



Petar Tasić^{1,a}, Ismar Hajro¹

UTICAJ UNOSA TOPLOTE NA DIMENZIJE UGAONIH SPOJEVA PRI PULSNOM MAG ZAVARIVANJU LIMOVA OD NELEGIRANOG ČELIKA

INFLUENCE OF HEAT INPUT ON WELD SIZE OF PULSED GMAW FILLET WELDS OF UNALLOYED STEEL

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Jun 2023.

Ključne reči: unos toplote, pulsni MAG, ugaoni spoj, nelegirani čelik, kateta

Rezime

Ovaj rad opisuje uticaj unosa toplote na vrijednost kateta ugaonih spojeva pri pulsnom MAG zavarivanju limova od nelegiranog čelika debljine 4 mm u položenoj i nadglavnoj poziciji. Parametri koji su varirani su jačina struje i brzina zavarivanja, dok su napon i profili struje bili predefinisani uređajem za zavarivanje. Uticaj je predstavljen pomoću modela koji se baziraju na linearnoj regresionoj analizi. Izvršeno je međusobno poređenje razvijenih modela, kao i poređenje sa modelima dostupnim u literaturi.

Adresa autora / Author's address:

¹ Mašinski fakultet Sarajevo, Vilsonovo šetalište 9, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina

email: ^a tasic@mef.unsa.ba

Keywords: heat input, pulsed GMAW, fillet weld, unalloyed steel, leg size

Abstract

This paper describes influences of heat input on leg size of pulsed GMAW fillet welds of unalloyed steel with thicknesses of 4 mm, in horizontal and overhead position. Varied parameters were welding current and speed, while voltage and current profile were predefined by welding equipment manufacturer. Influence is described through models based on linear regression analysis. Comparison is made between developed models, as well as with those available in literature.



1. Uvod

Za zavarivanje konstrukcionih čelika pogodni su svi postupci zavarivanja topljenjem [1]. Najčešće korišten postupak je MAG/MIG, pri čemu su obje varijante suštinski iste, samo je zaštitni gas različit [2]. Ovaj postupak ima veliku brzinu deponovanja i može se jednostavno mehanizovati ili robotizovati [3]. Ipak, još uvijek se značajnim dijelom izvodi kao ručni proces [4]. U prilog njegovoj često upotrebi ide i to da 85% proizvoda koji se izrađuju zavarivanjem ima masu do 40 kg, da je 70% spojeva izvedeno na limovima debljine između 3 i 5 mm, te da je 80% spojeva izvedeno kao ugaoni [5].

Kriteriji prihvatljivosti za različite klase kvaliteta spojeva se definišu odgovarajućim standardima koji propisuju zahtjeve u pogledu geometrijskih karakteristika spojeva, kao što je na primjer EN ISO 5817. Neke od njih se mogu utvrditi bez razaranja (vizuelni pregled i mjerenje), a neke sa razaranjem (rezanje zavara, nagrizanje i mjerenje na presjeku). Kako bi se ostvarile potrebne dimenzije zavarenog spoja na raspolaganju su preporuke i smjernice za izbor esencijalnih parametara zavarivanja koje daju proizvođači osnovnog i dodatnog materijala, a u nekim slučajevima i proizvođači opreme za zavarivanje [6].

Ispravno i pažljivo odabrani parametri zavarivanja mogu spriječiti prevelik unos toplote, deformacije predmeta i druge nedostatke spojeva, što smanjuje potrebu za popravkama u vidu brušenja i ponovnog zavarivanja ili termičke obrade [7].

Posebna varijanta je pulsni MAG, odnosno varijanta kada struja pulsira tokom zavarivanja [8]. Pulsiranje je uvedeno da bi se omogućio prenos metala izazivanjem skokovitog rasta jačine struje tokom veoma kratkih vremenskih perioda. Pulsni MAG omogućava dodatnu kontrolu procesa zavarivanja upotrebom profila struje koji se sastoji od pozadinske struje, koja održava električni luk i pulsne (vršne) struje, koji je namijenjen odvajanju kapljice dodatnog materijala. Pri tome jedan puls mora osigurati toplotu potrebnu da istopi samo onoliko dodatnog materijala koliko je dovoljno za jednu kap [7].

Proizvođači uređaja za zavarivanje su razvili i patentirali vlastite profile pulsne struje namijenjene za specifične namjene, kao što je zavarivanje veoma tankih limova ili provara korijena. Primjeri su CMT (Fronius), STT (Lincoln), CBT (Daihen), RMD (Miller), FastROOT (Kempfi) i QSet (ESAB) [9].

