



SPECIFIČNOSTI I PRIMJENA PLAZMA ZAVARIVANJA

SPECIFIC ISSUES AND APPLICATION OF PLASMA WELDING

Ivica GARAŠIĆ¹⁾, Zoran KOŽUH¹⁾, Slobodan KRALJ¹⁾

Ključne riječi: plazma zavarivanje, parametri, primjena

Key words: plasma welding, parametri, primjena

Sažetak: Zavarivanje plazmom (za razliku od rezanja i naštrcavanja plazmom) se relativno rijetko pojavljuje u proizvodnoj praksi unatoč brojnim komparativnim prednostima. Problemi zbog relativno skuplje i kompliciranije opreme, loše trajnosti sapnica, složene izvedbe i nepouzdanosti pištolja utjecali su na malu prisutnost ovog postupka zavarivanja u današnjoj zavarivačkoj proizvodnji. Međutim, nove generacije uređaja umanjuju ili u cijelosti eliminiraju navedene probleme tako da se u sve više slučajeva plazma zavarivanje može uzeti u obzir kao optimalno rješenje. U radu je opisan plazma postupak zavarivanja pri čemu su okvirno definirana radna područja, glavni operativni parametri te oblici priprema zavarenog spoja uz nekoliko primjera iz prakse.

Abstract: Plasma welding (compared to plasma cutting and spraying) is rarely used in manufacturing despite numerous advantages. Problems due to more expensive and complex equipment as well as poor durability of nozzles and welding guns had important influence on rare application of this welding process in industry production. However, application of modern plasma equipment reduce or completely removes specified issues so this process must be taken in to account as optimal solution. In this paper plasma welding process is described where working parameters and weld preparation are defined. Also, several practical examples of application is given.

¹⁾ Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za zavarene konstrukcije, I. Lučića 1, Zagreb

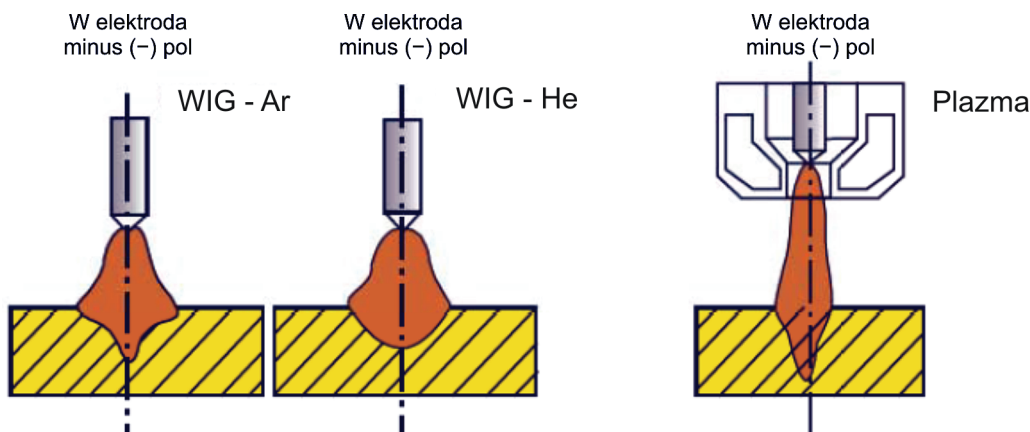
1. UVOD

Plazma postupak, isto kao i TIG, koristi netaljivu volframovu elektrodu koja ne sudjeluje u stvaranju metala zavara. Usmjereni plazmeni mlaz je znatno uži od konvencionalnog TIG električnog luka zahvaljujući uskoj sapnici kroz koju prolazi plazmeni plin (Ar), slika 1. Pilot luk (tj. inicijalni luk relativno male struje najčešće do 20 A) koji se uspostavlja između bakrene sapnice i netaljive elektrode ionizira plin VF strujom visokog napona a zatim se kroz plazmu ioniziranog plina propušta struja zavarivanja pri čemu se dobiva toplina potrebna za zavarivanje. Pri prekidu glavnog luka pilot luk se automatski uspostavlja kako bi se zadržalo ionizirano stanje. Plazmeni plin konvergira kroz sapnicu te kao rezultat daje plazmeni luk malog promjera koji je mnogo krući od klasičnog električnog luka kod TIG postupka i otporniji na magnetsko puhanje. Koncentrirani mlaz ioniziranog plina kroz koji prolazi struja električnog luka daje veću gustoću energije, bolju penetraciju i omogućuje veću brzinu zavarivanja .

