

MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA – UTJECAJ ZAŠTITNIH PLINOVA

GMAW welding process – influence of shielding gasses

Ivan Samardžić¹, Marko Horvat², Dražen Brezovečki³, Veljko Kondić²

¹ Sveučilište J. J. Strossmayer u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu,

² Sveučilište Sjever - Sveučilišni centar Varaždin, Odjel za strojarstvo,

³Bajkmont d.o.o., Sesvete

Ključne riječi: MIG/MAG postupak zavarivanja, zaštitni plinovi i mješavine

Sažetak

U radu su prikazane osnove MIG/MAG postupka zavarivanja, prednosti i nedostaci. Dane su osnovne fizikalne značajke zaštitnih plinova u zavarivanju te opisi najvažnijih plinova i čestih mješavina. U praktičnom dijelu prikazan je utjecaj zaštitnih plinova i mješavina na geometriju zavarenih spojeva.

Keywords: GMAW welding process, Shielding Gases and Blends

Abstract

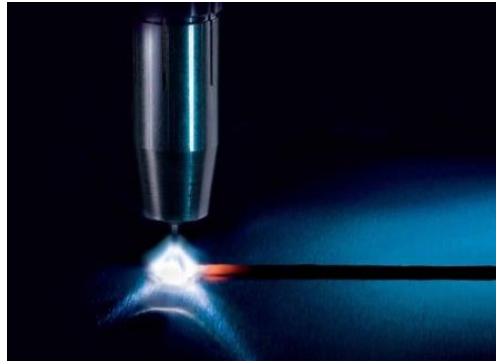
This paper presents the basics of MIG / MAG welding, advantages and disadvantages. There are given basic of physical properties of shielding gases and descriptions of the most important gases and common blends. The practical part shows the influence of shielding gases and blends on the geometry of welded joints.

1. Uvod

MIG/MAG postupak zavarivanja jest postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog ili aktivnog plina (MIG – Metal Inert Gas, MAG – Metal Active Gas) ili plinskih mješavina. [1-6] Razvoj ovog postupka zavarivanja kreće u 40-tim godinama 20. stoljeća, a zahvaljujući nizu prednosti koje ovakav način zavarivanja omogućava, danas se svrstava u jedan od najzastupljenijih postupaka zavarivanja. [4] Također, razvoj MIG/MAG postupka zavarivanja i dalje je aktivan, prvenstveno kroz razvoj izvora struje za zavarivanje, tj. modifikaciju prijenosa rastaljenog materijala na radni komad (modificirani postupci MIG/MAG postupka zavarivanja). [4]

2. Osnovne karakteristike MIG/MAG postupka zavarivanja

Kako navode izvori [1-6], prema definiciji, konvencionalni MIG/MAG postupak zavarivanja je elektrolučni, poluautomatski postupak zavarivanja kod kojeg se električni luk uspostavlja između taljive (kontinuirane) elektrode u obliku žice i radnog komada u krugu istosmjerne struje (elektroda u pravilu na + polu). Postupak zavarivanja se odvija u zaštitnoj atmosferi plinova (inertni, aktivni, mješavine).



Slika 2 MIG/MAG postupak zavarivanja – električni luk [1]

Osnovne prednosti MIG/MAG postupka zavarivanja:

- mogućnost zavarivanja širokog spektra materijala različitih debljina
- jednostavna i lako dostupna oprema za zavarivanje
- visoka iskoristivost dodatnog materijala (93-98%)
- visoka učinkovitost postupka zavarivanja u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- manji utjecaj operatera (zavarivača) na proces zavarivanja
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- odličan izgled zavarenih spojeva
- manji unos topline u usporedbi s drugim zavarivačkim postupcima
- lako i brzo čišćenje zavarenih spojeva, minimalno prskanje
- nizak unos vodika u metal zavara (uglavnom manje od 5ml/100g metala zavara)
- stvaranje manje količine zavarivačkih plinova
- niža cijena dodatnih materijala i općenito niža cijena zavara po jedinici dužine u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- manje deformacije osnovnih materijala u slučajevima primjene suvremenih MIG/MAG postupaka
- jednostavna automatizacija procesa
- mogućnost primjene i za lemljenje [1]

