



Belmin Hodžić¹, Petar Tasić^{1a}, Ismar Hajro¹

KARAKTERIZACIJA MAG PULSNOG ZAVARIVANJA UKLJUČUJUĆI SNIMANJE DINAMIČKIH KARAKTERISTIKA I PRORAČUN UNOSA TOPLOTE

CHARACTERIZATION OF PULSED GMAW INCLUDING RECORDING OF DYNAMIC CHARACTERISTIC AND HEAT INPUT CALCULATION

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, Srbija od 13. do 16. Oktobra 2021.

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2021.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Decembar 2021.

Ključne reči: MAG pulsno zavarivanje, izvor struje, parametri, unos toplote, profili struje i napona

Rezime

Kod MAG zavarivanja postoji nekoliko tipova prenosa metala koji su prvenstveno određeni primarnim parametrima zavarivanja. Različiti prijenosi metala u električnom luku su karakteristični za različite primjene. U ovom radu je izvršena detaljna karakterizacija pulsno prijenosa metala u električnom luku, uključujući karakterizaciju parametara i kriterije za izbor istih na korištenom izvoru struje za zavarivanje Welbee. Za dati uređaj Welbee, prikazan je izbor parametara kod zavarivanja čelika, kao i sinergijska funkcija koja je karakteristična za ove uređaje. Zavarivanje je izvedeno na konstrukcionim čelicima, s prethodno usvojenim parametrima, praćeno snimanjem dinamičkih karakteristika struje i napona osciloskopom. Na osnovu dostupnih literaturnih izvora, detaljno su analizirani postojeći modeli za proračun unosa toplote kod MAG pulsno zavarivanja, te je na osnovu jednog izvršen proračun unosa toplote za zavarene čelične limove, na osnovu prethodno snimljenih profila struje i napona. Nakon provedenog eksperimenta, dobijeni rezultati su analizirani, te su na osnovu istih dati opšti komentari uticaja parametara na kvalitet zavarenih spojeva.

1. Uvod

MAG pulsno zavarivanje predstavlja vrstu prijenosa metala kod kojeg se vršna i bazna struja

Adresa autora / Author's address:

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

^a Email: tasic@mef.unsa.ba

Keywords: Pulsed GMAW, power source, parameters, heat input, current and voltage profiles

Abstract

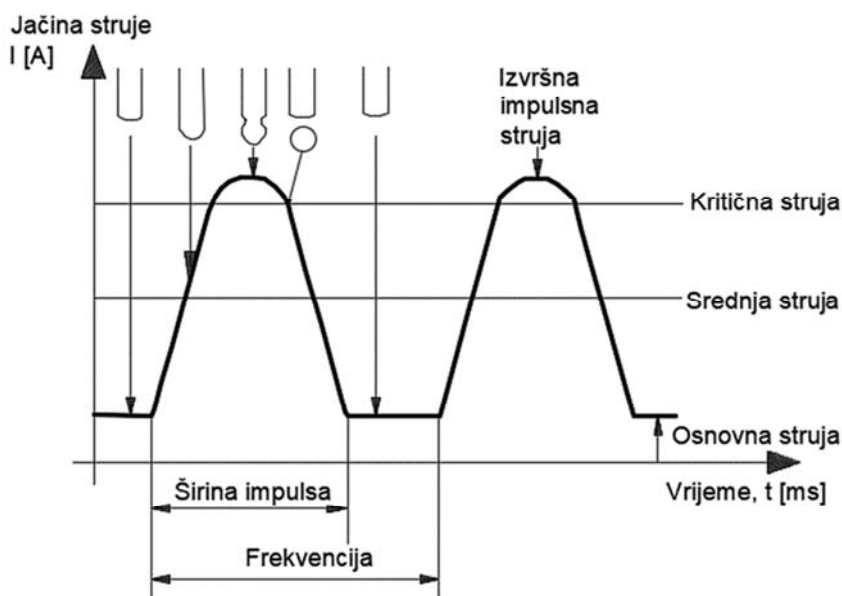
In GMAW welding, there are several types of metal transfer that are primarily determined by the primary welding parameters. Different metal transfers in an electric arc are characteristic of different applications. In this paper, a detailed characterization of the pulse transfer of metals in an electric arc is performed, including the characterization of parameters and criteria for their selection on the used power source for welding Welbee. For a given Welbee device, the choice of parameters in steel welding is shown, as well as the synergy function that is characteristic of these devices. Welding was performed on structural steels, with previously adopted parameters, accompanied by recording the dynamic characteristics of current and voltage with an oscilloscope. Based on the available literature sources, the existing models for heat input calculation in GMAW pulse welding were analysed in detail. Heat input calculation for welded steel sheets was performed by using one of them, with current and voltage profiles recorded with an oscilloscope. After the experiment, the obtained results were elaborated, and general comments were given regarding influence of parameters on the quality of welded joints.

