

# Korištenje NO:YAG lasera u proizvodnji elektronskih ekspanzijskih ventila

---

**Brubnjak, Leo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Istrian University of applied sciences / Istarsko veleučilište - Università Istriana di scienze applicate**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:212:449327>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-25**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital repository of Istrian University of applied sciences](#)



ISTARSKO VELEUČILIŠTE -  
UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE APPLICATE

Leo Brubnjak

**KORIŠTENJE ND:YAG LASERA ZA ZAVARIVANJE  
ELEKTRONSKIH EKSPANZIJSKIH VENTILA**

Završni rad

Pula, 2021.



ISTARSKO VELEUČILIŠTE -  
UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE APPLICATE

Leo Brubnjak

**KORIŠTENJE ND:YAG LASERA ZA ZAVARIVANJE ELEKTRONSKIH  
EKSPANZIJSKIH VENTILA**

Završni rad

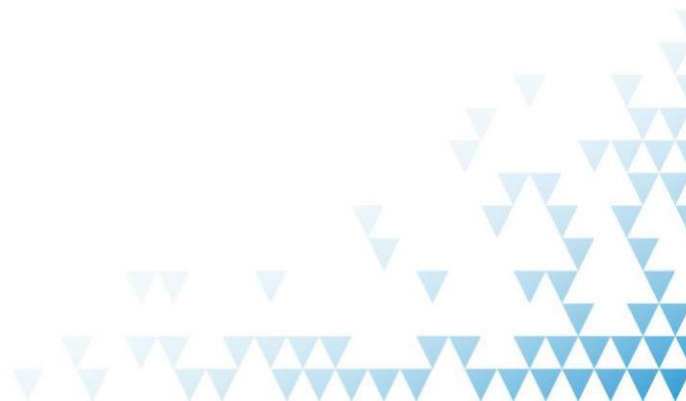
JMBAG: 02420090070

Studijski smjer: Politehnika

Kolegij: Tehnologija i proizvodna tehnika 2

Mentor: dr.sc. Davor Stanić, dipl. ing.

Pula, 2021.





## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Leo Brubnjak, kandidat za stručnog prvostupnika inženjera politehnike ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

U Puli, 2021. godine

Student

---



## IZJAVA

### o korištenju autorskog djela

Ja, Leo Brubnjak dajem odobrenje Istarskom veleučilištu – Università Istriana di scienze applicate, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom "Korištenje Nd:YAG lasera u proizvodnji elektronskih ekspanzijskih ventila" koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, 2021. godine

Potpis

---

# Sadržaj

1. Uvod .....	7
1.1 Problem i predmet istraživanja .....	7
1.2 Ciljevi rada .....	7
1.3 Hipoteza rada .....	8
1.4. Metode rada .....	8
1.5 Struktura rada.....	8
2. Princip rada lasera .....	9
3. Zavarivanje laserom.....	11
3.1. CO <sub>2</sub> laser .....	11
3.2. Nd:YAG laser .....	12
3.3. Disk laser .....	14
3.4 Optički (Fiber) laser .....	16
4. Elektronski ekspanzijski ventil.....	16
5. Proces proizvodnje elektronskog ekspanzijskog ventila.....	19
5.1 Proces zavarivanja elektronskog ekspanzijskog ventila .....	22
5.2. Optički laserski izvor IPG Photonics .....	26
5.3 Osiguravanje kvalitete zavarivanja .....	28
5.3.1 Mjerenje snage.....	28
5.3.2 Metalografija .....	30
6 Zaključak .....	34
Literatura.....	36
Popis slika .....	37
Popis tablica.....	38
Popis grafikona.....	38
Sažetak .....	39

## **1. Uvod**

Laser („Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“) je u prijevodu pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. Laserska svjetlost je u odnosu na druge izvore svjetlosti koherentna, monokromatska i usmjerena. Preteča lasera bio je Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Koncept stimulirane emisije dolazi od Alberta Einsteina iz 1917. godine kada je dao teorijski koncept postojanja fotona da bi objasnio fotoelektrični učinak, ipak trebalo je gotovo 40 godina dok se nije prepoznalo da ovaj proces može koristiti u uređaju za proizvodnju koherentnih mikrovalova i laserske svjetlosti.

Laser je ubrzo postao važan uređaj koju je svoju primjenu pronašao u različitim tehnologijama izrade kao što su npr. (zavarivanje, rezanje i graviranje), telekomunikacijama (prijenos podataka), medicini (korekcija vida), meteorologiji (mjerenje udaljenosti), informacijskoj tehnologiji (laserski pisari)

### **1.1 Problem i predmet istraživanja**

Osnovni problem istraživanja je odabir odgovarajuće vrste laserskog izvora za zavarivanje čeličnih elektronskih ekspanzijskih ventila. Trenutno je na tržištu dostupno nekoliko različitih tehnologija koje daju slične krajnje rezultate. Predmet istraživanja u ovom radu je postojeća proizvodna linija u firmi Carel Adriatic.

### **1.2 Ciljevi rada**

Ciljevi rada su:

- Objasniti princip rada lasera
- Nabrojati osnovne dijelove svakog lasera

- Dati uvid u različite vrste lasera koji se koriste za zavarivanje
- Prikazati trenutno stanje proizvodnje i osiguravanje kvalitete izrade elektronskih ekspanzijskih ventila u tvrtki Carel Adriatic

### **1.3 Hipoteza rada**

Hipoteza ovog rada može se definirati da je Nd:YAG laser optimalna i najekonomičnija vrsta izvora lasera za zavarivanje elektronskih ekspanzijskih ventila

### **1.4. Metode rada**

U ovom radu korištene su slijedeće znanstveno-istraživačke metode:

- Metoda analize
- Metoda sinteze
- Metoda klasifikacije
- Metoda deskripcije

### **1.5 Struktura rada**

Ovaj rad podijeljen je u šest poglavlja. U samom uvodu definiran je problem i predmet istraživanja, cilj rada, navedena je hipoteza te su navedene znanstveno-istraživačke metode korištene prilikom izrade rada.

U drugom dijelu je objašnjen princip rada lasera i kako dolazi do laserske zrake

U trećem dijelu su navedeni laserski izvori koji se najčešće koriste za zavarivanje

U četvrtom dijelu je navedeno gdje se koristi elektronski ekspanzijski ventil i koja je njegova primjena.



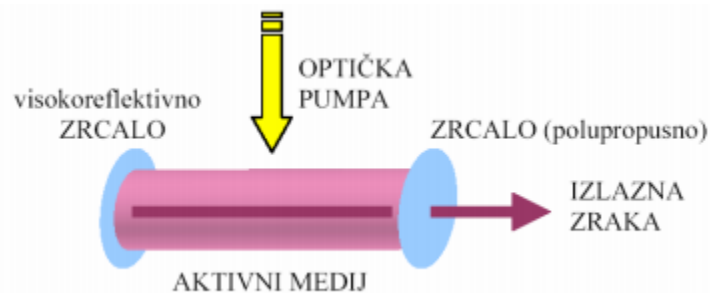
U petom dijelu je objašnjen proces izrade elektronskog ekspanzijskog ventila, zavarivanja, te su navedene provjere koje se svakodnevno izvode kako bi se osigurala izrada kvalitetnog proizvoda.

Zaključak je naveden u šestom dijelu.

## 2. Princip rada lasera

Znamo da kada svjetlost obasja neku površinu jedan dio se uvijek apsorbira. Ako uključimo ručnu lampu i uperimo je u crni list papira, molekule u papiru apsorbiraju svjetlost, prime energiju svjetlosti i zagrijavaju se. Laser je obrnuti proces toga, umjesto dobivanja energije od svjetla, on daje energiju svjetlu. Ako je papir laser, onda bi svjetlost koja udara u papir izašla s druge strane svjetlija nego prije.

Slika 1: Osnovni dijelovi lasera



Izvor: [http://eskola.hfd.hr/susreti/Laseri\\_Ticijana\\_Ban.pdf](http://eskola.hfd.hr/susreti/Laseri_Ticijana_Ban.pdf) (18.08.2021)

Razlikujemo tri osnovna dijela lasera:

- Optička ili laserska pumpa koja daje energiju aktivnom mediju
- Aktivni ili laserski medij ovisno o tipu lasera može biti u tekućem, plinovitom ili čvrstom stanju
- Rezonantni sustav dva paralelno postavljena zrcala od kojih je jedno nepropusno a drugo polupropusno

Generiranje laserske zrake proces je u tri koraka koji se dešavaju gotovo trenutno:

- 1) Laserska pumpa dovodi energiju u medij, pobuđuje atome u mediju tako da su elektroni zadržani u atomima privremeno na višoj energetskej razini. Elektroni zadržani u ovom stanju ne mogu tako ostati zauvijek pa se spuštaju na nižu energetskej razinu. U tom procesu elektron izgubi višak energije dobiven od laserske pumpe emitirajući foton. To zovemo spontanom emisijom.
- 2) Fotoni emitirani spontanom emisijom naposljetku udaraju druge elektrone na višoj energetskej razini. „Naposljetku“ je vrlo kratko vrijeme zbog brzine svjetlosti i gustoće pobuđenih atoma. Dolazni foton izbacuje elektrone sa više energetske razine u nižu kreirajući foton. Ta dva fotona su u istoj fazi, iste valne duljine, putuju istom brzinom i u istom smjeru. To zovemo stimuliranom emisijom
- 3) Fotoni se emitiraju u svim smjerovima, međutim neki putuju duž laserskog medija kako bi udarili u zrcalo rezonatora i reflektirali se natrag kroz medij. Rezonatorska zrcala definiraju preferirani smjer pojačanja za stimuliranu emisiju. Da bi došlo do pojačanja mora postojati veći postotak atoma u pobuđenom stanju nego nižih energetskej razina. To zovemo inverzija populacije.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Unitek Miyachi Corporation: Nd:YAG Laser Welding Guide, 2003.

