



Petar Tasić^{1a}, Ismar Hajro¹

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

INFLUENCE OF HEAT INPUT ON GEOMETRY OF GMAW FILLET WELDS OF UNALLOYED STEEL

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa 31. Savetovanja sa međunarodnim učešćem "Zavarivanje 2020" održanog u Kladovu 13-16. Oktobra 2021

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2021.

Adresa autora / Author's address:

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

^atasic@mef.unsa.ba

Ključne reči: Unos toplote, MAG, ugaoni spoj, nelegirani čelik

Keywords: Heat input, GMAW, fillet weld, unalloyed steel

Rezime

Ovaj rad opisuje uticaj unosa toplote na geometriju ugaonih spojeva pri MAG zavarivanju limova od nelegiranog čelika debljine 8 mm. Varirani su parametri koji utiču na unos toplote, odnosno jačina struje i brzina zavarivanja, a kao geometrijske karakteristike uzete su dimenzije zavarenog spoja, nadvišenje, penetracija, mešanje metala i asimetričnost spoja. One su dobijene kroz merenje na makrošlifovima. Uticaj unosa toplote na geometrijske karakteristike je predstavljen putem modela koji se bazira na regresionoj analizi.

Abstract

This paper describes influences of heat input on geometry of GMAW fillet welds of unalloyed steel with thicknesses of 8 mm. Welding current and speed are varied, as parameters influencing heat input, while weld size, reinforcement, penetration, dilution and weld asymmetry are considered as geometry properties. All of them are obtained through measurements on macro-sections. Influence of heat input on geometry is presented through the model based on regression analysis.

1. Uvod

Konstrukcionim čelicima se uobičajeno nazivaju oni čelici koji se primjenjuju za izradu dijelova mašina, te različitih građevinskih i mašinskih proizvoda, postolja, transportnih sredstava, vozova i brodova. Za zavarivanje konstrukcionih čelika pogodni su svi postupci zavarivanja topljenjem. [1] Pri ovome se kvalitet, odnosno klase kvaliteta, definišu odgovarajućim standardima i kodovima (na primjer ISO 5817). Između ostalog, ti standardi definišu šta su zahtjevi u pogledu geometrijskih karakteristika spojeva, od kojih se neki provjeravaju bez razaranja (mjerjenje i vizuelni pregled), a neki sa razaranjem (rezanjem zavara, nagrizanjem i mjerenjem). Definisano je također šta se smatra prihvatljivim i neprihvatljivim za zahtijevanu klasu kvaliteta. Sa druge strane, proizvođači osnovnog i dodatnog materijala, a nekada i proizvođači opreme za zavarivanje, daju opšte smjernice za izbor esencijalnih parametara zavarivanja.

MAG zavarivanje ima široku primjenu u proizvodnji različitih zavarenih proizvoda. To je postupak sa velikom brzinom deponovanja koji se može jednostavno mehanizovati ili robotizovati, a

pogodan je za spajanje nelegiranih i niskolegiranih konstrukcionih čelika [2]. Pri ovome, ispravno i pažljivo odabrani parametri mogu spriječiti prevelik unos toplote i posljedično, deformacije predmeta i druge nesavršenosti spojeva [3]. Bez obzira na sve prednosti koje nudi njegova automatizacija, MAG zavarivanje je još uvijek značajnim dijelom ručni proces. Pri tome, zavarivači su kao radna snaga skupi, a njihov umor zbog ponavljanja vrlo preciznih pokreta je značajan problem metalne industrije. Takav umor može uzrokovati ozbiljne zdravstvene probleme, ali i dovesti do pada kvaliteta zavarenih spojeva i povećanja potrebe za naknadnim intervencijama (popravljanja ili ispravljanja zavara). Sve ovo vodi povećanju troškova, ali i mogućim kašnjenjima u proizvodnji. [4] Međutim, ako se koristi robot, on vrši te precizne pokrete kojima se kontroliše pištolj, te u takvim slučajevima zavarivač (odnosno sada već operater) samo nadgleda proces zavarivanja i ukoliko je potrebno, vrši korekcije kretanja ili parametara zavarivanja. [5]



