

UTICAJ ZAŠTITNIH PLINOVA NAPREDNIH TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA NA RADNU I ŽIVOTNU SREDINU / IMPACT OF SHIELDING GASES OF ADVANCED WELDING TECHNOLOGIES ON THE WORKING AND ENVIRONMENT

Zdravko Božić¹, Darijo Božić², Slavko Djurić¹

¹Internacionalni univerzitet Travnik u Travniku, BiH,

²NCMC doo Žabljak bb, 74230 Usora, BiH,

e-mail: zdravko.bozickovic@gmail.com, slavko.djuric@sf.ues.rs.ba,

darijobozickovic@gmail.com

Stručni članak

<https://www.doi.org/10.58952/zr20251401453>

UDK / UDC 621.791.7:620.9:615.9:504

Sažetak

Rad daje pregled uticaja zaštitnih plinova konvencionalnih i naprednih procesa zavarivanja s obzirom na trostruki pristup održivosti (ekonomski, ekološki i društveni). Cilj rada je da pregleda dostupnu literaturu o uticaju na životnu sredinu naprednih tehnologija zavarivanja primenjenih na čelicima. U pregledu literature daje se kratak uvod u glavne procese i tehnike zavarivanja uključujući TIG zavarivanje, MIG zavarivanje, zavarivanje laserskim zrakama i metodu LCA. Prikazano je poređenje u smislu uticaja na životnu sredinu kao i negativni uticaji na zdravlje zavarivača za najčešće korišćene materijale za zavarivanje. Ekološki problem je predstavljen sa gledišta održivosti zavarivanja i smanjenja zagađenja životne sredine, uz predstavljanje uticaja tehnika zavarivanja. Prikazana je veza između održivog procesa zavarivanja i primjene standarda ISO 9001, ISO 14001 i ISO 45001 kao i amerčke objave Nacionalnog instituta za sigurnost i zdravlje na radu (NIOSH) standarda izloženosti za različite komponente u dimovima i plinovima za zavarivanje. Na kraju su dati zaključci i preporuke za postizanje ekološko održivog procesa zavarivanja.

Ključne riječi: zavarivanje, tehnologija, životna sredina, održiva proizvodnja

JEL klasifikacija: L610

Abstract

The paper provides an overview of the impact of shielding gases of conventional and advanced welding processes with regard to the three-fold sustainability approach (economic, environmental and social). The aim of the paper is to review the available literature on the environmental impact of advanced welding technologies applied to steels. The literature review provides a brief introduction to the main welding processes and techniques including TIG welding, MIG welding, laser beam welding and the LCA method. A comparison is presented in terms of environmental impact as well as negative health impacts of welders for the most commonly used welding materials. The environmental issue is presented from the perspective of welding sustainability and reduction of environmental pollution, with a presentation of the impact of welding techniques. The link between a sustainable welding process and the implementation of ISO 9001, ISO 14001 and ISO 45001 standards as well as the US publication of the National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) exposure standards for various components in welding fumes and gases is presented. Finally, conclusions and recommendations for achieving an environmentally sustainable welding process are given.

Key words: welding, technology, environment, sustainable production

JEL classification: L610

UVOD

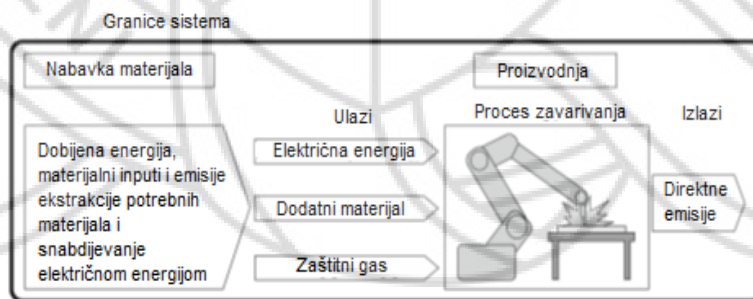
Napredne tehnologije zavarivanja su postale popularne tek pred kraj 19. veka. Smatra se da se najnovije tehnologije zavarivanja odlikuju manjim intenzitetom lokalnog izvora topline, manjom zonom uticaja topline, kvalitetnim zavarivanjem, produktivnošću i zavarivanjem različitih materijala. Dim i gasovi koji se emituju tokom zavarivanja predstavljaju opasnost za ljudsko zdravlje tokom zavarivanja. Kiselost ili alkalnost udahnutih čestica su hemijska svojstva koja mogu uticati na respiratorni sistem. Plinovi zavarivanja mogu se klasificirati na gasove koji se koriste kao zaštitni gas, a drugi nastaju procesom. Zaštitni plinovi su obično inertni, stoga se ne definišu kao opasni po zdravlje, ali mogu biti zagušljivači.

Eksperimentalnim i epidemiološkim studijama prijavljeni su dovoljni dokazi o karcinogenosti nikla, kadmijuma i hroma. Ova tri metala je Međunarodna agencija za istraživanje raka kategorizirala kao kancerogen "Klasa 1" [1-2]. Ozon je uveden kao sumnjiv kancerogen pluća, ali postoji vrlo malo dokumenata o njegovom dugotrajnom djelovanju na zavarivače. Emisije ultraljubičastog zračenja koje nastaju kao rezultat luka zavarivanja mogu potencijalno uzrokovati tumore kože kod životinja i kod preeksponiranih osoba, međutim, nema definitivnih dokaza za ovaj učinak kod zavarivača [3].