Obzirom da li se strujni krug zatvara između volframove elektrode preko radnog komada ili sapnice razlikuju se prenešeni i neprenešeni luk.

Uz plazmeni plin koji je u većini slučajeva argon, postoji i zaštitni plin koji se propušta kroz vanjsku sapnicu i koji prvenstveno ima zaštitnu ulogu. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika zaštitni plin je argon, kod zavarivanja Cr-Ni čelika moguće je koristiti mješavinu argona i vodika dok se za zavarivanje aluminija koristi argon i mješavine s helijem. Pri zavarivanju titana i cirkonija nužno je koristiti argon veće čistoće.

Volframova elektroda je u većini slučajeva na minus polu osim kod zavarivanja aluminija kada se primjenjuje izmjenična struja. Veliki utjecaj na stabilnost i kvalitetu zavarivanja ima koncentričnost elektrode i sapnica te preciznost namještanja elektrode unutar sapnice. Zbog visokog toplinskog opterećenja pištolj za zavarivanje je hlađen vodom.



Slika 1. Usporedba oblika luka i penetracije kod TIG zavarivanja argonom i helijem i plazme [1]

Pri plazma zavarivanju koristi se dodatni materijal iako je uz odgovarajuću pripremu moguće zavarivati i bez njega. Dodatni materijal je u obliku žice (hladne ili vruće) i praška [2, 3, 4].

Plazma zavarivanje u usporedbi s TIG postupkom nudi nekoliko prednosti:

- Manja mogućnost kontaminacije metala zavara volframom iz elektrode.
- Nema potrebe za čestim brušenjem elektrode zbog otkidanja i trošenja proizašlog zbog kontakta s osnovnim metalom.
- Povećana stabilnost procesa obzirom na promjenu visine plazmenog luka.
- Veća penetracija i mogućnost kontrole penetracije.
- Veća krutost luka.

- Veća brzina zavarivanja za istu jakost struje.
- Manji unos topline za istu penetraciju (u komparaciji s TIG postupkom) i manja širina ZUT-a).
- Manje deformacije.

S druge strane, oprema je skuplja i kompliciranija, održavanje je skuplje i mala je tolerancija na odstupanja u pripremi. Potrebno je podesiti znatno više parametara u odnosu na TIG što traži veće tehničko znanje i uvježbanost operatera (zavarivača). Potreba za dobrom pripremom svakako komplicira proizvodnju ali istovremeno omogućuje zavarivanje bez dodatnog materijala. Posebna prednost je zavarivanje tankih materijala.

Obzirom na mogućnosti izvedbe norma EN ISO 4063:2009 klasificira nekoliko varijanata plazma zavarivanja [5]:

- 151 Plazma MIG zavarivanje
- 152 Plazma zavarivanje praškom
- 153 Plazma zavarivanje s prenešenim lukom
- 154 Plazma zavarivanje s neprenešenim lukom
- 155 Plazma zavarivanje s djelomično prenešenim lukom.

Isto tako moguća je primjena plazme za rezanje, naštrcavanje, žlijebljenje i lemljenje.

2. RADNA PODRUČJA I PARAMETRI PLAZMA ZAVARIVANJA

Ovisno o struji zavarivanja razlikuje se nekoliko radnih područja koja su karakteristična po načinu zavarivanja i debljini materijala. Tu se u literaturi definiraju područja mikroplazma zavarivanja (1 do 15 A), plazma zavarivanja taljenjem (do 100 A) i plazma zavarivanja protaljivanjem tj. "ključanicom" (eng. Keyhole, njem. Stichloch) iznad 100 A. U tablici 1 dan je općeniti prikaz radnog područja i primjene plazma zavarivanja.

