

ISKUSTVA U RAZVOJU UREĐAJA ZA MJERENJE BRZINE I SILE DODAVANJA ŽICE KOD MIG/MAG ZAVARIVANJA

EXPERIENCES IN DEVELOPMENT OF WIRE FEEDING RATE AND FEEDING FORCE MEASURING DEVICES FOR GMAW

Ismar HAJRO, Omer PAŠIĆ¹⁾

Ključne riječi: MAG/MIG, mjerenje, uređaj, brzina i sila dodavanja

Key words: GMAW, measurement, device, feeding rate, feeding force

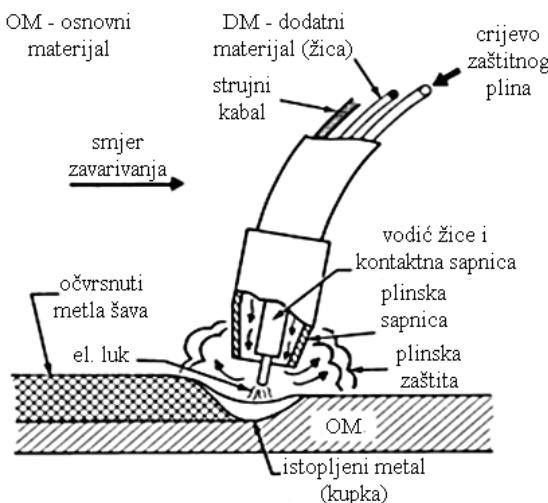
Sažetak: Ispitivanje kvaliteta zavarenih spojeva izvedenih pri polu-automatskom, automatskom ili robotskom MIG/MAG zavarivanju može se unaprijediti primjenom *on-line* akvizicije parametara zavarivanja. Tako, danas u zavarivačkoj praksi imamo stalno prisutne trendove razvoja uređaja za mjerenje esencijalnih parametara zavarivanja, kao što su jačina struje, napon električnog luka i brzine zavarivanja. Dodatno, posljednja istraživanja potvrđuju da značajan uticaj na kvalitetu zavarivanja, a uzimajući u obzir prenos metala u električnom luku, imaju i parametri kao što su brzina i sila dostavljanja dodatnog materijala - žice. Ovaj članak predstavlja principe i tehnike mjerenja sile i brzine dodavanja dodatnog materijala - žice za izabrani polu-automatski MIG/MAG zavarivački sistem. Princip, konstrukcija, tehnika i senzor svakog od mjernih uređaja su objašnjeni. Kao senzori, korišteni su element za mjerenje sile (Load Cell) i optički enkoder (Optical Encoder), za mjerenje sile i brzine dodavanja dodatnog materijala, redom. Konačno, u radu su pokazani i preliminarni rezultati i komentari za izvedena mjerenja za "Push" i "Push-Pull" sisteme dodavanja dodatnog materijala.

Abstract: Evaluation of welded joints quality made by semi-automatic, automatic or robotic GMAW may be improved by mean of on-line aquistion of welding parameters. Therefore, today in welding practice, there is a constant development trend of devices for measurement of essential parameters as welding current, arc voltage and welding speed. In addition, recent investigation proves that significant influence on welding quality, by mean of metal transfer accros welding arc, have parameters as feeding force and feeding rate of filler material. This paper presents principles and techniques of measurement of filler material feeding force and feeding rate for chosen semi-automatic GMAW welding system. A principle, construction, technique and sensing device of each measuring device on GMAW machine are described. A load cell and optical encoder are used as sensing devices for feeding force and rate, respectively. Finally, preliminary measurement results and comments of push and push-pull feeding systems are presented.

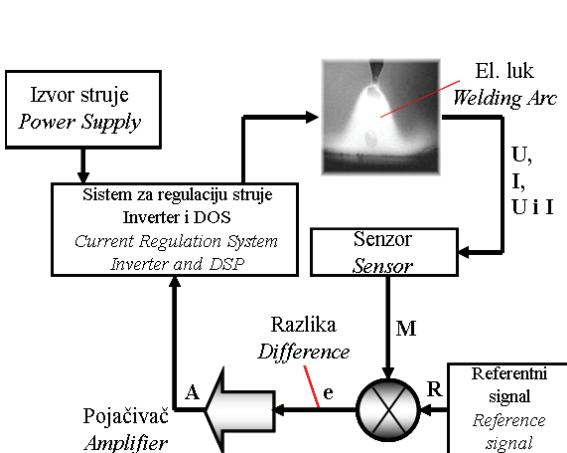
¹⁾ Faculty of Mechanical Engineering Sarajevo - University of Sarajevo, Vilsonovo setaliste 9, 71000 Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

