

# Specifičnosti plazma zavarivanja

---

Ćorluka, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2012

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:559178>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Marin Čorluka**

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Slobodan Kralj

Student:

Marin Čorluka

Zagreb, 2012.





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

Zahvaljujem se svojim roditeljima i djevojci na podršci, dipl. ing. M. Bušiću na pomoći i prof. dr. sc. S. Kralju na mentorstvu i pruženoj prilici.

Marin Ćorluka

## SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	III
POPIS SLIKA.....	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS KRATICA I OZNAKA.....	VII
SAŽETAK.....	1
<b>1. UVOD.....</b>	<b>2</b>
<b>2. PODJELA POSTUPAKA ZAVARIVANJA.....</b>	<b>3</b>
<b>3. PLAZMA KAO ČETVRTO AGREGATNO STANNJE.....</b>	<b>7</b>
<b>4. PLAZMA ZAVARIVANJE – PAW.....</b>	<b>10</b>
4.1 Što je to plazma zavarivanje?.....	10
4.2 Kako funkcionira plazma zavarivanje.....	12
4.3 Oprema za plazma zavarivanje.....	15
4.4 Područja rada plazma zavarivanja.....	19
4.5 Parametri zavarivanja.....	22
4.6 Prednosti i nedostaci.....	24
4.7.1 Razlika unosa energije i isplativosti između TIG i PAW postupka.....	25
4.7 Zavarljivost.....	28
4.8 Priprema spojeva i položaji kod zavarivanja.....	29
4.9 Primjena i priprema proizvodnje.....	31
<b>5. PRAKTIČNI EKSPERIMENTALNI RAD.....</b>	<b>32</b>
5.1 Priprema uzoraka za ispitivanje, spoja i opreme.....	32
5.2 Plan pokusa, određivanje parametara i provođenje eksperimenta.....	32
5.2.1 Ispitivanje utjecaja <u>promjenjivih</u> parametara na penetraciju, širinu i nadvišenje korijena navara ploče „a“.....	36
5.2.2 Ispitivanje utjecaja <u>promjenjivih</u> parametara na penetraciju, širinu i nadvišenje korijena navara lima „b“.....	38
5.2.3 Ispitivanje utjecaja <u>promjenjivih</u> parametara na penetraciju, širinu i nadvišenje korijena navara ploče „c“.....	41
5.2.4 Ispitivanje utjecaja <u>promjenjivih</u> parametara na protaljivanje, širinu i nadvišenje korijena zavara ploča „s1“, „s2“ i „s3“.....	43
5.3 Tabela prikaz rezultata.....	50
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>50</b>
<b>7. LITERATURA.....</b>	<b>52</b>

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Ilustracija promjene agregatnih stanja /4/	7
Slika 2. Ilustracija agregatnih stanja i njihovih promjena u odnosu na temperaturu /4/	8
Slika 3. Ilustrirani prikaz odnosa porasta temperature i povećanja zapremljene energije po volumenu nekih plinova /6/	9
Slika 4. Ilustrirani prikaz opreme plazma zavarivanja /7/	10
Slika 5. Penetracija i oblik zavara kod TIG-a i plazme	11
Slika 6. Ilustracija presjeka plazmene sapnice /9/	12
Slika 7. Usporedba TIG luka sa prenesenim i ne prenesenim plazmenim lukom /11/	13
Slika 8. Prikaz upravljačkog „pilot“ luka na stroju PMI 160B, FSB	14
Slika 9. Prikaz poprečnog presjeka pištolja za plazma zavarivanje /11/	15
Slika 10. Odnos depozita po satu i jakosti struje kod TIG-a i PAW-a /11/	18
Slika 11. Shematski prikaz plazma zavarivanja ključanicom /12/	20
Slika 12. Odnos brzine zavarivanja i debljine stijenke materijala kod TIG i PAW postupka /8/	26
Slika 13. Prikaz odnosa troškova zavarivanja materijala 304L, debljine stijenke 4 mm TIG i PAW postupkom u uvjetima visoke produktivnosti /8/	27
Slika 14. Prikaz odnosa troškova zavarivanja materijala 304L, debljine stijenke 6 mm TIG i PAW postupkom u uvjetima visoke produktivnosti /8/	27
Slika 15. Prikaz zavarivačkog stroja PMI 160B	33
Slika 16. Priprema vodilice i namještanje pištolja	33
Slika 17. Prikaz stezanja ispitnog uzorka	33
Slika 18. Rezanje ispitnih uzoraka na Vanad-u 2000	34
Slika 19. Prikaz ploče "A" sa svih osam prolaza	36
Slika 20. Uvećani prikaz navara na ploči "A"	37
Slika 21. Prikaz lima "B" sa sva tri prolaza	39
Slika 22. Uvećani prikaz presjeka, prolaz 1, lim "B"	40
Slika 23. Uvećani prikaz presjeka, prolaz 2, lim "B"	40

---

Slika 24. Uvećani prikaz presjeka, prolaz 3, lim "B"	41
Slika 25. Prikaz ploče "C" sa sva tri prolaza	42
Slika 26. Uvećani prikaz presjeka, prolaz 1, lim "C"	42
Slika 27. Uvećani prikaz presjeka, prolaz 2, lim "C"	43
Slika 28. Uvećani prikaz presjeka, prolaz 3, lim "C"	43
Slika 29. Prikaz lica zavara, „S1A“	44
Slika 30. Prikaz naličja spoja, „S1B“	44
Slika 31. Uvećani prikaz presjeka "S1"	45
Slika 32. Prikaz lica zavarenog spoja, „S2A“	45
Slika 33. Prikaz naličja spoja, „S2B“	45
Slika 34. Uvećani prikaz presjeka spoja "S2"	46
Slika 35. Prikaz lica zavarenog spoja, „S3A“	46
Slika 36. Prikaz naličja spoja, „S3A“	46
Slika 37. Uvećani prikaz presjeka spoja "S3"	47
Slika 38. Dijagramski prikaz odnosa geometrije navara i jakosti struje na limu B	47
Slika 39. Dijagramski prikaz odnosa geometrije navara i brzine zavarivanja na limu C	48
Slika 40. Dijagramski prikaz odnosa geometrije navara i protoka plazmenog plina na limu C	49
Slika 41. Dijagramski prikaz odnosa geometrije zavara i jakosti struje između spoja S1 i S2	49
Slika 42. Dijagramski prikaz odnosa geometrije zavara i protoka plazme između spoja S1 i S2	49

**POPIS TABELA**

Tabela 1. Podjela postupaka zavarivanja /4/	3
Tabela 2. Prikaz područja rada pojedine metode plazma zavarivanja /10/	21
Tabela 3. Prednosti i nedostaci plazma elektrolučnog zavarivanja /16/	24
Tabela 4. Zavarljivost osnovnog materijala postupkom plazma zavarivanja /17/	28
Tabela 5. Tipične pripreme spoja kod plazma zavarivanja /10/	29
Tabela 6. Mogućnosti zavarivanja u pojedinim položajima /17/	30
Tabela 7. Prikaz utjecaja parametara na geometriju zavara, ploča "A"	36
Tabela 8. Prikaz utjecaja parametara na geometriju zavara, ploča "B"	38
Tabela 9. Prikaz utjecaja parametara na geometriju zavara, ploča "C"	41
Tabela 10. Prikaz utjecaja parametara na geometriju zavarenog spoja, spojevi "S1", "S2", "S3"	44

## POPIS KRATICA I OZNAKA

### *Kratice*

TIG – (eng. Tungsten inert gas) zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštiti inertnog plina

PAW – (eng. Plasma arc welding) plazma zavarivanje

E-M. – elektromagnetsko (zračenje)

VF – visoka frekvencija

ZUT – zona utjecaja topline

Cr-Ni – krom-nikal

### *Oznake*

<b>Opis</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Oznaka</b>
Termodinamička temperatura	Kelvin	K
Duljina	milimetar	mm
Masa	kilogram	kg
Vrijeme	sekunda	s
Jakost električne struje	Amper	A
Napon	Volt	V
Širina zavara	milimetar	b
Dubina penetracije	milimetar	t
Energija, rad, količina topline	Joule	J

## **SAŽETAK**

Završni se rad sastoji od teorijskog dijela u kojemu se obrađuje tema specifičnosti postupka plazma zavarivanja, te od eksperimentalnog dijela u kojemu se kroz niz laboratorijskih ispitivanja utvrđuje utjecaj promjene određenih parametara prilikom zavarivanja na geometriju zavara.

U teorijskom se dijelu detaljno navode i opisuju: osnove plazma postupka zavarivanja, inačice plazma zavarivanja obzirom na vrstu plazmenog luka, oprema za zavarivanje plazmom, podjela plazma zavarivanja ovisno o jakosti struje zavarivanja, zatim radni parametri, prednosti i nedostaci, usporedba plazma i TIG zavarivanja, priprema spojeva i zavarljivost, te područja primjene.

U eksperimentalnom dijelu ispituje se utjecaj pojedinih parametara (jakosti struje, protoka plazmenog plina, brzine zavarivanja) na geometriju spoja čelika S 235 debljine 3,0mm bez dodavanja dodatnog materijala.

Sva laboratorijska ispitivanja obavljena su na Katedri za zavarene konstrukcije na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

## 1. UVOD

Pravi razvoj tehnologije, onaj vezan uz metale, započeo je kada su ljudi naučili upotrebljavati i obrađivati metalne rude. Nakon izvjesnog vremena postalo je jasno da se određeni metali mogu i prerađivati, pa su tako ljudi u brončanom i željeznom dobu zagrijavanjem talili rudu i potom je izlivali u pješčani kalup kako bi dobili željeni oblik. Da bi dobili složenije predmete, sastavljali su više takvih odljevaka i ulijevali rastaljeni metal kako bi ih spojili.

Iako zadnja rečenica ne opisuje zavarivanje u njegovom modernom poimanju, tako je ipak sve počelo. U modernijoj povijesti razvijaju se razni postupci zavarivanja i zavarivanje postaje jednim od glavnih nositelja druge industrijske revolucije kao i čovjekova ubrzanog napretka.

Danas se u industrijskom sektoru koristi oko stotinjak zavarivačkih postupaka, a jedna od važnijih i vodećih je ona u kojoj se metali zavaruju plazmom. Plazma postupak zavarivanja razvio je 1957. Robert M. Gage iz TIG-a /1/. Modificirao je sapnicu i postupku, uz zaštitni, dodao plazmeni plin. Nedugo nakon toga plazma postaje komercijalno dostupna i uskoro dobiva jak industrijski zamah. Zbog svojih prednosti popunjava prazninu koju tadašnji postupci nisu mogli upotpuniti, te ubrzo postaje jasno da je plazma postupak zavarivanja (i rezanja) idealan za precizno zavarivanje (i rezanje) metala relativno širokog dimenzijskog raspona.



## 2. PODJELA POSTUPAKA ZAVARIVANJA

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više, istovrsnih ili raznovrsnih materijala, taljenjem i/ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogen zavareni spoj. Ono je interdisciplinarna tehnologija za razumijevanje koje su nužna znanja iz više područja:

- Znanosti o materijalima i metalurgiji (metalurgija zavarivanja),
- Termodinamike (temperaturna polja pri zavarivanju),
- Elektrotehnike (izvori struje, električni luk, spajanje različitih senzora),
- Kemije (utjecaj korozije i plinova na zavarivanje),
- Informatike (ekspertni sustavi, različiti proračuni, baze podataka, ...) i dr.

U tabeli 1. prema engleskom ekvivalentu [HRN EN ISO 4063:2010](#) dana je nomenklatura i referentni brojevi pojedinih postupaka zavarivanja.

**Tabela 1. Nomenklatura postupaka i referentni brojevi zavarivanja prema ISO – EN 4063; 2009**

Oznaka postupka	Naziv postupka
1	Arc welding
11	Metal arc welding without gasprotection
111	Manual metal arc welding (metal arc welding with covered electrode). Shielded metal arc welding, USA
112	Gravity (arc) welding with covered electrode. Gravity feed welding, USA
114	Self-shielded tubular cored arc welding
12	Submerged arc welding
121	Submerged arc welding with solid wire electrode
122	Submerged arc welding with strip electrode
124	Submerged arc welding with metallic powder addition
125	Submerged arc welding with tubular cored electrode
126	Submerged arc welding with cored strip electrode

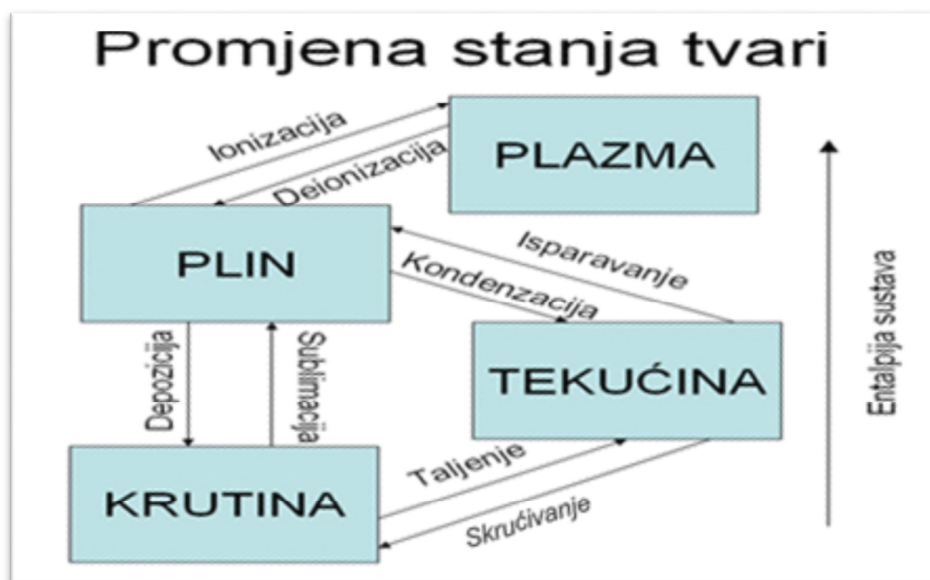
13	Gas-shielded metal arc welding. Gas metal arc welding, USA
131	MIG welding with solid wire electrode. Gas metal arc welding using inert gas and solid wire electrode, USA
132	MIG welding with flux cored electrode. Flux cored arc welding, USA
133	MIG welding with metal cored electrode. Gas metal arc welding using inert gas and metal cored wire, USA
135	MAG welding with solid wire electrode. Gas metal arc welding using active gas with solid wire electrode, USA
136	MAG welding with flux cored electrode. Gas metal arc welding using active gas and flux cored electrode, USA
138	MAG welding with metal cored electrode; gas metal arc welding using active gas and metal cored electrode
14	Gas-shielded arc welding with non-consumable tungsten electrode. Gas tungsten arc welding, USA
141	TIG welding with solid filler material (wire/rod). Gas tungsten arc welding using inert gas and solid filler material (wire/rod), USA
142	Autogenous TIG welding. Autogenous gas tungsten arcwelding using inert gas, USA
143	TIG welding with tubular cored filler material (wire/rod). Gas tungsten arc welding using inert gas and tubular cored filler material (wire/rod), USA
145	TIG welding using reducing gas and solid filler material (wire/rod) Gas tungsten arc welding using inert gas plus reducing gas additions and solid filler material (wire/rod), USA
146	TIG welding using reducing gas and tubular cored filler material (wire/rod). Gas tungsten arc welding using inert gas plus reducing gas additions and tubular cored filler material (wire/rod), USA
147	Gas-shielded arc welding with non-consumable tungsten electrode using active gas (TAG welding). Gas tungsten arc welding using active gas, USA
<b>15</b>	<b>Plasma arc welding</b>
151	Plasma MIG welding
152	Powder plasma arc welding
153	Plasma welding with transferred arc
154	Plasma arc welding with non-transferred arc
155	Plasma arc welding with semi-transferred arc
185	Magnetically impelled arc welding
<b>2</b>	<b>Resistance welding</b>
21	Resistance spot welding. Spot welding, USA
211	Indirect spot welding
212	Direct spot welding
22	Resistance seam welding. Seam welding, USA
221	Lap seam welding
222	Mash seam welding