Osnovna ograničenja MIG/MAG postupka zavarivanja:

- manji toplinski input kod prijenosa metala kratkim spojevima – zavarivanje samo tanjih materijala
- veći toplinski input kod prijenosa metala štrcajućim lukom – zavarivanje samo debljih materijala
- nemogućnost zavarivanja u prisilnim zavarivačkim položajima prilikom upotrebe aksijalnog prijenosa metala štrcajućim lukom
- potreba za primjenom skupljih zaštitnih plinova kod prijenosa metala štrcajućim lukom (mješavine zaštitnih plinova na bazi Ar, osjetno su skuplje od čistog CO₂)
- mogućnost pojave pogrešaka u zavarenim spojevima kod terenskih radova zbog vanjskih utjecaja
- problemi kod dovođenja dodatnog materijala (žice) kod zavarivanja aluminija i aluminijских legura
- prskanje kod prijenosa metala kratkim spojevima, gubitak istog i potreba za dodatnim čišćenjem
- složenost uređaja i opreme za zavarivanje [1]

Osnovni mehanizam koji se odvija u postupku MIG/MAG zavarivanja je mehanizam prijenosa metala. Mehanizmi prijenosa metala generalno se dijele na:

- prijenos metala slobodnim letom
 - štrcajući luk
 - pulsirajući luk
- prijenos metala premošćivanjem
 - kratki spojevi
 - mješoviti luk
- prijenos metala strujama velike gustoće. [1-6]

Način prijenosa metala je posljedica sila koje djeluju u električnom luku (sila gravitacije, elektromagnetska sila, sila površinske napetosti, sile plazme električnog luka, reaktivne sile, sile eksplozije kapljica metala) što u konačnici ovisi o:

- osnovnim parametrima zavarivanja (jakost električne energije, napon električnog luka, duljina slobodnog kraja žice, brzina žice...)
- dodatnom materijalu (puna žica, praškom punjena žica, promjer žice...)
- vrsti zaštitne atmosfere. [1]

3. Zaštitni plinovi kod MIG/MAG ZAVARIVANJA - karakteristike

Odabir vrste zaštitnog plina kod MIG/MAG zavarivanja ima značajan utjecaj na zavareni spoj, što se manifestira kroz:

- geometriju zone taljenja i zone utjecaja topline
- tvrdoću zavarenog spoja i zone utjecaja topline
- prijelazne vrijednosti jakosti struje i napona električnog luka
- izgled zavarenog spoja. [1]

Kako navodi izvor [1], prilikom odabira vrste zaštitnog plina potrebno je uključiti slijedeće čimbenike:

- vrsta dodatnog materijala
- zahtijevana mehanička svojstva zavarenog spoja
- debljina osnovnog materijala
- zahtijevani oblik zavarenog spoja
- stanje osnovnog materijala
- mehanizam prijenosa materijala
- položaj zavarivanja
- priprema zavarenog spoja
- zahtijevani oblik penetracije zavarenog spoja
- zahtijevani izgled zavarenog spoja
- troškovi.

Utjecaj zaštitnih plinova na spomenute značajke zavarenog spoja ovise o fizikalnim svojstvima plinova. U zavarivanju najvažnija su slijedeća svojstva:

- ionizacijski potencijal
- toplinska vodljivost
- disocijacija i rekombinacija
- kemijska reaktivnost
- gustoća plina, čistoća plina. [1]

