

# Zavarivanje laserom

---

**Antolić, Adrian**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:054736>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-17**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Adrian Antolić**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Adrian Antolić

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu te dr. sc. Matiji Bušiću i prof. dr. sc. Branku Baueru na pomoći i sugestijama prilikom izrade završnog rada.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji na razumijevanju i podršci tijekom studija.

Adrian Antolić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
 materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **ADRIAN ANTOLIĆ**

Mat. br.: **0035188772**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ZAVARIVANJE LASEROM**

Naslov rada na engleskom jeziku: **LASER WELDING**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu rada potrebno je shodno literaturnim podacima obraditi primjenu lasera za zavarivanje metala. Usporediti zavarivanje laserom s najčešće upotrebljavanim tehnologijama zavarivanja te navesti primjenu zavarivanja laserom. Obraditi najčešće upotrebljavane vrste lasera za zavarivanje. Posebno obraditi njihovo moguće spajanje u sustav laser-robot.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je na ~~izabranom~~ uzorku odrediti geometriju zavara, vizualno ga ocijeniti te odrediti njegovu strukturu.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zdao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:

- 1. rok: 25. veljače 2016
- 2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
- 3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
- 3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA.....	VI
POPIS KRATICA .....	VII
SAŽETAK .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. PROCES NASTAJANJA LASERSKE ZRAKE .....	2
2.1. Svjetlost .....	2
2.2. Svojstva laserskog zračenja.....	2
2.3. Teorija stimulirane emisije zračenja .....	2
2.4. Energetske razine lasera .....	4
3. VRSTE LASERA .....	7
3.1. Nd:YAG laseri .....	7
3.2. Fiber laseri .....	8
3.3. Diodni laseri .....	10
3.4. Disk laseri .....	11
3.5. CO <sub>2</sub> laseri.....	12
4. TEHNIKE ZAVARIVANJA.....	15
5. PARAMETRI ZAVARIVANJA .....	19
5.1. Razdioba gustoće snage po presjeku snopa – TEM mod .....	19
5.2. Snaga.....	20
5.4. Veličina (promjer) žarišne točke .....	21
5.5. Dubina žarišta .....	24
5.6. Položaj žarišta.....	25
5.7. Unesena energija .....	25
5.8. Zaštitni plin .....	26
5.9. Geometrija spoja.....	29

---

6. LASERSKO ZAVARIVANJE POJEDINIH ČELIKA .....	31
7. ROBOTIZIRANO LASERSKO ZAVARIVANJE .....	36
7.1. Sustav za dostavu laserske zrake .....	36
7.2. Senzori .....	39
8. PREDNOSTI I PRIMJENA LASERA .....	42
9. EKSPERIMENTALNI RAD .....	45
10. ZAKLJUČAK .....	54
11. LITERATURA .....	55

## POPIS SLIKA

Slika 1. Interakcija fotona s elektronom [1] .....	3
Slika 2. Prikaz lasera s tri i četiri energetske razine [1].....	5
Slika 3. Shematski prikaz Nd:YAG lasera [10].....	8
Slika 4. Prikaz optičkog vlakna fiber lasera [21].....	9
Slika 5. Shematski prikaz diodnih lasera [10] .....	10
Slika 6. Prikaz rada disk lasera [7].....	12
Slika 7. Shematski prikaz CO <sub>2</sub> lasera [10].....	14
Slika 8. Oblici impulsa [13].....	15
Slika 9. Povećanje širine i dubine zavara ovisno o trajanju i snazi impulsa [13].....	16
Slika 10. Prag gustoće snage [17] .....	16
Slika 11. Prikaz zavarivanja taljenjem i ključanicom [6] .....	18
Slika 12. Razdioba intenziteta energije kod modova i utjecaj na geometriju zavara [18] .....	20
Slika 13. Brzine zavarivanja konstrukcijskog čelika ovisno o snazi lasera [3].....	21
Slika 14. Shema fokusiranog laserskog snopa [10] .....	22
Slika 15. Usporedba leća žarišnih duljina (f) od 2,5 i 5 inča (63,5 i 127 mm) [5].....	23
Slika 16. Prikaz fokusiranja laserske zrake pomoću zrcala i optike [7] .....	24
Slika 17. Utjecaj položaja žarišta na penetraciju [12].....	25
Slika 18. Prikaz varijanta dovoda zaštitnog plina na mjesto zavarivanja [11] .....	27
Slika 19. Prikaz dobre i loše geometrije spoja [3] .....	29
Slika 20. Dozvoljene tolerancije pripreme sučeljenog i preklopnog spoja [17].....	29
Slika 21. Prikaz interakcije laserskog snopa i osnovnog materijala [9] .....	31
Slika 22. Stupanj apsorpcije laserske svjetlosti kod različitih materijala, u ovisnosti o valnoj duljini $\lambda$ [17] .....	31
Slika 23. Osnovni princip vođenja zrake sustavom zrcala kod CO <sub>2</sub> lasera [7].....	37
Slika 24. Osnovne vrste optičkih vlakna [7] .....	38
Slika 25. Konfiguracije Nd:YAG laserskog sustava s više optičkih vlakana [3].....	38
Slika 26. Fokusiranje laserskog snopa u obradnoj glavi [12] .....	39
Slika 27. Princip rada kapacitivnih senzora udaljenosti [7] .....	40
Slika 28. Princip djelovanja laserskog senzora za praćenja žlijeba [14] .....	40
Slika 29. Snimanje žlijeba CCD kamerom [20] .....	41



Slika 30. Sustav laser- robot.....	45
Slika 31. Prikaz radnog mjesta. ....	47
Slika 32. Stezni dio naprave za zavarivanje. ....	48
Slika 33. Mjerene geometrijske značajke poprečnog presjeka zavarenog spoja .....	50
Slika 34. Poprečni presjek zavarenog spoja pri brzini od 110 cm/min .....	51
Slika 35. Poprečni presjek zavarenog spoja pri brzini od 130 cm/min .....	52
Slika 36. Poprečni presjek zavarenog spoja pri brzini od 150 cm/min .....	52

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Usporedba najčešće korištenih lasera za zavarivanje [14,6].....	14
Tablica 2. Primjena zaštitnih plinova ovisno o vrsti materijala [14] .....	28
Tablica 3. Karakteristike zaštitnih plinova pri laserskom zavarivanju [3].....	28
Tablica 4. Usporedba s ostalim konvencionalnim postupcima [3].....	44
Tablica 5. Kemijski sastav čelika 25 CrMo 4.....	49
Tablica 6. Dimenzije zavara pri brzini od 110 cm/min.....	51
Tablica 7. Dimenzije zavara pri brzini od 130 cm/min.....	52
Tablica 8. Dimenzije zavara pri brzini od 150 cm/min.....	53

## POPIS OZNAKA

$A$	površina poprečnog presjeka zavara	$\text{mm}^2$
$A_F$	površina poprečnog presjeka laserskog snopa u žarištu	$\text{mm}^2$
$b_{kor}$	širina korijena zavara	mm
$b_{ob}$	širina obojenja	mm
$b_{zav}$	širina lica zavara	mm
$b_{zut}$	širina zone utjecaja topline	mm
$C_{ekv}$	ekvivalent ugljika	
$C_{Feqv}$	ekvivalent kroma	
$d_B$	promjer laserskog snopa na ulasku u leću	mm
$d_0$	promjer laserske zrake na izlazu iz rezonatora	mm
$d_F$	promjer žarišne točke	mm
$d_{min}$	minimalni promjer laserskog snopa	mm
$d_s$	promjer otvora vrha sapnice	mm
$d_v$	udaljenost vrha sapnice od radnog komada	mm
$E$	unesena energija	J/mm
$E_1, E_2, E_3$	energetske razine	
$f$	žarišna duljina leće	mm
$f_1$	žarišna duljina leće kolimatora	mm
$F'$	fokusni broj leće	
$K$	koeficijent kvalitete laserskog snopa	
$M^2$	kvaliteta laserskog snopa	
$Ni_{ekv}$	ekvivalent nikla	
$P$	snaga	W
$q$	gustoća snage	$\text{W}/\text{cm}^2$
$Q$	protok zaštitnog plina	l/min
$v$	brzina zavarivanja	cm/min
$z$	položaj žarišta od površine	mm
$Z_R$	Rayleigh-ova dužina	mm
$\lambda$	valna duljina zračenja	$\mu\text{m}$
$\theta_0$	kut divergencije laserskog snopa na izlazu iz rezonatora	mrad
$\theta_F$	kut divergencije laserskog snopa na izlazu iz leće	rad

**POPIS KRATICA**

cw	kontinuirani laserski izvor-način rada lasera
Nd:YAG	Neodimij: Itrij – Aluminij – Granat
pw	impulsni laserski izvor- način rada lasera
TEM	transverzalni elektromagnetski mod
ZT	zona taljenja
ZUT	zona utjecaja topline
Yb:YAG	Iterbij: Itrij – Aluminij – Granat

## SAŽETAK

Uvodni dio teoretskog dijela temelji se na postupku nastajanja laserske svjetlosti. Nakon toga dat je opis pojedinih lasera koji se koriste za zavarivanje te njihove karakteristike. Obrađeni su parametri laserskog zavarivanja te njihov utjecaj na kvalitetu zavara. Konačno na kraju navedena je prednost spajanja u sustav laser-robot i primjene laserskog zavarivanja.

Nakon teoretskog dijela rada uslijedio je eksperimentalni dio koji se bazirao na određivanju geometrije i strukture laserski izvedenih zavara izvedenih različitim brzinama zavarivanja.

Ključne riječi: laser, parametri, robot-laser, primjena, usporedba s konvencionalnim postupcima.

## SUMMARY

The introductory part of the theoretical section is based on the process of generating the laser light. After that the description of the individual lasers which are used for welding and their characteristics are given. Especially, the process parameters of laser welding and their influence on the quality of the weld were discussed. Further more, the advantage of integration in robot-laser welding system and the process industry applications are presented.

After the theoretical part of this thesis the experimental part was conducted, based on the determining of the geometry and structure of the laser welds which are produced with different welding speed.

Keywords: laser, welding parameters, robot-laser welding system, applications, comparison with conventional methods.

## 1. UVOD

LASER je skraćenica od skupa riječi: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, što u prijevodu znači pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. To je emisija fotona koju proizvodi atom ili molekula kada na njih djeluje drugi foton. U odnosu na druge izvore svjetlosti laserska svjetlost je koherentna, usmjerena i monokromatska. Takva svjetlost ima mogućnost fokusiranja na točku malog promjera ( $\ll 1$  mm) što rezultira velikom gustoćom unesene energije. Glavne prednosti ovakve vrste zavarivanja su visoka gustoća snage odnosno mali unos topline, uska zona utjecaja topline, male deformacije, velika brzina zavarivanja, visoka kvaliteta spoja, pristup zavaru samo s jedne strane, visoka fleksibilnost.

Metali su materijali koji su jako reflektirajući za lasersku svjetlost te gubitci energije uslijed refleksije mogu biti veliki jer mnogi materijali reflektiraju preko 90% upadne energije laserskog snopa. Kako temperatura površine raste i dolazi do promjene strukture metala taljenjem refleksija se smanjuje na ~50% i apsorbira se sve više energije.

Laseri za zavarivanje razlikuju se po vrsti aktivnog medija te samim time i valnoj duljini što ovisi o njihovoj primjeni u industriji. Industrijska proizvodnja bilježi rast primjene tehnologije laserskog zavarivanja i njezine integracije sa sustavom robot laser, te predstavlja konkurentnost na tržištu zbog visoke kvalitete i automatizacije procesa.

## 2. PROCES NASTAJANJA LASERSKE ZRAKE

### 2.1. Svjetlost

Pojednostavljeno se može reći da se svjetlost sastoji od fotona, koji se šire kao valovi. Svjetlost se širi kao elektromagnetski val, a smjerovi električnoga i magnetnog polja u elektromagnetskom valu međusobno su okomiti i oba su okomita na smjer širenja vala. Za postizanje laserske svjetlosti bitno je električno polje. Kada oscilirajuće električno polje dođe u interakciju s elektronima u materijalu dolazi do njihovog gibanja. Unesena energija u materijal pretvara se u toplinsku energiju. Za postizanje samo električnog polja potrebno je svjetlost polarizirati tj. omogućiti titranje elektromagnetskih valova samo u jednoj ravnini. U prirodi svjetlost je nepolarizirana, odnosno s istom vjerojatnošću električnog i magnetskog polja. [2]

### 2.2. Svojstva laserskog zračenja

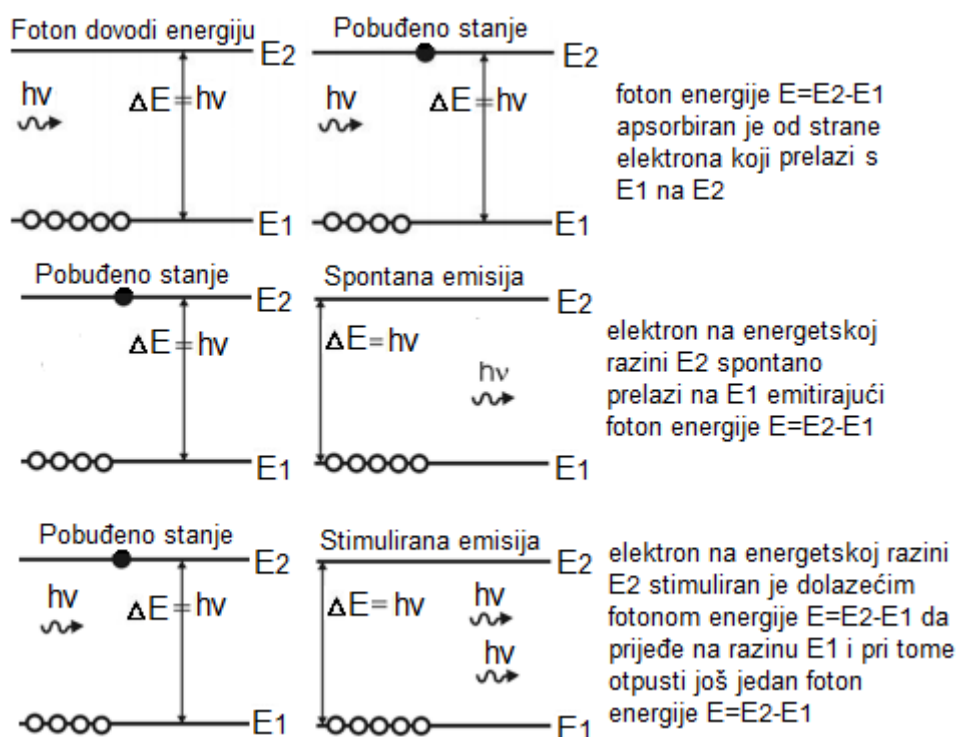
Laser je uređaj koji proizvodi određenu vrstu svjetlosti. Laserska svjetlost je koherentna i to znači da ima jednaku valnu duljinu, amplitudu i fazni pomak. Zbog iste valne duljine ( $\lambda$ ) svjetlost koju proizvodi laser uvijek je iste boje tj. monokromatska. Laserska svjetlost je izrazito usmjerena te odstupanje (rasipanje) laserskog snopa mjeri se u miliradianima (mrad). Male divergencija ( $\theta_0$ ) laserskog snopa postignuta je mnogim prolascima svjetlosti unutar rezonatora prije nego se propusti kroz djelomično propusno zrcalo. Samo zrake koje su poravnate s centrom rezonatora mogu napraviti potreban broj prolaska, i te zrake blago odstupaju kada se otpuste u obliku laserskog snopa. Idealne paralelne zrake ne mogu biti stvorene. Površina žarišne točke ( $A_F$ ) je mala i može iznositi nekoliko mikrometara ( $\mu\text{m}$ ), ovisno o vrsti lasera i žarišnoj duljini leće ili zrcala. Naravno elektromagnetsko zračenje nije moguće koncentrirati u jednu beskonačno malenu točku, čak i s idealnim optičkim sistemom. [2]

### 2.3. Teorija stimulirane emisije zračenja

Laserska zraka proizvodi se fenomenom stimulirane emisije zračenja. Kao prvi uvjet emisije fotona je da laserski medij mora sadržavati energijske razine (energetska razlika između dviju staze atoma) čija energija odgovara energiji emitiranih fotona. Drugi uvjet je da većina atoma (ili molekula) bude u pobuđenom stanju tj. da se

postigne inverzija naseljenosti. Inverzija naseljenosti je neravnotežno stanje u atomu u kojem je naseljenost pobuđenog stanja veća od naseljenosti osnovnog stanja. Tada je vjerojatnost da nadolazeći foton inducira stimuliranu emisiju veća od vjerojatnosti da foton bude apsorbiran. [2]

Na slici 1 prikazani su procesi apsorpcije te spontane i stimulirane emisije.



