Petar Tasić [1,a], Ismar Hajro [1,b]

MODELIRANJE UTICAJA UNOSA TOPLOTE NA GEOMETRIJU UGAONIH SPOJEVA PRI MAG ZAVARIVANJU U RAZLIČITIM POZICIJAMA

MODELLING INFLUENCE OF HEAT INPUT ON FILLET WELD GEOMETRY DURING MAG WELDING IN DIFFERENT POSITIONS

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

April 2026.

Adresa autora / Author's address:

[1] Univerzitet u Sarajevu – Mašinski fakultet, Vilsonovo šetalište 9, Sarajevo, BiH

email / ORCID ID:

[a] tasic@mef.unsa.ba / 0000-0002-3349-6116

[b] / 0000-0001-6148-895X

Ključne reči: unos toplote, MAG, ugaoni spoj, geometrija zavara, nelegirani čelik

Keywords: heat input, MAG welding, fillet weld, weld geometry, unalloyed steel

Rezime

Jedan od najčešće korištenih postupaka za zavarivanje nelegiranih konstrukcionih čelika je MAG, s obzirom da je relativno jednostavan i ima veliku brzinu deponovanja. Sa druge strane, postoje standardi koji definišu kvalitet zavarenih spojeva s obzirom na njegove geometrijske karakteristike. Ovaj rad opisuje uticaj unosa toplote na geometriju ugaonih spojeva pri MAG zavarivanju limova od nelegiranog čelika debljine 8 mm u položenoj i nadglavnoj poziciji. Parametri koji su nezavisno varirani su jačina struje i brzina zavarivanja. Uticaj je predstavljen pomoću modela koji se baziraju na linearnoj regresionoj analizi. Izvršeno je međusobno poređenje modela razvijenih za različite pozicije, kao i poređenje sa modelima dostupnim u literaturi.

Abstract

One of the most often used welding processes for unalloyed structural steels is MAG, which is relatively simple, yet achieving high deposition rates. On the other side, there are standards describing weld quality based on weld geometry. This paper describes influence of heat input on weld geometry for MAG fillet welds of unalloyed steel with thicknesses of 8 mm, in horizontal and overhead position. Independently varied parameters were welding current and speed. Influence is described through models based on linear regression analysis. Comparison is made between models developed for different positions, as well as with those available in literature.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. konferencije sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine.

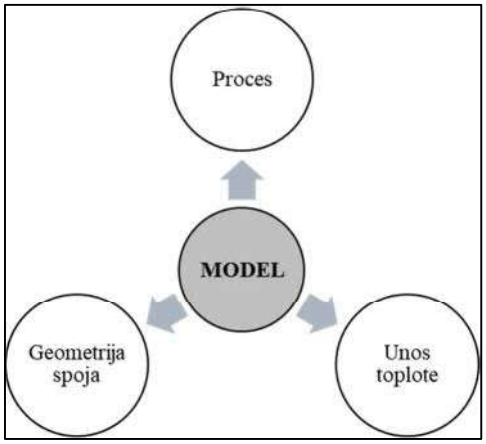
1. Uvod

Zavarivanje u zaštitnog atmosferi gasa je široko rasprostranjen postupak za spajanje u metalnoj industriji. Koristi se za nelegirane i niskolegirane čelike (MAG, sa aktivnim gasom), kao i visokolegirane čelike i legure aluminija (MIG, sa inertnim gasom). Ovaj postupak ima visoku brzinu deponovanja, stoga i značajno veću produktivnost nego TIG ili REL postupak [1]. Sam proces se može jednostavno modificirati ili prilagođavati, uključujući automatizaciju i robotizaciju [2]. Međutim, ovo je postupak koji se u značajnoj mjeri još uvijek koristi kao potpuno ručni. To znači da još uvijek postoji mogućnost pojave nesavršenosti i grešaka uzrokovanih ljudskim faktorom, odnosno zavarivačem [3,4].