### 3. Zavarivanje laserom

Postoji puno različitih tipova lasera, ali samo nekolicina ima dovoljno visoku izlaznu snagu potrebnu za zavarivanje. Trenutno, najviše se koriste CO<sub>2</sub> (ugljičkov dioksid) i Nd:YAG (neodimij: itrij-aluminij-granat) laser. Međutim, nedavno Yb:YAG (iterbij: itrij-aluminij-granat) disk i Yb fiber laser imaju visoku izlaznu snagu i kvalitetu laserskog snopa, te postaju sve dostupniji pa se sve više koriste za zavarivanje. Peti tip lasera koji se koristi je diodni laser.

Tablica 1: Usporedba najčešće korištenih lasera za zavarivanje <sup>2</sup>

	CO <sub>2</sub>	Nd:YAG	Disk	Fiber	Diodni
Aktivni medij	Plin	Kristalni štapić	Kristalni disk	Dopirana optička vlakna	poluvodič
Valna duljina (μm)	10,6	1,06	1,06	1,07	0,808-0,98
Efikasnost (%)	10-15	1-3	10-20	20-30	35-55
Izlazna snaga (kw)	20	6-16	8	50	8
Kvaliteta zrake (BPP) mm x mrad	4	25	2	2-25	44
Prijenos zrake	Zrcalo	Optički kabel	Optički kabel	Optički kabel	Optički kabel

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

CO<sub>2</sub> laser je najpopularniji plinski laser za obradu materijala danas. Aktivni medij je CO<sub>2</sub> pomiješan sa dušikom i helijem. Tijekom rada molekule dušika prenose energiju CO<sub>2</sub> molekulama sudarom elektrona. Prelaskom sa višeg energetskeg stanja CO<sub>2</sub> molekula u niže energetske stanje oslobađa se foton, što u konačnici dovodi do emisije

<sup>2</sup> Olsen F. O.: Hybrid laser-arc, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009.

laserskog snopa. Sudarajući se sa atomima helija molekule CO<sub>2</sub> vraćaju se u početno stanje te su ponovno dostupni za još jedan ciklus.<sup>3</sup>

Kao nedostacima ovakvog lasera najčešće se spominji visoka valna duljina i emitirano zračenje. Jedna od posljedica je ta da većina materijala koja su prozirna u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra za CO<sub>2</sub> laser su neprozirna, npr. staklo. Zbog toga se rezonator i elementi koji provode lasersku zraku u ovom laseru moraju raditi od specijalnih i skupih materijala kao što su cinkov selenid, otklon i fokusiranje snopa moraju biti izrađeni od reflektivne zlatne ili višeslojne bakrene podloge.

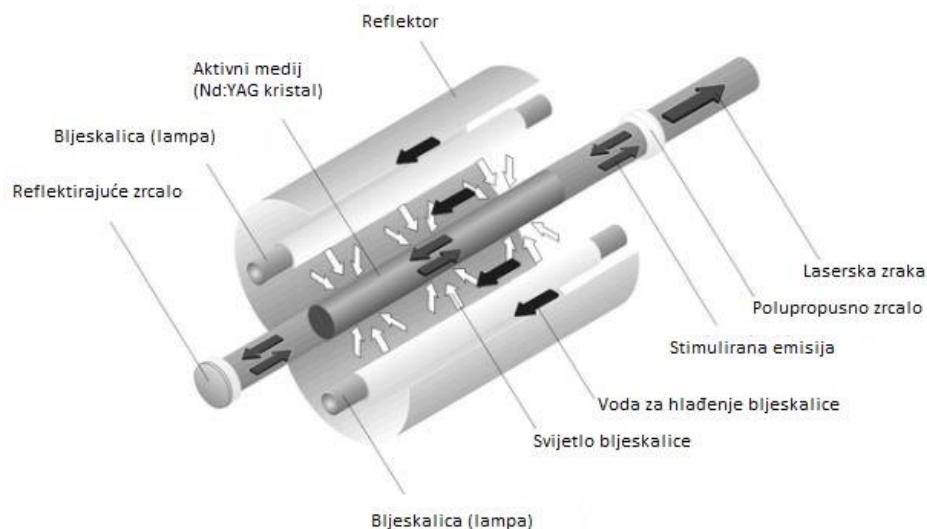
### **3.2. Nd:YAG laser**

Nd:YAG laser je najrašireniji laser sa čvrstim medijem. Radi na valnoj duljini od 1,06 μm. Energija se optički dovodi ili bljeskalicama visokog intenziteta ili laserskim diodama. U odnosu na plinske lasere, Nd:YAG kristal se aktivira optičkim putem, a kvaliteta izlaznog snopa smanjuje se s povećavanjem izlazne snage. Slijedom toga kvaliteta snopa je znatno niža od kvalitete snopa CO<sub>2</sub> lasera, ali zahvaljujući kraćoj valnoj duljini Nd:YAG laseri mogu postići slične veličine žarišta fokusa.

---

<sup>3</sup> Rofin: Introduction to Industrial Laser Materials Processing, Hamburg, 2004

Slika 2: Shematski prikaz Nd:YAG lasera



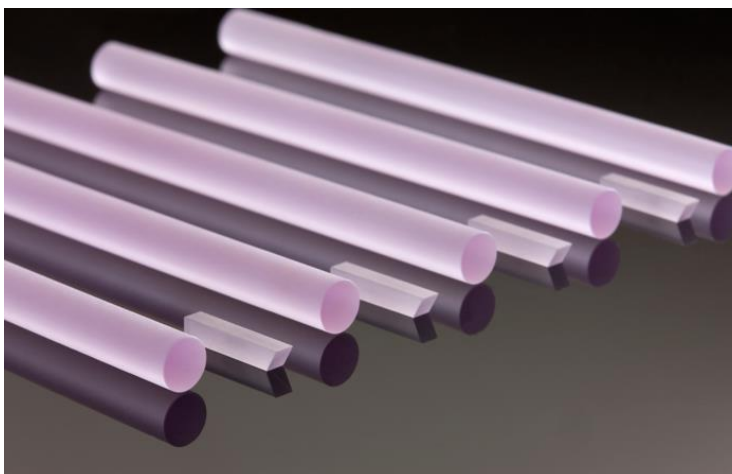
Izvor: Rofin (2005.) Introduction to Industrial Laser Materials Processing

Niža valna duljina Nd:YAG lasera donosi neke bitne prednosti. Laserska zraka može se provoditi optičkim kabelom i fokusirati običnim lećama što su važne prednosti za uporabu pri robotskom zavarivanju i zavarivanju složenih trodimenzionalnih konstrukcija. Također, ne dolazi do značajne interakcije između laserskog zračenja i nastale metalne pare prilikom zavarivanja kao kod CO<sub>2</sub> lasera <sup>4</sup>

Kristal Nd:YAG lasera ima oblik štapića debljine od 2 do 8 mm i dužine od 20 do 200mm. Ovi kristali mogu imati vanjsku snagu do 1000 W. Krajevi kristala su uvijek ispolirani kako bi imali najbolja optička svojstva

<sup>4</sup> Olsen F. O.: Hybrid laser-arc, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009.

Slika 3: Kristal Nd:YAG



Izvor: <https://www.scientificmaterials.com/products/nd-yag.php> (20.08.2021.)

Napravljen je od Itrij-Aminijevog granata dopiranim atomima neodimija. Neodimij je aktivni medij koji se umeće u kristalnu rešetku i zamjenjuje do 1% atoma itrija. Ovakav tip lasera ima mnogobrojne upotrebe kao što su LASIK operacija skidanja dioptrije u oftalmologiji, stomatologiji i laserskoj spektroskopiji. Generira lasersku svjetlost u infracrvenom spektru valne duljine 1064 nm. Pošto materijal ima veliku toplinsku vodljivost moguće je ovaj laser upotrebljavati u impulsnom i kontinuiranom radu. Valna duljina nalazi se u infracrvenom području pa tako nije vidljiva golim okom.

