



# ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

---

## WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 65 Vol. 65	Br. 1 No. 1	1-48 1-48	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2020. 2020.
--------------------	----------------	--------------	---------------------	------------------	----------------

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE  
ZAVARIVANJA U SRBIJI

SERBIAN WELDING SOCIETY  
QUARTERLY REVIEW

IZLAZI TROMESEČNO

### IZDAVAČ / PUBLISHER

**DUZS - Društvo za unapređivanje  
zavarivanja u Srbiji**

Adresa: 11000 Beograd, Grčića Milenka 67

**Za izdavača / For Publisher**

Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

### UREDNIŠTVO / EDITORIAL

**Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief**

Milica Antić, dipl.ing. EWE

duzs011@gmail.com, milicamantic@yahoo.com

**Tehnički urednik / Technical Editor**

Branislav Lukić, dipl.ing

**Redakcijski odbor / Editorial Board**

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Radomir Jovičić, dipl.ing.

Dr Bore Jegdić, dipl.ing.

Miloš Pavlović, dipl.ing.

**REDAKCIJA I MARKETING / EDITORIAL OFFICE  
AND MARKETING**

Vesna Jović

Grčića Milenka 67, I sprat  
11000 Beograd

Tel / Fax + 381 (11) 2420-652  
(10-16h)

[duzs@eunet.rs](mailto:duzs@eunet.rs)

[www.duzs.org.rs](http://www.duzs.org.rs)



### UREĐIVAČKI ODBOR / PUBLISHING COUNCIL

Dr Vencislav Grabulov, dipl.ing, (predsednik)

Prof.dr Vukić Lazić, dipl.ing.

Doc.dr Ismar Hajro, dipl.ing. (BiH)

Prof.dr Darko Bajić, dipl.ing. (Crna Gora)

Prof. dr Aleksa Blagojević, dipl.ing. (BiH, Republika Srpska)

Prof. dr Sveto Cvetkovski, dipl.ing. (Makedonija)

Doc. dr Tomaž Vuherer, dipl.ing. (Slovenija)

Prof. dr Ivan Samardžić, dipl.ing. (Hrvatska)

Dr Horia Dascau, dipl.ing. (Rumunija)

CIP - Каталогизacija u publikaciji  
Nародна библиотека Србије, Београд  
621.791

ZAVARIVANJE i zavarene konstrukcije :  
časopis Društva za unapređivanje zavarivanja  
u Srbiji = Welding & Welded Structures :  
Serbian Welding Society quarterly review /  
glavni i odgovorni urednik = editor-in-chief Milica Antić. –  
Vol. 41, no. 1 (1996)- . - Beograd :  
Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji,  
1996-. (Beograd : VIS studio).-29 cm

Tromesečno.  
ISSN 0354-7965 = Zavarivanje i zavarene konstrukcije  
COBISS.SR-ID 105396743

### CENE I NARUDŽBINA ZA 2020.

Cena pojedinačnog broja 825,00 dinara

Godišnja pretplata 2500,00 dinara

Tekući račun: 325-9500600002588-46

### PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100

Account No. RS35325960160000041546

OTPVRS22 (VOJVOĐANSKA BANKA AD)

IBAN RS35325960160000041546

### ŠTAMPA / PRINTED

“VIS STUDIO” d.o.o.

Aleksinačkih rudara 35, Beograd

Tiraž: 400 kom.

## SADRŽAJ

## CONTENTS



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

05

**HIGH-FREQUENCY LINEAR FRICTION  
WELDING BETWEEN ALUMINUM ALLOYS AND  
STAINLESS STEEL**

**ZAVARIVANJE LINIJSKIM  
VISOKOFREKVENTNIM TRENJEM LEGURA  
ALUMINIJUMA I NERĐAJUĆEG ČELIKA**

*T. Matsuda, H. Adachi, T. Sano, A. Hirose, R. Yoshida, H. Hori, S. Ono*



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

11

**INTRODUCTION OF A NEW TERM - FERRITE  
NUMBER DENSITY (FND) TO MEASURE THE  
FERRITE NUMBER OF WELDS ON THIN 300  
SERIES STAINLESS STEEL SHEETS**

**UVOĐENJE NOVOG TERMINA – GUSTINA  
FERITNOG BROJA (FND) ZA MERENJE  
FERITNOG BROJA ZAVARENIH SPOJEVA NA  
TANKIM LIMOVIMA OD NERĐAJUĆEG ČELIKA  
SERIJE 300**

*R. Kshirsagar, S. Jones, J. Lawrence, J. Tabor*



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

21

**Extended application of hardness prediction  
system for temper bead welding of A533B steel  
to various low-alloy steels**

**Proširena primena sistema za predviđanje  
tvrdoće kod zavarivanja čelika A533B za razne  
niskolegirane čelike**

*L. Yu, K. Saida, K. Nishimoto*



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

29

**NOVA FORMULA ZA ODREĐIVANJE VREMENA  
HLAĐENJA  $t_{8/5}$  SA OSVRTOM NA KVALITET  
ZAVARIVANJA**

**NEW  $t_{8/5}$  COOLING TIME FORMULA  
RELATING TO WELDING QUALITY**

*M. Miličević, V. Nejković*



OBRAZOVANJE

EDUCATION

37

**SERTIFIKACIONO TELO ZA SERTIFIKACIJU  
ZAVARIVAČKOG OSOBLJA SRBIJE**



OBRAZOVANJE

EDUCATION

41

**WELDING ENGINEERING  
CERTIFICATION OPTIONS**

**MOGUĆNOSTI SERTIFIKACIJE  
ZAVARIVAČKOG INŽENJERINGA**

*K. Bagheri*



VESTI

NEWS

4

**IN MEMORIAM - PROF. DR. ALEKSA BLAGOJEVIĆ**

28

**NAJAVE PLANIRANIH AKTIVNOSTI DUZS-A**

NAJAVE

**PLANIRANIH AKTIVNOSTI DUZS-A – nastavak**

47

**PRIKAZ KNJIGE “MATERIJALI I POSTUPCI OBRADU U JUVELIRSTVU – MONOGRAFIJA”  
(Zoran Karastojković-Radiša Perić)**

48

**MARKETING**

## **Poštovani čitaoci,**

Prvi kvartal ove prestupne 2020. godine sa zimom bez zime i virusom koji je još uvek enigma, bliži se kraju.

Nažalost, na samom početku godine ostali smo bez dvoje aktivnih članova našeg društva na čiju smo još dugu podršku računali. Napustili su nas Vladimir Zorić i Mirjana Prvulović. Skoro istovremeno smo saznali da nas je, nešto ranije, napustio i Aleksa Blagojević, član Izdavačkog saveta našeg časopisa (biografski podaci su na stranicama ovoga broja). Troje divnih ljudi i zaljubljenika u zavarivanje. Hvala im na svemu.

Kao i uvek, Život je jači od svih nas te i naše aktivnosti moraju da se nastave; o njima u rubrici Vesti.

U ovom broju ćete imati prilike da se upoznate sa zanimljivim načinom posmatranja formula za izračunavanje  $t_{8/5}$ , kao i radovima izloženim u okviru međunarodne konferencije „The 72 IAW Annual Assembly & International Conference“, July 2019 | Bratislava, Slovačka.

Konačno smo postali i oficijelno i formalno ovlašćeni za sertifikaciju IWE/IWT međunarodnih inženjera i tehničara.

U nadi da smo konačno razrešili sve teme i dileme oko toga šta to praktično znači, kako se dobija sertifikat, koja je naknada...

Do narednog susreta

Glavni i odgovorni urednik  
Milica Antić, dipl.ing. CIWE, EWE

---

**Podsećamo vas da je sada vreme da obnovite vaše članstvo u DUZS i pretplatu za naš časopis.**





## IN MEMORIAM

PROF. DR. ALEKSA BLAGOJEVIĆ

1940 – 2019.



član izdavačkog saveta našeg časopisa, napustio nas je u 80. godini, 18.7.2019. godine,. Bio je profesor Mašinskog fakulteta u Banjaluci, u penziji na Katedri za materijale, zavarivanje i metalurgiju, u nastavnoj oblasti Nauka o materijalima na predmetu Zavarivanje i termička obrada.

Obrazovanje stručna sprema	Gimnazija, Sarajevo 1960. god.
	Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, 1966, dip.ing. mašinstva
	Magistarski rad: Analiza uticaja ponavljalog zavarivanja na kvalitet zavarenog spoja čelika povišene čvrstoće, Strojarski fakultet, Zagreb, 1974. god., magistar tehničkih nauka
	Doktorska disertacija: Prilog rješenju problema poboljšanja triboloških svojstava spojeva repariranih navrivanjem punjenom žicom, Mašinski fakultet Univerziteta u B. Luci, 1987. god., doktor tehničkih nauka
Napredovanje u zvanjima:	asistent – 1970. god.
	viši asistent – 1972. god
	docent – 1975. god.
	redovni profesor – 1999. god.
Publikacije	Ukupno 36 radova na domaćim i međunarodnim konferencijama i časopisima, Knjiga 5, Skripte 2, Studijski boravci u SR Njemačkoj 2
Članstva u naučnim i stručnim organizacijama:	Jugoslovenski Savez zavarivača
	Drustvo zavarivača SR BiH
	Drustvo zavarivača BiH



Tomoki Matsuda<sup>1,a</sup>, Hironobu Adachi<sup>1,b</sup>, Tomokazu Sano<sup>1,c</sup>, Akio Hirose<sup>1,d</sup>, Ryo Yoshida<sup>2,e</sup>, Hisashi Hori<sup>2,f</sup>, Shozo Ono<sup>3,g</sup>

## High-frequency linear friction welding between aluminum alloys and stainless steel

### Zavarivanje linijskim visokofrekventnim trenjem legura aluminijuma i nerđajućeg čelika

#### Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u okviru 72. IIV godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Julu 2020

#### Rad primljen / Paper received:

Januar 2020.

#### Adresa autora / Author's address:

<sup>1</sup> Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita, Japan

<sup>a</sup> t-matsu@mapse.eng.osaka-u.ac.jp,

<sup>b</sup> h.adachi@mapse.eng.osaka-u.ac.jp,

<sup>c</sup> sano@mapse.eng.osaka-u.ac.jp,

<sup>d</sup> hirose@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>2</sup> Nikkei Research & Development Center, Nippon Light Metal Company, Ltd., Shizuoka, Japan

<sup>e</sup> ryo-yoshida@nikkeikin.co.jp, <sup>f</sup> hisashi-hori@nikkeikin.co.jp

<sup>3</sup> Research & Development Dept., Core Technology Center, Mitsui E&S Business Service Co., Ltd., Tamano, Japan

<sup>g</sup> onosho@mes.co.jp

**Ključne reči:** Spajanje raznorodnih materijala, Aluminijum, Čelik, Zavarivanje linearnim trenjem

**Keywords:** Dissimilar joining, Aluminum, Steel, Linear friction welding

#### Abstract

Intermetallic compound is one of the dominant factor for the dissimilar joints, e.g., Al-Fe joints. Since the joint strength generally decreases with the increasing intermetallic compound layer thickness, the development of joining process that can inhibit the intermetallic compound growth is required. In the present study, we show the dissimilar joining between 5083/6063 aluminum alloys and 304 stainless steel by high-frequency linear friction welding working at 245 Hz. In order to investigate the relationship between the mechanical properties and high-frequency linear friction process, the frictional heat at the interface was controlled by varying friction pressure. We found that sound joints with joint efficiency (95% and 90% for 5083 and 6063 aluminum alloys/304 stainless steel, respectively) were produced by short-time high-frequency linear friction welding process below 2 s. Microstructural observation showed that thin intermetallic compound layer was formed at the interface for both joints, and that the intermetallic compound layer thickness was influenced by the dependence of the plastic flow behavior during linear frictional motion on pressure. We believe the high-frequency linear friction welding was demonstrated to enable the sound joining of various materials by controlling the friction

#### Rezime

Intermetalno jedinjenje je jedan od dominantnih faktora za raznorodne spojeve, na primer, Al-Fe spojeve. S obzirom da se čvrstoća spoja obično smanjuje sa povećanjem debljine sloja intermetalnog jedinjenja, potrebno je razviti proces spajanja koji može inhibirati rast intermetalnih jedinjenja. U ovoj studiji prikazujemo spajanje raznorodnih materijala, legura aluminijuma 5083/6063 i nerđajućeg čelika 304 zavarivanjem visokofrekventnim linearnim trenjem pri 245 Hz. Da bi se istražila veza između mehaničkih svojstava i postupka visokofrekventnog linearnog trenja, toplota trenja na međupovršini (interfejsu) je kontrolisana promenljivim pritiskom trenja. Otkrili smo da su ispravni spojevi sa efikasnošću spojeva (95% i 90% za legure aluminijuma 5083 i 6063 / nerđajući čelik 304) proizvedeni kratkoročnim postupkom zavarivanja visokofrekventnim linearnim trenjem ispod 2 s. Mikrostrukturno posmatranje pokazalo je da se na interfejsu oba spoja formira tanak sloj intermetalnog jedinjenja i da je debljina sloja intermetalnog jedinjenja bila pod uticajem zavisnosti ponašanja plastičnog protoka tokom linearnog trenja od pritiska. Verujemo da je zavarivanje visokofrekventnim linearnim trenjem pokazalo da omogućava ispravno spajanje različitih materijala kontrolom pritiska trenja. Detaljni rezultati



pressure. The detailed results and discussion will be addressed in my presentation.

### 1. Introduction

Many studies have investigated the dissimilar joining between aluminum and steel, which involves the formation of intermetallic compound (IMC) layer at the interface. Growth of IMC layer generally results in the decrease of joint strength [1,2]. Therefore, the solid-state process has been applied to the dissimilar joining. Linear friction welding (LFW) is one of the solid-state joining method using frictional heat generated by the linear motion of weld materials. Although the LFW process has been used for high-melting-point or high-strength materials [3], it was difficult to be applied to aluminum alloys [4]. On the other hand, we developed the high-frequency LFW process for the joining of aluminum alloys [5]. The increase of friction frequency leads to the high heat flux, enabling the effective joining of aluminum alloys at short time [6].

In this study, we report the high-frequency LFW for aluminum alloy/stainless steel dissimilar joining. Aluminum alloys are basically classified into heat-treatable and non-heat treatable alloys, whose softening behaviors are different during heating, dependent on their strengthening mechanism. Herein, the bondability between 5083 or 6063 aluminum alloy and 304 stainless steel, which is a representative austenitic stainless steel, was investigated. Further, the change of joint strength and interfacial structure during the process was investigated by varying the friction pressure that is a factor for heat generation.

### 2. Experimental procedure

5083-O and 6063-T5 aluminum alloys (A5083 and A6063) and 304 stainless steel (SUS304) plates, which were 35 mm in square with 10 mm thickness, were used as specimens. These plates were fabricated to have projection part of 11 mm in square with 2 mm thickness at the center for linear friction. High-frequency LFW is composed of a friction process of butt materials and a forge process. Friction frequency and amplitude were 245 Hz and 1.8 mm, respectively. To investigate the influence of friction pressure for each aluminum alloy, the percentage of friction pressure against proof stress at room temperature,  $\alpha$ , was introduced as 20–60% for A5083/SUS304 joint and 5–40% for A6063/SUS304 joint; proof stress of each alloy was 145 MPa. Friction time was varied from 0.5–6 s for A5083/SUS304 joint and 0.2–6.0 s for A6063/SUS304 joint. Joints after friction process were forged at 150 MPa for 5 s.

The joint strength was measured by tensile test at a

i rasprava biće razmatrani u mojoj prezentaciji.

### 1. Uvod

Mnoge studije su istraživale raznorodne spojeve aluminijske i čelika, što uključuje formiranje sloja intermetalnog jedinjenja (IMC) na interfejsu. Rast IMC sloja uglavnom rezultuje smanjenjem čvrstoće spoja [1,2]. Stoga se postupak u čvrstom stanju primenio na spajanje raznorodnih materijala. Zavarivanje linearnim trenjem (LFW) je jedan od metoda spajanja u čvrstom stanju, koristeći toplotu trenja, koja se generiše linearnim kretanjem materijala za zavarivanje. Iako se postupak LFW koristio za materijale sa visokom tačkom topljenja ili visokom čvrstoćom [3], bilo je teško primeniti na legure aluminijuma [4]. S druge strane, razvili smo visokofrekventni LFW postupak spajanja aluminijumskih legura [5]. Povećanje frekvencije trenja dovodi do visokog toplotnog toka, što omogućava efikasno spajanje aluminijumskih legura u kratkom vremenu [6].

U ovoj studiji izveštavamo o visokofrekventnom LFW za aluminijumske legure / nerđajući čelik koji se međusobno razlikuju. Aluminijumske legure su u osnovi klasifikovane u legure koje se obrađuju toplotom i koje se ne mogu toplotno tretirati, a čija se omekšavanja razlikuju tokom zagrevanja, u zavisnosti od mehanizma ojačavanja. Ovde je ispitivana spojivost između 5083 ili 6063 legure aluminija i 304 nerđajućeg čelika, koji je reprezentativan austenitni nerđajući čelik. Dalje, promena čvrstoće spoja i međufazne strukture tokom procesa, istražena je promenom pritiska trenja koji je faktor za stvaranje toplote.

### 2. Eksperimentalni postupak

Aluminijumske legure 5083-O i 6063-T5 (A5083 i A6063) i ploče od nerđajućeg čelika 304 (SUS304), koje su bile 35mm kvadrat debljine 10 mm korišćeni su kao uzorci. Ove ploče su izrađene tako da imaju izbočeni deo od 11 mm u kvadratu sa debljinom od 2 mm u sredini za linearno trenje. Visokofrekventni LFW sastoji se od procesa trenja sučeljenih materijala i procesa kovanja. Frekvencija trenja i amplituda bili su 245 Hz i 1,8 mm, respektivno. Da bismo istražili uticaj pritiska trenja za svaku leguru aluminijuma, uveden je procenat pritiska trenja nasuprot dokazanom naponu na sobnoj temperaturi,  $\alpha$ , 20–60% za spoj A5083 / SUS304 i 5–40% za spoj A6063 / SUS304; dokazani napon svake legure bio je 145 MPa. Vreme trenja variralo je od 0,5–6 s za spoj A5083 / SUS304 i 0,2–6,0 s za spoj A6063 / SUS304. Spojevi nakon trenja kovani su pri 150 MPa tokom 5 s.

Čvrstoća spoja je ispitivanjem zatezanjem brzinom od 10 mm / min.



rate of 10 mm/min. The joint cross-section parallel to the friction direction was observed by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) to evaluate the shape change and joint microstructure during the process.

### 3. Results and discussions

Fig. 1 shows the tensile strength of A5083/SUS304 and A6063/SUS304 joints after high-frequency LFW. Dashed lines represent the strength of the base alloys, which were 317.6 MPa for A5083 and 184.3 MPa for A6063. We confirmed that friction pressure influenced on the relationship between friction time and joint strength. As for A5083/SUS304 joint (Fig. 1(a)), high pressure showed the high joint strength at the early friction process and the gradual decrease with further friction. In contrast, low friction pressure led to the delay of joining behavior compared with high pressure. The middle pressure showed the intermediate distribution. As for A6063/SUS304 joint (Fig. 1(b)), the relation was basically similar to that in A5083/SUS304 joint although the joining behavior occurred much early. It is emphasized that joint efficiency of each joint reached 94.9% and 89.7%. Thus, high-frequency LFW is found to form the sound joint by appropriate friction pressure for base alloys.

The decrease of strength with the friction time in A6063/SUS304 joint can be explained by softening behavior during the process. The effect of precipitation hardening in A6063 becomes lost after excessive friction owing to heating in high-frequency LFW. In contrast, no particular softening behavior would generally appear in A5083 that is a non-heat-treatable alloy, which indicates that the change in strength was attributed to the interfacial microstructure.

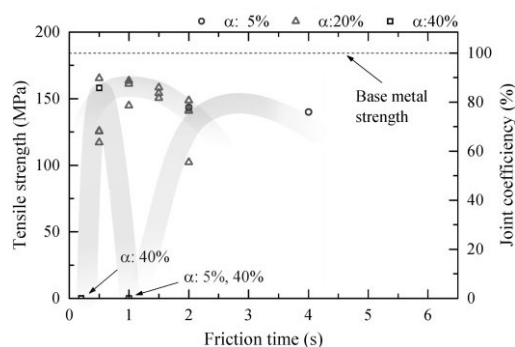
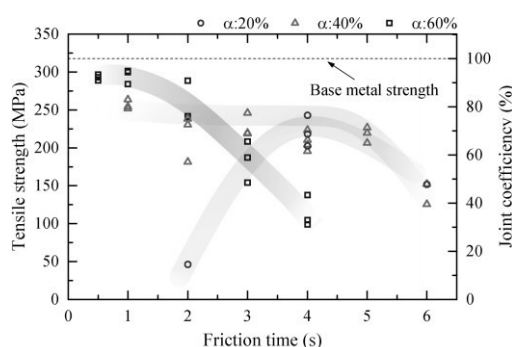


Fig. 1 The influence of loading ratio  $\alpha$  and friction time on the tensile strength of (a) A5083/SUS304 and (b) A6063/SUS304 joints.

SI. 1 Uticaj opterećenja na odnos  $\alpha$  i vremena trenja na zatezanu čvrstoću na (a) A5083 / SUS304 i (b) A6063 / SUS304.

Fig. 2(a) represents interfacial structure of A5083/SUS304 joint for  $\alpha=40\%$  and  $60\%$ . While thin interfacial (IMC) layer was present for both friction pressures, the thickness significantly changed in accordance with the pressure; a layer

Presek spoja paralelnog smeru trenja posmatran je optičkom mikroskopijom (OM) i skenirajućom elektronskom mikroskopijom (SEM) da bi se procenila promena oblika i mikrostruktura spoja tokom procesa.

### 3. Rezultati i diskusija

Slika 1 prikazuje zateznu čvrstoću spojeva A5083/SUS304 i A6063/SUS304 nakon visokofrekventnog LFW. Isečene linije predstavljaju čvrstoću baznih legura koje su bile 317,6 MPa za A5083 i 184,3 MPa za A6063. Potvrdili smo da pritisak trenja utiče na odnos vremena trenja i čvrstoće spoja. Što se tiče spoja A5083/SUS304 (Sl. 1 (a)), visoki pritisak je pokazao visoku čvrstoću spoja tokom procesa ranog trenja i postepeno smanjenje sa dodatnim trenjem. Suprotno tome, nizak pritisak trenja doveo je do odlaganja spajanja u poređenju s visokim pritiskom. Srednji pritisak pokazao je međuraspodelu. Što se tiče spoja A6063/SUS304 (slika 1 (b)), odnos je u osnovi bio sličan onom u spoju A5083/SUS304, iako se spajanje dogodilo mnogo ranije. Naglašava se da je zajednička efikasnost svakog spoja dostigla 94,9% i 89,7%. Tako je pronađeno da visokofrekventni LFW formira ispravni spoj odgovarajućim pritiskom trenja za bazne legure.

Smanjenje čvrstoće tokom vremena trenja u spoju A6063/SUS304 može se objasniti omekšavanjem tokom procesa. Efekat taložnog itvrdnjavanja u A6063 gubi se nakon prekomernog trenja usled zagrevanja u visokofrekventnim LFW. Suprotno tome, u A5083 se generalno ne pojavljuje neko posebno stanje omekšavanja, a to je legura koja se ne može toplotno tertirati, što ukazuje da se promena čvrstoće pripisuje mikrostrukturi na međupovršini.