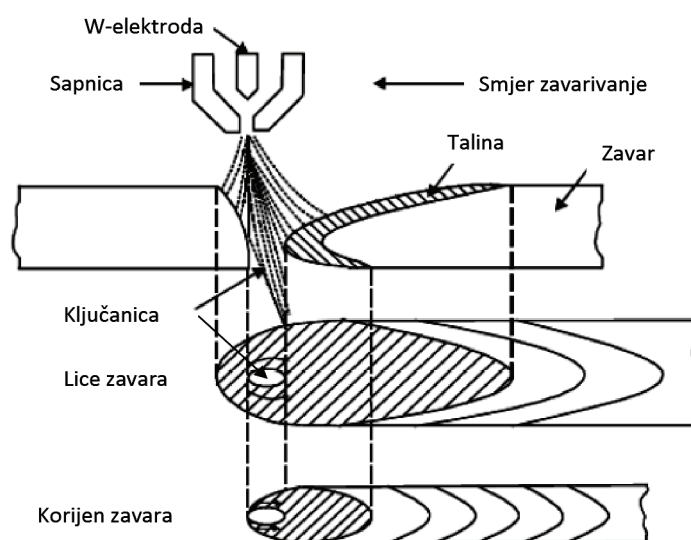
Tablica 1. Općeniti pregled radnog područja pri plazma zavarivanju

Jakost struje, A	Područje rada	
	Mikroplazma	Plazma i zavarivanje ključanicom
0,1 do 10	Folije 0,05 do 0,2 mm	-
1 do 20	Tanki limovi 0,2 do 0,5 mm	-
5 do 40	Tanki limovi 0,5 do 1 mm	-
40 do 100	-	Plazma zavarivanje 0,5 do 1,5 mm
100 do 200	-	Plazma zavarivanje 1,5 do 3 mm
100 do 350	-	Zavarivanje ključanicom 3 do 10 mm

U području zavarivanja mikroplazmom nerijetko se primjenjuju jako niske vrijednosti struje koje u kombinaciji s malim promjerom sapnice (npr. 0,6 mm) daju mogućnost zavarivanja tankih materijala. Zbog uskog područja djelovanja plazmenog luka potrebno je osigurati precizno vođenje kako bi se protaljivalo spojno područje. Takvo precizno zavarivanja je vrlo teško provesti ručno te se preferira strojno vođenje pištolja. Kod zavarivanja mikroplazmom dodavanje materijala je upitno zbog male količine topline i male količine taline te se većinom provodi bez dodatnog materijala.

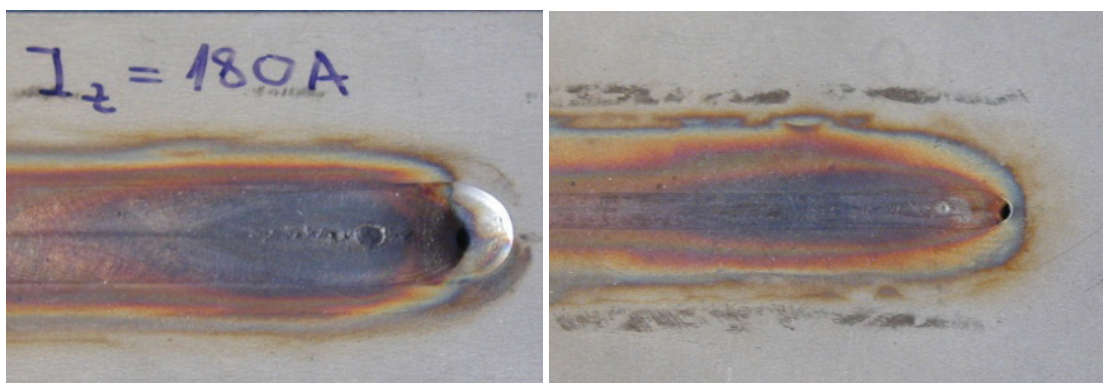
U srednjem području parametara (struje od 40 do 100 A) radi se o klasičnom zavarivanju taljenjem koje je vrlo slično TIG postupku te je moguća aplikacija ručnog zavarivanja. Dodavanje dodatnog materijala može biti ručno ili strojno.