2. Modeli veze parametara zavarivanja i geometrije

Da bi zavareni spojevi bili izvedeni bez prekida kroz nekoliko različitih pozicija i pri tome ispunjavali traženu klasu kvaliteta, potrebno je imati precizno vođenje pištolja. Ovo je slučaj, na primjer, kada se zavareni spoj pruža duž trodimenzionalne konture, jer se u općem slučaju za svaku poziciju preporučuju drugačije vrijednosti parametara. Prelazi između pozicija trebaju biti bez greške, a dimenzije šava potpuno iste duž cijelog zavarenog spoja [7].

Ono što bi olakšalo uspješno izvođenje ovakvog zavarenog spoja je postojanje veze između parametara procesa i geometrije zavarenog spoja. Koncept kontrole u realnom vremenu je suštinski veoma jednostavan, a njegova osnova bi bio pouzdan i tačan odnos ulaza (parametri zavarivanja) i izlaza (oblik i dimenzije zavarenog spoja) pri datim uslovima zavarivanja (osnovni i dodatni materijal i pozicija zavarivanja) [10, 11]. Za kontrolu oblika i dimenzija se može iskoristiti vještački vid (na primjer baziran na laseru) da bi se utvrdio oblik zavarenog spoja i izmjerile njegove dimenzije [12].

Model koji povezuje navedene ulaze i izlaze bi bio osnova kontrolne petlje koja bi omogućila korekciju parametara zavarivanja (odnosno unosa toplote) s ciljem ostvarivanja potrebne geometrije šava. Onda bi se tokom samog zavarivanja moglo vršiti podešavanje parametara (ukoliko je potrebno) i to nakon poređenja stvarnog oblika i dimenzija sa referentnim. Ovo je koncept koji je uspješno iskorišten za neke specifične slučajeve zavarivanja i navarivanja elektrolučnim i nekonvencionalnim postupcima [13, 14]. U najvećem broju slučajeva uslovi zavarivanja nisu podudarni sa uslovima u kojima je vršeno istraživanje izloženo u ovom radu. Međutim, dva rada se izdvajaju. To su radovi u kojima su rezultati dobijeni zavarivanjem u uslovima istim ili dovoljno sličnim kao u ovom istraživanju.

Prvi je rad Millera i Funderbruka iz 2001. godine, koji nije baziran na direktnom eksperimentalnom istraživanju, već na analizi 270 specifikacija procedura zavarivanja [15]. Iz njih su preuzeti podaci o parametrima zavarivanja i geometrijskim karakteristikama spojeva. U ovom radu vezu između katete i unosa toplote daje izraz:

$$z = 5,5\sqrt{Q} \quad (1)$$



gdje je z (mm) kateta ugaonog spoja, a Q (kJ/mm) unos toplote. Dalje je preko katete moguće izračunati ostale geometrijske karakteristike, kao što su debljina spoja a ili širina lica šava b . Izraz (1) vrijedi za ručni MAG/MIG postupak zavarivanja, jednoprozorne ugaone spojeve, nezavisno od pozicije, tehnike, prečnika žice i vrste i protoka zaštitnog gasa.

Drugi rad je rad Yaakuba i drugih iz 2013. godine, koji je baziran na eksperimentalnom istraživanju jednoprozornih ugaonih zavarenih spojeva izvedenih u nadglavnoj poziciji, na limovima od konstrukcionog čelika [3]. Nakon zavarivanja, izvršeno je presijecanje uzoraka, brušenje, poliranje i nagrizanje, te mjerenje katete, širine lica šava, stvarne debljine šava i penetracije. Sve geometrijske karakteristike su izražene kao funkcija unosa toplote Q , a njihova zavisnost je opisana funkcijom *trendline* u aplikaciji Microsoft Excel.

3. Eksperiment

Eksperimentalna ispitivanja su izvršena u Laboratorijama za zavarivanje na Mašinskom

fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Uzorci su napravljeni od čelika P355NL2 (prema EN 10028-3) u obliku pločica veličine 100×100 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% CO₂. Protok zaštitnog gasa je pratio jačinu struje i kretao se u rasponu od 13 do 20 l/min. Svi spojevi su izvedeni kao jednostrani jednoprozorni. Zavarivanje je izvršeno upotrebom digitalno kontrolisanog inverterskog uređaja proizvođača OTC Daihen, model Welbee P500L. Iskorišteni su profili struje i napona predefinisani od strane proizvođača.