Iz tog razloga, u poslednjim godinama, sve veća pažnja posvećena je proučavanju različitih metoda zavarivanja s ciljem minimiziranja uticaja na životnu sredinu. Sljedeće tehnologije zavarivanja se smatraju naprednim tehnologijama.

- 1) Lasersko zavarivanje.
- 2) Zavarivanje elektronskim snopom.
- 3) Zavarivanje trenjem.
- 4) Ultrazvučno zavarivanje.

Ciljevi rada. Odabir odgovarajućeg plina zavisi od vrste zavarivačkog postupka, vrste materijala koji se zavaruje i zahtjeva kvaliteta zavara. Cilj rada je upoređivanje uticaja zaštitnih plinova na životnu sredinu različitih procesa zavarivanja. Usporedba se uglavnom vrši između nekih od najčešćih konvencionalnih procesa, kao što su zavarivanje gasom metala (GMAW) i gasno zavarivanje volframovim lukom (GTAW), i naprednih tehnologija zavarivanja laserskim snopom, kako bi se zaključilo koji proces postiže najbolje rezultate uštede na životnu sredinu.



Slika 1: Granice sistema: ulazi i izlazi u procesu zavarivanja [4].

Da bi se u potpunosti proučio i procenio ekološki uticaj jednog procesa, treba sprovesti analizu životnog ciklusa (LCA). Prema metodi LCA, važno je početi od definisanja granica sistema, što znači razmatranje svih ulaznih i izlaznih tokova sistema kao cjelokupnog sistema.

Šematski primer ovoga može se videti na Slici 1, koja uzima u obzir kako fazu nabavke materijala, tako i sam proces zavarivanja. Ovo uključuje sve faze koje su potrebne za upravljanje materijalom, gasovima i, generalno, izlazima iz procesa [5].

Željezni oksidi se ne klasifikuju kao ljudski kancerogen, ali izazivaju siderozu, koja smanjuje kapacitet pluća. Hrom (VI, netopljiv) i njegovi spojevi su poznati kao ljudski kancerogen za pluća, a nikiel je takođe poznat kao ljudski kancerogen, izazivajući rak pluća, nosa i sinusa. Mangan i njegovi spojevi nisu kancerogeni, ali su povezani sa efektima na centralni nervni sistem (CNS) koji su slični Parkinsonizmu [6].

1. ASPEKTI ŽIVOTNE SREDINE

Zagađenje zraka je svaka opasna čestica ili biološki molekul koji kontaminira prirodnu Zemljinu atmosferu. Literatura podržava ideju smanjenja intenziteta struje kako bi se smanjile emisije iz dima od zavarivanja [7]. Smanjenje potrošnje energije SMAW procesa donosi nekoliko ekoloških i ekonomskih prednosti za ukupne performanse. Sterjovski i dr. [8] zavarivao je čelične ploče od 35 mm i ispitao unos toplotne energije luka za proces ručnog lučnog zavarivanja. Sproesser et al. [9] je koristio analizu životnog ciklusa (LCA) kako bi uporedio uticaj na životnu sredinu različitih procesa zavarivanja kao što su ručno elektrolučno zavarivanje (MMAW), elektrolučno zavarivanje u zaštiti gasa (GMAW), lasersko lučno hibridno zavarivanje (LAHW), procesi zavarivanja raspršivanjem i modifikovanim lukom itd. LCA studija je otkrila najveći uticaj na životnu sredinu za proces MMAW.

1.1. VRSTE ZAŠTITNIH PLINOVA

Zaštitni plinovi koji se koriste u zavarivanju mogu biti klasifikovani u dve glavne grupe: reaktivni plinovi i inertni plinovi.

Reaktivni plinovi plinovi se koriste u postupcima zavarivanja gde se plin mora hemijski reagovati sa metalom ili zavarenim materijalom, kako bi se poboljšala stabilnost luka ili sam proces zavarivanja. Ugljen-dioksid (CO_2): CO_2 je najčešći reaktivni plin u MIG/MAG zavarivanju i često se koristi za zavarivanje čelika, posebno u industrijama sa velikim proizvodnim obimima.

Inertni plinovi su plinovi koji ne reaguju sa metalima tokom procesa zavarivanja, pa se koriste kako bi se stvorila zaštita od oksidacije i kontaminacije zavarenog područja. Najčešći inertni plinovi u zavarivanju su: Argon (Ar): Najčešće korišćen plin u zavarivanju, posebno u TIG (Tungsten Inert Gas) i MIG (Metal Inert Gas) postupcima. Argon stvara zaštitu od spoljnog uticaja, stabilizuje zavarivački luk i poboljšava kvalitet zavara. Pored toga, koristi se za zavarivanje nerđajućeg čelika, aluminijuma, titanijuma i drugih legura. *Helijum* (He): Helijum se koristi u kombinaciji sa argonom za poboljšanje brzine zavarivanja i dubine prodiranja, naročito u TIG zavarivanju.

Mješavine CO_2 i argona: U kombinaciji sa argonom, CO_2 se koristi da se poboljša stabilnost luka i smanji trošak zavarivanja. Ova mješavina se koristi u MIG/MAG zavarivanju, gde CO_2 donosi veću brzinu zavarivanja, dok argon pruža bolju stabilnost i kontrolu nad procesom.