223	Prep-lap seam welding
224	Wire seam welding
225	Foil butt-seam welding
226	Seam welding with strip
23	Projection welding
231	Indirect projection welding
232	Direct projection welding
24	Flash welding
241	Flash welding with preheating
242	Flash welding without preheating
25	Resistance butt welding. Upset welding, USA
26	Resistance stud welding
27	HF resistance welding (high-frequency resistance welding) High-frequency upset welding, USA
29	Other resistance welding processes
<b>3</b>	<b>Gas welding. Oxyfuel gas welding, USA</b>
31	Oxyfuel gas welding. Oxyfuel gas welding, USA
311	Oxyacetylene welding. Oxyacetylene welding, USA
312	Oxypropane welding
313	Oxyhydrogen welding. Oxyhydrogen welding, USA
<b>4</b>	<b>Welding with pressure</b>
41	Ultrasonic welding
42	Friction welding
421	Direct drive friction welding
422	Inertia friction welding
423	Friction stud welding
43	Friction stir welding
44	Welding by high mechanical energy
441	Explosion welding
442	Magnetic pulse welding
45	Diffusion welding

47	Oxyfuel gas pressure welding. Pressure gas welding, USA
48	Cold pressure welding. Cold welding, USA
49	Hot pressure welding
<b>5</b>	<b>Beam welding</b>
51	Electron beam welding
511	Electron beam welding in vacuum
512	Electron beam welding in atmosphere
513	Electron beam welding with addition of shielding gases
52	Laser welding. Laser beam welding, USA
521	Solid state laser welding
522	Gas laser welding
523	Diode laser welding. Semi-conductor laser welding, USA
<b>7</b>	<b>Other welding processes</b>
71	Aluminothermic welding. Thermite welding, USA
72	Electroslag welding
721	Electroslag welding with strip electrode
722	Electroslag welding with wire electrode
73	Electrogas welding
74	Induction welding
741	Induction butt welding. Induction upset welding, USA
742	Induction seam welding
743	Induction HF welding
75	Light radiation welding
753	Infrared welding
78	Arc stud welding
783	Drawn arc stud welding with ceramic ferrule or shielding gas. Arc stud welding, USA
784	Short-cycle drawn arc stud welding. Arc stud welding, USA
785	Capacitor discharge drawn arc stud welding. Arc stud welding, USA
786	Capacitor discharge stud welding with tip ignition. Arc stud welding, USA
787	Drawn arc stud welding with fusible collar

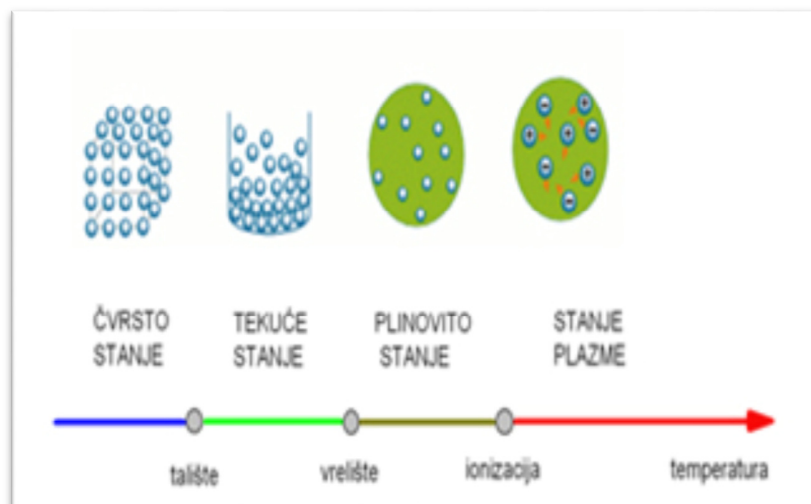
### 3. PLAZMA KAO ČETVRTO AGREGATNO STANJE

Prema /3/ više od 95% materije koju možemo opaziti u svemiru je u stanju plazme. Plazma je u fizici i kemiji naziv za *ionizirani plin* i uobičajeno je da se zbog različitih svojstava u odnosu na krutine, tekućine i plinove smatra posebnim agregatnim stanjem tvari. Slika 1. prikazuje sva četiri stanja sa njihovim transformacijama.



Slika 1. Ilustracija promjene agregatnih stanja /4/

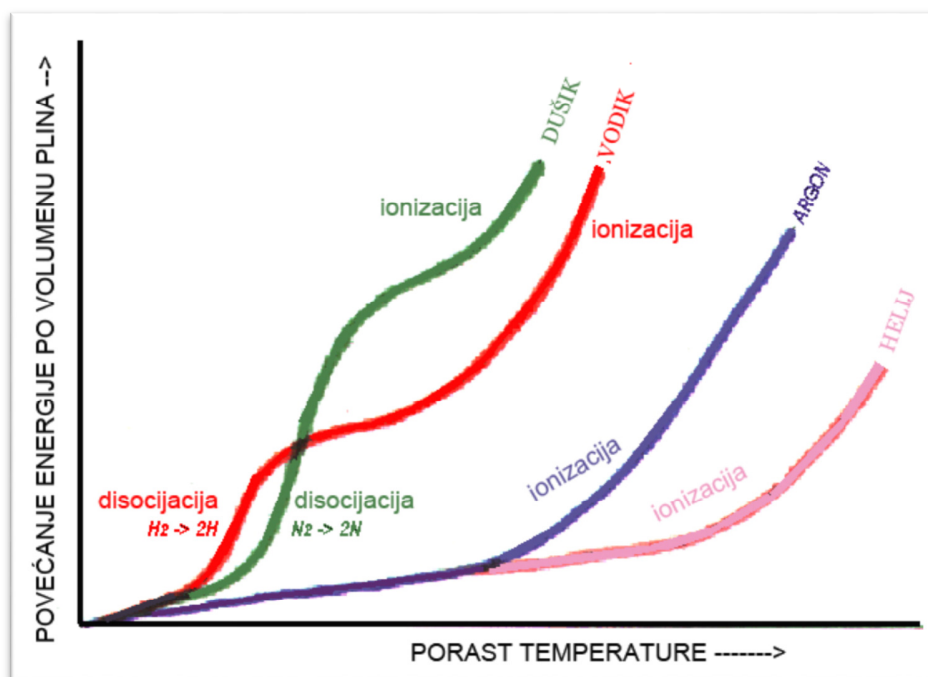
Gotovo svi plinovi koje je moguće zateći u prirodi sadrže određenu (relativno malu) količinu iona i elektrona, međutim plazmom se smatra tek onaj ionizirani plin čija se fizikalna svojstva razlikuju od svojstava plina u, između ostaloga, gustoći čestica, provodljivosti struje (potencijalu), brzini gibanja čestica itd. /3/. Plazma nastaje ionizacijom plinova na povišenim temperaturama. Atomi plinova zbog velike količine energije otpuštaju elektrone, čime se stvara mješavina pozitivnih iona i negativnih elektrona sa potpuno drugačijim fizikalnim svojstvima od plinova /5/.



**Slika 2. Ilustracija agregatnih stanja i njihovih promjena u odnosu na temperaturu /4/**

Temperaturno područje plazme na slici 2. namjerno je nacrtano produljeno jer ono u stvari obuhvaća veliki raspon temperatura – od sobne pa sve do  $10^{14}$  K, dok su čvrsta tijela ili tekućine ograničene na daleko manji raspon temperatura.

U zavarivačkoj se industriji za ionizaciju i prijenos energije sa elektrode na osnovni materijal najčešće koriste argon, helij dušik i vodik. Međutim, nemaju svi plinovi ista svojstva. Naime, plazmom je moguće osigurati prijenos iznimno visoke količine energije putem disocijacije i ionizacije. Disocijacijom se od molekularnih plinova dobivaju atomski plinovi, koji se se zatim ioniziraju. Tako je od elemenata koji su u prirodi u molekularnom stanju, od jedne molekule moguće dobiti dva iona i dva elektrona. Upravo zbog toga elementi u molekularnom stanju poput dušika i vodika na točno određenoj temperaturi mogu prenijeti veću količinu energije od argona ili helija (slika 3.) /6/.



Slika 3. Ilustrirani prikaz odnosa porasta temperature i povećanja zapremljene energije po volumenu nekih plinova /6/

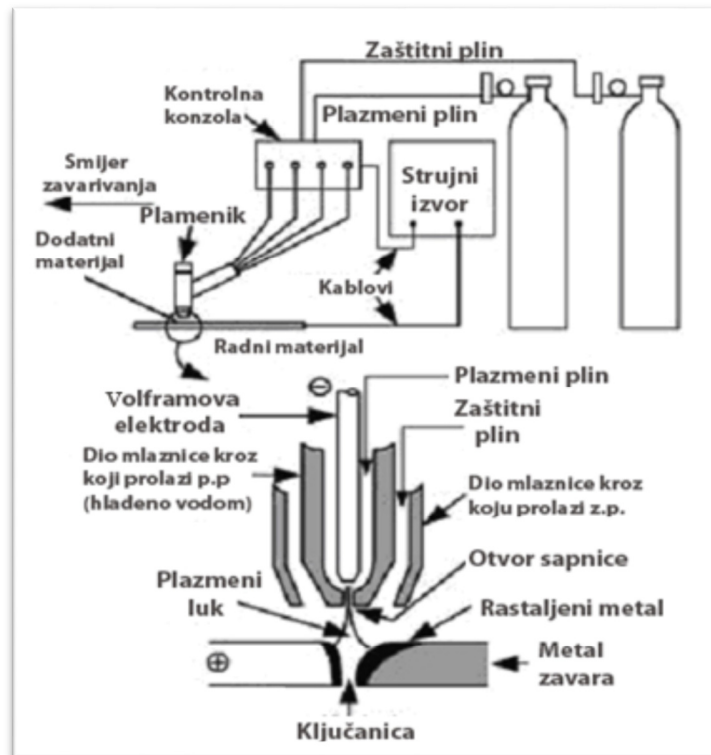
- Dušik – najjeftiniji plin; inertan prema većini materijala; koristi se sam ili u kombinaciji sa vodikom
- Argon – najčešće se koristi kao plazma plin; upotrebljava se u kombinaciji sa vodikom, dušikom ili helijem pretežito zbog povećanja energije; najlakše tvori plazmu i nije toliko agresivan prema sapnici i elektrodi u odnosu na spomenute plinove; plemeniti plin
- Vodik – najčešće se koristi kao sekundarni plin; izrazito utječe na povećanje prijenosa topline; upotrebljava se kao anti-oksidans;
- Helij – upotrebljava se u kombinaciji sa argonom; koristi se pretežito u slučajevima u kojima dušik i vodik imaju štetno djelovanje; plemeniti plin

Poznavajući pojam plazme kao stanja materije može se jasnije pojmiti utjecaj i način djelovanja plazmenog plina kao sastavnog dijela tehnologije plazma zavarivanja.

## 4. PLAZMA ZAVARIVANJE – PAW

### 4.1 Što je to plazma zavarivanje?

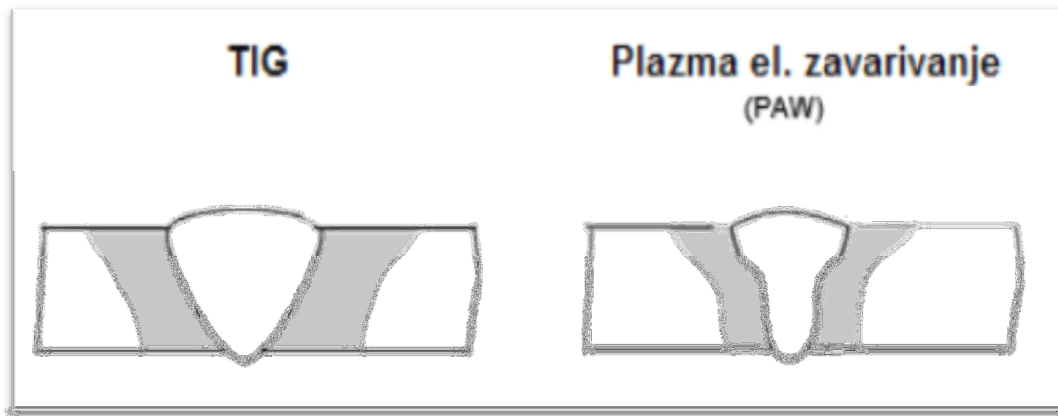
Plazma, punim nazivom plazma elektrolučno zavarivanje je postupak koji je tehnički sličan drugim postupcima elektrolučnog zavarivanja. Najrodniji je s TIG-om, iz kojeg je i potekao. Poveznica, ali i razlika između tih dvaju postupaka ima izrazito puno. Pa tako na primjer, oba postupka koriste niskolegiranu volframovu elektrodu spoenu na (većinom, ali ne nužno) negativni pol strujnog izvora. No, za razliku od TIG-a, elektroda je kod plazma zavarivanja zavučena u unutrašnjost sapnice. To za posljedicu ima sužen i koncentriran, ali prilično osjetljiv mlaz zbog čega minimalne varijacije u parametrima mogu dovesti do pogreške prilikom zavarivanja. Kako bi se pogreške izbjegle, opremi je dodan element pod nazivom *upravljačka jedinica* koji regulira napon, struju, brzinu zavarivanja itd. Ilustrirani prikaz osnovne opreme i načina rada zavarivanja plazmom dan je slikom 4. /7/.



Slika 4. Ilustrirani prikaz opreme plazma zavarivanja /7/



Kroz sapnicu osim zaštitnog, prolazi i *plazmeni plin*. On se sastoji od elektrona, iona i atoma nekog plazmenog plina. Pod visokom temperaturom te se čestice gibaju izrazito kaotično, a budući da imaju dobru električnu vodljivost, zajedno sa električnim lukom svoju energiju predaju sudarajući se sa radnim materijalom. Stoga je toplina (energija) koja napušta mlaznicu kod plazma zavarivanja puno *veća* u odnosu na TIG ili bilo koji drugi oblik zavarivanja, a temperature se kreću od 10 000 – 24 000 K, za razliku od 8 000 – 18 000 K kod, na primjer, TIG-a /8/. Ta usko koncentrirana toplina za posljedicu ima duboku penetraciju, malu zonu utjecaja topline i visoku brzinu zavarivanja.

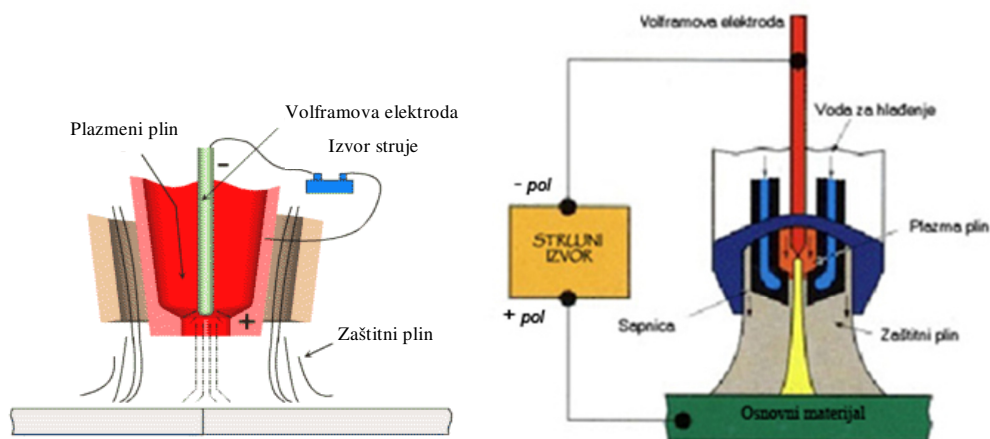


Slika 5. Penetracija i oblik zavara kod TIG-a i plazme

Iz prethodne slike vidljivo je da se plazmom sva energija koja izlazi iz mlaznice unosi na puno manju površinu nego kod TIG-a. Dakle, mlaz je jače fokusiran. Budući je temperatura plazme za 20% do 30% viša, dobiva se *veći* unos topline na *manjem* području! A samim time i nekoliko prednosti navedenih ranije – mnogo užu zonu utjecaja topline (u daljnjem tekstu ZUT), puno dublje prodiranje (penetraciju) i naravno veću brzinu zavarivanja. A time se pak, uz visoku razinu kontrole i preciznosti, te širok raspon podesivosti struje i napona, postižu idealni uvjeti za rad sa metalima gotovo svih vrsta.