Slika 1. Interakcija fotona s elektronom [1]

### Apsorpcija

Na početku se atom nalazi u osnovnom stanju. Apsorpcija se događa kada atom apsorbira foton, čija energija je jednaka energiji potrebnoj za prelazak atoma u više energetske stanje, pobuđeno stanje. Energija fotona jednaka je razlici  $E_2 - E_1$ . Energija elektrona atoma u nižoj energetskej razini je  $E_1$ , a energija više energetske razine je  $E_2$ . [2,8]



### **Spontana emisija**

Proces u kojemu atom koji se nalazi u višem energetske stanju spontano prijeđe u nižu energetske razini. Pri tome dolazi do otpuštanja fotona čija je energija jednaka energetskej razlici energetskekih razina. Proces se naziva spontana emisija jer se zbio bez vanjskog utjecaja. Atom će zatim ostati u tom energetskekom stanju određeno vrijeme. Srednje vrijeme života atoma u pobuđenom stanju je  $10^{-6}$  -  $10^{-9}$  s. Za neka pobuđena stanja, ovo srednje vrijeme života može biti i do  $10^5$  puta veće. Takva stanja zovu se metastabilna stanja i važna su za rad lasera. [2,8]

### **Stimulirana emisija**

Atom se nalazi u pobuđenom stanju. Drugi foton koji je jednake energije kao prvi stimulira atom na prelazak u osnovno stanje i tijekom tog procesa emitira dodatni foton. Ovaj proces se naziva stimulirana emisija jer je događaj pobuđen vanjskim fotonom. Vanjski foton nije apsorbiran od strane atoma već on uzrokuje emitiranje oba fotona. Emitirani foton je u potpunosti identičan vanjskom fotonu, tj. imaju istu energiju, fazu, polarizaciju i smjer kretanja. [2,8]

## **2.4. Energetske razine lasera**

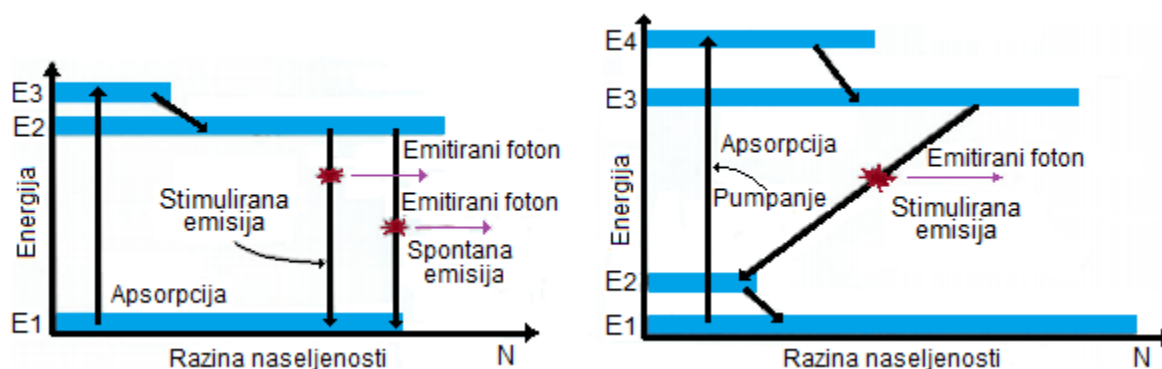
### **Laseri s tri energetske razine**

U početnom trenutku najveći broj atoma je u stanju energije  $E_1$ . Vanjski izvor pobuđuje ih s osnovne  $E_1$  na višu energetskeku razinu  $E_3$ . Na razini  $E_3$  atomi ostaju u prosjeku  $10^{-8}$  s i potom prelaze na razinu  $E_2$  koja je metastabilna. Pri tome prijelazu atoma otpušta se toplinska energija, a ne svjetlost. Vrijeme života metastabilne razine je relativno dugo ( $\sim 10^{-3}$  s), te mnogo atoma ostaje u tome stanju. Ako je pobuda dovoljno snažna, nakon određenog vremena više od 50% atoma će biti u stanju  $E_2$ , postignuta je inverzija naseljenosti između razina  $E_2$  i  $E_1$  i lasersko djelovanje se može odvijati. Laserska svjetlost nastaje pri prijelazu s razine  $E_2$  na  $E_1$ . Nedostatak sustava s tri razine je što donja razina laserskog prijelaza nije prazna. Ako se broj razina poveća na četiri taj nedostatak se može ukloniti. [1]

Princip djelovanja trostupanjskog lasera prikazan je na slici 2, lijevo.

### **Laseri s četiri energetske razine**

Laser s četiri energetske razine ima dodatni energijsku razinu iznad osnovnog stanja  $E_1$ . Metastabilno stanje popunjava se na isti način kao i kod lasera s tri energetske razine, a inverzija naseljenosti se postiže između razina  $E_3$  i  $E_2$ . Dodatni nivo  $E_2$  ima veoma kratko vrijeme života, odnosno donji nivo laserskog prijelaza se veoma brzo prazni što olakšava održanje inverzne naseljenosti. Zbog toga za lasersko djelovanje uz ovakvu shemu nisu potrebne velike snage pumpanja kao kod sustava s tri nivoa. Sustav s četiri razine (slika 2, desno) primjenjuje se kod lasera koji rade u kontinuiranom načinu rada. [1]



Slika 2. Prikaz lasera s tri i četiri energetske razine [1]

## **2.5. Dijelovi lasera**

### **Energija za pobuđivanje medija**

Da bi postigli inverznu populaciju naseljenosti potrebno je dovesti energiju laserskom mediju da se započne sa spontanom i stimuliranom emisijom fotona, koja vodi do pojave optičkog pojačanja tj. laserskog snopa. Energija se ne može dovesti u obliku topline jer bi došlo do zagrijavanja svih atoma i ne bi se postigla inverzna naseljenost. [2]

Ovisno o vrsti laserskog medija primjenjuju se različiti načini energetske pobude. Kao energetska pobuda medija može poslužiti apsorpcija fotona, sudari između atoma koji emitiraju lasersko svjetlo, sudari između samih aktivnih atoma odnosno molekula, rekombinacija slobodnih elektrona, rekombinacija nositelja naboja u poluvodiču,

kemijska reakcija koja stvara pobuđene molekule ili atome. Plinski laseri rade na principu električnog pumpanja gdje se laserski medij smješta na elektronsku zraku, a elektroni mogu uzrokovati inverziju naseljenosti predajom energije atomima pri sudaru. Kod plinskih lasera koristi se metoda električnog pražnjenja naboja gdje se inverzna naseljenost postiže primanjem energije iz električne struje. U laserima s krutim medijem kao laserska pumpa koristi se fokusirano svjetlo sa ksenon bljeskalicom ili laserskom diodom. [2]

### **Optički rezonator**

Optički rezonator sastoji od dva paralelna zrcala. Stupanje refleksije jednog zrcala je ~100%, dok je drugo zrcalo djelomično propusno kako bi se omogućilo da dio svjetlosti napusti rezonantnu šupljinu i stvori laserski snop. Rezonator s ravnim zrcalima osjetljiv je na međusobnu paralelnost zrcala jer jedino ona svjetlost koja putuje skoro okomito na zrcalnu površinu ostaje unutar rezonatora. Da bi svjetlost konstruktivno interferirala mora biti zadovoljen uvjet da je duljina rezonatora jednaka cjelobrojnom umnošku polovine valne duljine svjetlosti. Rezonatori sa sfernim zrcalima koriste se za fokusiranje zrake koja divergira. Foton nastao prvim prijelazom kroz laserski medij koji zadovoljava geometriju uzastopnih refleksija imaće višestruko povećanu vjerojatnost da inducira sljedeći prijelaz zbog svojih brojnih prolaza kroz sistem. Fotoni reagiraju s pobuđenim atomima. Stimulirano emitirani foton koherentan je s prvim i pojačava intenzitet u rezonantnom smjeru i sačinjavaju laserski snop. Prije kontakta s materijalom snop se mora na odgovarajući način modelirati. [1,2]

### **Laserski medij**

U laserskom mediju dolazi do pojačavanja laserska svjetlost svakim prolazom fotona. Pumpanjem (pobudom) iz vanjskog izvora energije dolazi do stvaranja inverzije naseljenost između energetske razina. Dolazi do pojave stimulirane emisije fotona što vodi do stvaranja laserskog snopa. Laserski medij je glavni određujući čimbenik na kojoj valnoj duljini će raditi laser. Postoje mnogo vrsta različitih laserskih medija te svaki ima svoju primjenu. Laserski mediji mogu biti tekućine, plinovi, krute tvari i poluvodiči. [2]

### 3. VRSTE LASERA

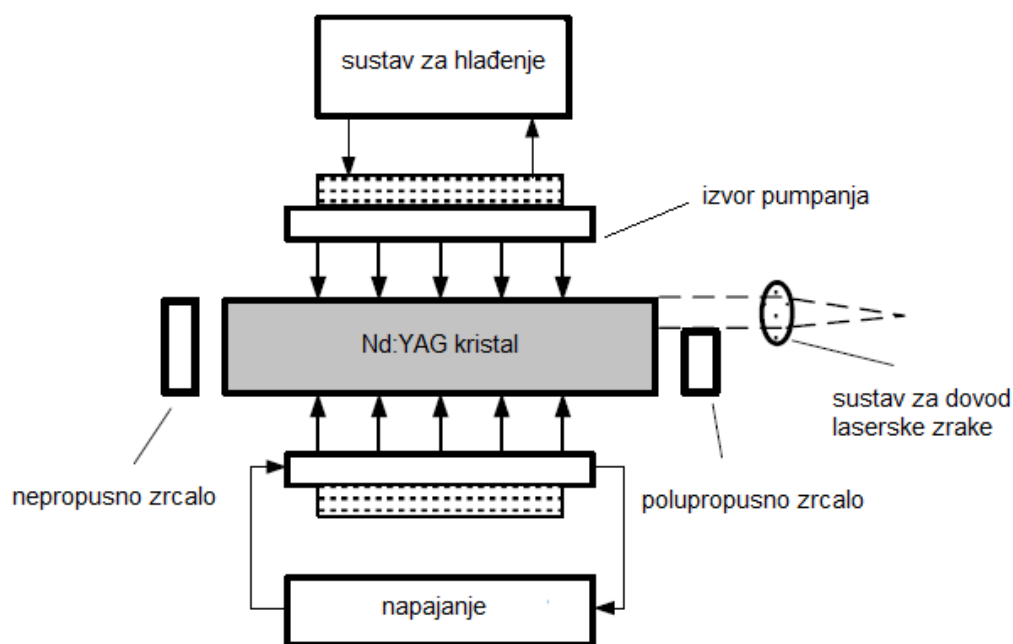
#### 3.1. Nd:YAG laseri

Nd:YAG laser (slika 3) ima četiri energetske razine i najčešće je korišten laser s krutim aktivnim medijem. Nd:YAG laser emitira infracrvenu svjetlost valne duljine  $\lambda=1,06 \mu\text{m}$ . Kruti aktivni medij je prema sastavu kristal granat. YAG označava "Itrij-Aluminij-Granat", a Nd neodimij. Neodimij je aktivni materijal koji se umeće u kristalnu rešetku i zamjenjuje 0,1 - 1% atoma itrija. Umjesto neodimija u kristalnu rešetku može se umetnuti i itrij (Yb) te se takav laser naziva Yb:YAG. Valne duljine oba lasera nalaze se u infracrvenom području, pa tako nisu vidljive golim okom. [6]

Aktivni medij ima oblik šipke promjera nekoliko milimetara i duljine nekoliko stotina milimetara. Pobuđivanje atoma u aktivnom mediju provodi se intenzivnim izvorom svjetla. Ovisno o primjeni lasera koriste se ksenonske ili kriptomne bljeskalice i laserske diode s kojima se povećava energetska učinkovitost lasera. Prednosti diodno pumpanih Nd:YAG lasera ispred pumpanja bljeskalicom je značajno veći stupanj djelovanja i duži vijek trajanja. [6]

Kraća valna duljina ovakve vrste lasera omogućuje dovođenje laserske zrake kroz optičko vlakno i fokusiranje zrake kroz obične staklene leće. To je vrlo pogodno pri robotskom zavarivanju i zavarivanju kompleksnih trodimenzijskih struktura. Kod mnogih metala zavarivanjem s kraćom valnom duljinom poboljšana je apsorpcija laserske zrake (bakar, aluminij) te se manji dio primljene energije odbija, a veći dio apsorbira unutar materijala i pretvara u toplinsku energiju. [2]

U konačnici ne dolazi do značajne interakcije između laserske zrake i nastalih metalnih para prilikom zavarivanja, kao kod CO<sub>2</sub> lasera, i omogućena je zavarivanje s dubljom penetracijom. Kao zaštitni plin može se koristiti argon (Ar) i mješavine s argonom umjesto skupog helija (He). Maksimalna snaga komercijalnih lasera kontinuirane snagom (cw) je do 16 kW. [2,6]



Slika 3. Shematski prikaz Nd:YAG lasera [10]

### Laserske diode

Zbog nižih troškova proizvodnje i visoke učinkovitosti, laserske diode sve se više koriste u krutim laserima kao izvor pumpanja. Laserske diode izrađene su od aluminij-galij-arsenida (AlGaAs) te su poredane simetrično oko površine kristala. Diodno pumpni laseri postižu efikasnost više od 18%, a vijek trajanja dioda je >100 000 h. Visoka efikasnost postiže se zbog dobrog usklađenja između emisija dioda i apsorpcije Nd:YAG kristala. Time je manje termičko opterećenje Nd:YAG kristala, a kvaliteta laserske zrake je bolja. [7]

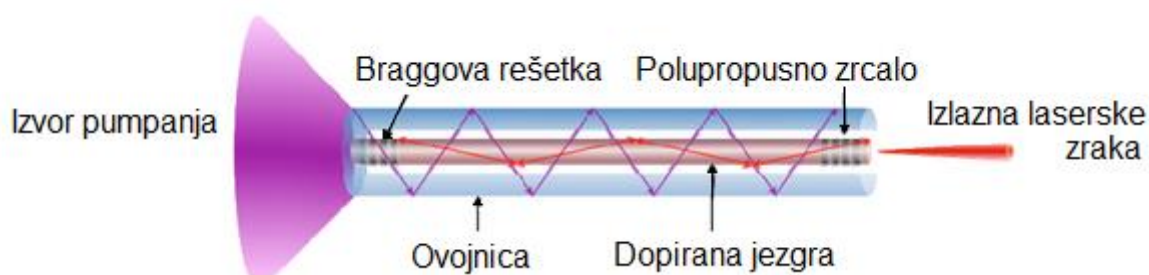
### 3.2. Fiber laseri

Fiber laseri su laseri s velikim stupnjem iskorištenja energije i kvalitetnom laserskom zrakom bez obzira o kakvoj se snazi radi. Sastoje se od dopiranih optičkih vlakna koje se koriste kao aktivni medij i poluvodičke diode koja je izvor pumpanja. Najjednostavnija vlakna imaju dva sloja: jezgra koja vodi svjetlost i ovojnica koja

spriječava gubitke svjetlosti u okoliš i omogućuje potpunu refleksiju. U njima dolazi do laserske emisije. Promjer jezgre je oko 10  $\mu\text{m}$  za jednomodno vlakno, te oko 63  $\mu\text{m}$  za višemodno vlakno. Izrađuje se od silicija i germanija s primjesama aktivnih elemenata iterbija ( $\text{Yb}^{3+}$  - valne duljine od 1,02 - 1,10  $\mu\text{m}$ ) i erbija ( $\text{Er}^{3+}$  - valne duljine od 1,5 do 2,9  $\mu\text{m}$ ). Neodimij se kod optičkih lasera rjeđe koristi jer kod velikih gustoća dolazi do efekta zagušenja.

Oko visokorefleksijskog omotača nalazi se mehanički omotač koji štiti jezgru kako se ne bi slomila. Kako optička vlakna rade na principu totalne refleksije i odlično zaštićuju svjetlost koja se propagira kroz vlakno, postoji mogućnost da se cijeli laserski rezonator napravi od optičkih komponenata kao što su Braggova rešetka i optički razdjelnik. Braggova rešetka zamjenjuje zrcala tako da propušta određene valne duljine, a druge zaustavlja. Braggova rešetka se nalazi direktno u dopiranom optičkom vlaknu. [1,2,6,19]

Prikaz strukture dopiranih optičkih vlakna prikazan je na slici 4.



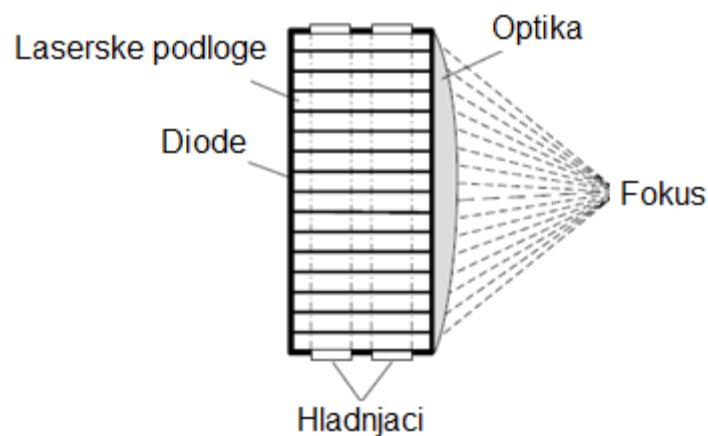
Slika 4. Prikaz optičkog vlakna fiber lasera [21]

Dostupni su jednomodni optički laseri s izlaznom snagom većom od 3kW pri 30% iskoristivosti, dok višemodni laseri postižu snagu do 50kW. S obzirom na ostale lasere, Nd:YAG,  $\text{CO}_2$ , disk laser, fiber laseri omogućuju fokusiranje laserske zrake na manji promjer sa znatnom većom snagom.