2. Veza unosa toplote i geometrije

Veliki napredak MAG zavarivanja predstavlja uvođenje kontrole brzine žice i mogućnosti mijenjanje i prilagođavanja struje i napona tokom samog zavarivanja, pri već uspostavljenom električnom luku. Na ovaj način je postignuta optimizacija procesa i smanjen unos toplote [3]. Istovremeno je potrebno razviti i pouzdanu kontrolu unosa toplote, a ona bi se mogla bazirati na provjeri geometrije i dimenzija spoja i poređenju sa referentnim vrijednostima. Kako MAG postupak nema šljaku, za mjerenje dimenzija se može upotrijebiti vještački vid baziran na laseru [6]. Onda bi se tokom samog zavarivanja izvršilo podešavanje parametara električnog luka (ukoliko je potrebno) i to nakon poređenja ostvarenog oblika i dimenzija spoja sa referentnim. Ovakav koncept kontrole zavarenog spoja 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* (vrsta i debljina osnovnog i dodatnog materijala i položaj zavarivanja). Tako bi se podešavao set parametara zavarivanja koji bi dao ugaoni spoj potrebnih dimenzija [7].

Ulaz, odnosno parametri zavarivanja, se mogu mijenjati u određenom rasponu bez ugrožavanja potrebne kvalitete zavara. Glavni (esencijalni) parametri kod MAG postupka zavarivanja su jačina struje, napon i brzina zavarivanja, koji određuju unos toplote. On je jedan od osnovnih faktora koji utiče na osobine zavarenih spojeva [7, 8]. Na računsku vrijednost unosa toplote utiče i termički stepen iskorištenja postupka. Ovo je veličina za koju postoje preporučeni rasponi i kao takva se usvaja. Za MAG iznosi od 65% do 85% [9].

Izlaz su geometrijske karakteristike zavarenog spoja, od kojih se neke mogu izmjeriti ili izračunati tek nakon presijecanja spoja. Mjere se dužina kateta, debljina i širina zavarenog spoja, nadvišenje i penetracija, dok se računaju površine osnovnog i dodatnog materijala u metalu šava, miješanje osnovnog i dodatnog materijala i asimetričnost spoja. [7, 10].

Jedan od najjednostavnijih izraza koji definiše odnos između unosa toplote Q i katete spoja z je primjenjiv na sve jednoproložne zavarene spojeva izvedene konvencionalnim elektrolučnim postupcima [8]. Neki od ostalih pristupa i modela su dosta kompleksniji i uključuju praćenje više ulaznih i izlaznih parametara, kao i upotrebu složenih statističkih alata [11, 12]. Neka istraživanja uzimaju u obzir i dodatne parametre, poput brzine dotura žice, ugla pištolja i udaljenosti vrha pištolja [13], a neka se odnose na MAG zavarivanje upotrebom punjenih žica [14]. Neka od istraživanja su čak ispitivala koncept po kojem bi se zvuk električnog luka koristio kao osnova za kontrolu procesa i procjenu kvaliteta zavarenih spojeva [15, 16]. Primjenom ovakve kontrole procesa je pokazano da se može predvidjeti i kontrolisati i širina zone uticaja toplote [17]. Na osnovu izloženog je moguće zaključiti da ideja o ovakvom načinu kontrole kvaliteta spoja putem kontrole geometrije nije novina.

3. Eksperiment

Kako bi se uspostavio model i izvršilo njegovo poređenje sa nekim od postojećih modela, izvršeno je zavarivanje serije spojeva na limovima od nelegiranog konstrukcionog čelika (S235JR, EN 10025-2) debljine 8 mm, a svi su izvedeni u jednom prolazu. Dodatni materijal je bila žica G 42 4 M21 3Si1 EN ISO 14341-A, prečnika 1,2 mm. Kao zaštitni gas je korištena mješavina 82% Ar sa 18% CO₂, čiji je protok bio 18-22 l/min. Udaljenost vrha pištolja od površine radnog komada se kretala u rasponu od 12 do 15 mm. Zavarivanje je vršeno ručno, u dvije pozicije (položena PB i nadglavna PD). Ukupno je zavareno 60 uzoraka, a za zavarivanje je korišten uređaj Daihen Welbee WB-P500L. Parametri zavarivanja su varirani u relativno ograničenom rasponu, kako bi se dobili samo unosi toplote koji su smisleni za date uslove zavarivanja, a njihov pregled daje tabela 1. Navedene jačine struje su srednje vrijednosti izmjerene tokom trajanja zavarivanja, a mjerenje je izvršeno upotrebom Fluke multimetra i strujnih kliješta.

