

ISTRAŽIVANJE UTICAJA PARAMETARA ZAVARIVANJA NA KVALITET SPOJEVA PRI PULSNOM MAG ZAVARIVANJU U NADGLAVNOJ POZICIJI

RESEARCH ON WELDING PARAMETERS INFLUENCE ON QUALITY OF PULSED GMAW WELDS IN OVERHEAD POSITION

doc. dr. Petar Tasić, v. prof. dr. Almira Softić, prof. dr. Ismar Hajro
Univerzitet u Sarajevu – Mašinski fakultet
Vilsonovo šetalište 9, Sarajevo
Bosna i Hercegovina

REZIME

Velika produktivnost pulsnog MAG postupka zavarivanja traži i efikasnu kontrolu kvalitete spojeva. U ovom radu su predstavljeni rezultati istraživanja uticaja parametara zavarivanja na geometriju i kvalitet ugaonih zavarenih spojeva izvedenih u nadglavnoj poziciji na dvije različite debljine limova od nelegiranog konstrukcionog čelika. Izmjerene geometrijske karakteristike spojeva su iskorištene da se uspostavi veza između parametara zavarivanja i klase kvaliteta zavarenog spoja, pri čemu su za utvrđivanje kvaliteta zavarenog spoja uzeti kriteriji prihvatljivosti prema EN ISO 5817.

Ključne riječi: pulsni MAG, geometrija zavara, kvalitet zavara, nadglavna pozicija

ABSTRACT

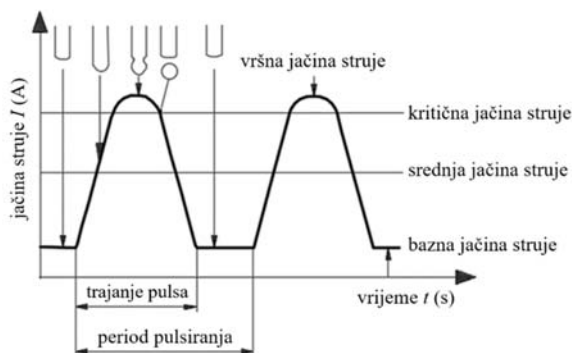
High productivity of pulsed GMAW requires efficient weld quality control. This paper presents results of research on welding parameters influence on weld geometry and quality of fillet welds, made in overhead position, using unalloyed structural steel sheets of two thicknesses. The relationship between welding parameters and quality level has been established by using measured geometrical characteristics of welds, while criteria for defining quality levels has been taken in accordance with EN ISO 5817.

Keywords: pulsed GMAW, weld geometry, weld quality, overhead position

1. UVOD

Zavarivanje MAG postupkom ima široku primjenu u proizvodnji različitih zavarenih proizvoda, najviše zbog toga što ima veliku brzinu deponovanja. Postupak je pogodan za spajanje svih konstrukcionih čelika, uključujući i visokolegirane [1]. Može se jednostavno mehanizovati ili robotizovati, čemu u prilog ide 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 ih je 80% ugaonih [2]. MAG postupak se još uvijek značajnim dijelom izvodi kao ručni, što može voditi povećanju troškova i kašnjenju u proizvodnji [3]. Sa druge strane, upotreba robota najčešće značajno smanjuje potrebe za naknadnim radovima i povećava produktivnost. Tada zavarivač samo nadgleda proces zavarivanja i po potrebi vrši korekcije kretanja i/ili parametara zavarivanja [4]. Dodatno, ispravno i pažljivo odabrani parametri

zavarivanja mogu spriječiti prevelik unos toplote i, posljedično, deformacije predmeta i druge nedostatke spojeva, što smanjuje potrebu za popravkama, a ponekad čak i termičkom obradom [5]. Za MAG postupak je razvijena posebna pulsna varijanta, pri kojoj struja pulsira tokom zavarivanja [6]. 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 [5]. Šematski prikaz profila jačine struje pri pulsnom MAG postupku je prikazan na slici 1.