Najveći problem kod lasera s krutim medijem bio je odvođenje topline, te je snaga lasera samim time bila ograničena. Kod fiber lasera vlakna su dugačka i tanka te odvođenje topline je znatno poboljšano. Valna duljina laserske zrake dobro je apsorbirana od strane metala. Optički medij ima veliki spektar pojačanja, dopuštajući ugađanje valne duljine i generiranje jako kratkih pulseva. [1,2,6,19]

### 3.3. Diodni laseri

Diodni laser, slika 5, je mali poluvodički uređaj koji koristi električnu struju kao izvor energije. Valna duljina diodnih lasera je  $0,97 \mu\text{m}$ . Tipični emiter diodnih lasera može proizvesti tek nekoliko vata (W) izlazne snage, ali spajanjem emitera zajedno na jednu monolitnu podlogu izlazna snaga može iznositi 100W. Podloge (eng. bars) se kombiniraju u horizontalne i vertikalne sustave gdje izlazna snaga iznosi nekoliko kilovata (kW). Efikasnost iznosi do 50%. [7, 22]



Slika 5. Shematski prikaz diodnih lasera [10]

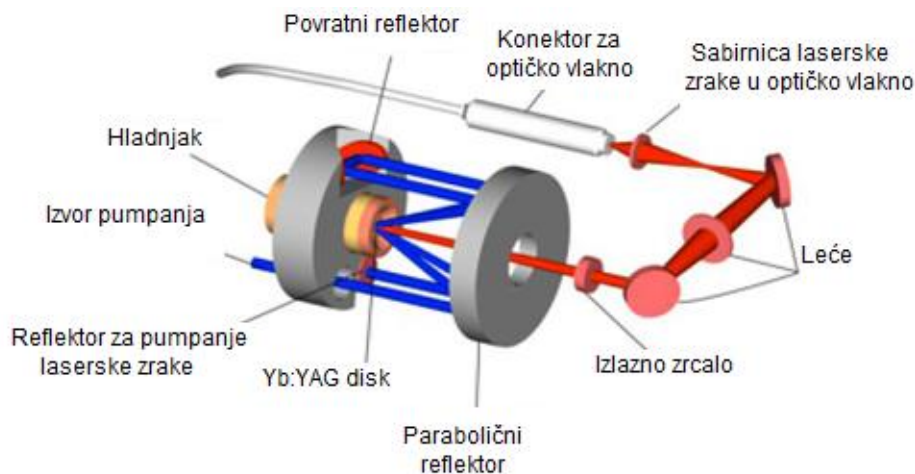
Zbog inherentne optičke karakteristike diodnih lasera svjetlost se na izlazu raspršuje, te nije moguće fokusirati laserski snop u malu točku. Tada se zavarivanje odvija na principu ključanice. Zavarivanje taljenjem moguće je postići integracijom diodnih lasera s optičkim vlaknima kako bi dobili željeni promjer žarišne točke. Zbog svoje male dimenzije diodni laseri mogu se montirati na robotske ruke i kretati relativno brzo. Sustav je fleksibilan zbog korištenja optičkih vlakna za dovođenje laserskog snopa te omogućava primjenu i u teško dostupnim mjestima. [7, 22]

### 3.4. Disk laseri

Disk laseri (slika 6) su kruti laseri valne duljine 1,03  $\mu\text{m}$ , a aktivni medij sastoji se od tankog Yt:YAG diska. Dopirani su atomima aktivnog elementa iterbija (Yb). Atomi iterbija se zbog svoje veličine bolje uklapaju u kristalnu rešetku itrij-aluminij-granita od neodimija te time omogućuju veće dopiranje osnovnog materijala. Dok su Nd:YAG laseri dopirani sa 0,3 do maksimalno 1% neodimija, Yb:YAG laseri sadrže i do 30% aktivnog elementa. Dopiranje s većom količinom neodimija dovelo bi do nastanka naprezanja u kristalnoj rešetci. Stoga, puno manji Yb:YAG kristal može primiti puno više laserskih aktivnih iona. Zbog svoje geometrije kao disk zauzima puno manje mjesta što je pogodno s tehničke strane. [7]

Problem koji se javljao kod Nd:YAG lasera bio je nizak stupanj efikasnosti, zagrijavanje medija te potrebno hlađenje. Hlađenje se odvija s vanjske strane medija i dolazi do nastanka parabolne temperaturne krivulje, paralelne s laserskom zrakom, što dovodi do odstupanja laserske zrake i smanjenje njene kvalitete. Zbog tog problema razvili su se disk laseri. Umjesto štavnog medija koji je imao malu površinu u odnosu na volumen, tanki kristalni disk koristi se kao aktivni medij. Promjer diska je nekoliko milimetara ovisno o izlaznoj energiji i debljine od 100 do 200  $\mu\text{m}$ . Disk je prevučen reflektirajućom površinom i povezan sa sustavom za hlađenje te se ponaša kao rezonator u krutim laserima. Vrlo mala debljina diska (velika površina u odnosu na mali volumen) u dodiru je s hladnjakom, i s obzirom na to da je promjer izvora laserske zrake korištene za pumpanje kristala puno veća nego debljina diska postiže se aksijalno hlađenje. Aksijalni raspored temperature smanjuje raspršivanje i stvara kvalitetnu lasersku zraku. [7,23]





Slika 6. Prikaz rada disk lasera [7]

### 3.5. CO<sub>2</sub> laseri

CO<sub>2</sub> laser je plinski laser koji emitira svjetlost valne duljine 10,6 μm. Optički rezonator sastoji se od dva zrcala između kojih se nalazi cijev kroz koju struji laserski plin tj. plinska mješavina koja omogućuje stvaranje laserske zrake. Plinska mješavina sastoji se od ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) 10 do 20%, dušika (N<sub>2</sub>) 10 do 20% i helija (He). Za neke vrste lasera, potrebno je u plinsku mješavinu dodati male količine ugljikovog monoksida (CO), helija (H<sub>2</sub>) ili ksenona (Xe). Sastav laserske plinske mješavine ovisi o vrsti lasera, snazi, načinu rada i proizvođaču. Nečistoće u laserskoj plinskoj mješavini mogu stvoriti probleme u radu CO<sub>2</sub> lasera i tako smanjiti izlaznu snagu, destabilizirati električni naboj, povećati potrošnju laserskih plinova i oštetiti optiku kod koje popravci znaju biti vrlo skupi. [7,12]

Za ostvarenje laserske reakcije aktivni medij CO<sub>2</sub> stimuliran je električnim pražnjenjem. Tijekom tog procesa molekule dušika sudarom predaju energiju CO<sub>2</sub> molekulama. Pumpanje se izvodi pomoću visokog napona od 30 kV, a molekule plina CO<sub>2</sub> pobuđuju se na više energetske stanje. Prijelazak s višeg energetske stanja pobuđenih molekula CO<sub>2</sub> u niže energetske stanje popraćen je emisijom fotona, te dolazi do stvaranja laserske zrake. Sudarom s atomima helija, koji čine većinski dio plinske

mješavine, CO<sub>2</sub> molekule vraćaju se u početno stanje te ciklus kreće ispočetka. Za ovaj proces potreban je tlak od 100 do 250 hPa, a višak energije koji ne može biti upotrebljen pretvara se u toplinsku energiju i odvodi se iz sustava. Laser može efikasno raditi samo na temperaturama manjim od 200 °C. [7]

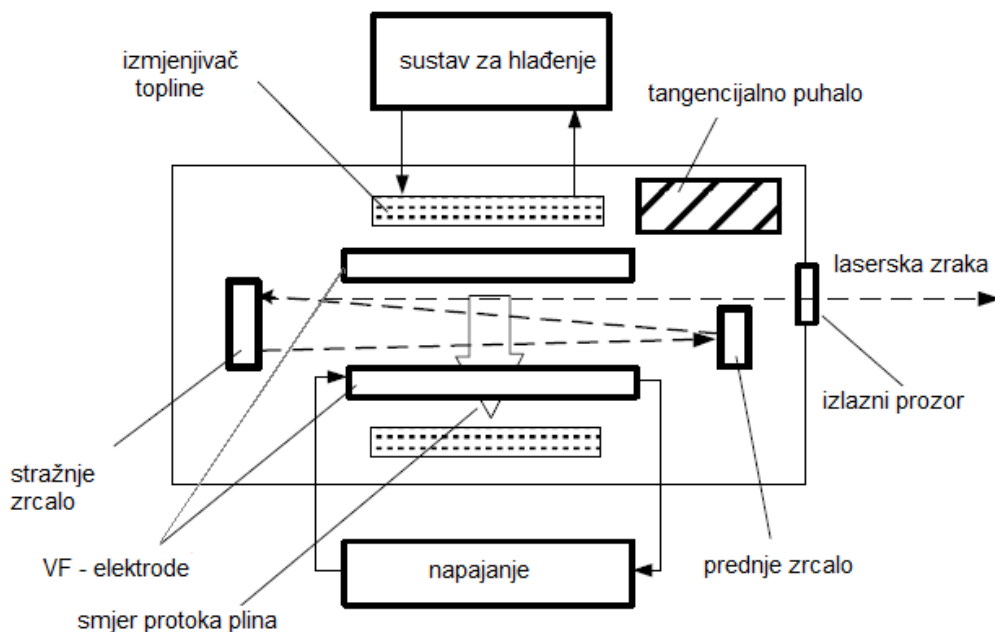
#### Konstrukcija lasera razlikuje se po:

- vrsti protoka plina: - neprotočni
  - kontinuirani protok - uzdužno strujanje (uzdužni laser)
  - poprečno strujanje (poprečni laser)
  
- vrsti energije : - pobuđivanje istosmjernom strujom
  - visokofrekvencijsko pobuđivanje

Efikasnost otprilike iznosi 5 do 20%, a maksimalan snaga današnjih CO<sub>2</sub> lasera iznos i do 50 kW. Laserski snop kod CO<sub>2</sub> lasera mora se voditi sustavom zrcala. Takav sustav je puno kompleksniji i zahtjeva usklađivanje zrcala na putu laserskog snopa i održavanje zrcala čistima. Problem se javlja prilikom štrcanja metala kod zavarivanja jer se ne može staviti dodatno zaštitno staklo kako kod ostalih lasera. Staklena jezgra optičkog vlakna nepropusna je za svjetlost njegove valne duljine, a materijal jezgre optičkog vlakna koji bi bio propustan za snop CO<sub>2</sub> lasere još nije pronađen. [6,7]

Zbog svoje valne duljine prilikom zavarivanja metala CO<sub>2</sub> laserom javlja se refleksija laserske zrake. Zbog toga kod CO<sub>2</sub> lasera izvodi se zavarivanje efektom ključanice. Rastaljeni metal puno bolje apsorbira lasersku zraku te ne dolazi do refleksije. Temperatura unutar ključanice iznosi od 6000 - 10000 K, a nastala plazma apsorbira dio laserske zrake, raspršuje ju i defokusira što ograničava dubinu penetracije. Zaštitni plin, helij, s visokim ionizirajućim potencijalom koristi se kako bi raspršio nastalu plazmu i omogućio nesmetan prolaz laserske zrake. [6,7]

Na slici 7 prikazan je princip rada CO<sub>2</sub> lasera.

Slika 7. Shematski prikaz CO<sub>2</sub> lasera [10]

Prikaz pojedinih karakteristika najčešće upotrebljivanih lasera za zavarivanje prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Usporedba najčešće korištenih lasera za zavarivanje [14,6]

Parametar	Vrijednost	Naziv lasera				
		CO <sub>2</sub>	Nd:YAG	Diodni	Fiber	Disk
Valna duljina	μm	10.06	1.06	0.97	1.07	1,07
Efikasnost	%	5 - 20	L P: 3 DP: 10-20	30-60	20-30	15
Izlazna snaga	kW	45	6-16	4-10	30	4
Kvaliteta zrake (BPP)	mm · mrad	3-8	1- 25	>50	1 - 4	8
Promjer žarišta	μm	200-600	400-600	>800	50	100
Prijenos zrake		zrcalo	optička vlakna	optička vlakna	optička vlakna	optička vlakna
Površina radnog prostora	m <sup>2</sup>	3	6	1	1	4
Investicijski trošak prema snazi	\$/W	35-120	100-120	60-90	80	100

## 4. TEHNIKE ZAVARIVANJA

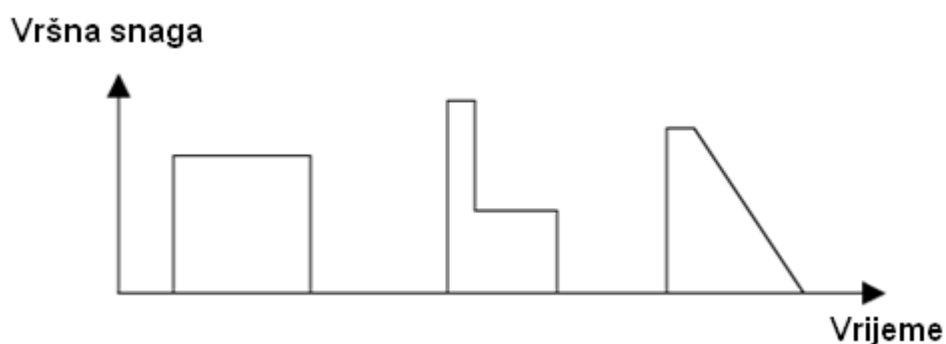
Lasersko zavarivanje je postupak zavarivanja s visokom gustoćom snage ( $10^5 - 10^9$  W/cm<sup>2</sup>) u odnosu na druge konvencionalne postupke. U krutom stanju metali su jako reflektirajući za laserske zrake (>90% refleksije), a taljenjem metala stupanj refleksije se znatno smanjuje na <50%.

Zavarivanje se izvodi u atmosferi zaštitnog plina. Laserski snop može biti kontinuirani (cw) i impulsni (pw), ovisno o zahtjevima konstrukcije, materijalu, tipu i geometriji spoja.

**Kontinuirani način rada:** emitira se laserska zraka kontinuirane snage tijekom procesa zavarivanja.

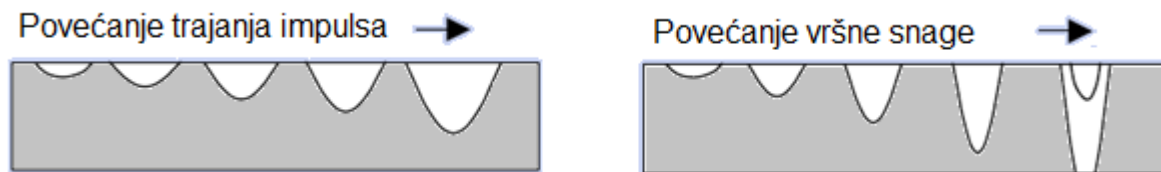
**Impulsni način rada:** moguće je ostvariti vrlo velike vršne snage u kratkim vremenskim intervalima. Trajanje impulsa može iznositi od nanosekunde ( $10^{-9}$  s) do femtosekunde ( $10^{-15}$  s).

Na slici 8 prikazani su najčešće korišteni impulsni oblici. Prvi, pravokutni oblik koristi se za prevladavanje početne refleksije visoko reflektirajućih materijala kao što su bakar (Cu) i aluminij (Al), a druga dva za sprječavanje toplinskih naprezanja materijala osjetljivih na pukotine. Energija po impulsu jednaka je umnošku vršne snage impulsa i širini (trajanju) impulsa.[13]



Slika 8. Oblici impulsa [13]

Vršna snaga određuje dubinu penetracije, a vrijeme impulsa određuje unos topline u materijal. Ta svojstva prikazana su na slici 9.

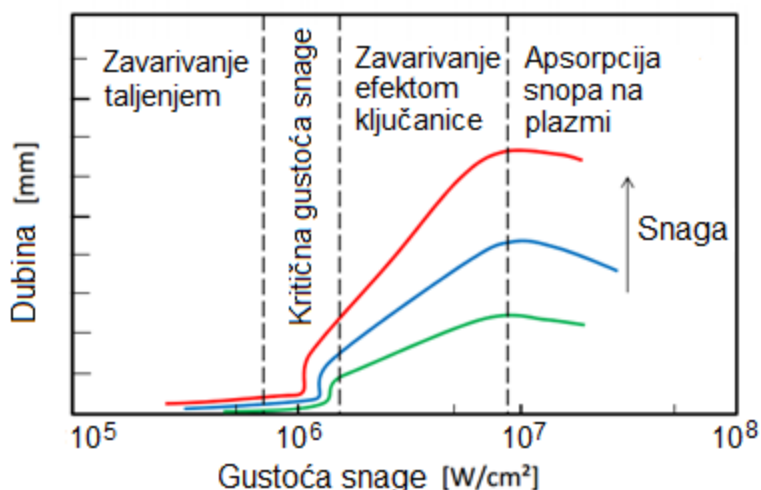


Slika 9. Povećanje širine i dubine zavara ovisno o trajanju i snazi impulsa [13]

Zavarivanje se uglavnom izvodi bez dodatnog materijala, a postupak se dijeli na :

- zavarivanje protaljivanjem – efekt ključanice
- zavarivanje taljenjem

Prijelaz praga gustoće snage i promjena dubine penetracije ovisno o snazi laserskog snopa prikazani su na slici 10.



Slika 10. Prag gustoće snage [17]

### **Zavarivanje protaljivanjem**

U području žarišta snopa metal se zagrijava do vrlo visokih temperatura te dolazi do isparavanja dijela metala. Na mjestu udara snopa trenutno se stvara duboki krater (ključanica) promjera 0,2 do 0,1 mm, ovisno o postupku. Oko kratera dolazi do taljenja metala kao što je prikazano na slici 11, desno. Nastanak kratera popraćen je nastankom plazme. Kada se formira ključanica penetracija se značajno poveća zbog

višestruke refleksije i apsorpcije laserske zrake u krateru, te dolazi do predaje topline radnom komadu reemitiranjem apsorbiranog laserskog zračenja. [6,16]

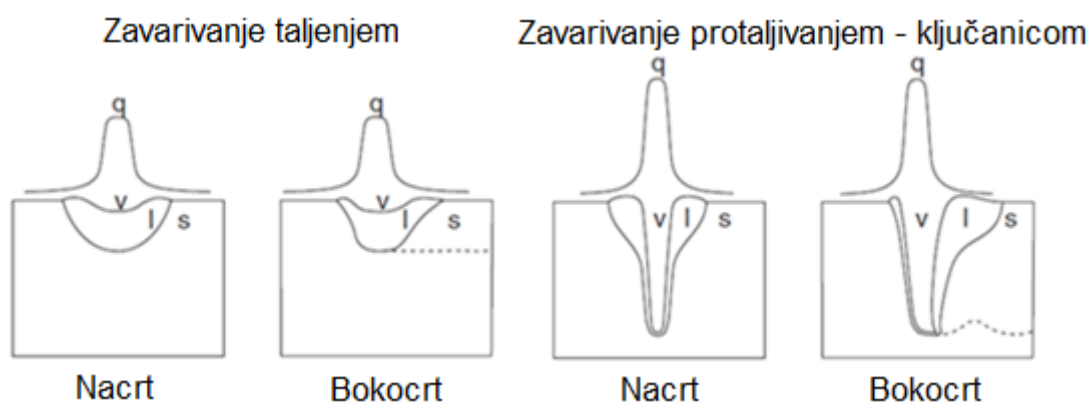
Plazma u ključanici ima visoku temperaturu,  $\sim 2000$  K za Nd:YAG i  $\sim 6000-10000$  K za CO<sub>2</sub> lasersko zavarivanje. Pomicanjem laserskog snopa, krater se popunjava talinom, dolazi do njezinog skrućivanja iza snopa i nastajanja zavara. Talinu na rubu kratera drži površinska napetost, viskoznost i sila gravitacije. Zavarivanje efektom ključanice javlja se kod gustoće snage  $>10^6$  W/cm<sup>2</sup>. Kada gustoća snage prelazi  $10^7$  W/cm<sup>2</sup> dolazi do prekomjernog štrcanja zbog povećanja tlaka metalnih para, a metal se tali u nekoliko mikrosekundi. [6,16]