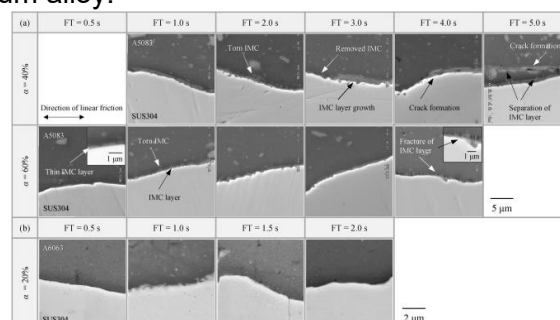
Slika 2 (a) predstavlja strukturu međupovršine spoja A5083/SUS304 za  $\alpha=40\%$  i  $60\%$ . Dok je za oba pritiska trenja bio prisutan tanki intermetalni (IMC) sloj, debljina se značajno promenila u skladu sa pritiskom; sloj ispod 500 nm formiran je pod



below 500 nm was formed in high pressure whereas a layer about 1–2  $\mu\text{m}$  in low pressure. On the other hand, we confirmed similar evolutions of interfacial structure for both pressure. Firstly, thin IMC layer formed at early process. Subsequently, the layer mainly remained thin during friction process whereas some layers locally grew. Finally, additional friction led to the crack formation and local fracture in the grown IMC layer. Since torn IMC was observed in aluminum side at the middle of process, it is supposed that stable layer thickness would be due to the tearing of IMC layer caused by plastic flow during linear friction. The shear load attributed to plastic flow initiates the crack in the grown IMC layer and leads to the fracture; the separation of IMC layer would be the evidence of torn grown IMC. Such crack formation in IMC layer lowers the interfacial strength of the joint. Fig. 2(b) represents the interfacial structure of A6063/SUS304 joint for  $\alpha=20\%$ . No reaction layer was observed at the interface for every friction time. Thick interfacial reaction layer generally tends to form in Al-Mg alloy compared with Al-Mg-Si alloy because of the alloying element of Si. This fact supports the difference of thickness between two aluminum alloys. Moreover, we found change in interfacial structure in A5083/SUS304 joint was consistent with joint strength depending on friction pressure and friction time. Here, we focused on the plastic flow of joined materials in order to correlate the formation of interfacial structure to friction process. Fig. 3 shows the cross-sectional OM images of joint shape. It was confirmed that aluminum alloy was squeezed out in association with the friction against little shape change in steel. In A5083/SUS304 joint (Fig. 3(a)), high friction pressure led to more squeezing than low one. Squeezing in A6063/SUS304 remarkably occurred at the early process (Fig. 3(b)). Moreover, projection part of aluminum was fully removed by squeezing after 1.5 s. This means the friction works like as steel is buried in aluminum alloy.

visokim pritiskom dok je sloj oko 1-2  $\mu\text{m}$  pri niskom pritisku. S druge strane, potvrdili smo slične evolucije međufazne strukture za oba pritiska. Prvo, tanki sloj IMC-a formiran je u ranom postupku. Nakon toga, sloj je uglavnom ostao tanak tokom trenja, dok su neki slojevi lokalno rasli. Konačno, dodatno trenje je do stvaranja pukotina i lokalnog loma u naraslom sloju IMC-a. Pošto je na sredini procesa u aluminijumu uočeno cepanje IMC, pretpostavlja se da bi stabilna debljina sloja nastala kidanjem sloja IMC bila uzrokovana plastičnim protokom pri linearnom trenju. Sporno opterećenje pripisano plastičnom toku inicira pukotinu u naraslom sloju IMC-a i dovodi do loma; odvajanje sloja IMC-a bio bi dokaz oštećenja IMC-a. Takvo stvaranje pukotina u IMC sloju smanjuje međufaznu čvrstoću sloja. Sl. 2 (b) predstavlja strukturu međupovršine spoja A6063/SUS304 za  $\alpha = 20\%$ . Nije primećen reakcioni sloj na međupovršini za svako vreme trenja. Debeli međupovršinski sloj uglavnom nastaje u Al-Mg leguri u poređenju sa Al-Mg-Si legurom zbog legirajućeg elementa Si. Ova činjenica potvrđuje razliku debljine između dve legure aluminijuma. Štaviše, otkrili smo da je promena međufazne strukture u spoju A5083/SUS304 bila u skladu sa čvrstoćom spoja u zavisnosti od pritiska trenja i vremena trenja. Ovde smo se fokusirali na plastični tok spojenih materijala kako bismo povezali formiranje međufazne strukture i procesa trenja.

Slika 3 prikazuje slike OM poprečnog preseka oblika spoja. Potvrđeno je da se aluminijumska legura stisla (skupila) zajedno sa trenjem nasuprot maloj promeni oblika kod čelika. U spoju A5083/SUS304 (Sl. 3 (a)), visok pritisak trenja doveo je do većeg stiskanja nego kod niskog. Stiskanje u A6063/SUS304 se u značajnom stepenu dogodilo u ranom procesu (Sl. 3 (b)). Štaviše, istureni deo aluminijuma je u potpunosti uklonjen pritiskom nakon 1,5 s. To znači da trenje deluje kao što je čelik sahranjen u leguri aluminijuma.



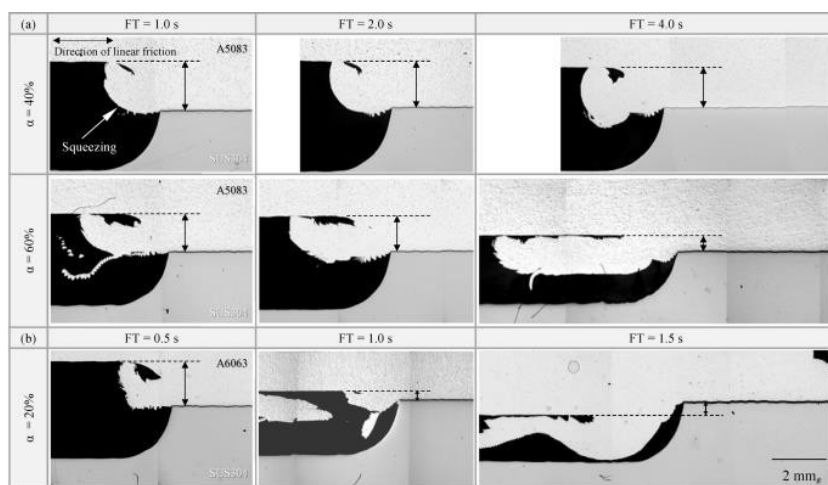
**Fig. 2** Cross-sectional SEM images of the joints showing temporal evolutions of interfacial structure for (a) A5083/SUS304 and (b) A6063/SUS 304 joints.

**Sl. 2** SEM slike poprečnog preseka spojeva koji prikazuju vremenske evolucije structure međupovršine za (a) A5083 / SUS304 i (b) A6063 / SUS 304 spojeve.



Each aluminum alloy shows the softening behavior during heating, which lead to the plastic flow. In particular, Al-Mg- Si alloy shows a typical decrease in hardness above 200 °C, resulting from growth or dissolution of precipitates, while Al-Mg alloy shows gradual decrease [7]. Hence, the softening behavior markedly facilitates the plastic flow of Al-Mg-Si alloy and squeezing. It is presumed that the softening behavior should be attributed to the change in friction pressure on the basis of heat flux at the interface; higher friction pressure induces more heat flux and plastic flow. The presumption also implies sufficient plastic flow and subsequent joining behavior would start late in low friction pressure. Further, plastic flow should influence on the IMC layer thickness in A5083/SUS304 joint. Large plastic flow induces large shear load on the interface, which induces tearing of IMC layer. Thus, friction pressure plays a significant role in determining IMC layer thickness and the following strength in A5083/SUS304 joint. On the contrary, excessive pressure could lead to inefficient welding for A6063/SUS304 joint owing to the excessive squeezing and softening of base alloy. These influence of friction pressure on the squeezing behavior is consistent with the weldability in Fig. 1. Thus, it is conducted that joint performance of A5083/SUS304 joint is due to the morphology of IMC attributed to plastic flow. Regarding A6063/SUS304 joint, the squeezing behavior also relates to the change in joint strength. However, it is noted that the joint efficiency was comparable to the other friction process instead of typical decrease of the strength. This indicates that characteristic interfacial structure contributing to strong bond is formed by high-frequency LFW.

Svaka legura aluminijuma pokazuje ponašanje omekšavanja tokom zagrevanja, što dovodi do plastičnog protoka. Konkretno, legura Al-Mg-Si pokazuje tipično smanjenje tvrdoće iznad 200 °C, što je posledica rasta ili rastvaranja taloga, dok legura Al-Mg pokazuje postepeno smanjenje [7]. Stoga ponašanje omekšavanja značajno olakšava plastični protok legure Al-Mg-Si i stiskanja. Pretpostavlja se da omekšavanje treba pripisati promeni pritiska trenja na osnovu toplotnog protoka na međupovršini; veći pritisak trenja indukuje veći toplotni protok i plastičnost. Pretpostavka takođe podrazumeva dovoljnu plastičnost i naknadno spajanje počelo bi kasno pri niskom pritisku trenja. Dalje, plastičnost treba da utiče na debljinu sloja IMC u spoju A5083/SUS304. Velika plastičnost indukuje veliko opterećenje na smicanje na međupovršini, što indukuje kidanje sloja IMC. Prema tome, pritisak trenja igra značajnu ulogu u određivanju debljine sloja IMC i sledeće čvrstoće u spoju A5083/SUS304. Suprotno tome, prekomerni pritisak može dovesti do neefikasnog zavarivanja spoja A6063/SUS304 usled prekomernog stiskanja i omekšavanja bazne legure. Ovakav uticaj pritiska trenja na stiskanje je u skladu sa zavarivljivošću na slici 1. Stoga se izvodi da je izgled spoja A5083/SUS304 posledica morfologije IMC koja se pripisuje plastičnom tečenju. Što se tiče spoja A6063/SUS304, stiskanje se takođe odnosi na promenu čvrstoće spoja. Međutim, treba primetiti da je efikasnost spoja uporediva sa drugim procesom trenja umesto tipičnog smanjenja čvrstoće. To ukazuje da je karakteristična struktura međupovršine koja doprinosi jakoj vezi formirana visokofrekventnim LFW.



**Fig. 3** Cross-sectional OM images showing time dependence of squeezing behavior for (a) A5083/SUS 304 and (b) A6063/SUS304 joints. Arrows in figures represent the distance between the surface of aluminum and projection part of steel.  
**Sl. 3** OM slike poprečnog preseka koje pokazuju vremensku zavisnost ponašanja stiskanja za (a) A5083 / SUS 304 i (b) A6063 / SUS304. Strelice na slikama predstavljaju udaljenost između površine aluminijuma i isturenog dela čelika.



Consequently, the HFLFW process allowed dissimilar joining between Al-Mg or Al-Mg-Si alloys and stainless steel, which was difficult to achieve by low-frequency friction welding owing to certain process characteristics. The control of friction pressure according to the type of welded material played a significant role in suppressing interfacial structure formation to effectively afford strong joints.

#### 4. Conclusions

High-frequency LFW was successfully used to join aluminum alloys with stainless steel at short friction times, with friction pressure control affording the required heat flux at the interface. The efficiency of the thus obtained joints was comparable to that of joints obtained by conventional friction-based methods. The thickness of the IMC layer was significantly suppressed by high-frequency linear friction joining, which facilitated the plastic flow of aluminum. Based on these results, high-frequency can be applied to the joining of other materials, not being limited to aluminum alloys and steels.

#### References

- [1] Borrisutthekul R, Yachi T, Miyashita Y and Mutoh Y 2007 *Mater. Sci. Eng. A* **467** 108  
 [2] Hatano R, Ogura T, Matsuda T, Sano T and Hirose A 2018 *Mater. Sci. Eng. A* **735** 361  
 [3] Vairis A and Frost M 1998 *Wear* **217** 117  
 [4] Fratini L, Buffa G, Cammalleri M and Campanella D 2013 *CIRP Ann. Manuf. Technol.* **62** 295

Shodno tome, postupak HFLFW omogućio je spajanje legura Al-Mg ili Al-Mg-Si i nerđajućeg čelika, što je bilo teško postići niskofrekventnim zavarivanjem trenjem zbog određenih karakteristika procesa. Kontrola pritiska trenja prema vrsti zavarenog materijala igrala je značajnu ulogu u suzbijanju formiranja međufazne strukture da bi se efektno dobili čvrsti spojevi.

#### 4. Zaključci

Visokofrekventni LFW uspešno se koristi za spajanje legura aluminijuma sa nerđajućim čelikom uz kratko vreme trenja, a kontrola pritiska trenja omogućava potreban toplotni protok na međupovršini. Efikasnost tako dobijenih spojeva bila je uporediva sa efikasnošću spojeva dobijenih konvencionalnim metodama zasnovanim na trenju. Debljina sloja IMC je značajno potisnuta postupkom visokofrekventnog linearnog trenja, što je olakšalo plastično tečenje aluminijuma. Na osnovu ovih rezultata, visoka frekvenca se može primeniti za spajanje drugih materijala, a ne ograničavajući se na legure aluminijuma i čelike.

- [5] Mogami H, Matsuda T, Sano T, Yoshida R, Hori H and Hirose A 2018 *Mater. Des.* 139 457  
 [6] Lis A, Mogami H, Matsuda T, Sano T, Yoshida R, Hori H and Hirose A 2018 *J. Mater. Process. Technol.* 255 547  
 [7] Leitão C, Louro R and Rodrigues D.M. 2012 *Mater. Des.* **37** 402

Podsećamo Vas da je članarina za 2020.g ostala  
nepromenjena i iznosi 3500,00 dinara.

Uplatom članarine stičete pravo na GRATIS godišnje izdanje  
časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"

Tekući račun DUZS: 325-9500600002588-46

Informacije:

+ 381 (11) 2420-652

[duzs011@gmail.com](mailto:duzs011@gmail.com)





R. Kshirsagar<sup>1,a</sup>, S. Jones<sup>2,b</sup>, J. Lawrence<sup>1,c</sup>, J. Tabor<sup>3,d</sup>

## Introduction of a New Term - Ferrite Number Density (FND) to Measure the Ferrite Number of Welds on Thin 300 Series Stainless Steel Sheets

### Uvođenje novog termina – Gustina feritnog broja (FND) za merenje feritnog broja zavarenih spojeva na tankim limovima od nerđajućeg čelika serije 300

NASTAVAK IZ PREDHODNOG BROJA  
2.deo

CONTINUED FROM PREVIOUS ISSUE  
Part 2

Also, at these cooling rates obtained using a TIG welding process, no shift from primary ferrite to primary austenite solidification mode is expected. This conclusion can be extended to thicker sheets (1.5 mm, 2.0 mm and 2.4 mm), but similar curves could not be plotted as the dilution from the filler wire changes the chemistry within the weld pool for every individual experiment.

Due to the contradicting results obtained, metallographic samples were prepared and etched in order to assess the microstructural features of the welds. Figure 5 shows the microstructures of different welds and their measured FNs for 0.7 mm thick sheet welds. In Figure 5, the dark dendritic lines are the retained delta-ferrite. It can be clearly seen that the density of the dark dendritic lines goes on decreasing from Figure 5(a) to 5(d). However, the measured FN has increased from Figure 5(a) to 5(d). On further analysis using ImageJ software, it was concluded that the amount of retained delta-ferrite concentration in the weld pool has in fact decreased from Figure 5(a) to 5(d), as shown in Figure 6. As mentioned previously, some experiments were done by adding certain quantities of nitrogen in the shielding gas in order to validate the above mentioned observations. Nitrogen being a strong austenite promoting element should significantly reduce the amount of residual delta-ferrite concentration in the weld. These experiments were done using the same parameter combinations as those using pure argon. However, nitrogen gas increased the voltage across the arc, increasing the heat input to the weld pool and consequently reducing the cooling rate. This is additionally expected to reduce the FN of the weld. However, in most of the cases, the measured FN was found to increase on addition of nitrogen, again contradicting the results from literature such as those reported by [13] and similar results were also reported by [14]. Figure 7 shows a comparison of measured Ferrite Numbers at different cooling rates, when welding probe, although both lying within the flux area of the probe

Takođe, pri ovim brzinama hlađenja dobijenim postupkom TIG zavarivanja, ne očekuje se pomak od primarnog ferita do primarnog načina očvršćavanja austenita. Ovaj zaključak može se proširiti na debljine limova (1,5 mm, 2,0 mm i 2,4 mm), ali slične krive se ne mogu nacrtati jer razblaživanje iz žice menja hemiju unutar zavarivačke kupke za svaki pojedinačni eksperiment.

Zbog kontradiktornih dobijenih rezultata, metalografski uzorci su pripremljeni i nagriženi u cilju procene mikrostrukturnih karakteristika zavarenih spojeva. Na slici 5 prikazane su mikrostrukture različitih šavov i njihovi izmereni FN za šavove od lima debljine 0,7 mm. Na slici 5, tamne dendritne linije su zaostali delta-ferit. Jasno se može videti kako gustina tamnih dendritnih linija opada sa slike 5 (a) na 5 (d). Međutim, izmereni FN se povećao sa slike 5 (a) na 5 (d). Daljom analizom pomoću ImageJ softvera zaključeno je da se količina zaostalog delta-ferita koncentriše u zavarivačkoj kupki i u stvari smanjila sa slike 5 (a) na 5 (d), kao što je prikazano na slici 6. Kao što je prethodno pomenuto, neki eksperimenti su rađeni dodavanjem određenih količina azota u zaštitni gas da bi se potvrdila gore navedena zapažanja. Azot kao snažni element za podsticanje austenita trebalo bi značajno da smanji količinu zaostale delta-feritne faze u šavu. Ovi eksperimenti su rađeni koristeći iste kombinacije parametara kao i oni koji koriste čisti argon. Međutim, azot povećava napon luka, povećavajući dovod toplote u kupku i posledično smanjujući brzinu hlađenja. Očekuje se da će ovo takođe smanjiti FN šava. Međutim, u većini slučajeva je utvrđeno da se izmereni FN povećava dodavanjem azota, što je opet u suprotnosti sa rezultatima iz literature kao što je ona koja je izneta u [13], a slični rezultati su takođe navedeni u [14]. Slika 7 prikazuje poređenje izmerenih feritnih brojeva sa različitim brzinama hlađenja, kada se zavarivanje koristi čisti argon kao zaštitnim gasom i korišćenjem 10% azota u argonu.



was done using pure argon as the shielding gas and using 10% nitrogen in argon.

Welds in Figure 8(a) and 8(b) are done using exactly the same parameters, except for the shielding gas. The weld in Figure 8(a) is done using pure argon, whereas the one in Figure 8(b) is done using 10% nitrogen in the shielding gas. The image analysis shows a significant reduction in the ferrite content of the weld when nitrogen was added to the shielding gas, whereas the FeritScope® results show an increase in FN in the presence of nitrogen. From all the above analysis, it is evident that there are some parameters, apart from the ones mentioned in FeritScope® user manual, which influence the FeritScope® results.

Consequently, only applying the correction factors mentioned in the user manual of the FeritScope® is not sufficient to fully understand the distribution of retained delta-ferrite and its effects on the weld properties, especially in case of thin welded sheets. One of the parameters that might have affected the FN measurements is the weld bead cross-sectional area. It is expected that as the weld area increases, the retained delta-ferrite of the weld reduces, since larger weld area means a higher heat input, which in turn means a lower cooling rate for a particular sheet thickness. For the welds shown in Figure 5 the cross-sectional area of the weld has increased from Figure 5(a) to 5(d). However, in this case the measured FN was found to increase with an increase in cross-sectional area. Similarly, in Figure 8, although the cross-sectional area of the weld in 8(b) was more than that in 8(a), the FN measured of weld 8(b) was more than 8(a). In general for most of the experiments, as the cross-sectional area of the weld bead increased, the measured FN also increased as shown in Figure 9. The trend flattened as the area increased, and beyond roughly 13 mm<sup>2</sup>, this influence was negligible. One of the reasons for all the contradictory results can be that the FeritScope® manual only considers the sheet thickness as a source of error in measuring the FNs, but does not consider weld width as an influential parameter. The effect of this combination of the sheet thickness and weld width (which forms the cross-sectional area) can be explained using Figure 10(a) and Figure 10(b).

Figure 10(a) schematically depicts two scenarios where two thin sheets have been welded together using different input parameters, resulting in two different bead geometries, one significantly larger than the other.

However, the cross-sectional area of both the weld beads varies and changes the interaction area covered by the magnetic flux of the FeritScope®

Zavareni spojevi na slici 8 (a) i 8 (b) rade se pomoću potpuno istih parametara, izuzev zaštitnog gasa. Zavareni spoj na slici 8 (a) se izvodi čistim argonom, dok se na slici 8 (b) izvodi sa 10% azota u zaštitnom gasu. Analiza slike pokazuje značajno smanjenje sadržaja ferita u šavu kada je u zaštitni gas dodan azot, dok rezultati FeritScope® pokazuju porast FN u prisustvu azota.

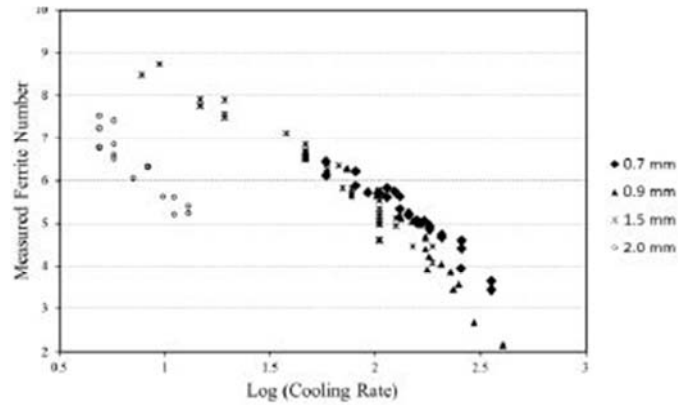
Iz gore navedene analize vidljivo je da postoje neki parametri, osim onih koji su navedeni u korisničkom priručniku FeritScope®, koji utiču na rezultate FeritScope®.

Prema tome, samo primena korekcijskih faktora navedenih u korisničkom priručniku FeritScope® nije dovoljna da u potpunosti shvatite raspodelu zaostalog delta-ferita i njegove efekte na svojstva šava, posebno u slučaju tankih zavarenih limova.

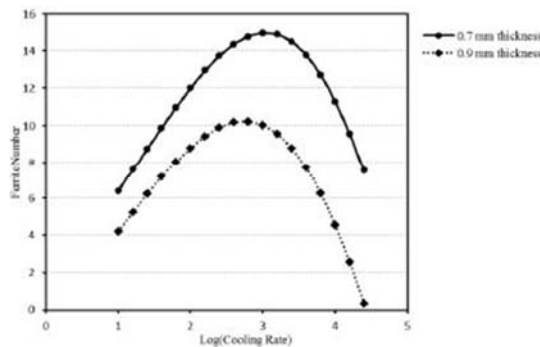
Jedan od parametara koji bi mogao uticati na mjerenje FN-a je područje poprečnog preseka zavara. Očekuje se da, kako se površina zavara povećava, zadržani delta-ferit u šavu se smanjuje, jer veće područje zavarivanja znači veći unos topline, što zauzvrat znači niži stepen hlađenja za određenu debljinu lima. Za šavove prikazane na slici 5 površina poprečnog preseka zavara povećala se sa slike 5 (a) na 5 (d). Međutim, u ovom slučaju je utvrđeno da se izmereni FN povećava sa povećanjem površine poprečnog preseka. Slično tome, na slici 8, iako je površina poprečnog preseka zavara 8 (b) bila veća od one u 8 (a), FN izmerena zavara 8 (b) bila je veća od 8 (a). Uopšteno, za većinu eksperimenata, kako se površina poprečnog preseka zavara povećavala, izmereni FN se takođe povećavao kao što je prikazano na slici 9. Trend je postajao ravnomerniji kako se površina povećavala, a za otprilike 13 mm<sup>2</sup>, taj uticaj je bio zanemariv. Jedan od razloga svih kontradiktornih rezultata može biti taj što FeritScope® priručnik samo debljinu lima smatra izvorom greške u merenju FN-a, ali ne smatra širinu šava kao uticajni parametar. Učinak ove kombinacije debljine lima i širine šava (koji formira površinu poprečnog preseka) može se objasniti pomoću slike 10 (a) i slike 10 (b).

Na slici 10 (a) šematski su prikazana dva scenarija gde su dva tanka lima spojena zajedno koristeći različite ulazne parametre, što rezultuje u dve različite geometrije zavara, jedna značajno veća od druge.

Međutim, površina poprečnog preseka oba zavara varira i menja područje interakcije prekriveno magnetnim fluksom sonde FeritScope®, iako obe leže unutar područja fluksa sonde.



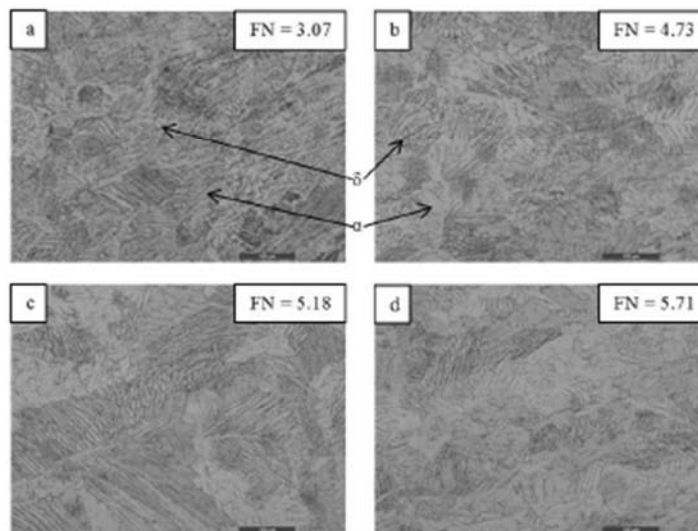
**Figure 3.** Plots illustrating dependence of retained delta ferrite content on the cooling rate on a logarithmic scale  
**Slika 3.** Grafikoni koji prikazuju zavisnost sadržaja zadržanog delta ferita od brzine hlađenja na logaritamskoj skali



**Figure 4.** Predicted Ferrite Number using ORFN plotted against cooling rates for 0.7 mm and 0.9 mm thick sheets  
**Slika 4.** Predviđeni feritni broj pomoću ORFN-a iscrtan na osnovu brzina hlađenja za 0,7 mm i 0,9 mm debljine lima

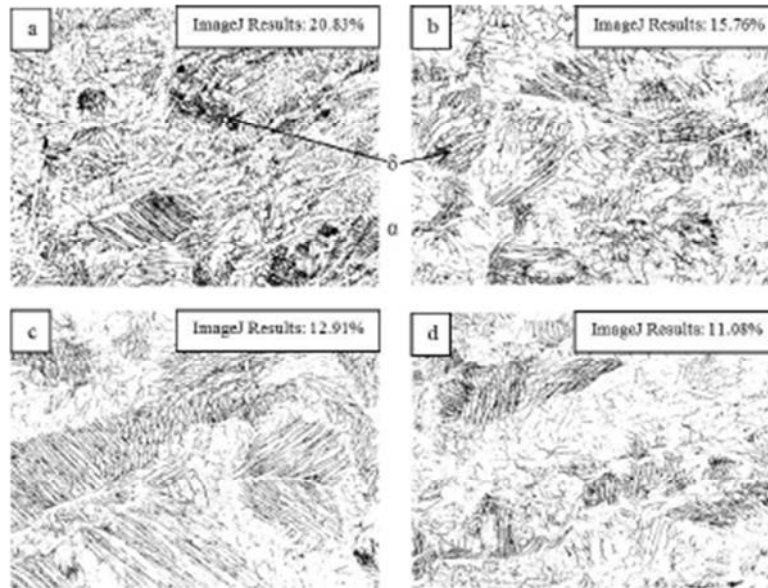
If it is assumed that the concentration of the retained delta-ferrite in both the weld beads is exactly the same, it has been shown that the FeritScope® will record a higher reading for the larger weld as compared to the smaller weld, since the total amount of magnetic delta-ferrite present in the larger weld is more as a result of its size. This will generate a larger magnetic force and increase the FeritScope® reading.

