



Ivan Sigumjak ¹, Božo Despotović ², Josip Pavić ³, Tihomir Marsenić ⁴, Mario Jagnjić ⁵, Dejan Marić ^{6,a}, Marko Dunder ^{6,b}, Jadranka Eržišnik ⁷

PRIMJENA LASERSKOG RUČNOG ZAVARIVANJA APPLICATION OF MANUAL LASER WELDING

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Decembar 2025.

Author's address / Adresa autora:

¹Sigmat d.o.o. Gromačnik, Slavonski Brod, Hrvatska

²Društvo za Tehniku zavarivanja Slavonski Brod, Slavonski Brod, Hrvatska

³ĐĐ Kompenzatori d.o.o, Slavonski Brod, Hrvatska

⁴Andritz TEP d.o.o, Slavonski Brod, Hrvatska

⁵Đuro Đaković Specijalna vozila d.d., Slavonski Brod, Hrvatska

⁶Sveučilište u Slavanskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavanskom brodu, Slavonski Brod, Hrvatska,

⁷Fakultet strojarstva I brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Hrvatska

email / ORCID ID :

^a dmaric@unisb.hr / 0000-0002-0142-1750

^b / 0000-0002-9360-0042

Ključne reči: Laser, primjena ručnog laserskog zavarivanja, usporedba s TIG zavarivanjem

Keywords: Laser, manual laser welding, TIG welding, application, comparison

Rezime

Tehnologija zavarivanja laserom je danas primjenjiva u gotovo svim područjima industrije od avioindustrije, brodogradnje, zavarivanja ugljičnih i nehrđajućih čelika, spajanja dijelova obrađenih na konačne dimenzije itd. Zavarivanje laserom karakterizira uska zona uticaja topline (ZUT), male deformacije, mali unos topline, velike brzine zavarivanja kao i fleksibilnost pri mehanizaciji i automatizaciji procesa. Kao negativne strane u primjeni ovog procesa mogu se navesti veliki investicijski troškovi (još uvijek), često zahtjevni načini prihvata dijelova koji se zavaruju, posebni sigurnosni zahtjevi, itd. U ovom radu se navode prva iskustva na području primjene ovog procesa pri proizvodnji dijelova kompenzatora. Na zavarenim spojevima X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr.1.4571) dimenzija Ø74,1 mm x 1,0 mm sa istim materijalom dimenzija Ø72,1 mm x 5,1 mm, kao i na zavarenim spojevima X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr.1.4571) dimenzija Ø74,1 mm x 1,0 i P355NH (W.Nr.1.0565) dimenzija Ø72,1 mm x 5,1 mm, proizvedenih TIG i laserskim postupkom zavarivanja, u ovom radu se uspoređuju rezultati ocjene geometrije spojeva, širina ZUT-a kao i ispitivanja tvrdoća. Konačno se izvode zaključci pri usporedbi ovih rezultata a navode se i preporuke za primjenu postupka ručnog laserskog zavarivanja.

Abstract

Today, laser welding technology is applied across nearly all industrial sectors, including aerospace, shipbuilding, welding of carbon and stainless steels, and the joining of components machined to final dimensions, etc. Laser welding is characterized by a narrow heat-affected zone (HAZ), minimal distortion, low heat input, high welding speeds, and flexibility in process mechanization and automation. However, the disadvantages associated with this process include high investment costs, demanding part-fixturing and positioning requirements, stringent safety regulations, etc. The present study presents initial experiences with the application of this process in the production of compensator components. Samples of X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr.1.4571), with dimensions Ø74.1 mm x 1.0 mm, and samples of the same material with dimensions of Ø72.1 mm x 5.1 mm were welded using TIG and laser welding processes, as well as samples of X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr.1.4571), with dimensions Ø74.1 mm x 1.0 mm, and samples of P355NH (W.Nr.1.0565), with dimensions of Ø72.1 mm x 5.1 mm. The results of joint geometry evaluation, HAZ width measurement, and hardness testing are comparatively analyzed. Based on these findings, conclusions are drawn, and recommendations for the application of the manual laser welding procedure are provided.