Iznad određenog praga gustoće snage dolazi do nastanka oblaka plazme iznad kratera. Oblak plazme može apsorbirati lasersku zraku, raspršiti ju i defokusirati što smanjuje penetraciju. Ako je apsorpcija snopa na plazmi velika može doći do nestajanja kratera. Problem apsorpcije zračenja javlja se kod CO<sub>2</sub> lasera tj. kod lasera velike valne duljine. U tom slučaju koristi se zaštitni plin, najčešće helij, kako bi otklonio oblak plazme. [6,16]

Nd:YAG laser ima 10 puta kraću valnu duljinu od CO<sub>2</sub> lasera. Svojestvo kraće valne duljine je viši prag gustoće snage iznad kojeg se javlja plazma i mala odnosno zanemariva apsorpcija na oblaku plazme. To znači da se kod Nd:YAG lasera utjecaj apsorpcije snopa na oblaku plazme, pri gustoćama snage uobičajenim za obradu materijala od približno  $10^6$  W/cm<sup>2</sup>, može zanemariti. [6,16]

### **Zavarivanje taljenjem**

Događa se kada je gustoća snage snopa na površini materijala mala ( $<10^6$  W/cm<sup>2</sup>) i ne dolazi do protaljivanja, slika 11 lijevo. Točna vrijednost praga gustoće snage ovisi o vrsti lasera i vrsti materijala. To je stabilniji proces te ne dolazi do zarobljavanja mjehurića plazme prilikom skrućivanja zavara. Toplina se unosi u usko područje metala, a deformacije metala su manje nego kod konvencionalnih postupaka. Zavari su plosnati s omjerom dubine i širine 1 do 1,5. [6]



Slika 11. Prikaz zavarivanja taljenjem i ključanicom [6]  
q-unesena toplina; v-metalne pare; l- rastaljeni metal; s-krti metal

## 5. PARAMETRI ZAVARIVANJA

### 5.1. Razdioba gustoće snage po presjeku snopa – TEM mod

Mod i intenzitet laserskog snopa određuju raspodjelu gustoće snage po poprečnom presjeku snopa. Prije kontakta s materijalom snop se mora na odgovarajući način modulirati. Modulacija je proces promjene amplitude, intenziteta, frekvencije i faze laserskog snopa i razlikujemo unutarnju (unutar laserske komore) i vanjsku (vanjske elektrooptičke komponente) modulaciju. Fokusiranje laserske zrake funkcija je transverzalnog elektromagnetskog moda (TEM). Indeksi (npr. „00“, „01“, „11“) označavaju način raspodjele energije u snopu. TEM<sub>00</sub> je mod s najvećom mogućnošću fokusiranja laserske zrake na najmanju površinu jer ima oblik Gaussove krivulje. To je najidealnija razdioba laserske energije i njome su omogućena najbrža zavarivanja i najuži zavari. Mod se označava s oznakom  $M^2$ , a TEM<sub>00</sub> iznosi  $M^2=1$ . Za laserske zrake manje kvalitete  $M^2$  ima vrijednost  $M^2>1$ . [3,12]

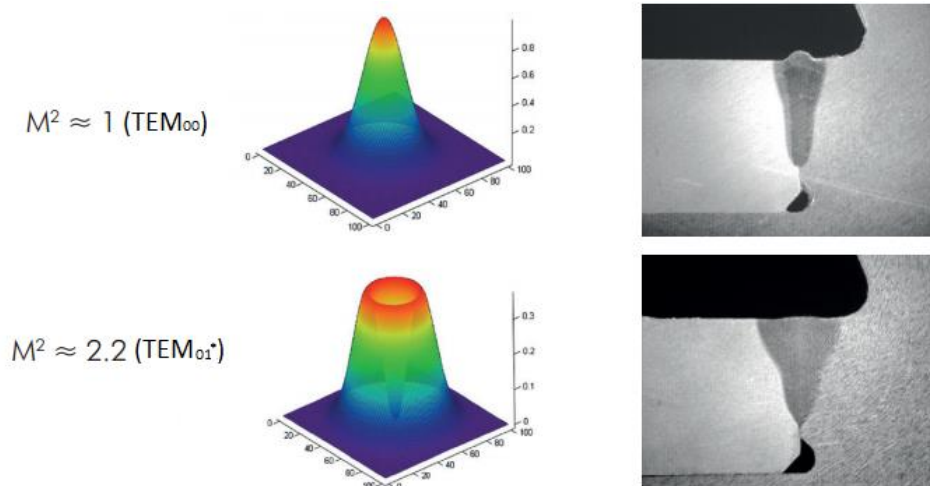
Utjecaja oblika laserske zrake na zavar prikazan je na slici 12.

Divergencija laserske zrake na izlazu iz rezonatora ( $\theta_0$ ) računa se prema izrazu 5.1. Proporcionalna je vrijednosti  $M^2$  i valnoj duljini laserskog zračenja ( $\lambda$ ), a obrnuto proporcionalna promjeru laserske zrake  $d_0$  na izlazu iz rezonatora. [12]

$$\theta_0 = \frac{4M^2\lambda}{d_0\pi} \quad (5.1)$$

Modove s većom vrijednosti i višemodne sustave karakterizira veća divergencija laserske zrake tj. veće rasipanje energije. Kvaliteta razdiobe ovisi o sustavu za modeliranje i snazi snopa. [3]





Slika 12. Razdioba intenziteta energije kod modova i utjecaj na geometriju zavora [18]

## 5.2. Snaga

Snaga lasera podešava se prema debljini i vrsti materijala. Povećanjem snage, s obzirom na to da su ostali parametri jednaki (raspodjela snage, veličina žarišne točke, itd.), omogućeno je brže zavarivanje i zavarivanje s većom penetracijom. Snaga laserskog snopa dovedena na jedinicu površine naziva se gustoća snage ( $q$ ) ( $W/cm^2$ ). Što je veća gustoća snage veće je temperatura materijala te omogućeno brže taljenje i isparavanje materijala. Fokusiranjem i defokusiranjem laserske zrake mijenja se gustoća snage. [3]

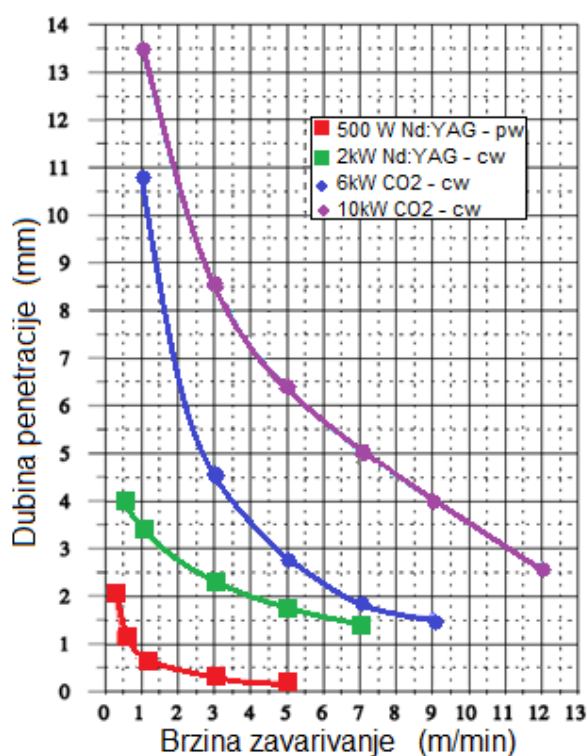
## 5.3. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja je brzina pomicanja radnog komada ili glave za zavarivanje. Ovisi o snazi lasera, promjeru žarišne točke, vrsti materijala, vrsti zavarenog spoja i vrsti zaštitnog plina (posebno kod zavarivanja efektom ključanice). Veća brzina zavarivanja ima i dodatnu prednost, a to je slabije isparavanje legiranih elemenata, a time i bolja struktura u zoni taljenja. Prevelike brzine zavarivanja dovode do nedovoljne penetracije i poroznosti zbog onemogućavanja otplinjavanja, a kod vrlo velikih brzina dolazi do pojave „humping-efekta“ tj. valovitog poskakivanja nadvišenja zavora.

Zahtjevi za kvalitetom proporcionalno rastu s brzinom zavarivanja. Premale brzine zavarivanja, za određenu debljinu lima rezultiraju pojavom pora i oksidacije zbog presporog hlađenja taline. Pore se javljaju u korijenu zavara i više ih je s porastom penetracije. U slučaju potpunog protaljivanja opasnost od pojave pora je minimalna. [14, 12]

Za vrlo niske brzine zavarivanja može se javiti, ovisno o valnoj duljini lasera, nedovoljna penetracija zbog intenzivnog stvaranja oblaka plazme iznad zavara, koji apsorbira laserske zrake. [10].

Na slici 13 prikazan je utjecaj snage lasera u ovisnosti s dubinom penetracije i brzinom zavarivanja.



Slika 13. Brzine zavarivanja konstrukcijskog čelika ovisno o snazi lasera [3]

#### 5.4. Veličina (promjer) žarišne točke

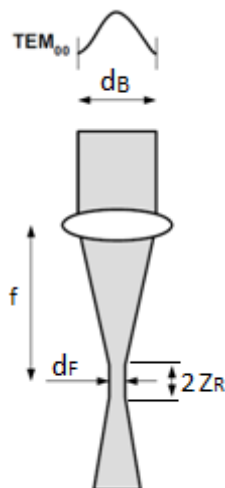
Postupak zavarivanja laserom zahtjeva fokusiranje laserske zrake velike snage na malu površinu da bi se ostvarila visoka gustoća snage potrebne za zavarivanje. Žarište je mjesto na kojem laserski snop ima najmanji promjer ( $d_F$ ) i dubinu žarišta ( $2Z_R$ ) (slika

14). Promjer žarišne točke proporcionalan je žarišnoj duljini leće ( $f$ ) i valnoj duljini laserske zrake i ovisi o promjeru snopa koji ulazi u leću ( $d_B$ ). Žarišna duljina leće ( $f$ ) je jednaka udaljenosti s koje se može provesti zavarivanje. [3]

Promjer žarišta može se odrediti preko formule 5.2. [10]

$$d_F = \frac{1.27f\lambda}{d_B} \quad (5.2)$$

- $f$  - žarišna duljina leće (mm)
- $\lambda$  - valna duljina laserske zrake ( $\mu\text{m}$ )
- $d_B$  - promjer snopa na ulazu u leću (mm)

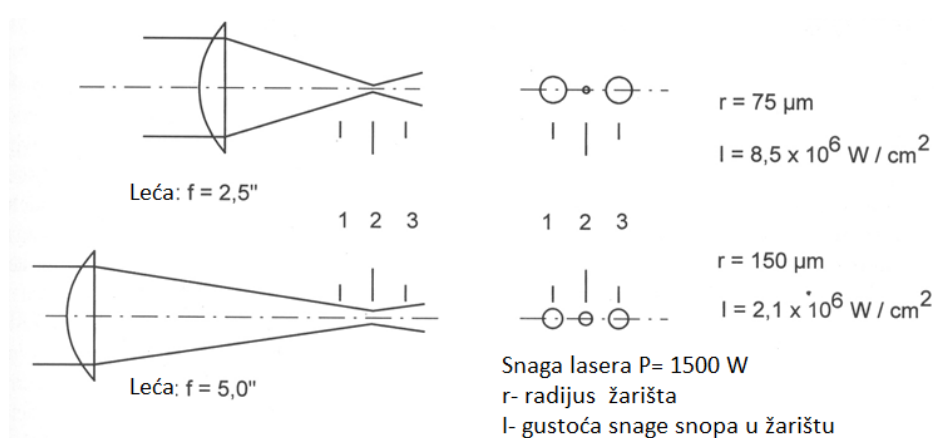


Slika 14. Shema fokusiranog laserskog snopa [10]

Veličina (promjer) žarišne točke ima veliki utjecaj na geometriju zavora i proces zavarivanja. Iako žarišne točke manjeg promjera daju veću gustoću energije, javlja se problem kod sučeljenih spojeva koji moraju biti izrazito točno namješteni. Kvaliteta zavora na površini je bolja za veću žarišnu točku i takvi zavori su zaobljeni. Preporučeni promjer žarišne točke je 30% od ukupne širine zavora. [14]

Leća s kraćom žarišnom duljinom (slika 15, gore) fokusira snop na manji promjer žarišta, što daje veću gustoću snage, ali zbog svoje manje dubine žarišta ograničene su u upotrebi. Upotrebljavaju se kada je potrebno zavariti male dijelove ili reflektirajuće

materijale koji zahtijevaju veću gustoću snage. Problem kod tih leća je lako oštećenje štrcanjem metala i metalnim parama, a cijena leća je visoka. Stoga mnogi proizvođači nude dodatne zaštitne leće koje obavještavaju operatera kada je leća oštećena i kada se treba zamijeniti. Leće veće žarišne duljine (slika 15, dolje) daju veći promjer žarišne točke i imaju veću dubinu žarišta tj. daju veću penetraciju. Veća dubina žarišta omogućuje veće tolerancije udaljenosti između glave i radnog komada. One se zbog toga i zbog manjeg oštećenja češće upotrebljavaju. [6,3]



Slika 15. Usporedba leća žarišnih duljina ( $f$ ) od 2,5 i 5 inča (63,5 i 127 mm) [5]

Prilikom zavarivanja reflektirajućih materijala može se javiti povratna refleksija laserske zrake u optiku te oštetiti laser. Glava lasera se stoga naginje za kut od  $5^\circ$  kako se reflektirana zraka ne bi direktno vratila u sustav. [6]

Kod mnogih industrijskih lasera promjer laserskog snopa nije konstantan i mijenja se s izlaznom snagom lasera što rezultira promjenom žarišne točke. Stoga se koriste senzori za kontrolu položaja žarišta, odnosno udaljenosti leće od radnog komada jer svaki pomak od namještene vrijednosti odražava se na pogoršanje kvalitete zavara.

## 5.5. Dubina žarišta

Laserski snop prolazi optiku za fokusiranje dok ne postigne minimalni promjer. Snop je blizu minimalnog promjera na određenoj udaljenosti prije i iza žarišta. Izvan dubine žarišta snop počinje značajno divergirati.

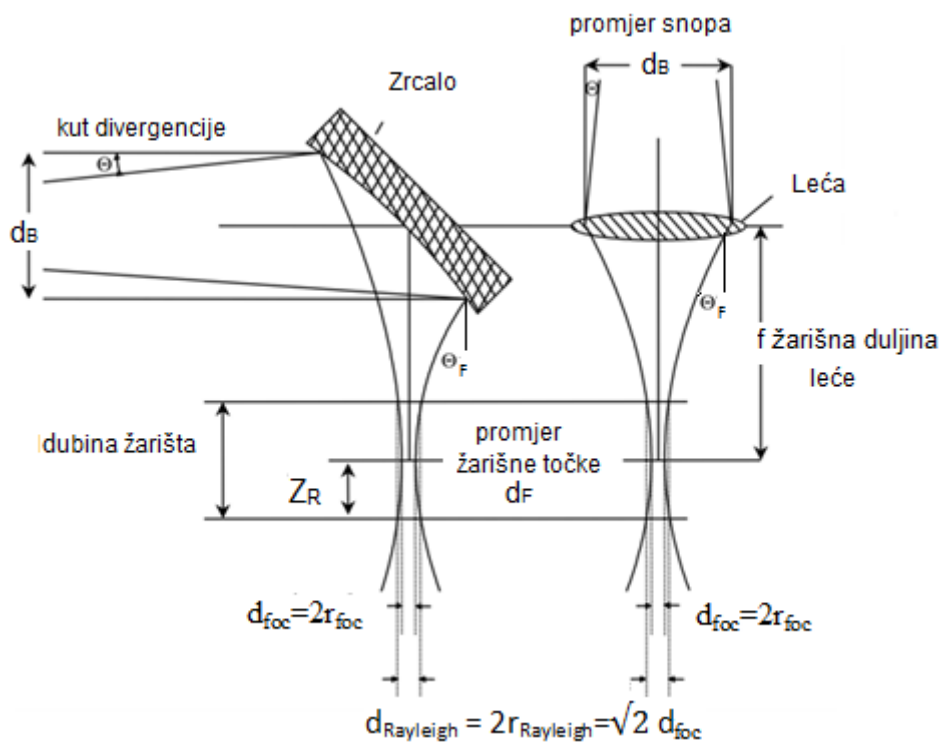
Dubina žarišta iznosi dvije Rayleigh-eve dužine ( $Z_R$ ). Dužina  $Z_R$  daje podatak na kojoj se udaljenosti od žarišta, gustoća snage snopa smanji na 50% maksimalne vrijednosti u žarištu, a računa se prema izrazu 5.3. [12]

$$Z_R = \frac{d_F}{\theta_F} \quad (5.3)$$

$\theta_F$  -kut divergencije laserskog snopa na izlazu iz leće (rad)

$d_F$  - promjer žarišne točke (mm)

Na slici 16 prikazan je način fokusiranja laserske zrake i mjerne veličine.

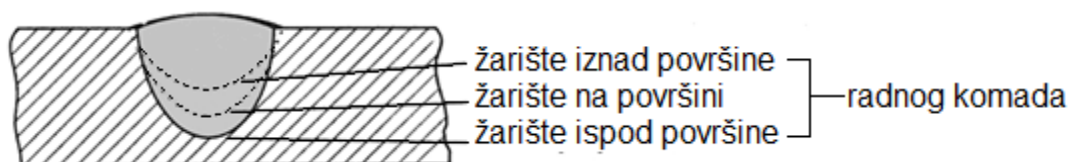


Slika 16. Prikaz fokusiranja laserske zrake pomoću zrcala i optike [7]

## 5.6. Položaj žarišta

Kontrola položaja žarišta ( $z$ ) bitna je za održavanje stabilnosti procesa. Najveća penetracija postiže se kada se žarište nalazi ispod površine radnog komada jer zbog mnogih refleksija dolazi do veće apsorpcije laserske zrake u materijal. Optimalnu dubinu, u odnosu na površinu materijala, potrebno je odrediti pokusom jer ovisi o snazi lasera i vrsti i dimenzijama materijala.

