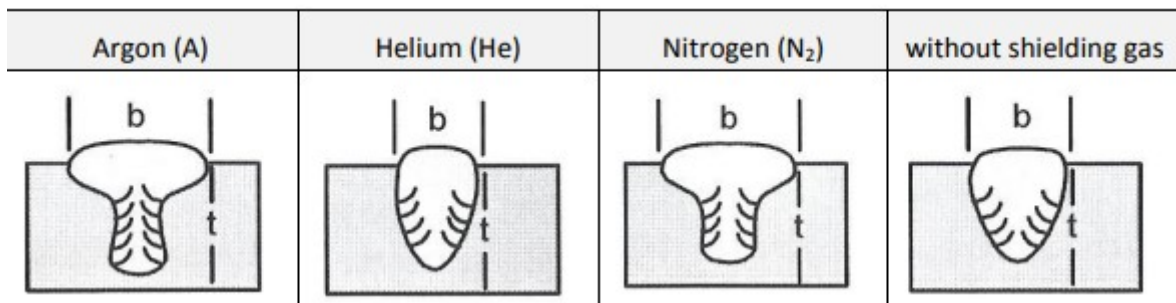
Glavna funkcija zaštitnog plina je smanjiti kontakt bazena za zavarivanje s atmosferom. Zaštita je neophodna jer su metali na visokoj temperaturi vrlo reaktivni i skloni stvaranju oksida koji dovode do nedostataka, kao što je poroznost, i smanjuje kvalitetu zavarenog spoja. Zaštitni plin također utječe na oblik šava i dubinu prodiranja. Budući da pomažu u stvaranju plazme, olakšavaju i cjelokupni proces zavarivanja. Proizvođač preporučuje tri glavna zaštitna plina: helij (He), argon (Ar) i dušik (N<sub>2</sub>).

- Dušik (N<sub>2</sub>) je inertan plin bez boje, mirisa, vrlo prikladan za zavarivanje krom-nikal čelika. Kod zavarivanja s dušikom važno je zapamtiti da će njegova uporaba smanjiti zaštitu kod nehrđajućeg čelika snižavanjem krom-nikal frakcije.

- Argon (Ar) je inertan plin bez boje i mirisa. Zapaljiv je i nije otrovan. Može se koristiti kao zaštitni plin za krom-nikal čelik. Budući da je najteži od svih, njegova uporaba se preporučuje na uređajima gdje plin može lako pobjeći.

- Helij (He) je inertan plin bez boje i mirisa. To je najlakši plin i brzo izlazi, stoga je njegova potrošnja veća od ostalih plinova. Njegova uporaba je prikladna za aluminij i Al legure. Helij se može koristiti kao dodatak pri zavarivanju s dušikom.

Na slici 3.2 može se vidjeti kako pojedini plin utječe na bazen zavara kada je u ulozi zaštitnog plina, pri čemu je  $b$  širina bazena zavara i  $t$  dubina penetracije zavara.



Slika 3.2. Utjecaj zaštitnog plina na oblik bazena zavara [10]

U sljedećoj tablici sažeti su podaci iz reference proizvođača o učinku zaštitnog plina u procesu zavarivanja.

Tablica 3.1. Prednosti i nedostaci zaštitnih plinova

	Argon (A)	Helij (He)	Dušik (N <sub>2</sub> )	Bez zaštitnog plina
Površina zavara	++	+	+	-
Prskanje	+	+	/	-
Rupice	-	+	+	.
Cijena	-	-	/	+

Zaštitni plin nije obavezan u postupku laserskog zavarivanja, na taj se način mogu smanjiti tekući troškovi, ali kvaliteta zavara može biti ugrožena, kao što je prikazano u gornjoj tablici. Unatoč tome, zaštitni plinovi se uvijek koriste za zahtjevnije zavare jer pomažu u postizanju veće kvalitete zavara.

### 3.2. Uvod u optimizaciju laserskog zavarivanja

Globalna inicijativa "Go Green" pozvala je sve proizvodne industrije za poboljšanje učinkovitosti kako bi se smanjio utjecaj stakleničkih plinova. U energetskom sektoru to je dovelo do razvoja super kritičnih, ultra super kritičnih i naprednih ultrasuper kritičnih tehnologija kotlova, koji rade na višim temperaturama i tlakovima u usporedbi s konvencionalnim manje kritičnim kotlovima. Ovi razvoji povećavaju učinkovitost rada čime



se smanjuju emisije zagađenja i zahtijevaju korištenje materijala koji mogu podnijeti takve radne uvjete. Nehrdajući čelici, Cr-Mo čelici poput P22, P23, itd., tradicionalno su se koristili za takve primjene u komponentama kao što su super grijaće cijevi, paneli, itd. Za daljnje produljenje životnog vijeka komponente bez ometanja učinkovitosti prijenosa topline su razvijene, poput čelika s 9-12 % Cr koji imaju bolju otpornost na oksidaciju, svojstva pri visokim temperaturama itd. Najčešće korišteni materijal u ovoj kategoriji je 9Cr-1Mo (P91) čelik zbog svoje visoke toplinske vodljivosti i niskog koeficijenta toplinskog širenja u usporedbi s bliskom konkurencijom austenitnih nehrđajućih čelika. P91 je bio u upotrebi za korištenje pri temperaturama reda veličine 600 °C. Međutim, prisutnost Mo dovodi do stvaranja štetnih faza, što će utjecati na visoko temperaturne performanse komponenti izrađenih od P91 materijala. Kako bi se smanjila mogućnost formiranja štetnih faza i dodatno povećanje visoko temperaturnih performansi, razvijeni su čelici P92 smanjenjem sadržaja Mo na 0,5 % i dodavanjem 2 % W da se nadoknadi gubitak čvrstoće zbog smanjenog sadržaja Mo. Materijal se razmatra za primjene poput zaglavlja, ploča, zavojnica itd., u super kritičnim i ultra super kritičnim elektranama. P92 materijali imaju otpornost na oksidaciju sličnu P91 jer je otpornost na oksidaciju pod utjecajem sadržaja Cr te oba materijala, P91 i P92, imaju sličan sadržaj Cr. Komponente proizvedene s P92 uključivat će opsežno zavarivanje. Stoga će zavarljivost materijala biti bitan zahtjev. P92 se također obično isporučuje u normaliziranim i temperiranim uvjetima i imat će potpuno martenzitnu mikrostrukturu na sobnoj temperaturi te će stoga tijekom zavarivanja imati probleme slične P91. Problemi sa zavarljivošću materijala uključivat će tvrdu i krhku mikrostrukturu u zavarivanju i HAZ (engl. *heat-affected zone*: zona utjecaja topline, u daljnjem tekstu ZUT), osjetljivost na vodikom inducirano pucanje (HIC), stvaranje meke među kritične zone itd. P91/92 materijali mogu biti zavareni gotovo svim postupcima zavarivanja taljenjem. Lasersko zavarivanje omogućuje prednosti kao što su izvođenje zavarivanja zaštitom rastaljenog bazena kako bi se izbjeglo vodikom izazvano pucanje, smanjene prilike za stvaranje mekih među kritičnih zona zbog visokih brzina hlađenja povezanih s ovim postupkom zavarivanja i smanjene prilike za stvaranje štetne faze.



*Slika 3.3. Cijevi izrađene od P92 materijala [9]*

U svakom postupku zavarivanja, za postizanje željenih svojstava, potrebno je izvršiti zavarivanje pomoću optimiziranih parametara. Za dobivanje optimiziranih parametara potrebno je korištenje tehnika optimizacije. Objavljena literatura je pokazala upotrebljivost tehnika optimizacije za zavarivanje bez taljenja i za zavarivanje taljenjem uključujući laserski postupak zavarivanja različitih materijala.

U ovom diplomskom radu optimizirat će se parametri CO<sub>2</sub> laserskog zavarivanja P92 čelika korištenjem metode sive relacijske analize temeljena na Taguchi metodi.