Industrija zavarivanja može smanjiti negativne uticaje na životnu sredinu prelaženjem na inertne plinove i optimizovanjem procesa zavarivanja kako bi se smanjile emisije štetnih gasova poput CO_2 . Ovaj pristup doprinosi održivosti i smanjuje ekološki otisak zavarivačkih operacija. "Ekološki otisak" (engl. "ecological footprint") je pokazatelj koji meri uticaj ljudskih aktivnosti na životnu sredinu. On prikazuje koliko prirodnih resursa (kao što su voda, energija, zemljište) i ekosistema je potrebno da bi se podržao životni stil i potrošnja jednog pojedinca, zajednice ili nacije.

2. METODOLOGIJA

Za istraživanje uticaja zaštitnih gasova naprednih tehnologija zavarivanja na radnu i životnu sredinu, korištene su različite metode istraživanja koje obuhvataju eksperimentalne, analitičke i simulacione pristupe. Neke od metoda koje su primijenjene u ovom radu uključuju:

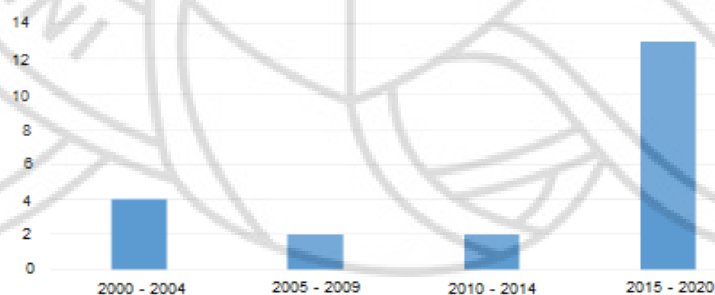
1. Eksperimentalne metode. Merenje emisija zagađivača, mjerenje koncentracija štetnih gasova, kao što su oksidi azota (NO_x), ugljen-dioksid (CO₂), ozon (O₃) i čestice (PM), koji nastaju tokom procesa zavarivanja i Prikupljanje podataka sa radnih mesta pomoću uređaja za praćenje kvaliteta vazduha.
2. *Komparativne analize*. Upoređivanje zaštitnih gasova i upoređivanje tehnologija zavarivanja:
3. Metode životnog ciklusa (LCA). Analiza životnog ciklusa (LCA)
4. *Pregled podataka i statističke metode*. Statistička analiza podataka o emisijama.
5. *Uvođenje ekoloških i sigurnosnih normi*. Primenjena regulativa i standarda.

Metoda istraživanja koja se može koristiti za istraživanje uticaja zaštitnih plinova naprednih tehnologija zavarivanja u budućnosti je i analiza trendova.

Kombinovanjem gore navedenih metoda, može se detaljno analizirati kako zaštitni plinovi utiču na radnu i životnu sredinu, omogućavajući razvoj naprednih tehnologija i politika za zaštitu zdravlja radnika i smanjenje negativnih uticaja na prirodu.

2.1. NAJNOVIJE STANJE

Pregledom literarnih radova u vezi sa zaštitnim plinovima kod zavarivanja je ustanovljena mala dostupnost članaka i radova koji se odnose na klimatske implikacije. Pošto je ovo pitanje i interesovanje za njega još uvek relativno novo, pokrivenost literature je daleko od potpune, a još uvek postoji mnogo tema koje treba analizirati, kako u vezi sa prethodno pomenutim materijalima, tako i sa drugim značajnim inženjerskim materijalima. Specifično, utvrđeno je da literatura vezana za ekološki uticaj titana i njegovih legura već postoji u određenoj mjeri, ali još uvek nije dovoljna. U poslednjim godinama broj članaka se povećava, ali je to još uvek u fazi razvoja.



Slika 1: Godina izdavanja članaka vezanih za uticaj zavarivanja na životnu sredinu u periodu 2000 – 2020. [9].

Kao što se može videti na grafiku prikazanom na slici 1, većina članaka vezanih za uticaj na životnu sredinu i posledice po zdravlje različitih metoda zavarivanja objavljena je u poslednjih 5

godina. Iako neki članci datiraju iz prethodnih godina, posljednjih 5 godina karakteriše nagli porast broja objavljenih članaka koji se odnose na ekološke teme. Štaviše, nije bilo članaka vezanih za ovu temu koji su objavljeni pre 2000-ih, što ponovo ukazuje na to koliko je ovo polje studiranja novije.

2.2. PRIKUPLJANJE, PRIKAZ I OBRADA PODATAKA

Kod laserskog zavarivanja, odabir pravog zaštitnog plina je ključan za postizanje optimalnih rezultata. Sljedeća tabela pokazuje neke od zaštitnih plinova koji se obično koriste u naprednim tehnologijama zavarivanja. Tabela 1 pokazuje neke od zaštitnih plinova

Tabela 1: Pregled zaštitnih plinova kod zavarivanja [11]