Položaj žarišta bitan je parametar kod zavarivanja tankostjenih materijala jer toplinsko izobličenje može maknuti žarište izvan materijala. [10]



Slika 17. Utjecaj položaja žarišta na penetraciju [12]

## 5.7. Unesena energija

Unesena energija je energija unesena po jedinici duljine zavara sposobna da rastali materijal određenog volumena. Proporcionalna je snazi lasera ( $P$ ) i obrnuto proporcionalna brzini zavarivanja ( $v$ ). Računa se prema izrazu 5.4. [12]

$$E = \frac{P}{v} \quad (5.4)$$

Konstantna unesena energija kombinira se s različitim kombinacijama snage i brzine zavarivanja. Zavari se razlikuju ako je zavarivanje izvedeno malom snagom i malom brzinom nasuprot zavarivanja izvedenog velikom snagom i velikom brzinom. Unošenjem energije uz velike snage ali i velike brzine zavarivanja reducirano je stvaranje plazme, tali se manji dio metala oko ključanice i veći je omjer dubine i širine zavara. Maksimalna teorijska efikasnost taljenja postiže se što bržim unosom energije

u predmet tako da ne ostane dovoljno vremena za disipaciju. Time se postiže maksimalna zona zavara i minimalna zona utjecaja topline. Visoka efikasnost taljenja u praksi postiže se zavarivanje s maksimalnim izvedivim snagama i brzinama. [12]

## 5.8. Zaštitni plin

Kod laserskog zavarivanja zaštitni plin koristi se za stabiliziranje procesa zavarivanja i za postizanje visoko kvalitetnih zavara. Izbor zaštitnog plina ovisi o vrsti lasera, svojstvima materijala koji se zavaruje, unesenoj energiji i dovodu zaštitnog plina. Zavarivanje u plinskoj zaštiti zahtjeva se kod svih zavara. Pojedini točkasti zavari nereaktivnih materijala, mogu se zavariti bez plinske zaštite. Kod kontinuiranog laserskog snopa (cw) utjecaj zaštitnog plina je veći nego kod impulsnog (pw), jer se interakcija na površini ne prekida.

### ***Inertni plinovi***

Koriste se helij (He) i argon (Ar) koji pružaju odličnu zaštitu od oksidacije.

Helij se najčešće koristi zbog svoje veće toplinske vodljivosti, što dovodi do bolje kvaliteta zavara, i većeg stupnja ionizacije, čime je omogućeno uklanjanje plazme i postizanje veće brzine zavarivanja. S helijem postiže se veća penetracija i veći poprečni presjek zavara nego s argonom. Nedostatak helija je njegova cijena i mala atomska masa zbog čega je teže postići laminarno strujanje te je zbog toga veća vjerojatnost ulaza atmosferskog kisika u zaštitnu atmosferu.

Argon, ima nizak stupanj ionizacije, i rastvorit će se u oblaku plazme čime će doprinijeti nakupljanju plazme iznad ključanice. [12]

### ***Aktivni plinovi i njihove mješavine s inertnim plinovima***

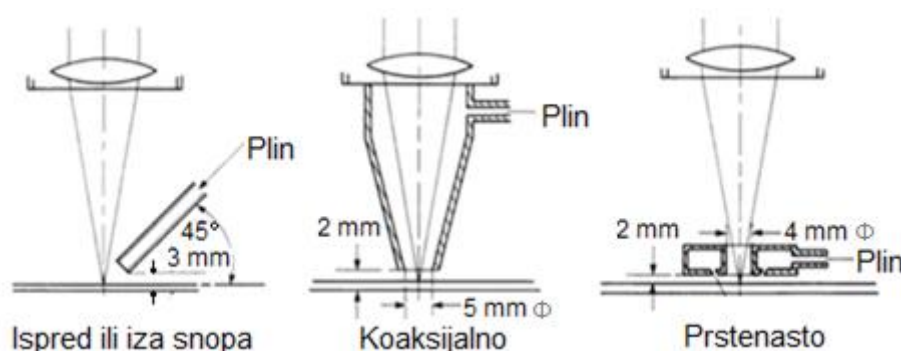
Koriste se mješavine s ugljikovim dioksidom (CO<sub>2</sub>), dušikom (N<sub>2</sub>), kisikom (O<sub>2</sub>) i vodikom (H<sub>2</sub>). U oksidirajućoj atmosferi (CO<sub>2</sub> plin ili inertni plin s dodatkom kisika) nastaje oksidni sloj na površini taline, koji uzrokuje neravnu i obojenu površinu zavara. [12]

### Uloga zaštitnog plina [15]:

- Poboljšanje estetskog izgleda i mehaničkih svojstva zavara.
- Štiti talinu i zonu utjecaja topline od utjecaja atmosfere (dolazi do izražaja kod zavarivanja titana i cinka kako bi se spriječila njihova reakcija s kisikom). U tu svrhu mogu se koristiti većina dostupnih komercijalnih inertnih plinova za zavarivanje.
- Služi za otklanjanje plazme i oblaka plazme. Nastali oblak plazme pri zavarivanju metodom ključanice apsorbira i rasipa lasersku zraku. Zbog toga dolazi do nestabilnog procesa zavarivanja što utječe na oblik i dubinu zavara u negativnom smislu. Ta pojava javlja se kod CO<sub>2</sub> lasera zbog njegove veće valne duljine u odnosu na Nd:YAG laser, kod kojih to nije problem. Kod CO<sub>2</sub> lasera potrebno je koristiti plinove koji imaju veći stupanj ionizacije od željeza, kao što je helij.
- Štiti optiku za fokusiranje od metalnih para i štrcanja.

### Način dovodenja zaštitnog plina

Zaštitni plin se može dovoditi ispred ili iza laserske zrake, koaksijalno i prstenastom sapnicom (slika 18). Kod zavarivanje s potpunom penetracijom preporučuje se dovodenje plina i s korijenske strane. Za svaku primjenu potrebno je optimirati vrstu, protok i dovod zaštitnog plina. Kod CO<sub>2</sub> lasera postoje radni i zaštitni plin. Oni se mogu dovoditi odvojeno, a u većini slučajeva to je isti plin koji ima dvije uloge.



Slika 18. Prikaz varijanta dovoda zaštitnog plina na mjesto zavarivanja [11]



Promjer koaksijalne sapnice za zavarivanje iznosi 5 do 20 mm, a udaljenost sapnice od radnog komada od 5 do 8 mm. Promjer sapnice kod dovođenja zaštitnog plina ispred ili iza laserske zrake je 5 do 9 mm, a udaljenost 2 do 8 mm. [11]

Protok plina ima veliku ulogu jer neadekvatan protok može izazvati turbulencije, lošu kvalitetu zavara i štrcanje taline, a time i oštećenje optike. Protok plina ovisi o snazi lasera i odaljenosti i pristupačnosti spoja. U tablici 2 navedena je primjena pojedinih zaštitnih plinova ovisno o vrsti materijala, a u tablici 3 svojstva zaštitnih plinova.

Tablica 2. Primjena zaštitnih plinova ovisno o vrsti materijala [14]

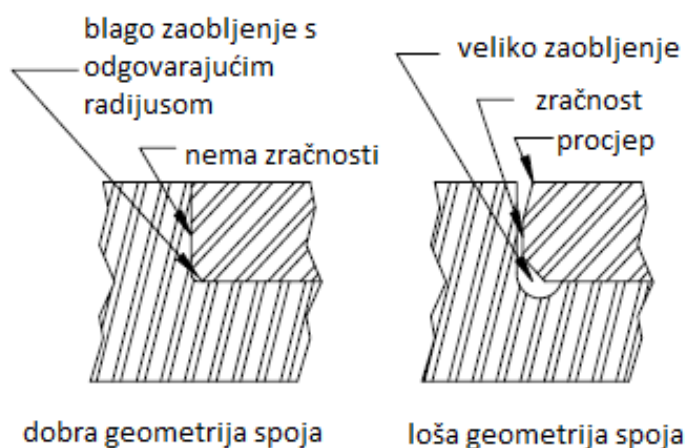
Aluminij i aluminijske legure	Mješavina dušika i helija.
Ugljični čelici	Ugljični dioksid i njegove mješavine s argonom i kisikom povećavaju produktivnost (kada se može tolerirati sloj oksida na površini) te dolazi do laganog povišenja tvrdoće.
Austenitni čelici	Mješavina argona i vodika (veća brzina zavarivanja i sjajnija površina u odnosu na helij i mješavine argona i helija).
	Dušik i mješavine dušika nadoknađuju gubitke dušika iz austenitnih čelika legiranih dušikom.
Duplex čelici	Mješavine dušika stabiliziraju austenitnu fazu.
Titan	Argon, helij i njihove mješavine.

Tablica 3. Karakteristike zaštitnih plinova pri laserskom zavarivanju [3]

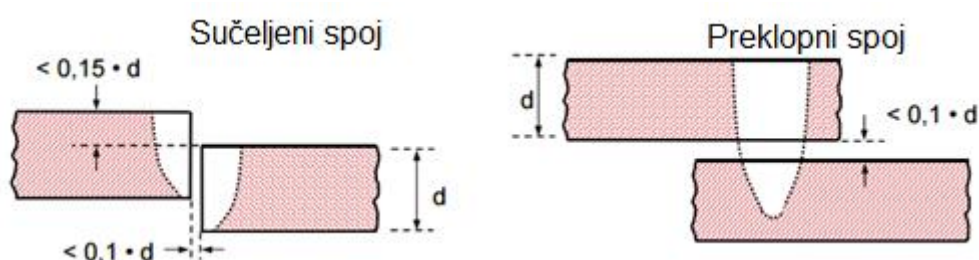
Plin	Molekularna masa	Toplinska vodljivost pri 1200 K	Stupanj ionizacije (eV)	Gustoća	Potiskivanje plazme	Štićenje zavara	Dubina penetracije	Cijena
Ar	40	0.049	15.68	1.7828	Dobro	Odlično	Dobro	0.4
He	4	0.405	24.46	0.1769	Odlično	Dobro	Odlično	1
Ar+He					Bolje	Bolje	Dobro	
N <sub>2</sub>	28	0.076	15.65	1.2507	Dobro	Dobro	Bolje	0.1
CO <sub>2</sub>	44	0.08	14.41	1.9768	Loše	Loše	Dobro	0.1

## 5.9. Geometrija spoja

Lasersko zavarivanje najčešće se izvodi bez dodatnog materijala. Zbog toga spojevi moraju međusobno točno odgovarati. Neadekvatna geometrija najčešće je uzrokovana lošom pripremom spoja. Geometrijske greške uzrokuju dodatnu koncentraciju naprezanja, što smanjuje nosivost zavarenog spoja. U skladu s malom veličinom žarišne točke ( $> 100 \mu\text{m}$ ), širina zazora treba biti puno manja kako žarišna točka, laserska zraka, ne bi prolazila između dva radna komada ili ih djelomično zavarila. Time bi se postigle šupljine i nehomogeni zavar koji će smanjiti čvrstoću zavara. Visoke tolerancije zazora nije jednostavno postići. Dimenzije zazora ne bi smjele biti veće od 0.1 mm. U skladu s time priprema spoja treba biti izvedena vrlo pažljivo. [3]



Slika 19. Prikaz dobre i loše geometrije spoja [3]



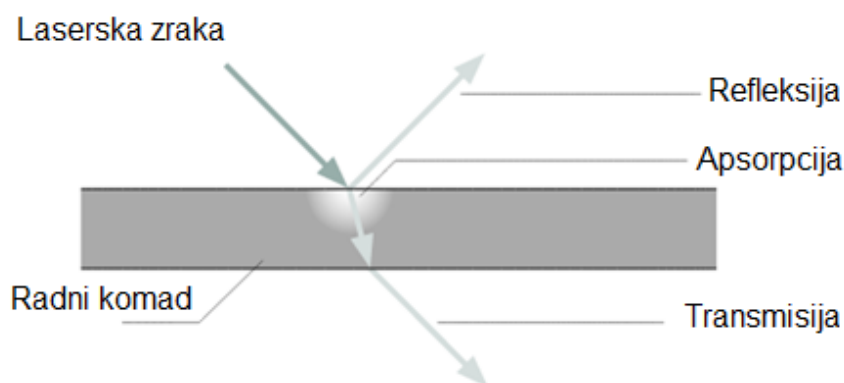
Slika 20. Dozvoljene tolerancije pripreme sučeljenog i preklopnog spoja [17]

Prilikom zavarivanja dijelove koji se zavaruju potrebno je učvrstiti kako bi se spriječio nastanak zazora. Kod preklopnog zavara prioritet je na čistoći površine. Zavarivanje metala s niskom temperaturom vrelišta (cink) sprječava se odvođenje metalnih para što uzrokuje poroznost spoja. U tom slučaju ostavlja se mali zazor (0,05-0,02 mm) između dijelova. Za točno pozicioniranje laserskog snopa koriste se senzori koji prate putanju spoja i tako pozicioniraju lasersku zraku.

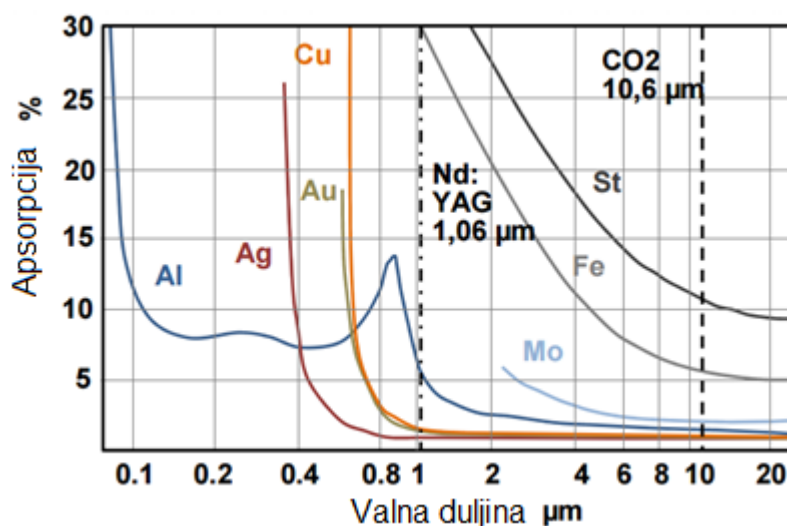
Zavarivanje laserom može se izvoditi u različitim položajima, teško pristupačnim mjestima i bez kontakta s materijalom. Zavarivanje u različitim položajima omogućeno je zbog površinske napetosti, ali ovisi o debljini materijala i brzini zavarivanja.

## 6. LASERSKO ZAVARIVANJE POJEDINIH ČELIKA

Kada laserska zraka udari na površinu osnovnog materijala, jedan dio zračenja se reflektira, drugi dio ulazi u materijal i apsorbira se (pretvara se u toplinsku energiju), a treći prolazi kroz materijal i transmitira se. Stupanj refleksije, apsorpcije i transmisije ovisi o valnoj duljini upadnog zračenja koja je kod različitih materijala drukčija. Visoko reflektivni materijali (Al-legure, Cu-legure, zlato, srebro) otežano se zavaruju laserom, posebno CO<sub>2</sub> laserom jer teško apsorbiraju njegovu valnu duljinu. Za njihovo zavarivanje prikladniji je impulsni Nd:YAG laser, ili u novije vrijeme tzv. „zeleni laseri“ s valnom duljinom od 532 nm.



Slika 21. Prikaz interakcije laserskog snopa i osnovnog materijala [9]



Slika 22. Stupanj apsorpcije laserske svjetlosti kod različitih materijala, u ovisnosti o valnoj duljini  $\lambda$  [17]

Gotovo svi metali mogu biti zavareni postupkom laserskog zavarivanja. Omogućeno je zavarivanje različitih materijala koji su metalurški kompatibilni. Bitan utjecaj imaju legirni elementi u materijalima jer zbog visokog unosa energije kod zavarivanja dolazi do isparavanja elemenata s nižom temperaturom isparavanja i isparavanja nečistoća (sumpor i fosfor) iz rastaljene metalne kupke te stvaranje poroznosti.

## Čelici

Prikladnost materijala za zavarivanje općenito je određena njegovim kemijskim sastavom. Zavarljivost čelika ovisi o ekvivalentnom sadržaju ugljika u čeliku ( $C_{ekv}$ ). Što je veći sadržaj ugljika u čeliku zavarljivost se smanjuje jer je povećana sklonost otvrdnjavanju, a time i nastanku hladnih pukotina. To svojstvo ima bitno manji negativni utjecaj na zavarljivost kod laserskog zavarivanja zbog ograničenog istezanja zone taljenja i zone utjecaja topline. Zbog visoke brzine hlađenja zona taljenja poprima tvrdnu martenzitnu strukturu.