*Tablica 3.2. Mehanička svojstva P92 čelika*

Razred	Vlačna čvrstoća MPa	Granica razvlačenja MPa	Produljenje %
P92	min. 620	min. 440	min. 20

Ispitivanja zavarivanja su provedena korištenjem ortogonalnog niza Taguchi L9 načina, promjenom snage lasera, brzine zavarivanja i položaja žarišta (fokusa). Varovi su izrezani u poprečnom smjeru za proučavanje geometrijskih karakteristika poput dubine prodiranja, gornje širine zavora i širine ZUT-a, koji su uzeti kao odgovori. Za analizu je uzet prosjek odgovora. Nakon toga je napravljena ANOVA i određeni su optimalni parametri.

Tablica 3.3. Udjeli pojedinih legirajućih elemenata u P92 čeliku

Razred	C %	Mn %	P %	S %	Si %	Cr %	Mo %	V %	N %	Ni %	Al %	Nb %	W %
P92	0,07- 0,13	0,3- 0,6	max. 0,02	max. 0,01	max. 0,5	8,5- 9,5	0,3- 0,6	0,15- 0,25	0,03- 0,07	max. 0,4	0,04- 0,09	1,5- 2,0	0,001- 0,006

### 3.3. Eksperimentalni dio

Za eksperimentiranje korištene su okvirne informacije s interneta, odnosno parametri za zavarivanje koji se najčešće koriste pri zavarivanju legiranih čelika, konkretno u ovom slučaju P92.

#### 3.3.1. Eksperimenti laserskog zavarivanja

Eksperimenti laserskog zavarivanja izvedeni su variranjem snage lasera, brzine zavarivanja i položaja žarišta u ravnini pomoću Taguchi L9 ortogonalnog niza na P92 ploči s dimenzijama  $200 \times 150 \times 8$  mm bez ikakvog predgrijavanja. Kemijski sastav materijala prikazuje tablica 3.3 dok su detalji parametara korištenih za ispitivanja prikazani u tablici 3.4.

Tablica 3.4. Početni parametri za eksperiment

Početni faktori	Razina		
	1	2	3
Snaga lasera (kW)	2,25	3	3,75
Brzina rezanja (m/min)	1	2,5	4
Fokus (mm)	-5	-2,5	0

Provedena su ispitivanja zavarivanja pomoću CO<sub>2</sub> lasera snage 3,5 kW koji koristi argon kao zaštitni i kao plin za pročišćavanje plazme pri protoku od 30 l/min. Žarišno zrcalo promjera 300 mm daje žarišnu točku veličine 180 μm u Gaussovom transverzalnom modu. Snaga zavarivanja varira u rasponu od 2,25-3,75 kW, brzina zavarivanja od 1-4 m/min i položaj žarišne ravnine u rasponu od 0 do -5 mm (unutar materijala). Svi zavari su rezani u poprečnom smjeru, polirani i jetkani. Nakon toga, mjerenja geometrije kao što su dubina

prodiranja, gornja širina zavora i širina ZUT-a su obavljena pomoću softvera za mjerenje dostupnog u mikroskopu Dino-Lite, a vrijednosti su korištene kao odgovori za optimizaciju.

### 3.3.2. Optimizacija parametara laserskog zavarivanja

Budući da se mora obraditi više izlaznih parametara, za analizu je korištena Taguchijeva metoda. Genichi Taguchi osmislio je ovu metodu kako bi poboljšao kvalitetu proizvoda. Ova metoda koristi se u inženjerstvu, marketingu, biotehnologiji i oglašavanju.

Taguchi metoda je tehnika planiranja eksperimenata koja se koristi za optimizaciju performansi proizvoda ili procesa. Svrha ove metode je identificirati najvažnije čimbenike koji utječu na performanse i optimizirati ih za najbolje moguće rezultate.

Taguchi siva relacijska metoda u Excelu je alat koji se koristi za implementaciju Taguchi metode. Ova metoda se temelji na konceptu sive boje, što znači da se promjene čimbenika trebaju raditi postupno i kontrolirano. Metoda se sastoji od sljedećih koraka:

1. Određivanje čimbenika koji utječu na performanse proizvoda ili procesa.
2. Određivanje razine svakog čimbenika koji će se testirati.
3. Izvođenje eksperimenata za različite kombinacije čimbenika i razina.
4. Analiza podataka dobivenih eksperimentima pomoću sive relacijske metode u Excelu.
5. Optimizacija čimbenika za najbolje moguće performanse.

Nakon što su definirani ulazni parametri i njihove razine, određuje se odgovarajući niz kako bi se pronašao odgovarajući tretman u eksperimentu. Za ovaj je eksperiment odabran L9 ( $3^3$ ) ortogonalni niz kako je i navedeno u tablici 3.5.

Tablica 3.5. Ortogonalna tablica parametara zavarivanja

Pokus	Snaga (kW)	Brzina (m/min)	Fokus (mm)
1	2,25	1	0
2	2,25	2,5	-2,5
3	2,25	4	-5
4	3,00	1	-2,5
5	3,00	2,5	-5
6	3,00	4	0
7	3,75	1	-5
8	3,75	2,5	0
9	3,75	4	-2,5

U slučaju laserskog zavarivanja, primarni cilj bit će povećanje dubine prodiranja na maksimalnu vrijednost, dok se gornja širina zavara i širina ZUT-a trebaju držati na najmanjim mogućim vrijednostima. Ovo će biti još važnije u materijalu osjetljivom na toplinu poput P92, gdje je sučelje između ZUT-a i osnovnog metala (OM) najslabija zona.

Stoga, u generiranju sive relacije, normalizirana gornja širina zavara i širina ZUT-a odgovaraju "manje-to-bolje" kriteriju koji se može izraziti jednadžbom:

$$X_i(k) = \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (3.1)$$

Dubina prodiranja treba pratiti "više-to-bolje" kriterij, koji se može izraziti jednadžbom:

$$X_i(k) = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (3.2)$$

gdje je  $X_i(k)$  vrijednost nakon sive relacijske analize,  $\min y_i(k)$  najmanja vrijednost od  $y_i(k)$  za  $k$ -ti odgovor i  $\max y_i(k)$  je najveća vrijednost od  $y_i(k)$  za  $k$ -ti odgovor. Sivi relacijski koeficijent može se izračunati koristeći izraz:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \psi \Delta_{\max}}{\Delta_{o_i}(k) + \psi \Delta_{\max}} \quad (3.3)$$

gdje je  $\psi$  koeficijent razlikovanja  $0 \leq \psi \leq 1$  (ovdje je  $\psi = 0,25$  za sve karakteristike kvalitete), dok su  $\Delta_{\min}$  i  $\Delta_{\max}$  redosljedno najmanja i najveća vrijednost  $\Delta_{o_i}$ .

Ako se pretpostavi da je idealni niz  $x_0(k)$  za  $k$ -ti odgovor, tada će njegova vrijednost biti najveća vrijednost tog određenog stupca koji će uvijek biti 1 i  $\Delta o_i =$  razlika apsolutne vrijednosti  $x_0(k)$  i  $x_i(k)$ , što znači koliko ta određena vrijednost odstupa od idealne vrijednosti pa je izraz za izračun delte:

$$\Delta o_i = \|x_0(k) - x_i(k)\|, \quad (3.4)$$

gdje je  $x_i(k)$  normalizirana vrijednost za datu grupu ulaznih parametara.

Nakon uzimanja prosjeka sivih relacijskih koeficijenata, siva relacijska ocjena može se izračunati kao:

$$G_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k), \quad (3.5)$$

gdje je  $n$  broj odgovora procesa. Što je veća vrijednost sive relacijske ocjene bolje odgovara intenzivnom relacijskom stupnju između referentnog niza  $x_0(k)$  i zadanog niza  $x_i(k)$ .

U tablici 3.6 prikazane su osnovne geometrijske značajke vezane uz date parametre zavarivanja. Nastoji se postići što manja gornja širina zavara i širina ZUT-a te što veća dubina prodiranja kako je ranije i navedeno.