Glavni parametar koji je podešavan prilikom zavarivanja je srednja jačina struje. Napon i brzina dotura žice su automatski podešeni prema proizvođačkoj specifikaciji, a u skladu sa srednjom jačinom struje, odabranim osnovnim i dodatnim materijalom i vrstom zaštitnog gasa. Pregled esencijalnih parametara zavarivanja korištenih u eksperimentu daje tabela 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	100 – 180	16,7 – 24,6	12,8 – 36,7	0,4 – 1,0
Nadglavna	100 – 180	18,8 – 24,6	16,4 – 32,2	0,4 – 1,0

Pri ovome je unos toplote izračunat izrazom

$$Q = \frac{60 \cdot P}{1.000 \cdot w} \cdot \eta \quad (2)$$

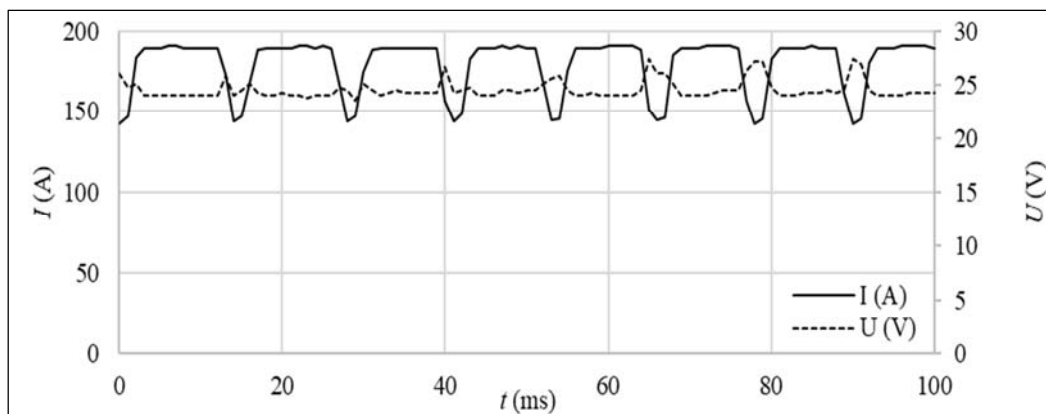
gdje je P (W) snaga električnog luka, w (cm/min) srednja brzina zavarivanja, a η termički stepen iskorištenja postupka koji iznosi između 0,80 i 0,85 [1]. Obzirom da kod pulsno MAG zavarivanja izvor struje daje specifične, promjenjive profile struje i napona, razvijeno je više modela za određivanje snage električnog luka i unosa toplote. U ovom radu je iskorišten model srednje trenutne snage (engl. *Average Instantaneous Power*, AIP) [16, 17].

Prema njemu se snaga električnog luka računa prema izrazu:

$$P_{AIP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \cdot U_i \quad (3)$$

gdje su I_i i U_i trenutne vrijednosti struje i napona i i -tom momentu mjerenja.

Primjer profila struje i napona za uzorak zavaren u položenoj poziciji strujom srednje jačine 180 A je prikazan na slici 1. Slični profili su dobijeni na osnovu zapisa za sve uzorke.



Slika 1. Primjer profila struje i napona za uzorak u položenoj poziciji i srednju struju 180A

Figure 1. Example of a current and voltage profile for a sample in a horizontal position and an average current of 180A

Stvarni profili struje i napona su zabilježeni sa rezolucijom 1 ms upotrebom strujnih kliješta i digitalnog osciloskopa, kako je prikazano na slici 2.



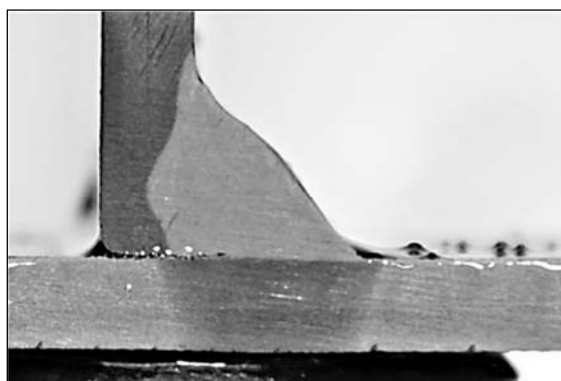
Slika 2. Mjerenje jačine struje i snimanje profila struje i napona pri zavarivanju