1. Uvod

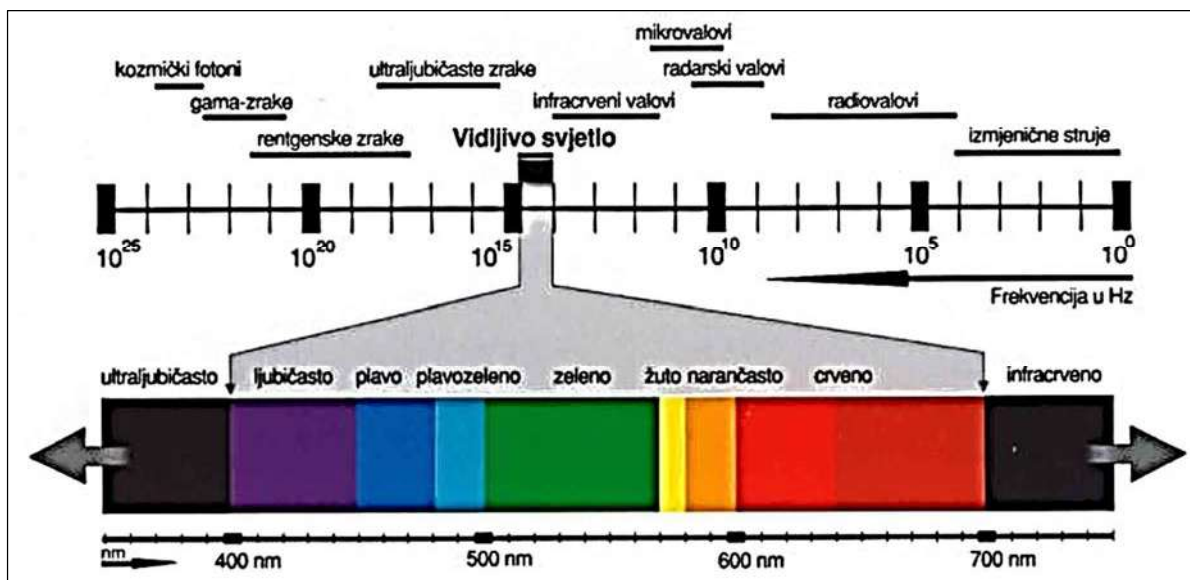
Od otkrića lasera pa sve do danas možemo vidjeti kako se laserska tehnologija postepeno razvijala u svim aspektima. Taj trend se i dalje nastavlja, a područja primjene laserske tehnologije biti će sve veća i sve značajnija.

Tehnološki razvoj na ovom području znanosti doveo nas je do shvaćanja kako fotoni kao svjetlosne titrajuće jedinice energije ili kvanti (kvant je ustvari najmanja količina energije koju neki sustav može dobiti ili izgubiti) igraju sličnu ulogu kao što su to igrali elektroni u dvadesetom stoljeću. Zapravo, možemo reći da je laser postao jedan od najpoznatijih i najpriznatijih izuma fizike. Laserima možemo slati informacije, korigirati vid, izoštravati astronomske slike dalekog svemira, obrađivati različite materijale itd. Zbog toga je primjena različitih lasera i u industriji sve veća, a naročito u daljnjem razvoju aditivnih, mikro i nanotehnologija, u računalnoj i vojnoj industriji. Zbog svojih osnovnih karakteristika kao što je čistoća, preciznost i moguće velike snage zrake, laser je našao veliku primjenu na području znanosti i razvoja, posebno u postizanju ekstremnih uvjeta pri laboratorijskim eksperimentalnim istraživanjima na području kemijskih i bioloških sustava. Koliko je važno

otkriće lasera, govori podatak da je u proteklih 50 godina čak 14 Nobelovih nagrada iz područja prirodnih znanosti dodijeljeno za ona znanstvena otkrića iz fizike koja su direktno povezana uz laserske tehnologije i njihovu primjenu.

Izraz LASER potječe od engleskih riječi „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ što u prijevodu znači pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja tako da je laser izvor koji za razliku od ostalih izvora predstavlja svjetlost koja je generirana mehanizmom stimulirane emisije fotona. Vidljiva svjetlost je uski pojas ili val elektromagnetskog zračenja vrlo visoke frekvencije koji titra okomito u odnosu na smjer svog širenja i pri tome ovaj val osim svjetlosti izaziva i osjećaj različitih boja.