1. UVOD

MAG/MIG postupak zavarivanja predstavlja elektrolučni postupak zavarivanja gdje se električni luk, unutar zaštitne gasne atmosfere, održava između radnog komada i elektrode koja se topi i u vidu kapljica prenosi kroz električni luk na radni komad (Slika 0). Pri tome se dio osnovnog materijala topi i zajedno sa istopljenim dodatnim materijalom (elektrodom) formira zavarivačku kupku. Dodatni materijal (elektroda, najčešće u obliku žice) se dodaje odgovarajućom brzinom koja kompenzira brzinutopljenja, pa se na taj način održava optimalna i konstantna dužina električnog luka. Upravo je održavanje konstantne dužine električnog luka suština regulacije i kontrole električnih parametara zavarivanja kod MAG/MIG postupka. Ovo je posebno bitno obzirom na činjenicu da od električnih parametara zavarivanja, odnosno jačine struje zavarivanja, I , i napona električnog luka, U , bitno zavisi kvaliteta zavarenog spoja.



Slika 0. Mikro-sHEMA MAG/MIG postupka zavarivanja [2]



Slika 1. Generalni princip regulacije parametara zavarivanja kod MAG/MIG postupka [3]

Moderne uređaje za MAG/MIG zavarivanje karakteriše upotreba polu-provodnika za direktnu kontrolu jačine struje i napona električnog luka. Ovo predstavlja značajnu promjenu u odnosu na starije uređaje, gdje je podešavanje protoka struje vršeno upotrebom pretvarača (*transducer*) ili magnetskih pojačivača (*magnetic amplifier*). Moderni izvori struje zavarivanja mogu se direktno kontrolirati putem nisko-strujnog električnog kola koji omogućava povratnu kontrolu izlaznih varijabli. Ovo znači da se izlazne električne karakteristike koje dostavlja izvor struje reguliraju putem kontrolnog sistema (Slika 1) [1,3].

Signal koji se dobije putem senzora, M , usporedi se sa referentnim vrijednostima, R , te se uočena razlika, e , pojačava putem pojačivača, A , kojom se konačno modificiraju izlazne karakteristike. Izlaz iz senzora može biti proporcionalan jačini struje zavarivanja, I , naponu električnog luka, U , ili u kombinaciji obje karakteristike električnog luka. Kada je regulacija električnih karakteristika izvora struje bazirana na jačini struje, I , izlazna karakteristika je ravna, a kada je baziran samo na naponu, U , izlazna karakteristika je strma. U slučaju da je regulacija bazirana na kombinaciji jačine struje i naponu, kao izlaz se dobiva prelazna karakteristika [1,3].

Kontrola primarnih parametara zavarivanja od presudnog je značaja u serijskoj i automatiziranoj proizvodnji, gdje je neophodno održati odgovarajući nivo kvaliteta sa minimum troškova naknadnih ispitivanja sa i bez razaranja. Tako, uočena značajnija odstupanja primarnih (ili esencijalnih) parametara od unaprijed zadanih vrijednosti, u toku serijske proizvodnje, mogu poslužiti za pravovremenu i pouzdaniju detekciju grešaka koje nastaju pri zavarivanju.

2. UTICAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA NA KVALITETU SPOJA

Dobro je poznato da jačina struje zavarivanja, I , napon električnog luka, U , i brzina zavarivanja, v , predstavljaju primarne ili esencijalne parametre zavarivanja kod svih elektrolučnih postupaka zavarivanja, pa tako i kod MAG/MIG postupka. Posebice, jačina struje zavarivanja, I , i napon električnog luka, U , određuju prenos metala u električnom luku, što ima direktni uticaj na geometrijske karakteristike zavarenog spoja, kao što je penetracija, profil i dimenzija nadvišenja lica, i slično. Tako upravo, jedan od kodova za kvalifikaciju procedura zavarivanja, ASME Code. Sec.IX (par. QW 409.2), tip prenosa metala u električnom luku smatra esencijalnim parametrom. Zapravo, prema ASME Sec.IX, kod MAG/MIG postupka, određeno odstupanje jačine struje, I , i napona električnog luka, U , kod različitih specifikacija zavarivanja (WPS-ova) je prihvatljivo, sve dok se isto nalazi unutar kvalificiranog tipa prenosa metala (npr. prenos kratkim spojem, eng. *short arc transfer*), definiranim atestom procedure zavarivanja (PQR-om) [2,4].

Ako se kvaliteta zavarenog spoja predstavi geometrijskim karakteristikama šava (poput: penetracije, nadvišenja lica i korijena, i slično) i prisustvom grešaka ili nepravilnosti (poput: poroznosti, nedovoljnog topljenja, i slično.) onda se presudan uticaj primarnih parametara na kvalitetu zavarenog spoja može prikazati sljedećom tabelom [1].