### 3.3. Disk laser

Takozvani Disk laseri koriste Iterbij (Yb), koji se također umeće u kristalnu rešetku YAG-a. Iterbij je u ulozi laserski aktivnog iona, ima značajnu prednost u odnosu na neodimij zbog svoje veličine pa se bolje uklapa u kristalnu rešetku. To omogućuje veće dopiranje, kod Nd:YAG lasera tipično je dopiranje do 1% neodimija, Yb:YAG laseri dopuštaju dopiranje do 30%. Dopiranjem Nd:YAG lasera sa više od 1% neodimija došlo bi do mehaničkog naprezanja u kristalnoj rešetci. Činjenica da se koristi kristal u obliku diska, umjesto štapića pogodno je s tehničke strane, jer zauzima manje prostora. Ovaj tip lasera ima disk dimenzija od 150 do 300  $\mu\text{m}$  debljine i 10 mm širine.<sup>5</sup>

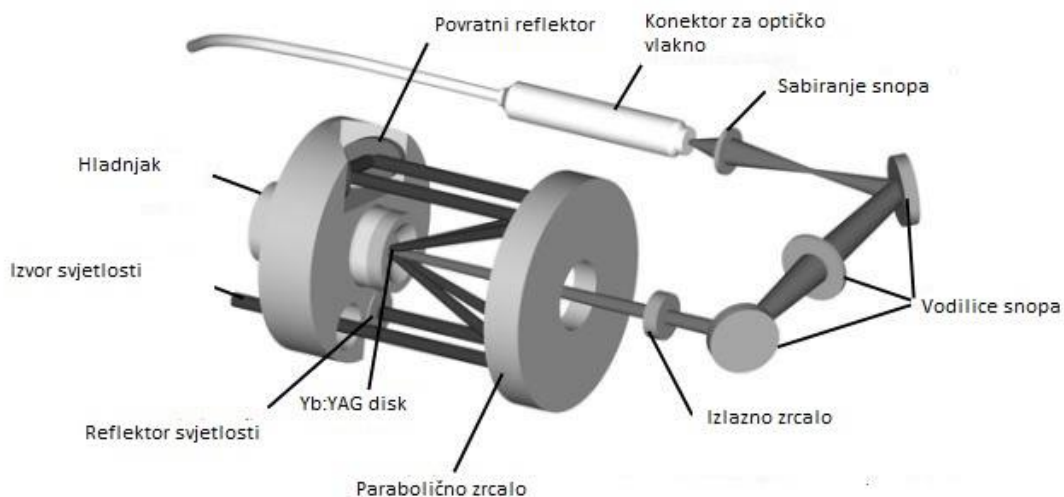
---

<sup>5</sup> Olsen F. O.: Hybrid laser-arc, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009.

Radi se o novijoj tehnologiji pa su sistemi još u fazi razvoja, ali disk laseri već daju obećavajuće rezultate kao što su:

- Faktor ukupne učinkovitosti do 20%
- BPP 7 mm x mrad pri snazi većoj od 750W po disku – BPP (“beam parameter product” je produkt kuta divergencije laserske zrake i polumjera zrake u njezinoj najužoj točki. BPP procjenjuje kvalitetu laserskog snopa i koliko se dobro može fokusirati na malu točku.
- Manji unos topline u materijal
- Kompaktan dizajn laserske glave

Slika 4: Shematski prikaz disk lasera



Izvor: Rofin (2005.) Introduction to Industrial Laser Materials Processing

### 3.4 Optički (Fiber) laser

Optički laseri su laseri koji za medij pojačanja koriste dopirano optičko vlakno. Rad optičkih vlakna se temelji na principu totalne refleksije. Optičko vlakno se sastoji od jezgre i ovojnice. Veličina jezgre je oko 10  $\mu\text{m}$  za jednomodno vlakno, te oko 63  $\mu\text{m}$  za višemodno vlakno. Jezgra je obično napravljena od kombinacije silicija (Si) i germanija (Ge). Oko jezgre je sloj silicija (Si) čiji je indeks loma manji od indeksa loma jezgre.

Optičko pumpanje postiže se pomoću lasera na lijevoj strani pri čemu svjetlost ulazi u vlakno. Na desnoj strani se pomoću drugog zrcala dobiva laserski signal iz optičkog vlakna. Braggova rešetka zamjenjuje zrcala tako da propušta određene valne duljine, dok druge zaustavlja. Kod optičkog lasera aktivno sredstvo je jezgra dopirana s rijetkim zemljinim ionima kao što su su erbij ( $\text{Er}^{3+}$ ), iterbij ( $\text{Yb}^{3+}$ ), neodimij ( $\text{Nd}^{3+}$ ) i drugi. Laserski prijelazi se odvijaju u primjesnim ionima. <sup>6</sup>

Slika 5: Shematski prikaz optičkog lasera



Izvor: Bistričić L. (2014) Fizika lasera

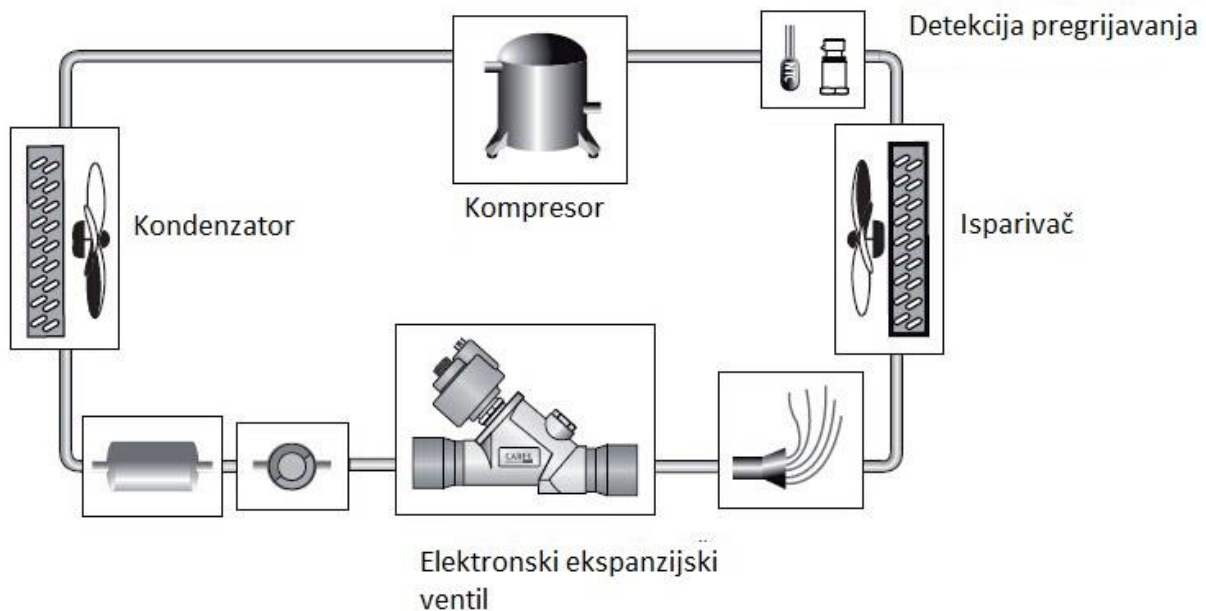
## 4. Elektronski ekspanzijski ventil

Elektronski ekspanzijski ventil koristi se u sistemima klimatizacije i hlađenja. Služi kao regulator protoka rashladnog sredstva prema isparivaču. Ova vrsta ventila kontrolira protok rashladnog sredstva pomoću signala kojeg dobije preko elektronskog kontrolera. Za rad samog ventila zaslužan je koračni motor pomoću kojeg je moguća precizna regulacija rashladnog sredstva za što bolju energetska učinkovitost kompletnog sustava.

<sup>6</sup> Bistričić L.: Fizika lasera, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2014



Slika 6: Primjena ventila u praksi



Izvor: <https://www.carel.com/documents/10191/0/+030220811/efea4435-4de2-4ceb-a9ea-8d69642ab32a?version=1.1> (20.08.2021)

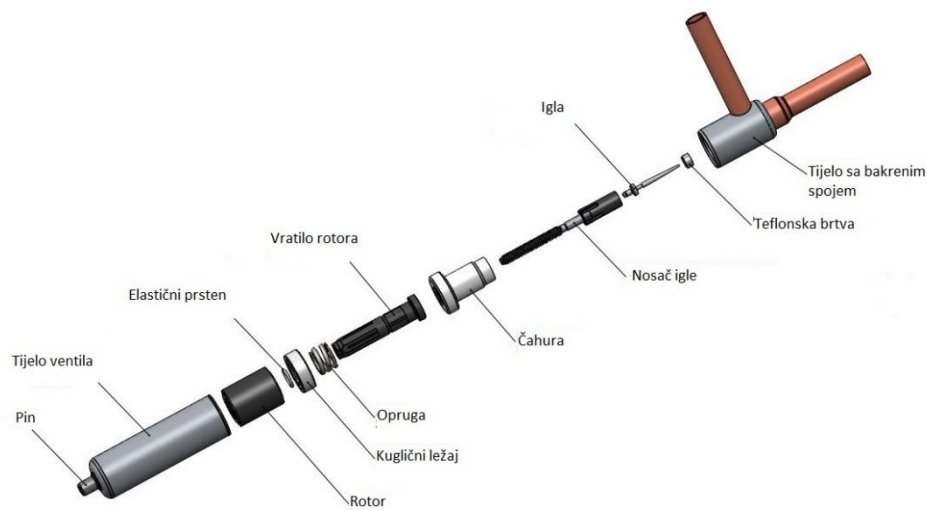
Neke od prednosti korištenja elektronskog ventila u odnosu na termostatske su:

- Stabilnija i preciznija kontrola pregrijavanja
- Širok raspon kontrole od 0 do 100% protoka
- Usklađenost sa širokim spektrom rashladnih sredstva bez potrebe da se odabere određena vrsta ventila u odnosu na sredstvo. Tip rashladnog sredstva se odabire kao parametar kontrolera.
- Za razliku od termostatskih ventila, nije potrebna periodična kalibracija.
- Brz odziv na vanjske utjecaje (zatvaranje i otvaranje ventila)
- Hermetičko brtvljenje osigurano korištenjem brtvi i motora visokih performansi. Termostatske ventile je potrebno koristiti u kombinaciji sa elektromagnetnim ventilom kako bi se spriječilo migriranje rashladnog sustava u kompresor.