Zaštitni gas	Potiskivanje plazme	Prevenција protiv oksidacije	Relativni trošak	Prednosti	Ograničenja
Ar	Odličan (15,76eV)	Odličan (Inertan)	Umjereno	Sprečava oksidaciju, odličan za titan i reaktivne metale, osigurava stabilan luk i dobru vidljivost zavarenog bazena.	Manja toplotna provodljivost može rezultirati užim profilima zavora.
He	Odličan (24,59eV)	Odličan (Inertan)	Visok	Odlične mogućnosti prijenosa topline. Poboljšana penetracija zavora	Skuplji, zahtijevaju veći protok i manje je dostupan.
N ₂	dobro (15,58eV)	Nizak (ponekad može doprinijeti oksidaciji)	Nisko	Može biti od koristi u određenim aplikacijama od nehrđajućeg čelika.	Nije pogodan za mnoge metale, može uzrokovati poroznost i lomljivost u zavarenim spojevima.
CO ₂	Loše (specifična energija ionizacije nije primjenjiva za CO ₂ u cjelinu)	Niska (aktivni plin)	Najniže	Poboljšava penetraciju i stabilizuje luk u određenim procesima.	Može dovesti do oksidacije, većeg prskanja i grubljih površina zavora
O ₂	Loše (12,07eV)	jedan (doprinosi oksidaciji)	Nisko	Nema (doprinosi oksidaciji)	Nisko

2.3. PRAĆENJE EMISIJA ZAVARIVANJA I PROCJENA ODRŽIVOSTI

Proces zavarivanja dovodi do hemijskog izlaganja dimovima i toksičnim gasovima u ogromnim količinama, [12, 13]:

Praćenje zraka, Praćenje zraka i mjerenje povezanih zagađivača putem ličnog uzorkovanja i uzorkovanja okoliša, biološkog praćenja, procjene na radnom mjestu s obzirom na fizičke i kemijske opasnosti, te medicinskih nalaza na radu mogu se koristiti za potpunu procjenu statusa izloženosti zavarivača.

Biološki monitoring. Biološki monitoring označava mjerenje koncentracije zagađivača, njegovih metabolita ili drugih pokazatelja u tkivima ili tjelesnim tekućinama radnika. U nekim slučajevima, biološki monitoring može biti dopunski monitoring za ličnu procjenu.

Praćenje zdravlja. Praćenje zdravlja znači praćenje radnika izloženih opasnim zagađivačima kako bi se identifikovale promjene u njihovom zdravstvenom statusu i procijenili efekti izloženosti. Kako adekvatno zaštititi zavarivače i izbjeći zdravstvene rizike izazvane dimom u ručnim procesima zavarivanja ključno je pitanje za dizajniranje procesa i poboljšanje zaštitne opreme.

Održivost se može mjeriti na različite načine jer su izvedeni različiti tipovi radova, kao što su socijalni, ekonomski, ekološki, efikasnost, energija, kvalitet, itd. Ova specifična procena takođe uključuje fizički aspekt, tj. čvrstoću, s obzirom na to da su u proizvodnji mehanička svojstva ključna za performanse komponenti. Metodologija proračuna ocjene održivosti se vrši prema jednačini (1). Svaki član jednačine je predstavljen u nastavku, od jednačina (2) do (11).

$$Ocjena = Fizički\ uticaj \times W + Ekološki\ uticaj \times X + Ekonomski\ uticaj \times Y + Socijalni\ uticaj \times Z \quad (1)$$

gdje:

W= 0.296 – Težina pridružena fizičkom uticaju

X= 0.24 – Težina pridružena ekološkom uticaju

Y= 0.198 – Težina pridružena ekonomskom uticaju

Z= 0.266 – Težina pridružena socijalnom

2.3.1. Fizički uticaj

Izraz sadrži granicu tečenja i žilavost osnovnog materijala (AA 6063-T6). Za podatke o mehaničkim svojstvima korišteni su primjenjivi standardi. Nadalje, za procjenu granice popuštanja i žilavosti zavarenih spojeva, izvršena su zatezna ispitivanja na univerzalnoj mašini za ispitivanje INSTRON 3345.

$$Fizički\ uticaj = \frac{\frac{Čvrstoća\ zavarā}{Čvrstoća\ osnovnog\ materijala}}{2} + \frac{\frac{Zatezna\ čvrstoća\ zavarā}{Zatezna\ čvrstoća\ osnovnog\ materijala}}{2} \quad (2)$$

2.3.2. Uticaj na životnu sredinu

Za proračun uticaja na životnu sredinu (pogledajte jednačinu (2)), treba uzeti u obzir nekoliko termina. Prvi pojam (emisije zavarā) uključuje različite materijale koji se emituju u okolinu –na primjer, ugljični dioksid (CO₂) tokom izvođenja zavarā (vidi jednadžbu (3)). Drugi, gubitak, odnosi se na razliku između osnovnog materijala, upotrijebljenih metala za punjenje i mase zavarene komponente, i na kraju, mase zavarā, koja se odnosi na masu dobivenu u svakom procesu zavarivanja. Za ova posljednja dva elementa faktora uticaja na životnu sredinu, gubitak i masu zavarā, nije predložena jednadžba, već samo procijenjene vrijednosti za svaki odabrani slučaj.

$$Ekološki\ uticaj = 1 - \frac{Emisija\ zavarivanja + \frac{Otpad}{Masa\ zavora}}{2} \quad (3)$$

Gdje je:

$$Emisije\ zavora = \frac{Odnos\ metalnih\ \check{c}estica + \frac{Ugljeni\check{c}ni\ otisak}{Limit\ ugljeni\check{c}ni\ otisak} + \frac{Upotreba\ pomo\check{c}nog\ materijala}{Limit\ pomo\check{c}nog\ materijala}}{3} \quad (4)$$

Ugljeni\check{c}ni otisak predstavlja ukupnu koli\check{c}inu emitovanih gasova staklene bašte (eng. greenhouse gases - GHG) proizvedenih direktno ili indirektno.