Tabela 1. Parametri zavarivanja korišteni pri ispitivanju
Table 1. Welding parameters used in investigation

Pozicija / Position	Jačina struje / Current I (A)	Napon / Voltage U (V)	Brzina zavarivanja / Welding speed w (cm/min)	Unos toplote / Heat input Q (kJ/mm)
Položena / Horizontal	164 – 291	22,2 – 28,5	13,8 – 60,6	0,6 – 1,3
Nadglavna / Overhead	161 – 292	22,0 – 28,6	16,2 – 53,4	0,7 – 1,3



Unos toplote je izračunat pomoću izraza (1), a za stepen termičkog iskorištenja postupka η je usvojena vrijednost 0,8 [7]

$$Q = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot w} \cdot \eta \quad (\text{kJ/mm}) \quad (1)$$

Ovde je:

U (V) – napon,

I (A) – jačina struje,

w (mm/s) – brzina zavarivanja,

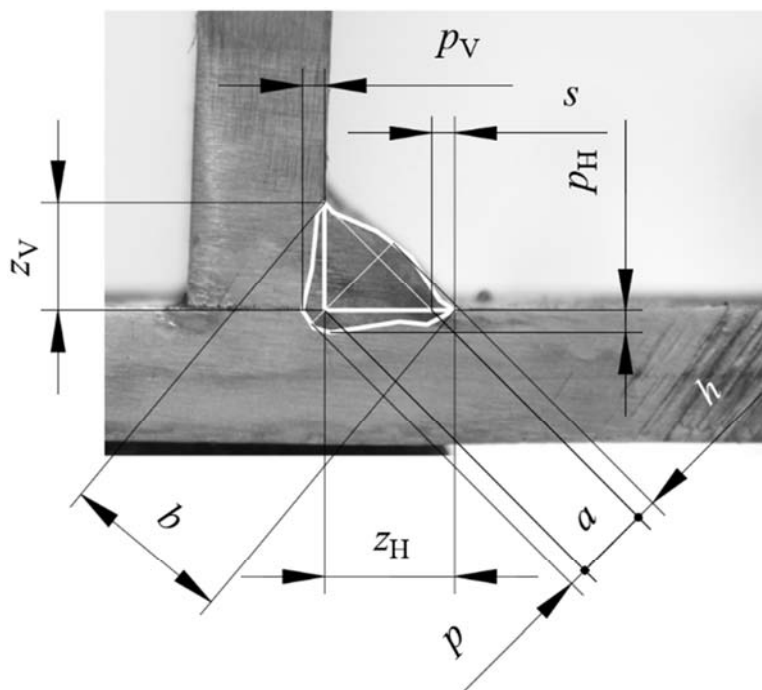
□ (-) – termički stepen iskorištenja postupka.

Nakon zavarivanja su svi uzorci vizuelno ispitani (pregledani). Izvršeno je i presijecanje svakog spoja na dva mjesta, te brušenje, poliranje i nagrizanje presjeka nitalom, nakon čega je slijedilo makroskopsko ispitivanje u skladu sa standardom

ISO 17639. Nakon fotografisanja tako pripremljenih spojeva, upotrebom aplikacije AutoCAD je izvršeno mjerenje kateta (z_H i z_V), debljine spoja (a), nadvišenja (h) i penetracije u korijenu (p) prema ISO TR 25901-1, te asimetričnosti (s) prema ISO 5817. Dodatno su izmjerene i penetracije u horizontalnom i vertikalnom pravcu (p_H i p_V , slika 1) i površine osnovnog i dodatnog metala (A_B i A_F) koji čine metal šava, te je prema izrazu (2) izračunato miješanje metala (D).

$$D = \frac{A_B}{A_B + A_F} \cdot 100\% \quad (\%) \quad (2)$$

Prikaz mjerenih dimenzija zavarenog spoja u aplikaciji AutoCAD na pripremljenom presjeku prikazuje slika 1, a pri ovome je korištena razmjera 1:1.