Kao rezultat dobijemo:

- Uštedu energije za krajnjeg korisnika, niži tlak kondenzacije znači manje opterećenje kompresora. Usporedna istraživanja elektronskih i termostatskih ventila pokazuju uštedu u godišnjoj potrošnji energije za od 15 do 35% pri korištenju elektronskih ventila.
- Niži troškovi održavanja, bolji uvjeti rada kompresora
- Manje komponenti s kojima korisnici moraju rukovati kako isto rješenje pokriva širok raspon rashladnih sredstava.

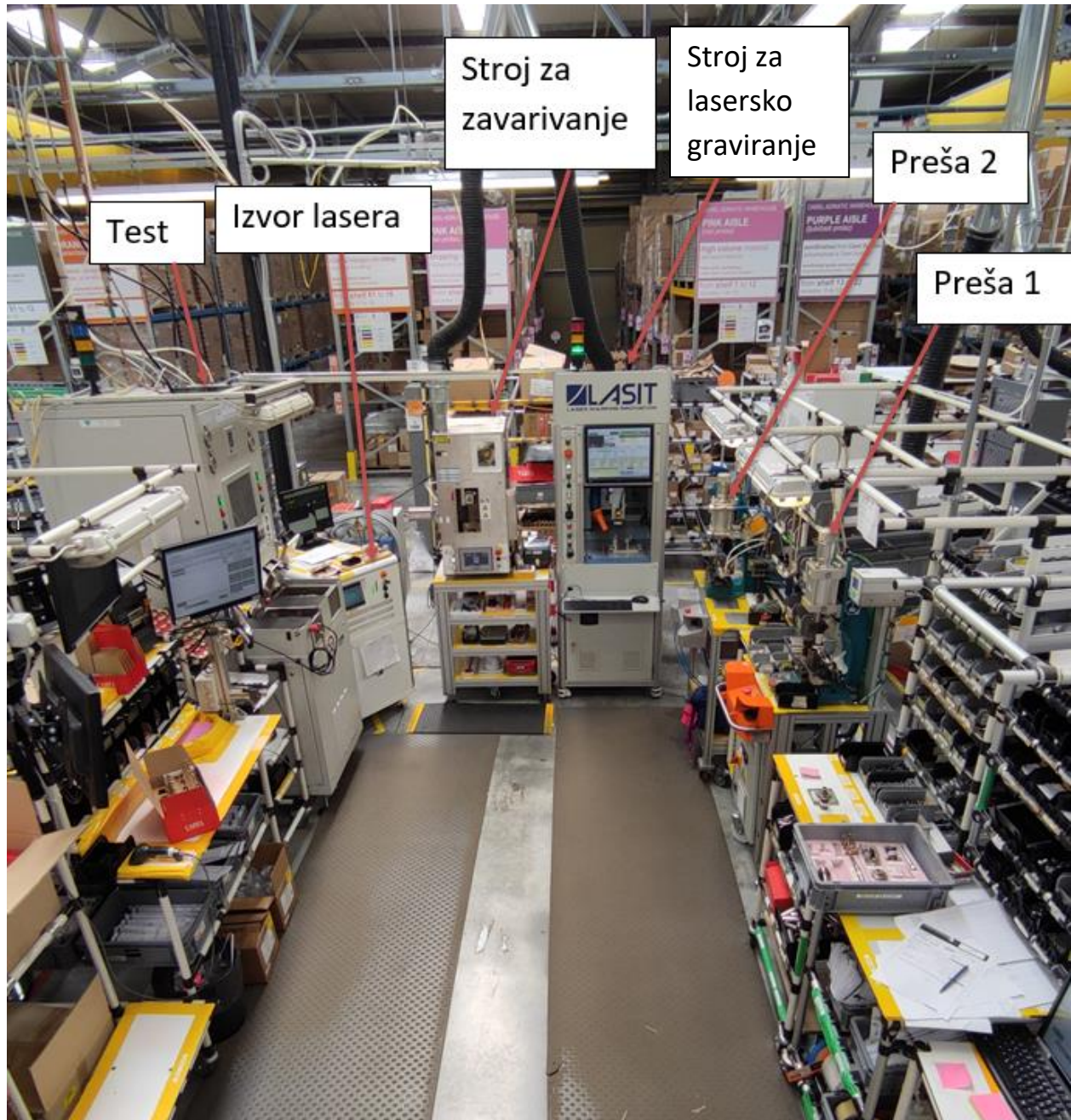
Slika 7: Sastavni dijelovi elektronskog ekspanzijskog ventila



Izvor: Carel interni dokumenti

## 5. Proces proizvodnje elektronskog ekspanzijskog ventila

Slika 8: Proizvodna linija elektronskih ekspanzijskih ventila



Izvor: fotografija autora rada

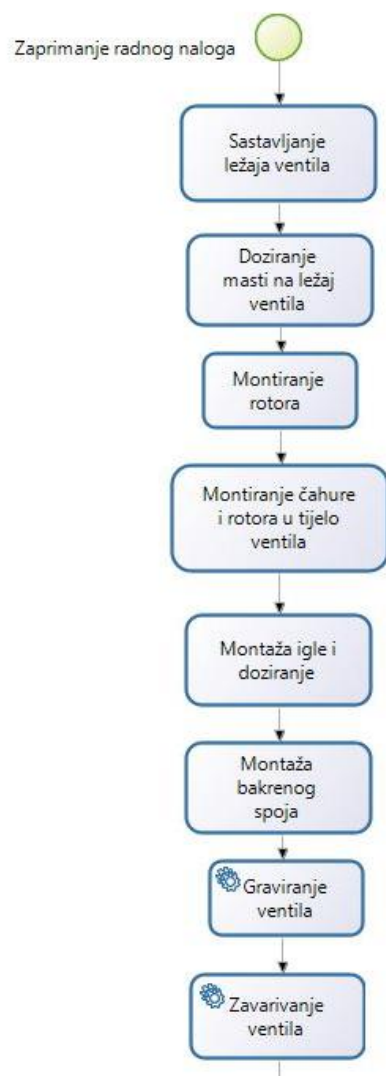
Pneumatske preše služe za sastavljanje unutarnjih dijelova ventila.

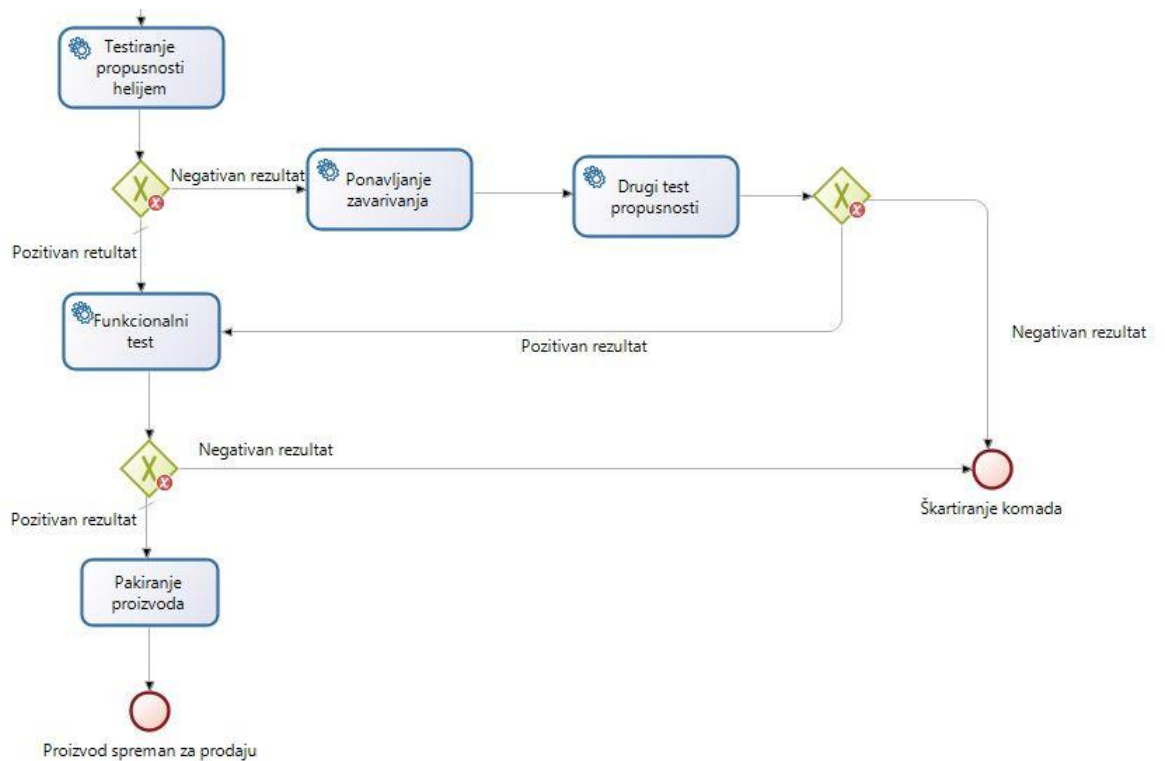
Stroj za lasersko graviranje označava svaki ventil jedinstvenim QR kodom, serijskim brojem, modelom ventila i datumom proizvodnje. Radi se o aktivnom fiber laseru dopiranom iterbijem. Očekivani radni vijek ovakvog izvora lasera je više od 100.000 sati aktivnog rada.