Tabela 1. Uticaj primarnih parametara na kvalitetu zavarenog spoja [1]

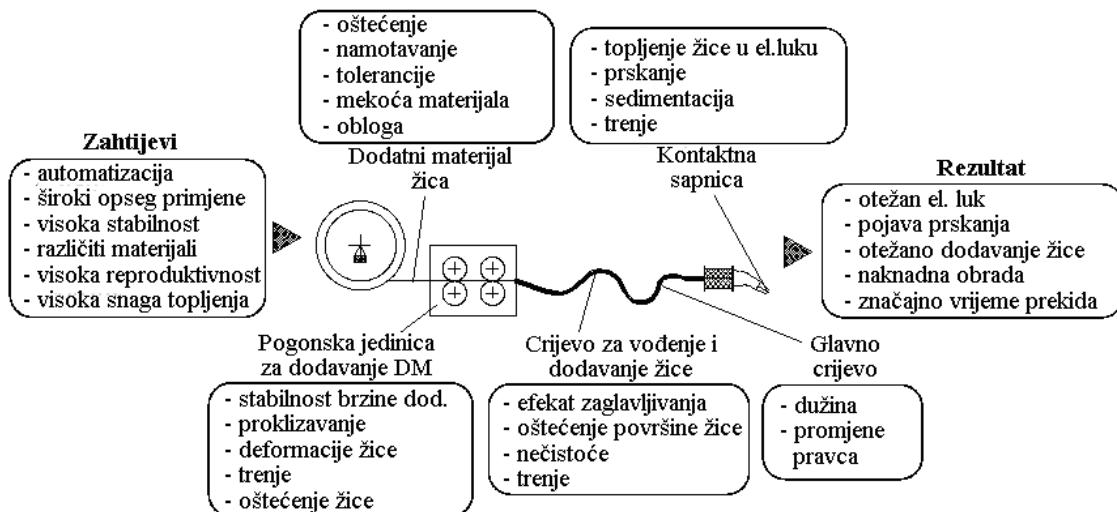
Uticaj na geometrijske karakteristike					
Geometrijska karakteristika	Primarni parametar zavarivanja				
	Napon električnog luka	Jačina struje zavarivanja	Brzina zavarivanja	Ugao vođenja gorionika	Slobodna dužina žice
Povećanje penetracije		↑ 1	↓ 5	↑ 2	↓ 3
Smanjenje penetracije		↓ 1	↑ 4	↓ 3	↑ 3
Smanjenje širine šava	↓ 4	↓ 1	↑ 2		↓ 3
Smanjenje nadvišenja	↑ 1	↓ 5	↑ 4		↓ 3
Povećanje brzine topljenja		↑ 1	↓ 4		↑ 3
Uticaj na prisustvo grešaka (nepravilnosti)					
Greška ili nepravilnost	Primarni parametar zavarivanja				
	Napon električnog luka	Jačina struje zavarivanja	Brzina zavarivanja	Ugao vođenja gorionika	Dužina žice ispred gorionika
Poroznost	↓ 1	↑ 5	↓ 4	↑ 3	↑ 2
Konveksnost	↑ 1	↓ 4	↓ 5	↓ 3	↓ 2
Nedostatak vezivanja topljenjem	↓ 1	↑ 4	↓ 5	↓ 3	↑ 2
Zabijanje elektrode	↑ 1	↓ 4	↓ 5	↑ 2	↓ 2
Prskanje	↑ 1	↓ 4	↓ 5	↓ 3	↓ 3

Objašnjenje: Uticaj od 1 (veliki) do 5 (mali), ↑ - povećanje parametra, ↓ - smanjenje parametra

3. VAŽNOST MJERENJA BRZINE I SILE DODAVANJA ŽICE

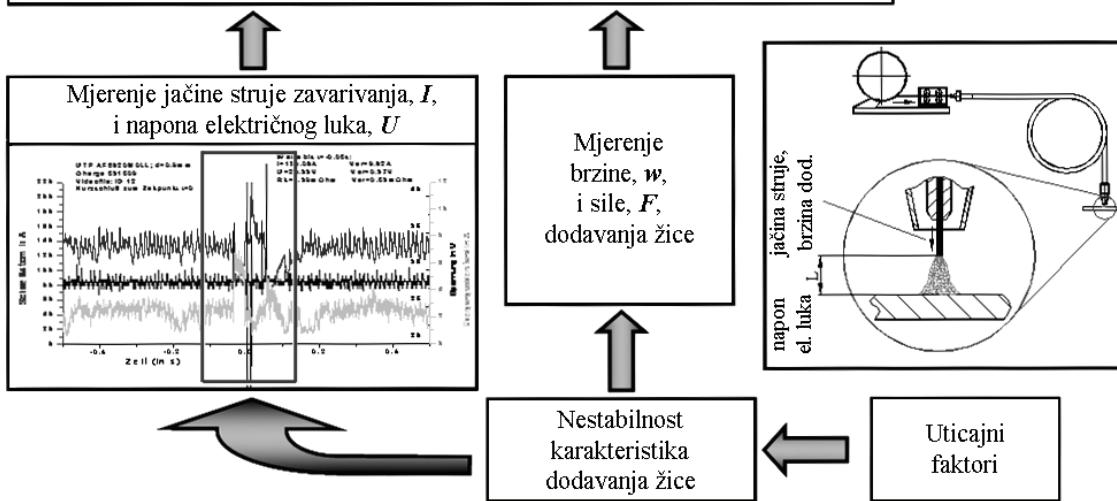
Kao što se može primijetiti (Tabela 1) primarni parametri zavarivanja sa najznačajnijim uticajem na kvalitetu zavarenog spoja su napon električnog luka, U , i jačina struje zavarivanja,

