Broj rada: 4.1
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.017

ISPITIVANJE UTICAJA TIG, TAG I ATIG POSTUPAKA NA GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE ZAVARENOG SPOJA OD AISI 304 NEHRĐAJUĆEG ČELIKA

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF TIG, TAG, AND ATIG WELDING PROCESSES ON THE GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS IN AISI 304 STAINLESS STEEL

Prof. Dr. Mersida Manjgo[1], Doc. Dr. Tomaž Vuherer[2] 0000-0002-1866-8266, Dr. Sc. Mirza Manjgo[2,3,*] 0009-0009-2944-0820

[1] Univerzitet "Džemal Bijedić" u Mostaru, Mašinski fakultet, 88000 Mostar, BiH
[2] Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2000 Maribor, Slovenija
[3] Aluminij Industries d.o.o., Odjel istraživanja i razvoja, 88000 Mostar, BiH

E-mail: mirza.manjgo@student.um.si

Rezime: U sektoru mašinske proizvodnje i građevinarstva, zavarivanje je osnovni postupak koji omogućava spajanje materijala radi izrade struktura i dijelova za različite primjene. Među brojnim tehnikama zavarivanja, postupak TIG (Tungsten Inert Gas) zavarivanja se izdvaja po svojoj sposobnosti da omogući visokokvalitetne i precizne zavare, posebno pri radu s nehrđajućim čelikom. Nehrđajući čelik se obično koristi u industrijama poput automobilske, avio industrije, petrohemijske i prehrambene zbog svoje odlične čvrstoće, otpornosti na koroziju i prilagodljivosti. U radu je provedeno ispitivanje zavarenih uzoraka od AISI 304 nehrđajućeg čelika, koji su zavareni različitim postupcima zavarivanja: TIG (Tungsten Inert Gas), TAG (Tungsten Active Gas) i ATIG (Activated Tungsten Inert Gas). Cilj rada je ispitati uticaj zavarivanja različitim postupcima i različitim unosom toplote na dimenzije zavarenog spoja.

Ključne reči: TIG zavarivanje, geometrije zavara.

Abstract: In the field of mechanical manufacturing and construction engineering, welding is a fundamental joining process that enables the fabrication of structures and components for a wide range of applications. Among the numerous welding techniques, the Tungsten Inert Gas (TIG) welding process stands out due to its ability to produce high-quality and precise welds, particularly when welding stainless steels. Stainless steel is widely used in industries such as automotive, aerospace, petrochemical, and food processing because of its excellent strength, corrosion resistance, and versatility. This study investigates welded specimens made of AISI 304 stainless steel produced using different welding processes: TIG (Tungsten Inert Gas), TAG (Tungsten Active Gas), and ATIG (Activated Tungsten Inert Gas). The aim of the study is to evaluate the influence of different welding processes and varying heat input levels on the dimensions and geometrical characteristics of the welded joint.

Key words: TIG welding, weld geometry.

1. UVOD

Austenitni nehrđajući čelici predstavljaju jednu od najvažnijih grupa konstrukcionih materijala zahvaljujući kombinaciji visoke otpornosti na koroziju, dobrih mehaničkih svojstava, duktilnosti i odlične zavarljivosti. Zbog navedenih karakteristika široko se primjenjuju u prehrambenoj, hemijskoj, petrohemijskoj, energetskoj, automobilskoj i procesnoj industriji, gdje se od zavarenih konstrukcija zahtijevaju visoka pouzdanost, dug radni vijek i otpornost u agresivnim eksploatacionim uslovima [1–3]. Najčešće korišteni materijal je AISI 304 zbog povoljnog odnosa cijene, mehaničkih svojstava i otpornosti na koroziju [1,4].

Kvalitet zavarenih spojeva od nehrđajućih čelika u velikoj mjeri zavisi od izbora postupka zavarivanja i procesnih parametara. Tokom zavarivanja dolazi do intenzivnih termičkih ciklusa koji uzrokuju promjene mikrostrukture, raspodjele zaostalih napona, deformacija i geometrije zavarenog spoja. Navedene promjene direktno utiču na mehanička svojstva, otpornost prema koroziji, zamornu izdržljivost i ukupni integritet zavarenih konstrukcija, zbog čega optimizacija procesa zavarivanja predstavlja jedno od najznačajnijih područja savremenih istraživanja [2,5].