Svjetlost kao zračenje sastoji se od vidljivog dijela spektra valova s rasponom valnih duljina od 380 do 780 nm koje ljudsko oko razlikuje kao boje - od ljubičaste, s najmanjom valnom duljinom, do crvene s najvećom valnom duljinom, što je prikazano na Slici 1 [1].



Slika 1. Prikaz vidljivog područja svjetlosnog zračenja [1].

Figure 1. Representation of the visible region of the electromagnetic spectrum [1].

Svaka duljina vala definirana je određenom bojom spektra. Prirodni spektar Sunčeve svjetlosti čine stalni prijelazi - od kratkih ljubičastih valova, plavih, zelenih i narančastih do dugih crvenih valova. Izvan ovog raspona, za ljudsko oko gama zrake, X, ultraljubičaste i infracrvene zrake nisu vidljive. Još davne 1917. godine Albert Einstein je dao teorijski koncept i predvidio izum lasera i

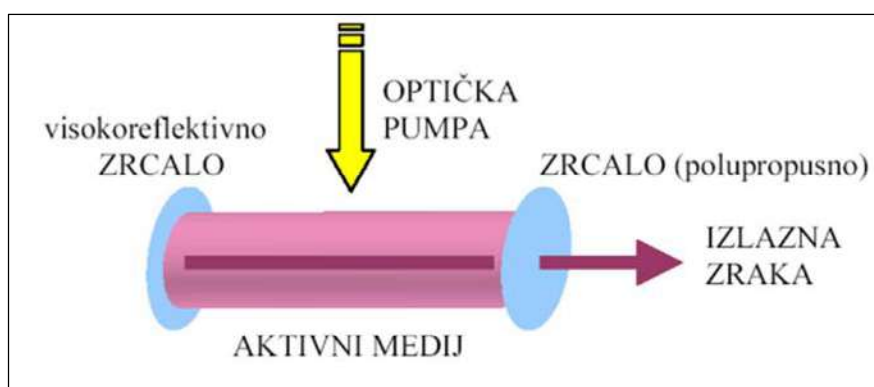
njegovog prvog oblika nazvanog Maser. Maser je u osnovi uređaj koji radi na isti način kao i laser, ali u drugom frekvencijskom području. Prvi laserski modul konstruirao je 1960. godine Theodore Maiman na način da je lasersku emisiju ostvario stimuliranom emisijom iz rubinskog kristala pobuđenog svjetlosnom lampom, a od 1961.



godine koriste se i prvi laseri s plinovima i njihovim mješavinama [2].

Dvije osnovne osobine ovog svjetlosnog procesa su koherentno i monokromatsko svjetlosno zračenje. Koherentno ili sinkronizirano zračenje predstavlja ono zračenje kod kojega svi svjetlosni valovi titraju u fazi. Laserska zraka je usmjerena a zračenje se rasprostire samo u relativno uskom prostornom kutu tako da su i udaljenosti rasprostiranja takvog zračenja velike. Monokromatsko zračenje sastoji se od relativno uskog frekventnog spektra ili možemo reći samo od jedne boje [2].

2. Osnovni dijelovi i princip rada lasera

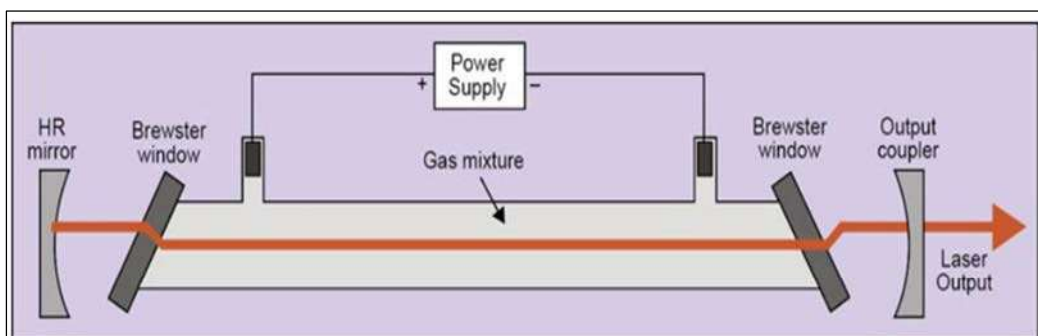


Slika 2. Prikaz osnovnih dijelova lasera [3].