Zavarivanje ključanicom je karakteristika plazma zavarivanja potpunim protaljivanjem gdje se u jednom prolazu dobiva kvalitetna penetracija bez potrebe za izradom žlijeba. Zbog karakteristike postupka (veće brzine, jaka struja) potrebno je mehanizirano vođenje. Kod zavarivanja ključanicom rastaljeni materijal rotira oko središnje rupice (tj. ključanice) nastale energijom plazmenog mlaza i solidificira iza smjera kretanja pištolja. Ovom tehnikom moguće je na debljinama materijala do 10mm dobiti zavar s punim provarom u jednom prolazu. Kod zavarivanja ovom tehnikom posebnu važnost ima i nagib pištolja tj. primjena lijeve i desne tehnike. Koncept zavarivanja ključanicom prikazan je na slici 2.



Slika 2. Shematski prikaz plazma zavarivanja "ključanicom" [1]

Slika 3 prikazuje oblik ključanice na Cr-Ni AISI 304 čeliku debljine 5mm pri čemu je struja zavarivanja iznosila 180A. Oblik ključanice na rubnom krateru se zadržava i nakon solidifikacije ako se ne programira posebna završna struja ili ne osigura izlazni komad.



Slika 3. Izgled ključanice na limu AISI 304 debljine 5 mm sa strane lica (lijevo) i korijena (desno) [6]



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:

- 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 pilot luka – najčešće do 10 A, 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 10 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 2–5 % vodika ili dušika ako se radi o duplex 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 lijevog i desnog nagiba 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 samnjivanjem 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 (1–2 m/min).

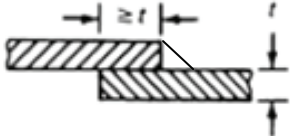
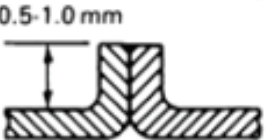

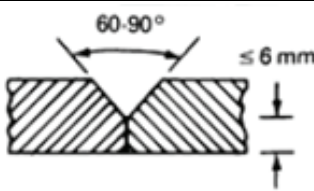
Samo optimalizirani parametri mogu osigurati stabilan proces i kvalitetno zavarivanje pa je ponekad potrebno napraviti veći broj proba kako bi se cjelokupni proces doveo u stanje

potrebno za industrijsku proizvodnju.

3. PRIPREMA SPOJEVA

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 tablici 2.

Tablica 2. Tipične pripreme spoja kod plazma zavarivanja

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.

4. EKSPERIMENTALNI RAD I PRIMJERI IZ PRAKSE

Zavarivanje ispitnih uzoraka provedeno je u Laboratoriju za zavarivanje Katedre za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje pri čemu je korišten inverterski izvor struje za plazma zavarivanje SBI 500 Varstroj s automatskim dodavanjem žice, slika 4.

Za plazmeni plin upotrijebljen je argon čistoće 5.0 dok je ovisno o osnovnom materijalu kao zaštitni plin korišten argon čistoće 4.8 ili mješavine argona i vodika kod zavarivanja CrNi čelika. Svi uzorci su zavareni mehaniziranim postupkom pri čemu su brzina zavarivanja i

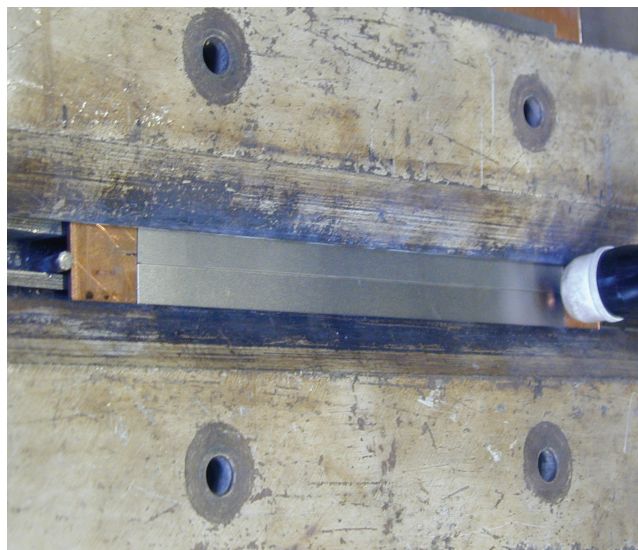
udaljenost sapnice od radnog komada bili konstantni.