primjenjuju u intervalima (slika 1), gdje se na taj način postiže manji unos toplote, što ima veliki značaj za materijale osjetljive na visoke temperature, a istovremeno prskanje je svedeno na



minimum. Pulsno zavarivanje, korištenjem odgovarajućeg izvora struje i parametara pri zavarivanju, gotovo neovisno o pokretima ruke

zavarivača i oblika predmeta (osnovnog materijala) omogućava dobijanje kvalitetnih zavarenih spojeva. [1]



Slika 1. Prikaz pulsno režima rada [2]

Figure 1. Presentation of the pulsating mode of operation [2]

Kod pulsno zavarivanja postoji nekoliko osnovnih parametara koji utiču na tip i stabilnost prijenosa metala u električnom luku, a to su vršna i bazna struja zavarivanja, napon električnog luka i frekvencija [3].

Na izvoru struje za zavarivanje Welbee, koji je korišten prilikom izvođenja eksperimenta, izbor parametara se najčešće vrši upotrebom sinergijske funkcije uređaja, obzirom da se na taj način dobija optimalna kombinacija svih parametara za određenu vrstu osnovnog materijala, a time je i znatno olakšan rad zavarivaču. Sinergijska funkcija uređaja podrazumijeva podešavanje parametara pomoću jednog potenciometra. Prilikom upotrebe iste potrebno je odabrati vrstu osnovnog materijala, struju zavarivanja, vrstu zaštitnog gasa i prečnik dodatnog materijala, nakon čega su ostali parametri automatski podešeni [4].

Kod pulsno MAG zavarivanja, izvor struje generira specifičan profil struje, gdje se ista mijenja u rasponu od bazne do vršne struje. Vršna struja (engl. *peak current*) topi dodatni materijal, utiče na formiranje kapljice i njenu oblik i veličinu, te omogućava odvajanje iste s vrha žice. Bazna struja (engl. *base current*) igra veoma važnu ulogu u održavanju stabilnosti električnog luka u smislu da ima minimalnu vrijednost (od 20 A do 50 A) tako da sprječava gašenje istog, bitno određuju unos toplote u zavareni spoj i značajno smanjuje

intenzitet prskanja prilikom pada odvojene kapljice u rastopljeni metal [3, 4].

Napon električnog luka kod pulsno zavarivanja, zavisi od toga da li se zavarivanje vrši u sinergijskom ili individualnom načinu rada. Kada je aktivan sinergijski način rada, vrijednost napona se automatski podešava na osnovu podešene vrijednosti struje zavarivanja. U individualnom načinu rada vrijednost napona ne zavisi od podešene vrijednosti struje, nego se ista podešava ručno na uređaju. Vrijednost napona je veoma bitna s aspekta dobijanja željenog kvaliteta, geometrije i mehaničkih osobina zavarenog spoja [4].

Visoka vrijednost napona uzrokuje i visok električni luk, što za posljedicu ima dobijanje šireg zavara (povećanje širine odvojene kapljice) i manju penetraciju. Ova pojava direktno utiče na pogoršanje mehaničkih osobina i mogućnost nastanka grešaka u zavarenom spoju, poput nedovoljne penetracije ili nedostatka topljenja, što posebno može predstavljati problem kod sučeonih zavarenih spojeva koji se po pravilu izvode s punom penetracijom. S druge strane, nizak napon podrazumijeva i nizak električni luk, gdje se kao posljedica javlja intenzivnije prskanje, a u određenim situacijama može doći i do kontakta mlaznice gorionika s osnovnim materijalom, što uzrokuje njenu kontaminaciju [4].