Ako se pretpostavi da je koncentracija zadržanog delta-ferita u obe zavara potpuno ista, pokazalo se da će FeritScope® zabeležiti veće očitavanje većeg zavaru u odnosu na manji zavar, pošto je ukupna količina magnetnog delta-ferita prisutna u većem zavaru, veća je zbog njegove veličine. To će generisati veću magnetnu silu i povećaće očitavanje FeritScope®



**Figure 5.** Microstructures ( $\delta$  = Delta-ferrite;  $\alpha$  = Austenite) of welds obtained from 0.7 mm thick sheets through different input parameters

**Slika 5.** Mikrostrukture ( $\delta$  = delta-ferit  $\alpha$  = austenit) zavara dobijenih na limu debljine 0,7 mm kroz različite ulazne parametre



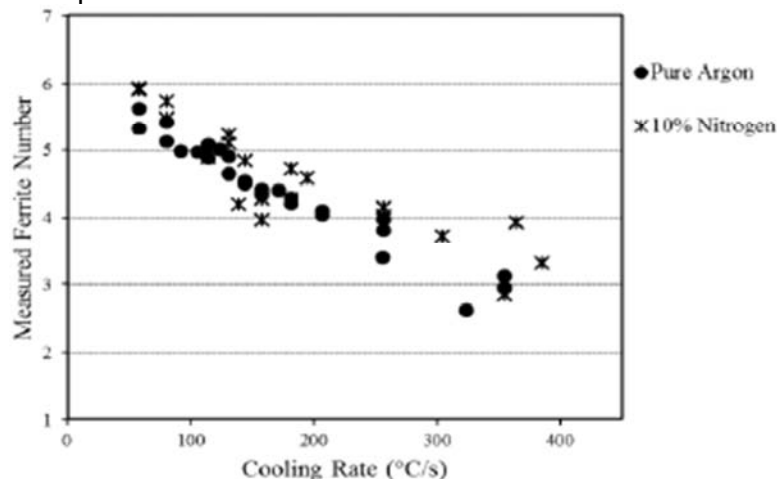
**Figure 6.** Analysis using ImageJ software on same welds as shown in Figure 5  
**Slika 6.** Analiza pomoću ImageJ softvera na istim zavarima kao što je prikazano na slici 5

However, as shown in Figure 10(b), the weld bead cross-sectional area is greater than the extended magnetic field of the probe; and irrespective of the size of the weld bead, the FN is always measured over a constant volume. The readings from the FeritScope® in such cases will only be based on the concentration of delta-ferrite and will not be influenced by the total amount of delta-ferrite in the weld bead. Consequently, no correction factors based on the plate thickness and the weld width are required and the readings obtained from the FeritScope® can be directly used as an indicator of the ferrite content. From this analysis, it can also be estimated that the area of effective magnetic flux of the probe is roughly 13 mm<sup>2</sup>.

For most of the experiments performed in this research, the cross-sectional area of the welds is smaller than 13 mm<sup>2</sup> and is expected to fall within the magnetic flux area of the probe.

Međutim, kao što je prikazano na slici 10 (b), površina poprečnog preseka zavara je veća od proširenog magnetnog polja sonde; i bez obzira na veličinu zavara, FN se uvek meri konstantnom zapreminom. Očitavanje FeritScope®-a u takvim slučajevima zasnivaće se samo na koncentraciji delta-ferita i na njega neće uticati ukupna količina delta-ferita u zavaru. Zbog toga nisu potrebni korektivni faktori na osnovu debljine ploče i širine zavara, a očitavanja dobijena iz FeritScope® mogu se direktno koristiti kao pokazatelj sadržaja ferita. Iz ove analize se takođe može proceniti da površina efektivnog magnetnog toka sonde iznosi otprilike 13 mm<sup>2</sup>.

Za većinu eksperimenata u ovom istraživanju površina poprečnog preseka zavara je manja od 13 mm<sup>2</sup> i očekuje se da padne unutar magnetnog toka sonde.

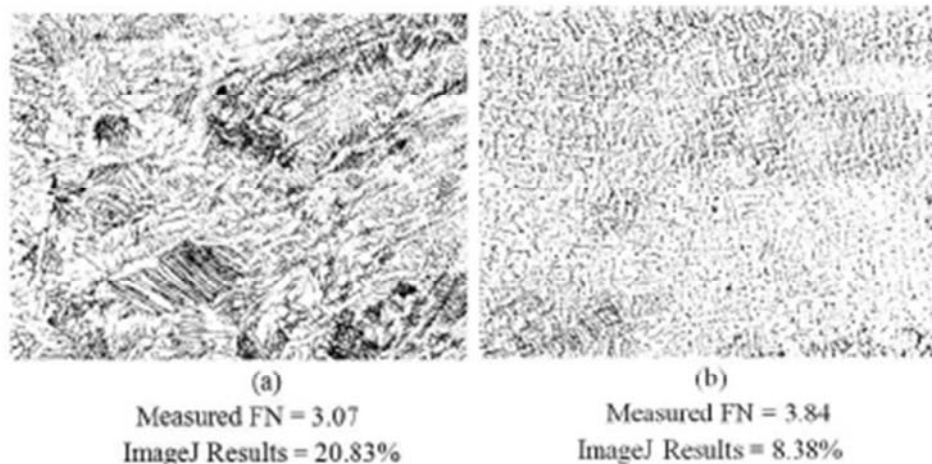


**Figure 7.** FNs of welds done using Pure Argon and 10% Nitrogen in shielding gas  
**Slika 7.** FN šavova sa čistim argonom i 10% azota u zaštitnom gasu

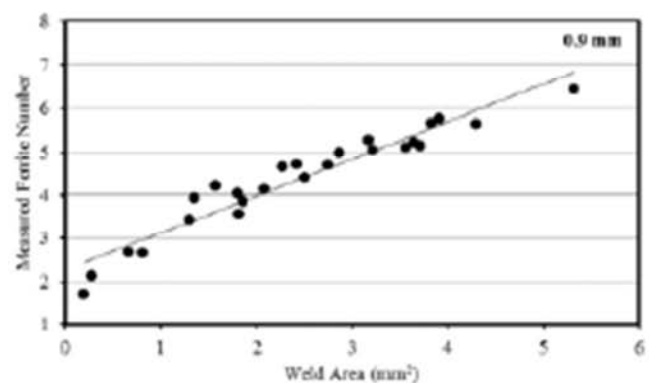
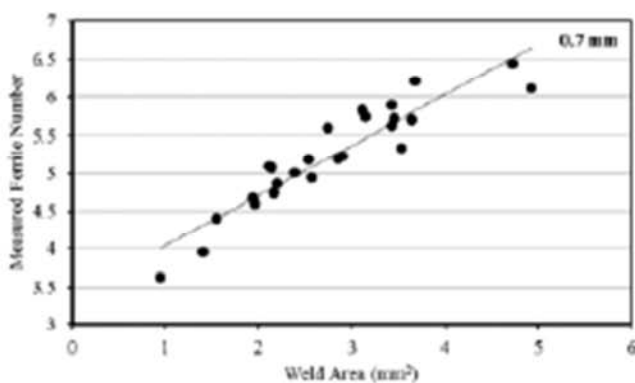


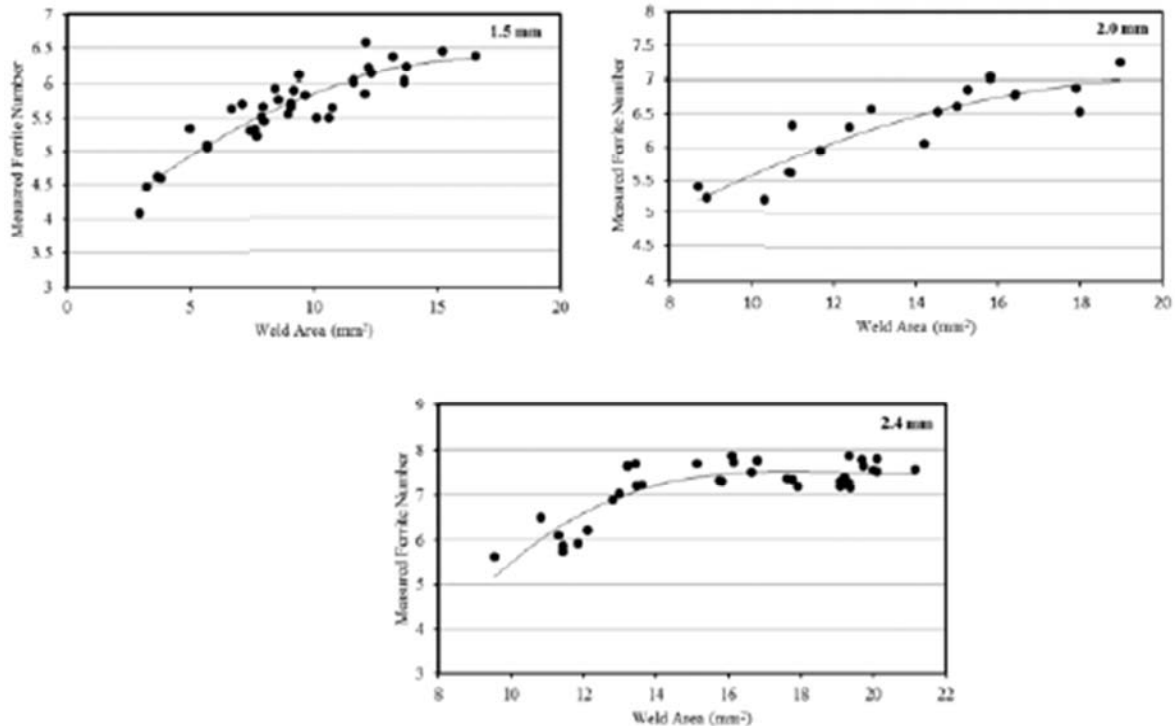
This is believed to be a potential reason for the controversial results obtained when compared to the literature. Such welds can be better assessed if the FN is replaced by Ferrite Number Density (FND) to indicate the amount of retained delta-ferrite in the weld. The FND can be measured by simply dividing the measured FN with the cross-sectional area of the weld. Although in many practical applications the cross-sectional area of the weld cannot be physically determined, however it can be estimated through predictive computational models such as regression analysis, artificial neural networks, etc. The development of such models is beyond the scope of this research and can be found elsewhere. For example, [15] used an artificial neural network to predict the bead height obtained in a robotic arc welding process, while [16] used an artificial neural network to predict the transverse and angular distortions of a TIG welding process. FND can eliminate the effect of both, the sheet thickness as well as the weld width, thus providing a number that can be used to compare all the welds of small cross-sectional areas ( $< 13 \text{ mm}^2$ ) on a common scale. Use of FND instead of FN also justifies all the contradictions obtained when the results were compared to those in literature.

Veruje se da je to potencijalni razlog za kontroverzne rezultate dobijene u poređenju sa literaturom. Takvi zavari se mogu bolje proceniti ako je FN zamenjen gustinom feritnog broja (FND) da pokaže količinu zaostalog delta-ferita u šavu. FND se može meriti jednostavnim deljenjem izmerenog FN-a sa površinom poprečnog preseka zavara. Iako se u mnogim praktičnim primenama površina poprečnog preseka zavara ne može fizički odrediti, ipak se može proceniti pomoću prediktivnih računarskih modela kao što su regresijska analiza, veštačke neuronske mreže itd. Razvoj takvih modela je izvan obima ovog istraživanja i mogu se naći negde drugde. Na primer, [15] je koristila veštačku neuronsku mrežu da predvidi visinu zavara koja je dobijena robotskim postupkom zavarivanja, dok je [16] koristila veštačku neuronsku mrežu za predviđanje poprečnih i ugaonih izobličenja kod postupka TIG zavarivanja. FND može eliminisati efekat oba, debljine lima kao i širine zavara, pružajući tako broj koji se može koristiti za upoređivanje svih zavarenih malih površina poprečnog preseka ( $< 13 \text{ mm}^2$ ) na zajedničkoj skali. Upotreba FND-a umesto FN-a takođe opravdava sve kontradikcije dobijene prilikom upoređivanja rezultata sa onima iz literature.

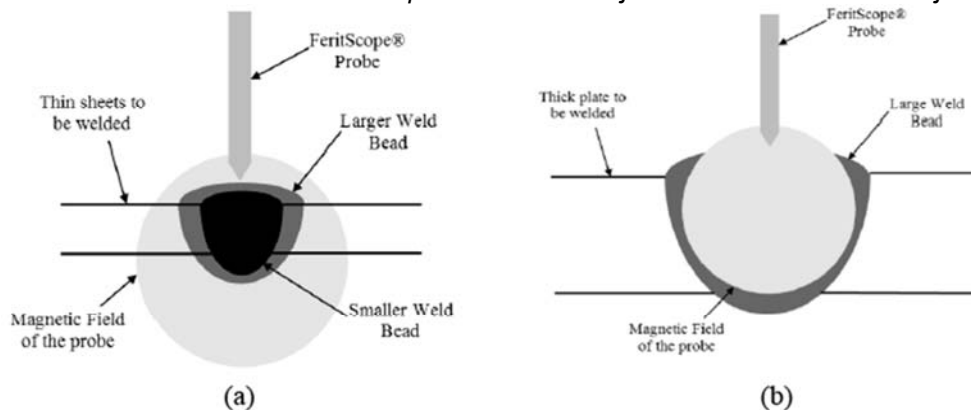


**Figure 8.** Ferrite content observed in welds done using (a) Pure Argon; (b) 10% Nitrogen in Argon as shielding gas  
**Slika 8.** Sadržaj ferita primećen u šavovima sa (a) čistim argonom; (b) 10% azota u argonu kao zaštitnom gasu





**Figure 9.** Measured FNs plotted against weld area obtained from various thickness sheets  
**Slika 9.** Izmereni FN-i iscrtani na površini šava dobijeni iz limova različitih debljina



**Figure 10.** Schematic explaining a possible reason for the error in measured FN  
**Slika 10.** Šematsko objašnjenje mogućeg razloga greške u izmerenom FN

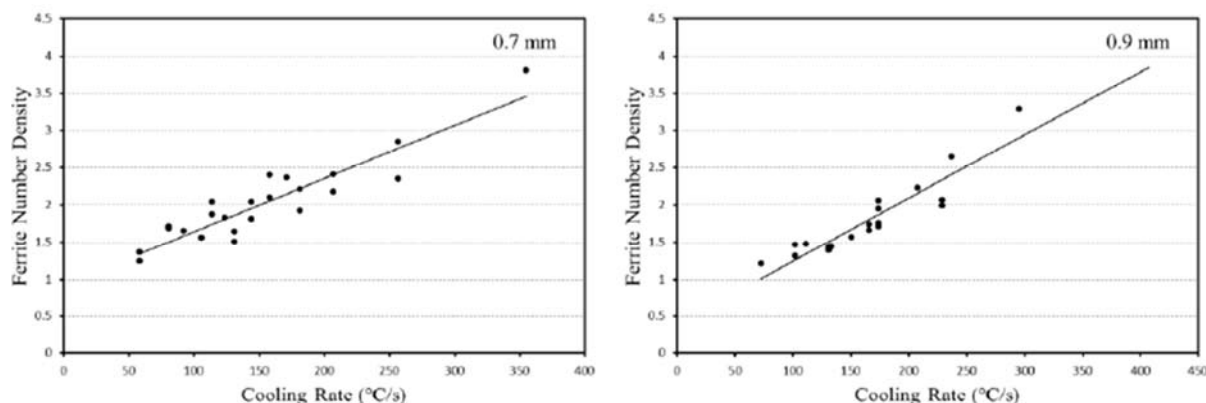
However, care must also be taken that for welds with cross-sectional area more than 13 mm<sup>2</sup>; the ferrite content of the welds is assessed using the FNs and not the FNDs. This is because the magnetic flux of the FeritScope® probe does not cover the entire area of the weld and dividing the FN with the cross-sectional area will lead to incorrect estimation of FND. An alternative for this is that for all the welds having the cross-sectional area over 13 mm<sup>2</sup>, the FND be calculated by dividing the measured FN by 13 mm<sup>2</sup>, which is roughly the area over which the FN is measured. It is important to note here that the minimum aspect ratio (Crown Width: Penetration) for all the welds that were fully penetrated was 2.36. Consequently, taking a slightly conservative approach, for the above analysis to hold true, the

Međutim, mora se paziti i na zavare sa površinom preseka većom od 13 mm<sup>2</sup>; sadržaj ferita u zavarima se procenjuje korišćenjem FN, a ne FND. To je zbog toga što magnetni tok FeritScope® sonde ne pokriva celokupno područje zavara i deljenje FN sa površinom poprečnog preseka dovodi do pogrešne procene FND. Alternativa za to je da za sve zavare koji imaju površinu poprečnog preseka preko 13mm<sup>2</sup> FND izračunava se deljenjem izmerenog FN sa 13 mm<sup>2</sup>, što je otprilike površina preko koje se meri FN. Važno je ovde napomenuti da je najmanji odnos slike (širina vrha: uvarivanje) za sve zavarene spojeve sa potpunim uvarivanjem bio 2,36. Prema tome, uzimajući blago konzervativan pristup, da bi gornja analiza bila



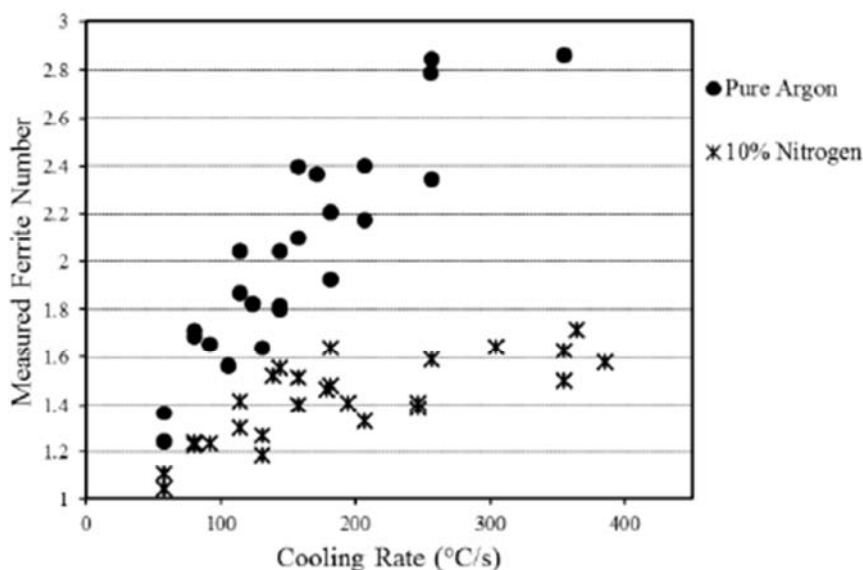
aspect ratio of the weld must be greater than 2.5 (which are common for a TIG welding process). If the welds are too narrow and deep, such as those obtained using activated TIG welding (A-TIG) process, even welds with area smaller than 13 mm<sup>2</sup> may not completely lie within the magnetic flux field of the probe. This will change the cut-offs for switching between FND and FN for such welds. The following sections show the analysis of the welds done using FND as an indicator of the ferrite content. As mentioned previously, it can be established from the literature that increasing the cooling rate must increase the amount of retained delta-ferrite in an FA-type of solidification. If the measured FN in Figure 2 is replaced with the FND, the results obtained are in agreement with the literature. This is shown in Figure 11 for 0.7 mm and 0.9 mm thick sheets as an example. Similarly, it can also be shown for thin sheet welds that the addition of nitrogen in the shielding gas affects only the FND and not the total FN of the weld. A comparison of FND obtained when welds are done using pure argon and 10% nitrogen in shielding gas for 0.7 mm thick sheets is shown in Figure 12. Unlike in Figure 7, this can explain the strong austenite-promoting behaviour of nitrogen, as there is a significant drop in the FND observed in using an Ar/N<sub>2</sub> (90:10) shielding gas mixture. This further supports the statement that for thin sheets, FND is a better indicator of the amount of retained delta ferrite in the weld structure. As the sheet thickness is increased, the welds become wider for a TIG welding process, consequently increasing their cross-sectional areas. As mentioned earlier, after a cross-sectional area of roughly 13 mm<sup>2</sup> associated with an aspect ratio of at least 2.5, its effect on the measured FN becomes insignificant. The minimum and maximum weld cross-sectional area obtained from the experiments, considering only fully penetrated welds on different thickness sheets is shown in Table 5.

istinita, odnos širine zavora mora biti veći od 2,5 (što je uobičajeno za TIG postupak zavarivanja). Ako su zavarivi preuski i duboki, kao što su oni dobijeni postupkom aktiviranog TIG zavarivanja (A-TIG), čak i zavari sa površinom manjom od 13 mm<sup>2</sup> možda neće u potpunosti ležati unutar polja magnetnog fluksa sonde. Ovo će promeniti prekidače za prebacivanje između FND i FN za takve zavare. Sledeći odeljci prikazuju analizu zavarenih spojeva rađenih korišćenjem FND-a kao pokazatelja sadržaja ferita. Kao što je prethodno spomenuto, iz literature se može utvrditi da povećavanje brzine hlađenja mora povećati količinu zaostalog delta-ferita u očvršćavanju tipa FA. Ako se izmereni FN na slici 2 zameni sa FND, dobijeni rezultati se slažu sa literaturom. To je prikazano na slici 11 za primere limova debljine 0,7 mm i 0,9 mm. Slično, može se pokazati i za zavarivanje tankih ploča da dodatak azota u zaštitnom gasu utiče samo na FND, a ne i na ukupni FN zavora. Upoređivanje FND-a dobijenog kada se zavarivanje upotrebljava čisti argon i 10% azota u zaštitnom gasu za limove debljine 0,7 mm, prikazano je na slici 12. Za razliku od slike 7, ovo može objasniti snažno ponašanje azota koji promovise austenit. značajan pad FND primećen korišćenjem Ar / N<sub>2</sub> (90:10) mešavine zaštitnog gasa. Ovo dalje potkrepljuje tvrdnju da je za tanke ploče FND bolji pokazatelj količine zaostalog delta ferita u strukturi šava. Kako se povećava debljina lima, šavovi postaju širi za TIG postupak zavarivanja, usled čega se povećavaju njihove površine poprečnog preseka. Kao što je ranije spomenuto, nakon površine poprečnog preseka otprilike 13 mm<sup>2</sup> koja je jednaka proporciji od najmanje 2,5, njen uticaj na izmereni FN postaje neznan. Minimalna i maksimalna površina poprečnog preseka šava dobijena eksperimentima, uzimajući u obzir samo potpuno uvarene zavare na limu različite debljine prikazani su u Tabeli 5.



**Figure 11.** Effect of cooling rate of the weld pool on the FN Density

**Slika 11.** Uticaj brzine hlađenja kupke na gustinu FN



**Figure 12.** Effect of addition of nitrogen in shielding gas in the FN Density

**Slika 12.** Uticaj dodavanja azota u zaštitni gas u gustini FN

Considering the values in Table 5, it can be generalised that for fully penetrated welds obtained through a TIG welding process, the term FN can be used to assess weld microstructure only if the sheet thickness is greater than or equal to 2.4 mm. For sheets thinner than 0.9 mm, the weld cross-sectional area is likely to lie within the magnetic flux area of the probe, for which FND must be used as an indicator of the ferrite content of the welds. For sheet thicknesses between 0.9 and 2.4, the use of either FN or FND depends on the cross-sectional area of the weld obtained. However, a common FND scale can also be used for all the welds if it is calculated by dividing the measured Ferrite Number by 13 mm<sup>2</sup>, for the welds having an area more than this value and having an aspect ratio greater than 2.5. All this analysis is only applicable if the FN is measured using a FeritScope® with an FGAB1.3-Fe probe. For any other probe, the thickness and the weld area that lies within the magnetic flux field may change, which will require similar analysis to obtain a cut-off thickness of the sheets.