Tablica 3.6. Geometrijske značajke zavara

Pokus	Snaga (kW)	Brzina (m/min)	Fokus (mm)	Gornja širina zavara ( $\mu\text{m}$ )	Dubina prodiranja ( $\mu\text{m}$ )	Širina ZUT-a ( $\mu\text{m}$ )
1	2,25	1	0	1898,7	5190,6	1024,7
2	2,25	2,5	-2,5	1599,3	3770,1	759,8
3	2,25	4	-5	1299,9	2349,6	494,9
4	3,00	1	-2,5	2250,2	5613,5	1210,2
5	3,00	2,5	-5	1950,8	4192,9	945,3
6	3,00	4	0	1478,2	3623,9	659,4
7	3,75	1	-5	2601,7	6036,3	1395,7
8	3,75	2,5	0	2129	5467,2	1109,8
9	3,75	4	-2,5	1829,7	4046,7	844,9

### 3.3.3. Rezultati optimizacije

U procesu evaluacije, u početku se koristi normalizacija pretvorbe parametara s različitim jedinicama u usporedive vrijednosti. To se može učiniti pomoću izraza (3.1) i (3.2). Ovo je izvedeno s obzirom na kriterij "veće-to-bolje" za dubinu prodiranja i kriterij "manje-to-bolje" za gornju širinu zavara i širinu ZUT-a. Normalizirane vrijednosti su prikazane u tablici 3.7. Tablica 3.8. pokazuje vrijednosti  $\Delta o_i$ .

Tablica 3.7. Normalizirane vrijednosti parametara

Pokus	Gornja širina zavara ( $\mu\text{m}$ )	Dubina prodiranja ( $\mu\text{m}$ )	Širina ZUT-a ( $\mu\text{m}$ )
1	0,540021509	0,770607861	0,411856128
2	0,770010754	0,38530393	0,705928064
3	1	0	1
4	0,270010754	0,885317493	0,205928064
5	0,5	0,499986438	0,5
6	0,863035797	0,345647869	0,817384547
7	0	1	0
8	0,363112613	0,845634307	0,317384547
9	0,593025042	0,460330377	0,611456483

Tablica 3.8. Vrijednosti delti za normalizirane vrijednosti

Pokus	Gornja širina zavara ( $\mu\text{m}$ )	Dubina prodiranja ( $\mu\text{m}$ )	Širina ZUT-a ( $\mu\text{m}$ )
1	0,459978491	0,229392139	0,588143872
2	0,229989246	0,61469607	0,294071936
3	0	1	0
4	0,729989246	0,114682507	0,794071936
5	0,5	0,500013562	0,5
6	0,136964203	0,654352131	0,182615453
7	1	0	1
8	0,636887387	0,154365693	0,682615453
9	0,406974958	0,539669623	0,388543517

Vrijednost sivog relacijskog koeficijenta koji će se koristiti za izračunavanje sive relacijske ocjene je data u tablici 3.9. U slučaju laserskog zavarivanja, najveća moguća dubina prodiranja u jednom prolazu je najpoželjniji izlaz dok gornja širina zavora i širina ZUT-a trebaju biti što je moguće manje. U skladu s tim, težinski faktor koji se koristi za dubinu prodiranja je 0,6 odnosno za gornju širinu zavora i širinu ZUT-a 0,2. Težinski faktori su usvojeni uzimajući u obzir važnost ovih odgovora dok se zavaruje toplinski osjetljivi P92 materijali. S dodijeljenim težinskim faktorima je izračunat sivi relacijski koeficijent, a vrijednosti su prikazane u tablici 3.9. Tablica 3.10. prikazuje vrijednost sive relacijske ocjene koja će se koristiti za izračun S/N omjera.

*Tablica 3.9. Sivi relacijski koeficijent*

Pokus	Gornja širina zavora ( $\mu\text{m}$ )	Dubina prodiranja ( $\mu\text{m}$ )	Širina ZUT-a ( $\mu\text{m}$ )
1	0,303040179	0,723421373	0,253760775
2	0,465127912	0,493950721	0,404799353
3	1	0,375	1
4	0,21505625	0,83953363	0,201192683
5	0,285714286	0,54544782	0,285714286
6	0,593534856	0,47833458	0,522718041
7	0,166666667	1	0,166666667
8	0,238980779	0,795370211	0,22659925
9	0,329502885	0,526468362	0,339821941

*Tablica 3.100. Siva relacijska ocjena*

Pokus	Siva relacijska ocjena	Rang
1	0,426740776	5
2	0,454625995	3
3	0,791666667	1
4	0,418594188	7
5	0,372292131	9
6	0,531529159	2
7	0,444444444	4
8	0,420316747	6
9	0,398597729	8



Iz tablice 3.10 se jednostavno zaključuje kako pokus broj 3, odnosno snaga od 2,25 kW, brzina od 4 m/min i fokus od -5 mm daju najbolju sivu relacijsku ocjenu.

S/N omjer (engl. *Signal-to-Noise Ratio*) je omjer snage signala i šuma koji ga prati. U kontekstu analize podataka S/N omjer se koristi za procjenu kvalitete signala, gdje se signal odnosi na korisne podatke koje se želi izmjeriti, a šum predstavlja sve ostale neželjene signale koji utječu na mjerenje i mogu ga iskriviti.

S/N omjer za kriterij "manje-to-bolje" se određuje kao

$$(S/N)_i = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^n y_{ij}^2\right), i = 1 \dots N, \quad (3.6)$$

dok za kriterij "više-to-bolje" iznosi

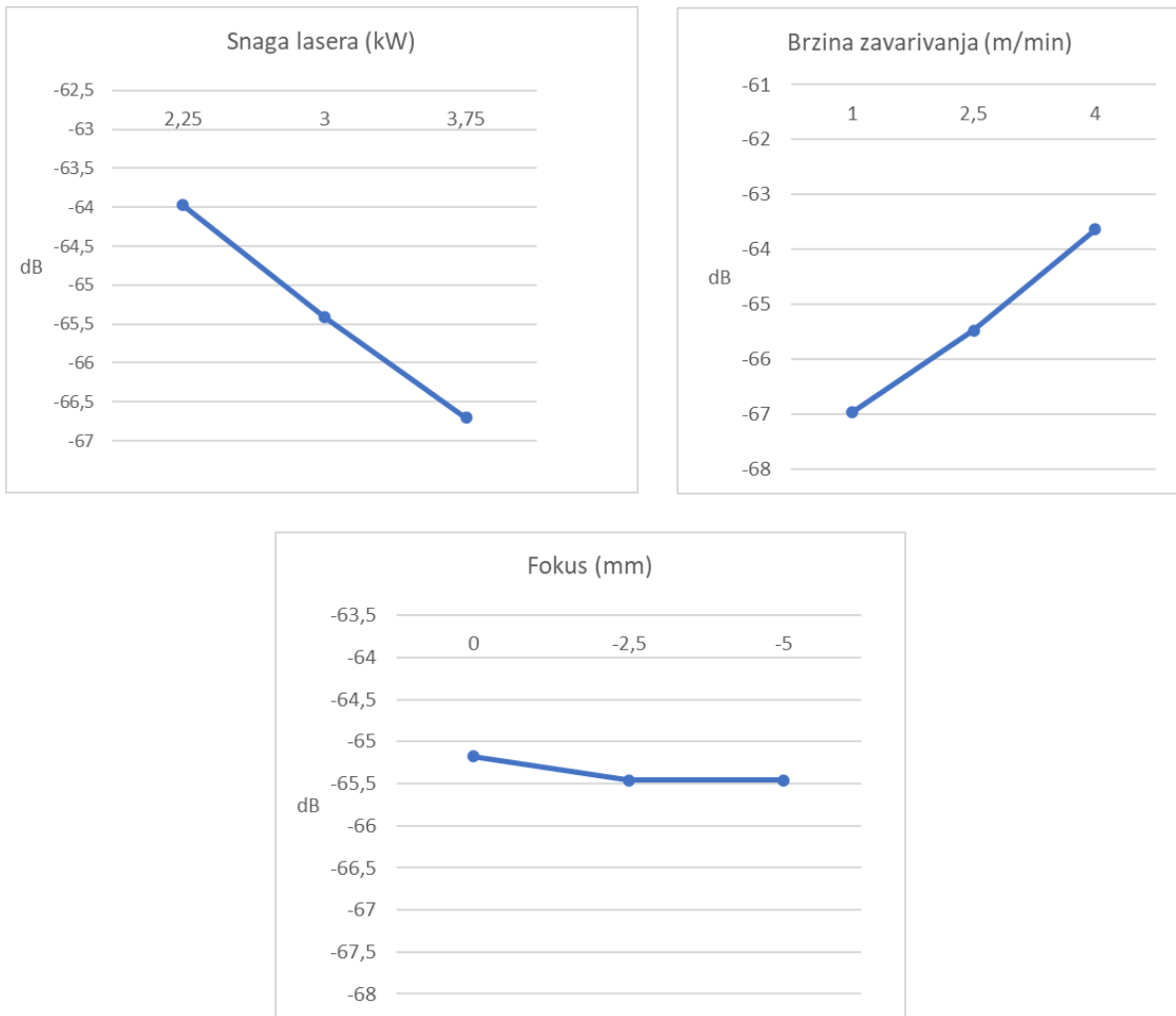
$$(S/N)_i = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2}\right), i = 1 \dots N. \quad (3.7)$$