Među postupcima elektrolučnog zavarivanja posebno mjesto zauzima TIG (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW), koji omogućava izradu visokokvalitetnih zavarenih spojeva uz stabilan električni luk, preciznu kontrolu procesa i minimalnu količinu metalurških nepravilnosti. Međutim, osnovni nedostatak konvencionalnog TIG postupka je relativno mala dubina penetracije i niža produktivnost u odnosu na druge postupke zavarivanja, što je uslovilo razvoj različitih modifikacija s ciljem povećanja efikasnosti procesa [5,6].

Jedna od najznačajnijih modifikacija je A-TIG (Activated TIG) postupak, kod kojeg se na površinu osnovnog materijala nanosi tanak sloj aktivirajućeg fluksa prije zavarivanja. Brojna istraživanja pokazala su da primjena odgovarajućeg fluksa može višestruko povećati dubinu penetracije, poboljšati odnos dubine i širine zavara te omogućiti zavarivanje debljih limova u jednom prolazu [6–8]. Pored A-TIG postupka, posljednjih godina pažnju istraživača privlači i primjena aktivnih komponenti u zaštitnom gasu (TAG), pri čemu kontrolisani dodatak aktivnih gasova utiče na karakteristike električnog luka, prenos toplote i formiranje zavarenog spoja, što može rezultirati povoljnijom geometrijom zavara i većom efikasnošću procesa [5,9].

Geometrijske karakteristike zavarenog spoja, uključujući širinu zavara, dubinu penetracije, visinu nadvišenja i površinu poprečnog presjeka, predstavljaju jedn od pokazatelja kvaliteta zavarivanja. Njihove vrijednosti zavise od primijenjenog postupka, procesnih parametara i unosa toplote, a direktno utiču na stepen razblaženja, raspodjelu napona i mehanička svojstva zavarenog spoja. Zbog toga analiza geometrije zavara predstavlja jedan od koraka pri optimizaciji procesa TIG, TAG i A-TIG zavarivanja [7–10].

Polazeći od navedenog, u ovom radu provedeno je eksperimentalno ispitivanje zavarenih spojeva od austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 304 izrađenih TIG, TAG i A-TIG postupcima zavarivanja. Cilj istraživanja bio je analizirati uticaj različitih postupaka zavarivanja i različitog unosa toplote na geometrijske karakteristike zavarenog spoja, s posebnim osvrtom na širinu zavara, dubinu penetracije, visinu nadvišenja i površinu poprečnog presjeka, radi utvrđivanja postupka kojim se postižu najpovoljnije dimenzije zavara.

2. EKSPERIMENT

Za eksperimentalne testove korišten je čelik AISI304 iz grupe nehrđajućih čelika. Hemijski sastav AISI304 prikazan je u Tabeli 1, a mehanička svojstva prikazana u Tabeli 2.

Tabela 1. Hemijski sastav AISI304 (mas. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0,07	1,00	2,00	0,045	0,03	8,00 – 10,50	17,50 – 19,50

Tabela 2. Mehanička svojstva AISI304

$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	E (GPa)	A_5 (%)	HR (HRB)
215	505 – 735	193 – 200	40 – 60	70 – 95

Kao materijal za punjenje odabran je TIG 19/9 NC Si. Tabela 3 prikazuje hemijski sastav TIG 19/9 NC SI, dok Tabela 4 prikazuje mehanička svojstva TIG 19/9 NC Si.