I. Održavanje ovih parametra stabilnim, u toku zavarivanja, bez značajnijih fluktuacija, predstavlja jedan od osnovnih principa održanja kvaliteta u toku zavarivanja. Kao što je poznato, kod MAG/MIG postupka zavarivanja, jačina struje, I , je direktno zavisna od brzine dodavanja žice, w . Prema tome, pretpostavlja se da svako odstupanje u sistemu za dodavanje dodatnog materijala - elektrode (odnosno žice) mora imati uticaja na jačinu struje zavarivanja, I , a time i na napon električnog luka, U . Tako, Slika 0 prikazuje osnovne faktore karakteristika sistema dodavanja žice koji direktno utiču na karakteristike električnog luka.



Slika 0. Shema faktora karakteristika dodavanja žice (dodataknog materijala) koji utiču na električne karakteristike [2]

Evaluacija ukupnih rezultata mjerjenja, da bi se razumijeli procesi, i uticaj nestabilnosti, w i F , dodavanja žice, na karakteristike električnog luka, I i U .



Slika 4. Shematski prikaz značaja paralelnog mjerjenja karakteristika dodavanja žice i karakteristika električnog luka [2]

Konačno, najčešći razlozi za smetnje u dodavanju žice (dodataknog materijala) su [1,2]:

- pogonski točkići (valjčići) i sila pritiska,
- ulazna vođica (*entrance nozzle*), na ulazu u crijevo za vođenje žice,

- crijevo za vođenje žice (*wire guide hose*),
- položaj glavnog crijeva
- koljeno gorionika
- kontaktna sapnica (vođica)
- svojstva površine dodatnog materijala (žice)

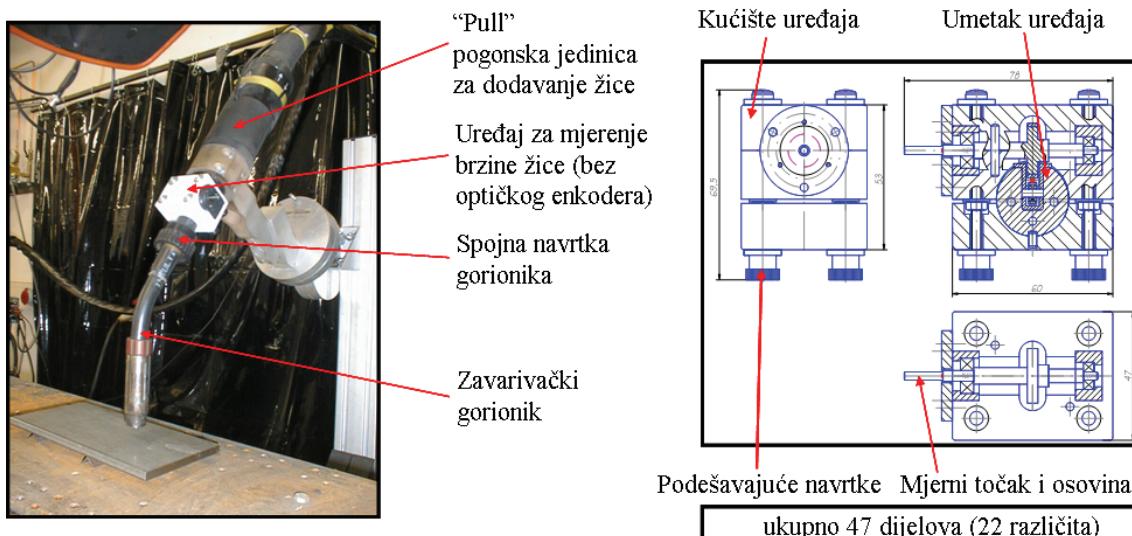
Stoga se za bolje razumijevanje procesa i uticaja nestabilnosti, kao i za jednu kvalitetniju *on-line* kontrolu kvaliteta zavarivanja preporučuje paralelno mjerjenje karakteristika električnog luka i karakteristika dodavanja žice (dodatnog materijala).