Figure 2. Schematic representation of the basic components of a laser [3].

S aspekta agregatnog stanja laseri mogu biti plinski, tekući, laseri čvrstog stanja kao i poluvodički laseri. Obzirom na osnovne karakteristike, lasere razlikujemo po različitim aktivnim laserskim medijima u kojima se stvara ovo zračenje, što određuje osnovna svojstva emitiranog zračenja: frekvenciju, spektralnu širinu, snagu, itd. Ako je aktivni laserski medij plin (He-Ne, Ar, Xe, CO₂, N₂) tada govorimo o plinskim laserima. Lasersku zraku moguće je proizvesti i u drugim različitim medijima kao što su razni poluvodički

materijali, kristali (Ti: safir, Nd:YAG,...), posebni organski nemetali, specifične molekule (KrF, ArF, XeCl) itd. S obzirom na raspodjelu emitiranog zračenja u vremenu lasere dijelimo na kontinuirane i impulsne. Kod kontinuiranih lasera svjetlost je konstantna u vremenu, dok se kod impulsnih lasera svjetlost periodički mijenja u vremenu. Najčešće korišteni laseri su plinski (Slika 3) koji koriste plinove CO₂, He-Ne, Ar ili mješavinu ovih plinova kao i Nd:YAG laser koji za kruti aktivni medij koristi Itrij Aluminijev kristal [4].



Slika 3. Prikaz lasera s plinom kao aktivnim medijem [4].

Figure 3. Schematic representation of a laser with gas as the active medium [4].



3. Primjena lasera

Laseri se danas mogu primjenjivati u većini grana ljudske djelatnosti kao što su medicina, telekomunikacije, energetika, vojna industrija, avionska industrija, strojarske tehnike, građevina itd.

Na području industrije laseri se najviše koriste za obilježavanje, rezanje, zavarivanje i bušenje materijala poput metala, plastike, drva, nemetala itd.

Rezanje materijala ovim postupkom moguće je i za taljive materijale i za materijale koji pri visokim temperaturama isparavaju. Ovo se odnosi i na specifične materijale kao što su polimeri, metalni i keramički kompoziti, metalne pjene ili ugljična vlakna. U tehnologiji zavarivanja laser je danas primjenjiv u gotovo svim područjima od zavarivanja ugljičnih i nehrđajućih čelika, spajanja materijala jako malih debljina, spajanja dijelova obrađenih na konačne dimenzije, zavarivanja specifičnih suvremenih materijala itd. Pri tome se kao aktivni medij najčešće koriste plin CO₂ i kristal Nd:YAG.

Zavarivanje laserom karakterizira uska zona ZUT-a, male deformacije, mali unos topline, velike brzine zavarivanja kao i vrlo široko područje mogućnosti mehanizacije i automatizacije procesa.

Prednosti laserskog zavarivanja u odnosu na ostale procesa je preciznost i fleksibilnost kao i mogućnost korištenja lasera velikih snaga do 25 kW. Posebna produktivnost procesa je evidentna ako se laser koristi na robotskim sustavima. Sveukupni trošak laserskog zavarivanja koristeći robotske sustave je prema nekim analizama i do 50% manji od MIG postupka zavarivanja za jednake dužini zavarenog spoja.

Zbog svoje visoke preciznosti i širokog raspona snage moderni laser je omogućio razvoj mikro zavarivanja i mikro strojne obrade koja je vrlo zastupljena u računalnoj, telekomunikacijskoj te svemirskim tehnologijama i vojnoj industriji.

Danas su u primjeni i razna unaprjeđenja i poboljšanja ovog procesa s ciljem daljnjeg povećanja njegove efikasnosti. Sve veće su moguće brzine zavarivanja, povećanje penetracije u materijal koji se zavaruje kao i povećanje količine depozita.

