



# ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

## WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 67 Vol. 67	Br. 4 No. 4	145-192 145-192	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2022. 2022.
--------------------	----------------	--------------------	---------------------	------------------	----------------

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**

Dr Zoran Odanović, dipl.ing.

duzs011@gmail.com, odanovic@ptt.rs

**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 Dragoslav Dobraš, 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 Zoran Odanović. – Vol. 41, no. 1  
(1996)- . - Beograd : DUZS - Društvo za unapređivanje  
zavarivanja u Srbiji, 1996-. (Beograd : VIS studio).-29 cm

Tromesečno. Je nastavak: Zavarivač = 0513-8523  
ISSN 0354-7965 = Zavarivanje i zavarene konstrukcije  
COBISS.SR-ID 105396743

### CENE I NARUDŽBINA ZA 2022.

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.

Bulevar Arsenija Čamojevića 123, Beograd

Tiraž: 400 kom.

## SADRŽAJ

## CONTENTS



## NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

## SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

147

UTICAJ HEMIJSKOG SASTAVA NA STRUKTURNE  
TRANSFORMACIJE KOD UGLJENIČNIH ČELIKA I  
NJIHOVIH ZAVARENIH SPOJEVA

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON  
STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN CARBON  
STEELS AND THEIR WELDED JOINTS

*Oleksandr M. Savitskyi, Mychailo M. Savitskyi, Darko Bajić*



## NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

## SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

157

STUDIJA ZAVARIVANJA SUČEONIH I UGAONIH  
SPOJEVA KORIŠĆENJEM POSTUPKA ZAVARIVANJA  
TRENJEM SA MEŠANJEM (FSW)

STUDY OF WELDING OF BUTT AND FILLET WELDS  
USING THE FSW METHOD

*Nikola Šibalić, Darko Bajić, Marko Mumović*



## NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

## SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

167

UTICAJ SADRŽAJA OKSIDA NA ZAVARIVANJE U  
ZAŠTITNOM GASU SA NETOPLJIVOM ELEKTRODOM  
SA AKTIVNIM TOPITELJEM

INFLUENCE OF OXIDE CONTENT IN ACTIVATED  
TUNGSTEN INERT GAS WELDING

*Sebastian Baloš, Miroslav Dramićanin, Petar Janjatović, Ivan Zabunov, Nenad Kulundžić, Slobodan Tabaković, Vencislav Grabulov*



## NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

## SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

181

WELDING TECHNOLOGY FOR STEEL P460NL2

TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA ČELIKA P460NL2

*Maja B. Poser, Dobro Runchev, Filip Zdraveski*



## PRAKSA

## PRACTICE

187

EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE ZAOSTALIH  
NAPONA U KONSTRUKCIJI METODOM BUŠENJA  
RUPE

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF RESIDUAL  
STRESSES IN STRUCTURE BY HOLE DRILLING  
METHOD

*Mersida Manjgo, Tomaž Vuherer, Mirza Manjgo, Meri Buzić*



## VESTI

## NEWS

156

SAVETOVANJE SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM ZAVARIVANJE 2022

166

SAVETOVANJE SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM ZAVARIVANJE 2022-NASTAVAK

192

MARKETING



Oleksandr M. Savitskyi<sup>1</sup>, Mychailo M. Savitskyi<sup>1</sup>, Darko Bajić<sup>2,a</sup>

# UTICAJ HEMIJSKOG SASTAVA NA STRUKTURNE TRANSFORMACIJE KOD UGLJENIČNIH ČELIKA I NJIHOVIH ZAVARENIH SPOJEVA

## INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN CARBON STEELS AND THEIR WELDED JOINTS

### Originalni naučni rad / Original scientific paper

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

### Rad primljen / Paper received:

Oktobar 2021.

### Rad prihvaćen / Paper accepted:

April 2022.