Slika 1. Primjer mjerenja dimenzija ugaonog spoja na limovima debljine 8 mm

Figure 1. Example of measuring dimensions of a fillet weld on 8 mm thick sheets

Debljina spoja (a) je izmjerena kao visina najvećeg istostraničnog trougla kojeg je moguće upisati u presjek zavarenog spoja, a širina lica šava (b) je dobijena preko izraza (3).

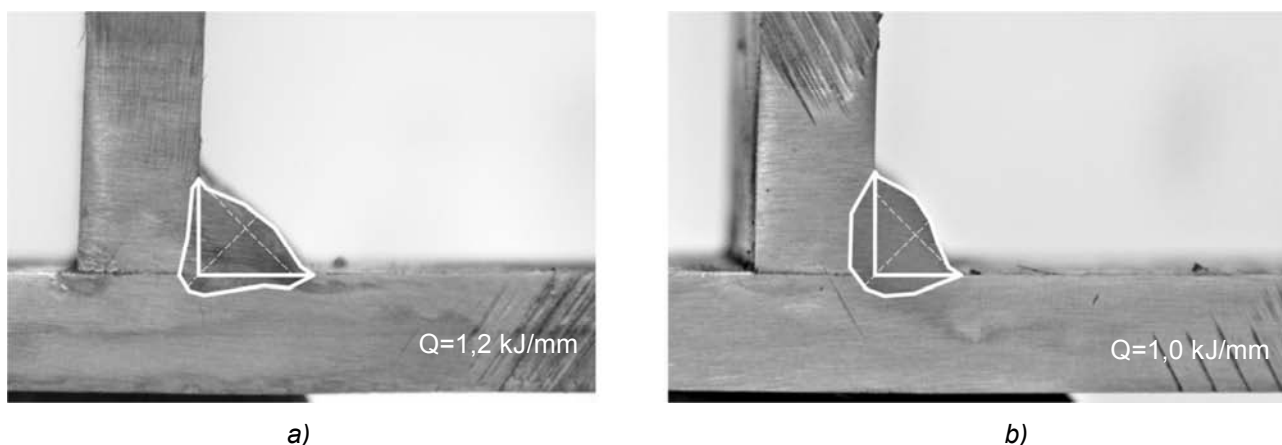
$$b = \sqrt{z_H^2 + z_V^2} \quad (\text{mm}) \quad (3)$$

4. Rezultati i diskusija

S obzirom da je zavarivanje vršeno u položenoj (PB) i nadglavnoj (PD) poziciji, rezultati mjerenja dimenzija zavarenih spojeva su dati odvojeno za

njih. Tako će se moći izvršiti i procjena uticaja pozicije zavarivanja na geometrijske karakteristike spoja, a ne samo unosa toplote.

Ono što je očekivano i jasno vidljivo na presjecima je uticaj gravitacije, odnosno razlika u profilu zavarenog spoja između položene i nadglavne pozicije. Ovo je prikazano na slici 2, gdje su dati presjeci dva spoja koja su zavarena istom jačinom struje ($I=225$ A), ali sa različitim unosima toplote u dvije pozicije. Vidljiva je i asimetrija koja odgovara uticaju gravitacije.