Sa druge strane, velika brzina proizvodnje, koja je posljedica visoke brzine deponovanja MAG postupka, predstavlja izuzetan izazov za kontrolu kvaliteta spojeva, posebno ako se uzme u obzir da se kvalitet spojeva ne kontroliše samo u jednom koraku, i to nakon što su izvedeni. Jedan od suštinski najjednostavnijih pristupa je da se vrši kontrola unosa toplote, odnosno esencijalnih parametara zavarivanja (jačina struje, napon električnog luka i brzina zavarivanja) [5]. Naravno, da bi se ostvario kvalitetan spoj potrebno je kontrolisati i sve ostale neesencijalne parametre (na primjer protok zaštitnog gasa, uglove vođenja pištolja, dužinu slobodnog kraja žice). Ukoliko se ostvari ovakva kontrola, onda se cijelom dužinom spoja mogu postići iste geometrijske karakteristike (profil šava i dimenzije), odnosno indirektno i klasa kvaliteta [6]. Sami kriteriji prihvatljivosti za različite klase kvaliteta spojeva su definisani preko njihovih geometrijskih karakteristika, i definišu ih standardi kao što je na primjer EN ISO 5817. Neke od njih se mogu utvrditi bez razaranja (vizuelnim pregledom i mjerenjem), a neke sa razaranjem (mjerenjem na prethodno pripremljenom presjeku).

Kontrola parametara je posebno važna u slučaju da se MAG/MIG postupak koristi za aditivnu proizvodnju (WAAM, eng. *Wire Arc Additive Manufacturing*), s obzirom da se tada na osnovni materijal nanosi (navaruje) sloj po sloj metala. Tada kontrola geometrijskih karakteristika navarâ zapravo predstavlja kontrolu geometrijskih karakteristika konačnog proizvoda [7].

Koncept završne kontrole kvaliteta zavarenog spoja ili navara kroz kontrolu njegovih geometrijskih karakteristika nije nepoznat, a korišten je u većini slučajeva za hibridne postupke, zavarivanje laserom i elektronskim mlazom, kao i postupke zavarivanja upotrebom mehaničke energije. Upotreba takvog koncepta za kontrolu zavarenih spojeva i navara izvedenih elektrolučnim postupcima, pa tako i MAG/MIG postupkom, je tek nedavno privukla pažnju. Razlog za ovo je jednostavan, a to je široka dostupnost preporuka za izbor svih parametara zavarivanja u literaturi, ali i od strane proizvođača dodatnog materijala i izvora struje (posebno digitalno kontrolisanih) [8]. U mnogim slučajevima cilj je povećanje proizvodnje, održanje visokog kvaliteta i smanjenje troškova. Ovakav koncept se oslanja na matematički ili statistički model koji ima ključnu ulogu u povezivanju kontrole procesa zavarivanja, praćenja unosa toplote, i geometrije zavarenog spoja ili navara, kako je prikazano na Slici 1.



Slika 1. Šematski prikaz modela koji povezuje proces, unos toplote i geometriju spoja [8].
Figure 1. Schematic of the model linking the process, heat input, and joint geometry [8].

Interesantno je da su ovakvi modeli razvijani neuporedivo češće za ugaone spojeve nego za sučeone, što je razumljivo s obzirom da je oko 80% svih spojeva izvedeno kao ugaoni [9]. Neki od najstarijih modela daju jednostavnu vezu između katete z (ili debljine a) i unosa toplote Q, a razvijeni su za grupu elektrolučnih postupaka spajanja nelegiranih konstrukcionih čelika [10,11]. Pristup koji se koristi u novije vrijeme koristi statističke alate (na primjer regresiju), a odnosi se samo na jedan osnovni metal, jedan proces i, najčešće, specifičnu poziciju zavarivanja, što povećava tačnost takvih modela i olakšava njihovu primjenu [2,12,13]. Postoje i doktorske teze u kojima su predstavljeni rezultati razvoja modela za MAG [14] i lasersko zavarivanje [15]. U zadnje vrijeme su razvijeni modeli za MAG/MIG postupak bazirani na naprednim matematičkim i statističkim alatima, sa velikim potencijalom da budu iskorišteni u metalnoj industriji [16-18]. U nekim slučajevima, ovi modeli su uvezani sa mjerenjem geometrijskih karakteristika spoja u realnom vremenu upotrebom vještačkog vida [19,20]. Ovime je veza predstavljena na Slici 1 skoro u potpunosti ostvarena, gdje eventualno jedino nedostaje podešavanje parametara tokom samog procesa zavarivanja.