U tablici 3.11. su izračunati S/N omjeri za svaki rezultat mjerenja.

Tablica 3.11. S/N omjeri za pojedina mjerenja

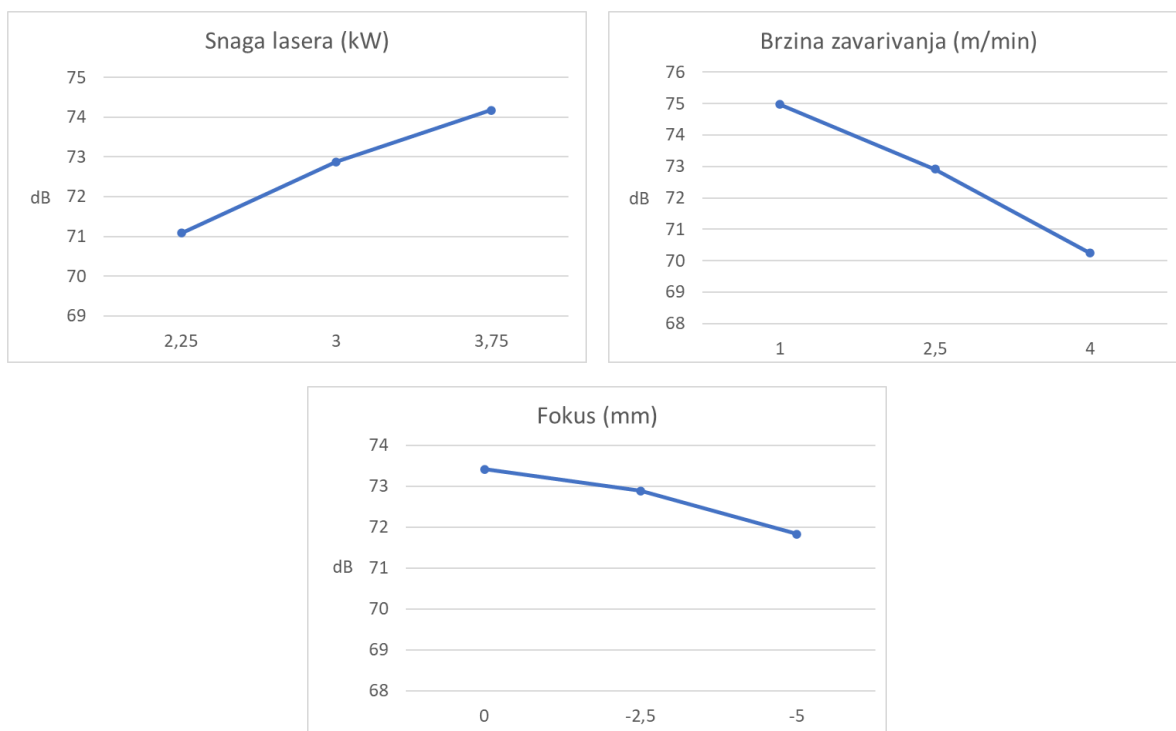
Pokus	Gornja širina zavara (dB)	Dubina prodiranja (dB)	Širina ZUT-a (dB)
1	-65,56912701	74,30435125	-60,21193472
2	-64,07859874	71,5270574	-57,61398578
3	-62,27819888	67,41987867	-53,89034908
4	-67,04442241	74,98467454	-61,65714297
5	-65,80425494	72,45029009	-59,51139316
6	-63,39466396	71,1835241	-56,38297886
7	-68,30514434	75,61541632	-62,89584157
8	-66,56351323	74,75529923	-60,90489441
9	-65,24759776	72,14202019	-58,5361062

Slika 3.4 prikazuje ovisnost gornje širine zavara o početnim parametrima. Iz datih se grafova može zaključiti da na gornju širinu zavara značajan utjecaj imaju snaga lasera i brzina zavarivanja, dok fokus ima jako mali utjecaj. Također, može se zaključiti da za manju gornju širinu zavara (čemu se i teži) treba odabrati snagu od 2,25 kW, brzinu zavarivanja od 4 m/min i fokus od 0 mm.



*Slika 3.4. Grafovi utjecaja ulaznih parametara na gornju širinu zavora*

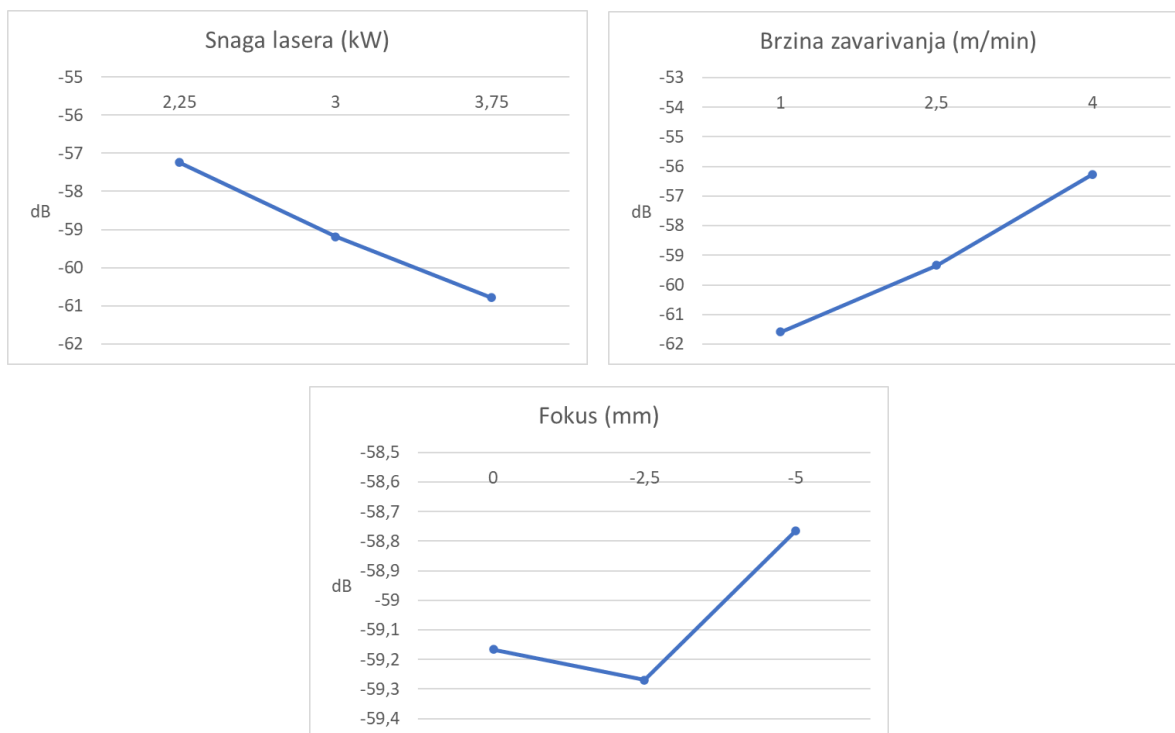
Slika 3.5 prikazuje utjecaj ulaznih parametara na dubinu prodiranja koja bi, kako je ranije navedeno, trebala biti što veća kako bi postupak zavarivanja bio efikasniji. Pri tome snaga će biti 3,75 kW, brzina zavarivanja 1 m/min i fokus 0 mm.