Frekvencija pri pulsnom zavarivanju predstavlja broj odvojenih kapljica rastopljenog metala u jedinici vremena. Sa povećanjem frekvencije povećava se brzina deponovanja metala šava i obrnuto. S povećanjem vrijednosti frekvencije, za istu vrijednost brzine zavarivanja, širina koraka će se smanjiti (manja kapljica), tako da za istu dužinu zavarenog spoja dolazi do odvajanja većeg broja kapljica. S druge strane, ako se vrijednost frekvencije smanji, uz konstantnu brzinu zavarivanja, korak kapljica će se povećati, pa u tom slučaju vrijedi da će se odvojiti manji broj kapljica za istu dužinu zavarenog spoja [3, 4].

2. Modeli za proračun unosa toplote

Unos toplote Q (engl. *heat input*) predstavlja jedan od najbitnijih parametara zavarivanja, koji utiče na osobine, kvalitet i geometriju zavarenog spoja. On predstavlja energiju koja je potrebna za topljenje dodatnog materijala i uske zone osnovnog materijala po jedinici dužine zavara, u opštem

slučaju za elektrolučne postupke se računa prema izrazu (1), a određen je strujom zavarivanja I , naponom električnog luka U , brzinom zavarivanja w i termičkim koeficijentom iskorištenja postupka η [5-7]:

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

Obzirom da kod pulsno MAG zavarivanja izvor struje generira specifičan, promjenjiv profil struje, postoji nekoliko modela za određivanje unosa toplote. U svom radu A. Joseph, D. D. Harwig i ostali autori su korištenjem kalorimetra s tečnim azotom i postavljanjem modela utvrdili efikasnost električnog luka i unos toplote pri pulsnom MAG zavarivanju. Korištena su tri modela za određivanje snage električnog luka, odnosno unosa toplote pri pulsnom zavarivanju i nazvani su kao srednja kvadratna snaga (P_{RMS}), prosječna snaga (P_{AV}) i prosječna trenutna snaga (AIP), a formule za izračunavanje istih su navedene u tabeli 1. [6, 7]

Tabela 1. Modeli za proračun unosa toplote [5]

Table 1. Heat input calculation models [5]

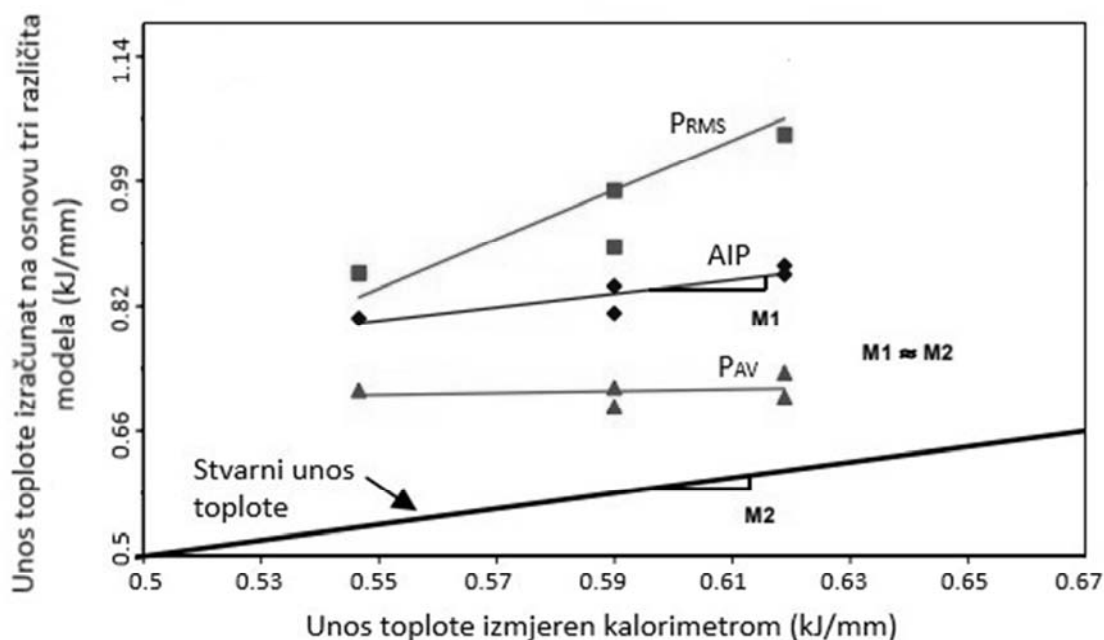
Srednja kvadratna snaga, P_{RMS}	$P_{RMS} = I_{RMS} \cdot V_{RMS}$ $I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i^2}$ $U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i^2}$
Prosječna snaga, P_{AV}	$P_{AV} = I_{AV} \cdot U_{AV}$ $U_{AV} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}$ $I_{AV} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n}$
Prosječna trenutna snaga, AIP	$AIP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \cdot U_i$

