



OBEZBEĐENJE KVALITETA ZAVARENIH SPOJEVA NA OSNOVU PRAĆENJA PARAMETARA ZAVARIVANJA U REALNOM VREMENU

Uroš Lukić¹, Radica Prokić - Cvetković¹, Olivera Popović¹, Radomir Jovičić², Branko Zrilić³

¹Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

²Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu

³Fin Import Beograd

Abstract:

Kvalitet zavarenih spojeva zavisi od mnogobrojnih konstrukcionih i tehnoloških faktora. Kod većine zavarenih spojeva ne postoji dovoljno dokaza da je proces zavarivanja sproveden koristeći parametre propisane tehnologijom zavarivanja. Odstupanja od propisanih parametara mogu dovesti do pojave različitih tipova nesavršenosti u zavarenom spoju i uticati na mikrostrukturu i mehaničke karakteristike materijala, što skupa može ugroziti integritet konstrukcije. Tokom protekle decenije intenzivno se radilo na razvijanju sistema za praćenje i kontrolu parametara zavarivanja, koji se zasnivaju na merenju određenih fizičkih veličina u realnom vremenu. U slučaju odstupanja od vrednosti parametara propisanih u tehnologiji zavarivanja ovi sistemi šalju odgovarajuća upozorenja operateru i omogućavaju da se momentalno reaguje u cilju korekcije parametara, čime se direktno utiče na obezbeđenje kvaliteta zavarenog spoja. U radu su prikazane osnovne mogućnosti ovih sistema i prednosti njihovog korišćenja u industriji.

Key words:

zavareni spojevi, obezbeđenje kvaliteta, parametri zavarivanja, praćenje parametara u realnom vremenu, karakteristike sistema.

UVOD

Izrada zavarenih spojeva na odgovornim mašinskim i građevinskim konstrukcijama sprovodi se na osnovu kvalifikovanih tehnologija zavarivanja i praćena je preciznim procedurama i uputstvima za sprovođenje ispitivanja materijala metodama bez razaranja, radi kontrole kvaliteta. Međutim, nameću se pitanja da li su propisane tehnologije zavarivanja u potpunosti ispoštovane i adekvatno sprovedene prilikom procesa izrade spojeva i koliko striktno su primenjene procedure i uputstva za sprovođenje ispitivanja nakon zavarivanja, te da li su rezultati izvršenih ispitivanja relevantni. Stoga se kao glavno pitanje nameće koliko su u praksi zaista pouzdane informacije o kvalitetu zavarenih spojeva.

Kod većine zavarenih konstrukcija ne postoji dovoljno dokaza da je zavarivanje sprovedeno koristeći propisane parametre za odgovarajući postupak zavarivanja, za svaki zavareni spoj. Parametri zavarivanja, kao što su: temperatura predgrevanja osnovnog materijala, vrsta dodatnog materijala, prečnik dodatnog materijala, jačina struje, napon električnog luka, brzina dodavanja elektrodne žice, vrsta i protok smeše zaštitnih gasova itd. mogu značajno

da utiču na nastajanje diskontinuiteta u strukturi zavarenog spoja, na formiranje i transformaciju određenih faza u mikrostrukturi osnovnog materijala i metala šava, što kao posledicu ima uticaj na mehaničke karakteristike spoja.

Osim toga, obično ne postoji ni dovoljno dokaza da je zavarivanje izveo stručni kadar koji poseduje odgovarajuće sertifikate kao dokaz stručne osposobljenosti i kvalifikovanosti za obavljanje konkretnih poslova (zavarivanje različitih materijala, upotreba različitih dodatnih materijala, zavarivanje u različitim položajima itd.).

Bez obzira na materijale koji se koriste i postupke zavarivanja koji se primenjuju za izradu spojeva, odstupanje od propisanih parametara može dovesti do pojave različitih tipova nesavršenosti u metalu šava (na primer: prsline, gasna poroznost, nalepljivanje dodatnog materijala itd.), ali uticati i na mehaničke karakteristike zavarenog spoja kao konstrukcione celine, usled odstupanja od propisanog opsega unete količine toplote, što skupa utiče na integritet konstrukcije.

Protekle decenije razvijeni su različiti sistemi za praćenje procesa zavarivanja. U relevantnoj literaturi opisane su metode za nadgledanje procesa zavarivanja koje se baziraju na analizi:



- ♦ elektromagnetnog spektra koji emituje električni luk;
- ♦ akustične emisije materijala [1];
- ♦ snimaka električnog luka i snimaka prenosa dodatnog materijala kroz električni luk, dobijenih pomoću ultra brzih kamera [2];
- ♦ signala dobijenih pomoću sistema za praćenje parametara zavarivanja u realnom vremenu [2-5].