**Ključne reči:** transformacija, prokaljivost, hemijski sastav, austenit, ugljenik, zavareni spoj

### Rezime

U radu je na osnovu analize zavisnosti temperaturnih kritičnih tačaka strukturnih transformacija od hemijskog sastava čelika pokazano da se ugljenik može smatrati opredjeljujućim faktorom uticaja na kinetiku formiranja strukture kod ugljeničnih čelika i njihovih zavarenih spojeva. Iako sa povećanjem sadržaja ugljenika povećava se i period inertnosti difuzione (perlitne) i intermedijalne (beinitne) transformacije pothlađenog austenita, pri tom tok transformacije se ubrzava. Ovo stvara preduslove za rešenje zadatka razvoja difuzione i intermedijalne transformacije pothlađenih austenita u metalu zavarenih spojeva sklonih prokaljivanju i predupređuje martenzitne (bezdifuzione) transformacije. Međutim, za svrsishodno započinjanje naznačenih oblika transformacija neophodan je efikasan metod ili način skraćenja perioda inertnosti njegovog raspada u predviđenim granicama. Legirajući elementi koji formiraju karbide uvećavaju pozitivno dejstvo ugljenika na  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformaciju u difuzionoj oblasti i slabe u intermedijalnoj oblasti. Svi drugi legirajući elementi u uslovima kontinualnog hlađenja usporavaju raspad pothlađenog austenita u difuzionoj i intermedijalnoj oblasti i uvećavaju period inertnosti, neophodnog za njegov početak.

### Adresa autora / Author's address:

<sup>1</sup> E.O.Paton, Institut elektrolučnog zavarivanja pri Alademiji nauka Ukraine, Kiev, Ukraina

<sup>2</sup> Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Podgorica, Crna Gora

E mail: <sup>a</sup> darko@ucg.ac.me

**Keywords:** transformation, hardenability, chemical composition, austenite, carbon, welded joint

### Abstract

In this paper, based on the analysis of the dependence of temperature critical points of structural transformations on the chemical composition of steel, it is shown that carbon can be considered a determining factor influencing the kinetics of structure formation in carbon steels and their welded joints. With the carbon content increases, the period of inertia of diffusion (perlite) and intermediate (beinite) transformation of subcooled austenite increases, while the course of transformation accelerates. This creates preconditions for solving the task of development of diffusion and intermediate transformation of subcooled austenite in metal of welded joints prone to hardenability and prevents martensitic (non-diffusion) transformations. However, for the purposeful beginning of the indicated forms of transformations, an efficient method or a way of shortening the period of inertness of its decomposition within the predicted limits is necessary. Carbide-forming alloying elements increase the positive effect of carbon on  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation in the diffusion region and weak in the intermediate region. All other alloying elements under conditions of continuous cooling slow down the decomposition of subcooled austenite in the diffusion and intermediate region and increase the period of inertia, necessary for its onset.



## 1. Uvod

Hladne prsline i okrupnjavanje metalnog zrna u zoni uticaja toplote (ZUT) predstavljaju jedan od problema koji se javljaju pri zavarivanju čelika sklonih prokaljivosti [1-4]. Sklonost ka lomu, u prvom redu, pokazuju one zone zavarenog spoja koje posjeduju niži nivo plastičnosti i podvragavaju se intenzivnom naprezanju usled neravnomjernog zagrijavanja i faznih transformacija [1-3]. Pojava ovih defekata kod čelika je moguća već pri sadržaju ugljenika 0,01-0,15% i legirajućih elemenata 3% [1, 3].

Konvencionalni način poboljšanja kvaliteta zavarenih spojeva ugljeničnih čelika sklonih prokaljivosti, predviđa mogućnost maksimalnog približavanja realnih uslova njihovog hlađenja ka idealnom termičkom ciklusu. Ovo podrazumijeva ubrzano zagrijavanje metala ZUT-a do maksimalne temperature i ubranog hlađenja do temperature  $A_{r3}$ , što obezbjeđuje minimalnu dužinu njegovog boravka u temperaturnom intervalu  $A_{c3}-A_{r3}$  gdje se intenzivno razvijaju procesi pregrijavanja i rasta austenitnog zrna. Pri temperaturama nižim od  $A_{r3}$  idealni termički ciklus predviđa maksimalno usporeno hlađenje zavarivanog materijala u perlitnoj (difuzionoj) i beinitnoj (intermedijalnoj) oblasti, s ciljem razvoja perlitne i beinitne transformacije pothlađenog austenita i sprečavanje njegovog raspada u martenzitnoj (bezdifuzionoj) oblasti [3]. Ovo zapravo predstavlja ravnotežu, veoma blisko izotermičkim uslovima hlađenja u naznačenim temperaturnim intervalima, analogno termičkoj obradi.

Obezbijediti pri zavarivanju ovakvu kombinaciju uslova zagrijavanja i hlađenja praktično je nemoguće, jer termičko stanje zavarenih spojeva definiše pogonska energija zavarivanja [5].