Konačno, pretpostavlja se da bi svaka uočena značajnija nestabilnost u izmjerenim karakteristikama, odnosno njen vremenski trenutak pojave, trebala upravo da ukaže na mjesto u zavarenom spoju, gdje se može očekivati eventualna greška ili nepravilnost (Slika).

4. KONSTRUKCIJA UREĐAJA ZA MJERENJE BRZINE I SILE DODAVANJA ŽICE

Izbor odgovarajućeg principa i tehnike mjerjenja bio je zasnovan na nizu zahtjeva, poput: brzine skeniranja (ili frekvencije akvizicije podataka), direktnost mjerjenja fizikalne veličine, složenost konstrukcije mjernog uređaja i lakoća ugradnje u postojeću MAG/MIG opremu, i konačno ukupne cijene mjernog uređaja.

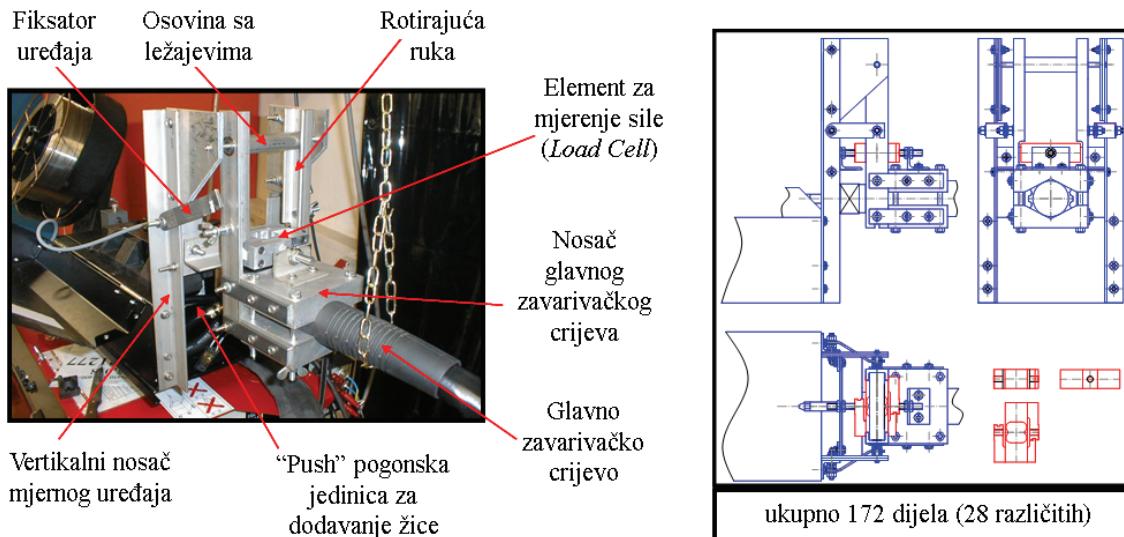
Tako je, primarno, za mjerjenje sile izabran element (ili čelija) za mjerjenje sile (*load cell*), a za mjerjenje brzine optički enkoder (*optical encoder*).



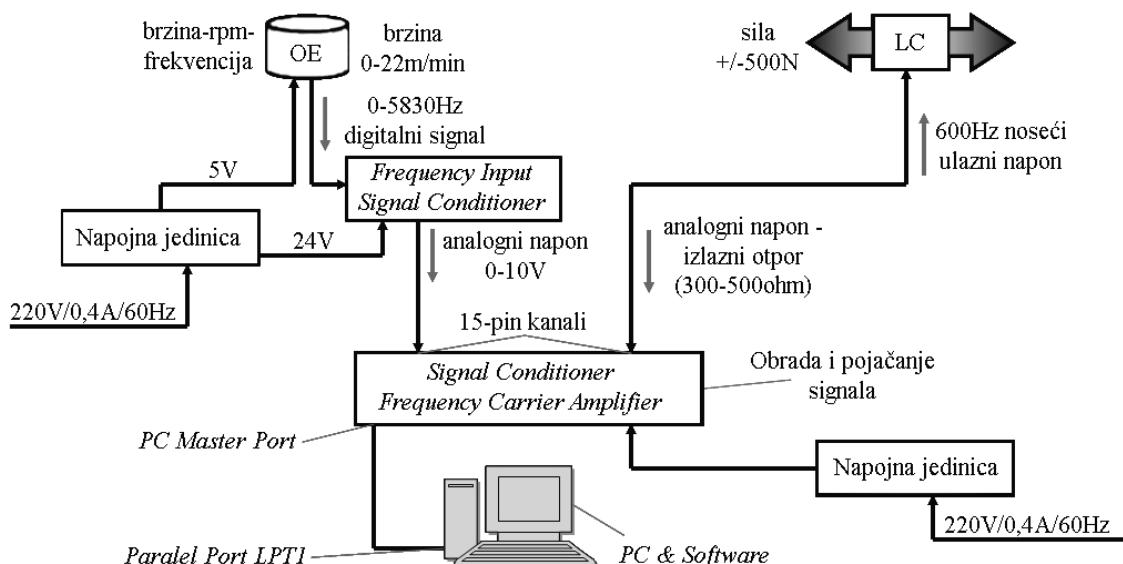
Slika 5. Slika i konstrukcija uređaja za mjerjenje brzine dodavanja žice [2]

