Broj rada: 3.2
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.012

ADVANTAGES, CHALLENGES, AND RISKS OF USING HANDHELD LASER BEAM WELDING (HLBW)

PREDNOSTI, IZAZOVI I RIZICI KOD RUČNOG LASERSKOG ZAVARIVANJA

Dr. Miloš Jovanović, dipl. inž. maš.

Institut za varilstvo, Ljubljana, Slovenija

milos.jovanovic@i-var.si

Abstract: *Handheld Laser Beam Welding (HLBW) is a new and promising process that is relatively new for the welding and joining community. Since 2023 at the latest, HLBW) systems have become interesting for many companies around the world. This is mainly due to two factors. Firstly, the cost of such a system has fallen significantly in recent years. Secondly, there is economic pressure in the manufacture of welded products, which is partly due to the shortage of skilled workers. HLBW offers a wide range of potential benefits, including higher throughput, less level of distortion due to the lower heat input, and the use of less experienced personnel The rapid development of this new equipment and its use in industry were not accompanied by the necessary safety measures, personnel qualification, welding procedure qualification, and metallurgical phenomena in the welded joint. Therefore, International I institute for Welding (IIW), European Welding Federation (EWF) and European Welding Association (EWA) decided to prepare a certain guideline for the safety, quality, qualification, and metallurgical considerations related to HLBW. In this article, we will summarize the main parts of this document and present some practical experiences from industry.*

Keywords: *handheld laser, safety, qualification, guidelines*

Sažetak*: Ručno lasersko zavarivanje (HLBW) je nov i perspektivan postupak na području spajanja materijala. Od 2023. godine HLBW sistemi su postali zanimljivi za mnoge kompanije širom sveta. Za to postoje dva razloga. Prvo, cena takvog sistema je značajno pala u poslednjim godinama. Drugo, postoji ekonomski pritisak u proizvodnji zavarenih proizvoda, što je delimično i zbog nedostatka kvalifikovanih kadrova. HLBW nudi širok spektar potencijalnih koristi, uključujući veću produktivnost, manji nivo deformacija usled manjeg unosa toplote i mogućnost korišćenja od strane manje iskusnog osoblja. Brzi razvoj nove opreme i njena upotreba u industriji nisu bili praćeni potrebnim merama bezbednosti, kvalifikacijom osoblja, kvalifikacijom postupaka zavarivanja i metalurškim pojavama u zavarenom spoju. Stoga su Međunarodni institut za zavarivanje (IIW), Evropska federacija za zavarivanje (EWF) i Evropska asocijacija za zavarivanje (EWA) odlučili da pripreme određene smernice za bezbednost, kvalitet, kvalifikaciju i metalurške aspekte vezane za ovaj postupak. U članku ćemo sažeti glavne delove ovog dokumenta i prikazati neka praktična iskustva iz industrije.*

Ključne reči: *ručni laser, bezbednost, kvalifikacija, smernice*

1.0 UVOD

Istorijski gledano, prvi patent za ručno lasersko zavarivanje (HLBW) registrovan je u Nemačkoj 1971. godine, a zatim u SAD 1972. godine. Od početka novog milenijuma tema ručnog laserskog zavarivanja povremeno je dolazila u fokus. Postojale su laserske glave koje su u potpunosti štitile okolinu od laserskog zračenja. Međutim, njihovi nedostaci bili su velika masa, dimenzije i posledično otežano rukovanje.

Tek od početka 2020-ih cena laserskih izvora snage 1 kW pala je na nivo koji je omogućio širu upotrebu ovog procesa. Pored toga, laserske glave postale su manje i lakše za manipulaciju.

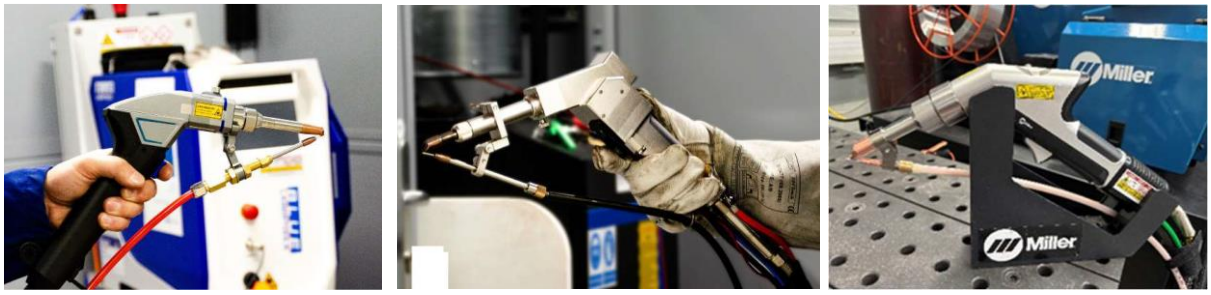
Ručno lasersko zavarivanje (HLBW - handheld laser welding), predstavlja opremu koja spada u kategoriju visokosnažnih lasera klase 4. Laseri klase 4 predstavljaju najozbiljniju kategoriju opasnosti kada je reč o laserskom zračenju. HLBW je proces sa veoma visokom gustinom snage (od 10^5do 10^{11} W/cm^2) koji koristi koherentan snop svetlosti kao izvor toplote.