Izrazi koji su navedeni u tabeli 1 predstavljaju izraze za izračunavanje snage električnog luka. Dijeljenjem tih izraza sa brzinom zavarivanja se dobijaju izrazi za proračun unosa toplote u idealnim uslovima, a obzirom da se dio toplote preda i okolini, izraz za količinu toplote je potrebno pomnožiti termičkim koeficijentom iskorištenja postupka η , koji za MAG postupak zavarivanja iznosi od 0,65 do 0,85 [5, 6].

Izvršena je provjera izraza koje daje tabela 1. [5] Zavarivanje je izvedeno na niskougličnom čeliku, pri čemu je korišten dodatni materijal prečnika 1,2 mm oznake G 42 4 C/M 3Si1 prema EN ISO 14341-A i mješavina 90% argona i 10% CO₂ kao zaštitni gas. Napon i struja električnog luka mjereni su s visokom frekvencijom, a brza kamera je korištena za održavanje konstantne dužine električnog luka od 3 mm. Unos toplote izmjeren kalorimetrom je iskorišten za poređenje sa izračunatim unosima toplote prema izrazima koje



daje tabela 1. Rezultate mjerenja i izračuna daje slika 2 [5].



Slika 2. Poređenje izračunatih i izmjerenih vrijednosti unosa toplote [5]

Figure 2. Comparison of calculated and measured values of heat input [5]

Posmatrajući sliku 2 može se zaključiti da su odstupanja između vrijednosti dobijenih korištenjem modela i izmjerene vrijednosti unosa toplote kalorimetrom veća ili manja u zavisnosti od modela koji se analizira. Unos toplote izračunat na osnovu prosječne snage (P_{AV}) daje najveću iskoristivost električnog luka od 85%. Također, može se primijetiti da nagib krive koja prikazuje prosječnu snagu (označena s P_{AV}), ne odgovara nagibu krive koja predstavlja stvarni unos toplote, odnosno unos toplote koji je izmjeren kalorimetrom [5].

Unos toplote izračunat na osnovu izraza za srednju kvadratnu snagu (P_{RMS}) daje manju efikasnost električnog luka (60%), a nagib krive još uvijek ne odgovara nagibu krive sa stvarnim unosom toplote. Unos toplote izračunat korištenjem modela prosječne trenutne snage (AIP) daje

efikasnost luka od 70%. Pored toga nagib krive (označena s AIP) najbliže odgovara nagibu krive koja predstavlja stvarni unos toplote. Ovi rezultati ukazuju na to da je AIP najprikladniji (najmjerodavniji) model za izračunavanje vrijednosti unosa toplote pri pulsnom MAG zavarivanju.[5]

3. Eksperiment

Zavarivanje je izvedeno na ugaonim spojevima u dvije pozicije, položenoj (PB) i nadglavnoj (PD), na limovima debljine 4 mm i 8 mm. Zavarivanje je izvedeno u ovim pozicijama jer se iste smatraju kao dvije ekstremne pozicije. Osnovne parametre zavarivanja daje tabela 2, a korišten je dodatni materijal prečnika 1,2 mm oznake G 46 5 M 4Si1 prema EN ISO 1434-1, i mješavina 82% argona i 18% CO₂, oznake M21 prema EN ISO 14175, kao zaštitni gas.