Svaki ventil prije prodaje mora se testirati kroz dvije faze. U prvoj fazi je testiranje propusnosti. Ventil se stavlja u hermetički zatvorenu komoru u kojoj se najprije napravi vakuum, zatim se kroz spojeve ventila propušta plin helij (He), a istovremeno se u komori detektira da li dolazi do propuštanja helija kroz ventil. Helij se koristi zbog najmanje čestice a negativan ishod na testu najčešće upućuje na grešku pri zavarivanju. Svako propuštanje veće od  $10^{-5}$  milibara po litri u sekundi daje negativan ishod testa.

Druga faza je testiranje funkcionalnosti ventila. Potrebno je na ventil spojiti stator, spojevi ventila se zatvaraju, kontroler šalje signal da se ventil u potpunosti zatvori i zatim se na nekoliko sekundi kroz jedan spoj pušta zrak pod pritiskom od 40 bara. Ako zrak ne dolazi do drugog spoja rezultat je pozitivan. Drugi dio testiranja funkcionalnosti napravljen je u tri faze gdje se ventil zatvara na 25, 50 i 75% i kroz jedan spoj se pušta pritisak od 5 bara dok se na drugom spoju mjeri dolazni pritisak. Svaki rezultat testiranja je pohranjen i svaki prodani ventil se može povezati sa pojedinačnim rezultatom testa, tako da je osigurana sljedljivost proizvoda u slučaju eventualnih problema kvalitete kod kupaca.

Slika 9: Sinoptik operacija izrade elektronskih ekspanzijskih ventila





Izvor: Izrada autora

## 5.1 Proces zavarivanja elektronskog ekspanzijskog ventila

U procesu se koriste dva stroja koja međusobno komuniciraju i povezani su optičkim vlaknom. Izvor lasera je Sisma SL300, uređaj koji u sebi ima dva Nd:YAG kristala. Kao laserska pumpa koristi se ksenonska bljeskalica koja je ujedno i jedna od mana ove vrste uređaja zbog toga što ima vijek trajanja od oko 4 milijuna impulsa pa je potrebno mijenjati obje bljeskalice svakih cca 300 radnih sati. Za svaki program zavarivanja moguće je podesiti snagu impulsa, duljinu impulsa i frekvenciju impulsa. Ventil je izrađen od austenitnog čelika Aisi 304.

Slika 10: Izvor lasera



Izvor: fotografija autora rada

Slika 11: Tehničke specifikacije izvora lasera



**SL 300**

Laser	Nd:YAG - 1064 nm
Average power	300 W
Pulse peak power	12 kW
Max pulse energy	100 J
Pulse frequency	0 ÷ 100 Hz
Pulse duration	0,3 - 25 ms
Cooling	Air
Cruise Control	/
Power supply	400 Vac 50 ÷ 60 Hz 3 ph
Dimensions (LxWxH)	900 x 630 x 1090 mm
Weight	206 kg

Izvor: [https://www.sisma.com/wp-content/uploads/2018/09/SL-series\\_industrial\\_2020.pdf](https://www.sisma.com/wp-content/uploads/2018/09/SL-series_industrial_2020.pdf) (25.08.2021.)

Drugi je stroj za zavarivanje koji je napravljen u Carelu Italija. Njemu je zadaća da upravlja ventilom i laserskom glavom. Svaki program za zavarivanje sastavljen je od niza „ćelija“. Ćelije su sastavljene od sljedećih parametara:

X- Udaljenost ventila i laserske glave. Promjenom ovog parametra proporcionalno se mijenja širina zavara.

Z- Visina zavara. Podiže i spušta ventil ovisno o postavljenom parametru

Tilt- Kut laserske glave. Laserska glava ima mogućnost mijenjanja kuta upadanja laserskog snopa na ventil. Tako da ako je ovaj parametar postavljen na 0° laserska zraka pogađati će ventil pod kutem od 90°. Krajnje vrijednosti su -45° i +45°

Rot- Rotacija ventila u stupnjevima. Cirkularni zavar zarotira ventil za 380°.

Tempo ms- Vrijeme zavarivanja u milisekundama (ms). Vrijeme cirkularnog zavara je 15000 ms

Programma Laser- Odnosi se na program postavljen u izvoru lasera (snaga u %, vrijeme impulsa i frekvencija impulsa)

Ovaj stroj je povezan sa izvorom lasera optičkim kabelom koji prenosi lasersku zraku i serijskim kabelom kojim šalje informaciju o promjeni programa ovisno o postavkama.

Rad sve tri osi motora se obavlja pomoću AC servo motora i pripadajućeg drivera. Pneumatski cilindri otvaraju i zatvaraju vrata, u slučaju da se vrata otvore prilikom rada u izvoru lasera se prebacuje jedna mehanička zaklopka koja onemogućuje daljnji rad lasera.



Slika 12: Izvor lasera i stroj za zavarivanje



Izvor: fotografija autora rada

Lasersko zavarivanje nije kontaktni proces koji zahtjeva pristup s jedne strane dijelu kojega se zavaruje. Zavar je formiran kada intenzivna laserska svjetlost velikom brzinom zagrijava materijal, vrijeme kalkuliramo u milisekundama (ms).

Svaki kružni zavar sastoji se od 200 pojedinih impulsa u trajanju od 5 ms. Vrijeme zavarivanja cijelog ventila iznosi 95 sekundi.

## 5.2. Optički laserski izvor IPG Photonics

Kod ovog tipa laserskog izvora tvrtke IPG Photonics valna duljina je  $1,07 \mu\text{m}$ , a radi se o YLR-1070 seriji u kojoj su optička vlakna dopirana iterbijem (Yb). Izvor pumpanja su diode što rezultira visokom snagom, visokom stabilnosti, idealnom kvalitetom laserske zrake, mogućnosti prijenosa zrake optičkim kabelom, dugim životnim vijekom i visokom efikasnosti.

Slika 13: Stroj za zavarivanje s optičkim laserskim izvorom



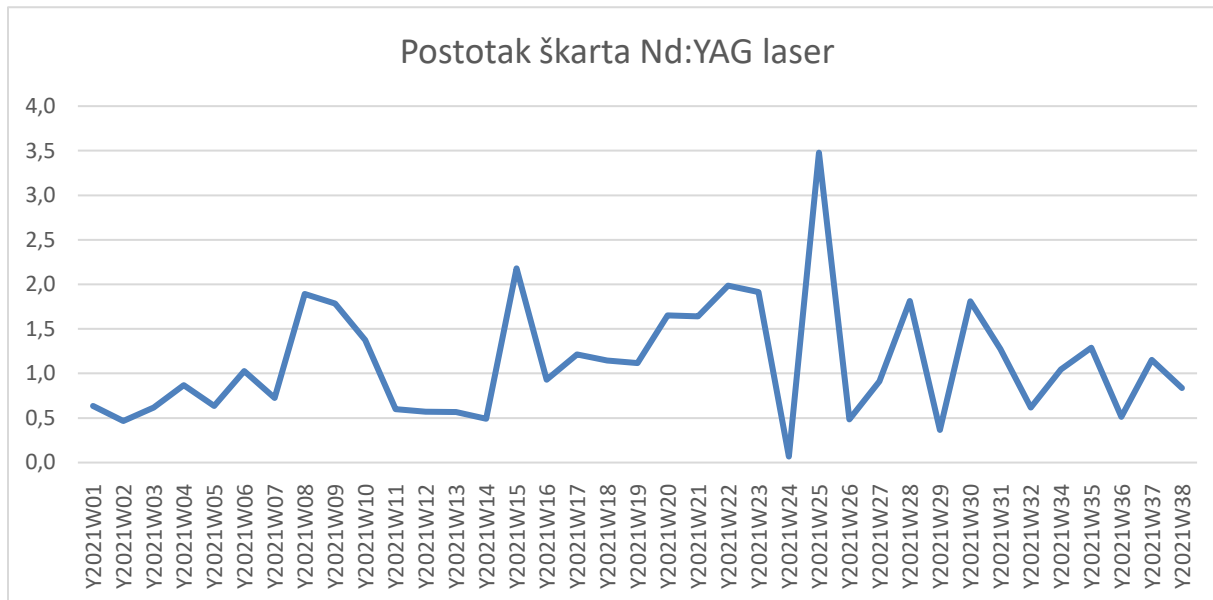
Izvor: interni dokumenti Carel

Optički laser u odnosu na Nd:YAG laser nije potrebno održavati mijenjanjem bljeskalica svakih 300 radnih sati. Na godišnjoj bazi se za održavanje ovog uređaja izgubi 3 sata, a kod Nd:YAG izvora se godišnje gubi oko 26 sati proizvodnje. Ako uspoređujemo cijenu cijelog sustava, ovakav stroj skuplji je pet puta od Nd:YAG izvora. Što se tiče brzine

zavarivanja ventila, Nd:YAG izvoru potrebno je 95 sekundi, dok je optičkom laseru potrebno 72 sekunde.