Uzimajući u obzir vrednosti iz tabele 5, može se generalizovati da se za potpuno uvarene zavare dobijene postupkom TIG zavarivanja, termin FN može koristiti za procenu mikrostrukture šava samo ako je debljina lima veća od ili jednaka 2,4 mm. Za limove debljine veće od 0,9 mm, područje poprečnog preseka šava verovatno će ležati unutar područja magnetskog fluksa sonde, za koju se FND mora koristiti kao pokazatelj sadržaja ferita u šavovima. Za debljine lima između 0,9 i 2,4, upotreba ili FN ili FND zavisi od površine poprečnog preseka dobijenog zavara. Međutim, zajednička FND skala takođe se može koristiti za sve zavare ako se izračuna tako što se izmereni feritni broj podeli sa 13mm<sup>2</sup>, za zavare koji imaju površinu veću od ove vrednosti i imaju odnos slike veći od 2,5. Sva ova analiza je primenljiva samo ako se FN meri pomoću FeritScope® sa FGAB1.3-Fe sondom. Za bilo koju drugu sondu, debljina i područje zavara koji se nalazi unutar polja magnetnog fluksa mogu se promeniti, što će zahtevati sličnu analizu da bi se dobila debljina presečne ploče.

Sheet Thickness (mm)	Minimum Area (mm <sup>2</sup> )	Maximum Area (mm <sup>2</sup> )	Minimum Aspect Ratio
0.7	0.952	5.682	2.71
0.9	1.202	6.479	2.65
1.5	3.968	16.544	2.58
2.0	8.826	22.626	2.47
2.4	13.547	25.356	2.36

**Table 5.** Minimum and maximum weld areas obtained from the experiments for various thickness sheets

**Tabela 5.** Minimalne i maksimalne površine šavova dobijene eksperimentima za različite limove debljine



#### 4. Conclusion

From the analysis of the measured FN done in this research, the following can be concluded:

1. The measured Ferrite Number can decrease with an increase in cooling rate of the welding process, contradicting to what is mentioned in the literature. However, the Ferrite Number Density will increase with an increase in the cooling rate in an FA type of solidification, for low and moderate cooling rates, irrespective of the size of the weld bead.
2. FND is a better indicator of the ferrite content of the weld bead, especially when welding thin sheets. FND follows all the expected trends when compared to the literature, which the FN values don't.
3. The cut-off weld area under which the FND is superior to the FN value was found to be 13 mm<sup>2</sup> when the aspect ratio is greater than 2.5. For welds with cross-sectional area larger than this value, FN can be directly used as an indicator of ferrite content, or alternatively, the measured FN must be divided by 13 mm<sup>2</sup> instead of the actual cross-sectional area to obtain the FND so long as the minimum aspect ratio criteria of the weld is not violated.
4. For the TIG welding process producing fully penetrated weldments, the minimum cross-sectional area of welds done on 2.4 mm thick sheets was found to be 13.547 mm<sup>2</sup>, which is more than the FGAB1.3-Fe probe magnetic flux field. Consequently to simplify, the cut-off values for sheets having a thickness greater than 2.4 mm, the FN can be used as a direct indicator of the ferrite content of the weld. For sheets thinner than 0.9 mm with an aspect ratio greater than 2.5, the FND must be used as an indicator of the ferrite content in the weld. For sheet thicknesses in between 0.9 and 2.4, FN or FND may be used depending on the cross-sectional area of the weld and its aspect ratio.

#### Acknowledgements

The authors would like to thank the Institute for Advanced Manufacturing and Engineering, Coventry University, for all the providing all the financial support without which this research wouldn't have been possible.

#### 4. Zaključak

Iz analize izmerenog FN-a urađenog u ovom istraživanju može se zaključiti sledeće:

1. Izmereni feritni broj može se smanjiti s povećanjem brzine hlađenja postupka zavarivanja, suprotno onome što je navedeno u literaturi. Međutim, gustina feritnog broja će se povećavati s povećanjem brzine hlađenja u FA tipu očvršćavanja, za niske i umerene brzine hlađenja, bez obzira na veličinu zavara.
2. FND je bolji pokazatelj sadržaja ferita u zavaru, posebno kada se zavarivaju tanki limovi. FND prati sve očekivane trendove u poređenju sa literaturom, koju vrednosti FN-a nemaju.
3. Presečno područje šava ispod kojeg je FND superiorno, FN vrednost iznosi 13 mm<sup>2</sup> kada je odnos slike veći od 2,5. Za zavare sa površinom poprečnog preseka većom od ove vrednosti, FN se može direktno koristiti kao pokazatelj sadržaja ferita, ili alternativno, izmereni FN mora biti podeljen sa 13 mm<sup>2</sup> umesto stvarne površine poprečnog preseka da bi se dobio FND tako dugo dok kriterijumi za minimalni odnos šava nisu prekršeni.
4. Za postupak zavarivanja TIG koji proizvodi potpuno uvarene zavarene spojeve, utvrđeno je da minimalna površina poprečnog preseka zavarenih ploča debljine 2,4 mm iznosi 13,547 mm<sup>2</sup>, što je više od polja magnetnog fluksa sonde FGAB1,3-Fe. Shodno tome, pojednostavljene vrednosti za limove debljine veće od 2,4 mm FN mogu se koristiti kao direktan pokazatelj sadržaja ferita u šavu. Kod limova tanjih od 0,9 mm sa proporcijama većim od 2,5, FND se mora koristiti kao pokazatelj sadržaja ferita u šavu. Za debljine lima između 0,9 i 2,4, FN ili FND se mogu koristiti u zavisnosti od površine poprečnog preseka zavara i njegovog odnosa slike.

#### Zahvalnost

Autori bi se zahvalili Institutu za naprednu proizvodnju i inženjering, Univerziteta u Coventriju, za pružanje sve finansijske podrške bez koje, ovo istraživanje ne bi bilo moguće.



## References

### Literatura

- [1] M. Vasudevan, A. K. Bhaduri, R. Baldev and K. P. Rao, "Delta ferrite prediction in stainless steel welds using neural network analysis and comparison with other prediction methods," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 142, no. 1, pp. 20-28, 2003.
- [2] J. M. Vitek, S. A. David and C. R. Hinman, "Improved Ferrite Number Prediction Model that Accounts for Cooling Rate Effect," *Welding Journal*, 2003.
- [3] J. A. Brooks, A. W. Thompson and J. C. Williams, "A Fundamental Study of the Beneficial Effects of Delta Ferrite in Reducing Weld Cracking," *Welding Journal*, vol. 63, p. 71, 1984.
- [4] J. C. Lippold and D. J. Kotecki, *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, Wiley-Blackwell, 2005.
- [5] T. P. Gill, R. K. Dayal and J. B. Gnanamoorthy, "Estimation of delta ferrite in austenitic stainless steel weldments by an electrochemical technique," *Welding Journal*, pp. 375-378, 1979.
- [6] D. J. Kotecki and T. A. Siewert, "WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals: A Modification of the WRC-1988 Diagram," *Welding Journal*, 1992.
- [7] J. M. Vitek, A. Dasgupta and S. A. David, "Microstructural modification of austenitic stainless steels by rapid solidification," *Metallurgical Transactions A*, vol. 14, no. 9, pp. 1833-1841, 1983.
- [8] J. W. Elmer, S. M. Allen and T. W. Eager, "Microstructural development during solidification of stainless steel alloys," *Metallurgical Transactions A*, vol. 20, no. 10, p. 2117-2131, 1989.
- [9] Helmut Fischer GmbH, "Operators Manual FERITSCOPE® FMP30," Sindelfingen, 2008.
- [10] C. M. Adams, "Cooling rates and peak temperatures in fusion welding," *Welding Journal*, vol. 37, 1958.
- [11] J. M. Vitek, S. A. David and C. R. Hinman, "Improved Ferrite Number Prediction Model that Accounts for Cooling Rate Effects – Part 2: Model Results," *Welding Journal*, 2003.
- [12] L. P. Connor, *Welding Handbook Volume 1: Welding Technology*, Amer Welding Society, 1987.
- [13] H. Huang, "Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments," *Materials & Design*, vol. 30, no. 7, pp. 2404-2409, 2009.
- [14] V. Shankar, T. S. Gill, S. L. Mannan and S. Sundaresan, "Effect of nitrogen addition on microstructure and fusion zone cracking in type 316L stainless steel weld metals," *Materials Science and Engineering*, pp. 170-181, 2003.
- [15] I. S. Kim, J. S. Son, C. E. Park, C. W. Lee and Y. Prasad, "A study on prediction of bead height in robotic arc welding using a neural network," *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. 130-131, pp. 229-234, 2002.
- [16] L. Tian, Y. Luo, Y. Wang and X. Wu, "Prediction of transverse and angular distortions of gas tungsten arc bead-on-plate welding using artificial neural network," *Materials & Design*, vol. 54, pp. 458-472, 2014.



Lina YU<sup>a</sup>, Kazuyoshi SAIDA<sup>b</sup>, Kazutoshi NISHIMOTO<sup>c</sup>

## Extended application of hardness prediction system for temper bead welding of A533B steel to various low-alloy steels

### Proširena primena sistema za predviđanje tvrdoće kod zavarivanja čelika A533B za razne niskolegirane čelike

#### Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u okviru 72. IIV godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Jula 2020

#### Rad primljen / Paper received:

Januar 2020.

**Ključne reči:** Tvrdoća, Zavar za otpuštanje, Niskolegirani čelik, Sekundarno otvrdnjavanje, FEM (metoda konačnih elemenata)

#### Abstract

Temper bead welding is one of effective repair welding methods in case that post weld heat treatment is not easily applied. In order to evaluate the effectiveness of temper bead welding, hardness in HAZ becomes important factor. The neural network-based hardness prediction system of HAZ in temper bead welding for A533B low-alloy steel has been constructed by the authors in the previous study. However, for HAZ hardness prediction of other steels, it is necessary to obtain hardness database for each steel which is time-cost consuming, if the same method is used. The present study has been conducted to develop the generalized hardness prediction method applicable for other steels by utilizing the hardness data-base of A533B steel assuming that the hardness in HAZ of steels after tempering have a linear relationship with LMP (Larson-Miller parameter). By using the newly proposed extended method, only a few hardness data-base for the other steels is needed to obtain. Hardness distribution in HAZ of temper bead welding for other steels was calculated by using the extended hardness prediction system. The thermal cycles used for calculation were numerically obtained by a finite element method. The experimental results have shown that the predicted hardness is in good accordance with the measured one for steels without secondary hardening. It follows that the currently proposed extended method is effective for estimating the tempering effect during temper bead welding for the steels without secondary hardening.

#### Adresa autora / Author's address:

Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka, Japan

<sup>a</sup> yulina@mapse.eng.osaka-u.ac.jp, <sup>b</sup> saida@mapse.eng.osaka-u.ac.jp, <sup>c</sup> nisimoto@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

**Keywords:** Hardness, Temper bead welding, Low-alloy steel, Secondary hardening, FEM

#### Rezime

Zavarivanje zavara za otpuštanje je jedna od efikasnih metoda popravljavanja zavarivanjem u slučaju da se termička obrada nakon zavarivanja ne izvodi lako. Da bi se procenila efikasnost zavarivanja zavara za otpuštanje, tvrdoća u ZUT-u postaje važan faktor. Autori su u prethodnoj studiji konstruisali sistem predviđanja tvrdoće ZUT zasnovanog na neuronskoj mreži pri zavarivanju zavara za otpuštanje za niskolegirani čelik A533B. Međutim, za predviđanje tvrdoće ZUT kod drugih čelika, potrebno je dobiti bazu tvrdoće za svaki čelik, koja zahteva mnogo vremena, ako se koristi ista metoda. Ova studija je provedena sa ciljem da se razvije generalizovana metoda predviđanja tvrdoće koja se primenjuje na ostale čelike korišćenjem baze podataka o tvrdoći čelika A533B uz pretpostavku da tvrdoća čelika u ZUT nakon otpuštanja ima linearni odnos sa LMP (Larson-Miller-ov parametar). Upotrebom novo-predložene proširene metode potrebno je dobiti samo nekoliko baza podataka o tvrdoći za ostale čelike. Raspodela tvrdoće u ZUT zavara za otpuštanje za ostale čelike, izračunata je korišćenjem proširenog sistema predviđanja tvrdoće. Termički ciklusi korišćeni za proračun bili su numerički dobijeni, metodom konačnih elemenata. Rezultati eksperimenta su pokazali da je predviđena tvrdoća u dobrom skladu sa izmerenom za čelike bez sekundarnog otvrdnjavanja. Sledi da je trenutno predložena proširena metoda efikasna za procenu efekta otpuštanja tokom zavarivanja zavara za otpuštanje za čelike bez sekundarnog otvrdnjavanja.



## 1. Introduction

Low alloy steels have been widely applied for the production of pipes, automotive and aerospace bodies, railway lines and offshore and onshore structural engineering plates. Low-alloy steel ASTM A533B possessing superior low-temperature toughness and weldability is typically used as the material for pressurized water reactor vessels in nuclear power plants [1,2]. Based on the experimentally obtained hardness database, the neural network-based hardness prediction system of heat affect zone (HAZ) in temper bead welding for A533B steel has been constructed by the authors in the previous study [3-5].

However in actual industry, not only A533B steel but also the other low-alloy steels are required to temper bead welding. For HAZ hardness prediction of other steels, it is necessary to obtain hardness database for each steel which is time-cost consuming, if the same method is used. The present study has been conducted to develop the generalized hardness prediction method applicable for the other low- alloy steels by utilizing the hardness data-base of A533B steel assuming that the hardness in HAZ of low-alloy steels after tempering have a linear relationship with LMP (Larson- Miller parameter) [3]. By using the newly proposed extended method, only a few hardness data-base for the other steels is needed to obtain. Therefore, the extended method of the previously constructed hardness prediction system of A533B steel to the other low-alloy steels without secondary hardening was proposed from the view of engineering.

## 2. Materials and experimental procedures

The chemical compositions of A533B, A508, 1.5%Ni, SM490 and A336 low-alloy steels used in this study are shown in **Table 1**, together with the filler material of Alloy690. Specimens of low-alloy steels (5×5×5 mm) were heated by a high frequency induction heating device to synthesize the as-welded and temper-processed HAZ. The peak temperature ( $T_p$ ) of the simulated thermal cycle were changed from 400 °C to 1350°C, and the cooling rate (CR) in the range between 800 °C and 500°C of the thermal cycle varied from 3 °C/s to 2 000 °C/s (water quenching). For the temper thermal cycle, temper temperature is lower than  $A_{c1}$ , thus it was changed in the range of 400 °C~650 °C.

The temper bead welded samples of low-alloy steels were produced by TIG welding with the welding conditions shown in **Table 2**. The temper bead welding was performed using the consistent layer technique [6,7]. The cross-sectional surfaces

## 1. Uvod

Nisko legirani čelici se široko primenjuju za proizvodnju cevi, automobilskih i vazduhoplovnih delova, železničkih pruga i morskih i obalnih konstrukcijskih elemenata. Nisko legirani čelik ASTM A533B koji ima vrhunsku žilavost na niskim temperaturama i zavarivljivost obično se koristi kao materijal za posude vodenih reaktora pod pritiskom u nuklearnim elektranama [1,2]. Na osnovu eksperimentalno dobijene baze podataka o tvrdoći, autori su u prethodnoj studiji konstruisali sistem predviđanja tvrdoće preko neuronske mreže na zoni uticaja toplote (ZUT) zavara za otpuštanje za čelik A533B [3-5].

Međutim, u stvarnoj industriji, zavari za otpuštanje potrebni su ne samo za čelik A533B, nego i za druge niskolegirane čelike. Za predviđanje tvrdoće ZUT kod ostalih čelika, potrebno je dobiti bazu podataka o tvrdoći za svaki čelik, koja zahteva mnogo vremena, ako se koristi ista metoda. Ova studija je sprovedena kako bi se razvila metoda opšteg predviđanja tvrdoće primenljiva na ostale niskolegirane čelike korišćenjem baze podataka o tvrdoći čelika A533B uz pretpostavku da tvrdoća u HAZ-u niskolegiranih čelika nakon otpuštanja ima linearni odnos sa LMP (Parametar Larson-Miller) [3]. Upotrebom novo- predložene proširene metode potrebno je dobiti samo nekoliko baza podataka o tvrdoći za ostale čelike. Stoga je sa stanovišta inženjeringa predložena proširena metoda ranije konstruisanog sistema predviđanja tvrdoće čelika A533B na ostale niskolegirane čelike bez sekundarnog otvrdnjavanja.

## 2. Materijali i eksperimentalne procedure

Hemijski sastavi niskolegiranih čelika A533B, A508, 1,5% Ni, SM490 i A336 korišćenih u ovom istraživanju prikazane su u tabeli 1, zajedno sa dodatnim materijalom Alloy690. Uzorci niskolegiranih čelika (5 × 5 × 5 mm) zagrevani su visokofrekventnim indukcionim grejnim uređajem za sintezaciju ZUT zavarenog i otpuštanog. Najviša temperatura ( $T_p$ ) simuliranog toplotnog ciklusa izmenjena je sa 400 °C na 1350 °C, a brzina hlađenja (CR) u opsegu između 800 °C i 500 °C termičkog ciklusa varirala je od 3 °C / s do 2 000 °C / s (kaljenje u vodi). Za termički ciklus otpuštanja, temperatura otpuštanja je niža od  $A_{c1}$ , pa je promenjena u opsegu od 400 °C do 650 °C.

Uzorci otpuštenih zavara kod niskolegiranih čelika proizvedeni su TIG zavarivanjem uz uslove zavarivanja prikazanih u tabeli 2. Zavarivanje zavara za otpuštanje izvršeno je korišćenjem metode konzistentnog sloja [6,7]. Površine



after 1-layer and 6-layer welding were cut from the multi-pass welded samples. The Vickers hardness was measured in the cross-section of the specimens after polishing and etching with 3% nital solution. The Vickers hardness measurement was performed at a load of 9.8N, and the mean value was taken after excluding the maximum and minimum values from each multiple measurement. The thermal cycles in temper bead welding were calculated using finite element analysis code developed by the authors specifically for welding simulation [8].

poprečnog preseka nakon jednoslojnog i 6-slojnog zavarivanja isečene su iz zavarenih uzoraka sa više prolaza. Tvrdoća po Vickersu je izmerena u preseku uzoraka nakon poliranja i nagrizanja sa 3% rastvorom nitala. Merenje tvrdoće po Vickersu izvršeno je pri opterećenju od 9,8 N, a srednja vrednost je uzeta nakon što su iz svakog višestrukog merenja isključene maksimalne i minimalne vrednosti. Toplotni ciklusi pri zavarivanju zavara za otpuštanje izračunati su korišćenjem analize konačnih elemenata koji su autori posebno razvili za simulaciju zavarivanja [8].

Material	Chemical composition (mass. %)																
	Hemijski sastav																
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Ti	Ca	B	Al	Nb	Co	Fe
A533B	0.12	1.43	0.006	0.002	0.26	0.53	0.01	0.51	0.02					0.038		-	Bal.
A508	0.18	1.48	0.005	0.002	0.18	0.76	0.12	0.5	0.2	0.003	0.015	0.015	0.003	0.0025	0.01	-	Bal.
1.5%Ni	0.08	1.01	0.011	0.003	0.25	1.93	0.16	0.07	0.05	0.02	-	-	-	-	0.009	-	Bal.
SM490	0.17	1.37	0.018	0.018	0.33	0.07	0.06	0.008	0.01	0.002	-	-	-	-	-	-	Bal.
A336	0.15	0.55	0.003	0.0006	0.05	0.20	2.54	1.03		0.30				0.011	0.030		Bal.
Alloy690	0.02	0.27	0.002	0.015	0.15	Bal.	29.59	0.02	-	-	-	-	-	0.216	-	0.05	10.13

Table 1. Chemical composition of materials used (mass. %)

Tabela 1. Hemijski sastav korišćenih materijala

Layer Sloj	Current [A] Jačina struje	Voltage [V] Napon	Wire sending speed [mm/s] Brzina dodavanja žice	Welding speed [mm/s] Brzina zavarivanja	Heat Input [kJ/mm] Uneta toplota	Number of passes Broj prolaza
1st	250	15.3	50	1.67	2.3	3
2nd	120	12.5	25	5	0.3	5
3rd	120	12.5	25	5	0.3	4
4th	200	14.5	42	1.67	1.7	3
5th	200	14.5	42	1.67	1.7	3
6th	200	14.5	42	1.67	1.7	3

Table 2. Welding condition of multi-pass welding of the low-alloy steels

Tabela 2. Uslovi zavarivanja kod višelojnog zavarivanja niskolegiranih čelika

### 3. Extended application method of hardness prediction system of A533B steel

The expansion of the previously constructed hardness prediction system of A533B steel to the other low-alloy steels without secondary hardening was proposed in this study. For the thermal cycle without temper (1-cycle, 2-cycle), because the hardness decrease monotonously with the decrease of  $T_p$ , as shown in Fig. 1 [3], Quenching Index (QI) can be proposed, as expressed in the following formulas (1) and (2):

$$QI = (Hv_{\alpha} - Hv_{0\alpha}) / (HvM_{\alpha} - Hv_{0\alpha}) \quad (1)$$

$$Hv_{\beta} = (HvM_{\beta} - Hv_{0\beta}) \times QR + Hv_{0\beta} \quad (2)$$

where,  $\alpha$  indicates A533B steel and  $\beta$  indicates the other steels; HvM is the maximum hardness (Full Martensite), and Hv0 is the minimum hardness (Full-Annealed). Through this method, based on the obtained A533B hardness database [3,5], the QI prediction system can be constructed by neural network [9-11], as illustrated in Fig. 2.

### 3. Proširena metoda primene sistema predviđanja tvrdoće za čelik A533B

U ovoj studiji je predloženo širenje ranije konstruisanog sistema predviđanja tvrdoće čelika A533B na ostale niskolegirane čelike bez sekundarnog otvrdnjavanja. Za termički ciklus bez otpuštanja (1-ciklus, 2-ciklusa), jer se tvrdoća monotono smanjuje sa smanjenjem  $T_p$ , kao što je prikazano na slici 1 [3], može se predložiti indeks kaljenja (QI), izražen u sledećim formulama (1) i (2):

$$QI = (Hv_{\alpha} - Hv_{0\alpha}) / (HvM_{\alpha} - Hv_{0\alpha}) \quad (1)$$

$$Hv_{\beta} = (HvM_{\beta} - Hv_{0\beta}) \times QR + Hv_{0\beta} \quad (2)$$

gde  $\alpha$  označava A533B čelik i  $\beta$  označava ostale čelike; HvM je maksimalna tvrdoća (potpuni martenzit), a Hv0 je minimalna tvrdoća (potpuno žarena). Pomoću ove metode, na osnovu dobijene baze podataka o tvrdoći A533B [3,5], sistem predviđanja QI može se konstruisati neuronskom mrežom [9-11], kao što je prikazano na slici 2.



For the thermal cycle with temper (1-cycle+temper, 2- cycle+temper), because the hardness after temper has a linear relationship with LMP for the low-alloy steels without secondary hardening as shown in Fig. 3 [3], Temper Index (TI) can be proposed, as expressed in the following formulas (3) and (4):

$$TI = (Hv_{\alpha} - Hv0_{\alpha}) / (HvM_{\alpha} - Hv0_{\alpha}) \tag{3}$$

$$Hv_{\beta} = (HvM_{\beta} - Hv0_{\beta}) \times TI + Hv0_{\beta} \tag{4}$$

where,  $\alpha$  indicates A533B steel and  $\beta$  indicates the other steels; HvM is the hardness before temper, and Hv0 is the minimum hardness after temper (Full-Annealed). Through this method, the TI prediction system can be constructed by neural network based on the A533B hardness database, as shown in Fig. 4.

By using the newly proposed extended hardness prediction method, the generalized hardness prediction method applicable for other steels can be developed, with only a few hardness data-base for the other steels needed to obtain.

Za termički ciklus sa otpuštanjem (1-ciklus + otpuštanje 2-ciklus + otpuštanje), jer tvrdoća nakon otpuštanja ima linearni odnos sa LMP-om za niskolegirane čelike bez sekundarnog otvrdnjavanja, kao što je prikazano na slici 3 [3], Indeks otpuštanja (TI) može se predvideti, izraženo sledećim formulama (3) i (4):

$$TI = (Hv_{\alpha} - Hv0_{\alpha}) / (HvM_{\alpha} - Hv0_{\alpha}) \tag{3}$$

$$Hv_{\beta} = (HvM_{\beta} - Hv0_{\beta}) \times TI + Hv0_{\beta} \tag{4}$$

gde  $\alpha$  označava A533B čelik i  $\beta$  označava ostale čelike; HvM je tvrdoća pre otpuštanja, a Hv0 je minimalna tvrdoća nakon otpuštanja (pitpuno žareno). Kroz ovu metodu, sistem predviđanja TI može se konstruisati neuronskom mrežom na osnovu baze tvrdoće A533B, kao što je prikazano na slici 4.