Figure 2. Current measurement and recording of current and voltage profiles during welding

4. Rezultati i diskusija

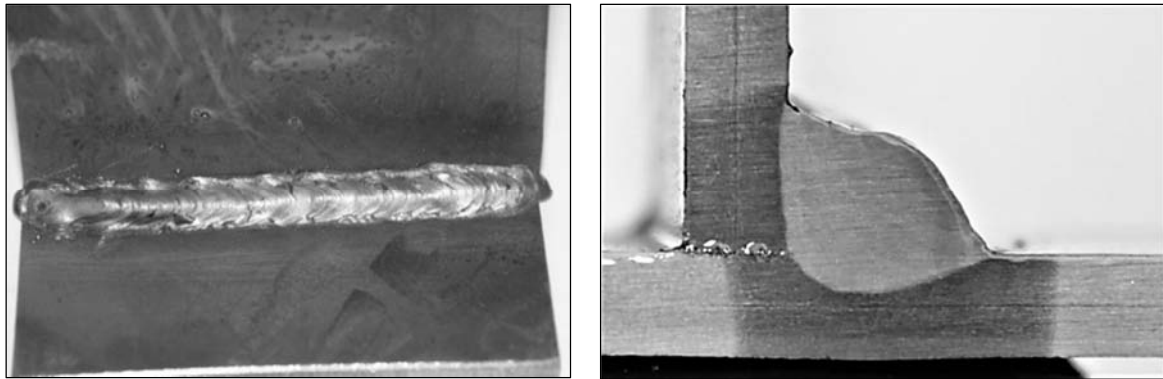
Nakon zavarivanja su svi uzorci vizuelno ispitani. Izvršeno je presijecanje spojeva, te njihovo brušenje, poliranje i nagrivanje presjeka nitalom,

nakon čega je slijedilo makroskopsko ispitivanje u skladu sa standardom ISO 17639. Primjeri tako pripremljenih uzoraka za položenu i nadglavnu poziciju su prikazani na slikama 3 i 4, respektivno.



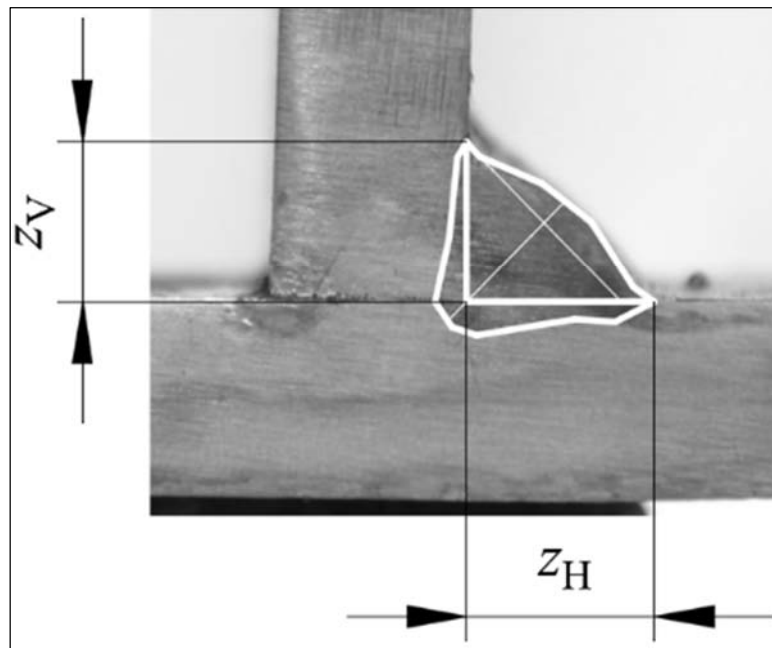
Slika 3. Izgled i presjek zavara za uzorak u položenoj poziciji ($Q=0,82$ kJ/mm)

Figure 3. Appearance and cross-section of the weld for the sample in the horizontal position ($Q=0,82$ kJ/mm)



Slika 4. Izgled i presjek zavara za uzorak u nadglavnoj poziciji ($Q=0,91$ kJ/mm)
Figure 4. Appearance and cross-section of the weld for the sample in the overhead position ($Q=0,91$ kJ/mm)

Nakon fotografisanja tako pripremljenih spojeva, upotrebom aplikacije AutoCAD je izvršeno mjerenje kateta (z_H i z_V), kako je prikazano na slici 5.