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. Pri laserskom zavarivanju mogu se dobiti zavari bez pukotina i kod sadržaja ugljika od 0,6% u čeliku, a tvrdoća može iznositi od 650 do 700 HV. Ali tada se ne može sigurno 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. [16]

Ekstremno velike brzine zagrijavanja i vrlo kratka vremena ohlađivanja uzrokuju transformaciju strukture koja se razlikuje od one kod konvencionalnog elektrolučnog zavarivanja. Dostupni zavarivački TTT-dijagrami vrijede za brzine zagrijavanja od 700 °C/s do 1000 °C/s. Brzine zagrijavanja kod laserskog zavarivanja su od 6000 °C/s do 10000 °C/s i dovode do promjene tijekom transformacije strukture. Ekstremno visoke brzine zagrijavanja nadalje dovode do podizanja točke  $A_{c3}$  i do drukčijeg odvijanja austenitizacije. U ovisnosti o početnoj strukturi materijala mogu nastupiti različiti mehanizmi transformacije prilikom austenitizacije. Tako će u mnogim slučajevima nastati nepotpuno rastvaranje perlita odnosno nastat će nehomogeni austenit. Te

pojave povezane s kratkim zadržavanjem u austenitnom području imaju značajan utjecaj na raspad austenita prilikom ohlađivanja velikim brzinama. [16]

### **Opće smjernice za zavarivanje čelika**

Potrebno je smanjiti brzine hlađenja kako bi se smanjila pojava pukotina kod čelika s  $C_{ekv} > 0,30\%$ . Primjenjuju se metode predgrijavanja, zavarivanja s dvostrukim snopom (jedan snop je fokusiran, a drugi defokusiran), manja brzina zavarivanja s manjom snagom (dubina penetracije ostaje ista). Preporučuje se korištenje čelika kod kojih je udio kisika reducirana na minimum pomoću deoksidirajući elemenata (aluminij (Al), silicij (Si)) ili nekim drugim postupkom zbog javljanja poroznosti radi nemogućnosti otplinjavanja. Čelici s visokim udjelom sumpora ( $>0,04\%$ ) ili fosfora ( $>0,04\%$ ) podložni su toplim pukotinama. Korištenjem impulsnog zavarivanja može se smanjiti unos topline i spriječiti nastanak pukotina. [14]

### **Niskougljični čelici:**

Niskougljične i niskolegirane čelike karakterizira dobra zavarljivost. U pravilu čelici s niskim sadržajem ekvivalentnog ugljika ( $C_{ekv}$ ) imaju visoku sposobnost zavarivanja. Ako je ekvivalent ugljika ( $C_{ekv}$ ) veći od 0.3% zavari postižu visoku tvrdoću, ali postaju skloni hladnim pukotinama i krhki su. [14]

### **Pocinčani čelici**

Pocinčani čelici teško se laserski zavaruju zbog niske temperature isparavanja cinka (Zn) ( $903\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) u odnosu na temperaturu tališta čelika ( $1535\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Tijekom zavarivanja, iz metalne kupke isparava cink pod visokim tlakom noseći sa sobom rastaljeni materijal. To uzrokuje poroznost zavarenog spoja. Prije zavarivanja, sloj cinka mora se ukloniti ili ispariti dodatnim izvorom topline. Za postizanje prihvatljivih zavara potrebno je osigurati ispušni odvod za cinkove pare i smanjiti promjer žarišne točke kako bi se smanjio udio isparenog cinka. Za zavarivanje pocinčanih čelika koristi se laser s dvije laserske zrake kako bi formirao ključanicu u tom obliku da cinkove pare mogu nesmetano izaći iz zone zavarivanja. Zavarivanjem s niskim brzinama (i nižom snagom) primijećeno je da se cinkove pare lakše odvede iz taline jer je vrijeme

solidifikacije dulje. Ovaj postupak laserskog zavarivanja nije prihvatljiv u industriji zbog male brzine zavarivanja koja bi znatno utjecala na produktivnost. [4]

### **Nehrđajući čelici**

Nehrđajući čelici su općenito laserski zavarljivi. S obzirom na nižu toplinsku vodljivost i bolju apsorpciju laserske zrake u odnosu na ugljične čelike mogu se zavarivati većim brzinama i s većim unosom topline. Rezultat toga je smanjenje toplinskih naprezanja, manje deformacije i manji utjecaj na korozijska svojstva u odnosu na ostale konvencionalne postupke (npr. TIG postupkom zavarivanja brzina je niska, a unos topline je visoki čime se smanjuje otpornost na koroziju)

Austenitni čelici, serije 300, najpogodniji su za lasersko zavarivanje. Sadrže dodatke sumpora (S) i selenija (Se) radi lakše strojne obrade, ali nakon zavarivanja skloni su nastanku pukotina nastalih skrućivanjem. U pravilu, austenitni čelici su dobro zavarljivi ako im je Cr/Ni ekvivalent veći od 1.6, a u slučaju da je manji javlja se sklonost toplim pukotinama. Cr/Ni ekvivalent računa se pomoću izraza 6.1. [3]

$$Cr_{ekv} \cong Cr + Mo + 0.7 Nb + 3Ti \quad (6.1)$$

$$Ni_{ekv} \cong Ni + 35C + 20 N$$

Feritni čelici, serije 400, laserskim zavarivanjem postiže bolju duktilnost nego li konvencionalnim postupcima zavarivanja, a značajno je reducirana pojava nastanka toplih i hladnih pukotina. [3]

Martenzitni čelici posjeduju najslabiju zavarljivost od ostalih nehrđajućih čelika i skloni su krhkom lomu zbog tvrde i krhke mikrostrukture. Za martenzitne čelike sa sadržajem ugljika većim od 0,1% potrebno je čelik predgrijavati kako bi smanjili tendenciju pojave krhkog loma. [3]

**Dupleks čelici**

Posjeduju feritno-austenitnu mikrostrukturu s približno jednakim omjerom ferita i austenita. Laserskim zavarivanjem dupleks čelika dolazi do nastanka povećanog udjela ferita, odnosno feritizacije mikrostrukture u zavaru kao posljedice velike brzine hlađenja, koja za sobom povlači smanjenje korozijske postojanosti i pogoršanje mehaničkih svojstava, posebno udarne žilavosti i deformabilnosti. Radi toga, kao zaštitni plin kod zavarivanja koristi se dušik ( $N_2$ ). Njime se povećava sadržaj austenita u zavaru i pruža dobra otpornost na rupičastu koroziju. [14]

**Visokotemperaturni Cr-Mo čelici**

Imaju bainitnu ili martenzitnu strukturu ovisno o postotku kroma (Cr). Koriste se na visokim temperaturama te moraju imati visoku otpornost na puzanje. Posjeduju dobru zavarljivost uz pojedine probleme kao što je visoko očvršnuće hlađenjem na zraku što dovodi to jake martenzitne mikrostrukture. U zoni taljenja dolazi do nastanka delta ferita, koji utječe na puzanje, vodikovu krhkost u zoni utjecaja topline. Laserskim zavarivanjem postiže se manja zona utjecaja topline. [14]



## 7. ROBOTIZIRANO LASERSKO ZAVARIVANJE

Lasersko zavarivanje je složeni automatizirani proces, a često se izvodi robotom. Pri instaliranju laserskog sustava u prostoru, potrebno je voditi računa o zračenju laserske zrake. Stoga je laserski sustav potrebno izolirati od preostalog dijela proizvodnje s pomoću odgovarajućih zaštitnih kabina. Osoblje u tvrtki mora biti dodatno educirano s obzirom na sigurnost na radu pri uporabi lasera u proizvodnji. Roboti koji se koriste kod laserskog zavarivanja najčešće posjeduju šest stupnjeva slobode gibanja. Opremljeni su sensorima za praćenje tijekom zavarivanja i posredstvom povratne veze u sklopu upravljačke strukture omogućavaju robotu da se prilagodi novonastalim uvjetima i postigne tražene zahtjeve zavarenog spoja. To je korisno kada postoje razlike u tolerancijama prilikom pripreme izradaka, netočnom pozicioniranju ili promjeni geometrije radnog komada uslijed toplinskih dilatacija. Veća se točnost procesa zahtijeva kod zavarivanja većim brzinama i kod izradaka malih dimenzija s uskim tolerancijama.

Prednost laserskog robotiziranog zavarivanja u odnosu na konvencionalne postupke je beskontaktni proces zavarivanja. Upotrebom skenera koji se sastoji od zrcala ili leća određuje se orijentacija i potrebna žarišna duljina zrake kako bi se zavarili spojevi na teško dostupnim, skučenim mjestima, koji kod konvencionalnih postupaka ne bi bili izvedivi.

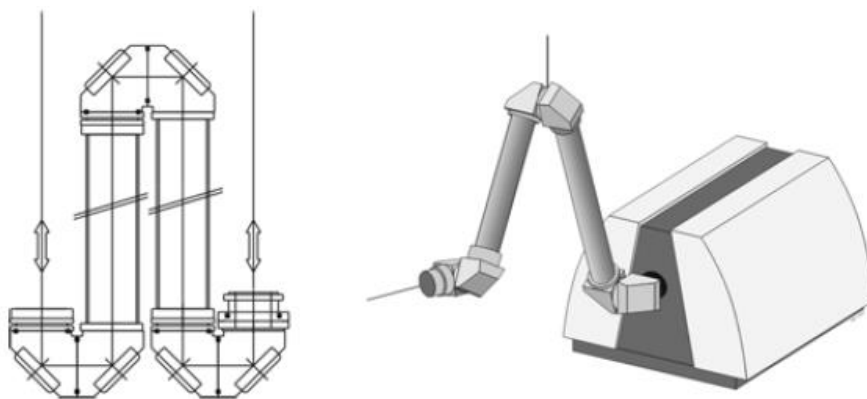
### 7.1. Sustav za dostavu laserske zrake

Koristi se za vođenje laserske zrake od izvora do radne površine uz što manje gubitaka i utjecaja na kvalitetu zrake. Kod CO<sub>2</sub> lasera zraka se vodi sustavom pomičnih zrcala, a kod lasera s krutim medijem ili diodnih lasera pomoću optičkih vlakna. Zbog prijenosa visokih gustoća snage potrebno je hlađenje sustava.

## Zrcala

Zrcala se najčešće izrađuju od čistoga bakra zbog njegove iznimne toplinske vodljivosti i visokog stupnja refleksije od 99%. Također se koriste obložena zrcala s tankom metalnom podlogom od aluminija, zlata ili srebra.

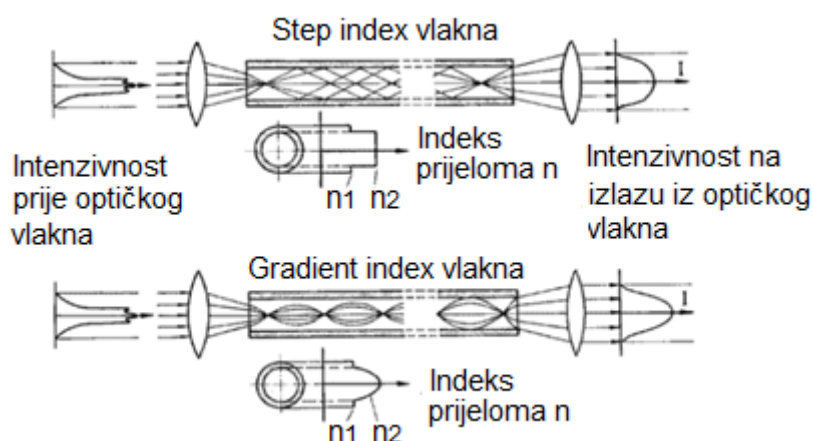
Različiti položaj zrcala unutar robotske ruke (slika 23) omogućuje brzo trodimenzijsko kretanje i dovođenje kvalitetne laserske zrake na radni komad. Laserska zraka konstantnog je promjera te se može koristiti i na udaljenost od 5 m. [10]



Slika 23. Osnovni princip vođenja zrake sustavom zrcala kod CO<sub>2</sub> lasera [7]

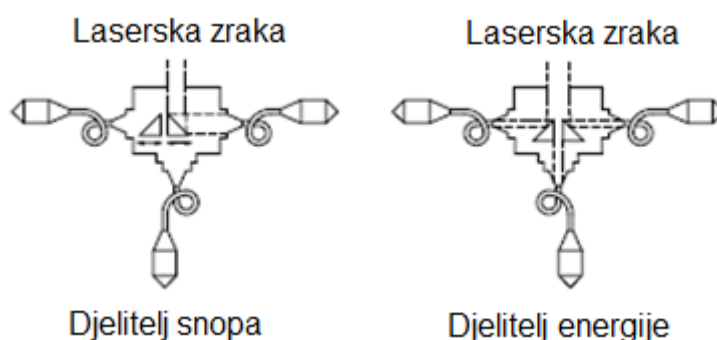
## Optička vlakna

U odnosu na prijenos zrake zrcalima prednost optičkih vlakna (slika 24) je da mogu obavljati zavarivanje na teško dostupnim mjestima (npr. izrada karoserije automobila). Također omogućavaju prijenos laserske zrake na veće udaljenosti gotovo bez gubitaka. Posebnu pažnju potrebno je posvetiti minimalnom savijanju optičkog vlakna kako ne bi došlo do oštećenja. [10]



Slika 24. Osnovne vrste optičkih vlakna [7]

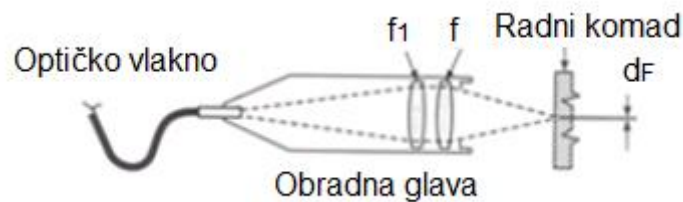
Optičkim vlaknima omogućeno je istovremeno korištenje snage izvora na nekoliko različitih pozicija. U takvom sistemu dolazi do dijeljenja snopa i dijeljenja energije (slika 25), a kod impulsnog finog zavarivanja omogućeno je istovremeno zavarivanje s 9 vlakna. [10]



Slika 25. Konfiguracije Nd:YAG laserskog sustava s više optičkih vlakana [3]

### **Sustav za fokusiranje zrake**

Montiran je na glavu robotske ruke kako bi se zraka projicirala na površinu i unijela željena količina energije. Cink selenid (ZnSe) je glavni materijal za izradu leća za fokusiranje kod CO<sub>2</sub> lasera, a kod krutih i diodnih lasera koriste se kvarcna stakla za izradu optičkih vlakna. Na slici 26 prikazano je fokusiranje laserskog snopa dovedenog pomoću optičkog vlakna.



Slika 26. Fokusiranje laserskog snopa u obradnoj glavi [12]

## 7.2. Senzori

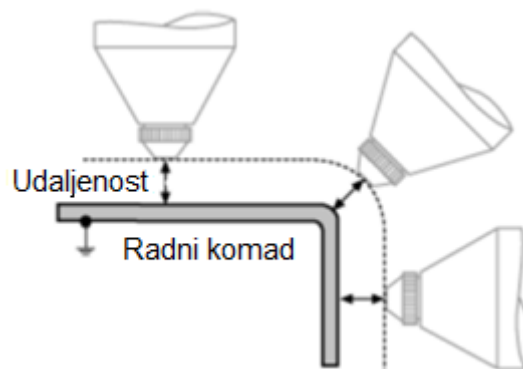
Za uspješno zavarivanje potrebno je pripremiti obratke u uskim dimenzijskim tolerancijama, s odgovarajuće pripremljenim rubovima za zavarivanje (ravan rez bez polumjera i konusnih stranica pri sučeonom zavarenom spoju) stezani u odgovarajućim alatima i steznim napravama.

Pri zavarivanju sučeonih zavarenih spojeva potrebno je osigurati točno vođenje laserske zrake te precizno pripremljene obratke jer pri zazoru većem od promjera laserske zrake dolazi do zaustavljanja procesa. Stoga je preporuka više koristiti preklopne zavarene spojeve.

### ***Senzori udaljenosti***

Položaj žarišta od radnog komada ima najznačajniju ulogu. Svaki pomak od namještene vrijednosti odražava se na pogoršanju kvalitete zavara, zato je upotreba senzori za kontrolu položaja žarišta od presudnog značenja.

Najčešće se koriste kapacitivni senzor (slika 27) kod kojega se približavanjem ili odmicanjem glave lasera od obratka mijenja kapacitet kondenzatora. [10]

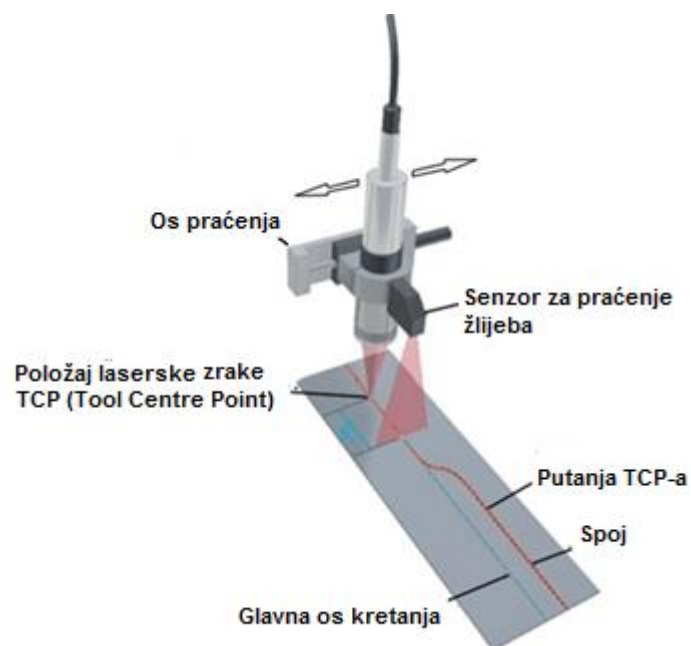


Slika 27. Princip rada kapacitivnih senzora udaljenosti [7]

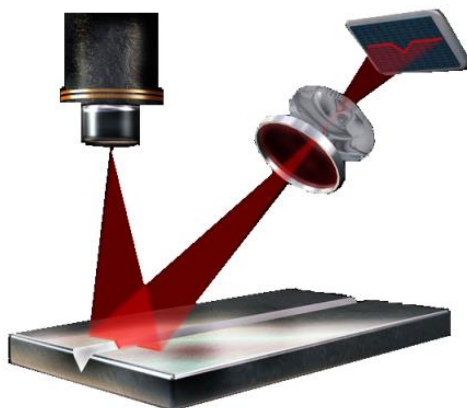
### **Senzori za praćenje zavora**

Za optičko praćenje žlijeba potreban je emiter laserske zrake (slika 28) i CCD (Charge coupled device) kamera. Emiter laserske zrake tijekom gibanja laserske glave emitira zraku prema radnom komadu koja se reflektira. CCD kamera snima reflektirane zrake (slika 29) i pomoću dobivenih podataka daje povratne informacije o žlijebu.

U toku procesa senzor kontinuirano vrši mjerenja i u sklopu korekcija određuje odgovarajuće položaje laserske glave s obzirom na geometriju spoja. Ti se podaci spremaju u memoriju čime je omogućeno snimanje podataka kao što su odstupanja od izvorne putanje, promjena orijentacije, odstupanja u veličini žlijeba . [14]



Slika 28. Princip djelovanja laserskog senzora za praćenja žlijeba [14]



Slika 29. Snimanje žlijeba CCD kamerom [20]

## 8. PREDNOSTI I PRIMJENA LASERA

### ***Prednosti laserskog zavarivanja***

a) Visoka gustoća snage i precizan dotok točno potrebne količine energije u odnosu na konvencionalne postupke koji pružaju gustoću snage u rasponu do  $10^4$  W/cm<sup>2</sup>. To rezultira dubokim i uskim zavarom s omjerom dubine i širine 10:1.