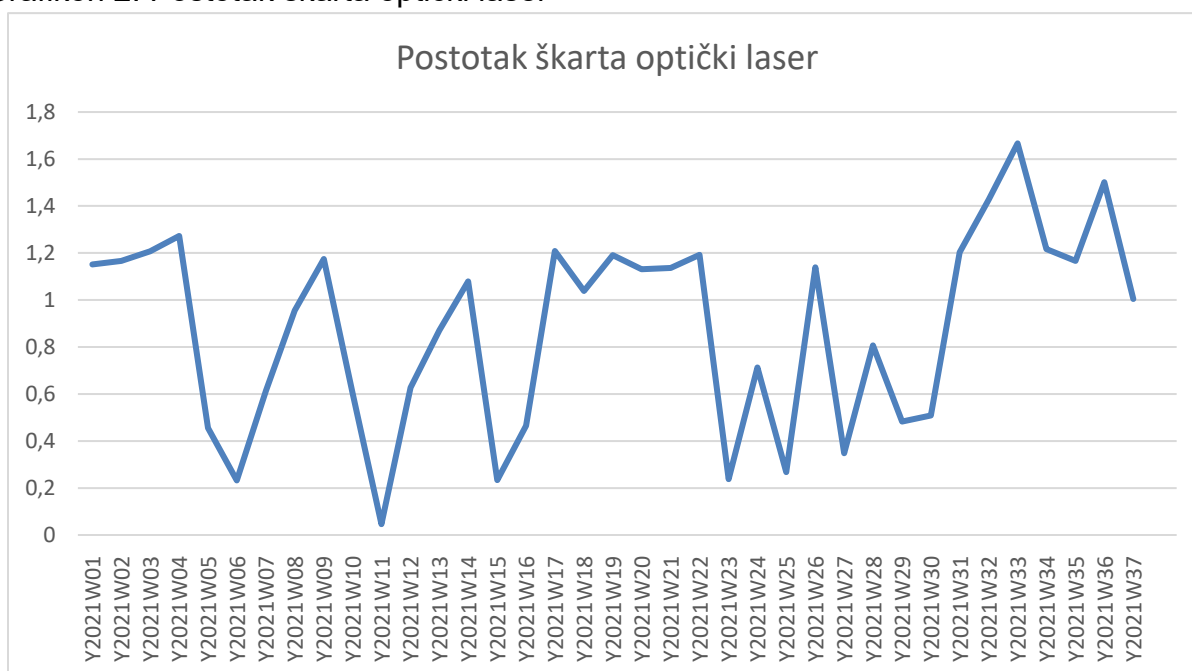
Iz ovoga se može zaključiti da optički laser ima prednosti u manjim troškovima održavanja i da je proces zavarivanja kraći za 23 s i time produktivniji. Kvaliteta zavara, odnosno nekvaliteta ili % škarta su prikazani na Grafikonima 1 i 2.

Grafikon 1: Postotak škarta Nd:YAG laser



Izvor: izrada autora

Grafikon 2: Postotak škarta optički laser



Izvor: izrada autora

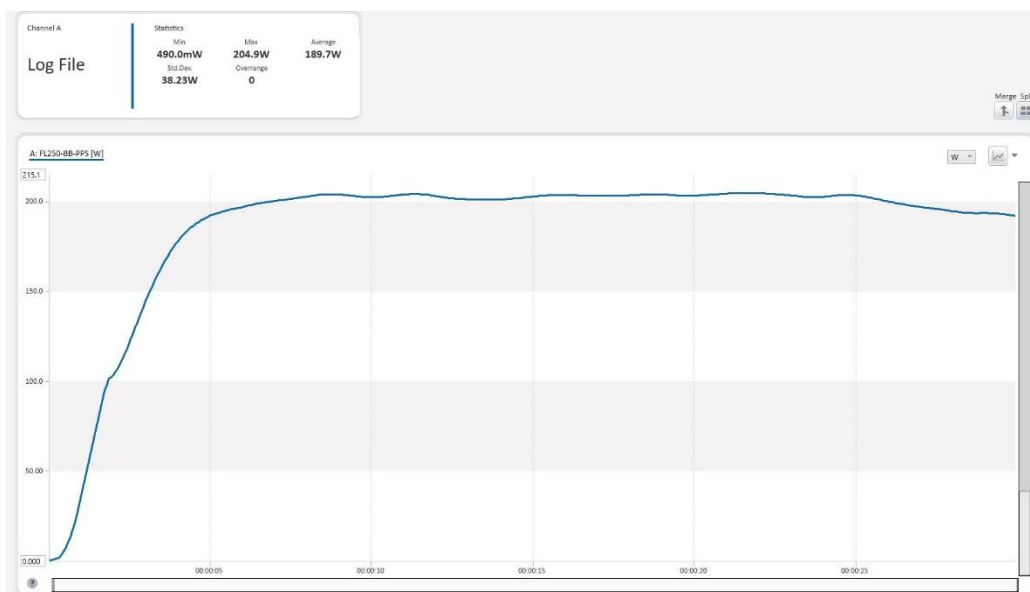
Na proizvodnoj liniji koja koristi Nd:YAG laser od početka godine napravljeno je 1,13% škarta na stroju za zavarivanje, dok je na proizvodnoj liniji koja koristi optički laserski izvor napravljeno 0,88% škarta. Vidljivo je da osim navedenih prednosti optički laser ima veću kvalitetu zavarenih spojeva, odnosno manje troškove škarta, jer razlika je ( $\Delta = 0,25\%$ ), što je vrlo bitan interni pokazatelj profitabilnosti proizvodnog procesa. Nabavna cijena optičkog lasera koja je 5 puta veća je jedini veliki nedostatak uspoređujući sa Nd:YAG laserom, ali to ne mora biti primarno za donošenje poslovne odluke koja prije svega ovisi o potrebnoj proizvedenoj količini proizvoda i investicijskoj sposobnosti proizvođača .

## 5.3 Osiguravanje kvalitete zavarivanja

### 5.3.1 Mjerenje snage

Provjera i osiguranje snage lasera u prihvatljivim tolerancijama vrše se sa uređajem Ophir FL250A-BB-50-PPS koji se postavlja na glavu lasera. Na izvor lasera se odabire program snage 40 %, duljine impulsa 3 ms i frekvencije 25 Hz. Zatim se pokreće laser na 30 sekundi i pomoću programa Ophir Starlab možemo vidjeti maksimalnu i srednju vrijednost snage lasera.

Slika 14: Prikaz rezultata mjerenja snage iz programa Ophir Starlab



Izvor: snimka zaslona autora

Ako se na grafu uočava opadanje snage u odnosu na prethodni dan to može značiti da su bljeskalice u izvoru lasera na kraju svog radnog vijeka ili se zaštitno staklo laserske glave onečistilo. Rezultati ove provjere označuju se u tablicu da bi se tijekom čitavom mjeseca pratili rezultati.

Slika 15: Mjesečna provjera mjerenja snage

MESE:	Giorno:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	AZIONI
1A. Potenza (target 200W)	>225	[Red]																														ALARM	
	220 + 224	[Red]																															
	215 + 220	[Yellow]																														WARNING	
	210 + 214	[Yellow]																															
	205 + 209	[Green]																															
	200 + 204	[Green]																														RANGE OPERATIVO	
	195 + 199	[Green]																															
	190 + 194	[Green]																															
	185 + 189	[Yellow]																														WARNING	
	180 + 184	[Yellow]																															
175 + 179	[Red]																														ALARM		
<175	[Red]																																
1B. Diametro (Target 20,5mm)	>23,4	[Red]																														ALARM	
	23,0 + 23,4	[Red]																															
	22,5 + 22,9	[Green]																															
	22,0 + 22,4	[Green]																															
	21,5 + 21,9	[Green]																															
	21,0 + 21,4	[Green]																														RANGE OPERATIVO	
	20,5 + 20,9	[Green]																															
	20,0 + 20,4	[Green]																															
	19,5 + 19,9	[Green]																															
	19,0 + 19,4	[Green]																															
18,5 + 18,9	[Green]																																
18,0 + 18,4	[Red]																														ALARM		
<18,0	[Red]																																
1C. Potenza su sorgente (Target 270W)	<290	[Red]																														ALARM	
	283 + 289	[Yellow]																														WARNING	
	276 + 282	[Green]																															
	269 + 275	[Green]																														RANGE OPERATIVO	
	262 + 268	[Green]																															
	255 + 261	[Green]																															
	248 + 254	[Yellow]																														WARNING	
<247	[Red]																														ALARM		
2. Posaggio "01"																															Giornaliera		
3. Cambio vetrino																															Bisettimanale		
4. Sistema di visione																															Settimanale		
5. Prove scoppio e macrografie																															Settimanale		
6. Cambio Lampade (X se cambiate)																															Almeno ogni 6000 colpi		
Firma																															<b>TABELLA 1</b> Da conservare per un anno		

Izvor: Carel standard proizvodnje

### 5.3.2 Metalografija

Jednom tjedno se uzima zavareni ventil iz proizvodnje i provodi se metalografska kontrola zavara. Na taj način se provjerava homogenost zavara i raspored zavara, eventualne greške, pukotine ili slična površinska ili dubinska oštećenja i kompaktnosti zavarenog spoja.