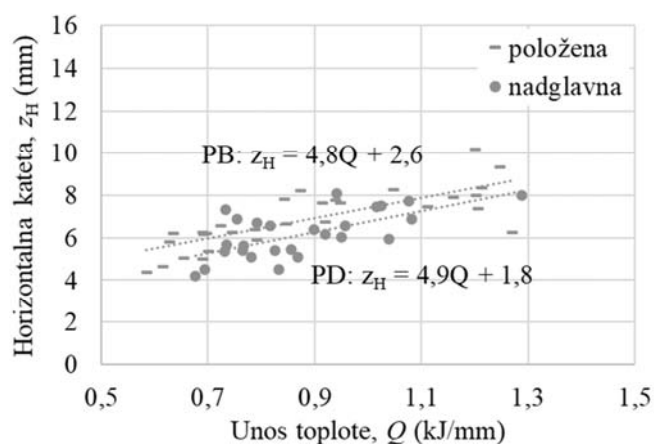


Slika 2. Primjer zavarenog spoja u položenoj (a) i nadglavnoj (b) poziciji

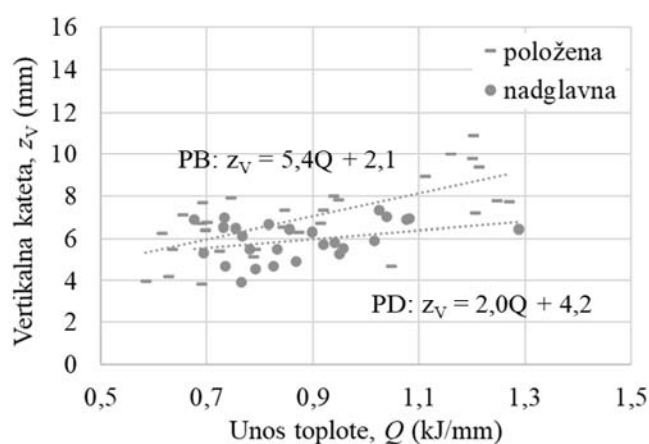
Figure 2. Example of a welded joint in the horizontal (a) and overhead (b) position

Prvi analizirani pokazatelj geometrije su dužine horizontalne i vertikalne katete za položenu i nadglavnu poziciju, i ovo prikazuje slika 3. Navedene su i jednačine koje opisuju zavisnost veličine katete od unosa toplote. Radi jednostavnosti, one su linearnog tipa, iako u literaturi postoje i drugi, često kompleksniji, modeli.

Kako se vidi, za isti unos toplote, položena pozicija daje veće vrijednosti obje katete. Sa druge strane, gravitacija značajno utiče na proces ručnog zavarivanja u nadglavnoj poziciji, što zavarivač kompenzira manipulacijom pištolja, te se tako ostvaruje relativno širok raspon vrijednosti veličine vertikalne katete. Ipak, njena veličina u nadglavnoj poziciji je općenito manja u odnosu na položenu.



a)



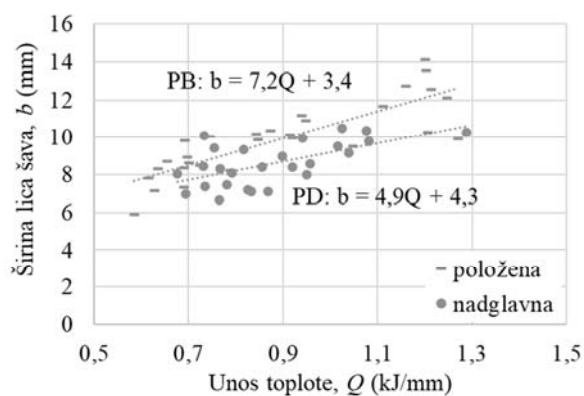
b)

Slika 3. Zavisnost veličine horizontalne (a) i vertikalne (b) katete od unosa toplote

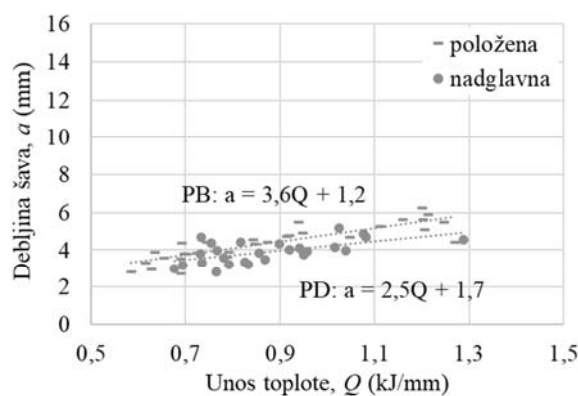
Figure 3. Dependence of the size of the horizontal (a) and vertical (b) triangle leg on heat input

Kako se može vidjeti sa slike 3, očigledno je da postoji određena asimetrija zavarenog spoja, odnosno razlika u veličinama kateta pri istom unosu toplote. Sama asimetrija je nešto izraženija u položenoj poziciji, ali na njenu vrijednost unos toplote nema uticaj.