Slika 1. Šematski prikaz pulsnog režima rada [7]

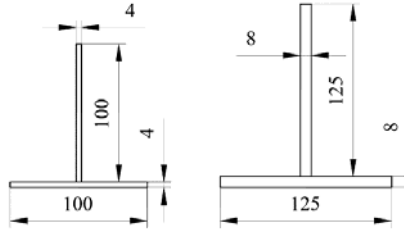
2. OPIS PROBLEMA

Da bi se složeni zavareni spojevi napravili takvim da ispunjavaju klase kvaliteta propisane standardom, potrebno je imati precizno vođenje pištolja i tačnu vezu između ulaznih parametara procesa i geometrije zavarenog spoja. Ovo je posebno važno u slučajevima kada se zavareni spoj pruža duž složene trodimenzionalne konture kroz nekoliko različitih pozicija, budući da se u općem slučaju za svaku poziciju preporučuju drugačiji parametri [8]. Prelazi između tih pozicija moraju biti bez greške, a geometrija i dimenzije šava potpuno iste duž cijelog zavarenog spoja. Ovakav zahtjev je, suštinski, potreban i u slučaju ručnog zavarivanja, a robot samo pomaže da on bude lakše ispunjen.

Koncept kontrole zavarenog spoja u realnom vremenu je zapravo 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, pozicija zavarivanja). Potrebno je odabrati odgovarajući set parametara zavarivanja kako bi se pri proizvodnji dobio ugaoni spoj potrebnih dimenzija i iskoristiti navedeni koncept za njihovo održavanje. Izbor parametara se često još uvijek svodi na preporuke koje daju proizvođači osnovnog ili dodatnog materijala, ali to nije garancija da će zavareni spoj imati potrebne mehaničke osobine i kvalitet [9]. Kako MAG postupak nema šljaku, relativno je lako upotrijebiti vještački vid (na primjer baziran na laseru) da bi se utvrdio oblik zavarenog spoja i izmjerile njegove dimenzije [10].

3. EKSPERIMENT

Uzorci debljine 4 mm su napravljeni od čelika P355NL2, dok su uzorci debljine 8 mm napravljeni od čelika S235JR. Za izradu ispitnih uzoraka korištene su pločice 100×100 mm (za uzorke debljine 4 mm) i 125×125 mm (za 8 mm). Skica izgleda pripreme pločica za zavarivanje je data na slici 2. Nije vršena posebna priprema zavarenih spojeva osim četkanja površina do metalnog sjaja.



Slika 2. Skica pogleda na pripremu limova prije zavarivanja ispitnih uzoraka

Kao dodatni materijal pri zavarivanju je korištena puna žica trgovačkog naziva Lincoln Electric Ultramag SG3, prečnika 1,2 mm, oznake G46 3 C 4Si1 prema EN ISO 14341. Kao zaštitni plin za izradu svih ispitnih uzoraka je korišten Messer Ferroline C18, standardne oznake M21 prema EN ISO 14175 [11], koji se sastoji od 82% Ar i 18% CO₂. Protok je pratio jačinu struje i bio u rasponu od 13 do 20 l/min za debljinu 4 mm i od 15 do 22 l/min za debljinu 8 mm. Preporuke za izbor zaštitnog plina i njegov protok su uzete na osnovu preporuka proizvođača dodatnog materijala [12] i literature [13]. Zavarivanje svih ispitnih uzoraka je izvršeno upotrebom digitalno kontrolisanog inverterskog uređaja proizvođača OTC Daihen, model Welbee P500L. Prilikom zavarivanja zabilježeni su i mjereni svi parametri neophodni za izračun unosa toplote. Osnovni izraz za izračunavanje unosa toplote je dat izrazom (1) [14].

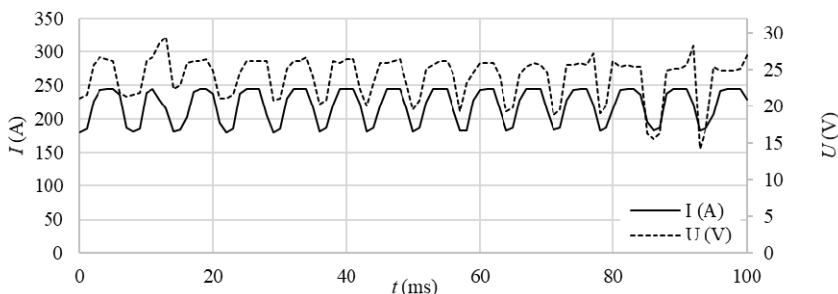
$$Q = \frac{60 \cdot P}{1000 \cdot w} \cdot \eta \quad (1)$$

Ovdje je P (W) snaga električnog luka, w (cm/min) srednja brzina zavarivanja, a η termički stepen iskorištenja postupka (koeficijent termičke efikasnosti) koji iznosi između 0,80 i 0,85. Obzirom da kod pulsnog MAG zavarivanja izvor struje daje specifične 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) [15,16]. Kod njega se snaga električnog luka izračunava prema izrazu (2).