Slika 5. Mjerenje kateta na pripremljenim uzorcima
Figure 5. Measurement of the cathetus on prepared samples

S ciljem pojednostavljenja uspostave veze parametara i geometrije, prvo je izvršeno poređenje rezultata mjerenja kateta u dvije različite pozicije (položenoj i nadglavnoj). Za ovo je iskorišten t -test dva uzorka sa pretpostavkom da su varijanse osnovnih skupova jednake (engl. *t-Test Two-Sample Assuming Equal Variances*) koristeći Microsoft Excel. Na ovaj način je utvrđeno da nema statistički značajne razlike između vrijednosti kateta ostvarenih u dvije navedene pozicije. Stoga su se svi podaci mjerenja u nastavku koristili kao jedinstven skup.

Nakon ovoga, izvršena je višestruka linearna regresiona analiza i uspostava veze ulaznih (jačina struje i brzina zavarivanja) sa izlaznim parametrima (veličina katete spoja). I ovo je izvršeno koristeći Microsoft Excel. Glavni pokazatelji regresionog modela su dati u tabeli 2, i prema njima se ovaj model može ocijeniti kao adekvatan, a njima je moguće objasniti 61,11% varijabiliteta (R^2). Ovo nije visoka vrijednost, ali treba imati na umu da je u pitanju ručno zavarivanje i da je to vrlo vjerovatno uticalo na ovu vrijednost.



Tabela 2. Pregled ključnih parametara regresionog modela $z=f(l, w)$

Table 2. Review of the key parameters of the regression model $z=f(l, w)$

Koeficijent determinacije R^2	0,6111
Značajnost F	$2,05 \cdot 10^{-12}$
Standardna greška	0,6102
Broj opservacija	60

Jednačina koja opisuje promjenu z je data preko odgovarajućih koeficijenata navedenim u tabeli 3. Uzevši u obzir P -vrijednost pojedinih ulaznih parametara, može se zaključiti da su u ovom slučaju relevantna oba ulaza (l i w).

Tabela 3. Pregled koeficijenata regresionog modela $z=f(l, w)$

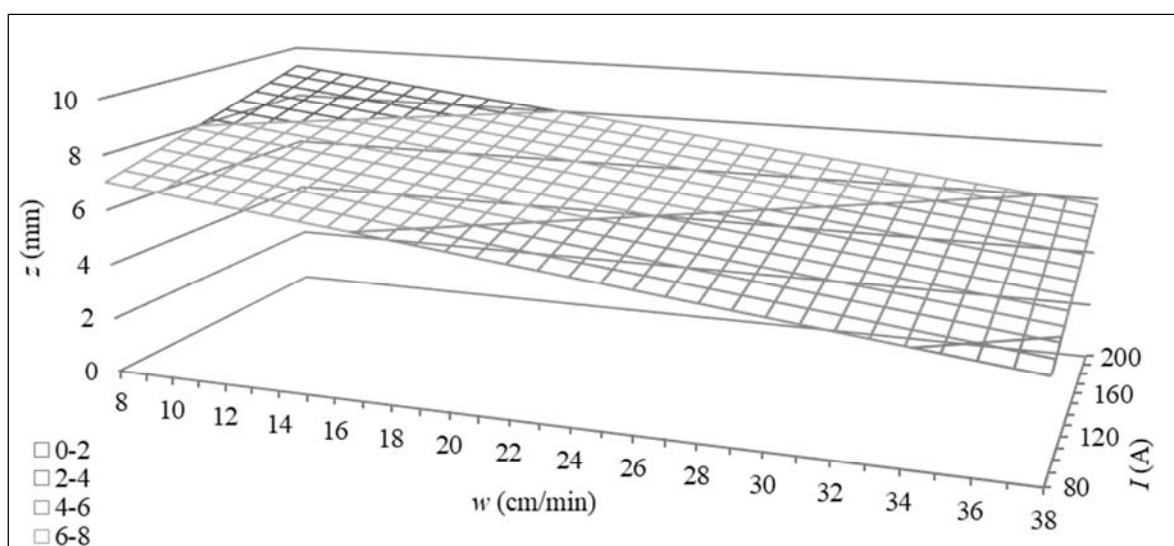
Table 3. Review of the coefficients of the regression model $z=f(l, w)$

	Koeficijent	Standardna greška	P -vrijednost
Odsječak	6,4454	0,4957	$1,07 \cdot 10^{-18}$
l (A)	0,0186	0,0028	$1,34 \cdot 10^{-08}$
w (cm/min)	-0,1150	0,0149	$1,98 \cdot 10^{-10}$

Na osnovu ovoga, jednačina koja opisuje kako se z mijenja u funkciji l i w je

$$z=6,4454+0,0186 \cdot l-0,1150 \cdot w. \quad (4)$$

Grafički prikaz ove jednačine je dat na slici 6.