2.3.3. Ekonomski uticaj

Ovaj pojam sadrži različite faktore kao što su troškovi rada, potrošnog materijala i energije koji se koriste tokom zavarivanja, troškovi opreme i troškovi zavarenog dijela, pri \check{c}emu je posljednji pojedina\check{c}ni nezavareni dio. Izraz za izra\check{c}unavanje ekonomskog uticaja nalazi se u jedna\check{c}ini koja je prikazana u nastavku.

$$EU = 1 - \frac{T_{zav} * C_{radne\ snage} + C_{potrošnog\ materijala} + br.kW * C_{energije}}{C_{zavarenog\ dijela}} \quad (5)$$

Gdje je :

EU – ekonomski uticaj

T_{zav} – vrijeme zavarivanja

C_{radne snage} – cijena radne snage

C_{potrošnog materijala} – cijena potrošnog materijala

C_{energije} – cijena enerije

C_{zavarenog dijela} – cijena zavarenog dijela

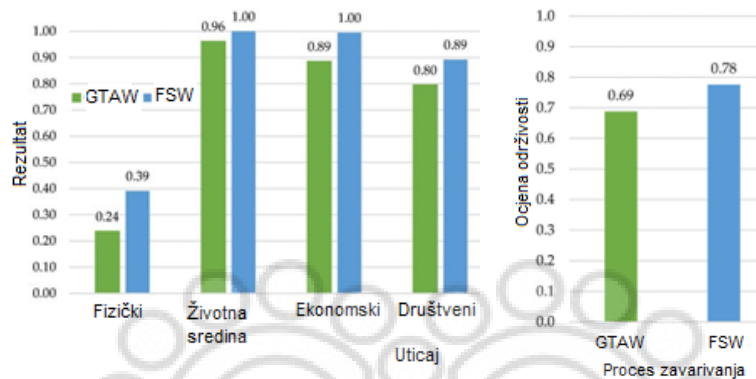
2.3.4. Društveni uticaj

Stopa nezgoda opisuje broj pojava u određenom razdoblju (vidi jednadžbu (6)), a ovaj faktor je povezan sa zdravljem i sigurnošću zaposlenika u obavljanju radnih aktivnosti. Društveni učinak izra\check{c}unava se jednadžbom (7). Važno je pojasniti da je jednadžba (7) modificirana u odnosu na izvorni izvor, jer je imala samo drugi \check{c}lan.

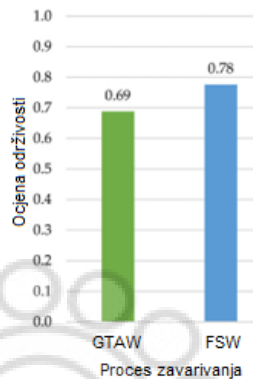
Rezultati ocjena održivosti izra\check{c}unati uz prethodna razmatranja sažeti su u tabeli 2, [10]. Slika 3 prikazuje uporedbu rezultata svakog pojma za oba procesa zavarivanja, dok slika 4 prikazuje ukupnu ocjenu održivosti.

$$Stopa\ nezgode = \frac{Nezgoda * br.radnih\ sati\ u\ godini}{Stvarni\ broj\ radnih\ sati} \quad (6)$$

$$Društveni\ uticaj = 1 - prose\check{c}an \left(\frac{Stopa\ nezgode}{Maksimalna\ stopa\ nezgode} \right) \quad (7)$$



Slika 3. Usporedba rezultata održivosti za FSW i GTAW.[10]



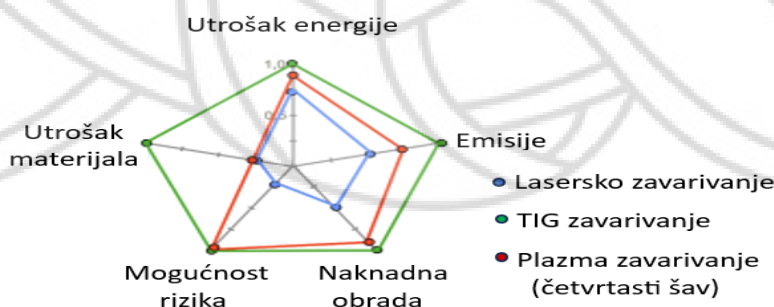
Slika 4. Ukupna ocjena. [10]

Tabela 2. Ocjena održivosti za GTAW i FSW. [10].

Aspekt	GTAW	FSW
Fizička izvedba	0.24	0.39
Ekološki utjecaj	0.96	1.00
Ekonomski utjecaj	0.89	1.00
Socijalni utjecaj	0.80	0.89
Ocjena održivosti	0.69	0.78

2.3.5. Uticaj na životnu sredinu procesa zavarivanja

Da bi se imalo jasniju sliku o prednostima različitih tehnologija zavarivanja u pogledu uticaja na životnu sredinu, u odnosu na njegove glavne konvencionalne konkurente, dat je grafički prikaz na slici 5 što ISO-14040 (LCA) obuhvata. Ovo je grafikon sa 5 tačaka u kojem svaka tačka predstavlja jedan od glavnih aspekata koji moraju biti proučeni u LCA: potrošnja energije, emisije, postprocesiranje, rizik potencijala i, na kraju, potrošnja materijala. Na slici 5 je data analiza različitih tehnologija zavarivanja, LBW, GTAW (TIG) i PW (plazma zavarivanje). Pregledom grafikona (slika 5) lako je uočiti prednosti izbora LBW u odnosu na najčešće korišćeni konvencionalni metod (tj. GTAW), jer LBW bolje performira u svakoj od analiziranih kategorija.