## 4.2 Kako funkcionira plazma zavarivanje ?

Dakle, plazma zavarivanje samo po sebi vrlo je slično TIG-u. Osnovna je razlika u tome što je kod plazma zavarivanja volframova (netaljiva) elektroda uvučena u sapnicu (slika 6.) kako bi se suzio plazmeni luk i na taj način povećala brzina i temperatura plazmenog plina koji izlazi iz sapnice.

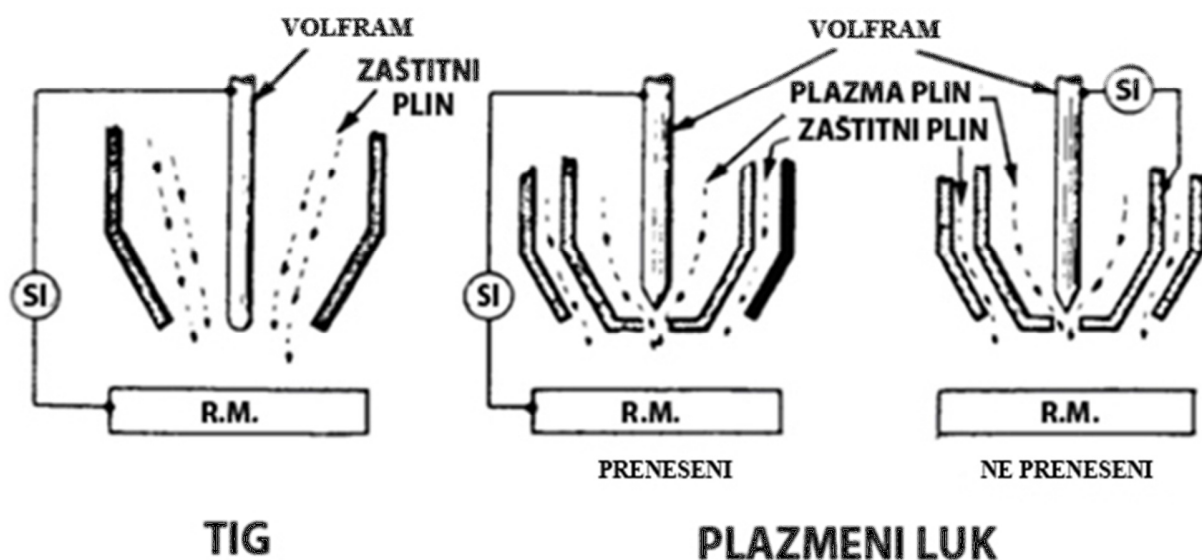


Slika 6. Ilustracija presjeka plazmene sapnice /9/

No, sam plazmeni plin nije dovoljno adekvatan za zaštitu rastaljenog metala zavora od utjecaja atmosfere pa kroz sapnicu prolazi *zaštitni plin*, ali i kanali sa *vodom za hlađenje* bez koje bi se mlaznica rastalila. Protok plazmenog plina je nešto manji od zaštitnog plina kako bi se minimizirale neželjene turbulencije /10/.

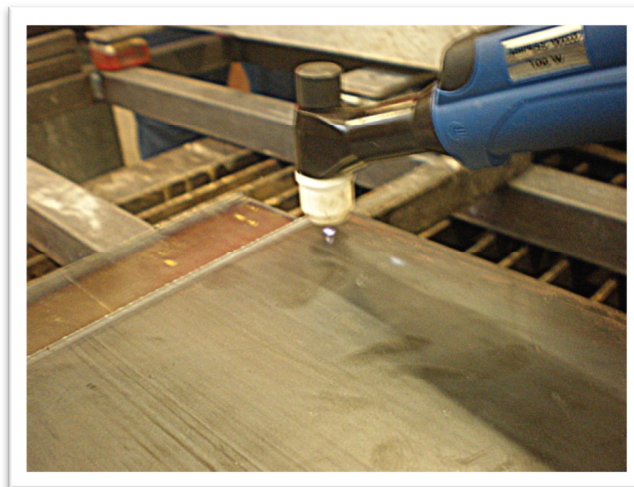
Za razliku od TIG-a kod kojega luk koji napušta mlaznicu ima čunjasti oblik (veći kut), kod plazma zavarivanja je taj oblik pravilniji, gušći i nalikuje stupu ili zraci (manji kut). Takva karakteristika luka dozvoljava veće varijacije u udaljenosti između pištolja i osnovnog materijala pa kod ručne upotrebe zavarivaču ostavlja više slobode za promatranje i kontroliranje zavora. Još jedna prednost uvučene elektrode je u tome što je zaštićena od kontaminacije i ima puno duži radni vijek od one kod TIG-a .

Da bi se plazmeni luk prenio na radni komad, prvo ga treba inicirati, a to se kod plazma zavarivanja postiže na dva načina. Inicira li se luk između osnovnog materijala i volframove elektrode nastaje tzv. **preneseni** luk, a ako se pak lukom poveže sužavajuću mlaznicu i elektrodu dobiva se **nepreneseni** luk. Prenesenim se ostvaruje duboki, a neprenesenim plitki provar u osnovnom materijalu i prvi se koristi u većini slučajeva, a drugim se mogu zavarivati materijali koji ne provode el. struju. Razlike, odnosno sličnosti između TIG-ova luka, te plazmenog prenesenog i neprenesenog, moguće je vidjeti na slici 7.



Slika 7. Usporedba TIG luka sa prenesenim i neprenesenim plazmenim lukom /11/

Jedna je od važnijih posebnosti koju posjeduje plazma zavarivanje **upravljajući**, odnosno tzv. **pilot luk** (slika 8). On se uspostavlja između bakrene sapnice i netaljive elektrode samo na početku rada plazmom uz pomoć visokofrekvencijskog uređaja i ostaje aktivan neograničeno dugo. VF strujom visokog napona se ionizira plazmeni plin, a zatim se kroz plazmu ioniziranog plina propušta struja zavarivanja pri čemu se dobiva toplina potrebna za zavarivanje /12/. Nakon uspostavljanja, *upravljajući* se luk prenosi na radni materijal. Prilikom zavarivanja luk se uredno i bez iskrenja prenosi na osnovni metal pa se zavari na sitnim i tankim predmetima izvode kvalitetno i bez oštećenja materijala. Jakost struje u upravljačkom luku je fiksna i najčešće iznosi negdje između 2 i 15 A /12/.



**Slika 8. Prikaz upravljačkog „pilot“ luka na stroju PMI 160B, FSB**

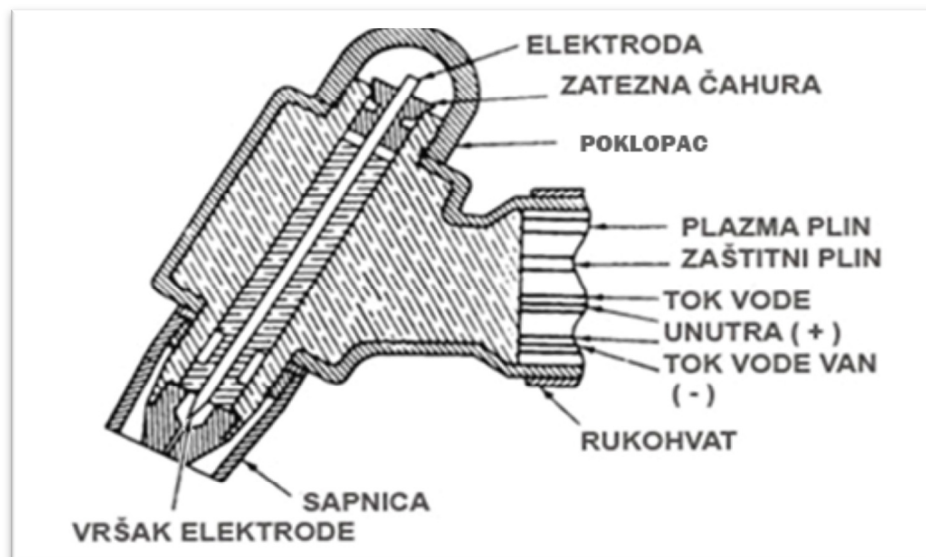
Nakon zavarivanja *upravljački luk* i dalje ostaje upaljen, bez potrebe za još jednim VF paljenjem, što je jako važna prednost jer je plazma zavarivanje u većini slučajeva automatizirano, a u automatiziranim okolinama visoke frekvencije potrebne za paljenje upravljačkog luka vrlo lako mogu omesti ili čak oštetiti okolne uređaje. Zanimljivo je da i sami plazma uređaji imaju oznaku da osobe sa ugrađenim pacemakerom svakako trebaju izbjegavati ovaj (ili bilo koji drugi) oblik VF izvora.

### 4.3 Oprema za plazma zavarivanje

#### (1) PIŠTOLJ

Pištolj za zavarivanje plazmom sličan je onom kod TIG-a, ali bitno složeniji (slika 9.). Naime, svi plazmeni pištolji, pa i oni koji rade na najnižoj struji, moraju imati ugrađen sustav za hlađenje vodom. Toplina koju luk generira unutar sapnice toliko je intenzivna da bi se sapnica, ukoliko se protok vode prekine samo nakratko, mogla potpuno rastaliti. Osim kanala za cirkulaciju rashladne tekućine, u kućištu pištolja se još nalazi kanal za dovod plazmenog, ali i zaštitnog plina. Sve to skupa, čini pištolj veoma robusnim, zahtjevnim za održavanje i često neadekvatnim za zavarivanje na uskim i skućenim prostorima.

Varijacije u veličini pištolja ovise pretežito o njegovoj namjeni. Razlikuju se oni za ručno i oni za automatizirano zavarivanje.



Slika 9. Prikaz poprečnog presjeka pištolja za plazma zavarivanje /11/

## (2) STRUJNI IZVOR/UPRAVLJAČKA JEDINICA

Slično TIG postupku, pištolji za zavarivanje i rezanje plazmom koriste se sa uobičajenim izvorima struje koji imaju strmopadajuće karakteristike (istosmjerna struja direktnog polariteta) uz jednostavno dodavanje upravljačke jedinice (konzole) kojom se regulira uspostavljanje luka, protok plinova, protok vode za hlađenje, itd. Napon praznog hoda je oko 80 V, a minimalna i maksimalna struja zavise od izabranog izvora, no najčešće se ne ide ispod 0.05 A, te ne preko 450 A /13/.

## (3) PLAZMENI PLIN

Služi za prijenos električne energije tijekom zavarivanja. Prolazi kroz pištolj, oko elektrode i kroz otvor na vrhu sapnice izlazi vani, te kao rezultat daje plazmeni luk malog promjera koji je otporan na magnetsko puhanje /12/. Kao plinovi koriste se argon i kombinacija argon/vodik, s time da je u komercijalnoj upotrebi puno više zastupljen sam argon. Kod većine proizvođača opreme za zavarivanje plazmom moguće je vidjeti zahtjev za argonom čistoće 4.5 i više /15/. U novije vrijeme, za rezanje se sve više koriste plazma uređaji koji kao plazmeni plin koriste zrak (što je najjeftinije), ali je elektroda u tom slučaju legirana cirkonijevim oksidom i drugačijeg je oblika /13/. Protok plazmenog plina kreće se uobičajeno od 0,1 do 5 litara/min., zavisno od metode, debljine materijala i položaja u kojem se zavaruje /12/.

- Argon: argon se ionizira i tvori plazmeni tok puno lakše od bilo kojeg drugog plina, čime se olakšava prijelaz luka sa pištolja na radni materijal. Kako je argon inertan plin, ne kontaminira elektrodu i ne dozvoljava oksidaciju osnovnog materijala./16/
- Argon/vodik: boce su punjene mješavinom od 98% argona i 2% vodika. Ova se smjesa preporučuje samo za zavarivanje tankostjenih metala na bazi nikla poput nehrđajućih čelika. Vodik u ovoj mješavini dodatno povišuje temperaturu luka i uništava površinske okside na materijalu, te stabilizira šav zavara. Međutim, upravo zbog svog erozijskog djelovanja i mogućnosti pojave pukotina njegovim difundiranjem iz metala, ne koristi se često, osim u slučajevima zavarivanja

tankostjenih materijala na niskoj jakosti struje. Također, dodatno zagrijavanje luka bitno smanjuje vijek trajanja sapnice./16/

#### (4) ZAŠTITNI PLIN

Protječe kroz vanjsku sapnicu i štiti šav zavara od štetnog utjecaja atmosfere. Argon je i ovdje najčešće korišteni plin, a koristi se najčešće za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika. Slijede ga argon/vodik (zavarivanje Cr-Ni čelika) i Argon/helij. Protok zaštitnog plina kreće se od 5,0 do 18,0 litara/min, a čistoća je obično nešto niža u odnosu na plazmeni plin /12/.

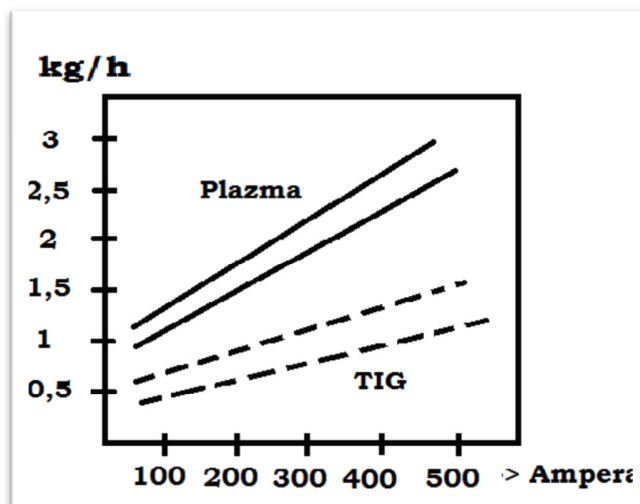
- Argon: Argon je teži od zraka pa stoga pruža dobru zaštitu korita kao i dobru stabilnost luka. Također, pruža najbolju i najstabilniju podršku prilikom prebacivanja upravljačkog luka na osnovni materijal /16/.
- Argon/vodik: Sastavljen od 95% argona i 5% vodika, ova se mješavina koristi za nehrđajuće čelike i druge slitine na bazi nikla, iako dosta rijede zbog istih razloga kao kod plazmenog plina. /16/
- Argon/helij: helij je 25% „topliji“ od argona i koristi se za zavarivanje aluminija, titana, te bakra i bakrenih slitina. Helijeva prednost leži u tome što unosi više topline u zavar nego što okolni zrak odnosi. Međutim, budući je lakši od zraka, teže se zadržava na zavaru pa je mogućnost kontaminacije nešto veća. /16/

#### (5) ELEKTRODA

Za plazma zavarivanje koristi se čista ili legirana 2% torij/cerij/cirkonij-volfram elektroda koja je uvučena i zaštićena unutar bakrene sapnice, a najčešće se spaja na negativni pol struje osim kod zavarivanja aluminija kada se primjenjuje izmjenična struja /9/. Veliki utjecaj na stabilnost i kvalitetu zavarivanja ima koncentričnost elektrode i sapnice, te preciznost namještanja elektrode unutar sapnice /12/. Volframove elektrode su cilindričnog oblika, dok im je vrh zašiljen u konus. Promjer volframove elektrode iznosi od 1 do 4 mm ovisno o struji kojom se zavaruje.