Slika 4. Izvor struje za plazma zavarivanje SBI 500 Varstroj s dodavačem žice [6]

4.1. Zavarivanje lima CrNi čelika AISI 304 debljine 1mm

Za zavarivanje nehrđajućeg lima debljine 1mm kvalitete AISI 304 primijenjena je I priprema bez razmaka na bakrenoj podloški bez korijenske zaštite. Limovi su stegnuti čeljustima na udaljenosti 10 mm od zavara, slika 5.



Slika 5. Priprema pri zavarivanju CrNi čelika AISI 304 debljine 1 mm [6]

Primijenjeni su parametri zavarivanja kako slijedi :

1. Struja zavarivanja 72 A
2. Brzina zavarivanja 150 cm/min
3. Protok plazmenog plina 0,2 l/min
4. Protok zaštitnog plina 6 l/min (Ar+5 %H₂)
5. Promjer sapnice 1,8 mm
6. Udaljenost radnog komada od sapnice 2,5 mm.

Postignut je potpuni provar uz širinu zavara od 1,2 do 1,6 mm, slika 6.

Vidljivo je da na strani lica zavarenog spoja nema pretjeranog oksidnog pobojenja što je rezultat primjene vodika koji reducirajućim efektom smanjuje koncentraciju kisika u okolini zavarenog spoja.



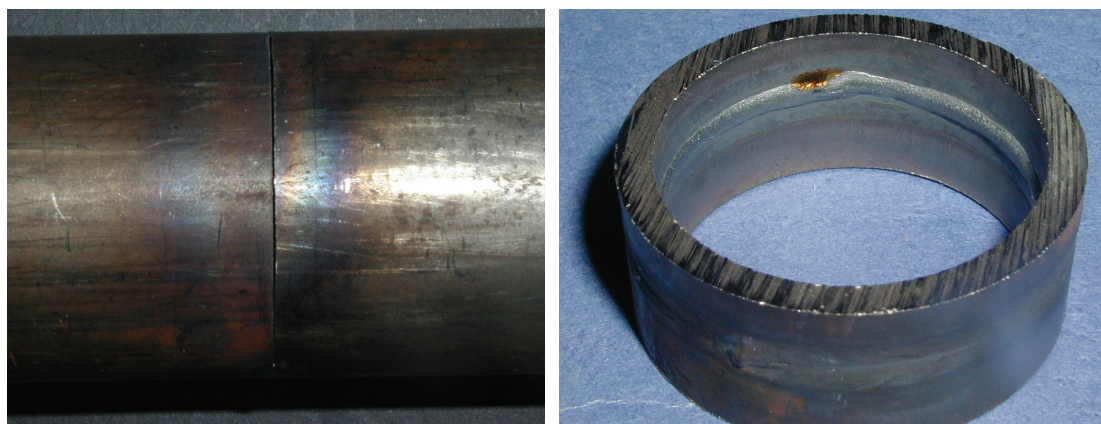
Slika 6. Izgled lica zavara; Cr-Ni čelika AISI 304 debljine 1 mm [6]

4.2. Zavarivanje cijevi 15Mo3 dimenzija 38×3 mm

Kod zavarivanja cijevi dimenzija 38×3 osnovnog materijala 15Mo3 napravljena je I priprema bez razmaka i bez osiguranja korijenja, slika 7. Zavarivanje je provedeno u 1 prolazu bez dodavanja dodatnog materijala.

Primijenjeni su parametri zavarivanja kako slijedi:

1. promjer sapnice: 2,8 mm
2. protok plazmenog plina: 1,2 l/min
3. protok zaštitnog plina: 10 l/min
4. udaljenost radnog komada od sapnice: 2,5 do 3 mm
5. nagib pištolja: 90°, PA položaj uz rotaciju cijevi
6. struja zavarivanja: 110 A
7. brzina zavarivanja: 24 cm/min.