Slika 3.5. Grafovi utjecaja ulaznih parametara na dubinu prodiranja

Iz priloženih se grafova na slici 3.5 može zaključiti da snaga lasera i brzina zavarivanja imaju značajan utjecaj na dubinu prodiranja, dok fokus ima značajno manji utjecaj. Rezultat ovog ispitivanja se mogao i unaprijed pretpostaviti jer će povećanjem snage i smanjenjem brzine zavarivanja neminovno doći do dubljeg prodiranja rastaljenog metala.

Slika 3.6. prikazuje međuovisnost ulaznih parametara i zone utjecaja topline (ZUT). Kao što je ranije navedeno, nastoji se da ZUT bude što manji, kako bi se izbjegle promjene u materijalu nastale prevelikom unosom energije. U ovom slučaju najbolje karakteristike su se pokazale pri snazi od 2,25 kW, brzini zavarivanja od 4 m/min i fokusu od -5 mm.

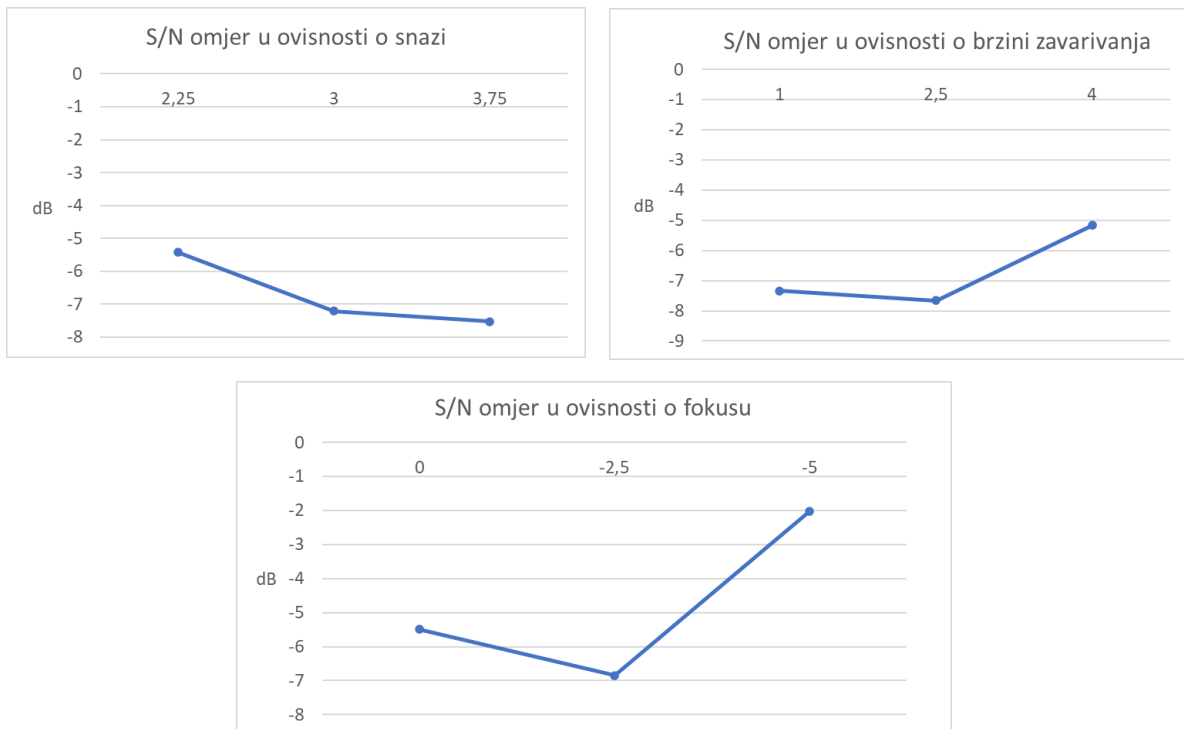


Slika 3.6. Grafovi utjecaja ulaznih parametara na širinu ZUT-a

Tablica 3.12 prikazuje S/N omjer za sivu relacijsku ocjenu koja obuhvaća sve geometrijske karakteristike istovremeno, temeljen na principu što veće to bolje. Iz navedene se tablice također može zaključiti da će ukupno najbolje geometrijske karakteristike biti pri snazi lasera od 2,25 kW, brzini zavarivanja od 4 m/min i fokusu od -5 mm. Ovi su podaci grafički prikazani na slici 3.7.

Tablica 3.12. S/N omjer za sivu relacijsku ocjenu

Pokus	S/N omjer za sivu relacijsku ocjenu
1	-7,396717156
2	-6,8469147
<b>3</b>	<b>-2,029152815</b>
4	-7,56413612
5	-8,582322873
6	-5,489458111
7	-7,043650362
8	-7,528466119
9	-7,989303591



Slika 3.7. Grafovi glavnih učinaka za S/N omjer

### 3.4. Analiza varijanci ANOVA metodom

ANOVA (engl. *Analysis of Variance*) je statistička metoda koja se koristi za analizu razlika između srednjih vrijednosti više grupa podataka. ANOVA test provjerava hipotezu o jednakosti srednjih vrijednosti između dvije ili više grupa podataka.

ANOVA je provedena kako bi se utvrdio ulazni parametar koji najviše utječe na željene vrijednosti geometrije. Za analizu učinka parametara procesa laserskog zavarivanja (snaga, brzina zavarivanja, položaj fokusa) na ukupnu varijaciju odgovora, korišteni su srednji podaci ukupne sive relacijske ocjene prikazani u tablici 3.13. ANOVA rezultati dati su u tablici 3.14.

Tablica 3.13. Tablica odgovora za sivu relacijsku ocjenu

Ulazni parametar	Razina 1	Razina 2	Razina 3	Raspon	Rang
Snaga	<b>1,673033</b>	1,322415	1,263359	0,409675	2
Brzina zavarivanja	1,289779	1,247235	<b>1,721794</b>	0,474559	1
Fokus	1,378587	1,271818	<b>1,608403</b>	0,336585	3

Tablica 3.14. ANOVA rezultati

ANOVA	DF	SS	MS	F	PC (%)
Snaga	2	0,032694871	0,016347	1,0445319	25,21197
Brzina	2	0,045961356	0,022981	1,468368	35,44214
Fokus	2	0,019722767	0,009861	0,6301006	15,2088
Greška	2	0,031300979	0,01565		24,1371
Ukupno	8	0,129679974			