## (6) DODATNI MATERIJAL

*Dodatni materijal* se ne upotrebljava jedino ako se zavaruje „I“ priprema spoja, a sama upotreba ne ovisi o debljini materijala. U svim se ostalim slučajevima, naravno, može i ne mora upotrebljavati. Koristi se u obliku žice (hladne ili vruće) i praška /12/. Dimenzije dodatnog materijala ovise o osnovnom materijalu i jakosti struje, a dodavati ga možemo ručno, mehanički i automatizirano. Procedura je vrlo slična onoj kod TIG-a, sa jednom razlikom – zavarivaču je kod plazma zavarivanja dozvoljena nešto veća sloboda u razmaku sapnice i materijala što olakšava unos i povećava moguću količinu depozita dodatnog materijala kao što je vidljivo na slici 10. gdje je okvirne vrijednosti depozita moguće očitati između dvaju crta za svaki postupak.



Slika 10. Odnos depozita po satu i jakosti struje kod TIG-a i PAW-a /11/

## (7) OSTALA OPREMA

- Hladnjak s vodom – ugrađeni ili vanjski
- Dodatna oprema za pištolj – poklopac, zatezna čahura, itd.
- Dodavač žice (dodatnog materijala) – mora održavati konstantnu brzinu dodavanja u rasponu od 254 mm/min do 3,18 m/min /11/



#### 4.4 Područja rada plazma zavarivanja

Postoje 3 radna područja zavarivanja plazmom koje se međusobno razlikuju prema jakosti struje, protoku plazmenog plina i promjeru otvora sapnice, a samim time i prema namjeni. To su: mikroplazma, zavarivanje taljenjem i metoda ključanice.

##### (1) MIKROPLAZMA

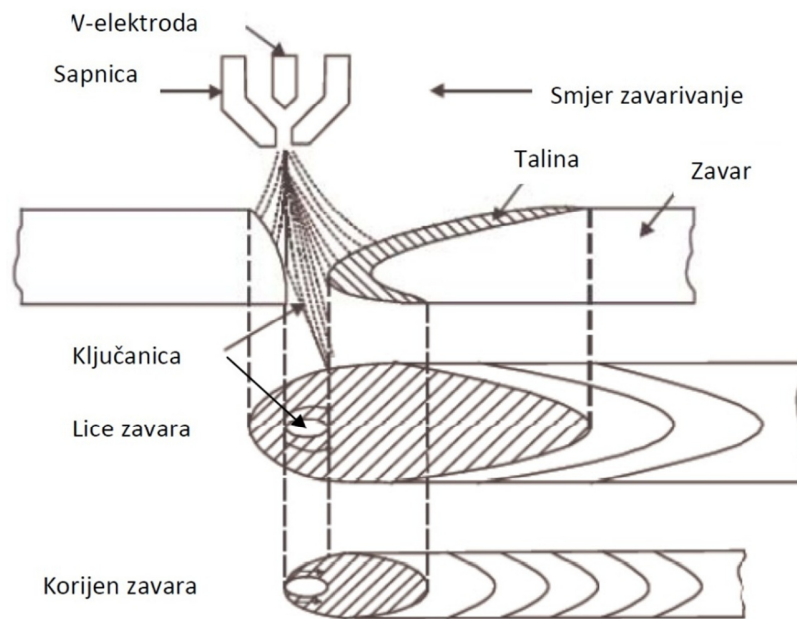
U području mikroplazme se zavaruju tanki materijali (od 0,05 do 1,6 mm) pretežito bez dodatnog materijala u osjetljivim okolnostima /13/. U području zavarivanja mikroplazmom nerijetko se primjenjuju jako niske vrijednosti struje koje u kombinaciji s malim promjerom sapnice (npr 0,6mm) daju mogućnost zavarivanja tankih materijala. Svrha ove metode su sitni popravci svih vrsta, a u industriji se posebice upotrebljuje za reparaturu alata i kalupa. Zbog uskog djelovanja plazmenog luka potrebno je osigurati precizno vođenje kako bi se protaljivalo spojno područje. Takvo precizno zavarivanje je vrlo teško provesti ručno te se preferira automatizirano vođenje pištolja. Prednost ove metode nad TIG-om je u tome što se stabilan luk može održavati i na niskoj jakosti struje. Jakost struje kod mikroplazma metode zavarivanja je između 0,1 i 15 A /12/. Zanimljivo je to da se s mogućnošću rada na struji tako niske jakosti, s plazmom može započeti luk čak i na vrhu žice ili igle.

##### (2) PLAZMA ZAVARIVANJE TALJENJEM

Ovo je područje zapravo najbližnja TIG-u.. Raspon jakosti struje kod plazma zavarivanja taljenjem je od 15 do 100 A. Zbog pouzdanog prijenosa i stabilnosti luka, koristi se za precizne i visoko kvalitetne zavare materijala debljine od 0,5 mm do 3,2 mm /11/. Međutim, plazma zavarivanje taljenjem se kvalitetno može koristiti jedino sa odgovarajuće širokim otvorom unutarnje sapnice i preciznom kontrolom jakosti struje kako bi se izbjeglo pregrijavanje vrha sapnice /16/. Dodavanje dodatnog materijala može biti ručno ili strojno /12/.

### (3) PLAZMA ZAVARIVANJE PROTALJIVANJEM - METODA „KLJUČANICE“

Ovo radno područje (100 A i više) ima dvije prednosti koje se posebno daju iskoristiti: visoke brzine zavarivanja i duboka penetracija. Stvaranje ključanice, odnosno rupe na šavu tokom zavarivanja, postiže se uslijed djelovanja plazmenog mlaza (slika 11.).



**Slika 11. Shematski prikaz plazma zavarivanja ključanicom /12/**

Površinska napetost prisiljava rastaljeni metal da teče oko plazmenog mlaza, stvarajući na taj način rupu u obliku ključanice, i da se potom slijeva samostalno formirajući korijen žlijeba zavara. Na taj se način postižu izrazito visoke brzine sa kvalitetnim zavarom. Energija se stvaranjem snažnog luka, nalik laserskoj zruci, raspodjeljuje po čitavoj dubini metala a ne samo na površini, pa je na taj način moguće provariti od 1,5 mm do 12 mm /10/, ovisno o materijalu koji se zavaruje. U slučaju samo jednog prolaza, običaj je ograničiti penetraciju na 6 mm. U usporedbi sa TIG-om, metoda ključanice minimizira potrebu za troškovima pripreme spoja i dodatnim materijalom. Moguća je upotreba za zavarivanje svih vrsta metala, no pretežito se upotrebljuje za nehrđajuće čelike.

Kod ove je tehnike potrebno obratiti izrazitu pozornost na parametre kako bi se održao efekt ključanice i stabilnost šava. Zbog toga je metoda ključanice primjerena samo u mehaniziranim uvjetima /17/.

U tabeli 3. dan je općeniti/uobičajeni prikaz radnog područja i primjene plazma zavarivanja /12/.

**Tabela 2. Prikaz područja rada pojedine metode plazma zavarivanja /12/**

Jakost struje, A	Područje rada	
	Mikroplazma	Plazma taljenjem i zavarivanje ključanicom
<b>0,1 do 10</b>	Folije 0,05 do 0,2 mm	-
<b>1 do 20</b>	Tanki limovi 0,2 do 0,5 mm	-
<b>5 do 40</b>	Tanki limovi 0,5 do 1 mm	-
<b>40 do 100</b>	-	Taljenjem 0,5 do 1,5 mm
<b>100 do 200</b>	-	Taljenjem 1,5 do 3 mm
<b>100 do 300</b>	-	Ključanicom 3 do 10 mm

## 4.5 Parametri zavarivanja

Kod plazma zavarivanja postoji puno parametara koje je potrebno podesiti kako bi se osigurao stabilan proces što svakako zahtjeva dobro uvježbane operatere/zavarivače. Najvažniji parametri su kako slijedi /12/:

- Promjer unutarnje sapnice (najčešće 0,6 do 4 mm) – odabir promjera unutarnje sapnice ovisi prvenstveno o količini energije koja se želi dobiti i širini zavara. Što su materijali tanji, manji je i promjer sapnice. Međutim, sa smanjenjem sapnice povećavaju se zahtjevi za kvalitetom pripreme i centriranjem elektrode prema sapnici.
- Promjer vanjske sapnice (ovisno o obliku spoja i primjeni) – vanjska sapnica usmjerava protok zaštitnog plina. Vrlo često se prilagođava obliku proizvoda kako bi se u cijelosti zaštitilo zagrijano područje.
- Jakost struje zavarivanja, A – porastom debljine materijala i potrebom za većom penetracijom povećava se i jakost struje zavarivanja. Ovisno o primjeni između 0,1 A i 300 A, pa kod nekih aplikacija i 500 A.
- Jakost struje upravljačkog (pilot) luka – najčešće do 10A, ovisno o konstrukciji uređaja. Kod nekih uređaja je to fiksna vrijednost ali se kod novijih izvora ista može mijenjati.
- Promjer volframove elektrode – ovisno o potrebnom strujnom opterećenju može se povući analogija s TIG postupkom. Za manje struje manji je promjer elektrode, za veće struje potreban je veći promjer elektrode.
- Protok plazmenog plina – s porastom protoka plazmenog plina povećava se i kinetička energija plazme što direktno utječe na penetraciju. Uobičajeno su ti protoci u rasponu između 0,1 i 5 l/min ovisno o promjeru sapnice, jačini struje zavarivanja i debljini materijala.
- Protok i vrsta zaštitnog plina – protok zaštitnog plina iznosi najčešće između 5 i 18 l/min i mora biti prilagođen obliku i promjeru vanjske sapnice. Najčešće se koristi argon ali kod zavarivanja visokolegiranih čelika moguća je i primjena mješavina s 2 do 5% vodika ili dušika ako se radi o dupleks čelicima. Za zaštitu korijenske strane koriste se argon i mješavine dušika i vodika. Ako se zavaruju bakar ili aluminij tj. materijali koji imaju dobru toplinsku vodljivost moguća je i primjena mješavina argona i helija.

- Brzina zavarivanja – najčešće u rasponu od 20 cm/min pa do brzine od nekoliko metara u minuti kod tanjih materijala.
- Nagib i udaljenost pištolja – moguće je primjenom lijeve ili desne tehnike, te nagibom pištolja utjecati na karakter penetracije i oblik provara. Udaljenost od radnog komada od 2 do 5 mm ovisno o jačini struje, količini taline i obliku provara. Ako se unutarnja sapnica previše približi radnom komadu može doći do pojave kratkog spoja što rezultira gubitom penetracije i prekidom plazmenog luka.
- Frekvencija i jakost osnovne i vršne struje pri impulsnom zavarivanju – utječe na oblikovanje nabora na zavaru, reducira unos topline što je važno kod tankih materijala.
- Predprotok i postprotok plina - za čišćenje prostora u kojem će nastati plazmeni mlaz potrebno je u vremenu od nekoliko sekunda propuhati zaštitni i plazmeni plin. Isto tako po završetku zavarivanja potrebno je produžiti protok plina nekoliko sekunda radi zaštite taline i volframove elektrode.
- Početni i završni uspon struje – regulira vrijeme od uspostave luka do radne struje te vrijeme smanjivanja od radne struje do prekida luka. Postupnim smanjivanjem reducira se veličina završnog kratera.
- Završna struja – regulira veličinu završnog kratera.
- Brzina dodavanja žice i intenzitet dodavanja praška – utječu na količinu nataljenog materijala. Vrijednosti brzine dodavanja žice su relativno male (1 do 2 m/min).

Samo optimizirani parametri mogu osigurati stabilan proces i kvalitetno zavarivanje pa je ponekad potrebno napraviti veći broj proba kako bi se cjelokupni proces doveo u stanje potrebno za industrijsku proizvodnju /12/.

## 4.6 Prednosti i nedostaci

Tablica na idućoj strani ukratko sažima važnije karakteristike plazma zavarivanja te njihove prednosti i nedostatke.

**Tabela 3. Prednosti i nedostaci plazma elektrolučnog zavarivanja /18/**

KARAKTERISTIKA	PREDNOST	NEDOSTATAK
<b>Zaštićena elektroda</b>	Manja opasnost od kontaminacije i dulji vijek trajanja.	<b>Skuplja, kompleksnija i robusnija oprema (hlađenje), nemogućnost zavarivanja u tijesnim prostorima.</b>
<b>Duljina luka kao posljedica ravnomjerne raspodjele temp. i pravilnog oblika luka</b>	Razmak između elektrode i osn. materijala nije kritična veličina kao kod TIG-a. Daje kontinuiran i stabilan zavar bez potrebe za automatskom kontrolom luka.	<b>TIG ipak fleksibilnija i jeftinija opcija u većini slučajeva.</b>
<b>Stabilan prijenos luka</b>	Pogodno za zavarivanje tankih stijenki, žica i minijaturnih komponenata bez pojave iskri.	
<b>Mala površina ZUT-a</b>	ZUT je uzak s paralelnim rubovima što smanjuje kutne deformacije	
<b>Stabilnost luka prilikom zavarivanja</b>	Smanjuje „lutanje“ luka, zavaruje mjesto na koje je ciljan.	<b>Na stabilnost također utječu plazmeni i zaštitni plin (argon) čija je potrošnja bitno veća u odnosu na druge postupke.</b>

<b>Minimalan VF utjecaj</b>	Nakon starta upravljačkog luka gubi se potreba za VF uređajem koji može oštetiti okolne elektroničke uređaje.	<b>Iako se koristi samo za inicijaciju upravljačkog luka, nužan VF generator.</b>
<b>Gustoća luka</b>	3 puta gušći luk od onog kod TIG-a, bitno smanjuje distorziju, omogućava uže zavare i veću brzinu.	<b>LBW i EBW još uvijek imaju manju ZUT i veću brzinu zavarivanja.</b>
<b>Trajanje zavarivanja i do 0.005 sec</b>	Izuzetno kratki i precizni zavari omogućuju točkasto zavarivanje finih žica, limova, itd.	<b>S obzirom na prirodu luka plazma postupak ima uske tolerancije pripreme spoja.</b>
<b>Zavarivanje na strujama niske jakosti (0.05 A)</b>	Dozvoljava zavare minijaturnih komponenti i dobru kontrolu pozicioniranja luka na osn. materijalu.	<b>Čak i za izvedbe zavara na ovoj jakosti struje potrebno hlađenje vodom.</b>
<b>Razlike u promjeru otvora sapnice</b>	Na ovaj se način postižu različite tehnike zavarivanja ovisno o promjeru.	<b>Ukoliko je promjer sapnice preuzak, vijek trajanja joj se bitno smanjuje.</b>

#### 4.6.1 Razlika unosa energije i isplativosti između TIG i plazma postupka

Sljedeći eksperiment prikazuje usporedbu unosa energije dvaju postupaka zavarivanja na posebno odabranom testnom materijalu. Rezultat ovog testa preuzet je sa internet stranice /18/ i trebao bi se uzimati u obzir jedino kao općenita smjernica, s napomenom da bilo kakva promjena parametara može polučiti drugačiji rezultat.

Parametri : Ručno zavarivanje, bez steznih ploča, Cr-Ni čelik, debljina 2,6 mm. Sve vrijednosti određene su sa odgovarajućim mjernim instrumentima.