Obzirom na zahtjev da se brzina dodavanja žice, w , mjeri što je moguće bliže električnom luku, to je odgovarajući mjerni uređaj konstruiran za ugradnju ispred zavarivačkog gorionika. Princip rada uređaja je u osnovi baziran na transformaciji linearnog kretanja žice, u kontaktu, sa rotacionim kretanjem mjernog točkića. Broj obrtaja mjernog točkića, ω , bi se potom mjerio preko optičkog enkodera ugrađenog na suprotnom kraju osovine mjernog točkića. Kompletan mehanički dio za transformaciju mjereneh veličina bio je smješten u teflonskom kućištu. Dodatno, da bi se mjerni uređaj uspješno ugradio, između "pull" pogonske jedinice i zavarivačkog gorionika, izrađen je metalni umetak, koji je svojim krajevima pasao u oba

susjedna dijela. U središnjem dijelu ovoga metalnog umetka izveden je utor gdje dolazi do kontakta dodatnog materijala - žice i mjernog točkića. Odgovarajući pritisak za ispravno nalijeganje žica, različitih prečnika, na mjerni točkić ostvarivao se stezanjem tzv. podešavajući navrtki na vanjskoj strani kućišta (Slika).



Slika 6. Slika i konstrukcija uređaja za mjerjenje sile dodavanja žice [2]



Slika 7. Generalna shema elektronske obrade signala za razvijene mjerne uređaje [2]

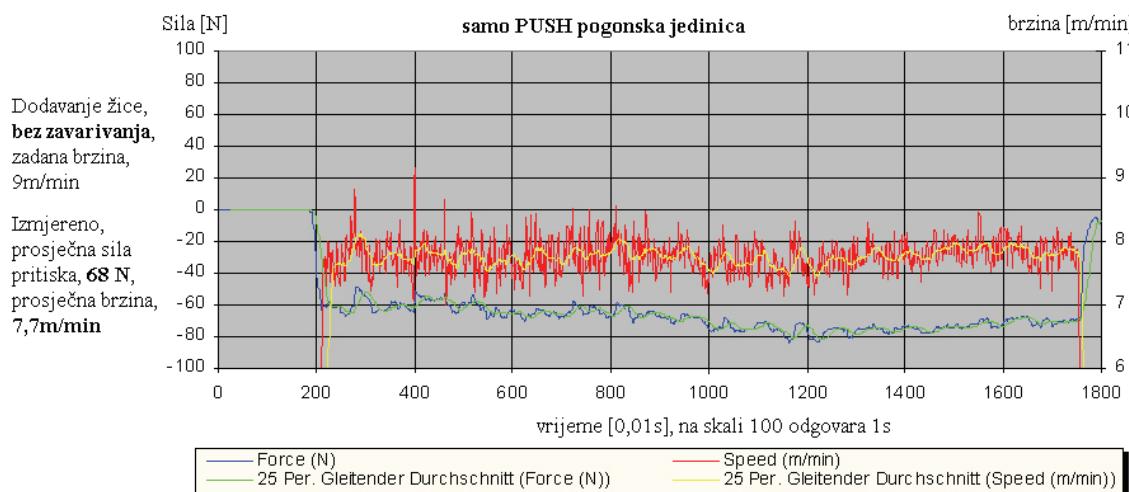
Obzirom na zahtjev da se sila kretanja žice mjeri na početku glavnog crijeva, to je uređaj za mjerjenje sile konstruiran za ugradnju iza "push" pogonske jedinice. Ovako je zapravo bilo moguće mjeriti silu proporcionalnu sili u žici. Praktično, mjerjenje sile je bilo bazirano na principu zgloba, gdje sila u žici, i njoj proporcionalna mjerna sila ostvaruju isti moment. Tako je na vrhu vertikalnog nosača mjernog uređaja, montiranog na izlaznoj strani "push" pogonske jedinice, postavljena osovina sa ležajevima koja je omogućavala rotaciju ruke - držača glavnog zavarivačkog crijeva (Slika). Pri korištenju samo "push" pogonske jedinice, glavno zavarivačko crijevo bi se udaljavalo, odnosno element za mjerjenje sile bi bio opterećen na

zatezanje. Ipak, konačno izmjerena sila, odnosno njena negativna vrijednost pri radu samo "push" pogonske jedinice, je smatrana silom pritiska u žici. Suprotno, izmjerene vrijednosti sile pri radu obje pogonske jedinice, "push" i "pull", bile su pozitivne, pa je smatrano da je žica opterećena na zatezanje.