3.1 Ionizacija i ionizacijski potencijal

Općenito, ionizacija je nastajanje električki nabijenih čestica, iona, iz neutralnih atoma ili molekula. Najmanja za to potrebna energija je energija ionizacije (ionizacijski potencijal), tj. energija koja je dovoljna da izolirani atom ili molekula u plinovitom stanju izgube jedan elektron, pri čemu nastaje ionski par, tj. energija ionizacije mjera je sposobnosti nekog kemijskog elementa da ulazi u kemijske reakcije uz stvaranje iona. [8] Do ionizacije u ovome slučaju dolazi u stupu električnog luka, a općenito gledano, veća molekulska masa osigurava i manji ionizacijski potencijal (privlačne sile vanjskih elektrona obrnuto su proporcionalne kvadratu udaljenosti od jezgre). Npr., Argon (inertni plin, 18 elektrona) ima ionizacijski potencijal 15,7eV, što je znatno manje od njemu srodnog plina He (inertni plin, 2 elektrona) sa ionizacijskim potencijalom od 24,5 eV. U praksi to znači slijedeće: potrebne su veće vrijednosti napona i jakosti struje za ionizaciju helija u usporedbi s argonom, zbog načina ionizacije zavarivanje helijem dati će veći toplinski input, zbog niskog ionizacijskog potencijala i lakše ionizacije zaštitni plin argon osigurava lakšu uspostavu električnog luka i njegovu stabilnost. [1, 9, 10]

3.2 Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost plina je sposobnost provođenja topline. Toplinska vodljivost plina u električnom luku važna je iz dva razloga. Prvo, osigurava prijenos topline na radni komad, tj. taljenje osnovnog materijala. Drugo, definira geometriju električnog luka i distribuciju prenesene topline. Npr., argon, plin sa manjom vrijednošću toplinske vodljivosti, osigurava električni luk sa koncentriranom toplinom u jezgri luka i vanjskom hladnom zonom, a što će utjecati direktno i na geometriju penetracije (uska penetracija). [1, 9, 10]

3.3 Disocijacija i rekombinacija

Disocijacija se odnosi na razlaganje molekula (npr. O₂, CO₂, H₂...) uslijed visokih temperatura u stupu električnog luka na atome. Ti se atomi pak mogu ionizirati i djelovati na strujni tok luka. Takvi atomi koji nastaju disocijacijom dolaze u kontakt s osnovnim materijalom čija je temperatura u odnosu na električni luk znatno manja te dolazi do rekombinacije (stvaranja molekula) i oslobođenja topline koja sudjeluje u procesu taljenja osnovnog materijala. Ovo vrijedi samo za plinove koji se pojavljuju kao molekule, što u praksi znači da pri jednakim temperaturama u stupu električnog luka, ukoliko se koriste plinovi u obliku molekula dati će veće količine energije za taljenje osnovnog materijala. [1, 9, 10]

3.4 Kemijska reaktivnost

Kemijska reaktivnost očituje se kroz mogućnost reakcije plina (pri razvijenim temperaturama) s rastaljenim materijalom. Kod ove pojave očitu prednost imaju He i Ar (inertni plinovi), dok drugi plinovi imaju oksidirajuće (CO₂, O₂) ili reducirajuće (H₂) djelovanje. [1]

3.5 Gustoća i čistoća plinova

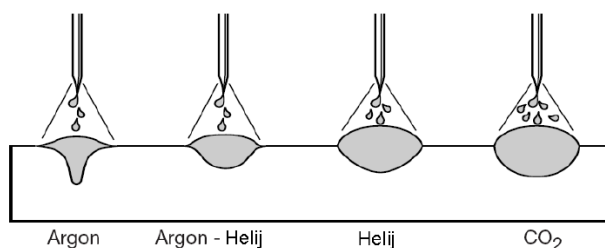
Gustoća plina je važno svojstvo plina koje djeluje na samu ulogu zaštite, ali i odabira položaja zavarivanja (protok plina). Važnost čistoće plina manifestira se kroz mogućnost pojave pogrešaka u zavarenom spoju, izgled zavarenog spoja kao i na same parametre zavarivanja. [1, 9, 10]

4. Vrste zaštitnih plinova

4.1 Pregled osnovnih plinova

4.1.1 Argon

Argon je najčešće upotrebljiv inertni plin. Radi se jednoatomnom plinu bez boje, okusa i mirisa. Nižeg je ionizacijskog potencijala od helija, što mu omogućava lakšu uspostavu električnog luka te jaču fokusiranost električnog luka (na što utječe i svojstvo toplinske vodljivosti – prstoliki oblik penetracije, slika 2.). Koriste kao čisti ili kao komponenta u mješavinama. Podržava sve mehanizme prijenosa metala. [1, 9, 10]



Slika 2 Primjer - geometrija penetracije zavarenog spoja obzirom na korišteni zaštitni plin [1]