Istraživanja na području lasera se i dalje vode te se njegovo područje primjene konstantno širi. Od negativnih strana zavarivanja laserom mogu se navesti nužni potrebni posebni sigurnosni zahtjevi, veliki investicijski troškovi, često zahtjevni načini prihvata dijelova koji se zavaruju, ali ovi elementi u većini slučajeva nisu ograničavajući faktor u primjeni ovog postupka. [5]

Korištenje laserske tehnologija na stabilnim mehaniziranim ili automatiziranim sustavima bilo da se radi o preciznim uređajima malih snaga ili o robusnijim industrijskim sustavima raznih namjena je danas uobičajeno.

U zadnje vrijeme ukazala se potreba i za mobilnim sustavima ovog procesa tako da su u sve većoj primjeni i ručni procesi koji su zasnovani na primjeni lasera.

Zahvaljujući prije svega mogućnošću ručnog upravljanja operater može vrlo precizno usmjeriti laserski snop na željeno mjesto što u konačnici rezultira fleksibilnošću i prilagodljivosti procesa za različite namjene. Danas se na tržištu opreme mogu nabaviti kompaktni multifunkcionalni uređaji na bazi laserske tehnologije koji osim rezanja i zavarivanja mogu obavljati i zadatke čišćenja površina od oksida, prljavštine, masnoća, a bez oštećenja osnovnog materijala.

4. Eksperimentalni deo

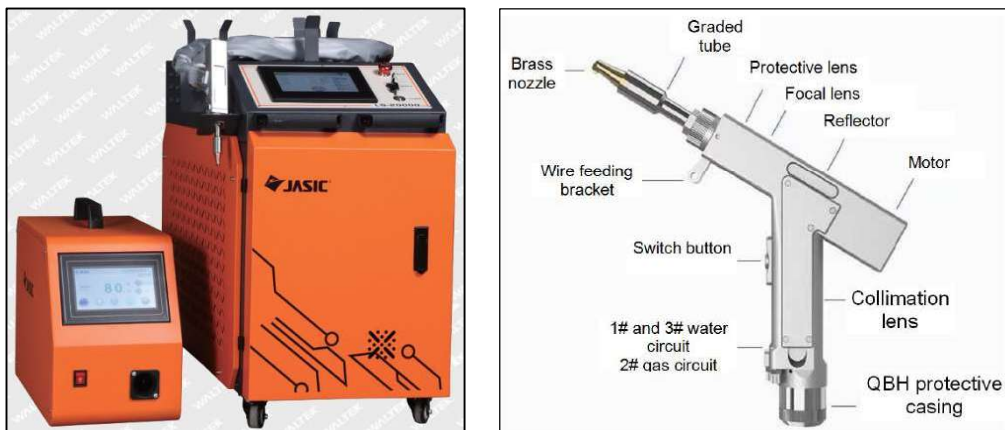
U firmi Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o. donesena je odluka o nabavi uređaja Jasic Model LS-20000M, lasera za ručno zavarivanje, sa ciljem istraživanja mogućnosti primjene ručnog laserskog zavarivanja u proizvodnji kompenzatora.

Zavarivanje preklopnih kutnih spojeva, tankostijene harmonike iz nehrđajućih materijala na cijevne nastavke i prirubnice iz nehrđajućih i/ili ugljičnih materijala, zahtjeva specifičnu pripremu za zavarivanje TIG postupkom sa gustim pripajanjem kako je prikazano na Slici 5. Unosom topline dolazi do toplinskih deformacija sa tendencijom odvajanja tankostijene harmonike od cijevnih nastavaka. Cilj je zadržati visoku kvalitetu proizvoda uz povećanje proizvodnosti, fleksibilnosti i ekonomičnosti. Lasersko zavarivanje sa svojim usko ograničenim i koncentriranim unosom energije predstavlja prikladan alat za udovoljavanje navedenih zahtjeva.



Slika 5. Detalj pripreme za zavarivanje tankostijene harmonike na cijevne nastavke.

Figure 5. Detail of the preparation for welding a thin-walled bellows to pipe fittings.



Slika 6. Uređaja Jasic Model LS-20000M (lijevo) sa prikazom dijelova ručnog gorionika za lasersko zavarivanje SUP20S (desno) [5].

Figure 6. Jasic Model LS-20000M device (left) with a view of the components of the SUP20S manual laser welding torch (right) [5].