Slika 6. Grafički prikaz zavisnosti $z=f(l, w)$

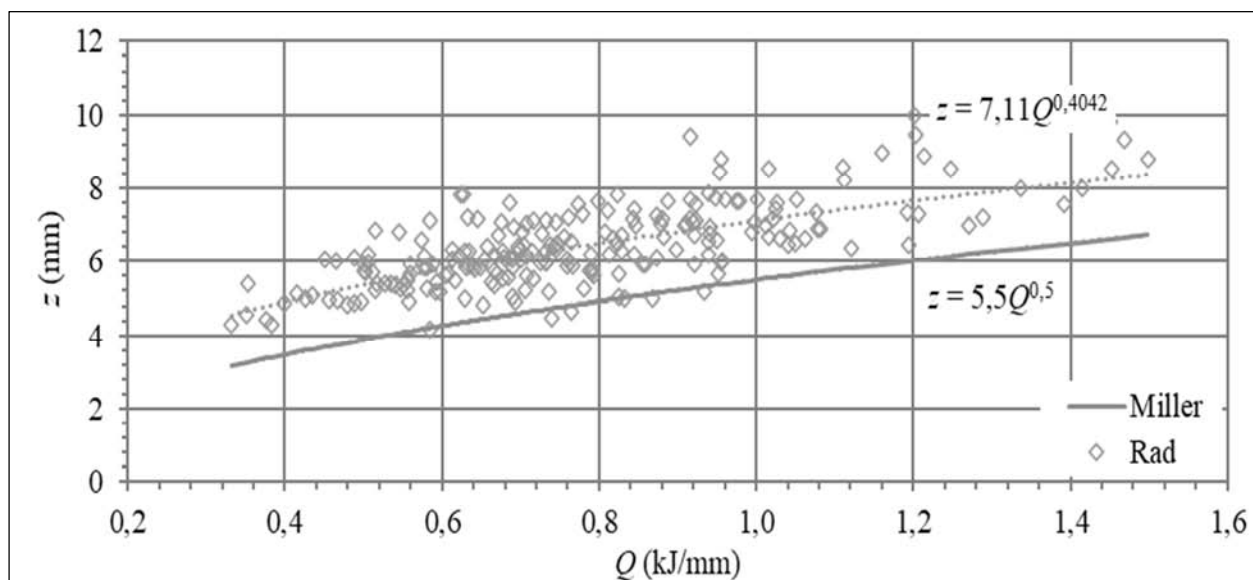
Figure 6. Graphic representation of dependence $z=f(l, w)$



Sa druge strane, radovi navedeni u poglavlju 2 koji su ponudili uspostavu veze između parametara zavarivanja i katete nisu koristili regresionu analizu, već funkciju *trendline*. Kako bi izvršili poređenje rezultata dobijenih u ovom istraživanju sa navedenim, izvršena je uspostava veze između

ulaza (unos toplote) i izlaza (veličina katete) na isti način, bez obzira na postojanje razvijenog regresionog modela (4).

Na slici 7 je dato poređenje sa radom Millera i Funderbruka u kojem je z dato izrazom (1).