Slika 4 prikazuje zavisnost širine šava, izračunate prema izrazu (3) i debljine šava od unosa toplote. Kako se vidi, i ove veličine imaju veće vrijednosti u položenoj poziciji. Objašnjenje za ovo može biti uticaj gravitacije u nadglavnoj poziciji, budući da manje materijala završi u šavu, ali i uticaj manipulativne sposobnosti zavarivača, budući da se radi o ručnom zavarivanju.



a)



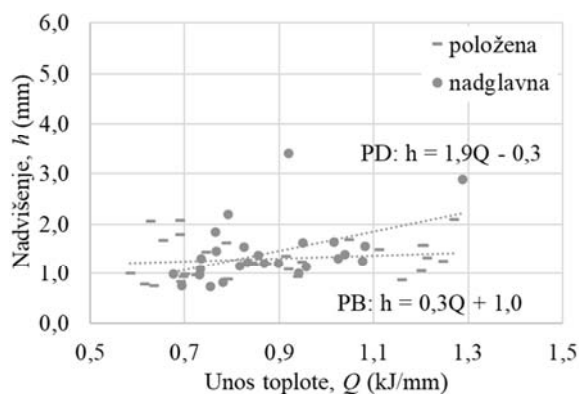
b)

Slika 4. Zavisnost širine (a) i debljine (b) šava od unosa toplote

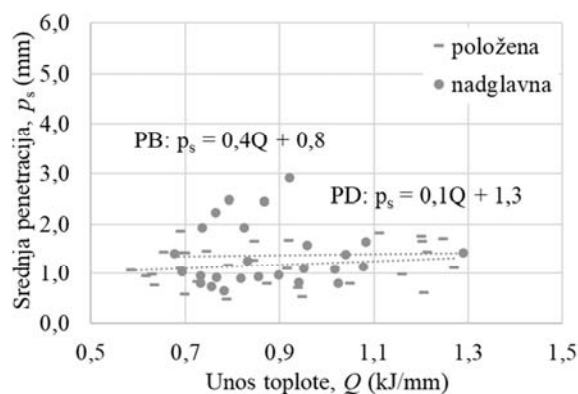
Figure 4. Dependence of width (a) and thickness (b) of the weld metal on heat input

Slika 5 prikazuje zavisnost nadvišenja šava i srednje penetracije u zavisnosti od unosa toplote. Srednja penetracija nije standardna veličina, a izračunata je kao srednja vrijednost maksimalne penetracije u horizontalnom i vertikalnom pravcu i

one u korijenu. Penetracija u korijenu nije bila uvijek ostvarena, nego je prisutna samo pri većim unosima toplote (od oko 1,1 kJ/mm). Ovo je posljedica i ručnog zavarivanja, ali i toga što nije vršena posebna priprema zavarenih spojeva.



a)



b)

Slika 5. Zavisnost nadvišenja šava (a) i penetracije (b) od unosa toplote

Figure 5. Dependence of excess weld metal reinforcement (a) and penetration (b) on heat input

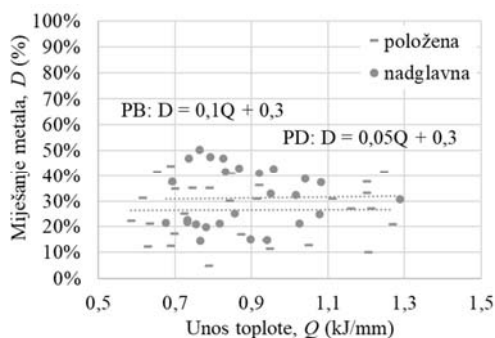
Kako se vidi, povećanje unosa toplote dovodi po povećanja nadvišenja. Zbog uticaja gravitacije, nadvišenje je mnogo više izraženo u nadglavnoj poziciji i više zavisi od unosa toplote. Uvidom u pojedinačne zavare je moguće vidjeti da nadvišenje nema isti oblik i dimenzije za slične unose toplote, što se može objasniti time da je u pitanju ručno zavarivanje. Pri ovome, vrijednost prihvatljivog nadvišenja standard EN ISO 5817 propisuje kao vrijednost koja zavisi od širine lica šava, i u većini slučajeva zavareni spojevi su ispunjavali bar najnižu D klasu kvaliteta.