Korišćenjem novo predložene proširene metode predviđanja tvrdoće, može se razviti generalizirana metoda predviđanja tvrdoće koja se primenjuje na ostale čelike, sa samo nekoliko potrebnih baza podataka tvrdoće za ostale čelike.

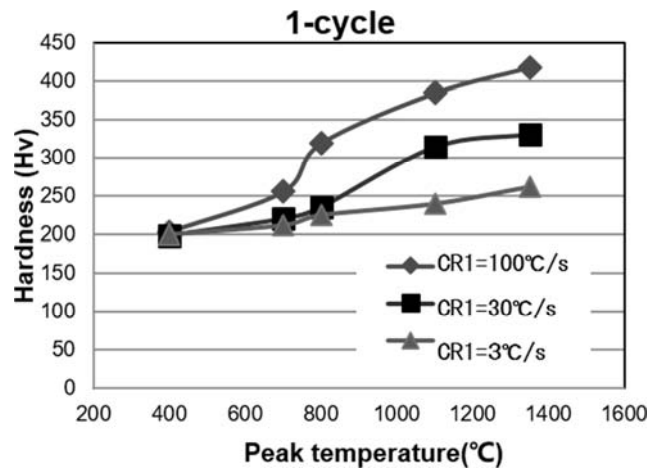


Fig. 1 Relationship between the hardness of 1-cycle and peak temperature  
SI.1. Međusobni odnos tvrdoća 1. ciklusa i vršne temperature

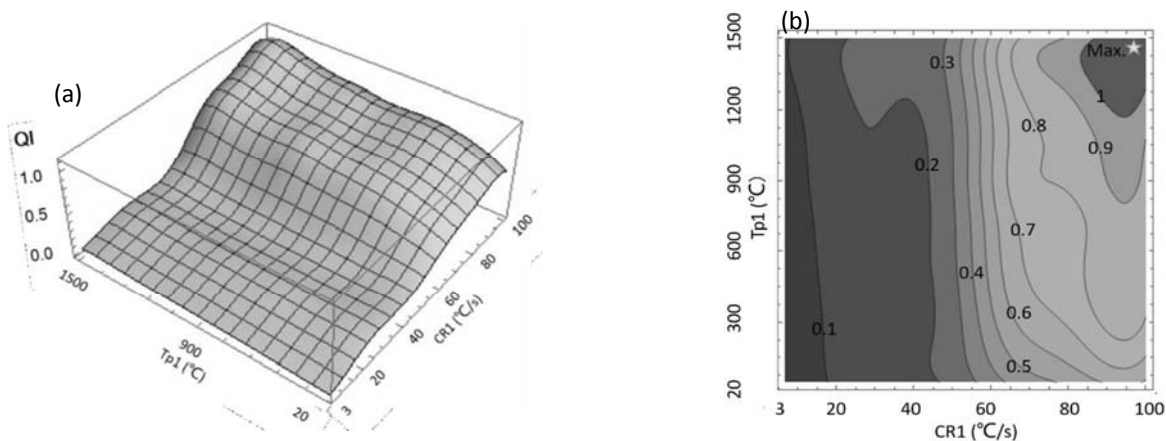
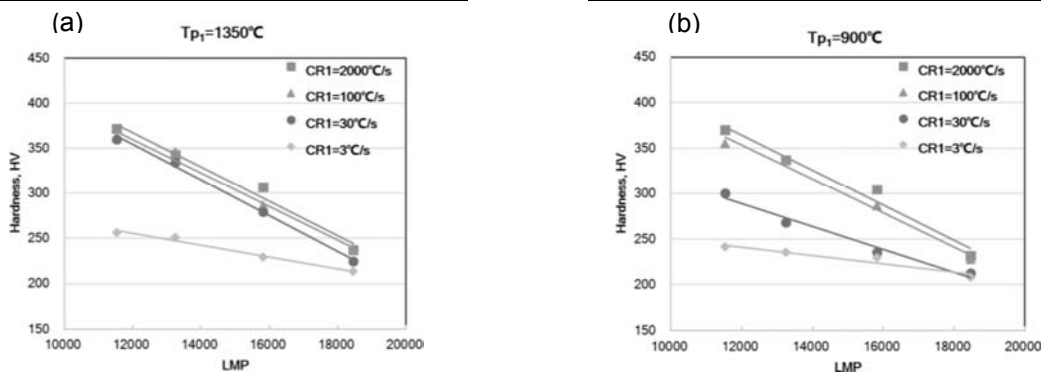
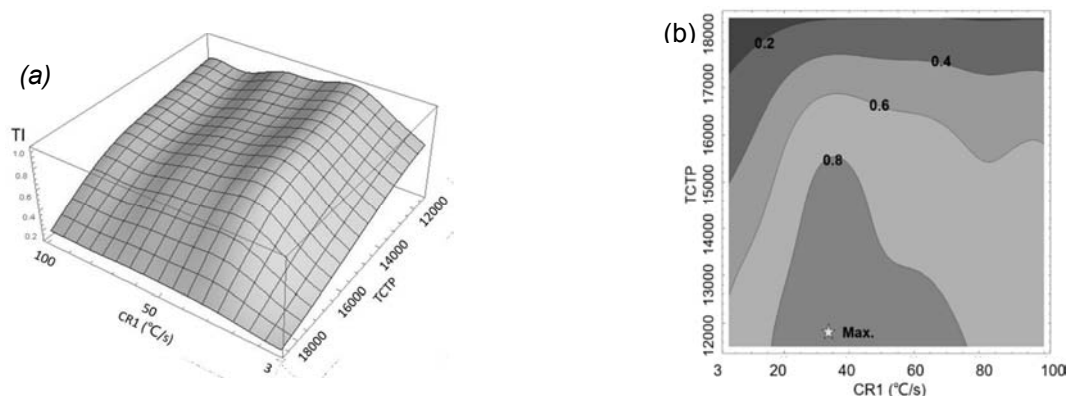


Fig. 2 QI prediction system of 1-cycle: (a) 3D figure and (b) 2D-contour figure  
SI. 2. Sistem predviđanja 1.cilusa : (a) 3D slika i (b) 2D-slika kontura



**Fig. 3** Relationship between the hardness of 1-cycle+temper and LMP: (a)  $T_{p1}=1350^{\circ}\text{C}$  and (b)  $T_{p1}=900^{\circ}\text{C}$   
**SI. 3.** Međusobni odnos tvrdoća 1. ciklusa+otpuštanje i LMP: (a)  $T_{p1}=1350^{\circ}\text{C}$  i (b)  $T_{p1}=900^{\circ}\text{C}$



**Fig. 4** TI prediction system of 1-cycle+temper (with constant  $T_{p1}=1350^{\circ}\text{C}$ ): (a) 3D figure and (b) 2D-contour figure  
**SI. 4.** Sistem predviđanja TI 1-ciklus+otpuštanje (sa konstantnom  $T_{p1}=1350^{\circ}\text{C}$ ): (a) 3D slika i (b) 2D-slika kontura

#### 4. Hardness prediction of the other steels after temper bead welding using the extended application method

By using the three-dimensional finite element analysis code developed specifically for welding simulation [8], the peak temperature distributions produced by multi-pass thermal cycles in welds during temper bead welding were calculated as illustrated in **Fig. 5**. Using the neural network-based QI and TI prediction system, the hardness in HAZ of A508, 1.5%Ni, SM490 and A336 steels after temper bead welding was calculated, based on the simulated thermal history in HAZ.

The two-dimensional hardness distribution in the HAZ of A508 steel after 1-layer welding and 6-layer welding are shown as color contour maps in **Fig. 6**. Besides the red weld metal (WM) and grey base metal (BM) regions, the hardness in HAZ is shown with rainbow colors depending on the different hardness levels. Compared with the hardness after 1-layer welding, the hardness has decreased remarkably after 6-layer welding because of the temper effect.

In order to verify the effectivity of the extended hardness prediction method, the predicted hardness distribution has been compared with the measured result as shown in **Fig. 7**. It follows that not only the maximum hardness but also

#### 4. Predviđanje tvrdoće drugih čelika nakon zavarivanja zavara za otpuštanje primenom proširene metode

Korišćenjem trodimenzionalnog koda za analizu konačnih elemenata razvijenog specijalno za simulaciju zavarivanja [8], raspodeljene vršne temperature dobijene više-prolaznim toplotnim ciklusima u šavovima za vreme zavarivanja zavara za otpuštanje izračunate su kao što je prikazano na slici 5. Korišćenje neuronske mreže - na osnovu QI i TI sistema predviđanja, izračunata je tvrdoća u ZUT kod čelika A508, 1,5% Ni, SM490 i A336 nakon zavarivanja zavara za otpuštanje, na osnovu simulirane termičke istorije u ZUT.

Dvodimenzionalna raspodela tvrdoće u ZUT čelika A508 nakon jednoslojnog zavarivanja i 6-slojnog zavarivanja prikazani su kao konturne karte u boji na slici 6. Pored područja crvenog metala šava (WM) i sivog osnovnog metala (BM), tvrdoća u ZUT je prikazana duginim bojama zavisno od nivoa tvrdoće. U poređenju sa tvrdoćom nakon jednoslojnog zavarivanja, tvrdoća se znatno smanjila nakon 6-slojnog zavarivanja zbog efekta otpuštanja.

Da bi se potvrdila efikasnost proširene metode predviđanja tvrdoće, upoređena je predviđena raspodela tvrdoće sa izmerenim rezultatom kao što je prikazano na slici 7. Iz toga sledi da se ne samo



the hardness change tendency agrees well with the predicted result. And as presented in **Fig. 8**, the hardness profiles were measured along the dotted line, which is 1.0 mm far from the specimen surface. The blue points indicate the experimentally measured hardness, and the red points indicate the calculated hardness using our proposed method, based on the simulated thermal history. The calculated hardness is in good accordance with the experimentally measured result for A508 steel.

Similarly, the predicted hardness distribution and the comparison of the predicted hardness and experimentally measured hardness of 1.5%Ni, SM490 steels are illustrated in **Figs. 9-11** and **Figs. 12-14** respectively. It indicates that the predicted hardness is in good accordance with the experimentally measured hardness for not only A508 steel, but also 1.5%Ni and SM490 steels.

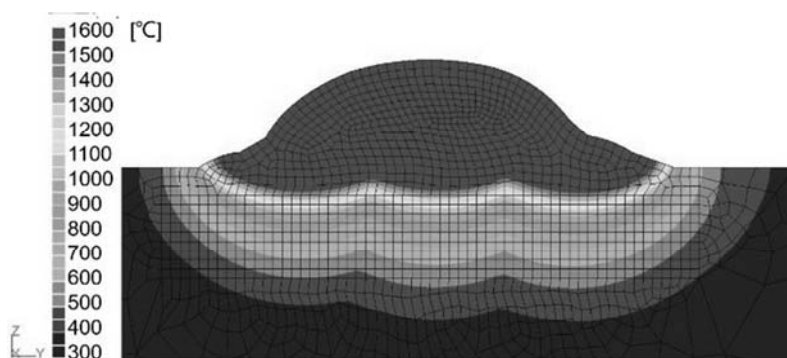
For A336 steel, the two-dimensional hardness distribution in the HAZ after 1-layer welding and 6-layer welding are shown as color contour maps in **Fig. 15**. The comparison of the predicted and the experimentally measured hardness distribution is illustrated in **Fig. 16**. It can be found that the predicted hardness is quite different from the experimentally measured result for A336 steel. And as presented in **Fig. 17**, the hardness profiles measured along the line of 1.0 mm far from the specimen surface do not agree with the calculated result. Above all, the predicted hardness is in good accordance with the experimentally measured hardness for A508, 1.5%Ni, SM490 steels, while the predicted hardness is quite different from the measured result for A336 steel. And the correlation coefficient between the predicted hardness and the experimentally measured hardness of 4 kinds of steel are summarized in **Table 3**, which also indicates that the proposed hardness prediction method is useful for A508, 1.5%Ni, SM490 steels, except A336 steel.

maksimalna tvrdoća, već i tendencija promene tvrdoće dobro slaže sa predviđenom rezultatima. I kao što je prikazano na slici 8, profili tvrdoće su izmereni duž isprekidane linije, koja je udaljena 1,0 mm od površine uzorka. Plave tačke označavaju eksperimentalno izmerenu tvrdoću, a crvene označavaju izračunatu tvrdoću pomoću naše predložene metode, zasnovane na simuliranoj termičkoj istoriji. Izračunata tvrdoća je u dobrom skladu sa eksperimentalno izmerenim za čelik A508 čelik.

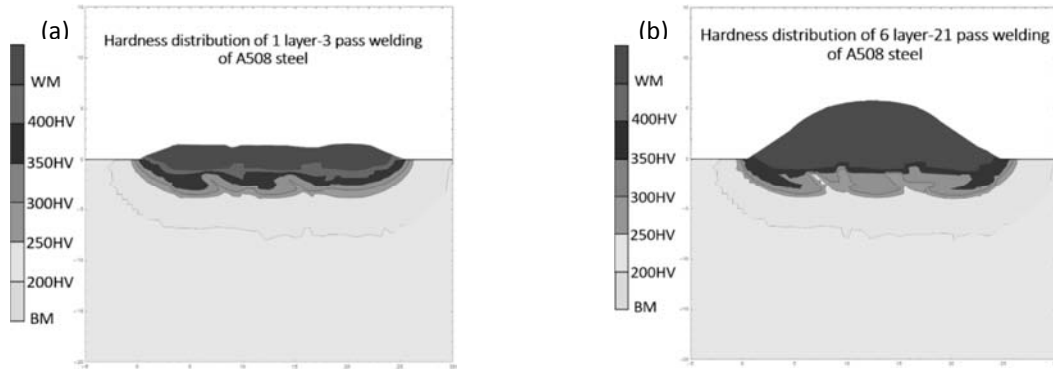
Slično, predviđena raspodela tvrdoće i poređenje predviđene tvrdoće sa eksperimentalno izmerenim tvrdoćama za čelike 1,5% Ni, SM490 su ilustrovane na sl. 9-11 i sl. 12-14. To pokazuje da je predviđena tvrdoća u dobroj usaglašenosti sa eksperimentalno izmerenim ne samo za čelik A 508, već i za čelike 1,5%Ni i SM 490.

Za čelik A336, dvodimenzionalna raspodela tvrdoće u ZUT nakon jednoslojnog zavarivanja i 6-slojnog zavarivanja prikazana je kao konturne karte u boji na slici 15. Upoređivanje predviđene i eksperimentalno izmerene tvrdoće je ilustrovano na sl. 16. Može se utvrditi da je predviđena tvrdoća prilično različita od eksperimentalno izmerenih rezultata za čelik A336. I kao što je prikazano na slici 17, profili tvrdoće meren duž linije od 1,0 mm udaljene od površine uzorka, se ne slažu sa izračunatim rezultatima.

Pre svega, predviđena tvrdoća se dobro slaže s eksperimentalno izmerenom tvrdoćom za A508, 1,5% Ni, SM490 čelik, dok je predviđena tvrdoća prilično različita od izmerene vrednosti za čelik A336. A koeficijent korelacije između predviđene tvrdoće i eksperimentalno izmerene tvrdoće 4 vrste čelika sažet je u Tabeli 3, što takođe ukazuje da je predložena metoda predviđanja tvrdoće korisna za čelike A508, 1,5% Ni, SM490, osim čelika A336.

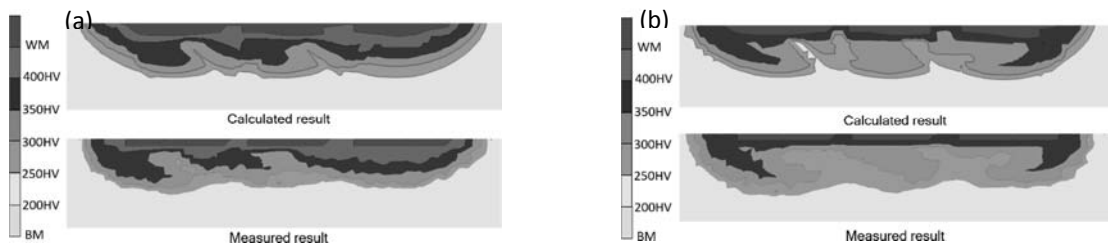


**Fig. 5** Simulated peak temperature distribution after 6layer- 21pass welding  
**Sl. 5** Simulirana raspodela vršnih temperature posle 6 slojeva- 21 prolaz zavarivanja



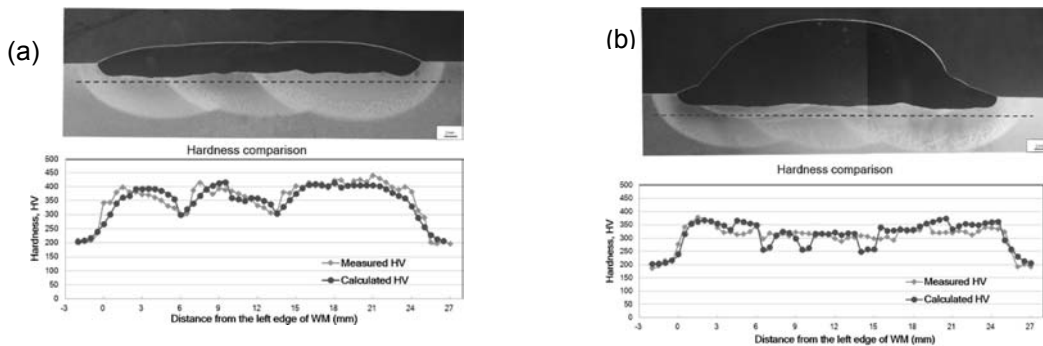
**Fig. 6** Predicted hardness distribution of A508 steel: (a) 1 layer-3 pass welding and (b) 6 layer-21 pass welding

**SI. 6** Predviđena raspodela tvrdoće čelika A508: (a) 1 sloj-3 prolaza i (b) 6 slojeva-21 prolaz



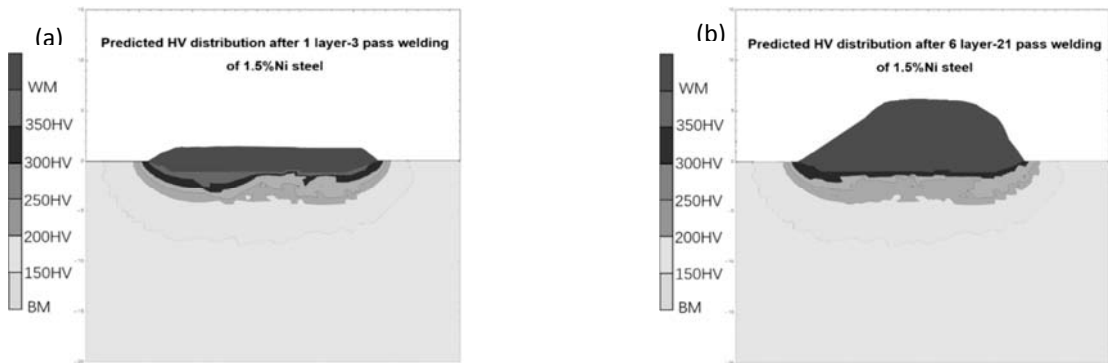
**Fig. 7** Hardness distribution comparison of A508 steel: (a) 1 layer-3 pass welding and (b) 6 layer-21 pass welding

**SI. 7** Upoređenje raspodele tvrdoće čelika A508: (a) 1 sloj-3 prolaza i (b) 6 slojeva-21 prolaz



**Fig. 8** Hardness comparison after 1-Layer and 6-Layer welding of A508 steel: (a) 1 layer-3 pass welding and (b) 6 layer-21 pass welding

**SI. 8** Upoređenje tvrdoće posle 1-slojnog i 6-slojnog zavarivanja čelika A508: (a) 1 sloj-3 prolaza i (b) 6 slojeva -21 prolaz



**Fig. 9** Predicted hardness distribution of 1.5%Ni steel: (a) 1 layer-3 pass welding and (b) 6 layer-21 pass welding

**SI. 9** Predviđena raspodela tvrdoće čelika 1.5%Ni: (a) 1 sloj-3 prolaza i (b) 6 slojeva-21 prolaza

**-Kraj 1. dela NASTAVAK U SLEDEĆEM BROJU**



## VESTI – NAJAVE

U pripremi su brojne aktivnosti DUZS-a za tekuću godinu.

U svetlu aktuelne situacije, svaka od njih će biti održana ukoliko okolnosti budu dozvoljavale.

U pripremi je seminar „Standard SPRS EN ISO 15614-1:2017, Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 1: Elektrolučno i gasno zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla" koji za proleće ove godine zajedno pripremaju DUZS - Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji i ISS - Institut za standardizaciju Srbije.

Verujemo da je tema interesantna i sa zadovoljstvom najavljujemo da će standard, koji je do sada bio na engleskom jeziku, biti preveden i da će time mnoge dileme oko prevoda i tumačenja biti otklonjene, čemu će svakako doprineti i našiiskusni predavači.



Za sredinu oktobra 2020.g. u Kladovu, planirano je održavanje Savetovanja sa međunarodnim učešćem „ZAVARIVANJE 2020“, skupa koji svake druge godine tradicionalno organizuje DUZS. Očekujemo radove iz različitih oblasti vezanih za zavarivanje i radujemo se ponovnom druženju i uspostavljanju novih prijateljstava.

Pozive za predstojeće skupove očekujte u narednom periodu. Članovi DUZS, kao i do sada, imaće beneficirane cene kotizacije za skupove u organizaciji našeg Društva.

Republičko takmičenje mladih zavarivača, gde DUZS učestvuje u ocenjivanju praktičnih uzoraka, održaće se 8. i 9. maja 2020. u Srednjoj stručnoj školi u Kragujevcu.



Nastavak na strani 47



Prof.dr Miroslav S. Miličević<sup>\*1</sup>, Dr Valentina M. Nejković<sup>\*2</sup>

# NOVA FORMULA ZA ODREĐIVANJE VREMENA HLAĐENJA $t_{8/5}$ SA OSVRTOM NA KVALITET ZAVARIVANJA NEW $t_{8/5}$ COOLING TIME FORMULA RELATING TO WELDING QUALITY

**Pregledni rad / Review paper**  
**UDK / UDC: 621.791.7 : 620.178**

**Rad primljen / Paper received:**  
Mart 2020.

**Ključne reči:** VF zavarivanje, tvrdoća, hemijski sastav, cev, struja, napon, kritično vreme hlađenja

## Rezime

Ovde će se dati pregled teoretskih i praktičnih rezultata kroz radove iz renomiranih časopisa iz oblasti zavarivanja čeličnih cevi. Izdvajaju se dve grupe istraživanja, jedna koja se bazira na primeni simulacionih paketa za modeliranje zavarivanja. Drugoj grupi pripada ovaj rad koji se pored teoretskih i egzaktnih izračunavanja, bavi opsežnim eksperimentalnim istraživanjima koja imaju karakter optimizacije parametara zavarivanja. Svi izloženi radovi biće ocenjivani preko ocene kvantitativnih i kvalitativnih rezultata dobijene finalne cevi i kompletnog procesa izrade.

## 1. UVOD

Prikaz rezultata ovog rada je moguć uz pomoć literature date u [1-23]. Navedenim referencama dat je opis i kretanje teoretskog istraživanja VF zavarivanja čeličnih cevi.

Radovi [24-31] se bave razvojem magnetnih koncentratora na bazi magnetodielektrika i simuliranjem njihovih primena korišćenjem paketa ELTA.

U radu [32] se autori bave prikazom numeričke analize VFZ cevi. Prvo se navode poznate jednačine a zatim i jednačine termodinamičkog ponašanja zavarivanja, bez citiranja odakle su jer se ne vidi njihovo izvorno izvođenje. Ove jednačine se navode radi prikaza simulacionog paketa ANSYS koji se zasniva na primeni poznate metode numeričke matematike koja se sreće pod imenom metoda konačnih razlika.

**Adresa autora / Author's address:**

<sup>\*1</sup>Visoka tehnička škola, Univerzitet u Beogradu

<sup>\*2</sup>Docent Elektronskog fakulteta u Nišu, Univerzitet u Nišu

**Keywords:** HF welding, hardness, chemical composition, pipe, current, voltage, critical cooling time

## Abstract

An overview of theoretical and practical results will be given here through papers from renowned magazines in the field of welding steel tubes. Two research groups are distinguished, one based on the application of welding modeling simulation packages. The second group belongs to this paper, which, in addition to theoretical and exact calculations, deals with extensive experimental studies that have the character of optimization of welding parameters. All the exhibited works will be evaluated through the evaluation of the quantitative and qualitative results of the final pipe and the complete design process.