4.1.2 Helij

Kao i argon, helij je inertni plin koji se može koristiti kao čisti ili u mješavinama. Zbog visoke cijene u Europi je slabo zastupljen. Visoki ionizacijski potencijal osigurava veću energiju električnog luka pa je pogodan kod zavarivanja većih brzina i većih provara, toj karakteristici doprinosi i veća toplinska vodljivost koja daje širi električni luk. [1, 9, 10]

4.1.3 CO₂

Ugljik-dioksid je plin koji je inertan pri sobnim temperaturama, ali u anodnom području električnog luka dolazi do disocijacije čiji produkti reagiraju sa s talinom, ili se pak u katodnom području vraćaju u prvobitni oblik (rekombiniraju). Posljedica je veći toplinski input, što utječe na geometriju zavarenog spoja. Kao zaštitni plin može se koristiti samostalno (mehanizam prijenosa premoščivanjem) ili pak kao komponenta plinske mješavine. [1, 9, 10]

4.1.4 O₂

Kisik je plin bez boje i mirisa, neotrovan i nezapaljiv. Reagira gotovo sa svim elementima (osim inertnih plinova), a važna karakteristika je što podržava gorenje. U zavarivanju se ne koristi samostalno, već se dodaje u manjim postocima u plinske mješavine. Pozitivno utječe na stabilnost električnog luka i povećava žitkost taline. Također, smanjuje površinsku napetost (smanjuje veličinu rastaljene kapljice materijala), pospješuje njihovo stvaranje i pozitivno utječe na izgled zavarenog spoja. Povećava stabilnost luka. [1, 9, 10]

4.1.5 H₂

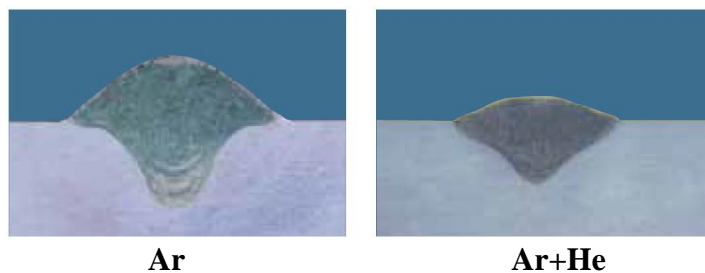
Vodik, kao i kisik, koristi se samo u plinskim mješavinama (do 5%), najčešće zbog velike toplinske vodljivosti koja osigurava dobro taljenje rubova i žitkost taline u primjeni kod zavarivanja nehrđajućih čelika i niklovih legura (slično djelovanje kao i O₂). Ovime omogućava i veću brzinu zavarivanja. [1, 9, 10]

4.2 Primjer najčešćih plinskih mješavina

Osim pojedinačnih plinova, zaštitnu atmosferu kod MIG/MAG zavarivanja mogu osiguravati i plinske mješavine. To su dvokomponentni, trokomponentni ili četverokomponentni sustavi zaštitnih

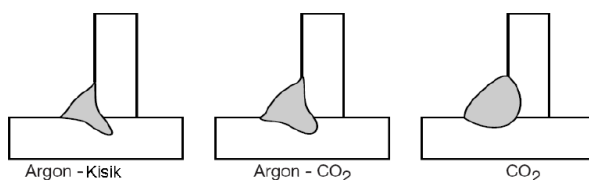
atmosfera kod kojih pojedina svojstva komponenata (plinova) osigurava specifična svojstva tražena u električnom luku koja će u konačnici rezultirati i kvalitetom zavarenog spoja. [1, 9, 10]

Najčešće dvokomponentne plinske mješavine su mješavine inertnih plinova argona i helija te argona i ugljičnog dioksida. Prve spomenute koriste se u različiti odnosima plinova (prevladava Ar ili prevladava He), a sve ovisno o željenim svojstvima zavarenog spoja. Veći udio argona osigurava užu penetraciju, veći udio helija jači toplinski input, zavarivanje debljih materijala i jače režime rada. Zajedničko im je da se uglavnom koriste za zavarivanje aluminija, bakra, nikla, magnezija i njihovih legura. [1, 9, 10]