Tabela **Error! No text of specified style in document.**. Hemijski sastav dodatnog materijala TIG 19/9 NC Si (mas. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0,025	0,80	2,00	0 – 0.045	0 – 0.03	9,00	19,00	balans

Tabela 3. Mehaničku svojstva dodatnog materijala TIG 19/9 NC Si

$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	E (GPa)	A_5 (%)	HR (HRB)	HB (HBW)
400	580	193	40 – 50	85 – 95	170 – 200

U ovom istraživanju primijenjeni su TIG i A-TIG postupci zavarivanja, pri čemu je kao zaštitni gas korišten argon ili mješavina argona i helija. Argon osigurava stabilan električni luk i efikasnu zaštitu rastopljenog metala od atmosferske kontaminacije, dok dodatak helija povećava unos toplote, poboljšava penetraciju zavara i može povećati efikasnost procesa, posebno pri zavarivanju materijala veće toplinske provodljivosti. U Tabeli 5, Tabeli 6 i Tabeli 7 dati su parametri zavarivanja. Zavarivanje ploča dimenzija 100 mm x 100 mm i debljine 6 mm je obavljeno na Fakulteta za strojništvo u Mariboru pomoću robota za zavarivanje.

Tabela 4. Parametri zavarivanja za TIG process sa aktivnim gasom bez dodatnog materijala

Br. uzorka	Postupak	Vrsta gasa	Brzina zavar. (cm/min)	Protok gasa (l/min)	Napon (V)	Jačina struje (A)	Unos toplote (kJ/cm)
1	TIG + aktivni gas	Ar + H (7 %)	40	13	12	210	3,024
2	TIG + aktivni gas	Ar + H (7 %)	40	13	12	180	2,592
3	TIG + aktivni gas	Ar + H (7 %)	40	13	12	160	2,304
4	TIG + aktivni gas	Ar + H (7 %)	40	13	12	130	1,872

5	TIG + aktivni gas	Ar + H (7 %)	40	13	12	100	1,44
6	TIG + aktivni gas	Ar + H (7 %)	40	13	12	80	1,152

Tabela 5. Parametri zavarivanja za TIG + aktivni gas s dodavanjem dodatnog materijala

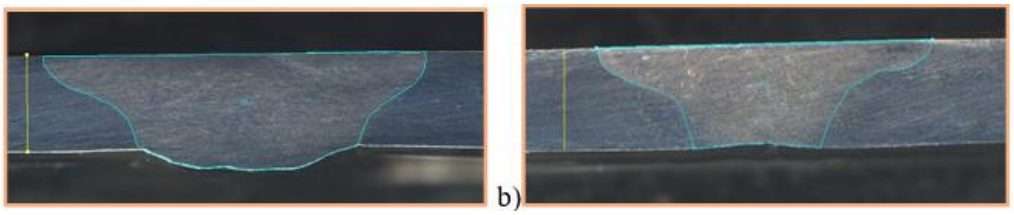
Br. uzorka	Postupak	Vrsta gasa	Brzina zavar. (cm/min)	Protok gasa (l/min)	Napon (V)	Jačina struje (A)	Unos toplote (kJ/cm)
7	TIG + aktivni gas	Ar + H (7 %)	40	13	12	210	3,024
8	TIG + aktivni gas	Ar + H (7 %)	40	13	12	210	3,024
9	TIG + aktivni gas	Ar + H (7 %)	40	13	12	180	2,592

Tabela 7. Parametri zavarivanja za TIG, ATIG i TIG + aktivni gas bez dodatnog materijala

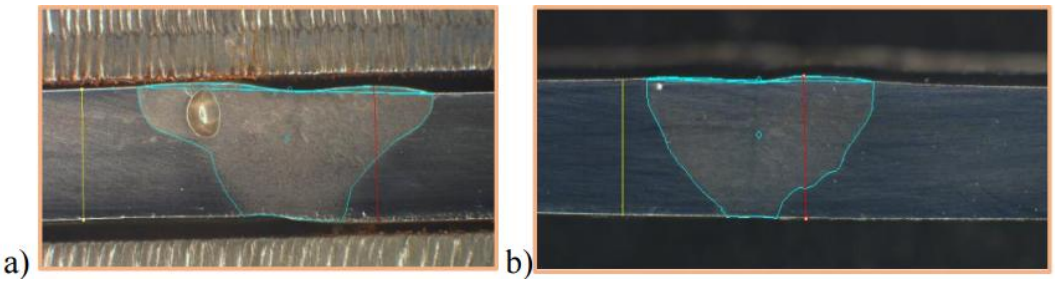
Br. uzorka	Postupak	Vrsta gasa	Brzina zavar. (cm/min)	Protok gasa (l/min)	Napon (V)	Jačina struje (A)	Unos toplote (kJ/cm)
10	TIG	Ar + H (7 %)	40	13	12	220	3,024
11	ATIG	Ar + H (7 %)	40	13	12	220	3,024
12	TIG + aktivni gas	Ar + H (7 %)	40	13	12	220	3,024
13	TIG + aktivni gas	Ar + H (7 %)	40	13	12	220	3,168