Radovi [33-35] obrađuju induktivno zavarivanje cevi većeg prečnika bez ocene energetske efikasnosti, a bavi se ocenom kvaliteta zavarenog spoja čelične cevi kroz prikaz promene i ponašanja hemijskog sastava elemenata materijala cevi i tvrdoće. Pri estimaciji se koristi potrebna moderna instrumentacija za merenje i primena simulacionog softvera tipa HKL Chanel 5.

U radu [36] je data analiza VF zavarivanja, gde se posle navođenja osnovnih jednačina prelazi na prikaz primene FEM analize i 3D paketa za simulaciju tipa COMSOL 4.2. Daje se akcenat pri analizi na V petlju i prikaz relevantnih promena parametara zavarivanja. U referencama toga rada daje se osvrt na citiranu literaturu iz ovog rada i to [33,35].

Kroz rad [37] autori daju analizu zavarivanja cevi primenom paketa i praktično merenjem na realnom modelu. Upoređivanjem razlika daju izvesne



zaključke za koje smatraju da daju prilog primenama. Treba istaći da se merenje temperature u zoni šavaa cevi izvodi pomoću termoparova.

U referenci [2] ovog rada se daje pregled metoda za simulaciju VF zavarivanja i kompanija koje se specijalizovano bave izradom softvera za simulaciju kao što su ANSYS; SYSWELD; Cosmos Corp., Vector, Ansoft itd. Uglavnom se koristi 3D simulacija.

Autori rada su se bavili teoretskim istraživanjima sa velikim naglaskom na primenjena istraživanja, što je ilustrovano u referencama [38-44]. Pri istraživanjima autori su koristili numerička izračunavanja koja su svojim aproksimacijama poboljšali jednodimenziono predstavljanje zavarivanja, pri čemu je kao korekciona metoda bila uvek prisutna eksperimentalna metoda zavarivanja u normalnom procesu zavarivanja.

## 2. TEORIJSKI MODEL VF ZAVARIVANJA

U bogatoj literaturi koja je prilog ovog rada [1-4] izlaže se teorija VFIZ kroz 2D i 3D modele što je bilo baza da se stvore mnogi paketi za simulaciju. Ali, zbog nemogućnosti posedovanja i nabavke ovih paketa, autori rada su se oslonili na jednodimezionalno proračunavanje koristeći literaturu [5-7]. Ovom izračunavanju autori dodaju i integrišu rezultate višegodišnjih primenjenih istraživanja i svojih publikovanih radova. Na bazi toga su izrađeni programi u jeziku C++, gde se

formiranjem višestrukih programskih petlji i korišćenjem površinske i dubinske metode grejanja i zavarivanja, dobija mogućnost izračunavanja svih relevantnih veličina koje predstavljaju VF zavarivanje.

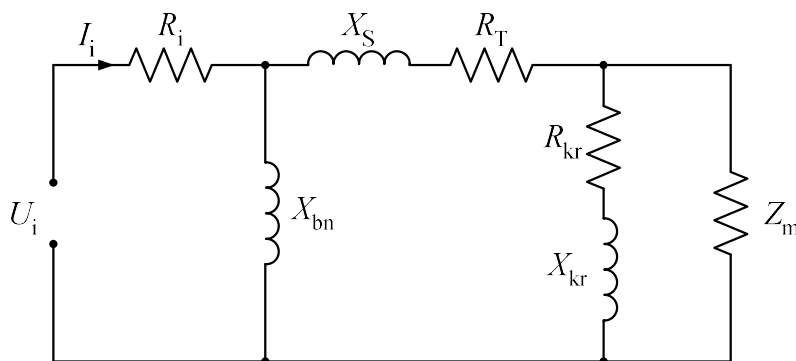
Induktivno zavarivanje cevi može se svesti na slučaj indukcije na polubeskonačnu sredinu. Dejstvo talasa se dešava iz sredine koja je dielektrična u provodnu u kojoj se zanemaruju dielektrične struje, te se rešavanjem Maksvelovih jednačina prema [1-8], dobijaju izrazi za magnetno polje H, električno polje E i snagu S redom u obliku:

$$\underline{H} = \underline{H}_0 e^{\frac{z}{\Delta}} \cdot e^{-j\frac{z}{\Delta}}, \quad (1)$$

$$\underline{E} = \frac{\sqrt{2}}{\gamma\Delta} \underline{H}_0 e^{\frac{z}{\Delta}} \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{4} - \frac{z}{\Delta}\right)} \quad i \quad (2)$$

$$\underline{S} = \frac{\sqrt{2}}{2\gamma\Delta} H_{0m}^2 e^{-\frac{2z}{\Delta}} \left( \cos \frac{\pi}{4} + j \sin \frac{\pi}{4} \right). \quad (3)$$

Na osnovu citirane literature, a za slučaj induktivnog zavarivanja cevi uz upotrebu spoljašnjeg induktora, ima se zamenska šema na sl.1.



Sl.1 Ekvivalentna šema zavarivanja

Razvijanjem je dobijen algoritam za izračunavanje svih potrebnih veličina kod VF induktivnog zavarivanja čeličnih cevi. Praktično izračunavanje će se obavljati za konkretne primere zavarivanja cevi, pri čemu će se poštovati tehnološke preporuke Wean Uniteda (PENA USA), Damirona iz Francuske i Elphiaca iz Belgije. Koristiće se rezultati iz publikovanih radova autora ovog rada [38-44]. Rezultati će se upoređivati sa onim koji su dobijeni u radovima koji koriste simulacione pakete.

## 3. REZULTATI

### 3.1 Komparativna analiza

U radovima [24-31] se opisuje primena magnetodielektrika za termičko grejanje i zavarivanje primenom simulacionih paketa za modeliranje ELTA. Rezultati dobijeni iz simulacija se ne upoređuju sa praktičnim primenama. Kod obrade VF zavarivanja čeličnih cevi ne navodi se ni kolika je ušteda i ne koristi se ni jedan kriterijum za ocenu energetske efikasnosti kao što to rade autori ovog rada u [38,39,47]. Pokušavaju se čak



pozajmiti rezultati rada autora iz [38,39] time što ih se prijavljuje svojim patentom u nekoliko zemalja. Firma Fluxtrol je razvila za VF zavarivanje magnetodielektrik B koji je u praksi pokazao poražavajuće rezultate kako sa aspekta energetske efikasnosti tako sa aspekta kvaliteta dobijene zavarene čelične cevi. Autori ovog rada, posle višegodišnjih istraživanja, su došli na ideju da iskoriste za zavarivanje MD materijal koji je predviđen da radi na srednjim frekvencijama, pri tome žrtvujući njegovu dužinu trajanja, ali su tada dobili veliku energetsku uštedu i kvalitetan spoj što je potvrđeno publikovanim radom u časopisu visokog renomea [44].

U radu [32] se opisuje VF zavarivanje kroz prikaz teorije radi uvođenja u primenu gotovog simulacionog paketa ANSYS. Vršiti se simulacija zavarivanja čelične cevi prečnika 219 mm i debljine zida 8,94mm, gde se koristi impeder dužine čak 800 mm bez navođenja vrste magnetnog koncentratora. Pošto su prikazani numerički podaci nedovoljno ubedljivi, autori su pristupili preciznom izračunavanju. Gospodin Han nije naveo koja je brzina zavarivanja, autori ovog rada su prepostavili minimalno kritičnu brzinu od 15m/min ispod koje ne bi trebalo da se ide iz više razloga. Stvarna snaga u ivicama trake koja se zavaruje iznosi 321 kW uz struju koje teče V petljom od 3914 A. Zaključuje se da je struja veća od struje dobijene simulacijom od 1800 A. Snaga koja se odaje induktoru iznosi 591 kW uz struju

koja teče kroz induktor od 8106 A i napon na induktoru od 2611 V.

Simulacioni paket nije dao korektno rezultate, pod uslovom da su se koristili ulazni parametri i preporuke iz analiziranog rada, što potvrđuje koeficijent iskorišćenja snage od 0,54. Rezultati su dobijeni na osnovu opisanog algoritma i preporuka kompanije Wean United iz USA, koja ima licencirane proizvodne tehnološke linije za izradu cevi.

Obavljaju se praćenja tvrdoće u zoni spoja, i nešto van, a ne konstatuje zašto dolazi do promene. Pri prikazivanju tvrdoće gosp. Han je citirao rad [44] u jednom od kineskih časopisa, koji je originalan rad autora ovog rada, ali ga nije citirao u radu publikovanoma u WJ USA iz njemu poznatih razloga. Šta više i to nije do kraja uspelo budući da su autori u radu [40] prikazali promenu u delu spoja cevi, ali i promene po čitavom preseku čelične cevi. Radi ilustracije redom se daju prikazi praktično merenih tvrdoća po celom preseku u tabelama  $T_1, T_2$  i  $T_3$ .

Naime kod hladnog deformisanja čelične trake u cev ili profil, usled termičkog tretmana i kao što se pokazalo uticaja elektromagnetnog polja induktora i koncentratora polja dolazi do promene tvrdoće. Iz ovih razloga u ovom radu će se obaviti merenje tvrdoće po metodi Vikersa [HV].

U tabeli  $T_1$  je prikazan rezultat merenja tvrdoće osnovne čelične trake, pre ulaska u zavarivanje. Srednja vrednost tvrdoće, izmerene na više mesta na traci, iznosi 211 HV.

Broj merenja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tvrdoća [HV]	215	218	215	214	185	217	216	223	185	225
Srednja vrednost [HV]: 211										

**Tabela  $T_1$ :** Tvrdoće osnovne čelične trake

Tabela  $T_2$  prikazuje merene podatke o tvrdoći cevi van spoja čelične cevi zavarene feritnim koncentratorom, merene po obimu cevi, gde je srednja vrednost 270 HV. Tvrdoća cevi zavarene istim koncentratorom, merena duž spoja, data je u

Broj merenja	1	2	3	4	5
Tvrdoća [HV]	273	285	245	276	270
Srednja vrednost [HV]: 270					

**Tabela  $T_2$ :** Tvrdoća cevi van spoja zavarene feritnim koncentratorom polja

Broj merenja	1	2	3	4	5
Tvrdoća [HV]	274	385	390	350	375
Srednja vrednost [HV]: 355					

**Tabela  $T_3$ :** Tvrdoća spoja cevi zavarene feritnim koncentratorom polja

tabeli  $T_3$ , gde je srednja vrednost 355 HV. Primećuje se u spoju i van spoja da je tvrdoća povećana znatno usled termičkog tretmana i izlaganja elektromagnetnom dejstvu induktora generatora.



Zaključuje se da se tvrdoća u spoju i van spoja čelične cevi usled visokofrekventnog induktivnog zavarivanja menja u odnosu na tvrdoću ulazne čelične trake, što autori u radu [32] nisu utvrdili ni dovoljno istražili. U istom radu se simulira pomeranje položaja impedera, što je nepotrebno budući da proizvođač generatora daje optimalne podatke za podešavanje. Prikazu metalografskih snimaka nedostaje snimak materijala osnovne trake ili bar hemijski sastav trake što je uobičajeno. Nema analize energetske efikasnosti što je u današnje vreme glavni uslov.

U radovima [33-35] se daje prikaz istraživanja visokofrekventnog induktivnog zavarivanja, vrši se identifikacija defekata i daje predlog za termičko tretiranje radi poboljšanja kvaliteta cevi. Autori rada žele prikazati da istražuju na praktičnom generatoru za zavarivanje, a navode izvor iz 1980 godine. Kao glavni rezultat pomenutih radova navodi se da se prilikom VF zavarivanja menja hemijski sastav u spoju cevi a samim tim i struktura materijala, ali pri tome ne citiraju rad autora ovog rada [44] kojim se prikazuje ovaj pronalazak čime je steknuto pravo prvenstva, jer je rad publikovan 2006. godine. U grupi radova se ne poklanja pažnja teoriji zavarivanja iako se navodi ispitivanje na proizvodnji čelične cevi prečnika 0,5m i debljine zida 10mm. Radi celovitosti, autori ovog rada su izvršili projektovanje ovog zavarivanja.

Autori ovog rada su istraživali impeder sa magnetodielektrikom tipa B za visokofrekventno induktivno zavarivanje cevi, koji je baš razvijen za ovu vrstu zavarivanja. Rezultati hemijske analize dobijeni su na profesionalnom optičkom kvantometru ARL 513. U preseku cevi van spoja, je identifikovan ugljenik u iznosu od 0,4416%.

Time su autori ovog rada pronašli da neki koncentratori remete hemijsku strukturu. Ovo se dokazuje i po istraživanjima Šumana [15] gde se navodi da se sa preko 0,35% ugljenika u čeličnom materijalu javljaju krte strukture.

Detektovani nedostaci u spoju cevi se navodno pokušavaju novom metodom termički tretirati radi otklanjanja nedostataka. Autori spornih radova pokušavaju da uvođenjem sekundarne rekristalizacije definišu jedan nov postupak što je nažalost netačno jer to postoji u pokazanoj teoriji i već se dugo koristi u praksi. Davno se zna da se zagrevanjem iznad temperature rekristalizacije struktura deformisanog metala preobražava u strukturu rekristalizacije iza koje se dobija ravnoosnost zrna i relativna ujednačenost njihovih veličina. Ovde se ne istražuje uticaj brzine čelične cevi pri proizvodnji na strukturu materijala iako je to poznato u brojnoj i ovde predloženoj literaturi.

Pored pobrojanih uzroka za nastanak defekata, bitna je i brzina deformacije kod formiranja čelične cevi, što se ignoriše ili nije poznato.

U radu [36] analizira se indukciono grejanje u smislu ostvarivanja VF zavarivanja. Daje se opis preko citiranih radova iz oblasti teorije i eksperimentalnih istraživanja, gde se ostvaruje veza sa radovima autora [33-35]. Opisuje se značaj frekvencije, zona toplotnog tretiranja, V petlja zavarivanja, feritni impeder i njegova pozicija. Opisuje se zavarivanje kroz poznate jednačine iako se usvaja gotov sistem za simulaciju VF zavarivanja čeličnih cevi COMSOL 4.2. Rad pokušava da obradi jedan praktičan primer zavarivanja cevi, ali se ne navode svi relevantni ulazni podaci koji su potrebni za izračunavanje svih električnih i termičkih veličina. Svaki primer iz rada, se mora precizno opisati kako bi se na svakom drugom mestu mogao proveriti i ponoviti taj eksperiment. Pošto autori ne navode sve ulazne podatke a citiraju radove [33-35], to znači da rade projektovanje zavarivanja na cevi prečnika 500 mm. Dobili su parametre za struju od 1000 A i napon 500V, radeći navodno na frekvenciji od 200 do 500 kHz. Izbor dimenzije cevi i citirana literatura ukazuju da se radi o primeru koga su projektovali i izračunali autori ovog rada. Ako se usvoji minimalna kritična brzina za ovu cev dobija se struja u ivicama trake za navedenu cev u iznosu od 2854 A, odnosno struja kroz induktor 3605 A, što je znatno više od prikazanih 1000 A. Navode da su kao bazni materijal koristili čeličnu traku sa 10% ugljenika, što je netačno.

Dalje će se prostudirati rad [37] u kome se prikazuje indukciono grejanje kod uzdužnog zavarivanja cevi. Prikazuje se model eksperimenta zavarivanja čelične cevi koja je fiksirana budući da je stacionarna zbog priključenih termospregova radi merenja temperature. Ne navodi se vrsta magnetnog koncentratora za impeder, što navodi da autori ovog rada misle da je to irelevantno. Navode se neki numerički podaci, ali nema glavnog podatka kog je prečnika cev koja se zavaruje, i koje debljine zida, te ispada da je to nebitno. Ali, nažalost to je netačno, pa gde je Zakon o održanju energije. Netačno je prikazana distribucija temperature bez impedera posle proteklog vremena od 4s. Ovde u spornom radu neuspeo je brzi pokušaj spajanja nepotpunih eksperimentalnih podataka zavarivanja i onih sa modeliranjem. Pokušaj da se prikažu rezultata promena u zavarivanju ako se pomera induktor, impeder i ostalo nisu novi jer su poznati u literaturi a posebno u brojnim radovima [38-44].



### 3.2 Izvođenje nove analitičke zavisnosti

Bitnu ulogu kod termičkog tretiranja čeličnih materijala imaju veličine kao što su vreme hlađenja  $t_{8,5}$ , tvrdoća HV i  $CE_{IIW}$  ekvivalent ugljenika. Vreme  $t_{8,5}$  predstavlja kritično vreme pri hlađenju čelika od temperature  $800^{\circ}\text{C}$  do  $500^{\circ}\text{C}$ . Tvrdoća se meri tvrdomerom ali od njenog iznosa zavise bitne mehaničke osobine. Hemijski sastav, izražen preko  $CE_{IIW}$ , nazvan ekvivalentom ugljenika ima uzročno posledične veze sa prethodnim veličinama.

Na osnovu [2-4], poznata je relacija za izračunavanje ekvivalenta ugljenika:

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (4)$$

Za određivanje vremena hlađenja  $t_{8,5}$  postoji veoma iscrpna eksperimentalna dilatometrijska metoda [15], koja za različite vrednosti C i tvrdoće čelika određuje ovo vreme.

Ovde će se u radu dati jedan numerički postupak za određivanje zavisnosti  $f(t_{8,5}, HV, CE_{IIW})$ . Pošto je gotovo nemoguće eksperimentisati sa mnogo vrsta čelika koji imaju različite vrednosti  $t_{8,5}$ , to će se iskoristiti vrednosti termalnog simulatora iz [45,46], gde se razmatraju vrednosti  $t_{8,5}$  od 2,4,6,8 i 10s.

Za određivanje analitičke zavisnosti tvrdoće HV po Vickersu u funkciji  $CE_{IIW}$  koristiće se iskustva iz rada [46]. Sa dovoljnom tačnošću se može usvojiti polinom prvog stepena tako da se dobija linearna zavisnost. Imaju se sledeće aproksimativne relacije:

$$t_{8,5} = 2s; H_{HV} = 830CE_{IIW} + 100 \quad (5)$$

$$t_{8,5} = 4s; H_{HV} = 760CE_{IIW} + 100 \quad (6)$$

$$t_{8,5} = 6s; H_{HV} = 740CE_{IIW} + 120 \quad (7)$$

$$t_{8,5} = 8s; H_{HV} = 760CE_{IIW} + 100 \quad (8)$$

$$t_{8,5} = 10s; H_{HV} = 620CE_{IIW} + 110. \quad (9)$$

U opštem slučaju se može uspostaviti relacija

$$H_{HV} = a CE_{IIW} + b, \quad (10)$$

gde se do sada parametar  $t_{8,5}$  uzimao kao nezavisna promenljiva funkcija a i b, te se dobija

$$a = -27t_{8,5} + 890 \quad (11)$$

$$b = 110, \quad (12)$$

što posle zamena daje

$$H_{HV} = (-27t_{8,5} + 890)CE_{IIW} + 110, \quad (13)$$

čime je uspostavljena formula razmatranih triju veličina  $H_{HV}, t_{8,5}$  i  $CE_{IIW}$ .

Jednakost (25) se može iskoristiti za izračunavanje  $t_{8,5}$ , te se ima

$$t_{8,5} = \frac{890CE_{IIW} + 110 - H_{HV}}{27CE_{IIW}} \quad (14)$$

Ekvivalent ugljenika se dobija hemijskom analizom na optičkom kvantomeru a tvrdoća pomoću tvrdomera, gde se iz (14) prosto izračunava  $t_{8,5}$ .

**Primer 1.** Odrediti vreme hlađenja i kritičnu brzinu hlađenja za zavarenu čeličnu cev feritnim koncentradorom polja.

Na osnovu hemijskog sastava je utvrđena vrednost za  $CE_{IIW}$  u iznosu od 0,3416 i tvrdoća od 340 HV. Smenom poznatih u (14) se dobija

$$t_{8,5} = 8 s, \quad (15)$$

odakle se može izračunati i kritična brzina hlađenja

$$W = \frac{300}{8} = 37,5 \text{ }^{\circ}\text{C/s} \quad (16)$$

**Primer 2** Za čeličnu cev koja je zavarena pomoću magnetodielektričnog impedera Fluxtrol B, čiji je hemijski sastav:

a). Hemijski sastav u spoju cevi Fe-0,2504C-0,02747Si-0,0022S-0,00123P-0,56039Mn-0,02118Ni-0,01551Cr-0,01814Nb-0,0451Al-0,03358Mo-0,01551V-0,03886Cu wt%.

b). Hemijski sastav van spoja cevi Fe-0,4416C-0,04553Si-0,00034S-0,00183P-0,54769Mn-0,0196Ni-0,01751Cr-0,01223Nb-0,05871Al-0,03208Mo-0,01248V-0,03594Cu wt%., odrediti tvrdoću po Vickersu.

Smenom poznatih u relaciji (13) dobija se vrednost tvrdoće u spoju od  $H_{HV}=352$  HV što je na nivou vrednosti izmerene i prikazane u tabeli T<sub>4</sub>. Ali vrednost tvrdoće po celom preseku cevi iznosi, posle smene poznatih u (13), 481 HV. Ova izračunata vrednost odstupa značajno u odnosu na vrednost iz tabele T<sub>3</sub> što proizvod čini vanklasnim za upotrebu. Do ove degradacije dolazi zato što je magnetodielektrik B, iako predviđen da zavaruje na visokim frekvencijama, loše projektovan a modeliranjem se nije uspelo to utvrditi. Zato je ovde uveden novi numerički postupak utvrdio da dolazi do povišene tvrdoće koja cev čini nekvalitetnom. Ovu tvrdnju su autori ovog rada potvrdili i prilikom primenjenih istraživanja tako što su vršili potpuno mehaničko spljoštavanje cevi uzdužno po spoju. Dobijen je rezultat, spoj se nije deformisao a cev naspram spoja je vidno mehanički pokazala prsline. Ovim se potvrđuje korisnost izvedenih numeričkih formula koje povezuju vreme hlađenja  $t_{8,5}$ , tvrdoću  $H_{HV}$  i ekvivalent  $CE_{IIW}$ .



#### 4. DISKUSIJA

Ovaj rad se bazira na iscrpnoj i plodnoj literaturi [1-23] i primenjenim višegodišnjim istraživanjima autora ovog rada čiji je jedan deo prikazan u referencama [38-44] ovog rada. Analizom radova [24-37], koji su odabrani kao podesni sa aspekta teorije i primenjenih istraživanja, došlo se do sledećih zaključaka. Radovi uglavnom započinju iznošenjem Maksvelovih jednačina, koje se dalje ne razvijaju niti rešavaju. Ne daje se nikakav numerički doprinos već se iznosi, a dosta često i bez citiranja. Nakon toga se navode gotovi komercijalni paketi za simulaciju numeričkih podataka VF zavarivanja. Nepotrebno je i suviše navoditi teoriju ako se usvaja komercijalni paket za simulaciju i modeliranje zavarivanja.

Ne pridaje se pažnja energetske efikasnosti zavarivanja koja je danas veoma bitna, niti se primenjuje ni jedna metoda za ocenu efikasnosti. Pored nedostataka kvantitativne prirode studirani radovi ne poklanjaju pažnju ni kvalitativnom pristupu analize gotovih proizvoda.

Primećeno je da neki od autora analiziranih radova pozajmljuju rezultate drugih autora a pri tome ih ne citiraju. Tako je utvrđeno da je jedan autor rezultate autora ovog rada uvrstio u svoju doktorsku disertaciju, dok je drugi slobodno patentirao i prisvojio rezultate primenjenih istraživanja koji su zaštićeni ranije publikovanim radom u renomiranom svetskom časopisu.

Nema praćenja kvaliteta i hemijskog sastava čelične trake, tvrdoće i tehnologije deformacija čeličnih cevi. Finalna cev se ne ispituje po standardima u većini radova, već se to čini partikularno što stvara često nedoumice i pogrešne zaključke. Rezultati dobijeni simulacijama su često kontradiktorni onim koje su autori ovog rada dobili preciznim numeričkim izračunavanjima i onim iz redovne proizvodnje koje su precizno beležili.

Za razliku od proučavanih radova, autori ovog rada su najpre ovladali zavarivanjem gde se ostvaruje visoka energetska efikasnost koja je potvrđena brojnim relevantnim kriterijumima za ocenu. Ovde nije pokazana samo ušteda energije već i veza sa kasnijim kvalitetom spoja cele čelične cevi nakon kompletnog postupka zavarivanja.

Naučnim istraživanjem kroz praktične primene autori su došli do zaključka ako se ne zavaruje efikasno, tada ona energija koja se rasipa i uz dejstvo elektromagnetnog polja čine i stvara velike defekte u celoj cevi.

#### 5. ZAKLJUČAK

Rad izlaže nove pristupe i inovacije koje su istraživanjem pronašli autori ovog rada. Velike kompanije proizvođači uređaja za VF zavarivanje i druge vidove termičke obrade godinama skupljaju dragocene podatke iz prakse, ali to sve postalo je poslovna tajna. Svim tim saznanjima onemogućen je pristup istraživačima sa fakulteta, instituta i onih koji se bave naučnim radom.