TIG: 125 A, 12 V, 26 cm/min

Plazma: 75 A, 18 V, 34 cm/min

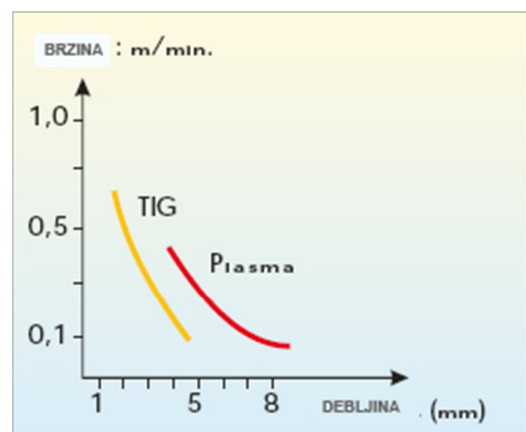
$$\text{Unos topline} = \frac{\text{Jakost struje} \cdot \text{Napon} \cdot 60}{\text{Brzina zavarivanja u cm/min}} \quad [\text{kJ}]$$

$$\text{TIG} = \frac{125 \cdot 12 \cdot 60}{26} = 3,46 \text{ kJ/cm}$$

$$\text{Plazma} = \frac{75 \cdot 18 \cdot 60}{34} = 2,38 \text{ kJ/cm}$$

Uz činjenicu da je moguće zavarivati većom brzinom (slika 12.), manji unos energije (topline) donosi sljedeće prednosti:

- Manje distorzije
- Manje naprezanja u zavarenoj komponenti
- Niži rizik od oštećivanja dijelova osjetljivih na povišenu temp. u blizini zavora
- Postojaniji zavar



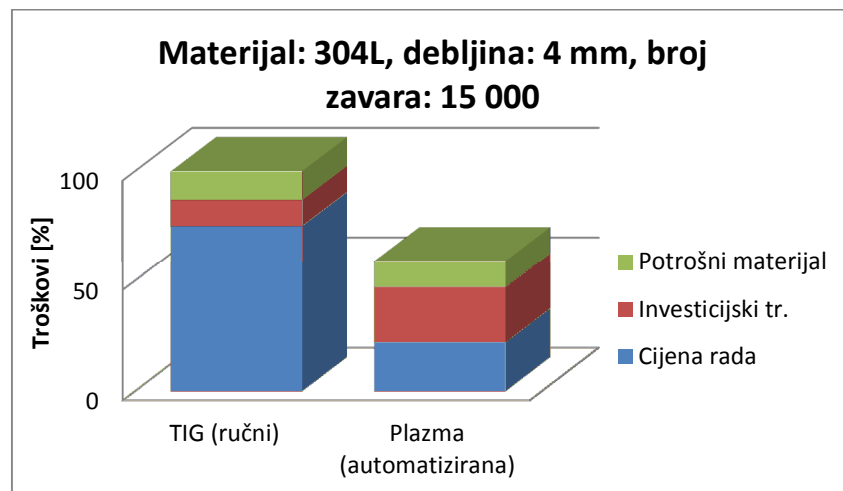
Slika 12. Odnos brzine zavarivanja i debljine stijenke materijala kod TIG i PAW postupka /8/

Ako se objektivno sagleda poglavlje prednosti i nedostataka, dobiva se postupak koji prednjači u kvaliteti, brzini, preciznosti, relativno malome unosu topline i visokoj konzistentnosti zavora nauštrb cijene opreme, loše trajnosti sapnica, složene izvedbe i ograničenog manevarskog prostora, te slabe ili nikakve isplativosti kod proizvodnje malih serija.

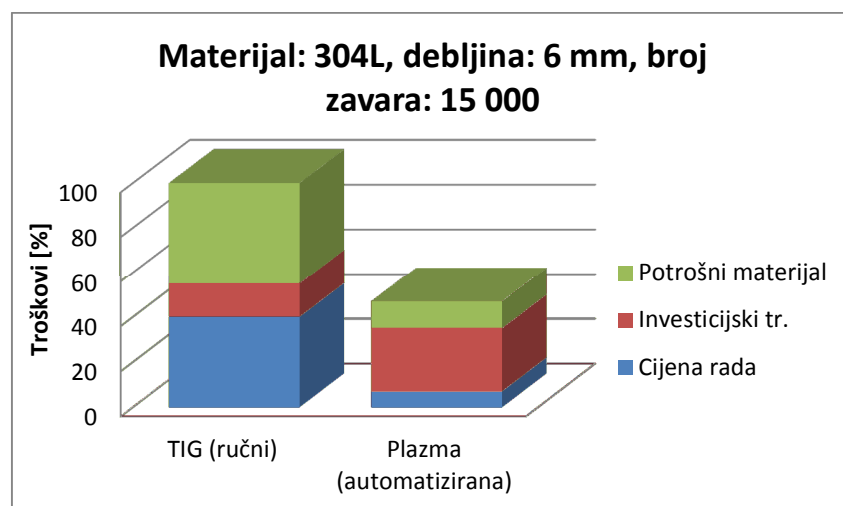


Ipak, plazma se često uzima u obzir kao optimalno rješenje u visokoproduktivnim proizvodnim pogonima, gdje postoji potreba za visokom kvalitetom zavara.

Na slikama 13. i 14. moguće je vidjeti isplativost automatiziranog plazma postupka zavarivanja u višeserijskoj proizvodnji u odnosu na ručni TIG, te povećanje isplativosti sa porastom debljine stijenke spoja.



Slika 13. Prikaz odnosa troškova zavarivanja materijala 304L, debljine stijenke 4 mm TIG i PAW postupkom u uvjetima visoke produktivnosti /8/



Slika 14. Prikaz odnosa troškova zavarivanja materijala 304L, debljine stijenke 6 mm TIG i PAW postupkom u uvjetima visoke produktivnosti /8/

## 4.7 Zavarljivost

Plazma zavarivanjem se, kao i sa TIG-om, mogu zavarivati gotovo svi komercionalno dostupni metali. Ta činjenica možda neće osigurati najbolji ili najisplativiji zavar, ali će, ukoliko se ukaže potreba za spajanjem metala koji nisu u uobičajenoj domeni plazme, poslužiti svrsi. Zavarljivost pojedinih metala podjeljena u određene kategorije po kvaliteti, ilustrirana u je tabeli ispod.

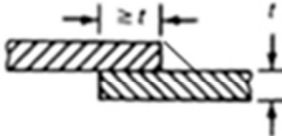
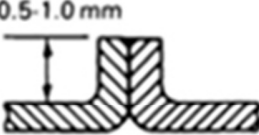

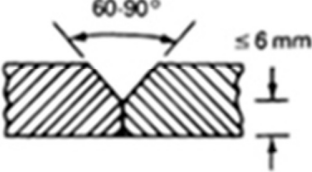
**Tabela 4. Zavarljivost osnovnog materijala plazma postupkom zavarivanja /11/**

Osnovni materijal ( metal )	Zavarljivost plazmom
- <b>Aluminij</b>	- <b>Dobro zavarljiv</b>
- <b>Bronca (bakar, kositar)</b>	- <b>Moguće, ali se ne koristi</b>
- <b>Bakar</b>	- <b>Dobro zavarljiv</b>
- <b>Konstantan (bakar, nikal)</b>	- <b>Dobro zavarljiv</b>
- <b>Kovano željezo</b>	- <b>Moguće, ali se ne koristi</b>
- <b>Olovo</b>	- <b>Moguće, ali se ne koristi</b>
- <b>Magnezij</b>	- <b>Moguće, ali se ne koristi</b>
- <b>Invar (željezo, nikal)</b>	- <b>Dobro zavarljiv</b>
- <b>Nikal</b>	- <b>Zavarljiv</b>
- <b>Monel (nikal, bakar)</b>	- <b>Dobro zavarljiv</b>
- <b>Plemeniti metali</b>	- <b>Zavarljiv</b>
- <b>Niskouglični čelici</b>	- <b>Dobro zavarljiv</b>
- <b>Srednje i visokouglični čelici</b>	- <b>Zavarljiv</b>
- <b>Legirani čelici</b>	- <b>Dobro zavarljiv</b>
- <b>Nehrđajući čelici</b>	- <b>Dobro zavarljiv</b>
- <b>Titan</b>	- <b>Dobro zavarljiv</b>
- <b>Volfram</b>	- <b>Dobro zavarljiv</b>

## 4.8 Priprema spojeva i položaji kod zavarivanja

Priprema spojeva kod plazma zavarivanja prvenstveno ovisi o radnom području parametara. Zbog dobre penetracije preferira se „I“ priprema gdje se može zavarivati sa ili bez dodatnog materijala, ali je kod većih debljina nužna „Y“ priprema jer se prvim prolazom osigurava provar korijena a drugim, završnim, oblikovanje lica zavara. Tipične pripreme koje se primjenjuju kod plazma zavarivanja dane su u tabeli 6. /12/.

Tabela 5. Tipične pripreme spoja kod plazma zavarivanja /12/

Vrsta spoja	Preporučena debljina, mm	Priprema spoja	Način zavarivanja	Broj prolaza	Napomene
Preklopni	0,5 do 1,0		Mikroplazma	1	Rub potpuno pretaliti (kutni spoj). Osigurati potpuno nasjedanje bez zazora, bez dodatnog materijala.
Rubni	0,5 do 1,5		Mikroplazma	1	Rubovi potpuno pretaljeni, bez dodatnog materijala.
Sučeljeni „I“	0,5 do 12		Mikroplazma/ plazma	1	Osigurati dobro nalijeganje bez zazora. Kod zavarivanja ključanicom upotrijebiti Cu podlošku s utorom.
Sučeljeni „Y“	6 do 15		Plazma	2 i više	Provar korijena ključanicom, popuna i završni s dodatnim materijalom.

Ovime se procesom može zavarivati u gotovo svim zavarivačkim položajima, no u pravilu se najviše koristi horizontalni. Tabela 7. prikazuje pojedine (ne sve) položaje kod zavarivanja prema HRN EN 288-9:2001, i kvalifikaciju istih prema složenosti njihove izvedbe.

**Tabela 6. Mogućnosti zavarivanja u pojedinim položajima /11/**

<b>Položaj kod zavarivanja</b>	<b>Ocjena</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vodoravni, PA</li> <li>- Horizontalni (zidni), PC               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Horizontalno-vertikalni, PB</li> <li>- Horizontalno-nadglavni, PD</li> </ul> </li> <li>- Vertikalni nagore, PG</li> <li>- Nadglavni, PE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Odličan</li> <li>- Odličan</li> <li>- Dobar</li> <li>- Dobar</li> <li>- Vrlo dobar</li> <li>- Vrlo dobar</li> </ul>

## 4.9 Primjena postupka zavarivanja plazmom

Plazma danas nalazi primjenu u jako širokom spektru djelatnosti. Upotrebu plazma zavarivanja moguće je pronaći u gotovo svakoj industriji – od alata, strojeva i spremnika u prehrambenoj i biotehnološkoj, preko medicine i medicinskih pomagala, građevinske industrije, pa sve do specijalizirane upotrebe u vojnoj i autoindustriji. Ipak, određena su područja zastupljenija od ostalih pa stoga treba izdvojiti:

**Zavarivanje malih predmeta:** Budući da se plazma procesom može *nježno*, ali konzistentno započeti luk na vrhu žice ili drugih sitnih komponenata i kvalitetno opetovati zavare u uskom vremenskom periodu, plazma se nameće kao idealna opcija za zavarivanje minijaturnih predmeta poput žarnih niti, igala, žica, termoelemenata, sondi, kirurških instrumenata itd. /18/

**Zabrtljivanje komponenti zavarivanjem:** Medicinske i elektroničke komponente se često hermetički zatvaraju zavarivanjem. Plazma proces u tom pogledu pruža više mogućnosti:

- Smanjen unos topline
- Precizno zavarivanje u neposrednoj blizini izolacijskih brtvi
- Električni luk bez visokofrekventnog generatora koji može štetiti električkim komponentama

Primjena ovoga ili sličnog tipa upotrebljuje se i na tlačnim i električnim sensorima, mikroprekidačima, ventilima, limenkama, baterijama, te na zavarivanju protisnutog lima u cilindre. /18/

**Popravci:** Od 30-ih godina 20. stoljeća postupno se na tržištu se pojavila povećana potražnja za popravcima komponenata koje su na bilo koji način oštećene ili potrošene, kako bi se osposobile za ponovnu upotrebu. Tu je svoje mjesto osigurala i mikroplazma u kombinaciji sa TIG-om, odnosno mikro-TIG-om /18/. Područje primjene je relativno široko pa tako imamo uobičajene popravke na nepravilno korištenim alatima i napuknutim kalupima, ali i one manje uobičajene poput rada na cijevima nuklearnih podmornica, kriogenim komponentama i dijelovima space shuttle-a.

## 5. PRAKTIČNI EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni dio završnog rada sastojao se jednim dijelom od navarivanja, a drugim od zavarivanja ispitnih uzoraka plazma postupkom, te mjerenja geometrije navara i zavara na presjeku istih uzoraka. Eksperiment je izvršen u Laboratoriju za zavarivanje Katedre za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje, na plazma stroju za zavarivanje PMI 160B, proizvođača SBI. Za zavarivanje su korišteni ispitni uzorci čelika S 235, debljine 3,0mm, a za navarivanje također čelik S 235, debljine 3,0mm i 10mm. Nakon obrade na plazma stroju za zavarivanje, plazma postupkom rezanja napravljen je poprečni presjek ispitnih uzoraka (osim uzorka od 10mm), te su odgovarajućom metodom uzete mjere širine zavara ili navara, dubine protaljivanja, te visine nadvišenja korijena.

Cilj ovoga ispitivanja bio je usporediti utjecaj parametara zavarivanja (jakosti struje, brzine zavarivanja i protoka plazmenog plina) na geometriju zavara kod sučeljenog spoja bez upotrebe dodatnog materijala.

### 5.1 Priprema uzoraka za ispitivanje, spoja i opreme

Uzorci predviđeni za eksperiment podijeljeni su u dvije grupe:

*Grupa 1.* predviđena je za ispitivanje utjecaja parametara na geometriju kod **navarivanja** (bez spajanja). Sastoji se od ploče i 2 lima – ploča „A“, debljine 10mm, materijala S 235, te limovi „B“ i „C“, debljine 3,0mm, materijala S 235.

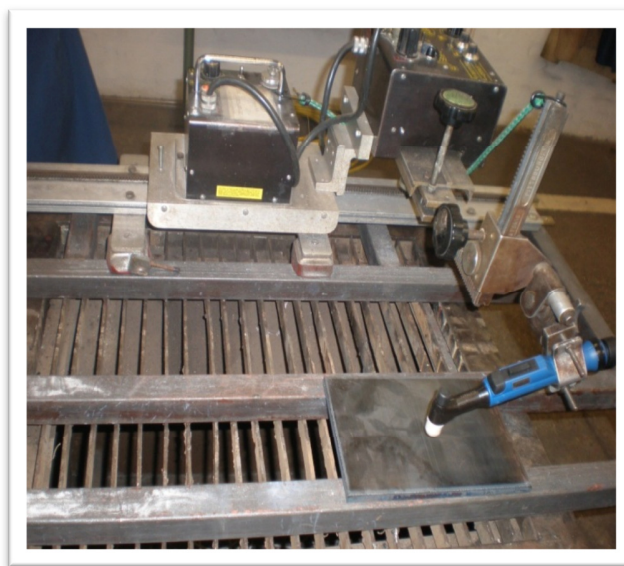
*Grupa 2.* predviđena je za ispitivanje utjecaja parametara na geometriju kod **zavarivanja** sučeljenog „I“ spoja, i sastojala se od 3 para limova debljine 3,0mm, materijala S 235 dekapirani, čiji su spojevi nakon zavarivanja označeni S1, S2 i S3 oznakama.

Obje su grupe prije ispitivanja očišćene i odmašćene kako bi se spriječila kontaminacija zavara i pojava eventualnih grešaka tokom ili nakon zavarivanja.

Za zavarivanje uzoraka korišten je inverterski izvor struje za plazma zavarivanje stroj PMI 160B, te mehanizirani postupak vođenja pištolja (slike 15. i 16.). Kao plazmeni plin koristio se argon čistoće 5.0, a zaštitni je bio također argon 4.5.



**Slika 15. Prikaz stroja PMI 160B**



**Slika 16. Priprema vodilice i namještanje pištolja**

I jedna i druga grupa ispitnih uzoraka zavarivana je na bakrenoj podlozi bez korijenske zaštite. Limovi predodređeni za spajanje (grupa 2.) su prethodno na rubovima bez razmaka zavareni TIG-om i zatim stegnuti steznim pločama na udaljenosti 15mm od zavara (slika 19.) kako bi se čim više smanjile deformacije prilikom spajanja.