Priprema za metalografsku kontrolu se odvija kroz nekoliko faza.

#### a) Rezanje

Reprezentativni uzorak za kontrolu mora biti odrezan ravno i na točno određenom mjestu, sa finom površinom radi lakše pripreme brušenjem i poliranjem za metalografsku kontrolu na optičkom mikroskopu. Rezanje se izvodi uređajem Remet TR80 namjenski napravljenim za metalografske potrebe

Slika 16: Proces rezanja



Izvor: fotografija autora rada

Slika 17: Primjer izrezanog ventila



Izvor: fotografija autora rada

## b) Kapsuliranje uzorka

Kako bi izrezanim dijelom kasnije mogli manipulirati potrebno ga je zaliti polimernom smolom. Za ovaj proces koristimo KULZER Technovit 4000 koji dolazi u tri komponente, praha i dvije vrste sirupa koji se miješaju u omjeru 2:2:1. Ovaj proces se također naziva kapsuliranje i može se napraviti i pomoću pneumatskih preša i polimernog praha.

Slika 18: Montiranje



Izvor: fotografija autora rada

### c) Brušenje

Postupak brušenja proveden je na uređaju Remet LS2. Odvija se u tri faze brušenja papir od silicijevog karbida. Papiri su razvrstani prema granulaciji i veličini zrna za brušenja, od grubljeg i većeg zrna prema finijem. Prvi papir ima oznaku P180, drugi P320, a treći P600.

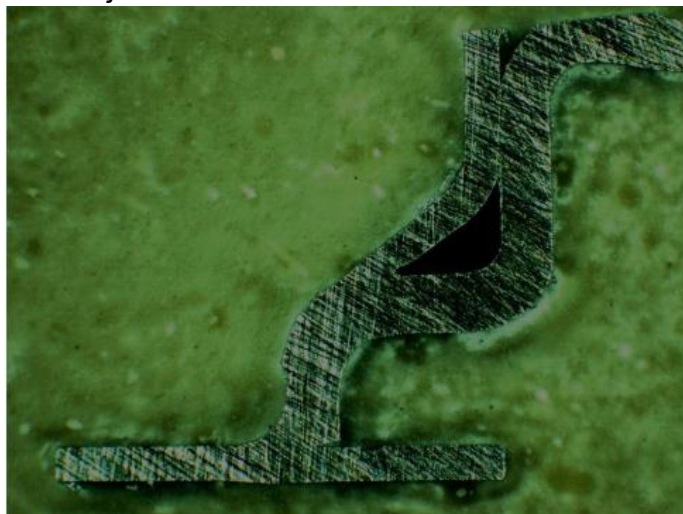
Prilikom brušenja potrebno je paziti da se uzorak ravnomjerno brusi, svakih nekoliko sekundi potrebno je uzorak rotirati za 90. Uzorak se ne smije pritiskati, već držati što laganije uz minimalni kontakt tako da se brušenje odvija samo uz pomoć brusnih zrna, bez dodatnog pritiska

Slika 19: Brušenje uzorka



Izvor: fotografija autora rada

Slika 20: Uzorak pod mikroskopom prilikom brušenja



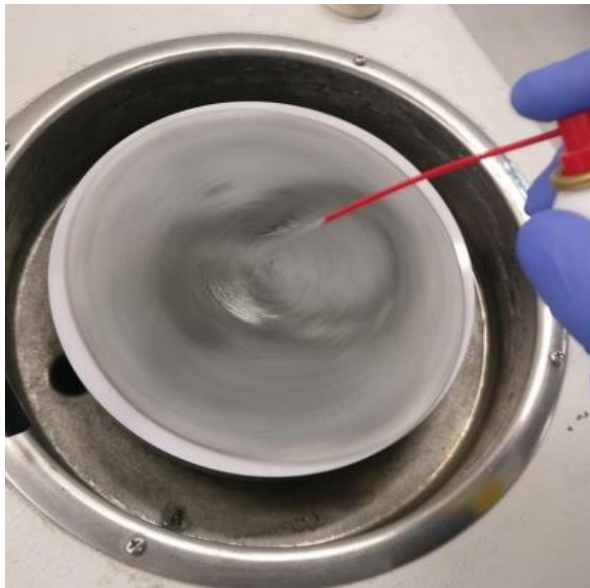
Izvor: fotografija autora rada

### d) Poliranje

Poliranje uzorka se izvodi u tri faze, umjesto brusnih papira podloga ima teksturu tkanine, a aktivni medij za poliranje je sprej koji u sebi sadrži abrazivne čestice dijamanta. U prvom koraku se koristi sprej sa česticama od 6  $\mu\text{m}$ , u drugom od 3  $\mu\text{m}$  a u trećem onaj od 1  $\mu\text{m}$