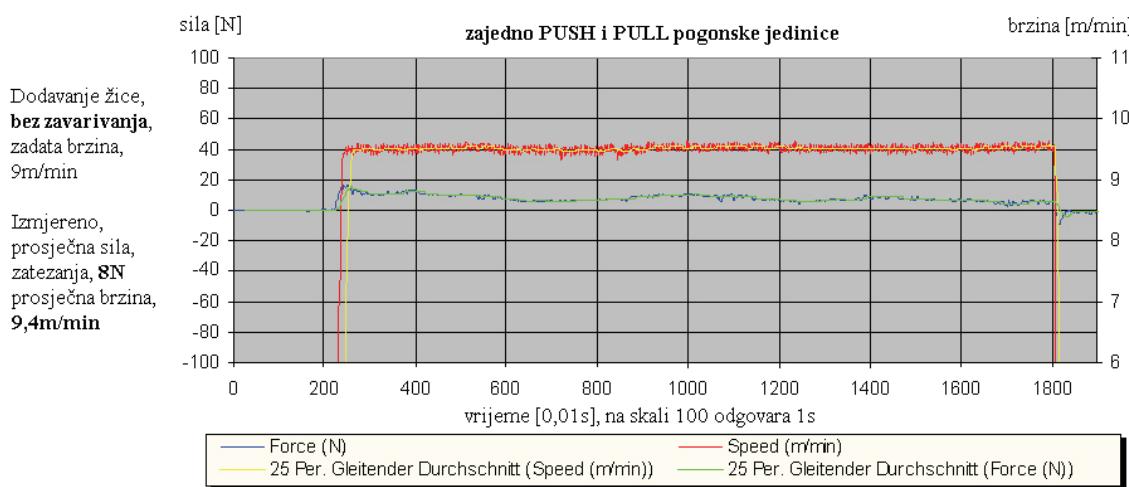
Shema korištene elektronske akvizicije i obrade signala, za oba mjerna elementa, OE (*optical encoder*) i LC (*load cell*), odnosno mjerne uređaje, data je na slici 7.

5. PRELIMINARNI REZULTATI MJERENJA

Naredne slike daju preliminarne rezultate mjerjenja. Tako, slike 8 i 9 prikazuju rezultate mjerjenja brzine i sile pri dodavanju žice kroz sistem, bez zavarivanja (bez električnog luka, eng. *inch*ing). Generalno, moguće je uočiti, da izmjerene vrijednosti brzine odstupaju od podešenih (zahtijevanih), te da je prisutna značajna nestabilnost u dodavanju žice kada se koristi samo "push" pogonska jedinica.



Slika 8. Rezultati mjerena brzina i sile pri dodavanju žice bez zavarivanja, primjenom samo "push" pogonske jedinice [2]



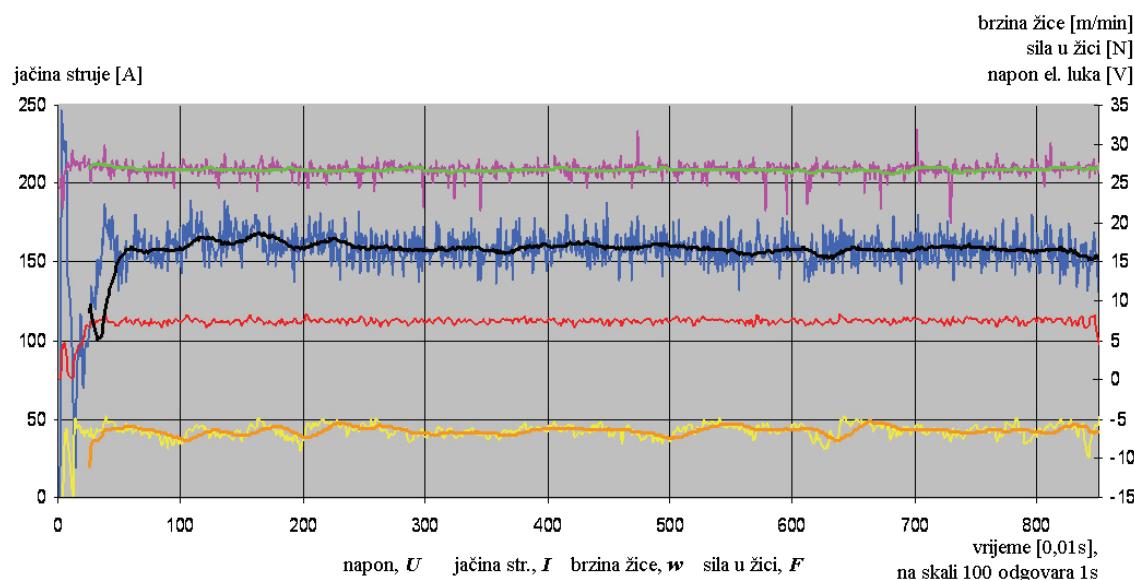
Slika 9. Rezultati mjerena brzina i sile pri dodavanju žice bez zavarivanja, primjenom "push" i "pull" pogonskih jedinica [2]