**Slika 17. Prikaz stezanja ispitnog uzorka**

## 5.2 Plan pokusa, određivanje parametara i provođenje eksperimenta

Ispitivanje utjecaja jakosti struje, brzine zavarivanja i protoka plazmenog plina na **grupi 1**. sastoji se od osam zasebnih prolaza na ploči „A“, te po tri također zasebna prolaza na limovima „B“ i „C“. Plan je pokusa uskladiti parametre navarivanjem na **grupi 1**. kako bi se dobila zadovoljavajuća kvaliteta u geometriji zavara kojom bi se nakon toga uspješno mogli spojiti, odnosno zavariti limovi iz **grupe 2**.

Budući plazma postupak zavarivanja ima izrazito veliki broj parametara, određeni se parametri kroz čitav eksperimentalni dio nisu mjenjali. Iz literature /10/, /19/ i /20/, sastavljeni su okvirni *konstantni* parametri.

### ➤ KONSTANTNI PARAMETRI

- Visina luka = 4mm
- Protok zaštitnog plina = 14 litara/min
- Debljina ploče = 10mm
- Vrijeme rasta struje,  $t_u = 1$  s
- Vrijeme pada struje  $t_d = 1$  s
- Početna struja = 15 A
- Struja pilotnog luka = 15 A
- Unutarnji promjer vanjske sapnice = 14mm
- Završna struja = 15 A



Slika 18. Rezanje ispitnih uzoraka na Vanad-u 2000

Parametri čiji je utjecaj mjereno (jakost struje, brzina zavarivanja i protok plazmenog plina), radi lakšeg klasificiranja u daljnjem će tekstu biti nazivani *promjenjivi* parametri.

Nakon provedenog zavarivanja i navarivanja, svi ispitni uzorci, osim ploče „A“, su poprečno presječeni na plazma stroju za rezanje Vanad 2000



(slika 18), izbrušeni na brusnoj ploči, papiru granulacije P 600, zatim uronjeni u otopinu za nagrizanje Nital, i odnešeni u Laboratorij za zaštitu materijala. Tamo su na mikroskopu pod povećanjem od 12 puta napravljene fotografije presjeka koje su naposljetku obrađene u računalnom programu „imageJ” /21/ pomoću kojega su uzete mjere dubine protaljivanja, širine navara/zavara i nadvišenja korijena, te se od prikupljenih materijala napravila procjena utjecaja pojedinih parametara na geometriju zavara.

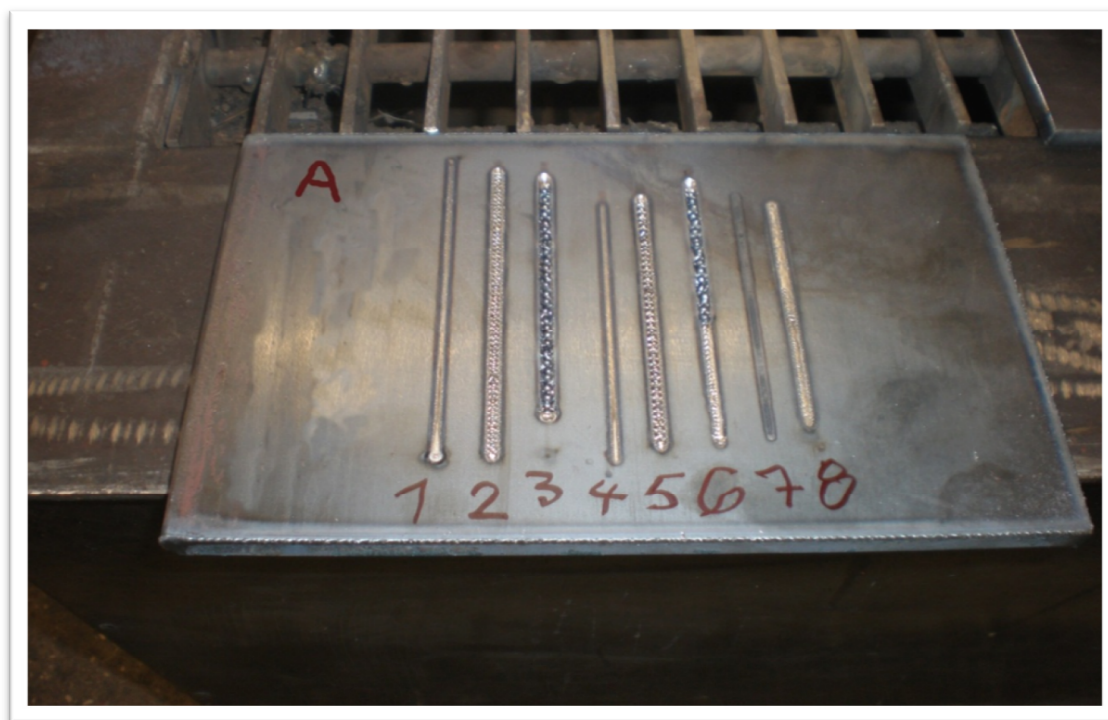
U poglavljima 5.2.1 do 5.2.4 prikazan je taj utjecaj, potkrijepljen slikama na kojima je moguće promotriti izgled površine i presjeka zavara/navara pojedinog prolaza.

### 5.2.1 ISPITIVANJE UTJECAJA PROMJENJIVIH PARAMETARA NA PENETRACIJU, ŠIRINU I NADVIŠENJE KORIJENA NAVARA PLOČE „A“

Ispitivanje utjecaja *promjenjivih* parametara najprije je provedeno na ploči „A“.

**Tabela 7. Prikaz utjecaja parametara na geometriju zavora, ploča "A" /14/**

Prolaz	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Jakost struje [A]	20	50	80	20	50	80	20	50
Brzina zavarivanja [cm/min]	26	26	26	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8
Protok plazmenog plina [litra/min]	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0



**Slika 19. Prikaz ploče "A" sa svih osam prolaza**



**Slika 20. Uvećani prikaz navara na ploči "A"**

Na prva tri navara ploče „A“ (slike 19. i 20.) mijenjana je jedino jakost struje – 20 A, 50 A i 80 A. Iz prethodne dvije slike jasno je vidljivo da se povećanjem struje bitno utječe na izgled navara. U prvom je slučaju navar izgledao relativno uredno iako je imao nisku penetraciju. No, to je bilo i za očekivati, budući se navar izvodio na niskoj jakosti struje. Međutim, povećanjem struje na 50A talina navara se počela pretjerano naslagivati što je bio indikator da ostala dva parametra (brzina zavarivanja i/ili protok plazmenog plina) nisu adekvatno postavljeni za dotičnu jakost struje. Daljnjim povećanjem struje na 80 A, naslage su postale još izražajnije poprimajući oblik kapljica prilikom skrućivanja.

Promjenom idućeg parametra – brzine zavarivanja – sa 26 na 20,8 cm/min, upravo zbog niže brzine, postigla se nešto dublja penetracija i nešto širi navar (prolazi 4, 5, 6) iako se u šestom prolazu do polovice navara pojavio tehnički problem pri dovođenju plazmenog plina. Međutim, izražajne naslage su i dalje ostale prisutne na strujama većim od 20 A. Budući da ni manja brzina

zavarivanja nije utjecala na smanjenje pojave kapljica u navaru, postalo je očito da se problem krije u prekomjernom ili ne dovoljnom protoku plazmenog plina.

Smanjenjem plazmenog plina sa 2,0 na 1,0 litru/min, smanjena je i količina energije koja se prenosi plazmom pa je stoga u prolazu 7 postignut nešto slabiji provar u odnosu na prolaz 1 i 4. No, na struji od 50 A (prolaz 8) vidljiva je povećana kvaliteta zavara u odnosu na prolaze 2 i 5.

Budući je na ploči „A“ ustanovljen pravilan srazmjer parametara, moglo se pristupiti ka navarivanju limova „B“ i „C“ kako bi se utvrdili potrebni parametri za protaljivanje lima debljine 3mm.

#### 5.2.2 ISPITIVANJE UTJECAJA PROMJENJIVIH PARAMETARA NA PENETRACIJU, ŠIRINU I NADVIŠENJE KORIJENA NAVARA LIMA „B“

**Tabela 8. Prikaz utjecaja parametara na geometriju zavara, lim "B"**

Prolaz	1.	2.	3.
Jakost struje [A]	20	50	80
Brzina zavarivanja [cm/min]	20,8	20,8	20,8
Protok plazme [litara/min]	1,0	1,0	1,0
Dubina protaljivanja [mm]	0	1,23	3,0
Širina navara [mm]	0	3,83	5,57
Nadvišenje korijena [mm]	0	0,09	0,151

Ako obratimo pozornost na tablicu 9. moguće je zapaziti da se u ovom dijelu eksperimenta mijenjala jedino jakost struje. Razlog tome leži u pokušaju da se uz zadovoljavajuće parametre iz prethodnog dijela (5.2.1) utvrdi na kojoj će se struji protaliti lim „B“.



**Slika 21. Prikaz lima "B" sa sva tri prolaza**

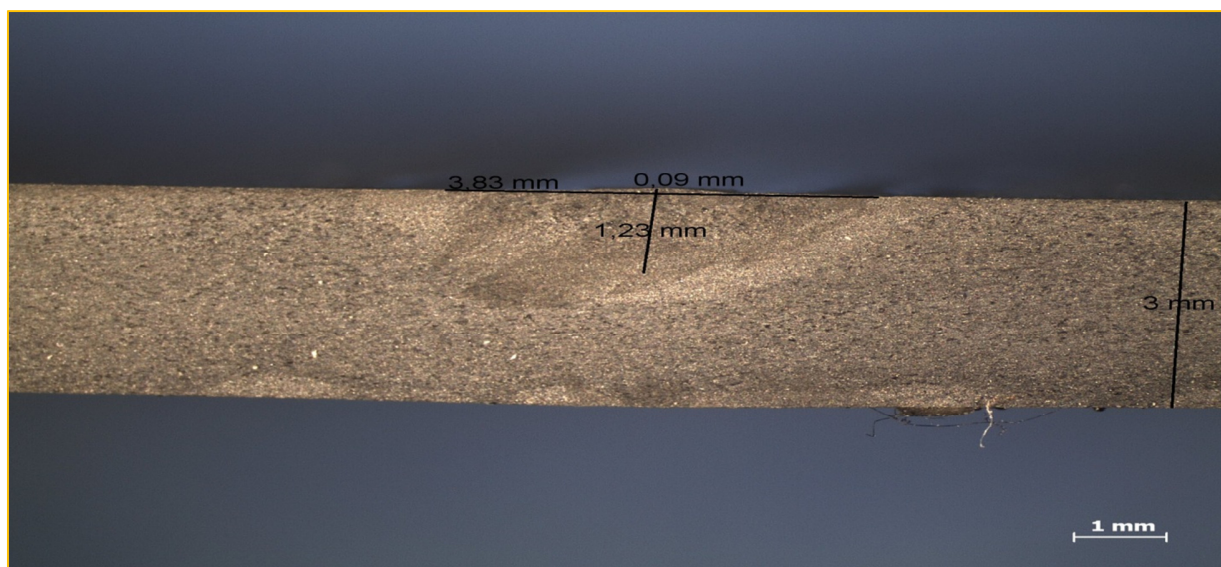
S navarivanjem na limu „B“ se nije počelo na vrlo niskoj jakosti struje (20 A) s ciljem da se lim odmah protali, nego kako bi se kasnije mogla utvrditi međusobna zavisnost pojedinih parametara. U prvom prolazu (slika 21. i 22.) se može vidjeti da penetracije uopće nema ili je ona tolika da se pod referentnim povećanjem ne razaznaje. Jedino što se na slici presijeka može nazrijeti su obrisi ZUT-a. Iz ovoga se može jasno zaključiti da se na struji oko 20 A zavaruju, odnosno mogu protaliti, samo puno tanji materijali. Naravno, važno je naglasiti da ovakav ishod vrijedi samo za ove parametre, te da na samu dubinu penetracije konačan utjecaj imaju i ostali parametri, posebice brzina zavarivanja i protok plazmenoga plina.





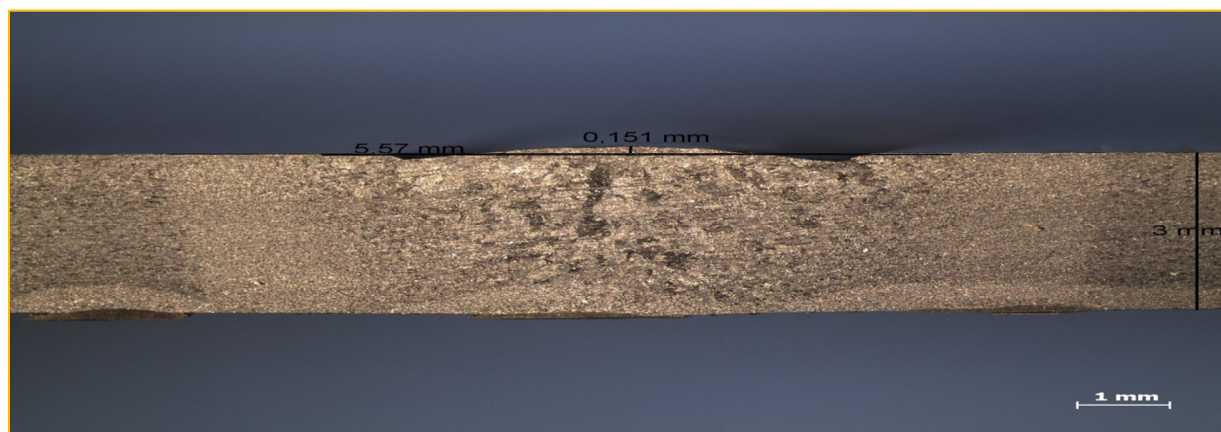
Slika 22. Uvećani prikaz presjeka, prolaz 1, lim "B"

U prolazu 2, na struji od 50 A, postignuti su izraženiji rezultati. Pod mikroskopom se jasno mogla vidjeti dubina penetracije, širina navara, kao i nadvišenje korijena (slika 23.). Međutim, kako je vidljivo na slici 21. navar ne izgleda konzistentno, a penetracija ne dopire ni do polovice lima. Stoga se išlo na daljne povećanje struje u prolazu 3. Premda, još jedno od rješenja toga problema je pravilno korigiranje ostala dva parametra. Smanjivanje ili povećavanje brzine zavarivanja i protoka plazmenog plina veoma utječe na izgled i geometriju zavara, stoga je važno poznavati pravilne odnose između ovih parametara.



Slika 23. Uvećani prikaz presjeka, prolaz 2, lim "B"

S prolazom 3, na struji 80 A , brzini zavarivanja 20,8 cm/min i protoku plazmenog plina od 1,0 litre/min postignuto je potpuno protaljšivanje uzorka „B“ (slika 24.). Pored protaljšivanja, poboljššan je i izgled, odnosno vođenje taline na licu zavara (slika 21).



Slika 24. Uvećani prikaz presjeka, prolaz 3, lim "B"

### 5.2.3 ISPITIVANJE UTJECAJA PROMJENJIVIH PARAMETARA NA PENETRACIJU, ŠIRINU I NADVIŠENJE KORIJENA NAVARA PLOČE „C“

Tabela 9. Prikaz utjecaja parametara na geometriju zavara, lim "C"

Prolaz	1.	2.	3.
Jakost struje [A]	90	90	90
Brzina zavarivanja [cm/min]	18	22,8	22,8
Protok plazme [litara/min]	1,0	1,0	1,5
Dubina protaljšivanja [mm]	3,0	3,0	3,0
Širina zavara [mm]	5,095	5,28	5,6
Nadvišenje korijena [mm]	0,37	0,24	0,18

Sa podacima prikupljenim na dijelu „B“ određena je jakost struje koja je potrebna za protaljšivanje uzorka od 3,0mm. Na limu „C“, pokušao se dodatno shvatiti utjecaj preostala dva

parametra na geometriju, ali i na vođenje taline. Stoga je u prolazu 1 brzina zavarivanja smanjena na 18 cm/min, u drugom prolazu povećana na 22,8 cm/min, dok je u trećem brzina ostala nepromijenjena ali je povećan protok plazmenog plina (tabela 9.).