3. REZULTATI I DISKUSIJA

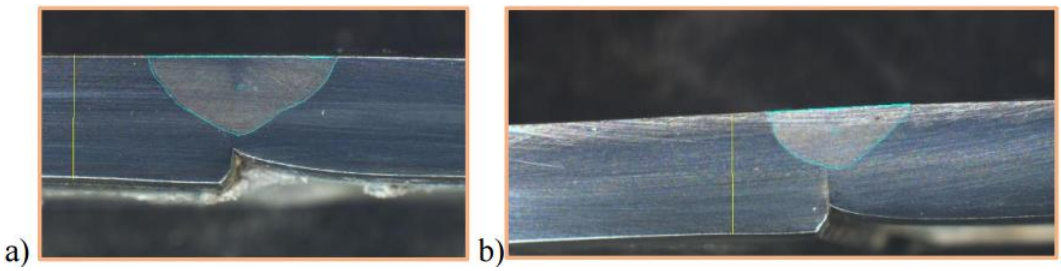
Na slikama od 1 do 6 prikazano je mjerenje u programu Digimizer, na osnovu kojih dobijamo potrebne rezultate koji su prikazani u Tabeli 8. Dimenzije pripremljenih uzoraka za ispitivanje su bile 80 mm x 40 mm sa debljinom oko 3 mm.



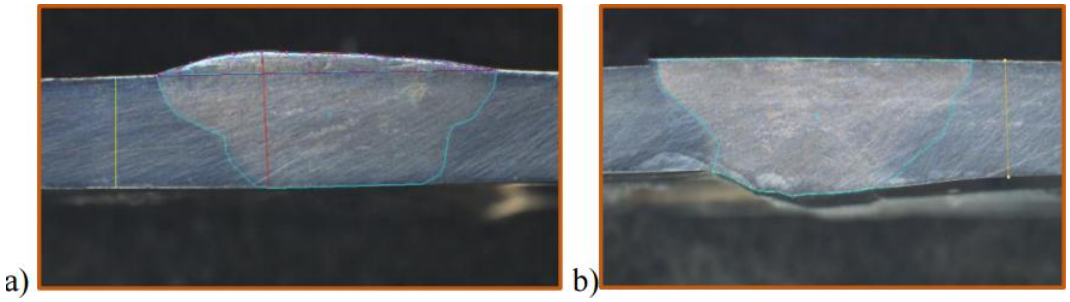
Slika 1. Makro uzorci zavarenog spoja (TAG, 93 % Ar + 7 % H_2 bez DM); a) zavareni spoj 1 (I = 210 A), b) zavareni spoj 2 (I = 180 A)



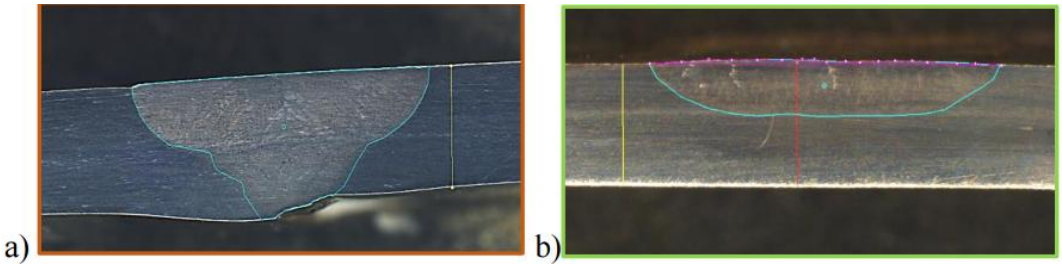
Slika 2. Makro uzorci zavarenog spoja (TAG, 93 % Ar + 7 % H_2 bez DM); a) zavareni spoj 3 (I = 210 A), b) zavareni spoj 4 (I = 180 A)