HLBW je po načinu rada uporediv sa ručnim elektrolučnim postupcima zavarivanja. Laserski gorionik vodi se preko radnog komada, ali energija koja topi materijal ne potiče od električnog luka, već od koherentnog laserskog zračenja. Laserski gorionik nalazi se u ruci varioca.

2.0 OPREMA ZA RUČNO LASERSKO ZAVARIVANJE

Komponente opreme za ručno lasersko zavarivanje obuhvataju sledeće elemente:

Laserska glava (slika1) - izgled i konstrukcija laserske glave zavise od proizvođača i mogu uključivati komponente za dodavanje žice. Dizajn i funkcije ovih glava značajno se razlikuju. U nastavku je prikazan izbor različitih tipova laserskih glava. To može biti fiber laser u pojedinačnom modulu ili u multi modulu, kao i diodni laserski izvor.



Slika 1. Jednoosna (levo) i dvoosna (sredina) glava s oscilacijom lasserskog snopa i glava sa aktivnim nadzorom plazme (desno) [Jena, Nemačka, i Miller Electric Mfg LLC, SAD].

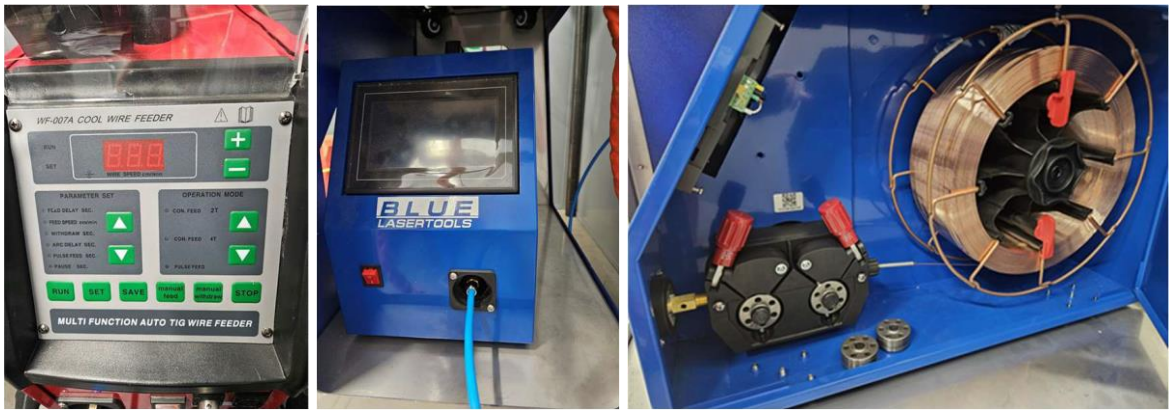
Laserski izvor (fiber, dioda) (slika 2) – u HLBW sistemima koriste se različite vrste laserskih izvora. Talasna dužina laserskog zračenja zavisi od tipa izvora koji se koristi.



Slika 2. Različiti HLBW sistemi [IFW Jena, Nemačka, i Miller Electric Mfg LLC, SAD].

U zavisnosti od tipa lasera, zračenje može biti emitovano u impulsnom režimu ili u režimu kontinuiranog talasa. Maksimalna snaga lasera kreće se između **800 W i 3 kW**. Važno je napomenuti da je fokusna tačka obično fabrički podešena unutar laserskog modula. Često je laserski izvor integrisan sa upravljačkom jedinicom i sistemom hlađenja u jednoj kućištu, postavljenom na kolica ili pokretnu platformu.

Uređaj za dodavanje žice (slika 3). Kada se zavarivanje izvodi sa dodatnim materijalom, neophodan je uređaj za dodavanje žice. Konstrukcija ovih uređaja razlikuje se u pogledu režima rada - mogu imati kontinuirano ili impulsno dodavanje žice, kao i funkciju povlačenja žice unazad.



Slika 3. Različiti uređaji za dodavanje žice kod HLBW sistema [IFW Jena, Nemačka].

Ručno lasersko zavarivanje nudi više prednosti u odnosu na tradicionalne postupke ručnog elektrolučnog zavarivanja, kao što su MIG/MAG i TIG, posebno u pogledu efikasnosti, preciznosti i jednostavnosti upotrebe. Međutim, ovaj postupak ima i određena ograničenja koja treba uzeti u obzir pri izboru odgovarajuće metode zavarivanja.