Slika 5: Uporedna analiza ekološkog otiska različitih tehnika zavarivanja za legure čelika [10].

2.3.6. Procjena uticaja na životnu sredinu i održivosti procesa zavarivanja

Ulazni i očekivani izlaz procesa variraju, ali u većini slučajeva ulaz se sastoji od materijala, električne energije, zaštitnog plina i elektroda, a izlaz se sastoji od zavara, dima i plinova. MAW se široko koristi i koristi obložene elektrode, ali ima nisku produktivnost i ograničenja u brzini zavarivanja i gubitku vremena zbog izmjena elektroda i uklanjanja troske. Jedna od ključnih strategija za poboljšanje ekološke efikasnosti procesa MMAW je smanjenje potrošnje energije u procesu, što će rezultirati sa nekoliko ekoloških i ekonomskih koristi za ukupnu izvedbu. Implementacija i prijelaz na robotsko zavarivanje daje prednosti u smislu poboljšanja društvenih, ekoloških i ekonomskih efekata. LAHW (lasersko lučno hibridno zavarivanje) nova je tehnologija koja obećava za održivu proizvodnju. Predvodnik je u uštedi resursa, nižem izobličenju i manje prerade zbog većih brzina zavarivanja i produktivnosti, manjeg broja prolaza i niže zapremine rastopljenog materijala. Istraživanje usporedbe između MMAW, GMAW i LAHW proveli su autori u radovima [10], a rezultati pokazuju da MMAW doprinosi višim nivima uticaja na životnu sredinu od GMAW ili LAHW.

Tabela 3. Uticaj GTAW, GMAW, FSW na životnu sredinu [10]

Uticaj na životnu sredinu							
Indikatori	Emisije zavarivanja (g/m ³)	Emisija CO ₂ (kg)	Ograničenje emisije CO ₂ (g)	Upotrijebljeni pomoćni materijal (g)	Pomoćni materijal max (g)	Materijalni gubitak (g)	Masa zavara (g)
GTAW	0	0.344	0.0868	0.01	0.012	0	4
	Kategorija ukupno = 0 (stvarni rezultat je bio negativan)						
GMAW	0.00817	0.0488	0.0446	0.0051	0.009	0	4.5
	Kategorija ukupno = 0,577						
FSW	0	0.0280	0.181	0	0	0	5.4
	Kategorija ukupno = 0,9612						

Rezultati o uticaju na životnu sredinu sažeti su u tabeli 3. Prema rezultatima, FSW daje vrlo dobre rezultate bez značajnog uticaja na životnu sredinu. Ovaj proces radi na niskim temperaturama, bez zaštitnog plina i bez emisija.

Također treba napomenuti da je GTAW podbacio rezultate u ovom istraživanju u usporedbi s GMAW; proces ne stvara otpad, ali je velika potrošnja energije u procesu značajno povećala ugljični otisak.

Obično se standardi izloženosti primjenjuju na dugotrajnu izloženost supstanci u trajanju od osam sati dnevno za normalnu radnu sedmicu, tokom cijelog radnog vijeka. Granica izloženosti svakog pojedinačnog sastojka komponenti za zavarivanje za svaki metal ili gas unutar zavarivanja ima svoj standard izloženosti.

3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Zaštitni plinovi koji se koriste u zavarivačkim procesima, poput CO₂, argona, helijuma i drugih plinova, imaju značajan uticaj na životnu sredinu. Da bi se sagledao njihov efekat na ekološke parametre i radnu sredinu, obično se koriste četiri ključna parametra:

1. *Potencijal globalnog zagrevanja* – GWP (Global Warming Potential). GWP je mjera koju koristi Međunarodni panel za klimatske promjene (IPCC) kako bi se procijenio uticaj određenih gasova na globalno zagrevanje u odnosu na ugljen-dioksid (CO₂). GWP prikazuje sposobnost plina da doprinosi efektu staklene bašte u atmosferi.

2. *Potencijal eutrofikacije* – EP (Eutrophication Potential). Eutrofikacija (grč. Εύ – dobro i τροφή – hrana) je proces prekomjernog unosa hranjivih materija, prije svega dušika (N) i fosfora (P). Kao posljedica povećanog unosa hranjivih materija dolazi do naglog razmnožavanja i uvećanja biomase fitoplanktona i tzv. pojave „cvjetanja vode“. EP se koristi za merenje uticaja emisije plinova koji mogu izazvati prekomeran rast biljaka i algi u vodama usled povećanja koncentracije hranjivih materija, posebno azota i fosfora. Ovaj proces može smanjiti kvalitet vode i ugroziti vodene ekosisteme.

3. *Potencijal zakiseljavanja* – AP (Acidification Potential). AP se koristi za procenu sposobnosti emisije kiselih gasova da smanje pH vrednost u vodi ili tlu, što može negativno uticati na biodiverzitet i kvalitet vode i tla.