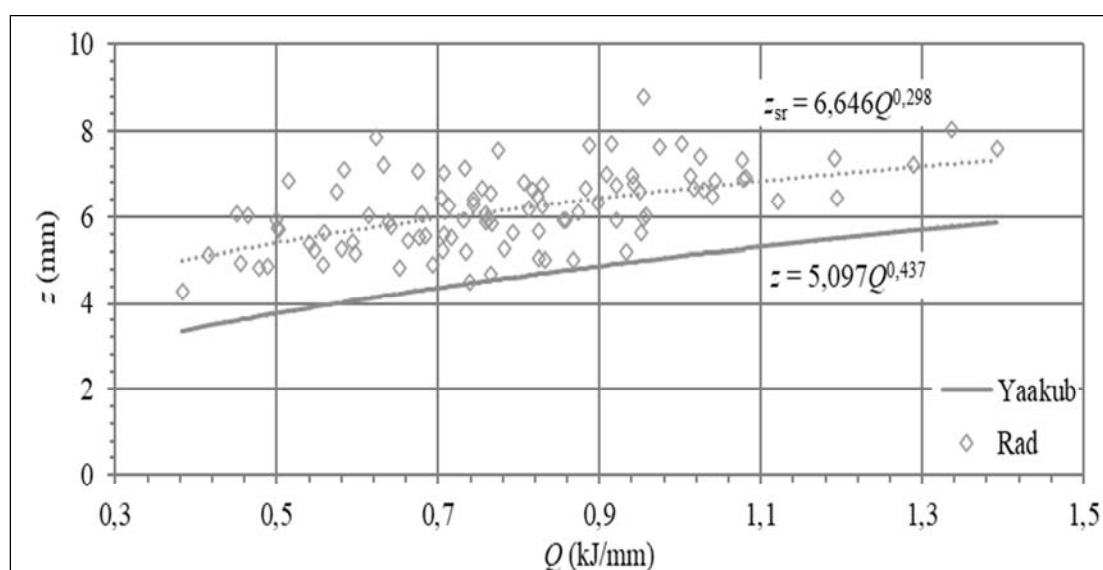
Slika 7. Poređenje s radom Millera i Funderbruka

Figure 7. Comparison with the work of Miller and Funderbruka

Kako se vidi, trend je isti, kao i zakrivljenost krive. Razlika je u tome što su vrijednosti katete dobijene u ovom istraživanju za oko 1,7 mm veće od onih koje daje model (1). Ovo se može objasniti time da model Millera uključuje i druge elektrolučne postupke (REL, FCAW i EPP) i različite debljine osnovnog metala, dok model u ovom radu uključuje

samo pulsni MAG izveden na limovima debljine 4 mm.

Prilikom poređenja rezultata ovog istraživanja sa onim od Yaakuba, uključeni su samo rezultati za nadglavnu poziciju (radi uporedivosti). Rezultat poređenja daje slika 8.



Slika 8. Poređenje s radom Yaakuba

Figure 8. Comparison with the work of Yaakub



Kako se vidi, i ovdje postoji određena razlika, ali je nešto manja i iznosi između 1,2 i 1,5 mm. Trend i zakrivljenost je opet podudarna. Razlika se može objasniti time da je u radu Yaakuba izvršeno

robotsko zavarivanje na limovima debljine 6 mm, za razliku od ovog rada, kod kojeg je to bilo ručno i na limovima debljine 4 mm.

5. Zaključak

U ovom radu su predstavljeni rezultati istraživanja koje je imalo za cilj pokazati kako se mijenja veličina katete u funkciji unosa toplote pri pulsnom MAG zavarivanju ploča nelegiranog čelika debljine 4 mm. Zavarivanje je izvršeno ručno, u dvije pozicije, položenoj i nadglavnoj. Veličina katete je utvrđena mjerenjem na presjecima zavarenih spojeva, dok je unos toplote izračunat preko AIP modela nakon snimanja profila jačine struje i napona rezolucijom 1 ms. Nakon toga je pristupljeno analizi rezultata i pokazalo se da nema statistički značajne razlike između vrijednosti katete dobijene u položenoj i nadglavnoj poziciji. Razvijen je model veze katete, jačine struje i brzine zavarivanja, i to upotrebom višestruke linearne regresije, i on je u stanju objasniti 61% promjene katete promjenom unosa toplote. Relativno niska vrijednost je posljedica toga što je u pitanju ručno zavarivanje.

Izvršeno je i poređenje rezultata dobijenih tokom ovog istraživanja sa uporedivim rezultatima dostupnih istraživanja. Ustanovljeno je da postoji podudarnost u trendovima i oblicima krivih koje prikazuju zavisnost katete od unosa toplote. U ovom istraživanju se dobijaju nešto veće vrijednosti katete, ali to može biti posljedica razlika uslova u kojima je vršeno zavarivanje.

Interesantno je da je *t*-test pokazao da nema statistički značajne razlike između vrijednosti kateta dobijenih u položenoj i u nadglavnoj poziciji, bazirano na rezultatima mjerenja u ovom istraživanju. Ovo bi bilo dobro detaljnije istražiti, po mogućnosti uz upotrebu robota kako bi se izbjegao uticaja zavarivača na rezultate.