2. Eksperimentalni deo

Eksperimentalna ispitivanja su izvršena u Laboratorijama za zavarivanje na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Uzorci su napravljeni od čelika S235JR u obliku pločica veličine 125×125 mm, debljine 8 mm. Kao dodatni materijal je korištena puna žica prečnika 1,2 mm, oznake G46 3 C 4Si1 prema EN 14341. Zaštitni gas za izradu svih uzoraka je bio M21 prema EN ISO 14175, trgovačkog naziva Messer Ferroline C18, koji se sastoji od 82% Ar i 18% CO_2. Protok zaštitnog gasa je pratio jačinu struje i kretao se u rasponu od 15 do 22 l/min. Svi spojevi su izvedeni kao jednoprolazni. Zavarivanje je izvršeno upotrebom digitalno kontrolisanog inverterskog uređaja proizvođača OTC Daihen, model Welbee P500L.

Tokom zavarivanja su mijenjane jačina struje i brzina zavarivanja. Napon i brzina žice su automatski podešeni prema specifikaciji proizvođača uređaja za zavarivanje, a u skladu sa jačinom struje, odabranim osnovnim i dodatnim materijalom i vrstom zaštitnog gasa. Pregled parametara zavarivanja izmjerenih tokom eksperimentalnog istraživanja je dat u tabeli 1.

Tabela 1. *Parametri zavarivanja korišteni u eksperimentu.*

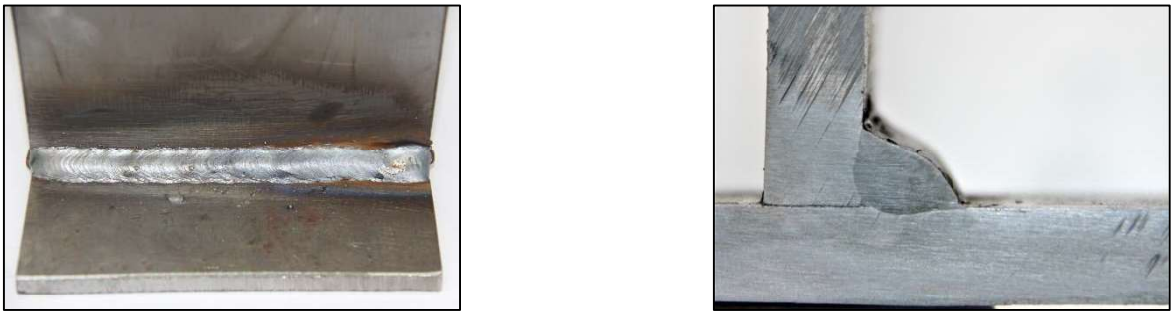
Table 1. *Welding parameters used in the experiment.*

Pozicija	Jačina struje *I* (A)	Napon *U* (V)	Brzina zavarivanja *w* (cm/min)	Unos toplote *Q* (kJ/mm)
Položena	165 – 290	22,2 – 28,5	13,9 – 60,9	0,6 – 1,3
Nadglavna	160 – 290	22 – 28,6	15,9 – 53,6	0,7 – 1,3

Unos toplote je izračunat primenom sledeće relacije:

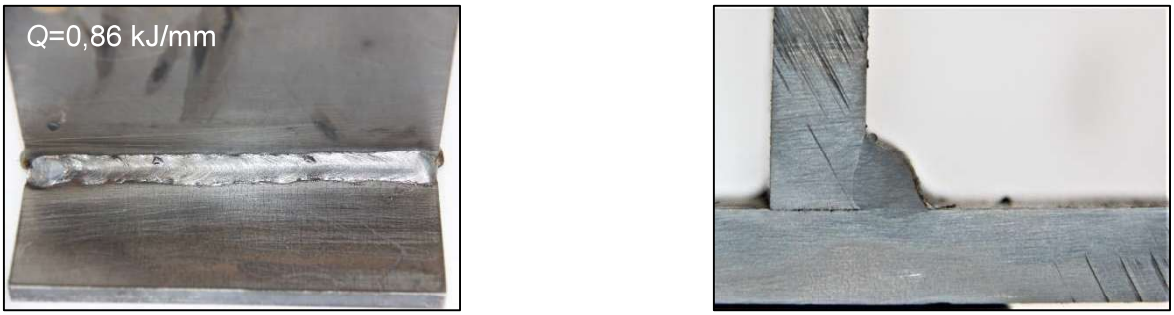
$$Q = \frac{I \cdot U}{w} \cdot \eta \qquad (1)$$

gde su I (A) jačina struje, U (V) napon električnog luka, w (cm/min) srednja brzina zavarivanja, a η termički stepen iskorištenja postupka koji iznosi između 0,80 i 0,85 [21]. Primjeri uzoraka za položenu i nadglavnu poziciju su prikazani na Slikama 2 i 3, respektivno.



Slika 2. *Izgled i presjek zavara za uzorak u položenoj poziciji.*

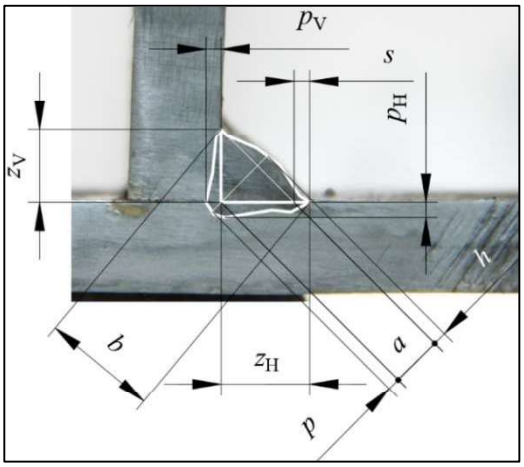
Figure 2. *Appearance and cross-section of the weld for the sample in the flat position.*



Slika 3. *Izgled i presjek zavara za uzorak u nadglavnoj poziciji.*

Figure 3. *Appearance and cross-section of the weld for the sample in the overhead position.*

Nakon zavarivanja su svi uzorci vizuelno ispitani, i oni koji nisu imali zadovoljavajući izgled (provare, preveliko prskanje i slično) su odbačeni. Za sve ostale spojeve izvršeno je presijecanje, te brušenje, poliranje i nagrizanje nitalom, nakon čega je izvršeno makroskopsko ispitivanje u skladu sa standardom ISO 17639. Nakon fotografisanja tako obrađenih zavara, upotrebom aplikacije AutoCAD je izvršeno mjerenje geometrijskih karakteristika, kako je šematski prikazano na Slici 4.



Slika 4. *Šematski prikaz mjerenje geometrijskih karakteristika na obrađenim zavarima.*

Figure 4. *Schematic of the measurement of geometric characteristics on the processed welds.*

Na presjeku su izmjerene veličine kateta (z_H i z_V) i penetracije (p_H i p_V) u horizontalnom i vertikalnom pravcu, i na osnovu njih su izračunate srednje vrijednosti zsr i psr, prema izrazima (2) i (3), respektivno.

$$z_{sr} = \frac{z_H + z_V}{2} \quad (2)$$

$$p_{sr} = \frac{p_H + p_V}{2} \quad (3)$$

3. Rezultati i diskusija

Nakon što su tokom eksperimentalnog dijela istraživanja prikupljeni svi podaci o ulaznim (jačina struje i brzina zavarivanja, odnosno unos toplote) i izlaznim (geometrijske karakteristike spojeva, odnosno kateta, širina lica šava, nadvišenje i penetracija) parametrima, upotrebom aplikacije Microsoft Excel je izvršena linearna regresiona analiza i uspostava veze ulaznih sa izlaznim parametrima. Glavni pokazatelji regresionih modela za položenu i nadglavnu poziciju su dati u Tabelama 2 i 3, respektivno. Na osnovu koeficijenta determinacije R^2 i značajnosti modela F se može donijeti ocjena o adekvatnosti razvijenih modela, odnosno njihovoj pouzdanosti i upotrebljivosti.