**Slika 25. Prikaz ploče "C" sa sva tri prolaza**

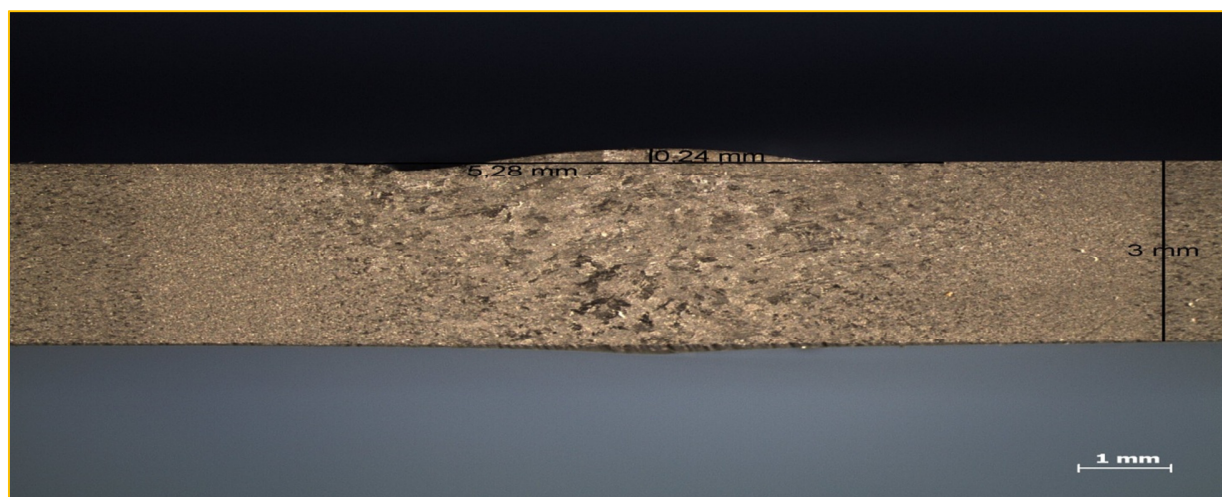
U prolazu 1, prema samome izgledu zavora (slika 25.) može se zaključiti je da je brzina zavarivanja prespora. Protaljivanje je postignuto (slika 26.), ali je sama talina počela propadati što nikako ne bi bilo dobro prilikom spajanja dvaju materijala.



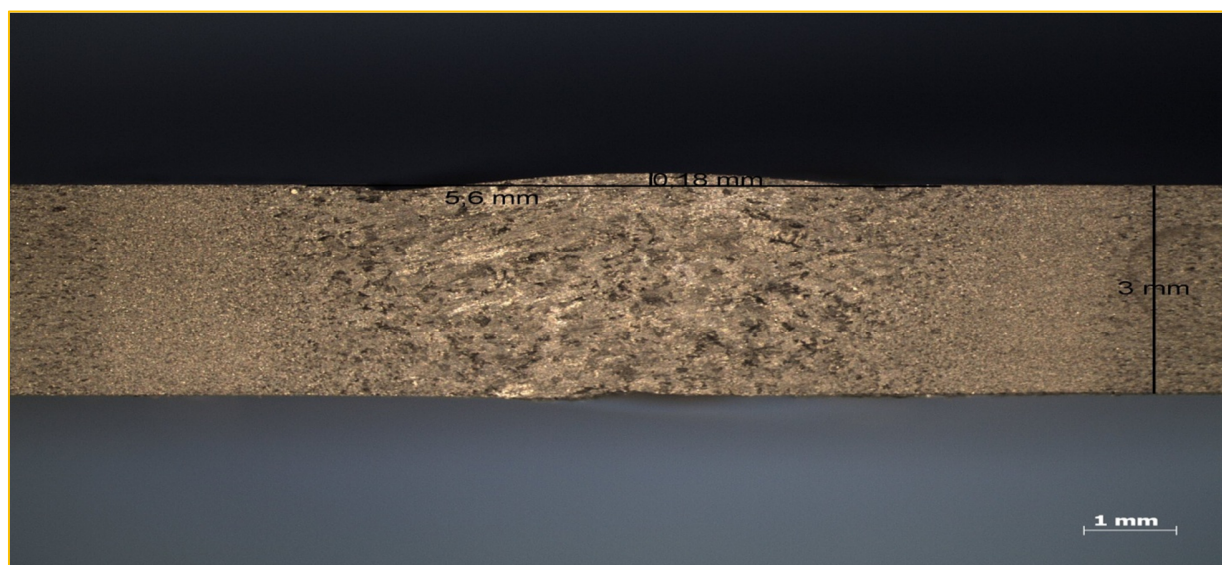
**Slika 26. Uvećani prikaz presjeka, prolaz 1, lim "C"**



Prolazi 2 i 3 su zadovoljavajući jer razlika u protoku plazmenog plina nije velika, premda je promatranjem slike 25. moguće primjetiti da bi se daljnim povećanjem protoka plazmenog plina počela narušavati konzistentnost zavora 3., ali i povećati vjerovatnost propadanja taline kao što je to slučaj kod prolaza 1. Na slikama 27. i 28. dan je prikaz presjeka prolaza 2. i 3.



Slika 27. Uvećani prikaz presjeka, prolaz 2, lim "C"



Slika 28. Uvećani prikaz presjeka, prolaz 3, lim "C"

Budući su se u prolazima 2 i 3 postigle zadovoljavajuće karakteristike za zavarivanje limova debljine 3,0mm, moglo se prijeći na zavarivanje i ispitivanje utjecaja parametara na geometriju zavarenog spoja.

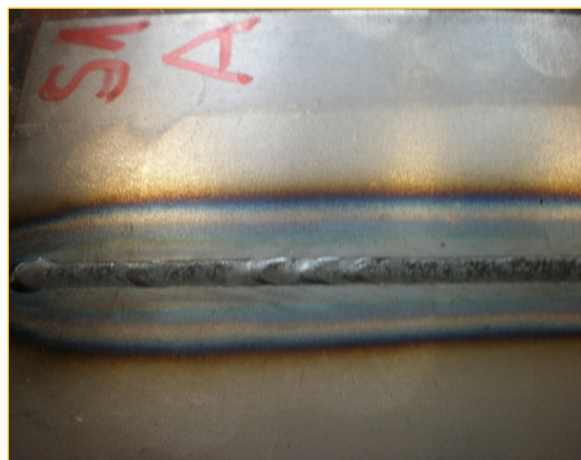
#### 5.2.4 ISPITIVANJE UTJECAJA PROMJENJIVIH PARAMETARA NA PROTALJIVANJE, ŠIRINU I NADVIŠENJE KORIJENA ZAVARA SPOJEVA „S1“, „S2“ i „S3“

**Tabela 10. Prikaz utjecaja parametara na geometriju zavarenog spoja, spojevi S1, S2, S3 /14/**

Redni broj spajanja/spoja	S1	S2	S3
Jakost struje [A]	90	105	105
Brzina zavarivanja [cm/min]	22,8	22,8	22,8
Protok plazmenog plina [litara/min]	1,2	1,2	1,0
Dubina protaljivanja [mm]	3,0	3,0	3,0
Širina zavora [mm]	4,74	6,16	4,8
Nadvišenje korijena [mm]	0,17	0,174	≈ 0

Pogledom na tabelu 10. mogu se vidjeti pojedini parametri korišteni za zavarivanje spojeva S1, S2 i S3. Svako je spajanje popraćeno sa slikom lica i naličja zavora, te slikom uvećanog poprečnog presjeka.

#### *Zavareni spoj S1*



**Slika 29. Prikaz lica zavora, „S1A“**



**Slika 30. Prikaz naličja spoja, „S1B“**



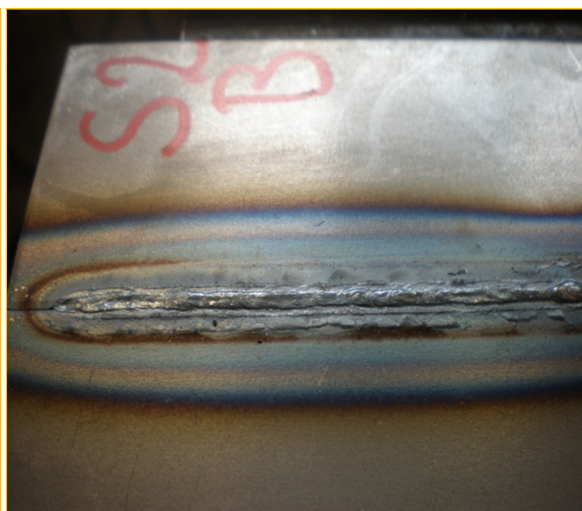
Slika 31. Uvećani prikaz presjeka "S1"

Iako je spoj uspješno zavaren, na licu zavarenog spoja S1 (slika 29. i 30.) moguće je vidjeti određene nepravilnosti. Razlike u nadvišenju korijena, širini zavora i ZUT-a na pojedinim dijelovima previše variraju. Na mjestu presjeka protaljivanje je potpuno, širina zavora je 4,74mm, a nadvišenje korijena 0,17mm (slika 31.).

#### Zavareni spoj S2

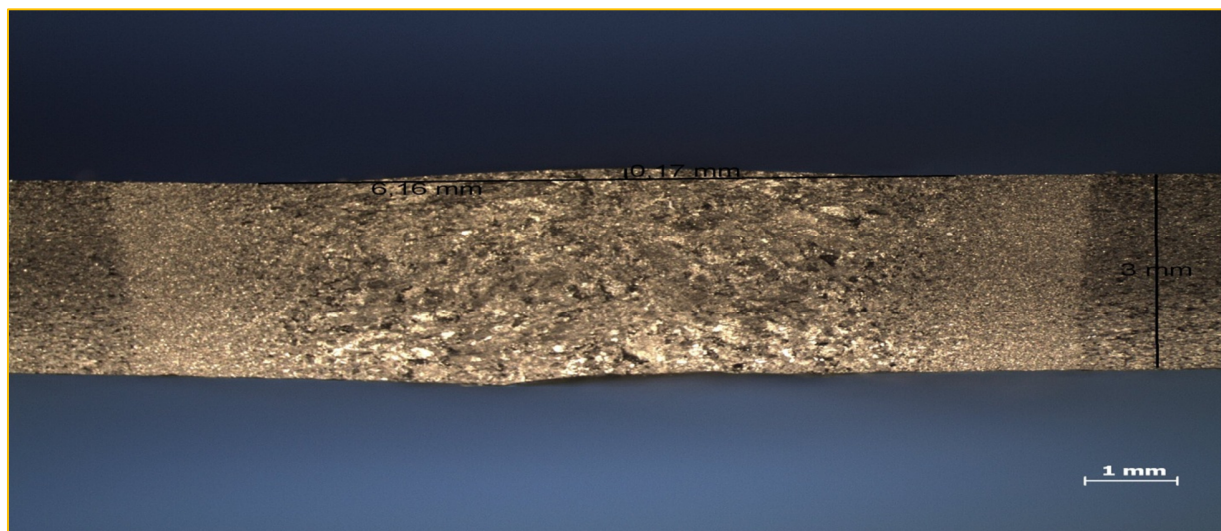


Slika 32. Prikaz lica zavarenog spoja, „S2A“



Slika 33. Prikaz naličja spoja, „S2B“

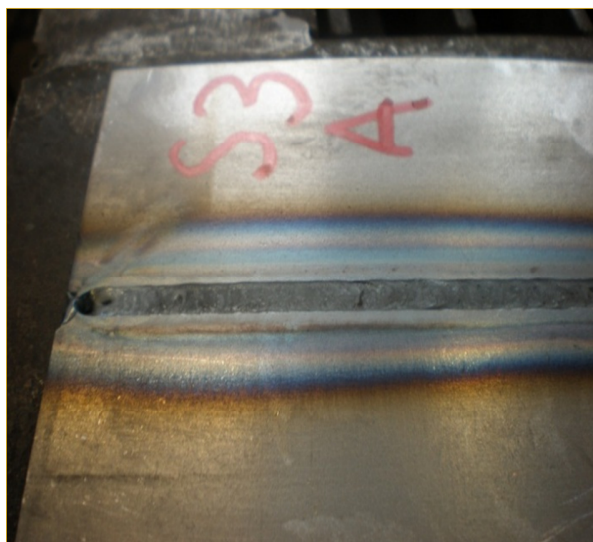




Slika 34. Uvećani prikaz presjeka spoja "S2"

U ovome je slučaju jakost struje podignuta sa 90 A, na 105 A, dok ostali parametri nisu mijenjani. Na slici 32. vidljiv je blagonaklon utjecaj povećane jakosti struje na izgled šava, kao i na protaljivanje (slika 34.). Također, zavar je bitno širi u odnosu na S1.