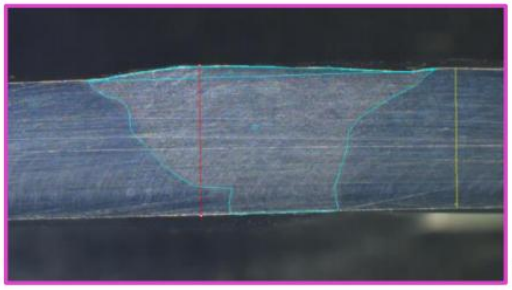
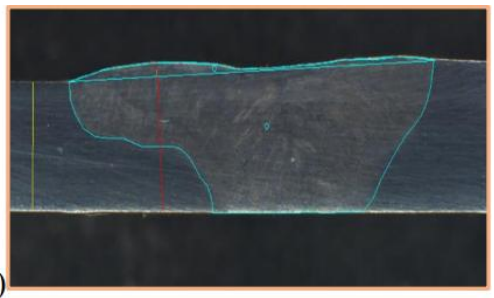
Slika 3. Makro uzorci zavarenog spoja (TAG, 93 % Ar + 7 % H_2 bez DM); a) zavareni spoj 5 (I = 210 A), b) zavareni spoj 6 (I = 180 A)



Slika 4. Makro uzorci zavarenog spoja (TAG, 93 % Ar + 7 % H_2 sa DM); a) zavareni spoj 7 (I = 210 A, vDM = 80 cm/min), b) zavareni spoj 8 (I = 180 A vDM = 120 cm/min)



Slika 5. Makro uzorci zavarenog spoja; a) zavareni spoj 9 (TAG 93 % Ar + 7 % H_2) I = 180 A, sa DM, vFM = 120 cm/min), b) zavareni spoj 10 (TIG, 100 % Ar, I = 220 A bez DM)

a)  b) 

Slika 6. Makro uzorci zavarenog spoja (93 % Ar + 7 % H_2); a) zavareni spoj 11 (I = 220 A, ATIG), b) zavareni spoj 12 (TAG without FM, I = 220 A)

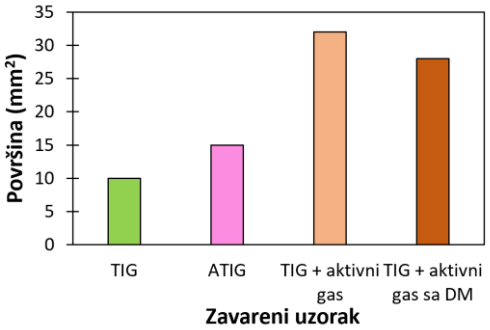
Tabela 8. Rezultati mjerenja geometrije zavara i stepena razrjeđenja

Broj uzorka	*u* (mm)	*b* (mm)	*h* (mm)	*t* (mm)	*A* (mm^2)	A_{ZM} (mm^2)	A_{OM} (mm^2)	*X* (%)
1	3,10	12,400	/	3,100	32,437	0	32,437	100
2	2,97	9,930	/	2,97	18,469	0	18,469	100
3	3,00	7,885	/	3,101	15,501	0	15,501	100
4	3,13	6,358	/	3,239	14,549	0	14,549	100
5	3,05	4,837	/	3,050	5,982	0	5,982	100
6	3,13	4,418	/	3,130	4,730	0	4,730	100
12	2,79	11,258	0,327	3,117	26,689	1.055	26,689	100
13	3,03	10,635	0,089	3,119	26,520	1,01	25,465	100
7	3,08	9,784	0,570	3,804	27,543	3,842	23,708	86,05
8	3,33	11,216	/	3,330	31,483	0	31,483	(100)
9	3,09	8,976	/	3,090	20,189	0	20,189	(100)
10	3,08	8,440	/	3,200	9,795	0	9,795	100
11	3,06	7,660	/	3,276	14,388	0	14,388	100