Tabela 2. *Pregled ključnih parametara regresionih modela za položenu poziciju.*

Table 2. *Overview of the key parameters of the regression models for the flat position.*

Geometrijska karakteristika	z_{sr}	b	h	p_{sr}
Koeficijent determinacije R^2	0,6871	0,6932	0,0303	0,0935
Značajnost F	$1{,}53\cdot10^{-8}$	$1{,}16\cdot10^{-8}$	0,3578	0,1004
Standardna greška	0,7838	1,0933	0,3940	0,5933
Broj opservacija	30	30	30	30

Tabela 3. *Pregled ključnih parametara regresionih modela za nadglavnu poziciju.*

Table 3. *Overview of the key parameters of the regression models for the overhead position.*

Geometrijska karakteristika	z_{sr}	b	h	p_{sr}
Koeficijent determinacije R^2	0,3772	0,3721	0,2149	0,0000
Značajnost F	0,0008	0,0009	0,0171	0,9690
Standardna greška	0,6697	0,9462	0,5513	0,7009
Broj opservacija	26	26	26	26

Kako se može vidjeti iz tabele 2, modeli za nadvišenje h i srednju penetraciju p_{sr} nisu upotrebljivi jer je značajnost modela F veća od 0,05. Model za p_{sr} u nadglavnoj poziciji nije upotrebljiv iz istog razloga, dok onaj za h ima koeficijent determinacije od svega 21%, što ga čini praktično neupotrebljivim. Polja sa ovim vrijednostima su radi lakšeg raspoznavanja u tabelama 2 i 3 označena sivom bojom. Modeli za srednju katetu z_{sr} i širinu lica šava b u nadglavnoj poziciji daju relativno niske vrijednosti koeficijenta determinacije od 37%, što ove modele čini nepouzdanim.

Od svih modela, samo dva, koja se odnose na z_{sr} i b u položenoj poziciji imaju vrijednosti R^2 od oko 70%, i to ih čini relativno pouzdanim i stoga upotrebljivim. Pregled koeficijenta regresionih modela za ove dvije geometrijske karakteristike je dat u Tabelama 4 i 5.

Tabela 4. *Pregled koeficijenata regresionog modela $z_{sr}=f(Q)$.*

Table 4. *Overview of the coefficients of the regression model $z_{sr} = f(Q)$.*

	Koeficijent	Standardna greška	P-vrijednost
Odsječak	2,38	0,60	0,0004
Q (kJ/mm)	5,11	0,65	$1{,}53\cdot10^{-08}$

Tabela 5. *Pregled koeficijenata regresionog modela b=f(Q).*

Table 5. *Overview of the coefficients of the regression model b = f(Q).*

	Koeficijent	Standardna greška	*P*-vrijednost
Odsječak	3,43	0,83	0,0003
Q (kJ/mm)	7,23	0,91	$1{,}16 \cdot 10^{-08}$

Kako se vidi iz Tabela 4 i 5, za oba modela su relevantni i odsječak i unos toplote *Q*, što je vidljivo na osnovu njihove *P*-vrijednosti, koja je manja od 0,05. Sada je moguće napisati i izraze (4) i (5) koji opisuju kako geometrijske karakteristike zavise od unosa toplote.

$$z_{sr}=2{,}38+5{,}11 \cdot Q \quad (4)$$

$$b=3{,}43+7{,}23 \cdot Q \quad (5)$$

Kako se vidi, upotrebljivi modeli su dobiveni samo za položenu poziciju. U literaturi su dostupni modeli za druge pozicije, uključujući i nadglavnu, i/ili za druge osnovne metale i/ili za druge postupke zavarivanja. Stoga nije moguće direktno poređenje dobijenih modela sa njima. Dodatno, u ovom radu je iskorištena linearna regresiona analiza, koja je najjednostavnija, dok se u drugim radovima umjesto nje često koristi i linearni i nelinearni *trendline*.