Ovaj rad želi da ukaže na ove činjenice stručnoj i naučnoj javnosti, sa predlogom premošćavanja velikog jaza između teoretskih i praktičnih saznanja i invencija. To zato što su autori ovog rada imali sreću da se dugo vremena bave primenjenim istraživanjem u procesu proizvodnog procesa izrade i zavarivanja čeličnih cevi. Uz praktičan rad, proučavana je i teorija iz ove oblasti.

Rad je istražio kako se vrši kvantitativna i kvalitativna analiza. Istraživanjem je u jednom radu primećeno navođenje procentualnog učešća ugljenika u čeliku od 10% što je apsurd, a tiče se brojnih autora rada i recenzenata citiranog časopisa. Šta više, i da je štamparska greška, od 1% na 10%, što sumnjamo, i vrednost C od 1wt% je pokazatelj da se ne vlada ovom oblašću i teorijski i praktično.

Većina istraživanih radova samo razmatra spoj, misleći da će se osnovni materijal strukturno preslikati na čitavu čeličnu cev. Zato je u ovom radu pokazano do kakvih nedostataka može doći u celom preseku cevi.

Zato se rezultati svih citiranih radova u ovom radu, kao i rezultati ovog rada stavljaju na uvid i ocenu svetskoj stručnoj i naučnoj javnosti.

#### ZAHVALNOST

Zahvaljujemo stručnjacima laboratorije MIN Holdinga iz Niša koji su nam omogućili hemijsku analizu uzoraka optičkim kvantometrom. Posebnu zahvalnost dugujemo editoru časopisa Termotehnika koji je doprineo da ovaj rad bude prikazan naučnoj javnosti u ovako uglednom časopisu koji gleda unapred objavljujući najnovije rezultate iz svih vidova zavarivanja.



## LITERATURA

- [1] Simpson P.G., Induction Heating - Coil and System Design, Mc Graw Hill, 1960, New York, USA, p.304
- [2] Rudnev V., Lovelless D., Cook R., Black M., Handbook of Induction Heating, Marcel Dekker Inc., New York, 2003, p.800
- [3] Welding Handbook, Ninth Edition, Volume 4, Materials and Applications, Part 1, American Welding Society, Annette O'Brien - Editor, Miami, FL, USA, 2011, p.860
- [4] Sindo Kou, Welding Metallurgy, Second Edition, Wiley-Interscience, 2003, Hoboken, New Jersey, USA, p.466
- [5] N.A. Shamov, V.I. Lunin and N.V. Ivanov: High frequency metal welding, (Leningrad, Masinstroenie, 1997) p.p.3-198
- [6] D. Gulaev: Improvements of production technologies and quality of electrically welded tubes, (Kiev, Tehnika, 1984) p.p. 4-116
- [7] N.P. Gluhanov and V.N. Bogdanov: Metal welding with high frequency heating, (Leningrad, Mashgiz, 1962) p.p. 5-175
- [8] Wright J., Principles of high Frequency Induction Tube Welding, Electronic
- [9] Rudnev I.V., Induction heat treatment, Steel Heat Treatment Handbook, New York, Basel, Hong Kong, 1997
- [10] Hubbard C., "High frequency contact and induction welding of tube", FMA Journal of Fabricator, Issue January/February 1980
- [11] Electronic Heating Equipment, Inc., Impeders, Work Coils, Ferrite, Casing, 1998 Catalog applications Guide, Buckley – WA
- [12] Choong/Mzeoung Kim, POSCO, Zong-Seong Kim, Hong Ik University; Korea, Tube and Pipe Technology, January/February, 2001
- [13] Suzuki S., Takamme T., " The Formation Mechanism of White Line Welded Joints of ERW Steel Pipes", Tetsu to Hagane, Vol.40, No 10, p.p.153-159, 1984
- [14] K.Mitani, K.H. Shibuya: Impeder: How its innovation and design impacts the welding process. Proc. 8 Annual World Tube Congress ,Chicago, Illinois, 1992 p.p.25-33 Heating Equipment, Inc., Sumner, 1997
- [15] H. Schuman: Metallography, Leipzig, VEB Deutcher Verlag fur Grunstoffindustrie (1989)
- [16] Cook R.L., Lovelless D.L., Rudnev V.I., Load Matching in Modern Induction Heat Treating, Industrial Heating, Sept.1995
- [17] Lovelless D.L., Cook R.L., Rudnev V.I., Considering Nature and Parameters of Power Supplies for Efficient Induction Heat Treating, Industrial Heating, June 1995
- [18] Fluxtrol Manufacturing, Inc., MI-USA, Magnetic Flux Concentrators for High Frequency Induction Heating, MI-USA, 1996
- [19] Ruffini S.R., Nemkov S.V., Materials for Effective Magnetic Flux Control and Concentration in Induction Heating Processes, Process Controls Instrumentation, November, 1996
- [20] Ruffini S.R., Ruffini T.R., Nemkov S.V., Advanced Design of Induction, Industrial Heating, November, 1998
- [21] Ruffini R.S., Nemkov V.S., Magnetic field control and concentration induction heating coils, Centre for Induction Technology, Troy, Michigan
- [22] Fluxtrol Manufacturing, Flux Field Concentrators Solve Induction Heating Problems, Modern Applications News, Avr.-1993
- [23] Ruffini S.R., Ruffini T.R., Nemkov S.V., Advanced Design of Induction, Industrial Heating, November, 1998
- [24] 1.Ruffini R.S., Ruffini P.T., Nemkov V.S., Goldstein R.S., Computer Simulation for Unduction Heat Treating of Automotive Parts, Global Power Train Congress, 1998, Detroit, Mi-USA s
- [25] V.Nemkov, R.Goldstein, J.Jackowski, N.Vyshinskaya, C.Yakey, Temperature prediction and thermal management for composite magnetic controllers of induction coils, Fluxtrol Inc., Michigan 48326, (2008), USA
- [26] Nemkov V., Ruffini R., Madeira R., Vyshinskaya N., Magnetic Flux Control in Induction Heat Treating. (2009), Proc. ASM Int. Conference, Indianapolis, USA
- [27] Ruffini R.T., Nemkov V.S., Goldstein R.C., Magnetic Flux Controllers-New Materials, New Opportunities, ASTRA 2003, November 3-6, 2003, Hyderabad, India
- [28] Ruffini R.T., Nemkov V.S., Vyshinskaya N., New Magnetodielectric Materials for Magnetic Flux Control, Heavy Wall Pipe Seam Annealing, HES 2004, MI, USA



- [29] V.Nemkov, Goldstein R., Bukanin V., Optimal Design of Internal Coils, Centre for Induction Technology, Inc. MI 48326, USA
- [30] Nemkov V., Magnetic flux guide for continuous high frequency welding of closed profiles (2008), Int.Patent.No. PCT-US 2008/007390
- [31] S.V.Nemkov, Tube Welding with Fluxtrol Magnetic Materials, Tube and Pipe Show, Dusseldorf, April 2008
- [32] Han Y., Yu E.L., Numerical Analysis of High-Frequency Induction Welded Pipe, Welding Journal, Vol.91, October 2012, p.270-277
- [33] Yan P.,Gunger O.E.,Thibaux P.,Liebeherr M.,Bahdeshia H.K.D.B., Tackling the Toughness of Steel Pipes Produced by High Frequency Induction Welding and Heat-Treatment, Materials Science and Engineering:A, Vol.528, Iss.29-30, 15 Nov. 2011, p.8492-8499
- [34] Yan P.,Gunger O.E.,Thibaux P.,Bahdeshia H.K.D.B., Induction welding and heat treatment of steel pipes:evolution of crystallographic texture determinantal to toughness, Science and technology of welding and joining, 2010, vol.15, no.2, p.137-141
- [35] Yan P.,Gunger O.E.,Thibaux P.,Bahdeshia H.K.D.B., Crystallographic texture of induction welded and heat treated pipeline steel, Advanced Materials research, Vols 89-91, 2010 p.651-656
- [36] .Iatcheva I.,Gigov G., Kunov G., Stancheva R., Analysis of Induction Heating System for High Frequency Welding, Facta Universitatis, Ser.Elec.Energ.Vol.25, No 3, Dec.2012, p.183-191
- [37] Spahiu A., Experimental Study of the Induction Heating Manufacturing of Metallic Tube by Longitudinal Welding process, U.P.D. Sci.Bul.Series C, Vol.69, No 2, 2007, p.37-48
- [38] Milićević M., Milićević V., Optimisation of energetic parameters and quality HF inductive welding steel pipei, 11th International Symposium POWER ELECTRONICS Ee2001 Novi Sad, Serbia, 31.10.-02-11-2001, Novi Sad
- [39] M. Milicevic and V. Milicevic: Impeder for HF Inductive Welding of Steel Tubes, IEE Proceedings, Science, Measurement and Technology, vol.149. No.3, May 2002, p.p. 113-116
- [40] Milićević M.: Possible Defects of the High Frequency Inductive Welding of the Steel Tubes by Applying a Ferrite Impeder, 39<sup>th</sup> *International October Conference on Mining and Metallurgy*, Soko Banja, Serbia & Montenegro, 2007, pp.318-333
- [41] Milićević M. and Milićević T.: New Solution for Improvement of Parameters and Quality of HF Inductive Welding of Steel Tubes, 37<sup>th</sup> *International October Conference on Mining and Metallurgy*, Bor, Serbia & Montenegro, 2005, pp.466-475
- [42] M. Milicevic, V. Milicevic and T. Milicevic: MDM Impeder for Improvement of Parameters and Quality of HF Inductive Welding, 36<sup>th</sup> *International October Conference on Mining and Metalurgy* (Bor, Serbia and Montenegro)(2004)p.p. 531-537
- [43] Milićević M., The Application of a New Formula of Nakaoka Coefficient in HF Inductive Welding, *Journal of Mechanical Engineering* 56 (2010), 7-8, 483-488, UDC 621.791.7.004.942
- [44] M. Milicevic and Z. Radakovic: Quality Improvement of Steel Pipes by Seam Welding with New Magneto-Dielectric Impeder, *Materials Transactions*, Vol.47 No.06(2006), The Japan Institute of Metals, Japan, p.p. 1464-1468
- [45] Nolan D., Sterjovski Z. and Dunne D., Modelling of HAZ Hardness in C-Mn Pipeline Steels Subjected to in-Service Welding Procedures, IIW Document No. IX-2165-05, Wolongong, Welding Technology Institute, 2005
- [46] Nolan D., Bruce W., Grace P., Dunne D., Weldability issues for in-service pipeline welding, Proc. of the International Conference on Pipeline reairs and In-Service Welding, Wolongong, 2003, Published by the Welding Technology Institute of Australia, 2003



## Sertifikaciono telo za sertifikaciju zavarivačkog osoblja Srbije

Nakon mnogo godina dogovaranja o potrebi da u Srbiji imamo svoje telo za sertifikaciju zavarivačkog osoblja, konačno smo ostvarili cilj. **Dakle i zvanično, formalno smo u mogućnosti da izdajemo sertifikate pod okriljem Međunarodnog instituta za zavarivanje, IIW.**

S obzirom da većina naših čitalaca, a i članova nije sasvim upoznata sa tim šta to praktično znači, trebalo bi da za početak objasnimo šta je cilj i šta se time dobija.

**Sertifikacija** predstavlja pravi dokaz da ste postali „maher u svojoj disciplini“, tj. da ste pored znanja koje je verifikovano diplomom (koja važi doživotno) i radili nešto valjano u nekom periodu i da ste u potpunosti time ovladali. Ako ste radili WPS-ove, učestvovali u pripremi WPQR-ova, bili u nadzoru pri zavarivanju nekih zavarenih konstrukcija ili proizvoda, osvežavali svoja znanja na seminarima, sačinjavali izveštaje o upotrebljivosti zavarenih delova i slično, onda ste Vi ta osoba koja treba da se sertifikuje.

**Zašto je to važno?** Objasnimo to primerom, imate diplomu ali sticajem okolnosti desetak godina radite u kaficu, a odjednom se javila potreba da ponovo budete u zavarivanju. Izvesno je da ni znanja koja ste imali po sticanju diplome neće biti ista, a iskustvo koje je neophodno za većinu poslova ni ne postoji i samim tim se očekuju problemi pri radu. Dakle, sertifikacija je kao u sportu održavanje kondicije.

Neke druge primedbe poput onih da „to niko ne traži“, svakako nisu opravdane jer možda će to sutra biti neminovni zahtev.

Često smo upoređivali završetak kurseva sa sticanjem vozačke dozvole: to što imate diplomu, odn. dozvolu, ne znači i da ste dobar vozač. A sertifikacija upravo dokazuje da ste i to postigli u određenom, Vašem segmentu.

I još jedan, ne manje važan detalj proistekao iz razgovora sa našim članovima. Bilo je opaski kako je to još jedan namet pored onih koji već postoje, i slično. Sigurno ćete biti razuvereni kada Vas obavestimo da će iznos, odnosno Vaš trošak za sertifikaciju, gledano godišnje, iznositi stotinak eura.

**Verujući da ste sada shvatili i razrešili dileme, dozvolite da Vas uputimo u proces sertifikacije osoblja za zavarivanje**

**Razlika između ispitivanja, kontrolisanja i provere**

**Ispitivanje** je utvrđivanje jedne ili više karakteristika objekata ocenjivanja usaglašenosti, u skladu sa procedurom.

**Kontrolisanje** je pregledanje projekta proizvoda, samog proizvoda, procesa ili ugradnje i utvrđivanje njihove usaglašenosti sa specifičnim zahtevima ili, na osnovu profesionalnog mišljenja, sa opštim zahtevima.

**Provera** je sistematičan, nezavisan i dokumentovan proces za dobijanje dokaza provere i njegovo objektivno vrednovanje da bi se odredio nivo do kojeg su ispunjeni specificirani zahtevi.

**SERTIFIKACIJA** predstavlja atestiranje koje je izvršila treća strana u vezi sa proizvodima, procesima, sistemima ili osobama.

Sertifikacijom se dokazuje da zavarivačko osoblje kontinuirano radi u struci i da kontinuirano unapređuje svoja znanja i sprovodi se prema IIW šemi sertifikacije. Sertifikacijom se takođe dokazuje ispunjavanje uslova standarda SRPS EN ISO 3834-2,3,4 koji propisuje zahteve za osoblje uključeno u obezbeđenje kvaliteta zavarivanja.

EFW i IIW predstavljaju dve glavne organizacije za zavarivanje koje poseduju međunarodnu stručnost u oblasti zavarivanja i srodnim tehnologijama. EFW/IIW struktura sertifikacije osoblja je jednostavno sredstvo kojim se može proceniti i prepoznati sposobnost za obavljanje određenog posla. Ona definiše profil obrazovanja, znanje, iskustvo i odgovornosti koje se zahtevaju za široko područje opšte poznatih zavarivačkih zadataka i daje proceduru profesionalnog procenjivanja.

**Postupak sertifikacije** obuhvata:

- podnošenje zahteva za sertifikaciju
- preispitivanje zahteva
- ocenjivanje
- razmatranje izveštaja o ocenjivanju usaglašenosti
- odluku o sertifikaciji
- nadzor i ponovno ocenjivanje
- korišćenje sertifikata i logoa



Sertifikat se dodjeljuje za određene tipove proizvoda koji preduzeće – poslodavac proizvodi i koordinator koordinira.

Dakle, sertifikat se odnosi na određene grupe materijala koje zavarujete/ tipove proizvoda koje proizvodite/ postupke zavarivanja kojima se bavite, a za koje dokazujete svoje radno iskustvo/praksu kroz proces sertifikacije, za šta uz sertifikat dobijate i pripadajući dokument sa navedenim obimom odobrenja.)

Za prvu sertifikaciju, potrebno je da prođe 3 godine od datuma sticanja IIW/EFW diplome.

Period važenja sertifikata je 3 godine. Nakon tog vremena sertifikovana osoba je dužna da obnovi sertifikaciju kako bi zadržala status. Podnošenjem Prijave za resertifikaciju započinje proces resertifikacije koji zahteva informacije o aktivnostima sertifikovane osobe tokom predhodne tri godine, kako u pogledu radnog iskustva tako i u pogledu sticanja i primene novih saznanja u oblasti koja je definisana obimom sertifikacije.

Šema sertifikacije je sačinjena tako da izdati sertifikat dokazuje tri stvari:

**1. Posedovanje određenog nivoa znanja stečenog u prošlosti**

- Dokazuje se posedovanjem odgovarajuće IIW/EFW diplome

**2. Rad u struci.**

- Dokazuje se popunjenim obrascem u kojem je vidljivo da je kandidat redovno radio na području zavarivanja i srodnih tehnologija, odnosno da je snosio određeni nivo odgovornosti

**3. Kontinuirano stručno usavršavanje** čime se dokazuje da kandidat održava i povećava svoj nivo znanja.

- Dokazuje se potvrdama o pohađanju stručnih seminara i savetovanja, radom u tehničkim odborima i stručnim grupama, člancima u stručnim i naučnim časopisima i zbornicima radova sa savetovanja i sl.

Postupak sertifikacije, odnosno ono što zainteresovani kandidat praktično treba da uradi je da:

1. Popuni prijavni list za sertifikaciju

**DUZS-CertPers**

**PRIJAVA ZA SERTIFIKACIJU OSOBLJA**

Ime	Prezime		
Adresa	Telefon	E-mail adresa	
Podaci o nosiocu IIW/EFW diplome			
Zvanje	Broj diplome	Datum sticanja diplome	Datum rođenja

Želim da se prijavim za sertifikaciju i prilažem dokaz o nadoknadi svih troškova sertifikacije. Moj CV je prikazan u predloženoj formi. Saglasan sam uslovima sertifikacije koji su naznačeni u napomeni ove prijave.

Potpis:

Datum:

\*dobija se na zahtev u sekretarijatu DUZS-CertPers

2. Dostavi prijavni list - Prijavu za Sertifikaciju (OBR-23), u pisanom obliku, sa svim traženim dokumentima Sekretarijatu DUZS-CertPers.

3. Nakon povratne informacije iz DUZS-CertPers o prihvatanju prijave, obavi „Profesionalni Intervju“ (nije ispit) sa predstavnikom ovlašćenog tela

4. Preuzme sertifikat u DUZS-CertPers. Sertifikovana osoba se mora pridržavati IIW pravila o profesionalnom ponašanju. U slučaju da to ne učini, sertifikat se može opozvati.



## ODRŽAVANJE I RAZVOJ ZNANJA ZA SERTIFIKACIJU OSOBLJA

Svaki kandidat mora da dobije najmanje 20 bodova u 2 godine od poslednje tri godine.

**Za prvu sertifikaciju, kandidat treba da ima 10 poena prema ovoj tabeli.**

<b>1. Aktivnosti zaposlenih</b>	
Funkcija posla odgovornog zavarivanja	2 poena ( po godini*)
Koordinacija zavarivanja i praktičan rad (radi na području zavarivanja, ali ne na zavarivanju odgovornog posla), npr. demonstrator	poen ( po godini*)
<b>2. Dalja edukacija</b>	
Profesionalna postdiplomska obuka	10 poena
Profesionalni sertifikati, kvalifikacije (npr.: kvalifikacija zavarivanja /NDT koja važi u poslednje 3 godine)	3 poena ( kvalifikacija)
Dobijanje naučne diplomu (npr.: doktorat)	10 poena
<b>3. Kursevi i obuke sa uverenjem o prisustvu</b>	
Kreditni poeni za seminar / kurs koji organizuje DUZS	5 poena (godišnje)
Međunarodni / nacionalni kurs koji organizuju ATB	5/3/1 poena
Kurs prema odobrenim tematskim oblastima od strane DUZS	2 poena ( dnevno)
<b>4. Širenje znanja</b>	
Održavanje povremenih profesionalnih prezentacija	2 poena (po prezentaciji)
Obrazovna aktivnost (teoretska, praktična i ispitivanje)	0,25 poena / po času nastave
Konsultantsko-savetodavne usluge	2 poena / BSc, MSc tema (5 poena / doktorske teme)
Radovi u publikacijama	3 poena (autor), 1,5 ( koautor)
Pretplata na stručne časopise iz oblasti zavarivanja i povezane tehnologije	1 pretplata 1 poen godišnje (maksimalno 2 poena godišnje).
<b>5. Konferencije, simpozijumi i izložbe</b>	
Prisustvo na konferenciji međunarodnoj ili zajednički organizovanoj i drugu profesionalnu organizaciju	1 poen (po slučaju, slušalac) 3 poena (po slučaju, izvođač)
Prisustvo na profesionalnim izložbama	1 poen (po slučaju)
<b>6. Prepoznavanje aktivnosti, Rad u komisijama</b>	
Prisustvo u odborima uspostavljenim od strane DUZS itd.	2 boda (po odboru)
Aktivnost u odborima međunarodnih organizacija-EWF, IIW, CEN, ISO i sl.	3 poena (po komitetu)
Prisustvo u međunarodnim i profesionalnim projektima	3 boda (po projektu)
<b>7. Ostalo (svaka prateća aktivnost u kontinuiranom profesionalnom razvoju)</b>	
Knjiga zavarivanja (standardne, profesionalne publikacije, itd.)	10 bodova (u slučaju autora), 5 bodova (u slučaju koautora)
Svaka druga aktivnost koja se profesionalno povezuje sa zavarivanjem ili srodnim tehnologijama	
* Maks. za tri godine (maksimalno 6 i 3 poena), godina podnošenja nije uključena	



## IIW PRIJAVA ZA SERTIFIKACIJU OSOBLJA S ODGOVORNOŠĆU KOORDINATORA ZAVARIVANJA

Najvažniji faktor osiguranja kvaliteta zavarivačkih radova je kvalitetno i kontinuirano stručno obrazovano zavarivačko osoblje. Koordinacija zavarivanja i inspekcija u zavarivanju su vrlo zahtevni poslovi, tako da stručnjaci koji su za to zaduženi, moraju poznavati najnovija dostignuća iz struke.

Sertifikacijom se dokazuje da zavarivačko osoblje edukovano prema IAB/EFW programu kontinuirano nadograđuje svoja znanja i aktivno bavi strukom.

Pozivamo vas da to obavite i za početak popunite prijavu.

Ime i prezime:
Naziv firme:
Adresa firme:
E mail:
Školska sprema:
ANB koji je izdao IIW/EFW diplomu:
Prijava za: <b>1. Sertifikacija prvi put</b> <span style="float: right;"><b>Zaokružiti vrstu prijave !</b></span>  <b>2. Obnavljanje sertifikata</b>
<b>Br.IIW/EFW diplome:</b>
<div style="text-align: center;"><b>Radno iskustvo:</b></div> (navesti br.godina)
Uz prijavu priložiti: - fotokopiju IIW diplome - dokaze o kontinuiranom obrazovanju - fotografiju - <b>ispunjeni obrazac sertifikacija ili obrazac obnavljanje sertifikata</b> *dobija se na zahtev u sekretarijatu DUZS-CertPers
<b>Potpis:</b>
Datum prijave:



Kevin Bagheri

## Welding Engineering Certification Options Mogućnosti sertifikacije zavarivačkog inženjeringa

### Originalni naučni rad / Original scientific paper

Prezentovano u okviru 72. IIV godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Jula 2020

### Rad primljen / Paper received:

Mart 2020.

**Ključne reči:** Koordinator za zavarivanje, Sertifikacija zavarivačkog inženjeringa, Kvalifikacija

### Adresa autora / Author's address:

Mechanical Engineering, University of Ottawa, OTTAWA, Canada  
kbagheri@uottawa.ca

**Keywords:** Welding Coordinator, Welding Engineering Certification, Welding Engineering Qualification

### Abstract

The University of Ottawa students asked the author about the options of Welding Engineering Certification available. Questions about how to get certification and which certification is best seem to reflect a general unfamiliarity with the process. But in all fairness to the Engineering novices, the processes are not uniform around the world so some of the answers to their questions may not always be understood due to variations from country to country. This paper is an attempt to point out some of the basic differences of the main system types and to offer ideas for those faced with prospect of lack of certification options in Welding Engineering.

Harmonisation of the main international methods of qualification and certification has been on-going but there are still a few differences that need to be addressed to allow worldwide mutual recognition to the two main third-party options.

The goal of this paper is to simplify the understanding of the certification options commonly used in Welding Engineering. When would be engineers ask; "Which certification is best?" they are perhaps not aware of all the facts. In some cases they have no choice as to which certification to get. But some agencies can actually accommodate several options. Today Welding Engineers often find it is convenient to hold more than one option of certification. Efforts are being made to have mutual recognition of certifications; however, unless we can agree on a common set of requirements this is still a future goal.