Time je omogućeno: - zavarivanje tankostjenih materijala

- zavarivanje s jedne strane
- jednostavno štíćenje zavara zaštitnim plinom

-Visoke brzine zavarivanja i jednostavna konstrukcija spojeva omogućuje visoku produktivnost . Kod daljinskog laserskog zavarivanja (eng. Remote Welding System ) točkastih zavara dostižu se brzine i do 2m/s.

-Nizak i precizan unos topline rezultira malom zonom utjecaja topline (ZUT) i manjim toplinskim deformacijama i oštećenjima.

-Mogućnost zavarivanja širokog spektra materijala i raznorodnih metala .

b) Zbog različitih metoda primjene lasera omogućena je fleksibilnost procesa i velika sposobnost za automatizaciju, a tijekom postupka vrši se kontrola točnosti mjera i položaja zavara.

c) Mogućnost zavarivanja teško dostupnih mjesta, trodimenzionalnih konstrukcija i ostvarivanje cjelovitog neprekinutog spoja korištenjem fleksibilnih optičkih vlakna i prikladne optike za fokusiranje.

d) Beskontaktni prijenos energije (nema fizičkog kontakta između glave lasera i materijala i ne dolazi do onečišćenja metala zavara kao ponekad kod TIG postupka)

e) Postupak je potpuno čist, a troškovi naknadne strojne obrade su vrlo niski.

f) Omogućuje zavarivanje konačno obrađenih dijelova, a da ostane sačuvana dimenzijska točnost nakon zavarivanja.

Glavni nedostatak lasera je i dalje njegova cijena koja je i do deset puta veća u odnosu na elektrolučne postupke iste snage. Potrebno je poznavati specifikacije i sposobnost lasera za zavarivanje pojedinih materijala kako bi se eliminirale greške kod zavarivanja i postigli zavari željenog oblika i mehaničkih svojstva. Potrebni su visoki zahtjevi za točnost spajanje dijelova i precizno pozicioniranje glave lasera u odnosu na radni komad jer je promjer žarišne točke mali a brzina zavarivanja velika.

Laserski zavari su visoke kvalitete, jednolike strukture i bez oksidacije koji pružaju dugoročnu stabilnost u eksploatacijskim uvjetima. Kvaliteta korijena zavara jedna je od prednosti laserskog zavarivanja.

#### ***Primjena laserskog zavarivanja:***

Automobilska industrija: prva primjena lasera bila je u automobilskoj industriji i zamijenila ja postupak tvrdog lemljenja sinkrona zupčanika brzim laserskim postupkom. Danas se laserskim zavarivanjem sastavljaju brojni dijelovi i komponente od različitih metala ( mjenjač, diferencijal, blokovi cilindra motora).

Strojarstvo: koristi se za reparaturno zavarivanje širokog spektra alata i oštećenih strojnih dijelova. Zavarivanje tankih limova debljine 0.5 mm kako bi se uštedjelo na materijalu. (konvencionalnim postupcima ta debljina trebala bi iznositi minimalno ~ 1 mm, kako ne bi došlo do deformacija i oštećenja materijala). Zavaruju se lopatica turbine kod kojih se javlja problem kontinuirane promjene parametra tijekom zavarivanja zbog povećanja debljine.

Elektrotehnika: zbog stabilnosti i iznimne kontrole procesa postižu se mikrozavari. Debljine zavara su male i mogu iznositi i do 0.2 mm. Snaga lasera do 2 kW dovoljna je za vrlo velike brzine zavarivanja. Koristi se za zavarivanje računalnih komponenti, senzora, prekidača, displeja, provodnika na solarnim pločama, baterije (spajanje raznorodnih materijala). Bitna razlika kod zavarivanje informatičke opreme u odnosu na konvencionalne postupke je da ne dolazi do elektromagnetskog utjecaja na komponente.



Zrakoplovna industrija: omogućuje visoko kvalitetne zavare malih dimenzija čime se ne utječe na ukupnu masu. Materijali koji se zavaruju su legure aluminija, titana, super legure otporne na visoke temperature, super legure nikla i kobalta. Koristi se za zavarivanje dijelova motora, propelera, ispušnih komora i prostora za izgaranje.

Medicinska industrija: koristi se za zavarivanje titana, visokonehrđajućih čelika, Ni-titan legura od kojih su izrađeni medicinski instrumenti i implantanti. Zbog visokih zahtjeva za higijensku površinu zadržava se otpornost na visokotemperaturnu sterilizaciju i koroziju. Instrumenti koji su prije bili jednodijelni i zahtijevali skup postupak proizvodnje, laserskim zavarivanje omogućena je izrada od više manjih dijelova.

Usporedba s ostalim postupcima zavarivanja i njihove karakteristike dani su u tablici 4.

Tablica 4. Usporedba s ostalim konvencionalnim postupcima [3]

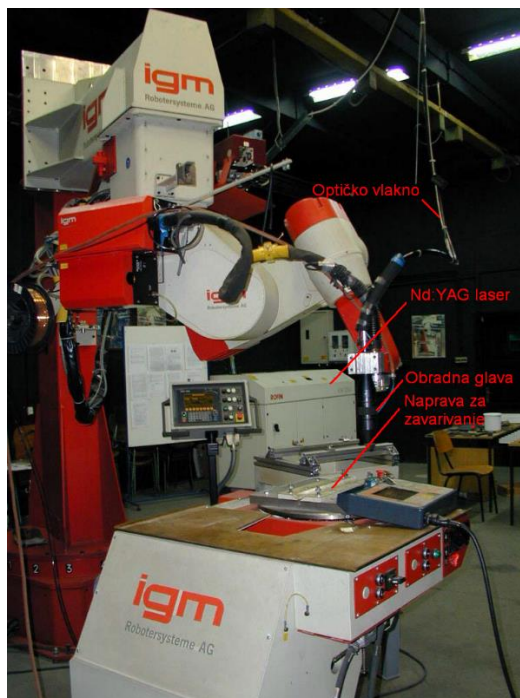
	Laser	Zavarivanje snopom elektrona	Elektro otporo	TIG	Zavarivanje trenjem	Plazma
Kvaliteta zavara	Izvrсна	Izvrсна	Dobra	Izvrсна	Izvrсна	Izvrсна
Brzina zavarivanja	Visoka	Visoka	Umjerena	Umjerena	Umjerena	Dobra
Unos topline	Nizak	Nizak	Umjeren	Jako visok	Umjeren	Visok
Zahtjevi za točnost pripreme spoja	Visoki	Visoki	Niski	Niski	Umjereni	Niski
Penetracija	Visoka	Visoka	Niska	Umjerena	Visoka	Visoka
Raspon materijala	Širok	Širok	Uzak	Širok	Širok	Širok
Raspon oblika/ veličine	Širok	Umjeren	Širok	Širok	Uzak	Širok
Upravlјivost	Jako dobra	Dobro	Loša	Loša	Umjerena	Dobra
Jednostavnost automatizacije	Izvrсна	Umjerena	Izvrсна	Loša	Dobra	Izvrсна
Troškovi uvođenja	Visoki	Visoki	Niski	Niski	Umjereni	Umjereni
Troškovi održavanja	Umjereni	Visoki	Umjereni	Niski	Niski	Umjereni
Troškovi rada	Visoki	Jako visoki	Umjereni	Umjereni	Niski	Umjereni

## 9. EKSPERIMENTALNI RAD

Cilj eksperimentalnog dijela završnog rada je odrediti utjecaj brzine zavarivanja (unošene energije), kao jedinog parametra koji se mijenja tijekom eksperimenta, na geometriju zavara (širina lica, širina korijena, širina ZUT-a, površina poprečnog presjeka) na limovima od čelika za poboljšavanje 25 CrMo 4, debljine 2 mm. Čelici za poboljšavanje imaju povećanu čvrstoću uz dobra svojstva žilavosti i dinamičke izdržljivosti te tako omogućuju izradu lakših tankostijenih konstrukcija. Lasersko zavarivanje čelika s povećanim sadržajem ugljika, kao što su čelici za poboljšavanje, još se ne primjenjuje u velikoserijskoj proizvodnji te je stoga bitno uočiti promjenu geometrije zavara kako bi se utvrdile dozvoljene brzine zavarivanja koje utječu na ekonomičnost proizvodnje.

### **Sustav za lasersko rezanje**

Sustav za lasersko zavarivanje smješten u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u, Zagreb, prikazan je na slici 30.



Slika 30. Sustav laser-robot

Za provođenje eksperimentalnog dijela završnog rada korišten je Nd:YAG laser „ROFIN CW 020“ proizvođača tvrtke „ROFIN SINAR“.

**Tehničke karakteristike lasera "ROFIN CW020":**

- Valna duljina: 1064 nm
- Nominalna snaga: 2000 W
- Način rada:
  - kontinuirani cw, prosječna snaga: 2000 W
  - impulsni pw s opcijom superpuls i opcijom oblikovanja impulsa, prosječna snaga: 2000 W, vršna snaga: 5000 W, frekvencija: 10 - 500 Hz, najmanje vrijeme trajanje impulsa: 1ms

**Kvaliteta snopa**

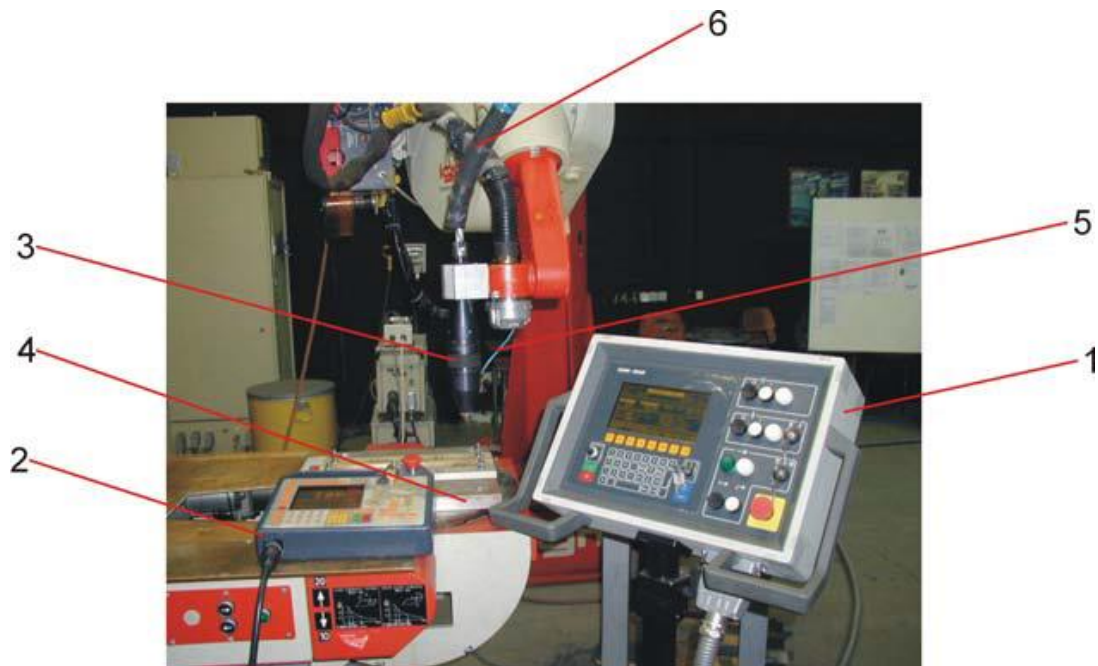
- promjer snopa na izlazu iz rezonatora,  $d_0$ : 18 mm
- kut divergencije,  $\theta_0$ :  $\leq 8$  mrad
- mod: multimod
- polarizacija, snop nije polariziran
- produkt parametara laserskog snopa,  $\frac{d_0}{2} \cdot \frac{\theta_0}{2} = 36$  mm mrad
- kvaliteta snopa,  $M^2 = 106,3$ ,  $K = 0,0094$

Laserski snop iz Nd:YAG lasera vođen je kroz optičko vlakno promjera 0,6 mm, a fokusiran je na površinu radnog komada pomoću obradne glave s optikom za fokusiranje:

- žarišna duljina leće kolimatora,  $f_1 = 120$  mm
- žarišna duljina leće za fokusiranje snopa na radni komad,  $f = 120$  mm
- promjer žarišne točke,  $d_F = 0,6$  mm
- kut divergencije,  $\theta_F = 0,24$  rad
- promjer snopa na ulazu u leću za fokusiranje,  $d_B = 28,8$  mm
- $F$  broj leće,  $F = 4,17$
- dubina žarišta,  $2 \cdot Z_R = 5$  mm

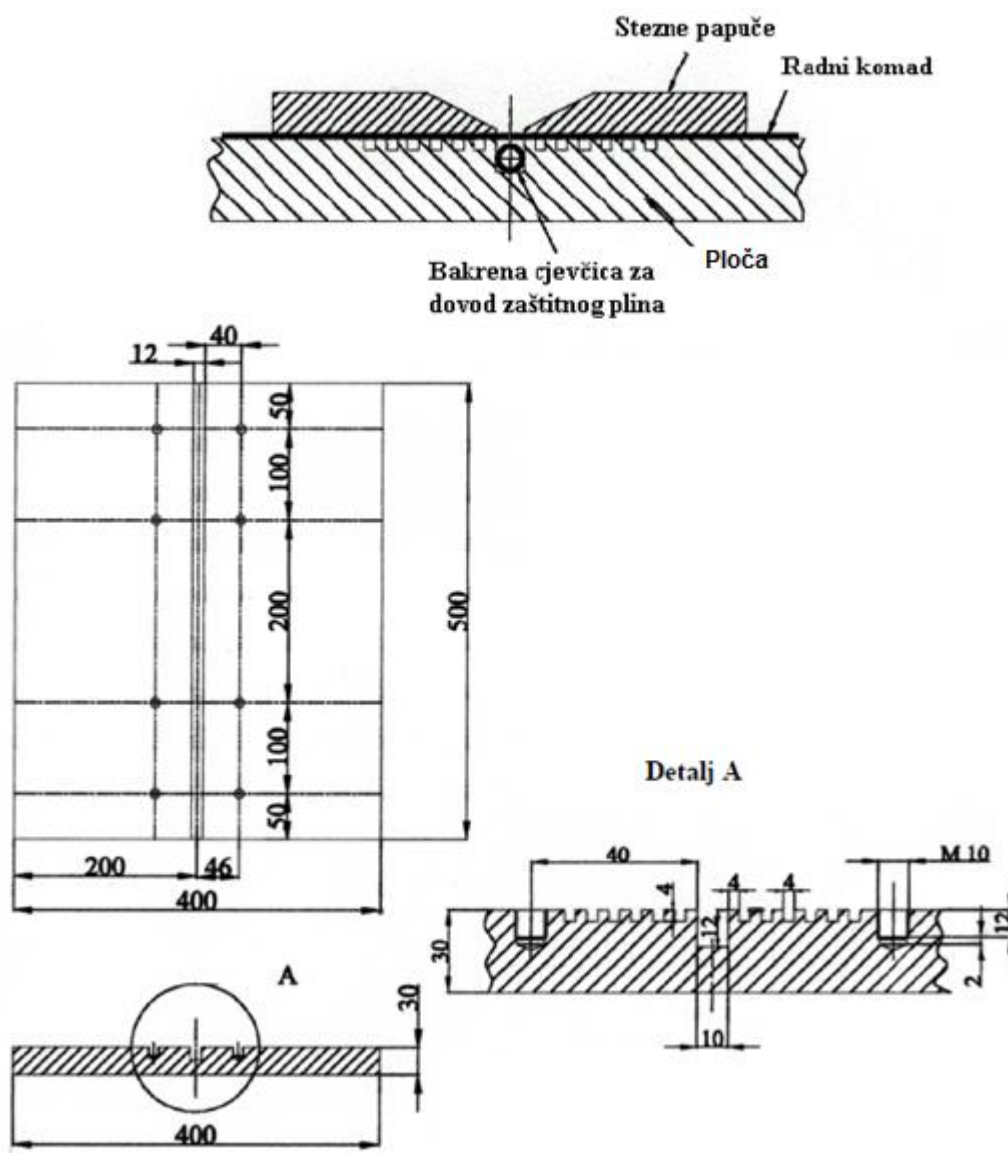
Obradna glava (slika 31) pričvršćena je na robotsku ruku robota "IGM Limat RT 280" sa 6 stupnjeva slobode gibanja te na taj način omogućeno je relativno gibanje između

laserskog snopa i radnog komada. Pozicioniranje snopa izvodi se pomoću helij-neon lasera, čiji se laserski snop provodi kroz isto optičko vlakno i optiku za fokusiranje.



Slika 31. Prikaz radnog mjesta. 1-upravljačka jedinica lasera, 2-upravljačka jedinica robota, 3-obradna glava s optikom za fokusiranje i koaksijalnom sapnicom za dovod zaštitnog plina, 4-naprava za stezanje, 5-dovod zaštitnog plina, 6-optičko vlakno.

Za stezanje i pozicioniranje radnih komada korištena je naprava prikazana na slikama 31 i 32.



Slika 32. Stezni dio naprave za zavarivanje.

### **Materijal i priprema radnih komada**

Zavarivanje je provedeno na limovima od čelika za poboljšavanje 25 CrMo 4. Svaka ploča lima debljine 2 mm bila je iz iste šarže kako bi se isključio utjecaj promijenjenog kemijskog sastava na dobivene rezultate. Kemijski sastav čelika 25 CrMo 4 dobiven je kemijskom analizom napravljenom na FSB-u Zagreb, na Zavodu za materijale, u Laboratoriju za analizu metala, te je prikazan u tablici 5.

Tablica 5. Kemijski sastav čelika 25 CrMo 4

Kem. sastav	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Kem. analiza	0,29	0,20	0,78	0,008	0,003	1,05	0,18
DIN EN 10083-1 %	0,22-0,29	<0,40	0,60-0,90	<0,035	0,02-0,04	0,90-1,20	0,15-0,30

### **Provođenje pokusa**

Dimenzije ploča lima iznosile su 250 x 130 mm. Površine limova su ispjeskarene, a dulje stranice, po kojima je izvođeno zavarivanje, poblanjane su na blanjatici. Tako pripremljeni radni komadi stezani su u napravu za zavarivanje. Neposredno prije zavarivanja mjesta spoja očišćena su pomoću brusnog papira i alkohola kako bi se uklonile nečistoće.