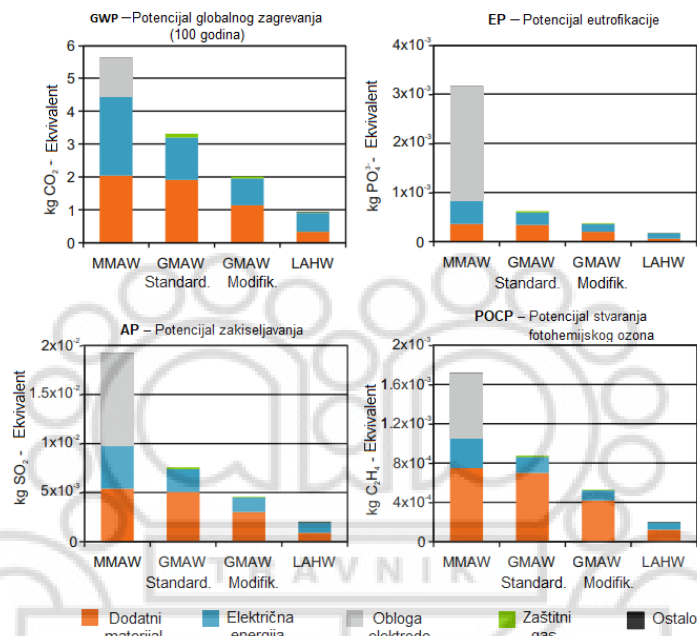
4. *Potencijal stvaranja fotohemijskog ozona* – POCP (Photochemical Ozone Creation Potential). POCP se koristi za merenje sposobnosti emisije plinova, kao što su NO_x, da stvore ozon u atmosferi, što može izazvati smog i imati štetne efekte na ljudsko zdravlje i ekosisteme. Ovi parametri omogućavaju kvantifikaciju uticaja emisije plinova na globalno zagrevanje, zakiseljavanje, eutrofikaciju i zagađenje vazduha. Među procesima koji su istraženi u spajanju 20 mm debele ploče od konstrukcijskog čelika, LAHW je najbolja opcija kada se uzme u obzir uzrokovani uticaj na životnu sredinu.

Tabela 4. Popis životnog ciklusa procesa zavarivanja. [5]

	MMAW	GMAW standardno	GMAW modifikovano	LAHW
Dodatni aterijal, <i>gr</i>	944	890	530	155
Zaštitni plin, <i>l</i>	–	241	100	33
Obloga elektrode, <i>gr</i>	580	–	–	–
Komprimirani zrak za lasersku optiku unakrsni mlaz, <i>l</i>	–	–	–	249
Električna energija, <i>kWh</i>	3.9	2.1	1.3	0.9
Dimovi zavarivanja, <i>gr</i>	11.6	3.6	1.2	0.6
Šljaka, <i>gr</i>	600	–	–	–
Drške elektroda, <i>gr</i>	150	–	–	–

LCA studija naglašava uticaje na životnu sredinu koje doprinose različiti ulazi i izlazi odabranih procesa zavarivanja i upoređuje razlike uticaja na životnu sredinu.

Podaci životnog ciklusa su prikazani u tabeli 4 na osnovu funkcionalne jedinice. Provođenjem procjene uticaja u okviru CML metode i softvera GaBi 6.0, procijenjeni su uticaji na životnu sredinu GWP, EP, AP i POCP koji doprinose odabrani procesi zavarivanja, kao što je prikazano na slici 6. *Najvažniji pokazatelji koje treba uzeti u obzir pri ocjeni procesa zavarivanja*, su potencijal globalnog zatopljenja, acidifikacija, fotohemijski potencijal stvaranja ozona i eutrofikacija.



Slika 6. Rezultati procjene uticaja, [5].

Potrošnja dodatnog materijala dominira u oko 54–80 % slučajeva uticaja na GMAW u odabranim kategorijama. Prednost smanjenja uglova šava može se direktno navesti poređenjem GMAW-a sa standardnim lukom sa rasprskavanjem i modifikovanim lukom. Ovo dovodi do približno 40% smanjenja nivoa uticaja na životnu sredinu. Stoga, kako bi se poboljšao GMAW iz perspektive životne sredine, spojevi bi uvijek trebali biti projektovani sa minimalnim mogućim uglom šava. Da bi se predstavio relativni potencijalni rizik za ljudsko zdravlje zavarivača izazvan dimovima, u radu su identifikovani potencijalni rizici (Gefährdungszahl, GZ) za procese zavarivanja. Za procenu pojednostavljenog potencijalnog rizika (GZs), koristi se sledeća jednačina 1:

$$GZ_s = (E_p + W_p) \times L \times R \times K_b \quad (1)$$

E_p = emisija specifične supstance po funkcionalnoj jedinici;

W_p = potencijalni efekat za specifične supstance u dimu;

L = faktor ventilacije (da li postoji dovoljna ventilacija ili ne);

R = prostorni faktor (na otvorenom ili u prostorijama);

K_b = faktor relativne udaljenosti glave/tela i izvora dima.

U slučaju studije, potencijalni rizik izazvan po funkcionalnoj jedinici E_p je ocenjen sa jedan; W_p se pretpostavlja da ima istu vrednost jedan (1). Faktori, L i R su postavljeni na jedan (1).