### 1. Introduction

The University of Ottawa students asked the author about the options of Welding Engineering Certification available. Questions about how to get certification and which certification is best seem to

### Rezime

Studenti sa Univerziteta u Otavi pitali su autora o mogućnostima dostupnih sertifikata za zavarivački inženjering. Pitanja o tome kako dobiti sertifikat i koja sertifikacija je najbolja, ukazuju na opšte nepoznavanje procesa sertifikacije. Ali, da budemo fer prema mladim inženjerima (inženjerima početnicima), procesi širom sveta nisu jednoobrazni, pa neki odgovori na njihova pitanja ne mogu uvek biti razumljivi zbog varijacija od zemlje do zemlje. Ovaj rad je pokušaj da se ukaže na neke osnovne razlike glavnih tipova sistema i da se predlože ideje za one koji su suočeni sa nedostacima opcija sertifikacije u zavarivačkom inženjeringu.

Usaglašavanje glavnih međunarodnih metoda kvalifikacije i sertifikacije je u toku, ali još uvek postoji nekoliko razlika koje se moraju rešiti kako bi se omogućilo uzajamno priznavanje širom sveta dve glavne opcije treće strane.

Cilj ovog rada je da se pojednostavi razumevanje opcija sertifikacije koje se obično koriste u zavarivačkom inženjeringu. Kada bi inženjeri pitali; „Koji je sertifikat najbolji?“ oni možda nisu svesni svih činjenica. U nekim slučajevima nemaju izbora koji sertifikat bi dobili. Međutim, neke agencije mogu zaista da primene nekoliko opcija. Danas inženjeri za zavarivanje često smatraju da je prikladno da poseduju više od jedne mogućnosti sertifikacije. Ulažu se naponi na međusobnom priznavanju sertifikata; međutim, osim ako se ne možemo složiti oko zajedničkog niza zahteva, to je još uvek budući cilj.

### 1. Uvod

Studenti sa Univerziteta u Otavi pitali su autora o mogućnostima dostupnih sertifikata za zavarivanje i inženjeringa. Pitanja o tome kako dobiti sertifikat i koja sertifikacija je najbolja, najviše odražava opšte



reflect a general unfamiliarity with the process. But in all fairness to the Engineering novices, the processes are not uniform around the world so some of the answers to their questions may not always be understood due to variations from country to country. This paper is an attempt to point out some of the basic differences of the main system types and to offer ideas for those faced with prospect of lack of certification options in Welding Engineering.

Harmonisation of the main international methods of qualification and certification has been on-going but there are still a few differences that need to be addressed to allow worldwide mutual recognition to the two main third-party options.

The goal of this paper is to simplify the understanding of the certification options commonly used in Welding Engineering. When would be engineers ask; "Which certification is best?" they are perhaps not aware of all the facts. In some cases they have no choice as to which certification to get. But some agencies can actually accommodate several options. Today Welding Engineers often find it is convenient to hold more than one option of certification. Efforts are being made to have mutual recognition of certifications; however, unless we can agree on a common set of requirements this is still a future goal.

## 2. Certification

The five steps to achieve the personnel welding certification:

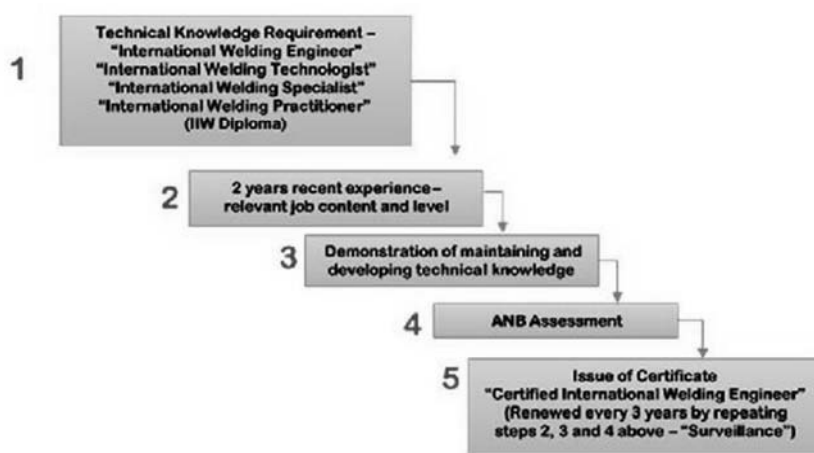


Fig.1 Welding Certification Steps – IIW  
Sl. 1. Koraci u sertifikaciji -IIW

### 2.1 Technical Knowledge Requirements

#### 2.1.1 General and Specific Knowledge Requirements EN-ISO 14731

General knowledge requirements of all welding coordination personnel (WC)

##### 1. General technical knowledge

nepoznavanje procesa. Ali u skladu sa inženjerskim početnicima, procesi širom sveta nisu jednoobrazni, pa neki odgovori na njihova pitanja ne mogu uvek biti razumljivi zbog varijacija od zemlje do zemlje. Ovaj rad je pokušaj da se ukaže na neke osnovne razlike glavnih tipova sistema i da se predlože ideje za one koji su suočeni sa nedostatkom opcija za sertifikaciju u zavarivačkom inženjeringu.

Usaglašavanje glavnih međunarodnih metoda kvalifikacije i sertifikovanja je u toku, ali još uvek postoji nekoliko razlika koje se moraju rešiti kako bi se omogućilo uzajamno priznavanje širom sveta dve glavnih opcija trećih strana.

Cilj ovog rada je da se pojednostavi razumevanje opcija sertifikacije koje se obično koriste u zavarivačkom inženjeringu. Kada bi inženjeri pitali; „Koja je potvrda najbolja?“ oni možda nisu svesni svih činjenica. U nekim slučajevima nemaju izbora koji sertifikat bi dobili, ali neke agencije mogu udovoljiti nekoliko opcija. Danas inženjeri za zavarivanje često smatraju da je prikladno da poseduju više od jedne mogućnosti sertifikacije. Ulažu se naponi na međusobnom priznavanju sertifikata; međutim, osim ako se ne možemo složiti oko zajedničkog niza zahteva, to je još uvek budući cilj.

## 2. Sertifikacija

Pet koraka za dobijanje sertifikata osoblja za zavarivanje:

### 2.1 Zahtevi tehničkog znanja

#### 2.1.1 Zahtevi opšteg i specifičnog znanja EN-ISO 14731

Opšti zahtevi za sve osoblje za koordinaciju zavarivanja (WC)

##### 1. Opšta tehnička znanja



2. Specialized technical knowledge in welding and allied process relevant to the assigned tasks, which shall be attained by a combination of theoretical knowledge, training and or experience

Specific requirements for the responsible welding coordinator (RWC)

Grouping of responsible Welding Coordinators:

a) Personnel with comprehensive technical knowledge, where full technical knowledge is required for the planning, executing, supervising and testing of all tasks and responsibilities in welding fabrication

b) Personnel with specific technical knowledge, where the level of technical knowledge needs to be sufficient for the planning, executing, supervising and testing of the tasks and responsibilities in welding fabrication within a selective or limited technical field;

c) Personnel with basic technical knowledge, where the level of technical knowledge needs to be sufficient for planning, executing, supervising and testing of tasks and responsibilities within a limited technical field, involving only simple welded constructions.

## **2.2 Recommendations for technical knowledge in welding**

The international Institute of Welding (IIW) has, on a voluntary basis, prepared recommendations for minimum requirements for education, examination and qualification of welding coordination personnel.

The recommendations are stated in the following documents:

- International Welding Engineer (IWE), Doc. IAB-252;
- International Welding Technologist (IWT), Doc. IAB-252;
- International Welding Specialist (IWS), Doc. IAB-252.

## **3. European Welding Federation (EWF) Supplementary Education Scheme**

The European Welding Federation introduced a supplementary education scheme, EWF 652R-1-11, for minimum requirements for education, examination and qualification of welding coordination personnel to comply with EN 1090-2.

2. Specijalizovana tehnička znanja u zavarivanju i srodnim procesima relevantnim za zadate zadatke, koja će se dostići kombinacijom teorijskog znanja, obuke i ili iskustva

Specifični zahtevi za odgovornog koordinatora za zavarivanje (RWC)

Grupisanje odgovornih koordinatora za zavarivanje:

a) Osoblje sa sveobuhvatnim tehničkim znanjem, gde je potrebno potpuno tehničko znanje za planiranje, izvršenje, nadzor i ispitivanje svih kod zadataka i odgovornosti u proizvodnji zavarivanjem

b) Osoblje sa specifičnim tehničkim znanjem, gde nivo tehničkog znanja treba da bude dovoljan za planiranje, izvršavanje, nadzor i ispitivanje kod zadataka i odgovornosti u zavarivanju proizvoda u selektivnom ili ograničenom tehničkom polju;

c) Osoblje sa osnovnim tehničkim znanjem, gde nivo tehničkog znanja treba da bude dovoljno za planiranje, izvršavanje, nadzor i ispitivanje kod zadataka i odgovornosti u ograničenom tehničkom polju, uključujući samo jednostavne zavarene konstrukcije.

## **2.2 Preporuke za tehničko znanje u zavarivanju**

Međunarodni institut za zavarivanje (IIW) pripremio je preporuke za minimalne zahteve za obrazovanje, sprovođenje ispita i kvalifikaciju osoblja za koordinaciju zavarivanja.

Preporuke su navedene u sledećim dokumentima:

- Međunarodni inženjer za zavarivanje (IWE), doc. Sa IAB 252;
- Međunarodni tehnolog za zavarivanje (IWT), doc. Sa IAB 252;
- Međunarodni specijalista za zavarivanje (IWS), doc. sa IAB 252.

## **3. Šema dopunskog obrazovanja Evropske federacije za zavarivanje (EWF)**

Evropska federacija za zavarivanje uvela je šemu dopunskog obrazovanja, EWF 652R-1-11, za minimalne zahteve za obrazovanje, sprovođenje ispita i kvalifikaciju osoblja za koordinaciju zavarivanja u skladu sa EN 1090-2.



EXC	Steels (Steel group)	Reference standards	Thickness (mm)		
			t ≤ 25 <sup>a</sup>	25 < t ≤ 50 <sup>b</sup>	t > 50
EXC2	S235 to S355 (1.1, 1.2, 1.4)	EN 10025-2 EN 10025-3 EN 10025-4 EN 10025-5, EN 10149-2, EN 10149-3 EN10210-1, EN 10219-1	B	S	C <sup>c</sup>
	S420 to S700 (1.3, 2, 3)	EN 10025-3 EN 10025-4 EN 10025-6 EN 10149-2, EN 10149-3 EN10210-1, EN 10219-1	S	C <sup>d</sup>	C
EXC3	S235 to S355 (1.1, 1.2, 1.4)	EN 10025-2 EN 10025-3 EN 10025-4 EN 10025-5, EN 10149-2, EN 10149-3 EN10210-1, EN 10219-1	S	C	C
	S420 to S700 (1.3, 2, 3)	EN 10025-3 EN 10025-4 EN 10025-6 EN 10149-2, EN 10149-3 EN10210-1, EN 10219-1	C	C	C
EXC4	All	All	C	C	C

<sup>a</sup> Column base plates and endplates ≤ 50mm

<sup>b</sup> Column base plates and endplates < 75mm

<sup>c</sup> For steels up to and including S275 level S is sufficient

<sup>d</sup> For steels N, NL, M and ML level S is sufficient

B: Basic technical knowledge

S: Specific technical knowledge

C: Comprehensive technical knowledge

**Tab. 1** Welding Coordination Personnel Requirements for Steels – EN 1090-2

**Tab. 1.** Zahtevi za osoblje za koordinaciju zavarivanja za čelike - EN 1090-2

EXC	Steels (Steel group)	Reference standards	Thickness (mm)		
			t ≤ 25	25 < t ≤ 50	t > 50
EXC2	Austenitic (8)	EN 10088-2:2005, Tabel 3 EN 10088-3:2005, Tabel 4 EN 10296-2:2005, Tabel 1 EN 10297-2:2005, Tabel 2	B	S	C
	Austenitic-ferritic (10)	EN 10088-2:2005, Tabel 4 EN 10088-3:2005, Tabel 5 EN 10296-2:2005, Tabel 1 EN 10297-2:2005, Tabel 3	S	C	C
EXC3	Austenitic (8)	EN 10088-2:2005, Tabel 3 EN 10088-3:2005, Tabel 4 EN 10296-2:2005, Tabel 1 EN 10297-2:2005, Tabel 2	S	C	C
	Austenitic-ferritic (10)	EN 10088-2:2005, Tabel 4 EN 10088-3:2005, Tabel 5 EN 10296-2:2005, Tabel 1 EN 10297-2:2005, Tabel 3	C	C	C
EXC4	All	All	C	C	C

B: Basic technical knowledge

S: Specific technical knowledge

C: Comprehensive technical knowledge

**Tab. 2** Welding Coordination Personnel Requirements for Stainless Steels – EN 1090-2

**Tab. 2.** Zahtevi za osoblje za koordinaciju zavarivanja za nerđajuće čelike - EN 1090-2

### 3. European Accreditation

EA is quite clear in EA-6/02:2013. Special attention for the audit team in evaluating the competence of the manufacturer's welding coordinators in accordance with EN ISO 14731.

- Contain persons with direct product/process/materials competence in products/process/materials being audited, and
- Contain at least one individual who is qualified and experienced in welding to a level that is sufficient to demonstrate that he/she is competent to audit the company's authorized welding coordinator in accordance with EN ISO 14731. "WELDING COORDINATION-TASKS AND RESPONSIBILITIES".

### 3. Evropska akreditacija

EA je sasvim jasan u EA-6/02: 2013. Posebna pažnja za ocjenivački tim u proceni kompetencija zavarivačkih koordinatora proizvođača u skladu sa EN ISO 14731.

- Sadrže osobe sa direktnim kompetencijama proizvod / proces / materijal u proizvodima / procesima / materijalima koji se proveravaju i
- Sadrži barem jednog pojedinca koji je kvalifikovan i iskusen u zavarivanju do nivoa koji je dovoljan da pokaže da je on / ona kompetentna za ocenjivanje ovlašćenih koordinatora za zavarivanje u preduzeću u skladu sa EN ISO 14731. „KOORDINACIJA ZAVARIVANJA- ZADACI I ODGOVORNOSTI “.



### 5. Qualification of a Welding Coordinator – EWF/IIW

The professional interview process shall involve the examination of specific contract(s) to audit compliance with the customer's specification in the following areas:

1. Selection/development of welding procedures
2. Welding sequences
3. NDT and heat treatment
4. Approval of personnel
5. Traceability
6. Quality control and acceptance
7. Sub-contracting

### 5. Kvalifikacija koordinatorazavarivanja – EWF/IIW

Proces profesionalnog razgovora uključuje ispitivanje određenog ugovora (a) za proveru poštovanja specifikacija kupca u sledećim oblastima:

1. Izbor / razvoj postupaka zavarivanja
2. Redosled zavarivanja
3. IBR i termička obrada
4. Odobrenja osoblja
5. Sledljivost
6. Kontrola kvaliteta i prihvatljivost
7. Podugovaranje

Situation	Additional requirement	Activity required towards the (R)WC
<b>EWF/IIW qualification is available (E/IWE, E/IWT, E/IWS) "Type 1"</b>	None	Check on adequate experience and competence in the products being manufactured by means of a professional interview and examination of the Welding Coordinator's curriculum vitae.
<b>EWF/IIW Personnel Certification is available (CE/IWE, CE/IWT, CE/IWS) "Type 1"</b>	Schedule should support the scope of work allocated to the Welding Coordinator	Check on adequate experience and competence in the products being manufactured by means of a professional interview.
<b>If none of the above EWF/IIW certifications or qualifications are available "Type 2"</b>	None	Verify compliance by means of a professional interview covering knowledge, skills, experience and competence with particular emphasis on welding technology, materials and their behaviour during welding, design fundamentals of welded construction, as well as fabrication and inspection aspects (including knowledge of standards) in the

**Tab. 3** Welding Coordination Personnel Qualification – EWF/IIW  
**Tab. 3.** Kvalifikacija osoblja za koordinaciju zavarivanja - EWF / IIW

This means that technical discussions must be take place between each welding coordinator and relevant auditor regarding the detailed technical scope of the welding coordinator's responsibilities and interview should take the form of a peer review and challenge process. This process will require the auditor to examine evidence of completed work done by each welding coordinator and to investigate his/her knowledge and understanding of it. The certification body shall maintain full records of the process of evaluation of the manufacturer's welding coordinators.

To znači da se moraju voditi tehničke diskusije između svakog koordinatora za zavarivanje i nadležnog proveravača u vezi s detaljnim tehničkim opsegom odgovornosti koordinatora zavarivanja a razgovor bi trebalo da bude u obliku stručnog pregleda i procesa izazova. Ovaj proces će zahtevati od proveravača da ispita dokaze o završenom radu obavljenom od strane svakog koordinatora zavarivanja i da istraži njegovo znanje i razumevanje istog. Sertifikaciono telo mora da vodi potpunu evidenciju procesa procene proizvođača koordinatora zavarivanja.



### 5.1 Professional Interview

We can see two essentially different professional interviews.

1. Type 1: Checking the actual knowledge related to the manufactured products to be covered by the welding coordinator.
2. Type 2: As specified above, but additionally covering knowledge, skill, experience and competence in the fields that is supposed to be covered by EWF/IIW qualifications and certifications.

This means:

General Knowledge and skill check for the (R)WC:

- Challenge the (R)WC by asking questions of the “what-if” type;
- Try to cover his/hers whole scope of work.

Additional knowledge and skill check for the (R)WC;

Type 1: Select a running (just delivered) contract and follow every single step as related to the (Responsible) Welding Coordinator;

Type2: As under Type 1, but in addition select random questions out of the questions database for EWF Guideline 652 or IAB 252 and use them as guidance for the Professional Interview Type 2.

### Summary

Certification options are not always an item of choice for the RWC. Company requirements, regulatory requirements or project specifications may limit the options that are allowed.

Certification schemes such as EWF and IIW are simply the programs run by the “certifying agencies” or “certifying bodies” approved to issue certificates. Since the certificate issued by the approved body indicates the qualification requirement standard (ISO 3834 or EN-ISO 14731) it is the standard identified and not the agency or scheme issuing the certificate that is relevant to the code compliance.

### References

#### Bibliografija

- [1] ISO 14731
- [2] ISO 3834
- [3] EA-6/02
- [4] EWF 652R1-11
- [5] EN 1090-2

### 5.1 Profesionalni razgovor

Možemo videti dva suštinski različita profesionalna intervjua.

1. Tip 1: Provera stvarnog znanja u vezi sa proizvedenim proizvodima koje pokriva koordinator za zavarivanje.
2. Tip 2: Kao što je prethodno navedeno, ali dodatno pokriva znanje, veštinu, iskustvo i kompetencije u oblastima koje bi trebale biti obuhvaćene kvalifikacijama i sertifikatima EWF / IIW.

To znači:

Opšta provera znanja i veština za (R) WC:

- Izazovite (R) WC postavljajući pitanja tipa „šta ako“;
- Pokušajte da obuhvatite njegov / njen čitav opseg posla.

Dodatna provera znanja i veština za (R) WC;

Tip 1: Izaberite tekući (upravo isporučeni) ugovor i sledite svaki korak u vezi sa (odgovornim) koordinatorom za zavarivanje;

Tip 2: Kao i pod tipom 1, ali pored toga izaberite nasumična pitanja iz baze podataka za EWF smernicu 652 ili IAB 252 i koristite ih kao smernice za profesionalni intervju 2.

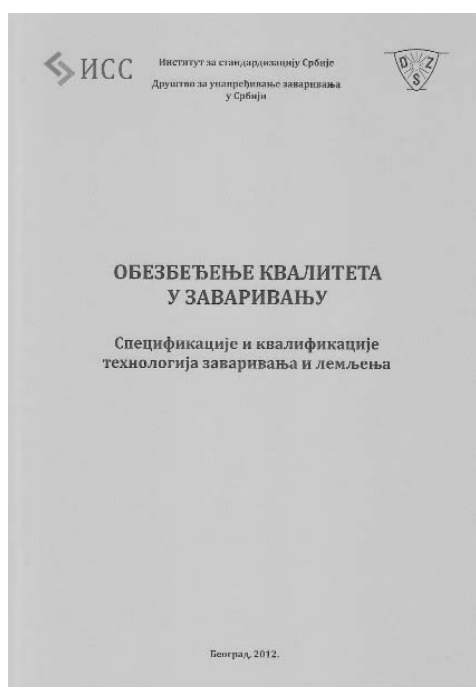
### Pregled

Opcije sertifikacije nisu uvek stavke po izboru za RWC. Zahtevi kompanije, regulatorni zahtevi ili specifikacije projekta mogu ograničiti opcije koje su dozvoljene.

Šeme sertifikacije kao što su EWF i IIW su jednostavno programi koje vode „sertifikacione agencije“ ili „sertifikaciona tela“ odobrena za izdavanje sertifikata. Budući da potvrda koju je izdalo odobreno telo ukazuje na zahtev standarda za kvalifikacijom (ISO 3834 ili EN-ISO 14731), identifikovan je standard, a ne agencija ili šema koja izdaje sertifikat, kao relevantan za usklađenost sa kodom.



U saradnji sa Institutom za standardizaciju Srbije pripremamo novo izdanje Zbirki standarda, o čemu će biti više reči u narednim brojevima časopisa.



## MATERIJALI I POSTUPCI OBRADU U JUVELIRSTVU – MONOGRAFIJA

Pre izvesnog vremena iz štampe je izašla publikacija koja ima delom dodirnih tačaka sa problematikom našeg časopisa u lemljenju plemenitih metala. Izuzetno luksuzno opremljena i sa estetski osmišljenom štampom daje ovoj monografiji šarm usaglašen sa tematikom.

Knjiga se može nabaviti preko autora, g. Karastojković Zorana.



CIP - Каталогизација у публикацији -  
Народна библиотека Србије, Београд

739.671

КАРАСТОЈКОВИЋ, Зоран 1951-

Материјали и поступци обраде у јувелирству / Зоран Карастојковић  
Радиша Перић. - Београд : Централни институт за конзервацију ; Пожаревац : "Perić  
& Perić" & Co, 2017 (Пожаревац : Компромис дизајн). -342 стр : илустр. : 25 cm

Тираж 300. - Аутори: стр. 319-323. - Библиографија: стр. 328-342

ISBN 978-86-6179-057-7 (ЦИК)  
1. Перић, Радиша, 1951 - [ аутор ]  
а) Златарство б) Накит - Материјали  
COBISS.SR-ID 252006924

ISBN 978-86-6179-057-7.

COBISS.SR.-ID 252006924

## ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

### Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2020

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimenzije (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
DIN	crno/beli	-	39 000	23 000	16 000	10 000
	kolor	105 000	75 000	-	-	-

- U cene nije uračunat PDV 20%.
- Objavljanje oglasa u samo jednom broju iznosi 30% od datih cena.
- Reklamni tekstovi: 25 % od cene površine crno/belih oglasa.
- Dostava materijala:
  - za crno-beli film ili CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW);
  - za kolor film ili CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW);
  - izrada filma sa CD: 10 % od cene angažovanog prostora.
- Na web prezentaciji DUZS-a, ([www.duzs.org.rs](http://www.duzs.org.rs)), na strani Marketing, objavljuje se pregled firmi-oglašivača sa podacima o glavnim grupama proizvoda/usluga i adresom web prezentacije. Svi posetioci naše web prezentacije mogu da posete i web prezentacije oglašivača, preko aktivnih linkova koji se nalaze na ovoj stranici!

## WELDING & WELDED STRUCTURES, Quarterly review

### Advertising prices for four successive numbers in 2019

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimensions (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
EUR	black/white	-	840	432	336	240
	colour	2 640	1 680	-	-	-

- VAT 20% included.
- Advertising in one number only is 35% of the given prices.
- Commercial articles: 30 % of black/white advertising price.
- Print material:
  - for black/white CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW)
  - for color CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW).
- All the visitors of our web site may be linked to the advertisers' web site.

## INDEKS OGLAŠIVAČA

### ADVERTISERS INDEX

MESSER TEHNOGAS

YASKAWA SLOVENIJA

HONEX

ELIMP

NEMINIK

APAVE Ver Tech Serbia

1. ČLANARINA DUZS za 2020. godinu ..... **3.500 dinara**  
 Članovima DUZS **GRATIS** godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"
2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2020. godina u slobodnoj prodaji (u cene je uračunat PDV 10%):
  - cena pojedinačnog broja..... 825 dinara
  - godišnja pretplata za 1 komplet brojeva godišnjeg izdanja..... 2.500 dinara
3. ČASOPIS - stari brojevi (u cene je uračunat PDV 10%)
  - a) u slobodnoj prodaji:
    - cena pojedinačnog broja za 2018. godinu ..... 500 dinara
    - cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... 250 dinara
  - b) beneficirane cene za članove DUZS:
    - cena pojedinačnog broja za 2019. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) ..... 400 dinara
    - cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) ..... Gratis
4. Knjiga Organizacija i ekonomika zavarivačkih radova – autor: prof. dr Zoran Radojević (uračunat PDV 10%) ..... 1.045 dinara
5. Zbirke standarda OBEZBEĐENJE KVALITETA U ZAVARIVANJU, komplet 4 toma ..... 6.750 dinara