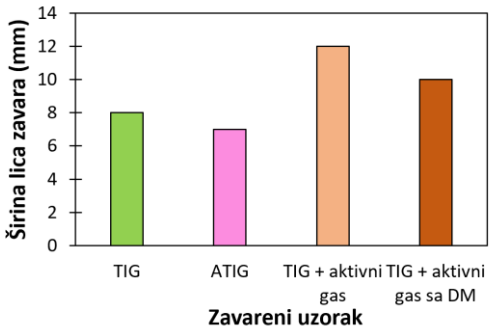
Legenda: ● TAG bez DM; ● TAG sa DM; ● TIG; ● ATIG; *u* – penetracija zavara; *b* – širina zavara; *h* – ojačanje zavara; *t* – debljina uzorka; *A* – ukupna površina zavara; A_{ZM} – Površina zavarenog dijela; A_{OM} – površina zavarivačkog metala; *X* – procenat zavarenosti.

Na dijagramu (slika 7) možemo vidjeti razlike između zavarivačkih procesa TIG, ATIG, TAG bez DM i TAG sa DM. Vidljivo je da TIG zavarivanje ima manji lokalni unos toplote, zbog čega ima i najmanju površinu istopljenog zavarivačkog metala (A). Najveće površine istopljenog zavarivačkog metala ostvarene su u TIG postupku zavarivanja sa aktivnim gasom, bez dodatnog materijala (DM), gdje se može primijetiti utjecaj vodonika u zaštitnom gasu (7 %) koji ima bolju toplinsku provodljivost i povećava lokalni unos toplote. U slučaju TIG zavarivanja s dodatnim materijalom (DM), dio toplote tokom zavarivanja koristi se za topljenje dodatnog materijala, zbog čega je manje lokalne toplote dostupno za topljenje osnovnog materijala. Kod ATIG zavarivanja, uslijed samog procesa i drugačijeg miješanja istopljenog materijala u zavarivačkom bazenu, dostupno je više lokalne toplote u odnosu na

TIG zavarivanje, ali manje nego kod TIG zavarivanja sa aktivnim gasom. Sličan efekat moguće je uočiti i u mjerenjima širine zavarivačkog lica, slika 8. Naime, najveća širina zavarivačkog lica može se izmjeriti na zavarenim spojevima izvedenim TIG zavarivanjem sa aktivnim gasom, dok je najmanja kod klasičnog TIG zavarivanja.

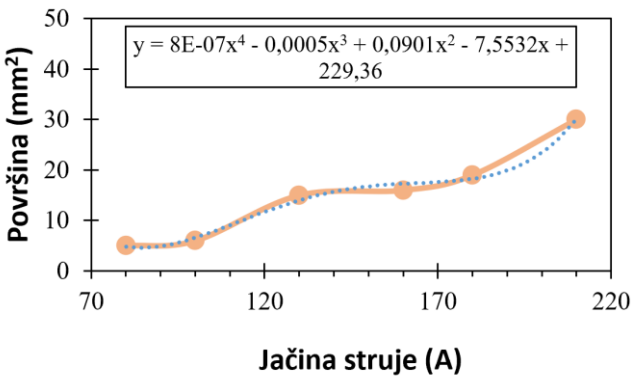


Slika 7. Razlike u površinama istopljenog zavarivačkog metala u makro presjeku između TIG (I = 220 A), ATIG (I = 220 A, TAG bez DM (I = 210 A) i TAG sa DM (I = 210 A, vDM = 80 cm/min)



Slika 8. Razlike u širini lica zavara TIG (I = 220 A), ATIG (I = 220 A, TAG bez DM (I = 210 A) i TAG sa FM (I = 210 A, vFM = 80 cm/min)