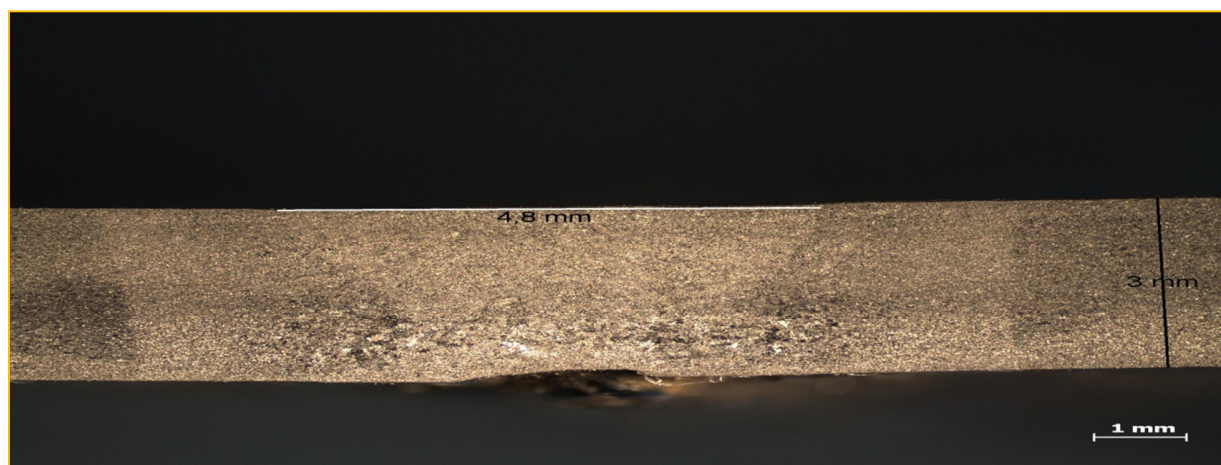
### Zavareni spoj S3



Slika 35. Prikaz lica zavarenog spoja „S3A“



Slika 36. Prikaz naličja spoja „S3A“

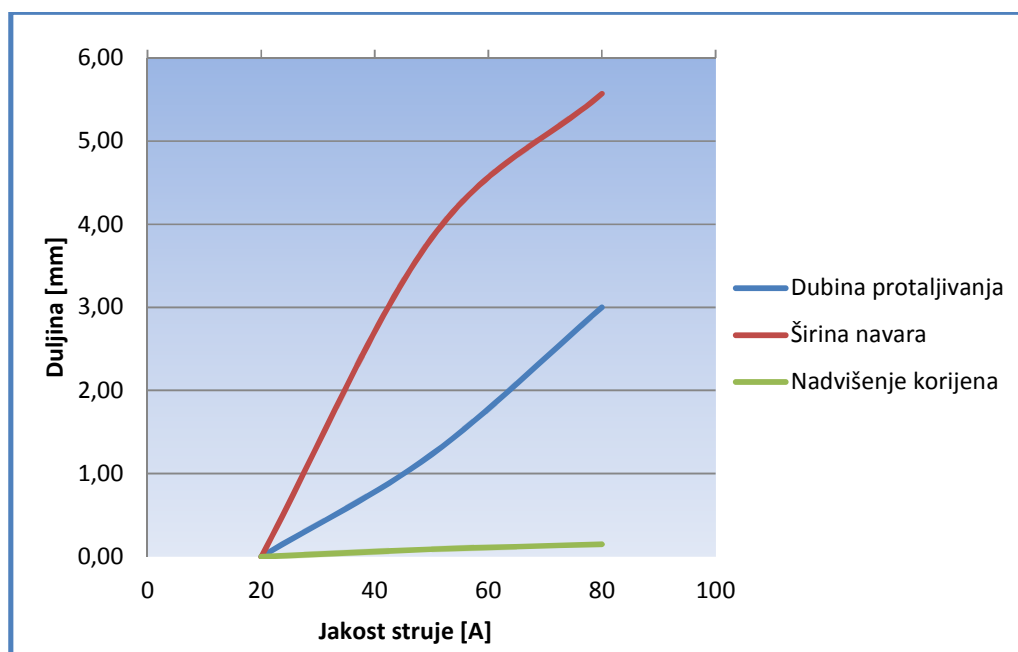


**Slika 37. Uvećani prikaz presjeka spoja "S3"**

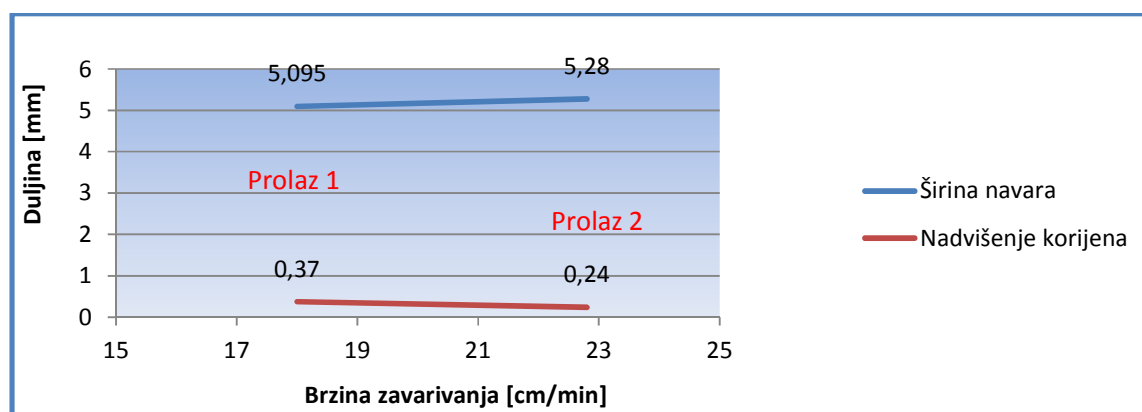
Iako bi se iz prethodnog slučaja (spoj S2) moglo zaključiti da je postignut zavareni spoj zadovoljavajuće kvalitete, promjenom protoka plina prilikom zavarivanja spoja S3 pokušalo se minimalno utjecati na smanjenje penetracije. Čini se da je zbog nešto smanjenog protoka (sa 1,2 na 1,0 litara/min) lice zavara gotovo potpuno izgubilo nadvišenje korijena (slike 35. i 37.) dok je naličje poprimilo nešto grublje konture u odnosu na S2 (slika 36.).

### 5.3 Tabelarni prikaz rezultata

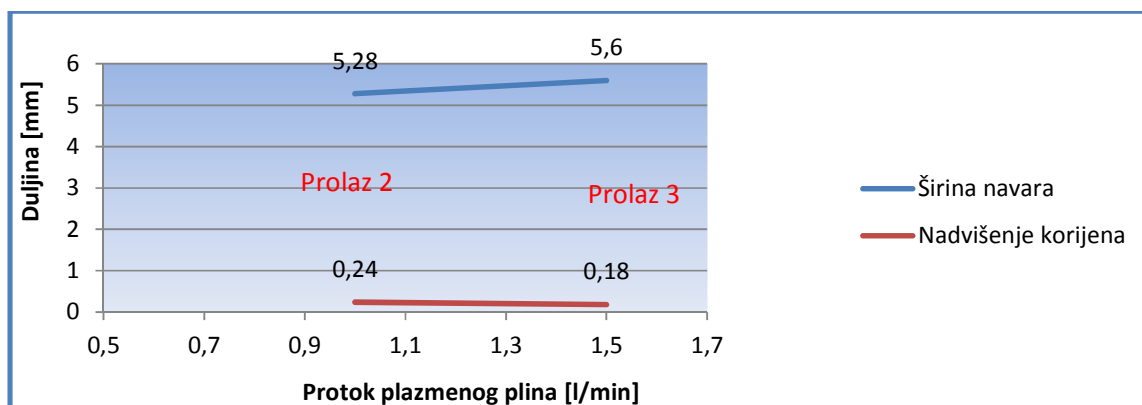
Ispitivanjem uzoraka izrađeni su dijagrami koji prikazuju utjecaj jakosti struje, brzine zavarivanja i protoka plazmenog plina na pojedine faktore geometrije zavara.



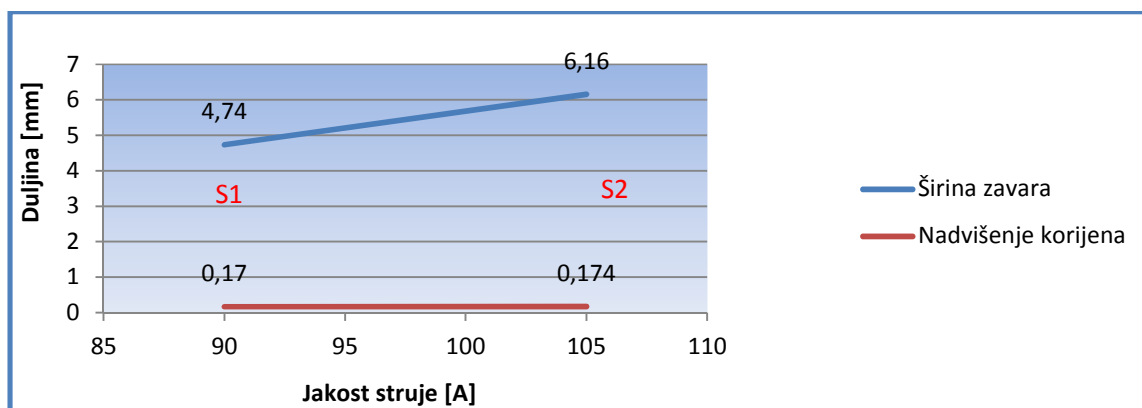
Slika 38. Dijagramski prikaz odnosa geometrije navara i jakosti struje na limu B



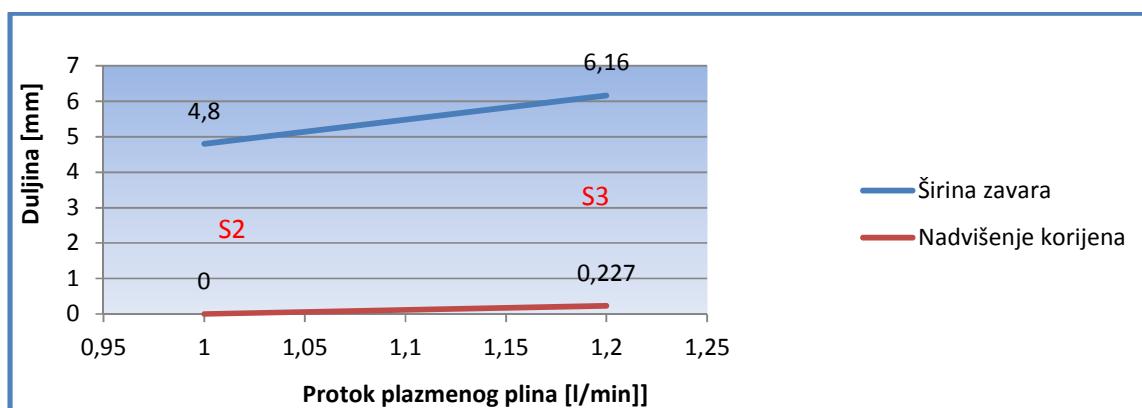
Slika 39. Dijagramski prikaz odnosa geometrije navara i brzine zavarivanja na limu C



Slika 40. Dijagramski prikaz odnosa geometrije navara i protoka plazmenog plina na limu C



Slika 41. Dijagramski prikaz odnosa geometrije zavara i jakosti struje između spoja S1 i S2



Slika 42. Dijagramski prikaz odnosa geometrije zavara i protoka plazme između spoja S1 i S2

## 6. ZAKLJUČAK

Određeni rezime cjelokupnog rada svodi se na nekoliko jednostavnih detalja. Prije svega plazma zavarivanje je postupak kojim se postiže relativno visoka preciznost, penetracija i brzina zavarivanja. Postoje tri radna područja zavarivanja koja, svako na svoj način, čine plazmu specifičnom i upotrebljivom na izrazito širokom području, a to su mikroplazma, plazma zavarivanje taljenjem i plazma zavarivanje protaljivanjem.

Usklađivanje velikog broja parametara, zahtjevno i skupo održavanje, cijena opreme, te male tolerancije na odstupanje u pripremi su nešto slabije strana plazma zavarivanja. Također, ukoliko se ulazi u ozbiljan zavarivački posao plazmom, ne smije postojati nedostatak stručnog zavarivačkog osoblja kao i detaljno razvijene operativne procedure. Ipak, ako se radi o kvalificiranom pogonu s masovnom proizvodnjom osjetljivih, elektroničkih, minijaturnih dijelova ili o popravcima koji zahtjevaju visoki stupanj preciznosti i kvalitete, tada je ovo primjeren postupak.

Također, na temelju prikupljenih rezultata u eksperimentalnom dijelu rada, za plazma zavarivanje se može reći da:

- Jakost struje, brzina zavarivanja i protok plazmenog plina imaju presudni utjecaj na oblik zavara, odnosno geometriju zavarenog spoja
- Pravilnim balansiranjem ta tri parametra moguće je postići različitu penetraciju, premda u vidu treba imati krhki odnos između parametara, koji, jednom narušen, daje loš i industrijski ne upotrebljiv zavar
- Postoji više različitih varijacija za svaki od tri ispitivana parametra kojima je moguće postići relativno sličan rezultat (sličnu penetraciju, širinu zavara, nadvišenje korijena)
- U mjerenome području, povećanjem jakosti struje, povećavaju se penetracija, širina zavara i nadvišenje korijena
- U mjerenome području, povećanjem brzine zavarivanja, smanjuju se penetracija i nadvišenje korijena uz minimalno povećanje širine zavara



- U mjerenome području, povećanjem protoka plazmenog plina, povećava se penetracija, širina zavara i nadvišenje korijena

U pogledu tehnološkog razvoja u narednom desetljeću, potrebno je posebno istaknuti razvoj tranzistora i mikroracunala. Povećana preciznost i fleksibilnost upravljanja radom plazma uređaja, omogućiti će da se postupak koristi na širem području nego do sada i u zahtjevnijim uvjetima. To će biti od velikog utjecaja kod mehaniziranih operacija gdje operater ima malu ili nikakvu kontrolu nad ponašanjem zavara. Nadalje, strujne će izvore biti sve lakše kontrolirati pomoću kompjuterskih programa, pa će uz pomoć povratne informacije računalu biti moguće raditi sitne korekcije u toku zavarivanja što će dodatno povećati efikasnost postupka.

Za kraj, bitno je naglasiti da svaki postupak zavarivanja, ne samo plazma, zahtjeva jako puno umijeća, predanosti, nadopunjavanja stečenog znanja i na kraju naravno, onoga što prema nekima pokreće svijet – novca. Samo tako cijela stvar može funkcionirati onako kako to priliči: kvalitetno i profitabilno.

## 7. LITERATURA

/1/ Mark E. Sapp, (2012), A history of welding: welding timeline 1900 – 1950 [online]. Dostupno na: <http://www.weldinghistory.org/whistoryfolder/welding/index.html> [10.01.2012]

/2/ ..... : <http://www.ram-rijeka.com/Repository/Dokumenti/Osnovni-postupci-zavarivanja.pdf> [23.01.2012]

/3/ Encrenaz, T., Barucci, M.-A. (2004), The Solar System, Paris: Springer

/4/ Milošević, S., (2008). Plazma u školi [online]. Zagreb: Institut za fiziku. Dostupno na: [http://eskola.hfd.hr/proc\\_za\\_vas/proc-21/pus.htm](http://eskola.hfd.hr/proc_za_vas/proc-21/pus.htm) [20.01.2012]

/5/ .....: <http://www.plasma-universe.com/Plasma> [13.01.2012]

/6/ England, G., (2008), Plasma flame theory [online]. Southampton: Wessex Institute of Technology. Dostupno na: <http://www.gordonengland.co.uk/pft.htm> [27.01.2012]

/7/ .....: [http://www.sapiensman.com/tools\\_and\\_equipment/equipment\\_store222.php](http://www.sapiensman.com/tools_and_equipment/equipment_store222.php) [27.01.2012]

/8/ ..... : <http://www.arcraftplasma.com/welding/plasma-welding.htm> [27.01.2012]

/9/ Thomas, W., Jones, R., (1995). Job knowledge 7: Plasma arc welding. Connect [online], broj 66. Dostupno na: <http://www.twi.co.uk/services/technical-information/job-knowledge/job-knowledge-7-plasma-arc-elding/> [27.12.2011]

/10/ Kralj, S, Andrić, Š., (1992) Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka., Zagreb: Sveučilišna tiskara.

/11/.....: <http://www.weldguru.com/plasma-welding.html> [23.12.2011.]

- /12/ Garašić, I., Kožuh, Z., Kralj, S., (2011). Specifičnosti i primjena plazma zavarivanja, Slavonski Brod: FSB.
- /13/ Gojić, M., (2008) Tehnike spajanja i razdvajanja materijala - 2. nepromijenjeno izdanje, Sisak : Metalurški fakultet.
- /14/ Milotić, M. (2008) Priručnik za zavarivače, 2. izdanje, Dobož: Prometni fakultet Dobož.
- /15/ ..... : <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVASPE1.pdf>
- /16/ Gary, R, (2009). The fundamentals of plasma welding [online]. Canadian Industrial Machinery. Dostupno na: <http://www.cimindustry.com/article/welding/the-fundamentals-of-plasma-welding> [27.01.2012]
- /17/ ..... : [http://www.ewf.be/media/documentosDocs/doc\\_31\\_plasma\\_welding\\_-\\_processos.pdf](http://www.ewf.be/media/documentosDocs/doc_31_plasma_welding_-_processos.pdf) [27.01.2012]
- /18/ Mannion, B., Heinzman, J., (1999). Plasma arc welding brings better control. Tooling & Production [online]. Dostupno na: <http://www.pro-fusiononline.com/welding/plasma.htm> [20.12.2011.]
- /19/ Plottier, G., Mouton, J. Y., (2001) Kako poboljšati TIG, plazma i MIG zavarivanje legura na osnovi nikla: uloga zaštitnih plinova. U: Kralj, S., Kožuh, Z., ur. Development of welding and allied processes at the beginning of new millenium, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Cavtat – Dubrovnik, Hrvatska
- /20/ Kralj, S., Bauer, B., Udiljak, T., Garašić, I., Mihoci, K., (2005) Instalacija CNC sustava za kombinirano rezanje laserom i plazmom. U: Kožuh, Z., ur. Mehanizacija, automatizacija i robotizacija u zavarenim i srodnim postupcima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, Hrvatska.

/21/ ..... : <http://rsbweb.nih.gov/ij/>