Tehničke karakteristike uređaja Jasic Model LS-20000M (Slika 6):

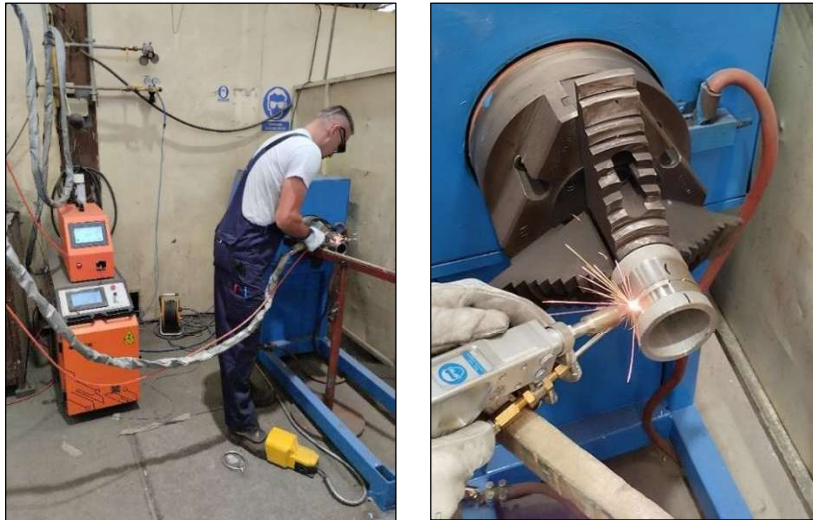
- vrsta lasera - fiber laser,
- tip provodljivosti - optičko vlakno,
- središnja valna duljina – 1080 ± 10 nm,
- ulazna snaga - 9 kW,
- izlazna snaga lasera - 2000 W,
- duljina zavarivačkog kabela - 12 m,
- promjer žice za zavarivanje - 0,8 mm - 1,6 mm,
- zaštitni plinovi - argon, dušik, komprimirani zrak (za rezanje),
- dodavač žice može raditi impulsno,

- mogućnost rezanja materijala do debljine 6 mm,
- mogućnost čišćenja površine materijala od hrđe.

4.1. Zavarivanje uzoraka

Uzorci iz materijala X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr.1.4571) dimenzija $\varnothing 74,1 \times 1,0$ mm zavarivani su TIG postupkom i laserom sa uzorcima iz materijala X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr.1.4571) i P355NH (W.Nr.1.0565) dimenzija $\varnothing 72,1 \times 5,1$ mm.

Parametri zavarivanja TIG postupkom: struja zavarivanja 130 A, napon 12 V, brzina zavarivanja 150 mm/min, žica ER316L $\varnothing 2,0$ mm. Uzorci za TIG zavarivanje pripojeni gusto u razmaku 2 - 3 mm.



Slika 7. Zavarivanje uzoraka laserom (lijevo) sa detaljom pozicioniranja gorionika (desno).

Figure 7. Laser welding of samples (left) with a detail of torch positioning (right).

Parametri zavarivanja laserom:

- scan speed - 400 mm/s,
- scan width - 4,0 mm,
- peak power - 1400 W,
- welding speed - 800 mm/min,
- duty cycle - 100 %,
- frequency - 4000 Hz,
- wire pulse cycle - 500 ms,
- wire smoothness - 50 %,
- wire average speed - 54 cm/min,
- wire ER316LSi \varnothing 0,8 mm.

Uzorki za zavarivanje laserom pripojeni samo na dva mjesta.

4.2. Pregled i ocjena uzoraka

Vizualnim pregledom zavarenih spojeva uočeno je da su zavareni spojevi, izvedeni TIG-om i laserom, pravilnog oblika, na zavarima nema prslina i nepravilnosti (rupa, poroznosti i nedozvoljenih zajedaja), dimenzije i nadvišenja zadovoljavaju (Slika 8a). Na uzorku zavarenom TIG-om (Slika 8b) vidljiva je pobojenost materijala sa unutrašnje strane cijevi kao posljedica unosa topline prilikom zavarivanja. Na uzorku zavarenom laserom (Slika 8c) pobojenost nije prisutna.



a)

b)

c)