Veća struja zavarivanja, a samim tim i veći unos toplote, utječu na površinu rastopljenog zavarenog metala. Zavarivanje s manjom strujom može imati nekoliko prednosti, kao što su preciznost, smanjena veličina zone uticaja toplote (ZUT), veća sigurnost za zavarivače, ali je dubina penetracije znatno manja. Međutim, važno je napomenuti da zavarivanje s preniskom strujom, a posljedično i većim unosom toplote, može dovesti do slabih zavara zbog rasta zrna i smanjenja žilavosti, posebno u zoni uticaja toplote. Na slici 9 možemo vidjeti da se povećanjem struje sa 80 A na 210 A povećava i površina zavara (A), što ukazuje na to da veće struje generalno proizvode veće površine zavara. Struje oko 160 A omogućavaju znatnu površinu zavara (oko 15 mm²) uz vjerovatno manji rizik od pojave defekata koji se mogu javiti pri vrlo visokim strujama. Optimalna struja za TIG zavarivanje nehrđajućeg čelika, kada se gleda maksimalna površina zavara, iznosi oko 210 A. Ipak, uzimajući u obzir mogućnost pojave defekata pri vrlo visokim strujama, nešto manja struja od oko 160 A može ponuditi bolji balans između površine zavara i kvaliteta. Dakle, za maksimiziranje površine zavara idealna struja je oko 210 A, ali struja od oko 160 A predstavlja bolji kompromis između veličine zavara i njegove kvalitete.



Slika 9. Grafički prikaz površina rastopljenog zavarenog metala za sedam različitih zavarenih spojeva (TAG bez dodatnog materijala) zavarenih pri različitim strujama zavarivanja

4. ZAKLJUČAK

Rezultati ispitivanja pokazali su da površina metala zavara značajno zavisi od primijenjenih parametara i postupka zavarivanja. Uočeno je da povećanje struje zavarivanja, odnosno povećanje unosa toplote, dovodi do povećanja površine rastopljenog metala zavara. Najveće vrijednosti površine zavara ostvarene su kod uzoraka 13 i 1, koji su zavareni pri većim vrijednostima struje, dok je uzorak 6, zavaren manjom strujom, imao najmanju površinu zavara.

Poređenjem primijenjenih postupaka zavarivanja utvrđeno je da konvencionalni TIG postupak daje manje površine metala zavara u odnosu na TAG postupak (TIG sa aktivnim zaštitnim gasom) i A-TIG postupak. Dobijeni rezultati ukazuju da primjena aktivnog zaštitnog gasa i aktivirajućeg fluksa utiče na povećanje površine rastopljenog metala, što se može dovesti u vezu s promjenom karakteristika električnog luka i efikasnijim unosom toplote u osnovni materijal.

LITERATURA

[1] Davis, J. R. Stainless Steels. ASM International, 1994.
[2] Lippold, J. C., & Kotecki, D. J. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. Wiley, 2005.
[3] Wang, J., et al. "Effect of Alternating Magnetic Field Intensity on Microstructure and Corrosion Properties of Deposited Metal in 304 Stainless Steel TIG Welding." Metals, 15(7), 761, 2025.
[4] Afify, R., et al. "Investigating TIG Arc Weldments for Austenitic Stainless Steel 304 and 304L: A Mechanical and Metallurgical Analysis." 2024.
[5] Singh, S. R., & Khanna, P. "A-TIG (Activated Flux Tungsten Inert Gas) Welding: A Review." Materials Today: Proceedings, 44, 808–820, 2021.
[6] Klobčar, D., Tušek, J., Bizjak, M., et al. "Active Flux Tungsten Inert Gas Welding of Austenitic Stainless Steel AISI 304." Metalurgija, 55(4), 617–620, 2016.
[7] Niagaj, J. "Influence of Activated Fluxes on the Bead Shape of A-TIG Welds on Carbon and Low-Alloy Steels in Comparison with Stainless Steel AISI 304L." Metals, 11, 530, 2021.
[8] Cai, Y., Luo, Z., & Zeng, Y. "Influence of Deep Cryogenic Treatment on the Microstructure and Properties of AISI 304 A-TIG Weld." Science and Technology of Welding and Joining, 2017.
[9] Baskoro, A. S., et al. "Investigation of Weld Geometry, Mechanical Properties, and Metallurgical Observations of Activated Flux TIG Welding on 304 Austenitic Stainless Steel." Transactions of the Indian Institute of Metals, 2024.
[10] Liu, G. H., et al. "Activated Flux Tungsten Inert Gas Welding of 8 mm Thick AISI 304 Austenitic Stainless Steel." Journal of Central South University, 2015.