Najjednostavnija od pomenutih metoda, te stoga i metoda koja se najčešće primenjuje oslanja se na prikupljanje podataka i analizu signala dobijenih pomoću sistema za praćenje parametara zavarivanja u realnom vremenu. Ovi sistemi zasnivaju se na merenju fizičkih veličina u realnom vremenu tokom procesa zavarivanja [2]. Pri tome se obavezno mere vreme trajanja procesa zavarivanja, jačina struje i napon električnog luka, dok se zavisno od postupka zavarivanja koji se primenjuje i karakteristika dostupnog sistema za praćenje parametara mogu meriti i brzina dodavanje elektrodne žice, opterećenje motora dodavača elektrodne žice, protok smeše zaštitnih gasova, brzina zavarivanja i temperatura materijala.

Ovakav pristup predstavlja proaktivnan proces koji se fokusira na kontrolu proizvodnog procesa, sa ciljem da se spreče značajnija odstupanja parametara od nominalnih vrednosti. Praćenje, nadgledanje i kontrola parametara zavarivanja u realnom vremenu omogućavaju da se u slučaju bilo kakvih odstupanja od vrednosti propisanih u kvalifikovanoj tehnologiji zavarivanja reaguje momentalno, kako bi se parametri korigovali, čime se utiče na osiguranje kvaliteta zavarenog spoja.

Osim toga, prikupljanjem i čuvanjem informacija o vrednostima svih relevantnih primenjenih parametara zavarivanja obezbeđuje se mogućnost naknadnih analiza u oblasti ekonomike izvođenja zavarivačkih radova, ali i naknadnih provera u slučajevima kada se kvalitet zavarenih spojeva dovodi u pitanje.

S obzirom na jednostavnost, sistemi za praćenje parametara zavarivanja u realnom vremenu, osim za upotrebu u laboratorijskim uslovima, veoma su pogodni i za integraciju u industrijskim okruženjima, gde se istovremeno mogu pratiti procesi izrade spojeva na više desetina pozicija na konstrukciji ili čak na različitim lokacijama.

PREDNOSTI I NEDOSTACI SISTEMA ZA PRAĆENJE PARAMETARA ZAVARIVANJA U REALNOM VREMENU

Sistemi za praćenje parametara zavarivanja u realnom vremenu mogu biti integrisani u samim uređajima za zavarivanje ili predstavljaju samostalni uređaj sa odvojenim napajanjem čija se veza sa aparatom za zavarivanje ili dodavačem elektrodne žice najčešće ostvaruje putem InterBus serijskog priključka. Ovaj tip serijske veze u industriji se uobičajeno koristi za međusobno povezivanje kontrolnih sistema, senzora i aktuatora. Zavisno od karakteristika uređaja moguće je prikupljanje većeg ili manjeg broja podataka, pri čemu se obavezno mere jačina struje, napon električnog luka i vreme dok je električni luk uspostavljen. Radi čuvanja i analize podataka podaci se putem

USB konekcije, lokalne računarske mreže, koja može biti kablovskog i bežičnog tipa ili putem mreže mobilne telefonije prenose na računar na kome je instaliran odgovarajući softver za prikupljanje i akviziciju podataka.

Ono što ove sisteme razdvaja u pogledu namene u istraživačke ili industrijske svrhe jeste pre svega frekvencija uzorkovanja, odnosno broj merenja u jedinici vremena svakog od parametara zavarivanja koji se prate. Oprema namenjena za istraživanje procesa prenosa dodatnog materijala kroz električni luk i stabilnosti električnog luka u različitim režimima zavarivanja može imati frekvenciju uzorkovanja i do nekoliko desetina kilo herca. Ovo je neophodno da bi se mogle pratiti sve faze prenosa dodatnog materijala kroz električni luk. Prikupljeni podaci naknadno se analiziraju najčešće primenom različitih statističkih metoda. Sa druge strane oprema namenjena za industrijsku upotrebu služi prevashodno za kontrolu usaglašenosti režima zavarivanja sa propisanim nominalnim vrednostima parametara, te se stoga frekvencija uzorkovanja kreće uglavnom u opsegu od nekoliko herca do nekoliko desetina herca.