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \cdot U_i \quad (2)$$

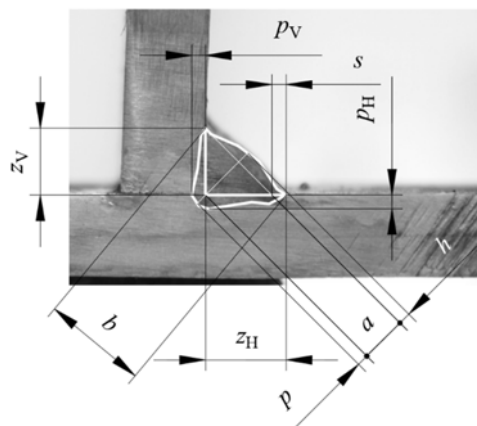
Ovdje su I_i i U_i vrijednosti jačine struje i napona u i -tom momentu, respektivno. Da bile izmjerene, upotrijebljen je digitalni osciloskop i vrijednosti su snimljene rezolucijom 1 ms.

Primjer zapisa sa strujom srednje jačine 220 A je dat na slici 3.



Slika 3. Profil struje i napona prilikom zavarivanja, snimljeno osciloskopom

Nakon zavarivanja ispitnih uzoraka, izvršen je njihov vizuelni pregled. Oni koji su imali značajne nedostatke su odbačeni. Nakon toga je izvršena obrada uzoraka kako bi se dobili makro presjeci (makrošlifovi ili makro izbrusci) u skladu sa standardom EN ISO 17639, koji su potom fotografisani i pomoću kojih je izvršeno mjerenje geometrijskih karakteristika zavarenih spojeva, kako je prikazano na slici 4.



Slika 4. Mjerenje dimenzija zavarenih spojeva

Svi geometrijski pokazatelji su utvrđeni prema ISO/TR 25901-1, dok su pokazatelji kvaliteta mjereni i klasa kvaliteta utvrđena prema EN ISO 5817. Pored parametara navedenim u standardima, kao dopunski pokazatelj je prema izrazu (3) izračunata i srednja kateta z_{sr} .

$$z_{sr} = \frac{z_H + z_V}{2} \quad (3)$$

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Od svih podataka dobijenih tokom eksperimenta, za razvoj modela veze unosa toplote i kvaliteta spoja je potrebno odabrati samo one koji su pogodni za kontrolu, posebno automatsku. Nakon analize izmjerenih (ulaznih) parametara, kao nezavisne varijable uzete su jačina struje I i brzina zavarivanja w , a kao zavisne nadvišenje h i srednja kateta z_{sr} . Utvrđeno je da je napon U prilikom ispitivanja zavisio od jačine struje I (veza je sinergijska), te je stoga odbačen kao nezavisna varijabla. Za ostale zavisne varijable (geometrijske pokazatelje) koje su izmjerene tokom istraživanja je utvrđeno ili da se mogu izraziti preko drugih, ili da nisu relevantne. Na primjer, asimetrija s je od interesa sa aspekta kontrole kvaliteta spojeva, ali nije posljedica tehnoloških parametara, odnosno jačine struje i napona, već manipulativne sposobnosti zavarivača. Odnosno, na nju parametri zavarivanja nemaju direktan uticaj.

Za razvoj modela iskorištena je višestruka linearna regresija, koja je u dostupnoj literaturi najčešće korišten alat za ovu svrhu. Modeli veze su razvijeni pojedinačno za nadvišenje i srednju katetu, odvojeno za svaku debljinu osnovnog materijala.