Tabela 2. Parametri zavarivanja

Table 2. Welding parameters

Osnovni materijal	Debljina (mm)	Struja (A)	Napon (V)	Protok gasa (l/min)	Pozicija
P355NL2	4	120	20	20	Položena
P355NL2	4	120	20	20	Nadglavna
S235JR	8	190	23	23	Položena
S235JR	8	160	22	23	Nadglavna



Dinamička karakteristika prikazuje promjenu struje i napona u jedinici vremena u toku zavarivanja. Dinamičkim praćenjem parametara zavarivanja omogućava se procjena stabilnosti samog procesa zavarivanja kao i kontrola parametara. Obzirom da ne postoji jedinstven način na koji bi se opisala dinamička karakteristika nekog uređaja, kao što je to slučaj za statičku karakteristiku (CC – konstantna struja ili CV –

konstantan napon), istu je potrebno mjeriti tokom procesa zavarivanja. Za snimanje dinamičkih karakteristika, odnosno promjene vrijednosti struje i napona tokom vremena korišteni su dvokanalni osciloskop Siglent SHS806 i strujna kliješta Fluke I310S. Na slici 3 je prikazan način povezivanja osciloskopa i strujnih kliješta na uređaj Welbee P500L, koji je korišten pri zavarivanju datih uzoraka.



Slika 3. Povezivanje osciloskopa i strujnih kliješta na uređaj Welbee P500L

Figure 3. Connecting the oscilloscope and current clamps to the Welbee P500L

4. Rezultati i diskusija

Nakon snimljenih profila struje i napona i izvršenog proračuna unosa toplote mogu se dati opšti komentari na stabilnost parametara tokom zavarivanja, kao i procesa zavarivanja generalno. Obzirom da se model AIP pokazao kao najmjerodavniji za proračun unosa toplote kod

pulsnog MAG zavarivanja, isti je upotrijebljen za proračun unosa toplote datih zavarenih uzoraka. Prilikom proračuna unosa toplote za vrijednost termičkog koeficijenta iskorištenja postupka η je uzeta vrijednost 0,75. U tabeli 3 su prikazane vrijednosti unosa toplote i parametri koji su potrebni za njeno izračunavanje.

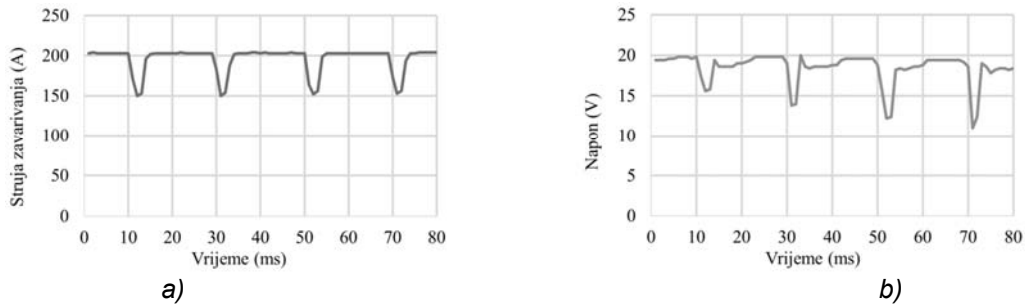
Tabela 3. Vrijednosti unosa toplote na osnovu snimljenih dinamičkih karakteristika

Table 3. Heat input values based on recorded dynamic characteristics

Osnovni materijal	Pozicija	AIP (W)	Brzina zavarivanja (cm/min)	Unos toplote (kJ/mm)
P355NL2	Položena	3.612	20,28	0,80
P355NL2	Nadglavna	3.577	31,20	0,51
S235JR	Položena	3.316	33,72	0,44
S235JR	Nadglavna	3.562	17,88	0,89

Za zavarene uzorke su prikazani profili struje i napona za nekoliko ciklusa, a bili su upotrijebljeni i prilikom proračuna unosa toplote. Za određene uzorke se može konstatovati veoma nizak unos

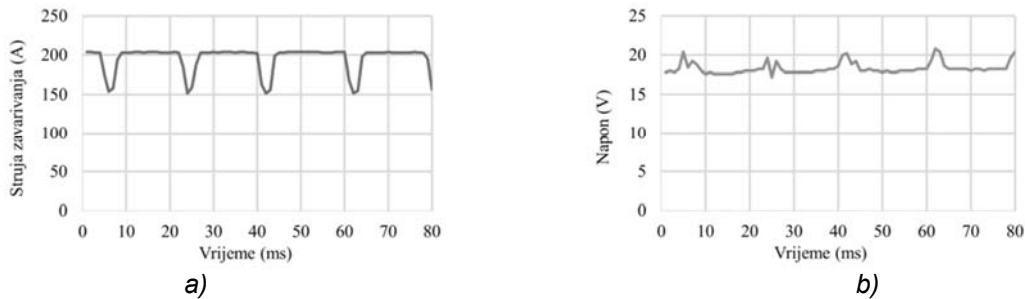
toplote, koji je upravo posljedica promjenjivog profila struje i velike brzine zavarivanja. Analizirajući profil struje na slici 4 može se utvrditi stabilnost procesa, jer se vrijednost struje mijenja pravilno u rasponu od bazne (150 A) do vršne vrijednosti (204 A).