Brzine zagrijavanja i hlađenja obrnuto je proporcionalna pogonskoj energiji zavarivanja [6]. Promijeniti ovu zakonitost samo na račun parametara zavarivanja je nemoguće. Zbog toga, u praksi se primjenjuje kombinacija niskog nivoa pogonske energije zavarivanja i zagrijavanja zavarivanog materijala. Najoptimalnije se pokazalo zagrijavanje materijala nakon zavarivanja. Iako su ove metode prilično efikasne, one smanjuju produktivnost zavarivanja, povećavaju potrošnju energije, obim posla i cijenu zavarene konstrukcije. Pored toga, ove tehnološke metode omogućavaju samo slabljenje prokaljivosti na račun procesa otpuštanja martenzitne strukture, no ne dozvoljava razvoj drugih oblika transformacija – perlitne i

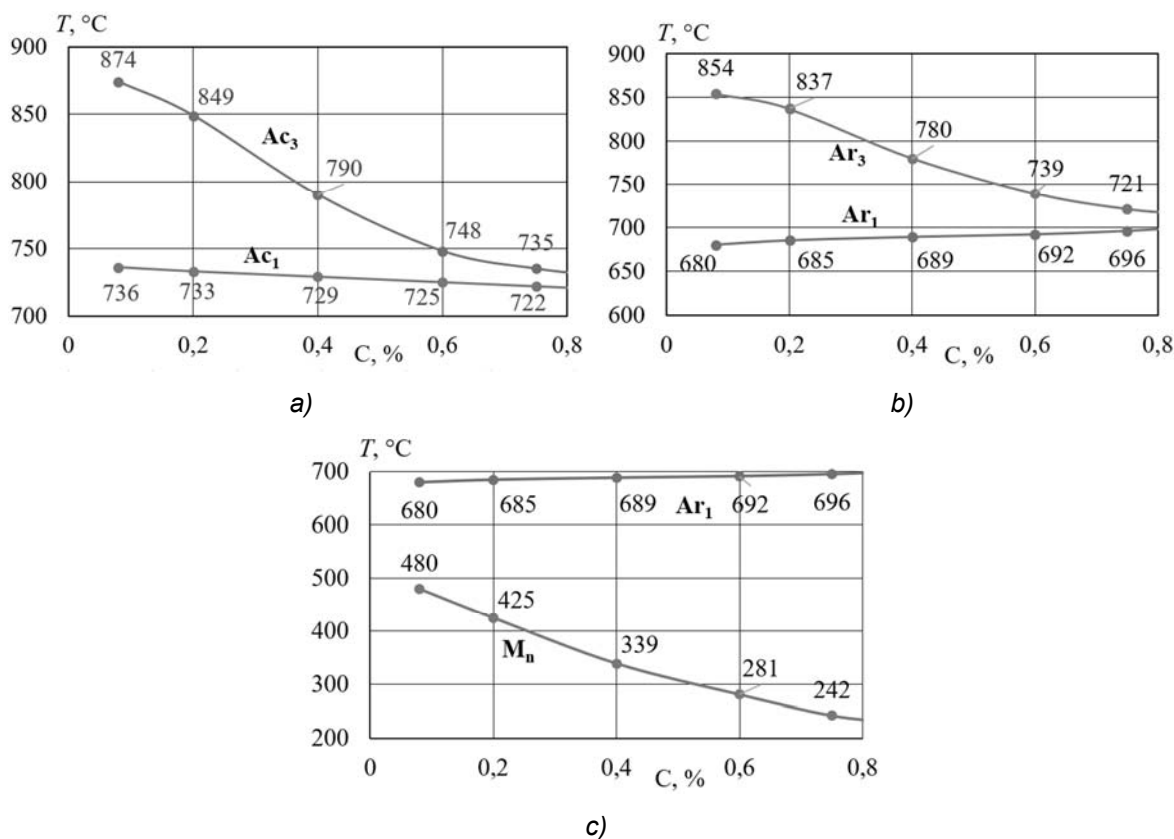
beinitne, što čini osnovni zadatak idealnog termičkog ciklusa zavarivanja.

## 2. Eksperiment i diskusija

Osnovni legirajući element koji ima dominantni uticaj na kinetiku stukturinih transformacija kod ugljeničnih čelika i njihovih zavarenih spojeva je ugljenik. Ostali legirajući elementi u nejednakom stepenu povećavaju ili smanjuju taj uticaj, no ne mijenjaju njegov karakter. Uticaju hemijskog sastava čelika na kinetiku njihovih stukturinih transformacija, naučnici iz oblasti zavarivanja posmatraju ugljenik kao negativan faktor. Povećanje njegovog sadržaja u čeliku, povezuje se sa pogoršanjem njegove zavarljivosti, povećanje sklonosti ka pregrijavanju metala zavarenog spoja i formiranje prsline u njima.