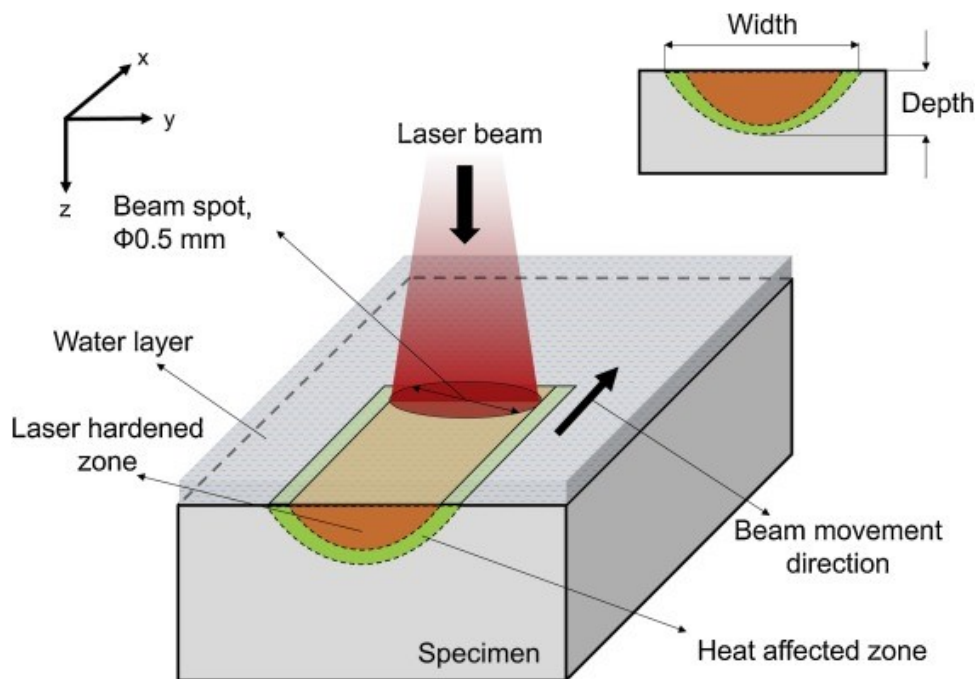
Iz tablice odgovora 3.13 i ANOVA tablice 3.14 slijedi da brzina zavarivanja ima najveći utjecaj na formiranje sive relacijske ocjene (35,44 %), zatim snaga (25,21 %) i na kraju položaj fokusa (15,2 %). U svakom postupku zavarivanja taljenjem, geometrijske vrijednosti zavarenog spoja jako ovise o unosu topline, a unos topline će uvelike ovisiti o brzini zavarivanja, više nego o snazi laserskog snopa.

### 3.5. Toplinska obrada zavarenog spoja laserom

Uključivanje toplinske obrade poznate iz konvencionalnih postupaka zavarivanja, npr. konvencionalno predgrijavanje, zavarivanje na konstantnoj temperaturi, zavarivanje s dogrijavanjem, u visokoproduktivni proces laserskog zavarivanja daje loše rezultate, odnosno poništava glavne prednosti laserskog zavarivanja. Upotrebom dodatnog materijala s ciljem postizanja dobre deformabilnosti metala zavara može se spriječiti nastanak pukotina. Međutim, kod uskih i dubokih zavara na niskolegiranim čelicima za poboljšavanje ne dolazi uvijek do potpunog miješanja materijala pa tada ne postoji direktan utjecaj na tvrdoću u zoni utjecaja topline. Stoga se u mnogo slučajeva zahtijeva dodatna toplinska obrada nakon zavarivanja. Drugi nedostatak je smanjenje brzine zavarivanja zbog korištenja dijela energije laserskog snopa za taljenje dodatnog materijala.

Prilikom upotrebe dodatnog materijala na bazi nikla postoji opasnost dodatnog smanjenja dinamičke izdržljivosti konstrukcije. Toplinska obrada također se može provesti korištenjem dodatnog defokusiranog laserskog snopa, koja se može odvijati u istom procesu s dvije obradne glave ili odvojeno, odnosno da se s istom obradnom glavom još jednom prođe preko zavara, ali sada s defokusiranim snopom manje gustoće snage koji samo zagrijava već napravljeni zavar. Odvojeni proces nije industrijski interesantan, jer su razlike u svojstvima

spojeva, u usporedbi kad je drugi snop integriran u proces zavarivanja, marginalne. Ako se drugi snop dobiva dijeljenjem ukupne snage jednog laserskog izvora, za zavarivanje ostaje na raspolaganju manje snage što uzrokuje smanjenje brzine. Najbolje rješenje je integracija induktora u proces laserskog zavarivanja jer se na taj način ne poništavaju prednosti laserskog zavarivanja. Međutim, induktor kao i dodatni laserski snop također predstavljaju dodatnu investiciju te potrebu uključivanja u proces zavarivanja na način da se ne utječe na pristupačnost zavarenom spoju.



Slika 3.8. Toplinska obrada laserom [10]

### 3.6. Ispitivanje zavarenih spojeva laserom

Funkcija laserom zavarenog konstrukcijskog elementa određuje opseg kontrole kvalitete nakon zavarivanja. Potrebno je uzeti u obzir specifična svojstva postupka laserskog zavarivanja u usporedbi s konvencionalnim postupcima zavarivanja, koja postavljaju posebne zahtjeve za ispitivanje. Laserski zavareni spojevi imaju malu zonu taljenja i vrlo usku zonu utjecaja topline, u kojima se kod zakaljivih čelika još pojavljuje martenzitna struktura visoke tvrdoće. Stoga je potrebno uobičajene metode kontrole s i bez razaranja, s obzirom na njihovu

prikladnost za opisivanje kvalitete laserom zavarenih spojeva, kritički ocijeniti. Metode ispitivanja za određivanje kvalitete zavarenih spojeva u zavarivanju dijele se u dvije grupe:

- Metode za dokazivanje nepravilnosti kojima se mogu utvrditi geometrija i položaj vanjskih (npr. površinske pukotine ili ugorine) i unutarnjih nepravilnost (npr. pore ili pukotine). Ove metode uglavnom pripadaju metodama kontrole bez razaranja.
- Metode za određivanje mehaničkih svojstava, pripadaju u grupu metoda kontrole s razaranjem.

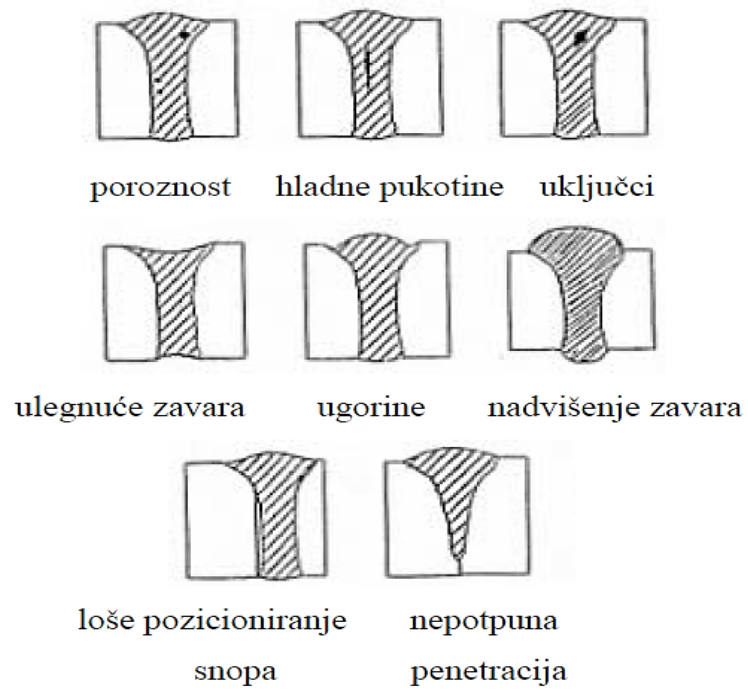
Metode kontrole bez i s razaranjem, koje se koriste za detekciju nepravilnosti odnosno određivanje mehaničkih svojstava u laserom zavarenom spoju navedene su u tablici 3.15.

*Tablica 3.15. Osnovne metode ispitivanja zavarenog spoja*

KONTROLA SA RAZARANJEM	KONTROLA BEZ RAZARANJA
Ispitivanje vlačne čvrstoće	Penetranti
Ispitivanje vrste loma	Magnetske čestice
Savijanje	Vrtložne struje
Ispitivanje udarne radnje loma	Ultrazvučna kontrola
Metalografija	Radiografska kontrola
Ispitivanje tvrdoće	
Ostala ispitivanja	

Nepravilnosti su klasificirane u normi HRN EN 6520-1 u šest grupa: pukotine, šupljine, kruti uključci, nepotpuno taljenje i penetracija, nepravilnosti oblika i druge razne nepravilnosti. Slika 3.9 pokazuje neke tipične nepravilnosti zavarenog laserskog spoja. U normi HRN EN ISO 13919-1 nalaze se smjernice za ocjenjivanje nepravilnosti laserski zavarenih spojeva za čelik, koje služe za klasifikaciju zavara u tri skupine kvalitete: skupina B visoka kvaliteta, skupina C srednja kvaliteta i skupina D niska kvaliteta.