4. Zaključak

U ovom radu su predstavljeni rezultati istraživanja koje ima za cilj ispitati uticaj unosa toplote na geometrijske karakteristike MAG zavarenih spojeva na pločama nelegiranog čelika debljine 8 mm, izvedenih ručno kao jednoprolaznih, u položenoj i nadglavnoj poziciji. Kao ulazni parametar je iskorišten unos toplote *Q*, izračunat na osnovu mjerenja jačine struje *I* , napona *U* i brzine zavarivanja *w*. Kao izlazni parametri odabrane su srednja veličina katete z_{sr}, širina lica šava *b*, nadvišenje h i srednja penetracija psr, izmjerene na presjecima spojeva koji su dobijeni sječenjem, poliranjem i nagrizanjem zavarenih uzoraka.

Na osnovu dobijenih rezultata izvršena je regresiona analiza i uspostava osam modela veze ulaznih i izlaznih parametara. Dva od njih, za z_{sr} i *b* u položenoj poziciji, su se pokazala relativno pouzdanim i upotrebljivim, sa koeficijentom determinacije od oko 70%. Za ostale modele se ispostavilo da nemaju potrebni nivo pouzdanosti i relevantnosti. Općenito veoma niska vrijednost R^2 modela je sasvim sigurno posljedica toga što je u pitanju ručno zavarivanje. Značajno je primijetiti da modeli koji mogu biti ocijenjeni kao relativno pouzdani daju vezu unosa toplote sa veličinom katete i širinom lica šava, što su geometrijske karakteristike koje se mogu mjeriti bez razaranja zavarenog spoja, za razliku od nadvišenja i penetracije.

4. Conclusion

This paper presents the results of a study aimed at examining the effect of heat input on the geometric characteristics of MAG-welded joints in 8 mm-thick unalloyed steel plates. The joints were produced manually as single-pass welds in the flat and overhead positions. Heat input, Q, was used as the input parameter and was calculated based on measurements of current intensity, I, voltage, U, and welding speed, w. The selected output parameters were the mean leg size, zsr; weld-face width, b; reinforcement, h; and mean penetration, psr. These parameters were measured on joint cross-sections obtained by cutting, polishing, and etching the welded samples.

Based on the obtained results, regression analysis was performed, and eight models describing the relationship between the input and output parameters were established. Two of these models, for zsr and b in the flat position, proved to be relatively reliable and applicable, with coefficients of determination of approximately 70%. The remaining models did not show the required level of reliability or relevance. In general, the very low R^2 values of the models were most likely a consequence of manual welding. It is important to note that the models that can be considered relatively reliable describe the relationship between heat input and leg size, as well as between heat input and weld-face width. These geometric characteristics can be

Na osnovu ovoga iznesenog, moguće je opravdano zaključiti da je uzrok nepouzdanosti većine modela razvijenih u ovom radu uticaj zavarivača. Da bi se ovo potvrdilo potrebno je izraditi seriju uzoraka potpuno mehaniziranim ili automatiziranim MAG postupkom i izvršiti poređenje rezultata, budući da će u tim slučajevima uticaj čovjeka biti u potpunosti izbjegnut.

measured without destroying the welded joint, unlike reinforcement and penetration.

Based on the above, it can reasonably be concluded that the unreliability of most models developed in this study was caused by the influence of the welder. To confirm this, a series of samples should be produced using a fully mechanized or automated MAG process, and the results should be compared, since human influence would be completely eliminated in those cases.

Literatura / References

[1] Girón-Cruz, J. A., Pinto-Lopera, J. E., Alfaro, S. C. A., Weld bead geometry real-time control in gas metal arc welding processes using intelligent systems, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 123, 2022, pp. 3871-3884.