5. Conclusion

This paper presents the results of research aimed at showing how the size of the cathetus changes as a function of heat input during pulsed GMAW welding of 4 mm thick unalloyed steel plates. The welding was done manually, in two positions, horizontal and overhead. The size of the cathetus was determined by measuring the cross sections of the welded joints, while the heat input was calculated using the AIP model after recording the current and voltage profiles with a resolution of 1 ms. After that, the results were analyzed and it was shown that there is no statistically significant difference between the values of the cathetus obtained in the horizontal and overhead positions. A model of the connection of the cathetus, amperage and welding speed was developed, using multiple linear regression, and it is able to explain 61% of the change in the cathetus with the change in heat input. The relatively low value is a consequence of manual welding.

A comparison of the results obtained during this research with comparable results of available research was also carried out. It was found that there is a matching in the trends and shapes of the curves that show the dependence of the catheter on the heat input. In this research, slightly higher values of the leg are obtained, but this may be a consequence of the differences in the conditions in which the welding was performed.

It is interesting that the *t*-test showed that there is no statistically significant difference between the values of the catheters obtained in the horizontal and overhead positions, based on the results of the measurements in this research. This would be good to investigate further, preferably with the use of a robot to avoid the influence of the welder on the results.



Literatura / References

- [1] Pašić, O., Zavarivanje, *Svjetlost*, Sarajevo, 1998.
- [2] Kejžar, R., Grum, J., Klobčar, D. (2007), New findings in welding of structural steels, *Int. J. Materials and Product Technology*, 29, 1, 311-326.
- [3] Yaakub, M. Y., et al. (2013), Prediction of Welding Parameters and Weld Bead Geometry for GMAW Process in Overhead T-Fillet Welding Position (4F), *Advanced Materials Research*, 686, 320-324.
- [4] Czifra, J., Vicikova, J., Szabo, P., Automated production system for pipelines of vessels, *Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium*, Vol. 21, No. 1, 2010
- [5] Åstrand, E., Öberg, A. E., Jonsson, B. (2013), Cost Affecting Factors Related to Fillet Joints, in: Design, Fabrication and Economy of Metal Structures, Springer.
- [6] Hajro, I., Tasic, P. (2020), Influence of heat input and welding position on geometrical properties of GMAW fillet welds of unalloyed steel, *TEM Journal*, 9, 2, 496-500.
- [7] Mvola, B., Kah, P., Martikainen, J., Hiltunen, E. (2013), Applications and benefits of adaptive pulsed GMAW, *Mechanika*, 19, 6, 694-701
- [8] Horvat, M., Kondić, V. (2012), The examples of modified procedures of MIG/MAG welding, *Tehnički glasnik*, 6, 2, 137-140.
- [9] MIG/MAG – developments in low heat input transfer modes, TWI, dostupno na <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/mig-mag-developments-in-low-heat-input-transfer-modes-133> (25.08.2022.)
- [10] Sharma, A., Arora, N. (2016), A scheme of comprehensive assessment of weld bead geometry, *Intl. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 82, 1507-1515.
- [11] Yao, P., Zhou, K., Huang, S. (2019), Process and Parameter Optimization of the Double-Pulsed GMAW Process, *Metals*, 9, 9
- [12] Reddy, G. A., Raman A., Reddy H., Kumar G. S. (2008), Laser Vision Based Seam Tracking System for Welding Automation, Proceedings of the 2008 International Conference on Image Processing, Computer Vision, & Pattern Recognition, July 14-17, 2008, Las Vegas, USA
- [13] Sen, M., Mukherjee, M., Pal, T. K., Prediction of Weld Bead Geometry for Double Pulse Gas Metal Arc Welding Process by Regression Analysis, *Proceedings of 5th International Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, December 12th-14th, 2014, IIT Guwahati, Assam, India
- [14] 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
- [15] Miller, D. K. (2001), Funderburk R. S., Tools for reviewing Welding Procedures, *Welding Journal*, 80, 7, 40-43.
- [16] Joseph, A., Harwig, D. D., Farson, D., Richardson, R. (2002), Assessing the effects of GMAW-P parameters on arc power and weld heat input, *Proceedings of 6th International conference Trends in Welding Research*,
- [17] Joseph, A., Harwig, D., Farson, D. F., Richardson, R. (2003), Measurement and calculation of arc power and heat transfer efficiency in pulsed gas metal arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 8, 6, 400-406.