*Slika 3.9. Osnovne nepravilnosti laserski zavarenog spoja*

## 4. Opasnosti korištenja lasera

Uzimajući u obzir da je laser usmjerena svjetlost, odnosno gibanje fotona, može se zaključiti kako laserska zraka sama po sebi nema štetni utjecaj na okoliš. Nadalje, kao i svaka industrija tako i laserska za proizvodnju lasera iskorištava prirodna bogatstva kao što su rude te time direktno štete okolišu. No, uzimajući u obzir ostale industrije, laserska je u tom području zapravo zanemariva. Što se tiče laserskog utjecaja na čovjeka, tu postoji niz situacija u kojima laser itekako može štetno utjecati.

Čak je i prvi laser prepoznat kao potencijalno opasan. Theodore Maiman okarakterizirao je prvi laser kao snagu jednog "Gillette" jer je mogao progorjeti jednu Gillette britvu. Danas je prihvaćeno da čak i laseri niske snage sa samo nekoliko mili vata izlazne snage mogu biti opasni za ljudski vid kada zraka udari u oko izravno ili nakon refleksije od sjajne površine. Na valnim duljinama koje rožnica i leća mogu dobro fokusirati, koherencija i niska divergencija laserske svjetlosti znači da ga oko može fokusirati u iznimno malu točku na mrežnici, što rezultira lokaliziranim opekotinama i trajnim oštećenjima za nekoliko sekundi ili čak manje vrijeme.



*Slika 4.1. Europski znak upozorenja za laser klase 2 i veći [11]*

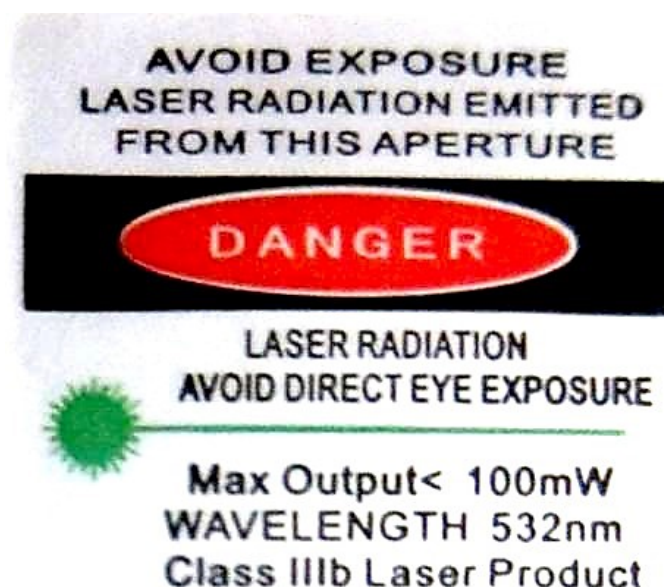
Laseri su obično označeni brojem sigurnosne klase, koji identificira koliko je laser opasan.

Klasa 1 je sama po sebi sigurna, obično zato što se svjetlost nalazi u kućištu, na primjer u CD playerima.

Klasa 2 je sigurna tijekom normalne uporabe; refleks treptaja oka spriječit će oštećenje. Obično do 1 mW snage, na primjer, laserski pokazivači.

Laseri klase 3R (ranije IIIa) obično imaju do 5 mW i uključuju mali rizik od oštećenja oka unutar vremena refleksa treptaja. Gledanje u takvu zraku nekoliko sekundi vjerojatno će uzrokovati oštećenje točke na mrežnici.

Laseri klase 3B (5-499 mW) mogu uzrokovati trenutno oštećenje oka nakon izlaganja.



*Slika 4.2. Američki znak upozorenja za laser klase 3B [12]*

Laseri klase 4 ( $\geq 500$  mW) mogu opeći kožu, a u nekim slučajevima čak i raspršena svjetlost ovih lasera može uzrokovati oštećenje očiju i/ili kože. Mnogi industrijski i znanstveni laseri su u ovoj klasi. Navedene snage odnose se na lasere s kontinuiranim valovima vidljive svjetlosti. Za pulsirajuće lasere i nevidljive valne duljine vrijede druga ograničenja snage. Osobe koje rade s laserima klase 3B i klase 4 mogu zaštititi svoje oči zaštitnim naočalama koje su dizajnirane za apsorpiranje svjetlosti određene valne duljine.

Infracrveni laseri s valnim duljinama duljim od približno 1,4 mikrometra često se nazivaju "sigurnima za oči", jer rožnica ima tendenciju apsorbirati svjetlost na tim valnim duljinama, štiteći mrežnicu od oštećenja. Međutim, oznaka "sigurno za oči" može dovesti u zabludu jer se odnosi samo na kontinuirane valne zrake relativno niske snage. Laser velike snage ili laser s Q-sklopkom na tim valnim duljinama može izgorjeti rožnicu, uzrokujući ozbiljna oštećenja oka, a čak i laseri umjerene snage mogu ozlijediti oko.

Laseri mogu predstavljati opasnost i za civilno i za vojno zrakoplovstvo, jer mogu privremeno omesti ili zaslijepiti pilote. Kamere koje se temelje na uređajima sa spregnutim nabojem mogu biti osjetljivije na laserska oštećenja nego biološke oči.

## 5. Zaključak

Laseri su neizostavni dio svakodnevnice, samim time život bez njih bi bio gotovo nezamisliv. Od samih početaka pa sve do danas, velika se pažnja poklanjala ovoj vrsti tehnologije iz razloga jer se u njima uvidio potencijal za obavljanje specifičnih zadataka koji se drugim metodama, sredstvima ili izvorima energije ne bi mogli ostvariti. Jedan od takvih zadataka jest lasersko zavarivanje. Kako bi smanjili utrošak energije, CO<sub>2</sub> emisije, otpad itd., znanost, tehnologija i industrija teže ka što većoj iskoristivosti sustava i procesa.

U ovom je diplomskom radu obavljeno optimiziranje parametara za lasersko zavarivanje Taguchi temeljenom sivom relacijskom analizom s 3 odziva (gornja širina zavara, širina ZUT-a i dubina prodiranja). Također, Taguchi metodom su određeni S/N (signal/šum) omjeri za svaki ulazni parametar (snaga, brzina zavarivanja i položaj fokusa) i geometrijsku karakteristiku posebno te je sve potkrijepljeno odgovarajućim slikama, tablicama i grafovima. Naposljetku je provedena i analiza varijance (ANOVA) kako bi se utvrdilo koji ulazni parametar većim dijelom utječe na rezultat zavarivanja.

Iz analize proizlaze sljedeći zaključci:

1. Optimizacija parametara laserskog zavarivanja čelika P92 korištenjem Taguchi temeljene sive relacijske analize je pokazala da su za ispitivane uvjete optimalni parametri kako slijedi: snaga laserskog snopa 2,25 kW, brzina zavarivanja 4 m/min i postavljanje žarišne ravnine lasera na -5 mm od površine osnovnog materijala.
2. Analiza varijance (ANOVA) je pokazala među ulaznim parametrima brzina zavarivanja ima najznačajniji doprinos s 35,44 %, slijedi snaga s 25,21 % i položaj fokusa s 15,2 %.