[2] Yaakub, M. Y., et al., Prediction of Welding Parameters and Weld Bead Geometry for GMAW Process in Overhead T-Fillet Welding Position (4F), *Advanced Materials Research*, 686 (2013), pp. 320-324.

[3] Popescu, M., Welding Ergonomics – Elements, Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, Zadar, Croatia, October 20-23, 2010

[4] Czifra, J., Vicikova, J., Szabo, P., Automated production system for pipelines of vessels, Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, Zadar, Croatia, October 20-23, 2010

[5] Tham, G., et al., Predicting the GMAW 3F T-Fillet Geometry and Its Welding Parameter, Procedia Eng., 41 (2012), pp. 1794-1799.

[6] Filho, C. A. M. D., et al., Weld bead geometry prediction using artificial neural networks and genetic algorithm hybrid model in GMAW, Proceedings of 27th International Congress of Mechanical Engineering, Florianopolis, Brazil, December 4-8, 2023

[7] Maraki, M. R., et al., Prediction and optimization of weld geometry in gas metal arc welding (GMAW) using least squares support vector machine, Journal of Welding Science and Technology of Iran, 8 (2023), ISSN: 2676-6787

[8] Tasic, P., et al., Prediction of Geometry of Pulsed GMAW Fillet Welded Joints of Structural Steels, Proceedings of the 31st DAAAM International Symposium, Mostar, B&H, October 21-24, 2020, pp. 444-0452

[9] Åstrand, E., Öberg, A. E., Jonsson, B., Cost Affecting Factors Related to Fillet Joints, in: Design, Fabrication and Economy of Metal Structures, Springer, 2013.

[10] Bosworth, M. R., Effective Heat Input in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding with Solid Wire Electrodes, Welding Journal (Supplement), (1991), pp. 111-117.

[11] Miller, D. K., Funderburk R. S., Tools for reviewing Welding Procedures, Welding Journal, 80 (2001), 7, pp. 40-43.

[12] Gucwa, M., Beczkowski, R., The Effect of Heat Input on the Geometric Properties of Welded Joints, Archives of Foundry Engineering, 14 (2014), pp. 127-130., ISSN 1897-3310

[13] Ribeiro, R. A., et al., Predicting Weld Bead Geometry in the Novel CWGMAW Process, Welding Journal, 94 (2015) 9, pp. 301-311., ISSN 0043-2296

[14] Khalaf, G. H., Neuro-fuzzy control modelling for gas metal arc welding process, Ph. D. thesis, Department of Manufacturing Engineering, Loughborough University, Loughborough, UK, 1998

[15] Benyounis, K. Y., Prediction and optimization of residual stresses, weld-bead profile and mechanical properties of laser welded components, Ph. D. thesis, Dublin City University, Ireland, 2006

[16] Khrais, S., Al Hmoud, H., Al, A. A., Darabseh, T., Impact of Gas Metal ArcWelding Parameters on Bead Geometry and Material Distortion of AISI 316L, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 7 (2023)

[17] He, Y., et al., Dynamic Modeling of Weld Bead Geometry Features in Thick Plate GMAW Based on Machine Vision and Learning, Sensors, 20 (2022)

[18] Biber, A., Sharma, R., Reisgen, U., Robotic welding system for adaptive process control in gas metal arc Welding, Welding in the world, 68 (2024), pp. 2311-2320.

[19] Lima, E. J., et al., Development of a model to predict weld bead geometry during the GMAW process using high speed camera, Proceedings of 7th International conference Trends in Welding Research, Pine Mountain, USA, May16-20, 2005

[20] Silva, R. H. G., et al., An adaptive orbital system based on laser vision sensor for pipeline GMAW welding, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43 (2021)

[21] Hajro, I., Tasic, P., Influence of heat input and welding position on geometrical properties of GMAW fillet welds of unalloyed steel, TEM Journal, 9 (2020) 2, pp. 496-500.