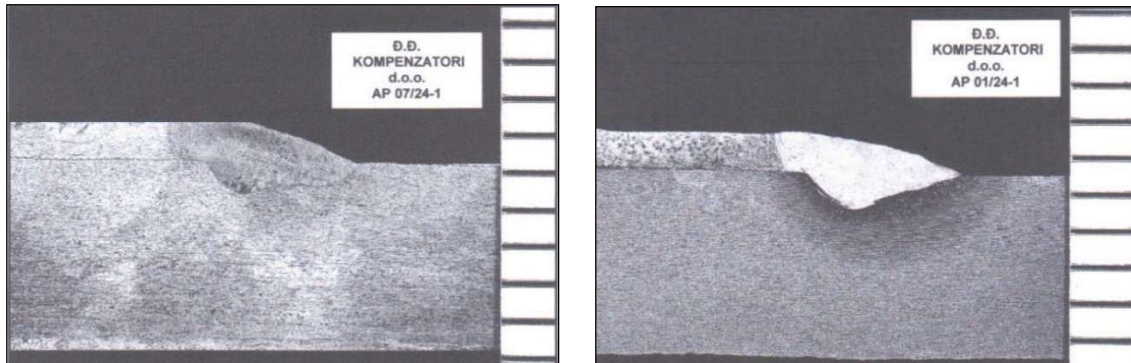
Slika 8. Zavareni uzorci iz materijala X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr. 1.4571), a) Vizualna usporedba uzoraka TIG (lijevo) i laser (desno), b) Uzorak zavaren TIG-om sa izraženom pobojenosti sa unutrašnje strane i c) Uzorak zavaren laserom bez pobojenosti.

Figure 8. Welded samples made of X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr. 1.4571): (a) visual comparison of TIG-welded (left) and laser-welded (right) sample, (b) TIG-welded sample with pronounced discoloration on the inner side, and (c) laser-welded sample without discoloration.



Makrostruktura na uzorcima AP 07/24-1 i AP 01/24-1, zavarenih TIG-om, je bez anomalija prema

EN ISO 6520-1:2007. i prikazana je na Slici 9.



Slika 9. Makrostruktura uzoraka TIG zavarivanja AP 07/24-1 materijal W.Nr.1.4571 + W.Nr.1.4571 (lijevo) i AP 01/24-1 materijal W.Nr.1.4571 + P355NH (desno).

Figure 9. Macrostructure of TIG-welded samples: AP 07/24-1, material W.Nr. 1.4571 + W.Nr. 1.4571 (left), and AP 01/24-1, material W.Nr. 1.4571 + P355NH (right).

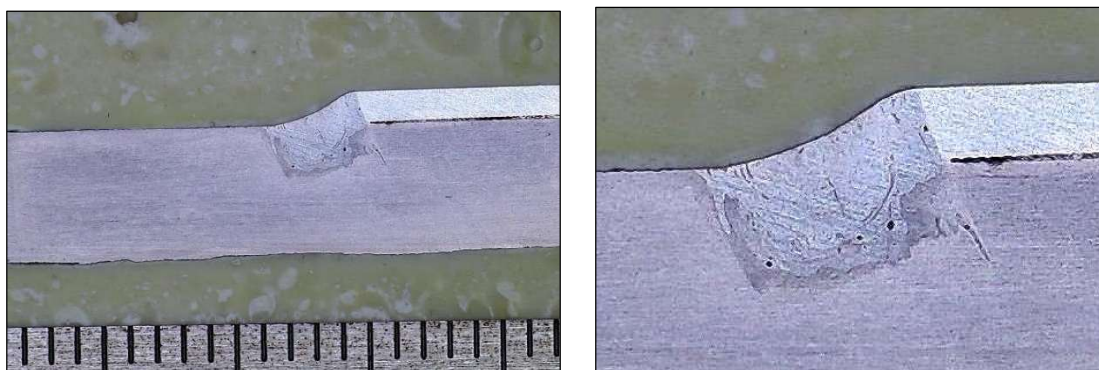
Makrostruktura uzoraka zavarenih laserom (Slike 10 i 11) pokazuje prisutnost pora u zavarenom spoju, a na uzorku zavarenom između

raznorodnih materijala, W.Nr.1.4571 + P355NH, vidi se i prslina (Slika 11).



Slika 10. Makrostruktura uzorka zavarenog laserom, materijal W.Nr.1.4571 + W.Nr.1.4571 (lijevo) sa uvećanim detaljom pora (desno).