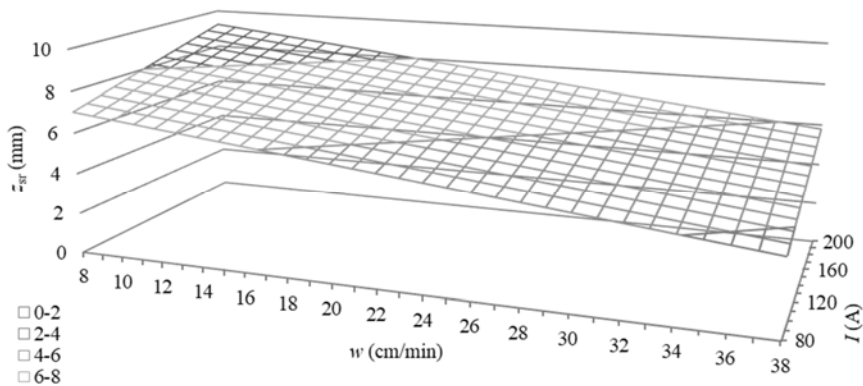
Modeli za nadvišenje su se pokazali neadekvatnim, objašnjavajući 17% i 19% varijabiliteta za debljine osnovnog materijala 4 mm i 8 mm, respektivno. Ovo znači da na nadvišenje mnogo više utiču slučajni faktori nego analizirani ulazni podaci. Odnosno, na nadvišenje veći uticaj ima zavarivač nego izbor tehnoloških parametara.

Za razliku od nadvišenja, za srednju katetu su dobijeni modeli koji objašnjavaju 60% i 71% varijabiliteta za debljine osnovnog materijala 4 mm i 8 mm, respektivno. Uticaj slučajnih faktora je prisutan, ali u mnogo manjoj mjeri. Model za debljinu 4 mm daje izraz (4), a za debljinu 8 mm izraz (5).

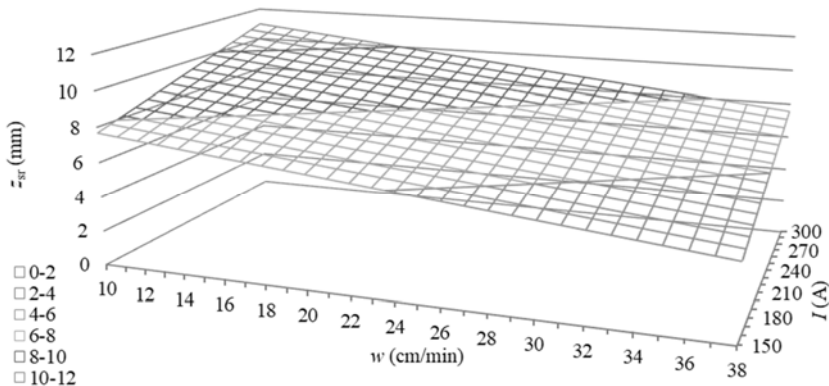
$$z_{sr}=6,45+0,02 \cdot I-0,12 \cdot w \quad (4)$$

$$z_{sr}=6,58+0,02 \cdot I-0,12 \cdot w \quad (5)$$

Grafički prikaz navedenih zavisnosti je dat na slikama 5 (za 4 mm) i 6 (za 8 mm).



Slika 5. Grafički prikaz zavisnosti $z_{sr}=f(I, w)$ za osnovni materijal debljine 4 mm



Slika 6. Grafički prikaz zavisnosti $z_{sr}=f(I, w)$ za osnovni materijal debljine 8 mm

Sa dijagrama se vidi kako jačina struje I i brzina zavarivanja w pojedinačno utiču na veličinu srednje katete z_{sr} , te da je određenu vrijednost z_{sr} moguće dobiti različitim kombinacijama I i w . Ova činjenica se može direktno iskoristiti za kontrolu procesa zavarivanja, odnosno korekciju parametara kako bi se dobila zahtjevana geometrija. Ostvarenje zadane vrijednosti z_{sr} može značiti korekciju brzine pri istoj jačini struje, ili obrnuto, zavisno od toga šta je u datom momentu pogodnije. Ovakav pristup i koncept se može iskoristiti i pri zavarivanju čelika kod kojih se traži kontrolisani unos toplote.