Slika 4. Profil struje (a) i napona (b) za materijal P355NL2, položena pozicija
Figure 4. Current (a) and (b) voltage profiles for material P355NL2, flat position

Kod pulsno MAG zavarivanja, procesor samog uređaja na osnovu podešene vrste osnovnog materijala, struje zavarivanja i vrste zaštitnog gasa definiše profil po kojem će se mijenjati vrijednost napona. U tom slučaju profil napona ne slijedi profil struje, nego se oba profila mijenjaju po određenoj

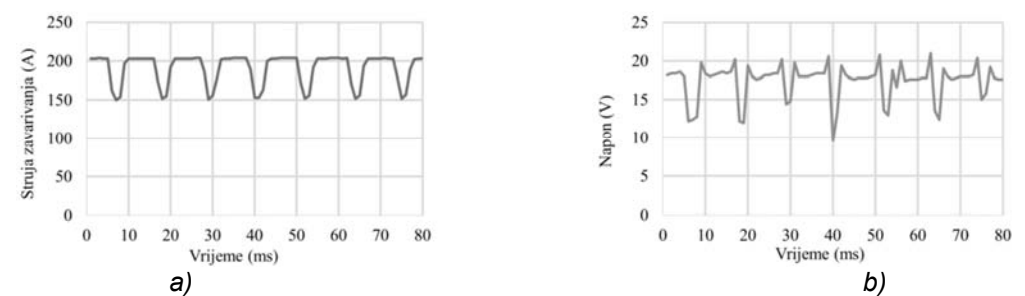
programiranoj zakonitosti na osnovu izabranih prethodno spomenutih parametara. Za određene uzorke vrijednost napona se mijenjala u veoma uskim granicama, kao što je prikazano na slici 5, dok je za druge uzorke karakteristična nestabilnija promjena napona kao što je to prikazano na slici 6.



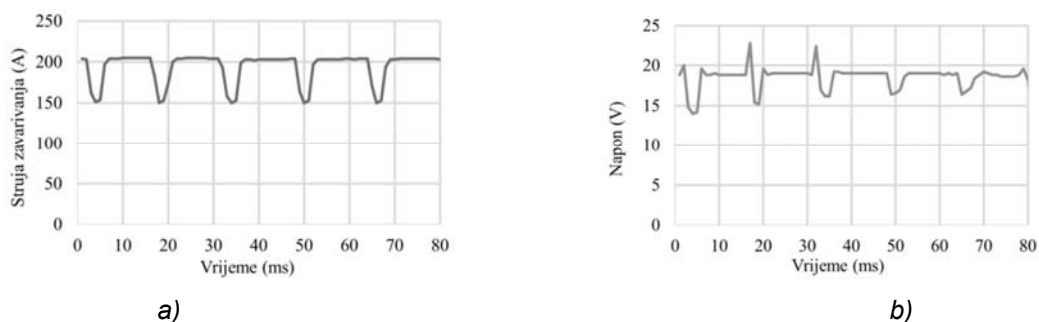
Slika 5. Profil struje (a) i napona (b) za materijal P355NL2, nadglavna pozicija
Figure 5. Current profile (a) and voltage profile (b) for material P355NL2, overhead position

Za profil napona prikazan na slici 6, vrijednost napona u jednom ciklusu je bila ispod 10 V što

upućuje na trenutnu nestabilnost električnog luka.



Slika 6. Profil struje (a) i napona (b) za materijal S235JR, položena pozicija
Figure 6. Current (a) and voltage (b) profiles for material S235JR, flat position



Slika 7. Profil struje (a) i napona (b) za materijal S235JR, nadglavna pozicija
Figure 7. Current (a) and voltage (b) profiles for material S235JR, overhead position



Period jednog ciklusa se može očitati sa profila struje za svaki uzorak, te se na osnovu njega može izračunati vrijednost frekvencije. Za osnovi materijal P355NL2 vrijednost perioda je u obje pozicije iznosila 20 ms, pa je frekvencija 50 Hz. Za osnovi materijal S235JR (položena pozicija), vrijednost perioda je bila 12 ms, pa je frekvencija 83 Hz, a pri zavarivanju u nadglavnoj poziciji period je iznosio 17 ms, tako da je frekvencija 59 Hz.