Kako se vidi, kod obje pozicije je prisutan blagi rast srednje penetracije sa rastom unosa toplote. Ipak, može se reći da su nešto veće vrijednosti penetracije u nadglavnoj poziciji, ali je i veći raspon

ostvarenih penetracija za slične unose toplote. I ovo je posljedica manipulativne sposobnosti zavarivača, koji nastoji održati i kupku i električni luk u datim uslovima.

Jedna od karakteristika je i miješanje materijala, koje se izračunava pomoću izraza (2), a čiju zavisnost od unosa toplote prikazuje slika 6. Kako se vidi prema izrazima na dijagramu, unos toplote, u obje pozicije, nema značajnog uticaja na miješanje metala. Pri istom unosu toplote, nešto veće vrijednosti miješanja metala se dobijaju u nadglavnoj poziciji.

Miješanje materijala nije toliko značajan parametar kada se radi o čelicima iste vrste, što je ovdje slučaj, ali je ipak uključen u analizu budući da može biti indirektni pokazatelj intenziteta topljenja.

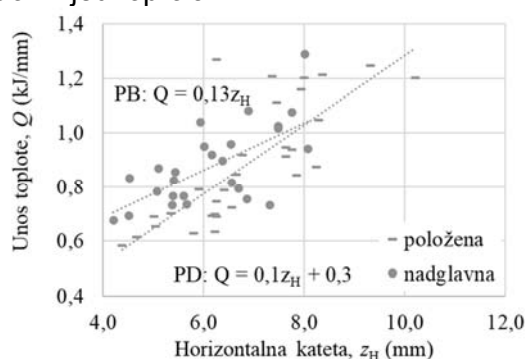


Slika 6. Zavisnost miješanja metala od unosa toplote

Figure 6. Dependence of metal mixing on heat input

Zanimljivo je iskoristi ovakav model, gdje je unos toplote ulaz a dimenzije izlaz, na obrnut način. U tom slučaju izlaz postaje unos toplote, pa bi se model koristio da se utvrdi unos toplote potreban da se u datim uslovima (ugaoni jednoprolazni

zavar, čelik S235JR debljine 8 mm) dobije određena veličina spoja. Slika 7 daje primjer takvog dijagrama, na kojem je dat i izraz koji linearno opisuje tu zavisnost.



Slika 7. Zavisnost unosa toplote od potrebne katete

Figure 7. Dependence of heat input on the required leg size

Isti koncept je moguće provesti za ostale geometrijske karakteristike, te bi se na taj način omogućio izbor raspona unosa toplote za potrebne raspone vrijednosti geometrijskih karakteristika. Ovo bi dalje moglo dovesti do automatizacije kontrole dimenzija i kvaliteta zavarenog spoja.

5. Zaključak

Rezultati navedeni u ovom radu se odnose na ručno zavarivanje ugaonih spojeva na nelegiranom konstrukcionom čeliku debljine 8 mm u dvije pozicije, položenoj i nadglavnoj. Pri tome je istraživao uticaj unosa toplote na geometrijske karakteristike zavara, koje su utvrđene mjerenjem na presjeku. Za svaki zavar su izvedena po tri presjeka.

Kako se vidi sa dijagrama, u slučaju povećanja unosa toplote dimenzije spoja se općenito povećavaju. U horizontalnoj poziciji se općenito ostvaruju veće dimenzije spoja za isti unos toplote.

Vidljivo je da se penetracija i miješanje materijala ne mijenjaju značajno sa promjenom

unosa toplote, kao i da ova dva pokazatelja imaju veće vrijednosti za nadglavnu poziciju.