Prednosti: veća brzina zavarivanja, niži unos toplote i zato manje deformacije, mainimalna obrada po zavairvanju, jednostavno rukovanje i obuka operatera, različite vrste materijala, niži troškovi pribora i alata, kraće vreme od projektovanja do izrade komponente.

Nedostaci: zahtevi za lasersku bezbednost, niža snaga HLBW sistema u odnosu na automatizovane laserske sisteme, manja kontrola brzine kretanja u odnosu automatizovane laserske sisteme, refleksivnost kod određenih vrsta materijala, ograničen pristup licima u zoni zavarivanja, ograničeno razumevanje parametara procesa.

3.0 ZAHTEVI ZA BEZBEDNOST

Sve osobe koje koriste postupke zavarivanja već bi trebalo da budu upoznate sa neophodnim merama predostrožnosti, kao što su električna bezbednost, dimovi i gasovi, opasnost od požara ili eksplozije, opekotine, zračenje luka, buka, kao i električna i magnetna polja (EMF).

Pored navedenih opasnosti koje prate zavarivanje električnim lukom, korisnici moraju razumeti da HLBW oprema stvara opasnosti povezane sa laserskim snopom, koje mogu biti štetne za oči i kožu. Laserski snop može predstavljati i opasnost od požara zbog svoje sposobnosti da zapali zapaljive materijale.

Pored opasnosti povezanih sa zavarivanjem električnim lukom, direktni ili reflektovani laserski snopovi velike snage opasni su za posmatranje/vid u svim uslovima. Laseri velike snage obično emituju više kilovata svetlosti visokog intenziteta, vidljive ili nevidljive (blisko-infracrvene).

Većina komercijalno dostupnih HLBW sistema opremljena je laserskim izvorima talasne dužine 1070 nm, koji su nevidljivi za ljudsko oko. Vidljiva crvena tačka pilot - lasera može biti zavaravajuća jer je na mnogo nižem nivou snage, ali prati putanju laserskog snopa klase 4.

Kao i kod zavarivanja električnim lukom, lasersko zavarivanje takođe emituje UV zračenje (čija jačina zavisi od materijala koji se zavaruju).

3.1 Opasnosti za oči

Izlaganje laserskom zračenju može izazvati teška oštećenja mrežnjače i/ili rožnjače, koja mogu dovesti do trajnog oštećenja vida. Deo laserskog zračenja, uključujući snop za zavarivanje, sečenje ili čišćenje (npr. 1070 nm), nevidljiv je.

Zaštitne naočare za lasersku bezbednost dizajnirane su da štite od direktnih, reflektovanih i rasutih laserskih snopova i zračenja. Korisnici moraju poštovati lokalne propise (obavezno!) i preporuke proizvođača opreme za odgovarajuću talasnu dužinu i optičku gustinu (OD – Optical Density), odnosno nivo zaštite (LB – Laser Blocking), u skladu sa standardom EN 207 u Evropi.

Oznake „LB brojeva“ (LB5, LB6, LB7 itd.) odnose se na maksimalnu snagu ili gustinu energije za koju su zaštitne naočare sertifikovane

Nivo zaštite za određeni laser zavisi od više promenljivih, kao što su maksimalna snaga i veličina fokusne tačke. Proizvođači lasera treba da navedu minimalni nivo zaštite, a ovaj nivo mora da potvrdi kvalifikovano lice za lasersku bezbednost - LSO (Laser Safety Officer) koji radi u organizaciji koja koristi laser. LSO takođe mora da obezbedi pravilnu upotrebu lične zaštitne opreme i drugih bezbednosnih funkcija, kao što je kontrolisana zona za laser - LCA (Laser Controlled Area).

Zaštitne naočare treba uvek pregledati pre upotrebe, kako bi se utvrdilo da li postoje oštećenja ili nepravilno naleganje. Direktni laserski zraci su najopasniji. U zavisnosti od nivoa snage laserskog snopa, zaštitne naočare za lasersku bezbednost dizajnirane su da štite samo od slučajnih (tj. veoma kratkih) direktnih i reflektovanih zraka. Nikada se ne sme gledati direktno u otvor lasera, čak ni kada se nose zaštitne naočare. Nikada se ne sme usmeravati gorionik ka drugoj osobi.

Obavezno je nošenje laserskih zaštitnih naočara u svakom trenutku za sve osobe koje se nalaze unutar LCA zone. Ako laserska zaštitna maska ima integrisanu zaštitu za oči (integrisani zaptivni element), tada je sama maska dovoljna. Međutim, ako više osoba radi unutar LCA, takva maska se ne sme otvarati osim ako se nose dodatne laserske zaštitne naočare.

Važno je razumeti da standardne zaštitne naočare i standardna zaštitna maske ne pružaju adekvatnu zaštitu od laserskih zraka. Kada zavarivač upotrebljava i laserske i elektrolučne postupke zavarivanja, preporučuje se upotreba hibridne zavarivačke maske (pogodne za oba postupka - električni luk i laser). Pored zaštite očiju, upotreba odgovarajuće zavarivačke maske je ključna za zaštitu kože lica zbog opasnosti od refleksija visoke energije.