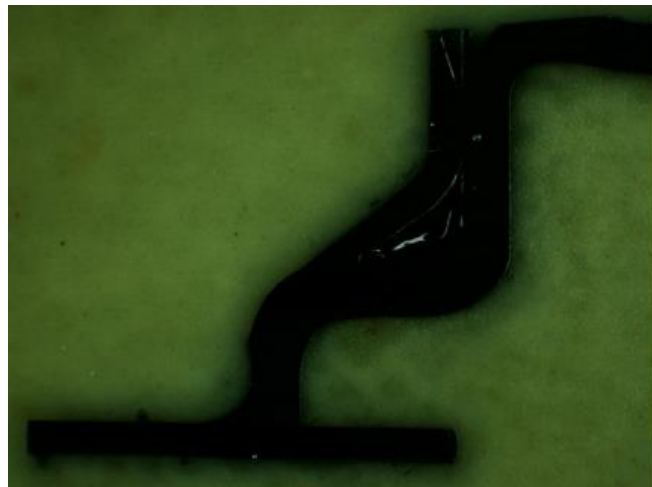


Slika 21: Poliranje uzorka



Izvor: fotografija autora rada

Slika 22: Uzorak pod mikroskopom nakon poliranja



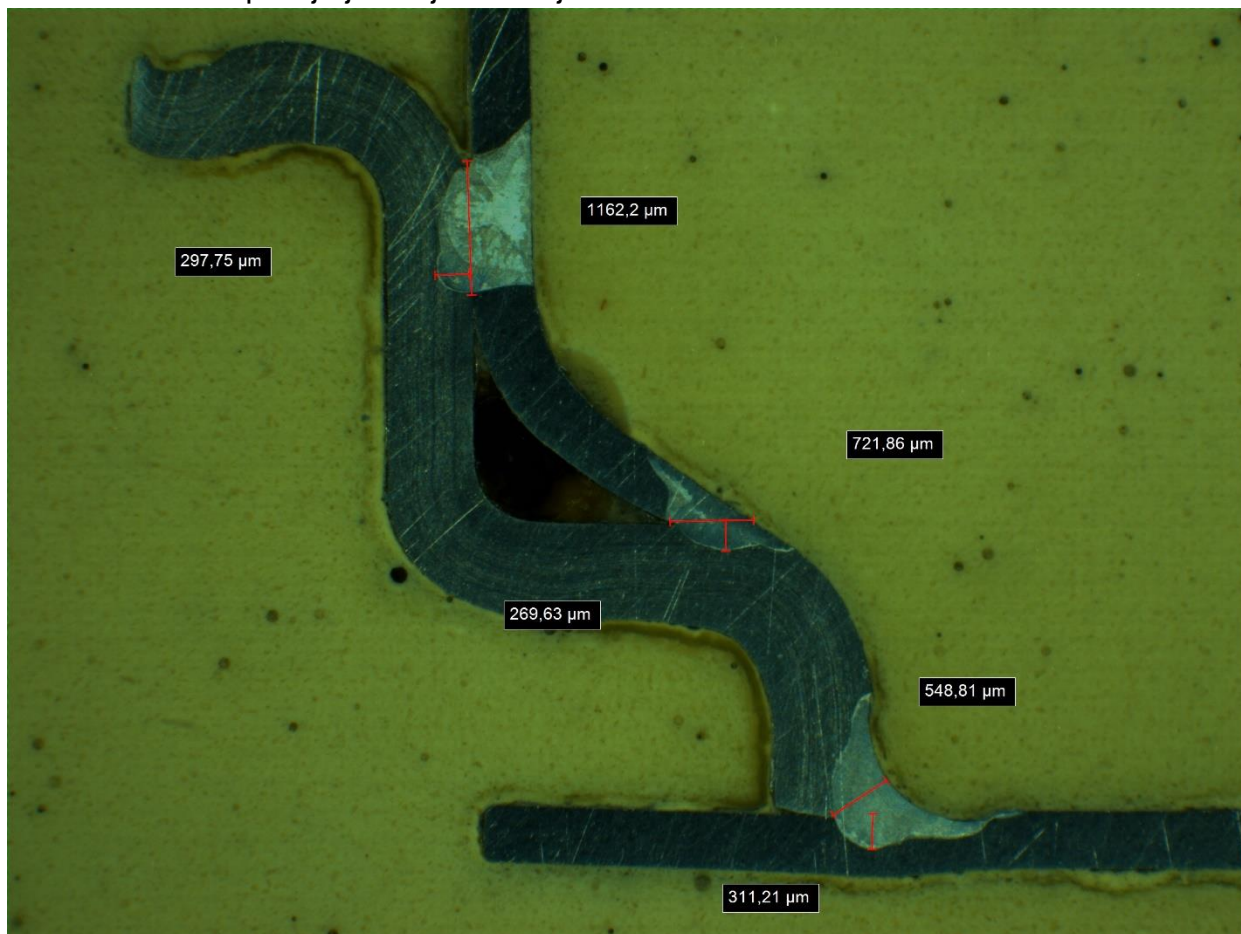
Izvor: fotografija autora rada

### e) Jetkanje - nagrivanje

Zadnja faza u ovom procesu je jetkanje. Kada je površina uzorka dobro ispolirana na uzorak kapnemo nekoliko kapljica reagensa na bazi željezovog klorida. Nakon otprilike jedne minute uzorak se stavlja pod mlaz vode kako bi se zaustavila kemijska reakcija.

Prilikom zavarivanja ventila i dovođenja visokih temperature od preko  $600^{\circ}\text{C}$  dolazi do promjene u čeliku koju nazivamo sigma fazom nakon kemijske reakcije s željezovim kloridom dio uzorka koji je bio izložen visokoj temperaturi zavarivanja promijeni boju nakon čega možemo vidjeti koliko je zavar uspio probiti u unutarnji materijal. Cilj je da svaki zavar probija u drugi materijal minimalno  $200\ \mu\text{m}$ .

Slika 23: Uzorak poslije jetkanja sa izmjerama



Izvor: fotografija autora rada

## 6 Zaključak

Od otkrića lasera prošlo je više od pedeset godina i od tada se laserska tehnologija sve više usavršava i sofisticira. Univerzalnost primjene laserske tehnologije sve više se koristi u različitim tehničkim i medicinskim granama. Lasere možemo koristiti za graviranje, bušenje, zavarivanje, rezanje, čak i skidanje korozije sa metala.

Korištenjem Nd:YAG lasera u proizvodnji možemo dobiti precizan rezultat sa prihvatljivim taktom proizvodnje. Na tržištu danas postoji nekoliko tehnologija (disk, fiber) koje su konkurencija starijim postupcima laserskog zavarivanja (Nd:YAG). Kada uspoređujemo efikasnost Nd:YAG lasera sa novim tehnologijama razlike su minimalne u korist novijih

tehnologija, visoki investicijski troškovi još uvijek ne opravdavaju prelazak na novije tehnologije.

Globalno tržište elektronskih ekspanzijskih ventila doseglo je 592.3 milijuna američkih dolara i na tržištu postoji tek nekoliko tvrtki koji proizvode ovakvu vrstu ventila. Procjenjuje se da će potražnja za ovim proizvodima u budućnosti još više rasti, pa je stoga ključno da je kvaliteta proizvoda na željenom nivou. Carel kao tvrtka kontinuirano poboljšava proizvodne i poslovne procese kako bi zadržali korak sa tržištem, u isto vrijeme pokušavajući zadržati cijenu proizvoda konkurentnom.

## Literatura

### Knjige

- Olsen F. O.: Hybrid laser–arc, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009.
- Rofin: Introduction to Industrial Laser Materials Processing, Hamburg, 2004.
- Bistričić L.: Fizika lasera, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2014

### Članci

- Unitek Miyachi Corporation: Nd:YAG Laser Welding Guide, 2003.

### Internetski izvori

- Ban, T. „Lasери u znanosti i tehnologiji“, Dostupno na: [http://eskola.hfd.hr/susreti/Laseri\\_Ticijana\\_Ban.pdf](http://eskola.hfd.hr/susreti/Laseri_Ticijana_Ban.pdf) (Pristupljeno: 18. kolovoza 2021.).
- Teledyne Flir. „Yttrium Aluminum Garnet“, Dostupno na: <https://www.scientificmaterials.com/products/nd-yag.php> (Pristupljeno: 20. kolovoza 2021.).
- Carel, „Guide to EEV system“, Dostupno na: <https://www.carel.com/documents/10191/0/+030220811/efea4435-4de2-4ceb-a9ea-8d69642ab32a?version=1.1> (Pristupljeno 20. kolovoza 2021.)
- Sisma, „Sl series“, Dostupno na: [https://www.sisma.com/wp-content/uploads/2018/09/SL-series\\_industrial\\_2020.pdf](https://www.sisma.com/wp-content/uploads/2018/09/SL-series_industrial_2020.pdf) (25. kolovoza 2021.)

## Popis slika

Slika 1. Osnovni dijelovi lasera.....	9
Slika 2. Shematski prikaz Nd:YAG lasera .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Slika 3. Kristal Nd:YAG .....	14
Slika 4. Shematski prikaz disk lasera .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 15
Slika 5. Shematski prikaz optičkog lasera .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 16
Slika 6. Primjena ventila u praksi .....	17
Slika 7. Sastavni dijelovi elektronskog ekspanzijskog ventila.....	18
Slika 8. Proizvodna linija elektronskog ekspanzijskih ventila.....	19
Slika 9. Sinoptik operacija izrade elektronskih ekspanzijskih ventila .....	21
Slika 10. Izvor lasera .....	23
Slika 11. Tehničke specifikacije izvora lasera .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 23
Slika 12. Izvor lasera i stroj za zavarivanje.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 25
Slika 13. Stroj za zavarivanje s optičkim laserski izvorom.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 26
Slika 14. Rezultat mjerenja iz programa Ophir Starlab.....	28
Slika 15. Mjesečna provjera mjerenja snage.....	29
Slika 16. Proces rezanja.....	30
Slika 17. Primjer izrezanog ventila .....	30
Slika 18. Montiranje uzorka .....	30
Slika 19. Brušenje uzorka.....	31
Slika 20. Uzorak pod mikroskopom prilikom brušenja .....	31
Slika 21. Poliranje uzorka .....	32
Slika 22. Uzorak pod mikroskopom nakon poliranja.....	32
Slika 23. Uzorak nakon jetkanja sa izmjerama.....	33

## **Popis tablica**

Tablica 1. Usporedba najčešće korištenih lasera za zavarivanje ..... 11

## **Popis grafikona**

Grafikon 1. Usporedba najčešće korištenih lasera za zavarivanje .....27

Grafikon 2. Usporedba najčešće korištenih lasera za zavarivanje .....27

## **Sažetak**

Cilj ovog rada bio je opisati korištenje laserskog izvora za zavarivanje elektronskih ekspanzijskih ventila. Rad se sastoji od teorijskog i praktičnog dijela. Teorijski dio obuhvaća princip rada lasera, osnovne dijelove svakog laserskog izvora, te opis primjene elektronskog ekspanzijskog ventila u praksi. Opisane su glavne karakteristike nekih od najčešće korištenih lasera za zavarivanje. Kroz praktičan dio opisana je proizvodna linija koja za lasersko zavarivanje koristi Nd:YAG izvor, te je uspoređena sa proizvodnom linijom koja koristi optički izvor lasera. Također detaljno su opisane metalografske tehnike koje se koriste kako bi se osigurala postavljena razina kvalitete konačnog proizvoda i osigurali strateški ciljevi profitabilnog poslovanja i održivog razvoja kompanije.

Ključne riječi: laser, lasersko zavarivanje, Nd:YAG, metalografija

## **Abstract**

The aim of this thesis was to describe the use of the laser source for welding electronic expansion valves. The thesis consists of a practical and theoretical part. The theoretical part includes the principle of laser operation, the main parts of every laser source, and a description of the application of the electronic expansion valve in field. The main characteristics of some of the most commonly used welding lasers are described. The practical part describes a production line that uses an Nd:YAG laser source for welding, and it is compared to a production line that uses a fiber laser source. Also described in detail are the metallographic techniques used to ensure the set level of quality of the final product and to ensure the strategic goals of profitable business and sustainable development of the company.

Keywords: laser, laser welding, Nd:YAG, metallography