### **Konstantni parametri zavarivanja**

- Snaga:  $P=1800$  W  
Najvećom snagom postižu se najveće brzine zavarivanja čime se pozitivno utječe na produktivnost industrijskih procesa. Odabrana snaga od 1800 W iznosi 90% maksimalne snage lasera.
- Žarišna duljina leće za fokusiranje snopa na radni komad:  $f=120$  mm  
Pri toj udaljenosti žarišne leće promjer žarišne točke iznosi 0,6 mm, a gustoća snage  $6,4 \cdot 10^5$  W/cm<sup>2</sup>.
- Položaj žarišta u odnosu na površinu:  $z= - 0,7$  mm
- Zaštitni plin: helij
- Promjer vrha koaksijalne sapnice za plin:  $d_s=5$  mm
- Udaljenost vrha sapnice od radnog komada:  $d_v= 8$  mm

Namještanje udaljenosti vrha sapnice od radnog komada omogućeno je odvrtanjem vrha sapnice koja ima urezani vanjski navoj dok sapnica ima unutarnji navoj. Udaljenost je određena u tablicama proizvođača lasera.

Protok plina:  $Q= 26$  l/min

### **Promjenjivi parametri zavarivanja**

- Brzina zavarivanja: 110, 130, 150 cm/min

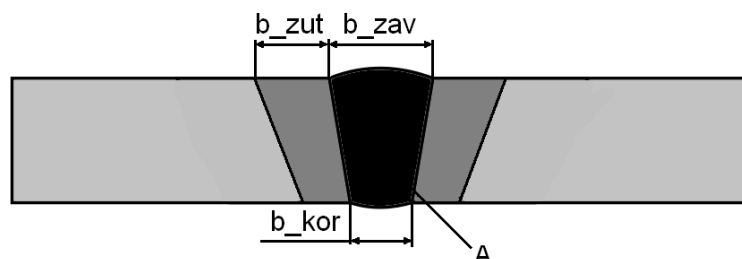
### **Određivanje geometrijskih značajki zavarenog spoja**

Za određivanje geometrije zavara pripremljeni su makroizbrusci poprečnog presjeka. Nakon zavarivanja, zavarene ploče lima izrezane su pomoću lasera na dimenzije 16 x 26 mm. Sa svakog radnog komada izabran je po jedan uzorak. Zona utjecaja topline od rezanja laserom pobrušena je na brusnoj ploči uz hlađenje vodom. Dobiveni uzorci zatim su zaliveni u kalupe.

Nakon stvrdnjavanja kalupa makroizbrusci izbrušeni su brusnim papirom sljedećih zrnatosti: 80, 150, 240, 360, 600, 1000. Nagrizanje makroizbrusaka izvršeno je u 5%-tnoj otopini dušične kiseline ( $\text{HNO}_3$ ) u alkoholu.

Snimanje geometrije zavara na makroizbruscima izvršeno je u pod mikroskopom LEICA MZ6 pod povećanjem 31.3x, koji se nalazi u Laboratoriju za zaštitu materijala, FSB. Mjerenje geometrije zavara obavljeno je pomoću programskog paketa Image J.

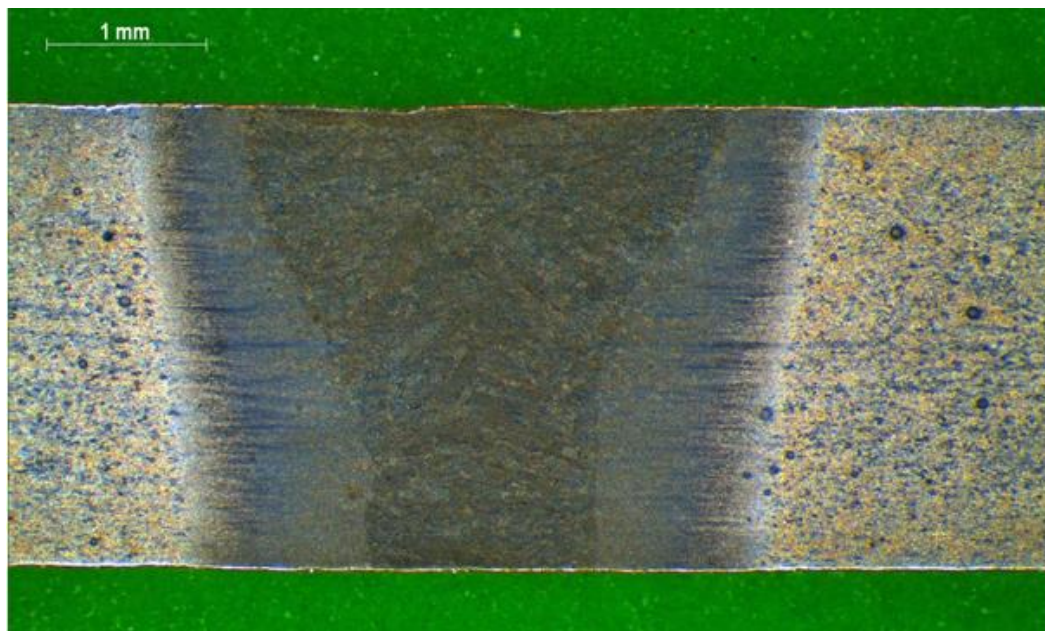
Izvršena su mjerenja širine lica zavara ( $b_{zav}$ ), širine ZUT-a ( $b_{zut}$ ), širine korijena zavara ( $b_{kor}$ ) i površine poprečnog presjeka zavara ( $A$ ), slika 33, za određivanje utjecaja brzine zavarivanja na geometrijske karakteristike zavarenog spoja.



Slika 33. Mjerene geometrijske značajke poprečnog presjeka zavarenog spoja



Na slici 34 prikazan je poprečni presjek zavara pri brzini od 110 cm/min. Jasno su vidljivi prijelazi ZT-a i ZUT-a i njihova površina. Dimenzije zavara prikazane su u tablici 6.



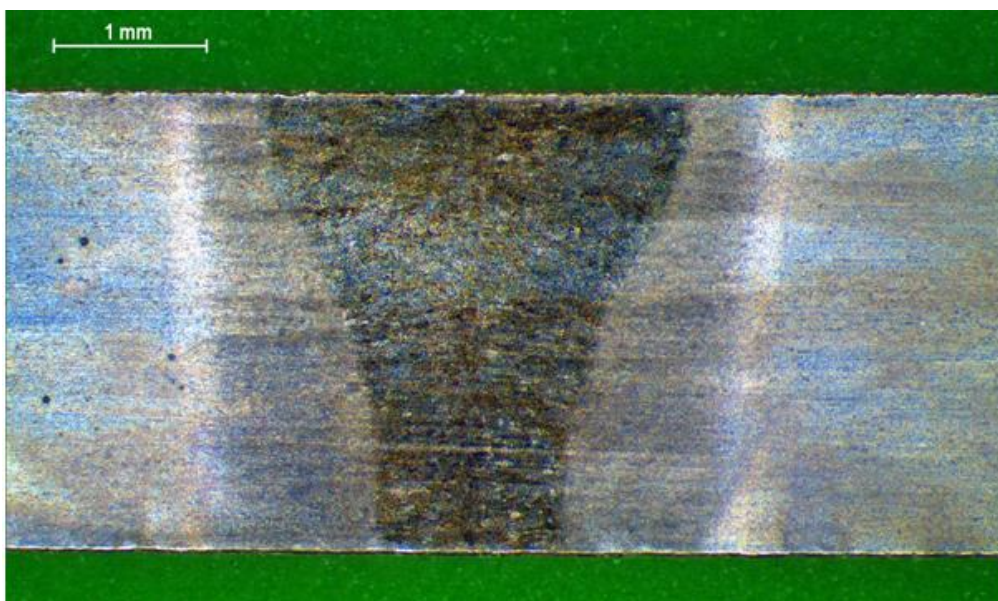
Slika 34. Poprečni presjek zavarenog spoja pri brzini od 110 cm/min

Tablica 6. Dimenzije zavara pri brzini od 110 cm/min

Brzina zavarivanja $v$ (cm/min)	Širina zavara $b_{zav}$ (mm)	Širina korijena $b_{kor}$ (mm)	Širina ZUT-a $b_{zut}$ (mm)	Površina zavara $A$ (mm <sup>2</sup> )
110	3,01	1,41	0,54	5,59

Povećanjem brzine zavarivanja na 130 cm/min dolazi do blagog smanjenja širine zavara, ZUT-a i korijena zavara te je površina zavara manja. Poprečni presjek zavarenog spoja prikazan je na slici 35, a dimenzije u tablici 7.



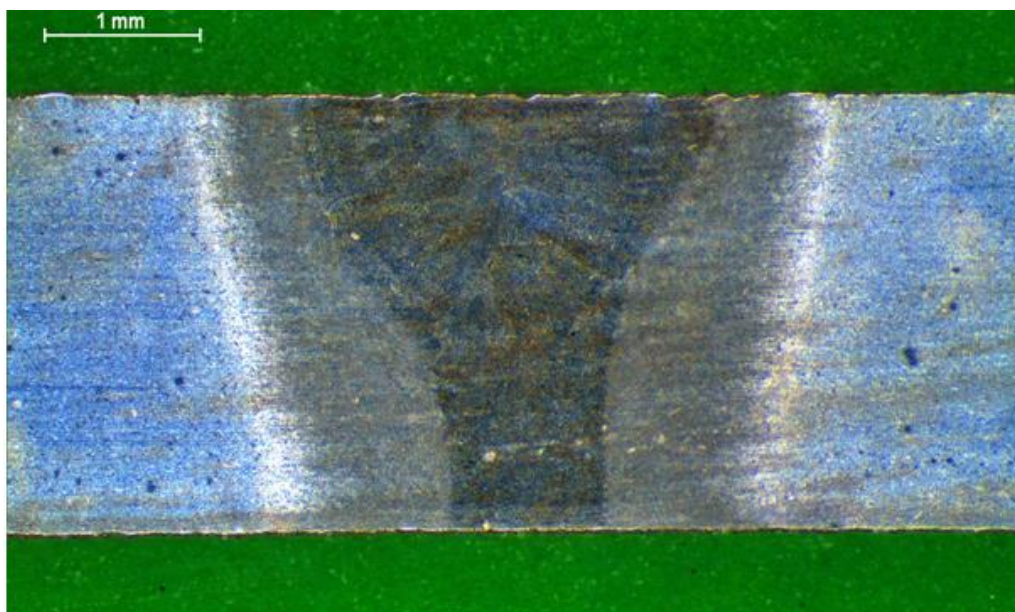


Slika 35. Poprečni presjek zavarenog spoja pri brzini od 130 cm/min

Tablica 7. Dimenzije zavara pri brzini od 130 cm/min

Brzina zavarivanja $v$ (cm/min)	Širina zavara $b_{zav}$ (mm)	Širina korijena $b_{kor}$ (mm)	Širina ZUT-a $b_{zut}$ (mm)	Površina zavara $A$ (mm <sup>2</sup> )
130	2,78	1,27	0,49	5,03

Najmanje dimenzije zavara i najmanja površina postignute su pri najvećoj ispitnoj brzini od 150 cm/min. Geometrijske karakteristike zavara (slika 36) su zadovoljavajuće te je postignuta potpuna penetracija. Dimenzije zavara prikazane su u tablici 8.



Slika 36. Poprečni presjek zavarenog spoja pri brzini od 150 cm/min

Tablica 8. Dimenzije zavara pri brzini od 150 cm/min

Brzina zavarivanja $v$ (cm/min)	Širina zavara $b_{zav}$ (mm)	Širina korijena $b_{kor}$ (mm)	Širina ZUT-a $b_{zut}$ (mm)	Površina zavara $A$ (mm <sup>2</sup> )
150	2,64	0,98	0,43	4,52

### **Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka zavarenog spoja**

Eksperiment je proveden s ciljem određivanja promjene geometrije poprečnog presjeka zavarenog spoja uslijed promjene brzine zavarivanja kao jedinog parametar koji se mijenja tijekom eksperimenta.

U izvedenom pokusu dobivena je zavisnost između unošene energije tj. brzine zavarivanja i geometrije zavara. S porastom brzine zavarivanja smanjio se unos topline u metal zavara, a time se suzila zona utjecaja topline i smanjila širina lica i korijena zavara, tj. površina poprečnog presjeka zavara smanjuje se povećanjem brzine. Naravno brzina zavarivanja nije jedini parametar koji utječe na oblik zavara, ali ovaj eksperiment bazirao se na toj osnovi.

Dobiveni su zadovoljavajući rezultati zavarivanja i geometrijskih značajki zavarenih spojeva. Sa svim brzinama zavarivanja postignuta je potpuna penetracija. Povećanjem brzine zavarivanja povećava se ekonomičnost, te se smanjuju širina zavara i ZUT-a, pa tako i deformacije, što upućuje na opravdanost upotrebe brzine od 150 cm/min.

## 10. ZAKLJUČAK

Primjena laserskog zavarivanja u industriji u stalnom je porastu. Broj robota za zavarivanje u svijetu značajno se povećava zbog same prednosti robotizirane proizvodnje i napretka na području robotike. Postižu se puno veće brzine zavarivanja te visoka kvaliteta zavarenog spoja uz male ili nikakve deformacije dijelova koji se zavaruju. Kod laserskog zavarivanja ZUT je vrlo uzak, a struktura zavara je sitnozrnata što u određenoj mjeri kompenzira negativno djelovanje visokog gradijenta tvrdoće u ZUT-u. To je problem koji se javlja kod zavarivanja čelika s povećanim sadržajem ugljika. U odnosu na konvencionalne postupke omogućena je visoka preciznost zavarivanja i najkompleksnijih dijelova te mali i kontrolirani unos energije s obzirom na visoku gustoću snage laserskog snopa.

Sve je veći razvoja novih vrsta lasera koji eliminiraju nedostatke prethodnih te postaju direktna konkurencija starijim postupcima. To su disk, fiber i diodni laseri koji imaju veću energetska učinkovitost i bolju kvalitetu laserske zrake što se rezultira na povećanju fleksibilnosti i produktivnosti samog procesa. Zbog jedinstvenosti samog procesa zavarivanja, lasersko zavarivanje kombinira se s konvencionalnim postupcima, kako bi se postigli zavari s dubokom penetracijom i malim ZUT-om.

Glavni nedostatak u usporedbi s konvencionalnim postupcima su i dalje visoki investicijski troškovi, pogonski troškovi i troškovi održavanja. To se može kompenzirati integracijom u visoko automatizirane fleksibilne procese s ciljem velike produktivnosti visokokvalitetnih proizvoda.

U eksperimentalnom dijelu rada određen je utjecaj brzine zavarivanja Nd:YAG laserom na geometrijske karakteristike zavarenog spoja.

## 11. LITERATURA

- [1] Bistričić L.: *Fizika lasera*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2014.
- [2] Breck C., Hitz C., Ewing J., Hecht J.: *Introduction to Laser Technology*, IEEE PRESS, New Jersey, 2012.
- [3] Rofin: *Process Fundamentals of Industrial Laser Welding and Cutting*, Sinar, Michigan, 1999.
- [4] Schneider M.: *Laser Cladding with Powder*, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 1998.
- [5] Garašić I.: *Zavarivanje laserom- prezentacija*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [6] Olsen F. O.: *Hybrid laser-arc*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009.
- [7] Rofin: *Introduction to Industrial Laser Materials Processing*, Hamburg, 2004.
- [8] Godinović N.: Autorizirana predavanja iz kolegija „*Eksperimentalne metode moderne fizike*“, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2006./2007.
- [9] Trumpf: [http://www.trumpf.com/fileadmin/DAM/trumpf.com/Innovation/Laser\\_as\\_a\\_tool\\_Chapter\\_4.pdf](http://www.trumpf.com/fileadmin/DAM/trumpf.com/Innovation/Laser_as_a_tool_Chapter_4.pdf), dostupno 02./2016.
- [10] Pires J. N., Loureiro A., Bölmjsjo G.: *Welding Robots*, Springer, Portugal, 2006.
- [11] Dawes C.: *Laser welding, A practical guide*, Abington Publishing, Cambridge, 1992.
- [12] Bauer B.: *Lasersko zavarivanje čelika s povećanim sadržajem ugljika*, Magistarski rad, Zagreb, 2002.
- [13] Unitek Miyachi Corporation: *Nd:YAG Laser Welding Guide*, 2003.
- [14] Majumdar J. D., Manna I.: *Laser Assisted Fabrication of Materials*, Springer, 2013.
- [15] TWI- global: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-the-difference-between-gas-shielding-plasma-control-and-plume-control-in-laser-welding/>, dostupno 02./2016.
- [16] Bauer B.: *Optimiranje parametra zavarivanja čelika za poboljšavanje*, Doktorski rad, Zagreb, 2006.

- [17] Müller M.: Fine Welding with Lasers, Rofin; [http://engineers.org.il/\\_Uploads/10355RofinFineWeldingwithLaser.pdf](http://engineers.org.il/_Uploads/10355RofinFineWeldingwithLaser.pdf), dostupno 02./2016.
- [18] Rofin: <http://www.rofin.es/wp-content/uploads/2015/05/Cat%C3%A1logo-comparativa-corte-l%C3%A1ser-CO2-y-Fibra.pdf> , dostupno 02./ 2016.
- [19] Laser focus world: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue4/features/the-state-of-the-art.html>, dostupno 01./2016.
- [20] The fabricator: <http://www.thefabricator.com/article/testingmeasuring/exploring-the-versatility-of-laser-vision-systems>, dostupno 02./2016.
- [21] Double-clad\_fiber: [https://en.wikipedia.org/wiki/Double-clad\\_fiber](https://en.wikipedia.org/wiki/Double-clad_fiber), dostupno 01./2016
- [22] The fabricator: <http://www.thefabricator.com/article/laserwelding/welding-with-diode-lasers>, dostupno 01./2016.
- [23] TWI-global: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/what-is-a-disk-laser/>, dostupno 01./2016.