5. ZAKLJUČAK

S ciljem uspostave modela veze kvaliteta zavarenog spoja (predstavljenog kroz mjerive geometrijske karakteristike) i tehnoloških parametara (predstavljenih kroz jačinu struje i brzinu zavarivanja), izvršeno je zavarivanje uzoraka čeličnih limova debljine 4 mm i 8 mm. Analizom

dobijenih rezultata je utvrđeno da su ciljne geometrijske karakteristike nadvišenje h i srednja kateta z_{sr} , dok su tehnološki parametri iskorišteni i za izračun unosa toplote modelom srednje trenutne snage (AIP).

Korištenjem višestruke linearne regresije uspostavljena je veza između ulaznih i izlaznih podataka, za svaku debljinu osnovnog materijala posebno. Ispostavilo se da varijacije u nadvišenju h nije moguće objasniti promjenama I i w , već da su u mnogo većoj mjeri posljedica sposobnosti zavarivača ili drugih faktora. Sa druge strane, dobijeni su izrazi relativno visoke adekvatnosti, po jedan za svaku debljinu, koji opisuju zavisnost veličine srednje katete z_{sr} od parametara zavarivanja (jačine struje I i brzine zavarivanja w).

Dobijeni izrazi se mogu iskoristiti za podešavanje parametara zavarivanja prilikom već uspostavljenog električnog luka, dok se sličan koncept može iskoristiti pri zavarivanju čelika kod kojih se traži kontrolisani unos toplote.

6. REFERENCES

- [1] Yaakub, M. Y.; Tham, G.; Rahim, W. M. A. W. A.; Radzi, M. A. R. M.; Mahmud, A.: Prediction of Welding Parameters and Weld Bead Geometry for GMAW Process in Overhead T-Fillet Welding Position (4F), *Advanced Materials Research*, Vol. 686, 2013, pp. 320-324
doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.686.320
- [2] Åstrand, E.; Öberg, A. E.; Jonsson, B.: Cost Affecting Factors Related to Fillet Joints, poglavlje u *Design, Fabrication and Economy of Metal Structures*, Springer, 2013.
- [3] 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, ISSN 1726-9679
- [4] Karimzadeh, S.: The Need for Artificial Intelligence in the Age of Industry 4.0, *Welding journal*, Vol. 98, No. 5, 2019, pp. 34-35
- [5] Mvola, B.; Kah, P.; Martikainen, J.; Hiltunen, E.: Applications and benefits of adaptive pulsed GMAW, *Mechanika*, Vol. 19, No. 6, 2013, pp. 694-701, doi: 10.5755/j01.mech.19.6.6003
- [6] Horvat, M.; Kondić, V.: The examples of modified procedures of MIG/MAG welding, *Tehnički glasnik*, Vol. 6, No. 2, 2012, pp. 137-140
- [7] AWS Welding Handbook, Volume 2, 9th Edition, AWS, 2004, ISBN 0871717298
- [8] Weman, K.: Welding Processes Handbook, CRC, 2003, ISBN 0849317738
- [9] Hajro, I.; Tasic, P.: Influence of heat input and welding position on geometrical properties of GMAW fillet welds of unalloyed steel, *TEM Journal*, Vol. 9, No. 2, 2020, pp. 496-500
doi: 10.18421/TEM92-10
- [10] Reddy, G. A.; Raman A.; Reddy H.; Kumar G. S.: 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
- [11] Messer Ferroline C8/C18, informacioni list, verzija 2.0
- [12] Lincoln Electric UltraMAG® SG3, informacioni list, verzija C-EN30-27/02/19
- [13] Pratikno, H.; Samiyono, A. N.; Dhanistha, W. L.: Analyzing the Effect of Variation in Shielding Gas Flow Rate and V Groove Type Towards Tensile and Metallographic Testing of GMAW Weld Joint of ASTM A53 and A36, *Intl. J. f Offshore and Coastal Engineering*, Vol. 4, No. 1, 2020, pp. 35-41
- [14] Pašić, O., Zavarivanje, Svjetlost, Sarajevo, 1998.
- [15] Joseph, A.; Harwig, D. D.; Farson, D.; Richardson, R.: Assessing the effects of GMAW-P parameters on arc power and weld heat input, Proceedings of 6th International conference Trends in Welding Research, 2002
- [16] Joseph, A.; Harwig, D.; Farson, D. F.; Richardson, R.: Measurement and calculation of arc power and heat transfer efficiency in pulsed gas metal arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 8, No. 6, 2003, pp. 400-406, doi: 10.1179/136217103225005642