Tako je prosječna izmjerena brzina žice iznosila 7,7 m/min, u odnosu na zadatu 9 m/min, kada se koristi samo "push" pogonska jedinica, što je razlika od -14 %. Sa druge strane, prosječna izmjerena brzina žice iznosila je 9,4 m/min, u odnosu na zadatu 9 m/min, kada se koriste obje pogonske jedinice, "push" i "pull", što je razlika od +4 %.

Odstupanje brzine i sile dodavanja žice, od gore navedenih prosječnih vrijednosti, je iznosilo +/-1 m/min, +/-23 N, kada se koristi samo "push" pogonska jedinica; odnosno +/-0,1 m/min, +/-4 N, kada se koriste obje pogonske jedinice, "push" i "pull".

Konačno, u nastavku slijede rezultati mjerenja sva četiri (4) bitna parametra koji karakteriziraju električne karakteristike i dodavanje žice, primjenom samo „push“ pogonske jedinice (Slika 10).

Naravno, da bi se odredio prag ili tolerancija ovih parametara, vezano za eventualno nastajanje grešaka ili nepravilnosti u zavarenim spojevima, neophodno je izvršiti jedno znatno šire ispitivanje. Tako bi se zapravo za eventualne vizualno ili drugim NDT metodama registrirane greške, a u vezi sa odgovarajućom nestabilnošću izmjerenih parametara električnih karakteristika i dodavanja žice, mogao definirati prihvatljivi opseg odstupanja. Na dalje bi se mogao, odgovarajućom softverskom aplikacijom u toku *on-line* akvizicije, u slučaju odstupanja mjerjenih karakteristika izvan dozvoljenih tolerancija, davati "signal" operateru da je kod predmetnog zavarenog uzorka moguć nastanak greške ili nepravilnosti.



Slika 10. Rezultati mjerenja karakterističnih parametara električnog luka i dodavanja žice, primjenom samo "Push" pogonske jedinice [2]

6. KOMENTARI I ZAKLJUČCI

U cilju boljeg razumijevanja fizikalnih procesa pri MAG/MIG zavarivanju, a time i uticaja karakteristika dodavanja žice - dodatnog materijala, na primarne parametre zavarivanja: jačinu struje zavarivanja i napon električnog luka, razvijeni su uređaji za *on-line* mjerenje i akviziciju brzine i sile dodavanja žice.

Osnovni komentari i zaključci preliminarnih rezultata mjerenja brzine i sile dodavanja žice, za razvijene uređaje, bi bili:

- Upotreba obje pogonske jedinice, "push" i "pull", obezbjeđuje znatno stabilnije karakteristike dodavanja žice, u odnosu kada se koristi samo "push" pogonska jedinica. Na osnovu ovoga slijedi jasna preporuka i važnost istovremene upotrebe "push" i "pull"

- pogonskih jedinica za serijsko i automatsko zavarivanje.
- Pažljivom analizom i usporedbom rezultata mjerenja električnih karakteristika i karakteristika dodavanja žice mogla bi se dovesti u vezu nestabilnost ukupnog procesa, te sa tim u vezi i eventualno nastajanje grešaka ili nepravilnosti u zavarenim spojevima.
 - Razvijeni uređaji se mogu koristiti i za evaluaciju dodatnih materijala, odnosno ispitivanje njihovih karakteristika dodavanja, te za eventualne korekcije i dalji razvoj.
 - Iako relativno složen obzirom na mogućnost problema koji mogu nastati u toku zavarivanja, MAG/MIG postupak zavarivanja, se može značajno unaprijediti, dogradnjom odgovarajućih mjernih uređaja, čime bi se značajno poboljšao sistem održanja kvaliteta, i na vrijeme jasno uočio potencijalni izvor problema.

7. LITERATURA

- [1] J. Cornu, Advanced welding systems - Consumables electrode processes, 1985.
- [2] I. Hajro, Diploma Thesis, Development of devices for measurement of wire feeding rate and force for GMAW, Institute for Material Science, Welding and Forming at TU Graz, Faculty of Mechanical Engineering Sarajevo, 2001.
- [3] Digital Revolution, Focus on welding - Technologies, Fronius International, <http://www.fronius.com>, 2000.
- [4] Qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and welding operators, ASME BPV Code, An International Code, ASME, 2001.