Navedeni izrazi se baziraju na podacima koji su dobiveni mjerenjem. Uzimajući u obzir izmjerene vrijednosti nadvišenja i asimetrije, oko pola zavarenih spojeva zadovoljava klasu B kvaliteta (prema EN ISO 5817), dok preostali zadovoljavaju klase C i D. Ipak, na slikama je vidljivo da su rasponi vrijednosti geometrijskih karakteristika relativno široki, što se može pripisati tome da je u pitanju ručno zavarivanje. Naravno, u slučaju da se radi o robotskom zavarivanju, ponovljivost pokreta i preciznost izvedbe zavara postaje neupitna, te bi tako ovakav koncept bio upotrebljiviji jer bi imao i veću pouzdanost.

Sa druge strane, izložena je ideja da se sličan koncept i rezultati dobijeni ovakvim pristupom iskoriste za definisanje potrebnog unosa toplote kojim se dobija željena dimenzija spoja, kako je prikazano na slici 7. Međutim, u slučaju ručnog zavarivanja, ovo bi tražilo zavarivanje i analizu velikog broja spojeva ili upotrebu naprednih statističkih alata.

**Literatura / References**

- [1] Pašić, O., Zavarivanje, Svjetlost, Sarajevo, 1998.
- [2] Yaakub, M. Y., Tham, G., Rahim, W. M., Radzi, M. A. R. M., Mahmud, A., *Advanced Materials Research*, 686 (2018), 320-324.
- [3] Mvola, B., Kah, P., Martikainen, J., Hiltunen, E., *Mechanika*, 19 (2013) 6, 694-701.
- [4] Czifra, J., Vicikova, J., Szabo, P., Automated production system for pipelines of vessels, *Proceedings, 21st International DAAAM Symposium*, B. Katalinic (Ed.), 21 (2010), 1
- [5] Karimzadeh, S., *Welding journal*, 98 (2019), 5, 34-35.
- [6] Reddy, G. A., Raman A., Reddy H., Kumar G. S., *Proceedings, 2008 International Conference on Image Processing, Computer Vision, & Pattern Recognition*, July 14-17, 2008, Las Vegas, USA
- [7] Hajro, I., Tasic, P., *TEM J.*, 9 (2020), 2, 496-500.
- [8] Miller, D. K., Funderburk R. S., *Welding Journal*, 80 (2001), 7, 40-43.
- [9] Bosworth, M. R., *Welding Journal*, Supplement (1991), 111-117.
- [10] Ribeiro, R. A., Santos, E. B. F., Assunção, P. D. C., Maciel, R. R., Braga E. M., *Welding Journal*, 94 (2015), 9, 301-311.
- [11] Kumar, A., DebRoy, T., *Proceedings, 7th Int. conference Trends in Welding Research*, May 16-20, 2005, Pine Mountain, USA
- [12] Kumar, V., Parida, M. K., Albert, S. K., *Int J Syst Assur Eng Manag*, (2021)
- [13] Kolahan, F., Heidari, M., *Intl. J. Of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 3 (2009), 11, 1391-1394.
- [14] Gucwa, M., Beczkowski, R., *Archives of Foundry Engineering*, 14 (2014), 127-130.
- [15] Horvat, J., Prezelj, J., Polajnar, I., Čudina, M., *Journal of Mech Eng*, 57 (2011), 3, 267-278.
- [16] Cayo, E. H., Absi, S. C. A., *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 3 (2008), 571-579.
- [17] Lima, E. J., Castro, C., Bracarense, A. Q., Campos M. M., *Proceedings, 7th Int. conference Trends in Welding Research*, May 16-20, 2005, Pine Mountain, USA

Članstvo u strukovnoj asocijaciji DUZS

je referenca za Vaš profesionalni status

Članarina za 2022. godinu je 3500,00 dinaraUplatom članarine stičete pravo na beneficirane cene
pretplate časopisa (strana MARKETING)

Tekući račun DUZS: 325-9500600002588-46

Informacije

+ 381 (11) 2420-652 (10-16 h)

duzs@eunet.rswww.duzs.org.rs