Velika razlika uočava se i u kvalitetu softverskih rešenja koja prate ovakve sisteme, njihovoj jednostavnosti za korišćenje i broju alata koji su dostupni za naknadnu analizu prikupljenih informacija. Za većinu softvera ove namene karakteristične su sledeće mogućnosti:

- ♦ grafičko i tabelarno prikazivanje izmerenih vrednosti parametara zavarivanja u realnom vremenu;
- ♦ davanje vizuelnih i zvučnih upozorenja u slučaju kada neki od parametara zavarivanja izađe iz opsega propisanog kvalifikovanim tehnologijom zavarivanja;
- ♦ izračunavanje prosečnih vrednosti nadgledanih parametara zavarivanja (na primer: jačina struje, napon električnog luka, brzina dodavanja elektrodne žice, brzina zavarivanja itd.);
- ♦ merenje ukupnog vremena rada i vremena zavarivanja - vremena dok je uspostavljen električni luk;
- ♦ izračunavanje ukupne potrošene energije i toplote unete po jedinici dužine zavarenog spoja;
- ♦ izračunavanje potrošnje dodatnog materijala za zavarivanje;
- ♦ izračunavanje troškova, što najčešće obuhvata troškove koji se izdvajaju za električnu energiju, potrošne i dodatne materijale za zavarivanje;
- ♦ mogućnost primene metoda deskriptivne statistike radi preliminarnih analize podataka;
- ♦ mogućnost izvoza podataka u različitim formatima radi vršenja detaljnih analiza.

Pored brojnih prednosti koje omogućavaju sistemi za praćenje parametara zavarivanja u realnom vremenu, njihov veliki nedostatak je što za sada nisu standardizovani. Iz tog razloga se uređaji različitih proizvođača opreme uglavnom ne mogu kombinovati.

Kako je reč o sistemima nove generacije, koji su se na tržištu pojavili relativno skoro, implementacija ovakvih rešenja zahteva izdvajanje značajnih finansijskih sredstava, te je uglavnom ograničena na velike proizvodne pogone i pogone za proizvodnju visoko odgovornih konstrukcija.



PRIKAZ REZULTATA PRAĆENJA PARAMETARA ZAVARIVANJA U REALNOM VREMENU

Radi prikaza mogućnosti jednostavnog sistema za praćenje parametara zavarivanja u realnom vremenu izvršeno je višeprolazno zavarivanje u horizontalnom položaju. Zavarane su ploče, debljine 14 mm i dužine 500 mm, izrađene od čelika P460NL1, namenjenog za proizvodnju opreme pod pritiskom za rad na sniženim temperaturama. Za zavarivanje je korišćena punjena samozaštitna elektrodna žica Coreshield 8, prečnika \varnothing 1,6 mm, švedskog proizvođača „Esab“. Propisane granice jačine struje (I) i napona električnog luka (U) prikazane su u tabeli 1. Prosečna uneta količina toplote po jedinici dužine zavarenog spoja (Q) ne treba da prelazi 1,8 kJ/mm.

Korišćena je oprema finskog proizvođača uređaja i opreme za zavarivanje „Kemppi“:

- ♦ uređaj za zavarivanje - Fast MIG Pulse 350,
- ♦ uređaj za dodavanje elektrodne žice - Fast MIG MXF 65 i
- ♦ uređaj za praćenje parametara zavarivanja u realnom vremenu - Fast DLI 20, sa pripadajućim softverom za prikupljanje podataka - Pro Weld Data. Ovaj uređaj i softver imaju mogućnost praćenja tri veličine istovremeno tokom procesa zavarivanja i to jačine struje, napona električnog luka i brzine dodavanja elektrodne žice. Maksimalna vrednost frekvencije merenja ovih parametara iznosi 5 Hz.

Nakon povezivanja uređaja sa aparatom za zavarivanje ili uređajem za dodavanje elektrodne žice, u softverskom paketu neophodno je izvršiti odgovarajuća podešavanja. Osnovna podešavanja obuhvataju:

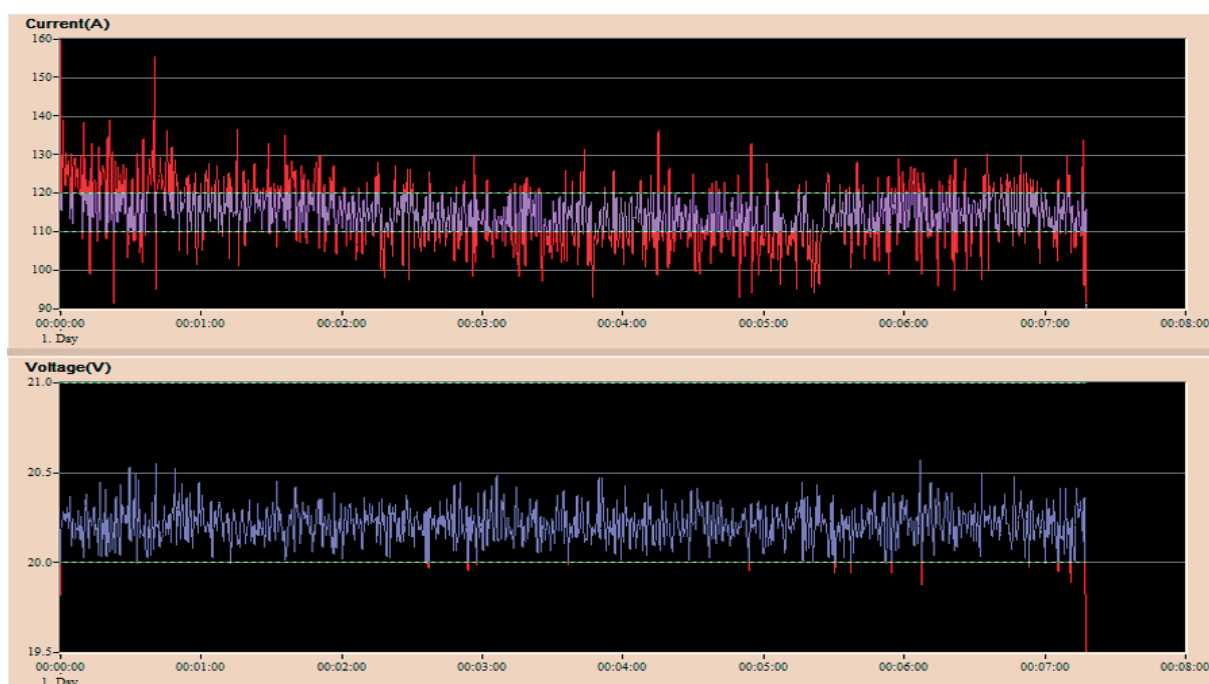
- ♦ izbor postupka zavarivanja i opreme koja će biti korišćena (uređaj za zavarivanje, dodavač elektrodne žice, pištolj za zavarivanje, kablovi, smeša

zaštitnih gasova ukoliko se koristi za određeni postupak);

- ♦ izbor frekvencije merenja veličina koje će se pratiti u realnom vremenu tokom procesa zavarivanja
- ♦ definisanje geometrije zavarenog spoja i propisanih (minimalne i maksimalne) vrednosti parametara zavarivanja, kako bi se u slučaju odstupanja iz definisanih okvira aktiviralo odgovarajuće upozorenje;
- ♦ načina prikazivanja (tabelarno ili grafički) izmenjenih vrednosti.

Tokom procesa zavarivanja u realnom vremenu praćeni su jačina struje i napon električnog luka. Prosečne izmerene vrednosti jačine struje (I) i napona električnog luka (U), kao i izračunatih vrednosti brzine zavarivanja (V) i unete količine toplote po jedinici dužine zavarenog spoja (Q), za svaki od pet prolaza, prikazane su u tabeli 2. Prosečne vrednosti jačine struje, napona električnog luka i unete količine toplote po jedinici dužine zavarenog spoja nalaze se u okviru propisanih nominalnih vrednosti.

Međutim, na osnovu ovih rezultata nije moguće zaključiti da li su parametri tokom procesa zavarivanja odstupali iz propisanih granica. Zbog toga je neophodno pratiti dinamiku promene parametara tokom vremena. Na sl. 1 prikazane su promene jačine struje i napona električnog luka tokom procesa zavarivanja prvog od ukupno pet prolaza. Na osnovu grafički prikazanih rezultata merenja, vidi se da jačina struje odstupa od propisanog opsega vrednosti (odstupanja su obeležena crvenom bojom). Na osnovu ovakvog prikaza rezultata moguće je doneti odluku o potrebi za korekcijom vrednosti određenog parametra - jačine struje ili napona električnog luka, ukoliko se promenom dužine električnog luka, promenom dužine slobodnog kraja elektrodne žice, što utiče na povećanje električnog otpora ili promenom tehnike zavarivanja (pomenuti parametri su pod direktnom kontrolom operatera koji sprovodi zavarivanje), ne može stabilizovati proces i parametri vratiti u propisane okvire.