Slika 4 Primjer geometrije zavarenog spoja: zaštitni plin AR, zaštitni plin Ar+He [9]

Dvokomponentne plinske mješavine sastavljene od argona i ugljičnog dioksida jesu mješavine koje se najčešće primjenjuju u praksi. Osnovno svojstvo im je da podržavaju (osiguravaju) sve mehanizme prijenosa materijala. Također, disocijacijom CO₂ dolazi do stvaranja O₂ koji, kako je već spomenuto, osigurava stabilniji luk i bolju žitkost taline. Najčešće su mješavine sa maksimalno 18% CO₂, što je i gornja granica udjela istog, koja osigurava prijenos metala štrcajućim lukom. Istovremeno, ovakva ekonomično prihvatljiva mješavina daje mogućnost rada na širokim rasponima debljina, daje dobru penetraciju, smanjuje se prskanje, a sprečava se i preveliki toplinski input i mogućnost pregaranja osnovnog materijala, slika 4. [1, 9, 10]



Slika 4 Primjer utjecaja korištene plinske mješavine na geometriju zavarenog spoja [1]

Od dvokomponentnih mješavina valja istaknuti mješavinu argona i niskog udjela kisika koja se koristi kod većeg spektra materijala, a kisik osigurava veći toplinski input, stabilnost luka, veće brzine zavarivanja i sl. Mješavine argona i vodika (do 3% H), osim utjecaja na geometriju spoja osiguravaju i reducirajuću atmosferu što povoljno utječe na izbjegavanje pojave oksida. Dvokomponentne mješavine argona i dušika, kao i dušika i vodika mogu imati povoljan utjecaj na stvaranje pojedinog tipa mikrostrukture. [1, 9, 10]

Trokomponentne plinske mješavine koriste se za zavarivanje konstrukcijski (ugljičnih) čelika, ali i kod korozijski postojanih čelika. Najčešće su to mješavine He/Ar/CO₂, Ar/He/CO₂, Ar/CO₂/O₂ i Ar/He/O₂. Četverokomponentne plinske mješavine koriste se kod visokoproduktivnih MAG postupaka. [1, 9, 10]

5. Utjecaj zaštitnih plinova na geometriju zavarenog spoja

Temeljem prikazanih izlaganja izvršeno je zavarivanje (navarivanje) čelika S355 (d=12mm) na probnim pločama uređajem EWM Phoenix 351 Concept. Pri tome, zavarivanje je izvršeno mehanizmom prijenosa metala kratkim spojevima, štrcajućim lukom ("spray arc") i modificiranim štrcajućim lukom tvrtke EWM – forceArc-om. Korištene su različite plinske mješavine i čisti plinovi. Plinske mješavine izabrane su prema odabiru najčešće upotrebljavanih i na tržištu prisutnih mješavina

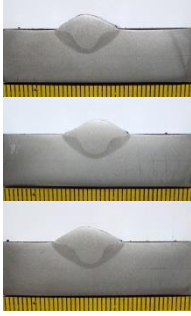
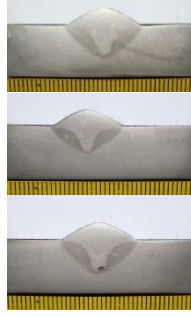
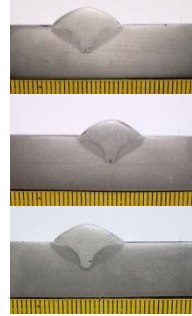
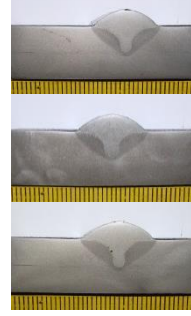
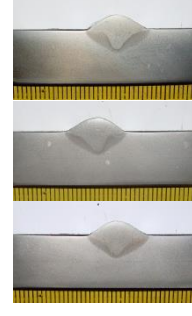
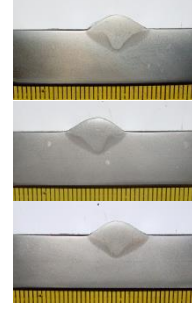
te prema mogućnosti osiguranja pojedinih mehanizama prijenosa metala u električnom luku. Parametri zavarivanja i plinske mješavine dane su u slijedećoj tablici.