Slika 7. Pripremljena cijev za zavarivanje i izgled zavarenog spoja [6]

Dobivena je potpuna penetracija pri čemu je nadvišenje korijena do 0,4 mm. Širina lica zavara je 5 do 6 mm. Važno ja naglasiti da su probe pokazale da je s ovim parametrima moguće dobiti zavar s potpunom penetracijom i na I pripremi razmaka do 1 mm ali postoji rizik od protaljivanja. Ako se uzme manji promjer sapnice dobije se uži zavar ali znatno pada tolerancija na razmak I pripreme tj. čim se otvori mali zazor dolazi do protaljivanja. Za ove debljine moguće ja na limu postići i veću brzinu u PA položaju ali kod cijevi zbog centrifugalnog efekta na talinu dolazi do nestabilnosti procesa tako da je u ovom slučaju važno pratiti dinamiku taline koja diktira tempo zavarivanja.

4.3. Impulsno mikroplazma zavarivanje Cr-Ni čelika AISI 316 Ti-primjer iz prakse

Za zavarivanje jako tankih materijala i sitnih komponenti u proizvodnji mjernih elemenata primijenjeno je mikroplazma impulsno zavarivanje. Programiranje impulsnog oblika koji će dati zadovoljavajući oblik i geometriju zavarenog spoja vrlo je složeno jer je potrebno odrediti kombinaciju osnovne i vršne struje i frekvencije.

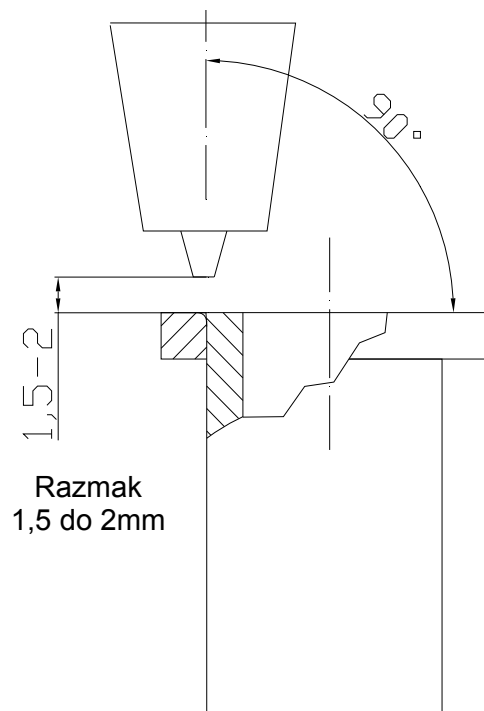
Zavarivano je bez dodatnog materijala, u PA položaju uz rotaciju. Dimenzije prstena su 12×1 mm (unutarnji promjer 9 mm). Kvaliteta osnovnog materijala je AISI 316 Ti (1.4571). Srednja struja kod impulsnog plazma zavarivanja je u ovom slučaju iznosila 6 do 7 A.

Parametri zavarivanja za ovaj konkretni primjer definirani su kako slijedi:

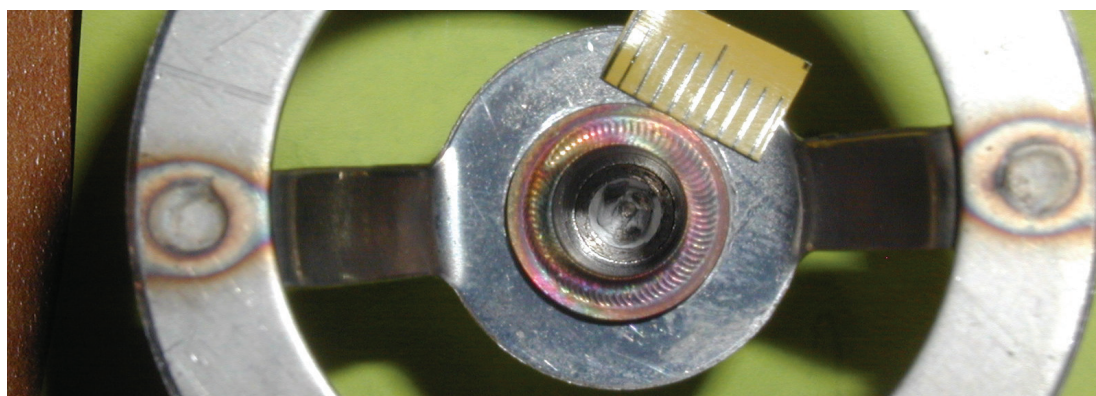
1. elektroda WT20 promjera 1mm
2. struja impulsa: 59 A
3. osnovna struja: 8 % struje impulsa, 4,72 A
4. vrijeme pulsa: 24 % periode, 30 ms
5. frekvencija: perioda 125 ms, 8 Hz
6. širina sapnice za zaštitni plin: 9,5mm
7. širina plazmene sapnice: 1,0 mm
8. vrijeme pretprotoka plina: 0,1 s
9. intenzitet početne struje: 100 %
10. vrijeme uspona struje: 0 s
11. vrijeme spuštanja struje: 2,5 s
12. intenzitet završne struje: 6 %
13. postprotok plina: 5 s
14. udaljenost sapnice od radnog komada: 1,5 do 2 mm
15. plazmeni plin: argon 100 %, protok 0,25 do 0,3 l/min
16. zaštitni plin: argon+ 6 % H₂, protok 6 do 6,5 l/min.