Sl. 1. Promena jačine struje (gore) i napona električnog luka (dole) tokom procesa zavarivanja prvog prolaza (odstupanja od propisanih graničnih vrednosti obeležena su crvenom bojom)



Tabela 1 Propisani parametri zavarivanja

Redni broj prolaza	I (A)		U (V)	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
1	110	120	20	21
2	190	210	24	25
3	220	240	26	27
4				
5				

Tabela 2 Prosečne vrednosti parametara zavarivanja

Redni broj prolaza	I (A)	U (V)	V (cm/min)	Q (kJ/cm)
1	115	20,2	6,9	1,6
2	199	24,7	13,5	1,7
3	227	26,2	15,9	1,8
4	232	26,3	21,9	1,3
5	228	26,3	17,7	1,6

ZAKLJUČAK

Sistemi za praćenje parametara zavarivanja u realnom vremenu omogućavaju detaljan uvid u dinamiku promene jačine struje, napona električnog luka i eventualno drugih parametara tokom procesa zavarivanja. Na osnovu toga, prilikom pojave odstupanja od propisanih graničnih vrednosti, moguće je doneti odluke o korekcijama neophodnim za njihovo vraćanje u zahtevane okvire, čime se direktno utiče na obezbeđenje kvaliteta zavarenog spoja.

Usled raznovrsnosti mogućnosti za prenos podataka sistemi za praćenje parametara zavarivanja u realnom vremenu pogodni su za integraciju u industrijskim okruženjima. U ove svrhe koriste se sistemi sa niskim frekvencijama uzorkovanja, s obzirom da je njihova uloga kontrola usaglašenosti podešavanja sa parametrima propisanim u tehnologiji zavarivanja i prikupljanje podataka neophod-

nih za analizu troškova. Međutim, za istraživački rad i analizu formiranja, odvajanja i prenosa kapi dodatnog materijala kroz električni luk tokom procesa zavarivanja, neophodni su sistemi sa frekvencijom merenja parametara i do nekoliko desetina kilo herca, uzimajući u obzir brzinu odvijanja ovih procesa.

Pored navedenih prednosti koje omogućavaju sistemi za praćenje parametara zavarivanja u realnom vremenu, a koje se pre svega odnose na pomoć pri brzom donošenju odluka o potrebi za odgovarajućim korekcijama parametara zavarivanja, kao i mogućnosti sprovođenja različitih analiza i skladištenja podataka u formatima pogodnim za manipulaciju i tabelarno i grafičko prikazivanje, dva osnovna nedostatka su visoka početna ulaganja, pogotovu kada je reč o opremanju većih proizvodnih kapaciteta i nekompatibilnost sa uređajima za zavarivanje drugih proizvođača.

Zahvalnica

Istraživanje je sprovedeno u okviru nacionalnog projekta TR 35024, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] L. Grad, "Sproten nadzor varilnih procesov s pomoćju akustičnih signalov", Varilna Tehnika, vol. 3, pp. 97-102, 1996.
- [2] M. Suban, J. Tušek, "Methods for the determination of arc stability", Journal of Materials Processing Technology 143-144, pp. 430-437, 2003.
- [3] Z. Kolumbić, B. Sabo, Š. Klarić, "Monitoring of the Process Stability - MAG welding process using a flux cored wire", Zbornik radova Zavarivanje u Pomorstvu, pp. 233-242 Zagreb, 2004.
- [4] I. Samardžić, Z. Kolumbić, M. Baotić, "Contribution to flux cored wires application by MAG welding process", Tehnički vijesnik, vol 8, pp. 23-37, 2002.
- [5] I. Samardžić, Š. Klarić, V. Pecić, "The influence of welding parameter modifications on electric arc stud welding process stability", Zavarivanje, vol. 49, pp. 71-80, 2006.

QUALITY ASSURANCE OF WELDED JOINTS ON THE BASIS OF MONITORING OF WELDING PARAMETERS IN REAL-TIME

Abstract:

Quality of welded joints depends on numerous constructional and technological factors. For most of welded joints there is no sufficient evidence that the welding process was carried out using the welding parameters specified in the welding procedure. Deviations from the prescribed parameters can lead to the occurrence of different types of imperfections in the welded joint and affect the microstructure and mechanical properties of the materials, which all together can compromise the integrity of the structure. During the last decade, intensive efforts were made to develop systems for monitoring and control of welding parameters, which are based on the measurements of specific physical quantities in real time. In case of deviation from the values of the parameters specified in welding procedure, these systems send appropriate warnings to the operator and allow him to react immediately in order to correct the parameters, which directly affects the quality assurance of welded joints. This paper presents the basic features of these systems and advantages of their implementation in the industry.

Key words:

welded joints, quality assurance, welding parameters, monitoring of parameters in real-time, system characteristics.