Tablica 1 Prikaz parametara zavarivanja i korištenih plinskih mješavina na ispitnim pločama

OSNOVNI PARAMETRI ZAVARIVANJA I PLINSKE MJEŠAVINE												
Uredaj:	EWM Phoenix 351 Concept – KRATKI SPOJ/ŠTRCAJUĆI LUK						EWM Phoenix 351 Concept – FORCE ARC					
Tip zaštitnog plina:	CO ₂ 100%	Ar 100%	Ar + CO ₂ (82% +18%)	Ar + CO ₂ (92% +8%)	Ar + O ₂ + CO ₂ (90% + 5% + 5%)	Ar + O ₂ + CO ₂ (86% + 2% + 12%)	CO ₂ 100%	Ar 100%	Ar + CO ₂ (82% +18%)	Ar + CO ₂ (92% +8%)	Ar + O ₂ + CO ₂ (90% + 5% + 5%)	Ar + O ₂ + CO ₂ (86% + 2% + 12%)
Oznaka uzorka:	1	-	3	4	5	6.	-	-	8	9.	10	11
Jakost struje zavar.: I [A]	290	x	300	310	325	290	x	x	310	315	310	305
Napon zavar.: U [V]	33,3	x	30,5	28,2	28,2	29,8	x	x	29,4	28,6	27	29,2
Brzina žice: v _z [m/min]	18	x	16,2	18	18	16,2	x	x	18,6	18,2	18	18
Vrijeme zavarivanja: t _z [s]	28	x	30	29	29	26	x	x	26	26	27	24
Brzina zavarivanja: v _z [m/min]	7,14	x	6,67	6,90	6,90	7,69	x	x	7,69	7,69	7,41	8,33
Ef. topl. input (η = 0,8) : E _{ef} [J/mm]	1082,02	x	1097,45	1013,57	1062,60	899,04	x	x	948,14	937,21	903,64	855,31

Nakon zavarivanja, navarene ispitne pločice su rezane, brušene, polirane te je izvršeno nagrizanje (Nital, 5%) u svrhu promatranja geometrije penetracije, mjerenja površine zone taljenja (zavareni spoj/ugar) te dubine penetracije. Mjerenja su izvršena na tri uzorka iz svake skupine. Dobivenu rezultati dani su u tablici 2.

Tablica 2: Prikaz makroizbrusaka, površine zavarenog spoja/uvara i dubine penetracije (sa prikazom srednjih vrijednosti rezultata):a) kratki spoj/štrcajući luk, b)forceArc

Uredaj:	EWM Phoenix 351 Concept – KRATKI SPOJ/ŠTRCAJUĆI LUK											
Tip zaštitnog plina:	CO ₂ 100%		Ar 100%		Ar + CO ₂ (82% +18%)		Ar + CO ₂ (92% +8%)		Ar + O ₂ + CO ₂ (90% + 5% + 5%)		Ar + O ₂ + CO ₂ (86% + 2% + 12%)	
Oznaka uzorka:	1		-		3		4		5		6.	
Makroizbrusak uzorka: (1, 2,3):												
Površina poprečnog pr. zavarenog spoja : A ₁ [mm ²]	55,65	62,23			78,81	71,67	67,16	64,59	63,59	66,32	49,77	49,34
	62,91				60,29		60,47		65,30		48,68	
	68,12				75,93		67,22		70,09		49,57	

Površina poprečnog presjeka uvara: A ₂ [mm ²]	30,83	32,90			38,83	35,41			29,12	28,83			27,89	29,08			22,60	24,20
	32,79				27,68				28,59				28,50				24,82	
	35,10				39,73				28,78				30,87				25,19	
Dubina penetracije: P ₁ [mm ²]	4,45	4,65			6,85	6,59			5,82	5,74			6,10	6,01			4,44	4,48
	4,69				5,77				5,76				5,67				4,63	
	4,83				7,15				5,65				6,27				4,31	

a)