Udaljenost između zavarivača i izvora dima u različitim procesima zavarivanja se značajno razlikuje, K_b nivoi su postavljeni u skladu s tim. U MMAW i ručnom GMAW, zavarivači su blizu izvora dima, pa su nivoi postavljeni na 4; u automatskom GMAW, K_b nivo se pretpostavlja kao 2 jer obično postoji udaljenost između zavarivača i izvora dima; u LAHW, proces zavarivanja se sprovodi u zavarivačkim ćelijama, pa je K_b nivo definisan kao jedan (1). Kao što je prikazano u tabeli 5, MMAW ima najviši GZ_s za zavarivače među svim odabranim procesima. Rezultati pokazuju da zavarivači koji rade u ručnim procesima zavarivanja se suočavaju sa znatno višim rizicima nego u automatizovanim procesima.

Tabela 5. Procjena relativnih efekata procesa zavarivanja na zdravlje [5].

Proces zavarivanja	E_p (emisija specifične supstance)	K_b (faktor udaljenosti)	GZ_s (potencijalni zdravstveni rizik)
MMAW	17	4	68
Ručni GMAW	8	4	32
Automatski GMAW	6	2	12
LAHW	1	1	1

Rezultati pokazuju da MMAW izaziva najveći uticaj na životnu sredinu. u odabranim kategorijama uticaja među odabranim procesima, a LAHW varijanta daje najniži. Za GMAW i LAHW, električna energija i materijal za punjenje su dominantni faktori uticaja. Za MMAW, obloga elektrode je od velike važnosti, zajedno sa materijalom za punjenje i električnom energijom. LAHW izvodi zavarivanje s najmanjim brojem prolaza i ukupnim zapreminom zavara. Glavni razlog manjeg uticaja na životnu sredinu kod LAHW leži u boljem odnosu između utrošene snage i vremena zavarivanja, što znači da je niska efikasnost prekomerno kompenzovana uštedom vremena zavarivanja. MMAW zavarivanje dovodi do najvećih efekata na životnu sredinu. *Obloga elektrode* ima značajan udio u uticaju na životnu sredinu, iako se samo 55% sastava elektrode uzima u obzir u LCA modelu. Kako bi se ublažio uticaj na životnu sredinu, industrija bi se stoga trebala fokusirati prvo na rutilne prevlake elektroda, a zatim i na dizajn šavova.

ZAKLJUČCI

U radu su razmatrana pitanja dimova pri zavarivanju kako bi se uporedili relativni efekti zdravlja i sigurnosti zavarivača u različitim procesima zavarivanja. Uticaj na životnu sredinu je strogo zavistan od selekcije procesa zavarivanja i njegovih parametara. Ručni procesi karakterišu se najvećim uticajem na sve kategorije uzete u obzir tokom LCA analize, zbog nedostatka preciznosti i nižih brzina procesa, što dovodi do veće potrošnje energije i dodatnog materijala. Zaključeno je da je ukupni ekološki otisak procesa TIG zavarivanja oko 1,3 puta veći nego kod MIG procesa zavarivanja. Upotrebom automatizacije u TIG zavarivanju može se povećati brzina procesa zavarivanja, a to će naknadno smanjiti potrošnju električne energije i zaštitnog plina što će rezultirati smanjenjem štetnih faktora okoline.

LITERATURA

- [1] International Agency for Research on Cancer (IARC). welding fumes and gases. IARC Monographs 49; 1987.
- [2] Golbabaei F, Seyedsomea M, Ghahri A, Shirkhanloo H, Khadem M, Hassani H, Sadeghi N, Dinari B. Assessment of Welders Exposure to Carcinogen Metals from Manual Metal Arc Welding in Gas Transmission Pipelines, Iran. Iranian J Publ Health. 2012; 41 (8): 61-70.
- [3] National Occupational Health and Safety Commission. Welding: Fumes and Gases. In: Commonwealth of Australia, editor: Ambassador Press Pty Ltd; 1990.
- [4] Gunther Sproesser, Ya-Ju Chang, Andreas Pittner, Matthias Finkbeiner, and Michael Rethmeier. Energy efficiency and environmental impacts of high power gas metal arc welding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 91(9-12):3503–3513, 2017.
- [5] Gunther Sproesser, Ya-Ju Chang, et.al.: Sustainable technologies for thick metal plate welding. In Sustainable Manufacturing, pages 71–84. Springer, Cham, 2017
- [6] Ya-Ju Chang, Gunther Sproesser, et al.: Environmental and Social Life Cycle Assessment of welding technologies, 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Procedia CIRP 26 (2015) 293 – 298
- [7] H N, JY S and M B 2012 Environmental Impacts of Using Welding Gas J. Technol. Manag. Appl. Eng. 28 1–11
- [8] Sterjovski Z, Norrish J, Sloan G, Nolan D J, Sterjovski Z, Norrish J, Holdstock R, Sloan G and Nolan D 2005 Evaluation of calculated arc energy heat input in MMAW processes Evaluation of calculated arc energy heat input in MMAW processes Australas. Weld. J. - Weld. Res. Suppl. 50 42–8
- [9] Elie Abi Fadel, Valentina Bedendo et al.: Environmental impact of laser welding compared to conventional welding methods, Politecnico di Milano School of Industrial and Information Engineering, 2020-2021 Academic Year.
- [10] Elisaveta Donchevaa, Jelena Djokikj, et al.: Sustainability assessment of welding processes: a review, IIW 2022 International Conference on Welding and Joining