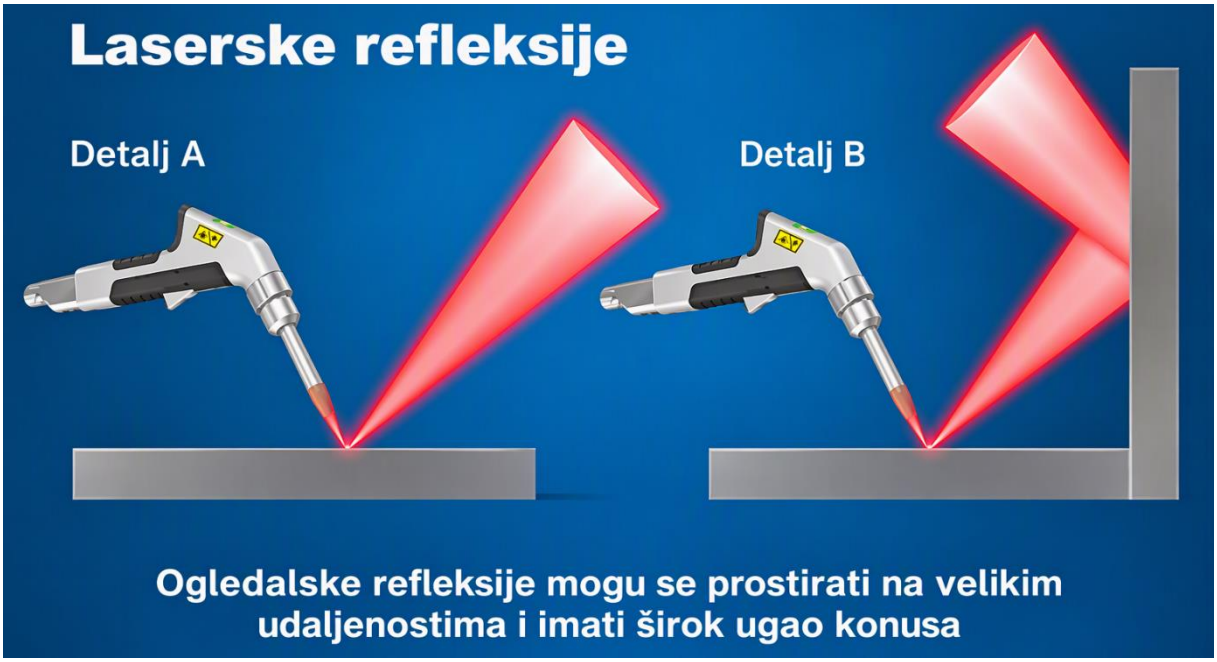
3.2 Opasnosti zbog refleksije laserskih zraka

Kod laserskog zavarivanja moraju se uzeti u obzir opasnosti od rasutog i direktnog laserskog zračenja. Visoko reflektivni metali mogu proizvesti opasne reflektovane snopove putem „spekularnih“ (zrcalnih) refleksija (slika 4). Intenzitet refleksije zavisi od vrste materijala i završne obrade površine. Takođe, metali sa veoma visokom toplotnom provodljivošću (npr. aluminijum i bakar) mogu izazvati refleksiju dela laserske energije sa mesta zavarivanja, jer je paljenje plazme odloženo (slika 5). Kada se plazma jednom formira, spekularna refleksija se značajno smanjuje.



Slika 4. Šematski prikaz refleksije tokom laserskog zavarivanja [Miller Electric, SAD].

Kod zavarivanja u režimu provodnosti (conduction mode), opasnost od refleksije je veća u poređenju sa režimom „keyhole - ključaničnog“ zavarivanja, nakon što se ključanica formira.