Uredaj:	EWM Phoenix 351 Concept – FORCE ARC													
Tip zaštitnog plina:	CO ₂ 100%	Ar 100%	Ar + CO ₂ (82% +18%)			Ar + CO ₂ (92% +8%)			Ar + O ₂ + CO ₂ (90% + 5% + 5%)			Ar + O ₂ + CO ₂ (86% + 2% + 12%)		
Oznaka uzorka:	-	-	8			9			10			11		
Makroizbrusak uzorka: (1, 2,3):														
	Površina poprečnog pr. zavarenog spoja : A ₁ [mm ²]			63,42	62,94	71,50	70,61	59,35	62,26	60,68	63,83			
				57,66		72,31		69,41		67,34				
			67,74	68,02		58,02		63,49						
Površina poprečnog presjeka uvara: A ₂ [mm ²]			29,09	27,96	32,59	32,05	25,09	26,73	27,83	20,56				
			22,80		33,56		28,89		31,90					
			31,99		30,00		26,23		29,78					
Dubina penetracije: P ₁ [mm ²]			6,39	6,08	6,43	6,40	5,68	5,96	5,65	5,85				
			5,02		6,46		6,49		5,88					
			6,83		6,33		5,72		6,02					

b)

6. Zaključak

Vizualnim promatranjem makroizbrusaka nakon izvršenih ispitivanja (konvencionalni mehanizmi prijenosa metala – kratki spoj/štrcajuću luk, tablica 2. a)) vidljiv je dominantan utjecaj vrste plinske mješavine na geometriju zavarenog spoja. Promjene u oblicima zone taljenja odgovaraju teoretskom izlaganju: ugljični-dioksid utječe na toplinski input što za posljedicu daje širi oblik zone taljenja, dok argon ako zaštitni plin suzuje zonu uvara i daje joj "prstoliki" oblik. Vidljiv je i utjecaj kisika (utjecaj na penetraciju kada se koriste trokomponentne mješavine).

Rezultati ispitivanja primjenom modificiranog prijenosa metala, tzv. forceArc, daju rezultate sličnih vrijednosti iz razloga što se radi o mehanizmu prijenosa metala koji svojim modifikacijama utječe upravo na penetraciju, a izvodi se isključivo sa plinskim mješavinama (radi se o modifikaciji štrcajućeg luka) pa su rezultati ispitivanja sa 100% reaktivnim plinom isključeni. Prikazano ispitivanje zorno prikazuje utjecaj plinske mješavine na zavareni spoj, ali za daljnje zaključke oko upotrebe različitih plinskih mješavina (ili čistih plinova) na konstrukcijskim čelicima potrebno je u ispitivanje uključiti i utjecaj troškova zaštitnih atmosfera te svakako položaja zavarivanja. Za daljnja ispitivanja preporučuje se upotreba i drugih plinskih mješavina i smanjenje utjecaja zavarivača (automatsko zavarivanje).

7. Literatura

- [1] Lincoln Electric Company: GMAW Welding, Cleveland, Ohio, 2006.
[2] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

- [3] Lukačević, Z.: Zavarivanje, Sveučilište Josip Juraj Strossmayer, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [4] Horvat M., Kondić V., Brezovečki D.: Opravdanost primjene MAG forcearc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik 8, 3(2014), 288-294
- [5] Kou, S.: Welding Metallurgy, John Wiley&Sons Inc., 2003.
- [6] Priručnik za zavarivanje – Elektroda Zagreb, Zagreb, 1987.
- [7] Horvat M., Kondić V., Dunder M, Samardžić I.: Zavarivanje cjevovoda modificiranim MIG/MAG postupcima, "Design, production and service of welded constructions and products", SBZ 2015., Slavonski brod, 2015.
- [8] <http://www.enciklopedija.hr>
- [9]http://www.linde-gas.com/internet.global.lindegas.global/en/images/Overview_of_shielding_gases_60734_1217_82202.pdf?v=3.0
- [10]http://www.linde-gas.com/internet.global.lindegas.global/en/images/Shielding_gases_for_carbon_and_low_alloy_steels%20_60848_1217_82203.pdf?v=3.0
- [11] <https://www.ewm-group.com/en/practical-knowledge/wallpapers.html>