## 6. Literatura

- [1] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/hr/thumb/2/24/Energijske\\_razine\\_1.png/450px-Energijske\\_razine\\_1.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/hr/thumb/2/24/Energijske_razine_1.png/450px-Energijske_razine_1.png)
- [2] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/89/05-07-2015\\_Problem\\_7.64.jpg/300px-05-07-2015\\_Problem\\_7.64.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/89/05-07-2015_Problem_7.64.jpg/300px-05-07-2015_Problem_7.64.jpg)
- [3] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/93/Bohr\\_atom\\_model.svg/600px-Bohr\\_atom\\_model.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/93/Bohr_atom_model.svg/600px-Bohr_atom_model.svg.png)
- [4] <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A1276/datastream/PDF/view>
- [5] <https://mikro.elfak.ni.ac.rs/wp-content/uploads/Vrste-lasera.pdf>
- [6] [https://eksmaoptics.com/out/pictures/generated/product/1/1500\\_1500\\_75/ndyag-crystals\(1\).jpg](https://eksmaoptics.com/out/pictures/generated/product/1/1500_1500_75/ndyag-crystals(1).jpg)
- [7] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/af/Hene-1.png>
- [8] <https://cdn.thefabricator.com/a/laser-welding-technology-for-manual-welding-1625077919.jpg>
- [9] [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRdIbnRc9yu3QH4tcT\\_o12lG979GQ2pLLDA\\_sA&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRdIbnRc9yu3QH4tcT_o12lG979GQ2pLLDA_sA&usqp=CAU)
- [10] Bauer, Branko: doktorski rad "Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje", Sveučilište u Zagrebu, 2006.
- [11] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/16/DIN\\_4844-2\\_Warnung\\_vor\\_Laserstrahl\\_D-W010.svg/1024px-DIN\\_4844-2\\_Warnung\\_vor\\_Laserstrahl\\_D-W010.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/16/DIN_4844-2_Warnung_vor_Laserstrahl_D-W010.svg/1024px-DIN_4844-2_Warnung_vor_Laserstrahl_D-W010.svg.png)
- [12] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4e/Laser\\_label\\_2.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4e/Laser_label_2.jpg)
- [13] Ištoković, Elvira: diplomski rad "Lasери", Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2011.
- [14] "Strojarski priručnik", Bojan Kraut, Tehnička knjiga Zagreb 2009.
- [15] "Termini i definicije kod zavarivanja", dr.sc. Ivan Samardžić, izv. prof., Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2012.
- [16] "Zavarivanje I", izv. prof. dr. sc. Duško Pavletić, Tehnički fakultet Rijeka, 2011.
- [17] Shanmugarajan B., Rishabh Shrivastava, Sathiya P., Buvanashakaran G.: "Optimisation of laser welding parameters for welding of P92 material using Taguchi based grey relational analysis", 2016.
- [18] Valter Sousa Carolo: master's degree "Laser welding heat Distortions on Thin Plates", 2010.

## POPIS SLIKA

Slika 1.1. Energijske razine elektrona.....	1
Slika 1.2. Dijagram energijskih razina elektrona u vodikovom atomu.....	2
Slika 1.3. Smanjenje energijske razine rezultira zračenjem .....	3
Slika 2.1. Osnovni dijelovi lasera .....	4
Slika 2.2. Dijelovi rubinskog lasera .....	7
Slika 2.3. Kristalni štapići Nd:Yag .....	9
Slika 2.4. Shema Nd:YLF lasera.....	10
Slika 2.5. Dijelovi He-Ne lasera .....	13
Slika 2.6. Konstrukcija argonskog lasera.....	15
Slika 2.7. Konstrukcija CO <sub>2</sub> lasera .....	19
Slika 2.8. Prikaz dušikovog lasera s osnovnim dijelovima sklopa .....	20
Slika 3.1. Lasersko zavarivanje tankostjenih ploča od aluminijske legure .....	23
Slika 3.2. Utjecaj zaštitnog plina na oblik bazena zavara .....	25
Slika 3.3. Cijevi izrađene od P92 materijala.....	27
Slika 3.4. Grafovi utjecaja ulaznih parametara na gornju širinu zavara .....	355
Slika 3.5. Grafovi utjecaja ulaznih parametara na dubinu prodiranja.....	366
Slika 3.6. Grafovi utjecaja ulaznih parametara na širinu ZUT-a .....	377
Slika 3.7. Grafovi glavnih učinaka za S/N omjer .....	38
Slika 3.8. Toplinska obrada laserom.....	400
Slika 3.9. Osnovne nepravilnosti laserski zavarenog spoja .....	422
Slika 4.1. Europski znak upozorenja za laser klase 2 i veći .....	433
Slika 4.2. Američki znak upozorenja za laser klase 3B.....	444

## POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Karakteristike rubinskog lasera.....	7
Tablica 2.2. Usporedba karakteristika Nd:YAG i Nd:staklo lasera.....	10
Tablica 2.3. Karakteristike Nd:YLF lasera .....	11
Tablica 2.4. Karakteristike He-Ne lasera .....	14
Tablica 2.5. Karakteristike argonskog lasera .....	16
Tablica 2.6. Karakteristike CO <sub>2</sub> lasera.....	19
Tablica 2.7. Karakteristike dušikovog lasera .....	21
Tablica 3.1. Prednosti i nedostaci zaštitnih plinova.....	25
Tablica 3.2. Mehanička svojstva P92 čelika .....	27
Tablica 3.3. Udjeli pojedinih legirajućih elemenata u P92 čeliku .....	28
Tablica 3.4. Početni parametri za eksperiment .....	28
Tablica 3.5. Ortogonalna tablica parametara zavarivanja.....	30
Tablica 3.6. Geometrijske značajke zavara.....	311
Tablica 3.7. Normalizirane vrijednosti parametara.....	322
Tablica 3.8. Vrijednosti delti za normalizirane vrijednosti.....	322
Tablica 3.9. Sivi relacijski koeficijent .....	333
Tablica 3.10. Siva relacijska ocjena.....	333
Tablica 3.11. S/N omjeri za pojedina mjerenja.....	344
Tablica 3.12. S/N omjer za sivu relacijsku ocjenu.....	37
Tablica 3.13. Tablica odgovora za sivu relacijsku ocjenu .....	38
Tablica 3.14. ANOVA rezultati .....	39
Tablica 3.15. Osnovne metode ispitivanja zavarenog spoja .....	411



## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U ovom diplomskom radu odrađena je optimizacija parametara laserskog zavarivanja čelika P92, čija je primjena relativno specifična s obzirom na karakteristike kao što su velika toplinska otpornost, otpornost na oksidaciju, velika čvrstoća i tvrdoća te mu je glavna primjena u elektranama s fosilnim gorivima. U prvom dijelu rada detaljno je objašnjen rad lasera, osnovni dijelovi, princip rada i glavna podjela lasera. Također, detaljno su opisani laseri koji se najčešće koriste kao što su: Nd:YAG, CO<sub>2</sub>, rubinski, He-Ne, dušikov i drugi laseri. U drugom dijelu rada (eksperimentalnom) provedena je Taguchi temeljena siva relacijska analiza kako bi se optimirali parametri zavarivanja, određen je S/N omjer za pojedine parametre i geometrijske karakteristike te je naposljetku izvedena analiza varijance (ANOVA).

**Ključne riječi:** laser, Nd:YAG laser, CO<sub>2</sub> laser, rubinski laser, frekvencija, dioda, valna duljina, pumpanje, lasersko zavarivanje, optimizacija, Taguchi metoda, siva relacijska analiza, analiza varijance.

## SUMMARY AND KEY WORDS

In this work, the optimization of laser welding parameters of P92 steel was performed, which application is relatively specific considering its characteristics such as high heat resistance, oxidation resistance, high strength and hardness, and its main application is in power plants with fossil fuels. In the first part of the work, the operation of the laser, the basic parts, the principle of operation and the main division of the laser are explained in detail. Also, the most commonly used lasers are described in detail, such as: Nd:YAG, CO<sub>2</sub>, ruby, He-Ne, nitrogen and other lasers. In the second part of the work (experimental), a Taguchi gray relational analysis was performed in order to optimize the welding parameters, the S/N ratio was determined for individual parameters and geometric characteristics, and finally an analysis of variance (ANOVA) was performed.

**Keywords:** laser, Nd:YAG laser, CO<sub>2</sub> laser, ruby laser, frequency, diode, wavelength, pumping, laser welding, optimization, Taguchi method, gray relational analyse, analysis of variance.