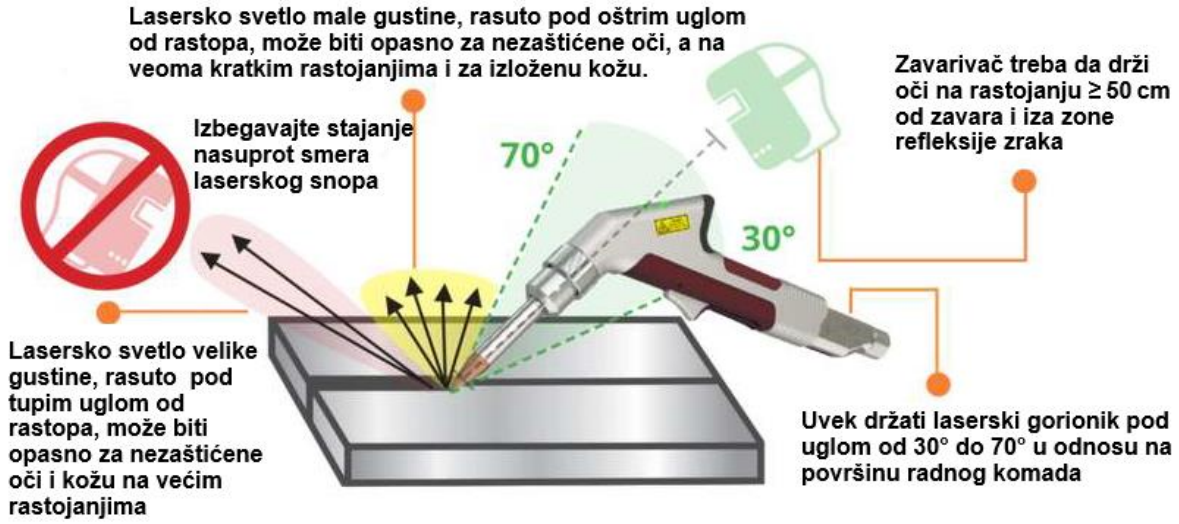


Slika 5. Šematski prikaz multi refleksije kod laserskog zavarivanja [Miller Electric, SAD].

Korisnik mora proceniti radno okruženje pre upotrebe ručne laserske opreme kako bi razumeo koje površine mogu stvoriti opasne reflektovane snopove. Ova procena mora uključiti kompletan pregled LCA zone.

Normalan smer refleksije laserskog zraka sa metalne površine može proizvesti opasan snop koji se reflektuje sa jedne površine na mestu zavarivanja (slika 5, detalj A). Normalan smer refleksije laserskog snopa može proizvesti opasan snop koji se reflektuje i sa dve površine postavljene pod uglom, što se naziva „retrorefleksija“ (slika 5, detalj B). Spekularne (zrcalne) refleksije mogu predstavljati opasnost za oči i kožu operatera i drugih osoba u LCA zoni, jer se deo

laserskog snopa može reflektovati od više površina. Preporuke za operatera prikazane su na slici 6.



Slika 6. Preporuke za osoblje tokom refleksije pri HLBW [IPG Photonics Corporation, SAD].

Pored refleksije od površine komada, u režimu „ključaoničnog“ zavarivanja laserski snop može proći kroz radni komad, naročito kada je potrebno provariti koren zavara. Kao posledica toga, prostor iza dela koji se zavaruju mora se takođe uzeti u obzir u okviru laserske bezbednosti.

Pored navedenih primera, zavarivači koji rade sa laserom moraju biti obučeni da razumeju promenljive opasnosti tokom zavarivanja delova, koji imaju kompleksnu geometriju sa mnogo površina.

Obučeni zavarivač koji radi sa laserom treba da bude u stanju da predvidi sve izazove i da pravilno upravlja gorionik kako bi izbegao refleksije usmerene ka rukama ili licu, naročito pri zavarivanju aluminijuma i bakra.

Materijali sa visokom reflektivnošću, kao što je bakar, nisu pogodni za podloške, jer mogu stvoriti nove opasnosti koje ne postoje kod elektrolučnih postupaka zavarivanja.

3.3 Bezbednosne karakteristike HLBW opreme

Korisnici moraju obezbediti da HLBW oprema sadrži važne ugrađene bezbednosne funkcije koje se zahtevaju za sve lasere klase 4, i to:

1. Ključ-prekidač za obezbeđivanje opreme i sprečavanje neovlašćenog korišćenja.
2. Dugme za hitno zaustavljanje koje odmah prekida emisiju lasera.
3. Priključak za spoljašnji sistem zaključavanja koji isključuje laser ako neko izuzev operatera, neočekivano uđe u LCA zonu.

Proizvođači i korisnici HLBW opreme moraju uzeti u obzir bezbednosne funkcije koje se zahtevaju standardima ISO 11553-1 i -2, međunarodnim standardima za mašine za lasersku obradu, kako bi se zaštitili operateri i osobe u blizini. Slede tipične mere za smanjenje rizika, projektovane u skladu sa serijom ISO 11553, kao i drugim bezbednosnim standardima ili razvijene od proizvođača opreme:

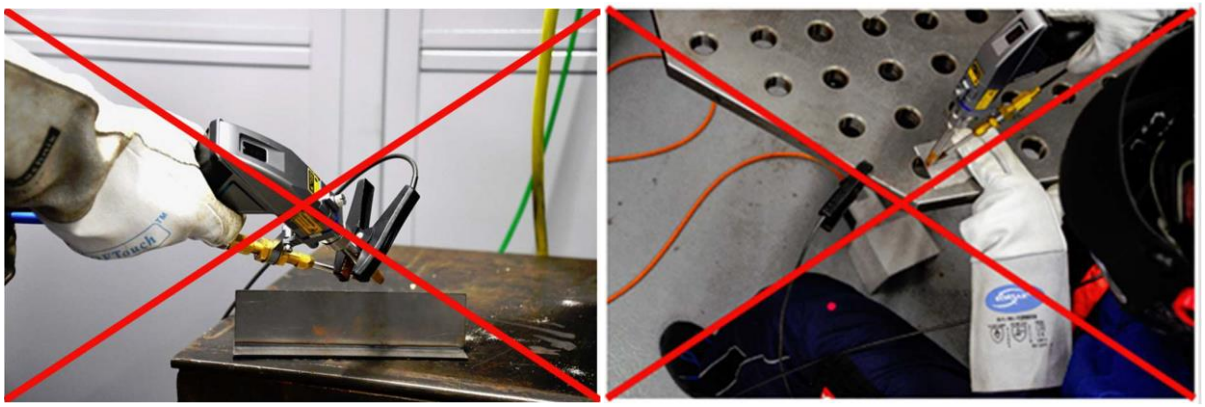
1. Dvostepeni okidač na gorioniku koji sprečava nenamernu emisiju lasera, uključujući vidljivi indikator spremnosti lasera i vidljivo upozorenje u vidnom polju operatera

tokom emisije. Vidljivi indikatori moraju jasno prikazivati i trenutak kada je potrebna lična zaštita očiju.

2. Kontaktni krug sa radnim komadom, koji obezbeđuje da laser može biti aktiviran samo kada je vrh gorionika u kontaktu sa komadom koji se zavaruje.
3. Pored prve dve funkcije, treća funkcija značajno povećava lasersku bezbednost i zahteva se u nekim lokalnim regualtivama. To može biti, na primer, senzor za detekciju plazme, gde ručni gorionik sadrži foto-senzor koji prati plazmu. Ako se nakon početka zavarivanja ne generiše dovoljno svetlosti plazme, oprema automatski isključuje emisiju lasera. Druga opcija je nožna pedala, koja mora biti pritisnuta dodatno da bi se aktivirala emisija lasera.
4. Optički krug zaključavanja u kompletu optičkih vlakana, namenjen proveravi celovitosti veze između zavarivačkog gorionika i laserskog izvora.

3.4 Česti primeri nepravilne upotrebe HLBW sistema

Slike u nastavku prikazuju nebezbedne radne prakse povezane sa HLBW sistemima:



Slika 7 . Nepravilno premošćenje pomoću mase (levo), ne preporučuju se radni stolovi sa otvorima (desno). [IFW Jena, Nemačka].



Slika 8. Nebezbedna praksa (levo) i neadekvatna zaštitna oprema za lice i bradu (desno). [IFW Jena, Nemačka]

3.5 Organizacioni i bezbednosni zahtevi na radnom mestu

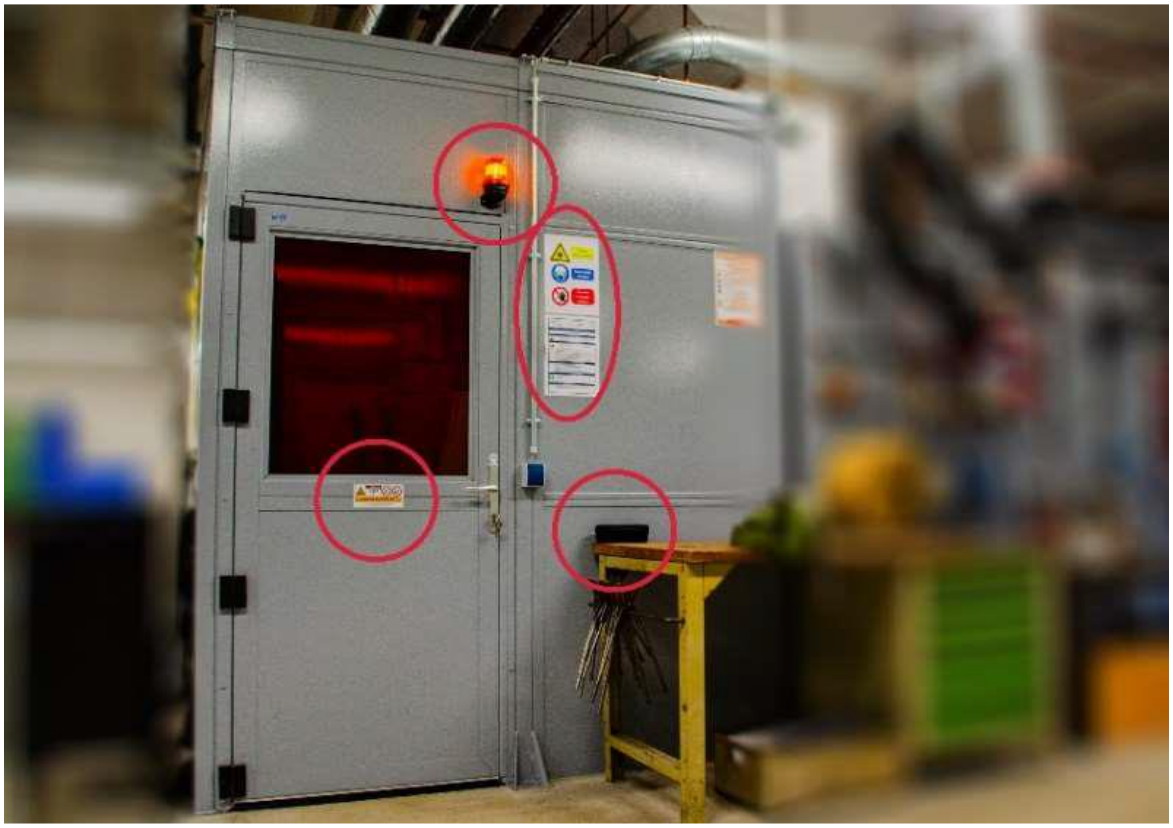
Svaka organizacija, kao i svaki samostalni operater koji radi van organizacije, a koristi lasere klase 4, mora da:

1. Imenuje kvalifikovano lice za lasersku bezbednost (LSO) ili da bude obučen kao takva osoba.
2. Ima dokumentovanu proceduru za lasersku bezbednost.
3. Ima kontrolisanu zonu za laser (LCA) za svako radno mesto.

Operateri i sve osobe koje se nalaze u LCA zoni moraju nositi propisanu ličnu zaštitnu opremu (PPE - Personal Protective Equipment): zaštitne naočare za lasersku bezbednost, lasersku zavarivačku masku, rukavice otporne na toplotu i odeću otpornu na plamen.

LCA je svetlosno zaptivena prostorija ili ograđeni prostor sa panelima koji blokiraju laserske zrake, vratima sa prekidačem za međuzaključavanje i upozoravajućim znakom i/ili svetlosnim signalom „Laser On“. Na spoljašnjoj strani LCA mora biti postavljen informativni znak sa maksimalnom snagom lasera i talasnom dužinom.

Sve barijere ili prozori koji se koriste u zoni zavarivanja moraju biti izrađeni od materijala bezbednog za laser, koji može izdržati direktne i reflektovane snopove. Slika 9 prikazuje fotografiju LCA sa bezbednosnim funkcijama.



Slika 9. Prikaz kontrolisane zone lasera (LCA) sa bezbednosnim funkcijama [IFW Jena, Nemačka]

Odgovarajući upozoravajući znakovi na laser moraju biti postavljeni širom kontrolisane zone, posebno na svim ulazima u prostor i izlazima iz njega. Pristup LCA zoni mora biti ograničen isključivo na osobe koje su obučene za lasersku bezbednost tokom rada sa laserom.

3.6 Dimovi usled zavarivanja

U procesu HLBW takođe se stvaraju čestice dima od zavarivanja, koje nastaju isparavanjem osnovnog i dodatnog materijala u laserskom snopu tokom hlađenja. Ove čestice su veoma sitne i uglavnom respirabilne. Kao i kod elektrolučnog zavarivanja, potencijalne zdravstvene

opasnosti zavise od materijala koji se koriste. Zbog toga se za HLBW proces primenjuju isti propisi o zdravlju i bezbednosti kao i za elektrolučno zavarivanje.

Opšte je pravilo da granične vrednosti štetnih supstanci u udahnutom vazduhu ne smeju biti prekoračene. Dodatne informacije mogu se pronaći u informativnoj brošuri EWA „Introduction to methods of prevention and extraction of welding fume“ .

Ako se oslobađanje štetnih supstanci ne može sprečiti ili dovoljno smanjiti, one se moraju odstraniti na samom mestu nastanka, pre nego što uđu u zonu disanja. Pomoćna opšta ventilacija može smanjiti koncentraciju štetnih materija u celom prostoru i time zaštititi i osobe koje nisu direktno uključene u proces zavarivanja.

Ako se takve tehničke ili organizacione metode ne mogu primeniti ili nisu dovoljno efikasne, u mnogim slučajevima jedina opcija je da zavarivač koristi ličnu zaštitnu opremu za disanje. Međutim, treba imati na umu da takva oprema štiti samo osobu koja je nosi.

Iako preliminarne analize dima pri zavarivanju pokazuju da je stopa stvaranja dima kod laserskog zavarivanja veoma niska u poređenju sa elektrolučnim postupcima zavarivanja, kao npr. MAG, opasnosti i dalje postoje zbog dima koji nastaje tokom HLBW procesa. Pored toga, kako se povećava nivo snage uređaja, povećava se i stopa stvaranja dima.