Prije zavarivanja potrebno je proći po putanji spoja kako bi se utvrdilo eventualno odstupanje od kružnosti te spriječilo nejednoliko protaljivanje prstena i cijevi, slika 8. Plazmeni luk mora podjednako zahvaćati prsten i unutarnju cijev kako bi se dobio odgovarajući spoj.

Makroizbrusak ukazuje da je dobiven homogeni zavar bez poroziteta uz kontroliranu penetraciju do 0,5 mm. Jedini zahtjev za ovaj zavar je mehanička čvrstoća i nepropusnost. Odmaščivanje i kvalitetna priprema prije zavarivanja svakako su bitan preduvjet za postizanje kvalitetnog spoja. Sama geometrija spoja nije karakteristična za plazmu koja daje duboku i usku penetraciju ali ilustrira mogućnosti upravljanja penetracijom kod specifičnih zahtjeva.



Slika 8. Pozicioniranje pištolja u odnosu na radni komad



Slika 9. Izgled i makroizbrusak zavarenog spoja načinjenog mikroplazma impulsnim zavarivanjem [6]



5. ZAKLJUČAK

Moderni izvori struje i pripadajuća oprema za plazma zavarivanje uz odgovarajući stupanj automatizacije mogu bitno poboljšati produktivnost i kvalitetu zavarivanja. U usporedbi s TIG-om moguće je dobiti veću brzinu i veću penetraciju uz manje defomacije ali se svakako više pažnje mora posvetiti pripremi spoja. Sve češća primjena niklenih legura i visokolegiranih čelika uz zahtjeve za visokom kvalitetom zavara stavlja plazmu u primarni izbor iako ni aplikacija kod nelegiranih i niskolegiranih čelika nije nemoguća. Međutim, ako se kod nelegiranih čelika zavaruje bez dodatnog materijala vrlo često mehanička svojstva mogu biti upitna jer nema pozitivnog utjecaja dodatnog materijala koji poboljšava strukturu i kvalitetu metala zavara. Posebno oprezno treba pristupiti uvođenju plazme i kroz edukaciju operatera/zavarivača jer postoji cijeli niz parametara za podešavanje koji utječu na stabilnost procesa. Ako operater nije u stanju prepoznati problem i poremećaj u radu primjena cijelog sustava postaje upitna. Relativno složeni sustav za plazma zavarivanje traži veći angažman pri uvođenju u proizvodnju ali ako se pravilno aplicira koristi su višestruke.

6. LITERATURA

- [1] SFI Aktuell, Schweissprozesse, DVS Verlag 2008.
- [2] R. W. Messler, Principles of welding, Wiley VCH Verlag GmbH , ISBN-13: 978-0-471-25376-1, 2004.
- [3] ASME Handbook, Welding, Brazing and Soldering, Vol.6, ISBN 0-87170-377-7(V.1), ASM International, 1993.
- [4] P. Lahti, Plasma welding aluminium, Svetsaren No3., 1999.
- [5] EN ISO 4063-2009: Welding and allied processes – Nomenclature of processes and reference numbers (ISO 4063:2009)
- [6] Arhiva Laboratorija za zavarivanje FSB, Sveučilišta u Zagrebu.
- [7] SBI Plasma Multinverter PMI 500 V2.1 Operating Instructions, Issue 08, September 2007.