Generalno za sve uzorke vrijedi da je proces bio stabilan u smislu da se struja mijenjala u rasponu od bazne do vršne struje bez rasipanja vrijednosti i podjednako vrijeme trajanja svakog ciklusa.

Ako se uporede vrijednosti frekvencije, najveća vrijednost iste je za uzorak S235JR zavaren položenoj poziciji (83 Hz), dok je najmanja za uzorke P355NL2 za obje pozicije (50 Hz). Kako je frekvencija recipročna vrijednost perioda, isto se moglo zaključiti i pregledom profila struje. Bitno je napomenuti da se prilikom zavarivanja datih uzoraka, vrijednost frekvencije nije podešavala na uređaju, nego je procesor na osnovu ostalih podešenih parametara sinergijski odredio optimalnu vrijednost frekvencije.

5. Zaključak

Kod elektrolučnih postupaka zavarivanja postavljaju se mnogi zahtjevi pred iste, u smislu održavanja stabilnosti električnog luka, ostvarivanja dovoljne penetracije, kontrole unosa toplote (prvenstveno za tanke limove i materijale osjetljive na visoke temperature) i postizanja velikih brzina zavarivanja. Kada govorimo o MAG pulsnom zavarivanju, prethodno navedeni zahtjevi mogli su biti ispunjeni samo razvojem modernih izvora struje

za zavarivanje, koji omogućavaju visoku kontrolu postupka, precizno podešavanje parametara, kao i što lakši rad za zavarivača. Ovi uređaji su bazirani na izvorima struje tipa invertera, poput uređaja Welbee koji je korišten u eksperimentalnom dijelu za zavarivanje datih uzoraka.

Analiza postojećih modela za proračun unosa toplote je pokazala da mogu postojati velika odstupanja istih u odnosu na izmjereni unos toplote. Tako model srednje kvadratne snage (P_{RMS}) daje unos toplote i do 10% veći od stvarnog (izmjenog), a model prosječne snage (P_{AV}) i do 15% manji od izmjenog. Imajući u vidu da unos toplote značajno utiče na osobine i kvalitet zavarenog spoja, veoma je bitno primjeniti odgovarajući model kojim se dobijaju najrelevantnije vrijednosti.

Istraživanja koja se provedena na drugim uređajima su pokazala da se vrijednost bazne struje kreće od 20 A do 50 A, dok je snimanjem profila struje za date zavarene uzorke na uređaju Welbee ustanovljena minimalna vrijednost iste u iznosu od 150 A. Iz ovog proizilazi zaključak da vrijednost bazne struje prvenstveno zavisi od korištenog uređaja za zavarivanje, kao i izabranih osnovnih parametara na istom na osnovu kojih onda procesor uređaja daje optimalan profil struje i napona.

Ovaj rad prikazuje i da se primjenom pulsno MAG zavarivanja može uspješno zavarivati velikim brzinama, tako da je prilikom zavarivanja jednog od uzoraka postignuta brzina od 33,72 cm/min uz zadržanu stabilnost ostalih parametara i procesa zavarivanja generalno.

Literatura / References

[1] Jurica, M., (2015), Doctoral thesis, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb,

[2] Horvat, M., Kondić, V., (2012), Tehnički glasnik, Vol. 6, 2, 137-140.

[3] Rudan, M., (2007) Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom, 4. Seminar "Čelici otporni na koroziju", Pula

[4] Welbee inverter P500L, (2013), Owner's Manual, Daihen Corporation

[5] Joseph, A., Harwig, D. D., Ferson, D., Richardson, R., (2003), Science and Technology of Welding & Joining, The Ohio State University

[6] Joseph, A., Harwig, D. D., Ferson, D., Richardson, R., (2003), Science and Technology of Welding & Joining, Vol. 86, 400-406.

[7] Joseph, A., Harwig, D. D., Ferson, D., Richardson, R., (2005), Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 103, 311-318.