Zbog poznatih rizika od kancerogenih i neurotoksičnih čestica koje nastaju pri zavarivanju određenih metala i legura, kod laserskog zavarivanja mora biti prisutan visok nivo opreznosti kako bi se zaštitilo zdravlje i bezbednost zavarivača.

4.0 OSOBLJE ZA HLBW

4.1 Kvalifikacija LSO (Lice za lasersku besbednost)

Svaka organizacija mora imati kvalifikovanog LSO koji je odgovoran za bezbednost operatera i drugog prisutnog osoblja, što uključuje:

1. Sprovođenje procene rizika za sve opasnosti povezane sa laserskim snopom i opasnosti koje nisu vezane za snop.
2. Obezbeđivanje da su sve mere kontrole implementirane i da se dosledno poštuju.
3. Odobravanje pisanih radnih procedura koje se odnose na upotrebu lasera.
4. Obezbeđivanje da svaki operater i posmatrač koji koristi laser ili je izložen laserskim opasnostima ima informacije i obučen je o bezbednoj upotrebi opreme i potencijalnim rizicima.

4.2 Kvalifikacija zavarivača

Za HLBW je neophodna i provera ručnih spretnosti, koja se može sprovesti kao poseban test zasnovan na seriji standarda ISO 9606. Na sertifikatu treba navesti da je proces 521 za fiber laserske izvore izveden ručno.

Cilj je da se HLBW integriše u standarde kao samostalan postupak. U tu svrhu su preduzete početne aktivnosti na nivou ISO standardizacije.

Kao alternativa, kvalifikacija za ručno i poluautomatsko lasersko zavarivanje može se sprovesti u skladu sa tabelom QW-358 iz ASME Section IX (verzija 2023).

Vreme i obuka potrebni da neobučeni pojedinac postane bezbedan i kompetentan zavarivač za lasersko zavarivanje pomoću HLBW pokazali su se značajno kraćim nego kod postupaka elektrolučnog zavarivanja.

Pored demonstracije praktičnih veština, svaki zavarivač treba da stekne znanje iz sledećih oblasti:

- Osnove i svojstva laserskog zračenja
- Laserska bezbednost
- Laserska zavarljivost materijala
- HLBW sistemi
- Parametri procesa, priprema zavara i karakteristike zavarenog spoja

Preporučuje se da se teorijsko znanje zavarivača proveri pismenim ispitom.

4.3 Kvalifikacija zavara i aspekti kvaliteta

Kvalifikacija zavara zasnovana je na postojećim standardima i poglavljima iz priručnika. Kvalifikovani zavari treba da budu izvedeni prema odobrenom postupku zavarivanja koja obuhvata zahteve dizajna kupca i bezbednosne aspekte. Dokumentacija za postupak zavarivanja mora predstavljati evidenciju potrebnu zavarivaču, poslodavcu i kupcu. Ona treba da se poziva na nacionalne ili međunarodne standarde i da ih prati.

Postupak zavarivanja treba da sadrži sledeće postavke:

1. Osnovni materijal koji se zavaruju, uključujući specifikaciju i dimenzije.
2. Dodatni materijal koji se koristi, uključujući specifikaciju i dimenzije.
3. Metoda čišćenja osnovnog materijala.
4. Alati i pribori koji se koriste.
5. Specifikacija zaštitnog gasa i potreban protok.
6. Oprema za lasersko zavarivanje, uključujući proizvođača, tip lasera, model laserskog generatora, optiku u ručnom uređaju (ako se primenjuje), sistem dodavanja žice (ako je odvojen od HLBW opreme), sistem dovoda gasa (ako je odvojen od HLBW opreme) itd.
7. Specifikacije zavarenog spoja, uključujući geometriju, tolerancije itd.
8. Parametre laserskog procesa, npr. veličinu tačke na radnom komadu, podešavanja snage, režim rada (kontinuirani talas ili impulsni), kao i metod kalibracije snage.
9. Parametre oscilacije snopa, kao što su frekvencija, širina, i ako se primenjuje - tip figure ili režim kompenzacije snage.
10. Parametre dodavanja žice, npr. brzinu dodavanja i metod kalibracije brzine dodavanja.

5.0 ZAKLJUČCI

HLBW predstavlja obećavajuću alternativu ručnom zavarivanju električnim lukom, posebno za primene koje zahtevaju brzinu, preciznost i minimalan unos toplote. Međutim, njegova uspešna primena zahteva odgovarajuću obuku, mere bezbednosti i optimizaciju procesa kako bi se maksimalno iskoristile njegove prednosti. Ovaj dokument treba koristiti kao smernicu za bezbednu primenu ručnog zavarivanja laserom za različite vrste zavarenih spojeva i materijala.

LITERATURA

[1] CONSIDERATIONS ABOUT HANDHELD LASER BEAM WELDING (HLBW), July 2025. Brochure-handheld-laser-TC-HSE-184-R0-2025.pdf