Figure 10. Macrostructure of the laser-welded sample, material W.Nr. 1.4571 + W.Nr. 1.4571 (left), with an enlarged detail of pores (right).



Slika 11. Makrostruktura uzorka zavarenog laserom, materijal W.Nr.1.4571 + P355NH (lijevo) sa uvećanim detaljom pora i prslinom (desno).

Figure 11. Macrostructure of the laser-welded sample, material W.Nr. 1.4571 + P355NH (left), with an enlarged detail of pores and a crack (right).



5. Zaključak

U radu su prikazani neki od preliminarnih rezultata istraživanja primjene ručnog laserskog zavarivanja u proizvodnji kompenzatora u kojima se uočavaju prednosti ove tehnologije ali i mogući problemi vezani uz kvalitetu zavarenih spojeva.

Lasersko zavarivanje sa svojim usko ograničenim i koncentriranim unosom energije omogućuje zavarivanje tankostijenih materijala, velika brzina zavarivanja omogućuje veću produktivnost, nizak i precizan unos topline rezultira malom zonom utjecaja topline i manjim toplinskim deformacijama. Kada govorimo o ručnom laserskom zavarivanju najveće mane su upravo navedene prednosti laserskog zavarivanja. Parametri laserskog zavarivanja, snaga lasera, velika brzina zavarivanja, fokusiranje žarišne točke lasera u odnosu na radni komad, točnost pripreme spoja, nalaze se u uskom rasponu. Svako odstupanje ima za posljedicu pojavu anomalija u zavarenom spoju (poroznost, zajedi, prsline, nedostatak penetracije,...).

Sama cijena uređaja za ručno lasersko zavarivanje je prihvatljiva, ali obavezno treba razmisliti o troškovima pomoćnih naprava, okretaljki, pozicionera kako bi se osigurala ponovljivost i konstantnost prilikom zavarivanja. Sa stajališta zaštite na radu, poželjno je osigurati poseban prostor za zavarivanje sa odgovarajućim zaštitnim zaslonima, laserska zraka može ozlijediti oči i spaliti kožu, obavezno treba koristiti zaštitne maske i naočale za područje valne duljine lasera.

Literatura / References

[1] Tanhofer, N. (2008). O boji. Zagreb: Novi Liber.

[2] Artemii, B., Vladyslav, K. The history of the creation of lasers and analysis of the impact of their application in the material processing on the development of certain industries, *History of science and technology*, 2021, 11(1):125-149.

[3] Ticijana B., *Laseri u znanosti i tehnologiji*. Državni seminar za učitelje i nastavnike fizike u osnovnim i srednjim školama, Zadar 25.-28. ožujka 2008.

5. Conclusion

This paper presents preliminary research results regarding the application of manual laser welding in the production of expansion joints (compensators). The findings highlight the advantages of this technology while simultaneously identifying potential challenges related to the quality of welded joints.

Laser welding, characterized by its highly localized and concentrated energy input, facilitates the welding of thin-walled materials. Its high processing speeds enhance productivity, while the low and precise heat input results in a narrow heat-affected zone (HAZ) and minimal thermal distortion. However, in the context of manual laser welding, the primary disadvantages arise from the very nature of these advantages. Parameters such as laser power, high welding speed, focal point positioning relative to the workpiece, and joint preparation precision operate within a very narrow tolerance range. Any deviation leads to weld defects, including porosity, undercut, cracks and lack of penetration.

While the capital cost of manual laser welding units is relatively accessible, it is essential to account for the additional costs of auxiliary equipment, such as rotators and positioners, to ensure repeatability and consistency during the welding process. Furthermore, from an occupational safety perspective, it is advisable to provide a dedicated welding area equipped with appropriate protective screening. Given that laser beams can cause severe ocular injuries and skin burns, the use of specialized protective masks and goggles rated for the specific laser wavelength is mandatory.

[4] Maršal, D. *Laseri i njihova primjena*, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, 2019.

[5] Pavić, J., Sigurnjak, I., Samardžić, I., Marić, D., Petrović, I. Iskustva u primjeni ručnog laserskog zavarivanja. *Zavarivanje, časopis za zavarivanje i srodne tehnologije* 67(3/4): 91-95.