Na Slici 1 [7-10] prikazani su rezultati istraživanja koji nam pomažu u razumijevanju oblika uticaja ugljenika na temperature kritičnih tačaka stukturinih transformacija pri zagrijavanju i hlađenju ugljeničnih čelika. Ovi podaci ukazuju da povećan sadržaj ugljenika u čeliku doprinosi smanjenju vrijednosti temperature  $A_{c3}$  (sl.1a).

Stepen uticaja ugljenika na kritične temperature u fazi zagrijavanja je različit. U poređenju sa  $A_{c3}$  uticaj ugljenika na temperaturu  $A_{c1}$  je minimalan (sl.1a). Smanjenje temperature  $A_{c1}$  je ~10 puta manja nego što je to slučaj sa razlikom temperatura tačke  $A_{c3}$  istog čelika. Neravnomjeran uticaj sadržaja ugljenika na temperature  $A_{c1}$  i  $A_{c3}$  doprinosi skraćenju temperaturnog intervala austenitne transformacije od  $A_{c3}-A_{c1}=138^{\circ}\text{C}$  za 0,07%C do  $A_{c3}-A_{c1}=15^{\circ}\text{C}$  za 0,8%C (sl.1a). Intenzivno skraćenje temperaturnog intervala austenizacije i njegovo pomjeranje u oblast nižih temperatura ukazuje na ubrzanje procesa austenitne transformacije adekvatnom povećanju sadržaja ugljenika u čeliku, što korespondira s rezultatima istraživanja Sadovskog [11, 12].



**Slika 1.** Uticaj ugljenika na temperature kritičnih tačaka i ravnotežnih međukritičnih intervala bliskih izotermičkim uslovima: a) austenitna transformacija, b) perlitna transformacija pothlađenog austenita, c) beinitna transformacija pothlađenog austenita; Ac<sub>1</sub>, Ac<sub>3</sub> – temperature početka i kraja austenitne transformacije; Ar<sub>3</sub>, Ar<sub>1</sub> – temperature početka i kraja perlitne transformacije pothlađenog austenita; M<sub>n</sub> – temperatura martenzitne transformacije pothlađenog austenita

**Figure 1.** Influence of carbon on temperatures of critical points and equilibrium intercritical intervals close to isothermal conditions: a) austenitic transformation, b) pearlitic transformation of undercooled austenite, c) bainitic transformation of undercooled austenite; Ac<sub>1</sub>, Ac<sub>3</sub> – temperatures of the beginning and end of the austenitic transformation; Ar<sub>3</sub>, Ar<sub>1</sub> – temperatures of the beginning and end of pearlitic transformation of undercooled austenite; M<sub>n</sub> – temperature of martensitic transformation of undercooled austenite

Difuzioni raspad austenita (sl.1b) kod čelika s 0,07%C započinje pri temperaturi Ar<sub>3</sub>=854°C. Dalje povećanje sadržaja ugljenika u čeliku do 0,8%, doprinosi smanjenju temperature Ar<sub>3</sub>. Ovi podaci potvrđuju da povećanje sadržaja ugljenika u čeliku, pomjera početak difuzionog raspada austenita u oblast nižih temperatura. Temperatura završetka raspada (Ar<sub>1</sub>) raste (sl.1b). Povećanje temperature Ar<sub>1</sub> i skraćenje temperaturnog intervala difuzionog raspada austenita omogućava da se pretpostavi da povećanje sadržaja ugljenika u čeliku doprinosi ubrzanju procesa difuzionog raspada pothlađenog austenita.

Uticaj ugljenika na proces difuzionog raspada austenita nije jednoznačan. S jedne strane, povećan sadržaj ugljenika u čeliku doprinosi povećanju postojanosti austenita pri pothlađenju, pomjerajući njegov raspad u oblast niskih temperatura i povećava period inertnosti (inkubacioni period) transformacije [13], što se

negativno odražava na kinetiku formiranja strukture čelika. S druge strane, povećan sadržaj ugljenika može ubrzati transformaciju pothlađenog austenita [10], što predstavlja pozitivnu stranu njegovog uticaja na strukturne transformacije kod čelika.

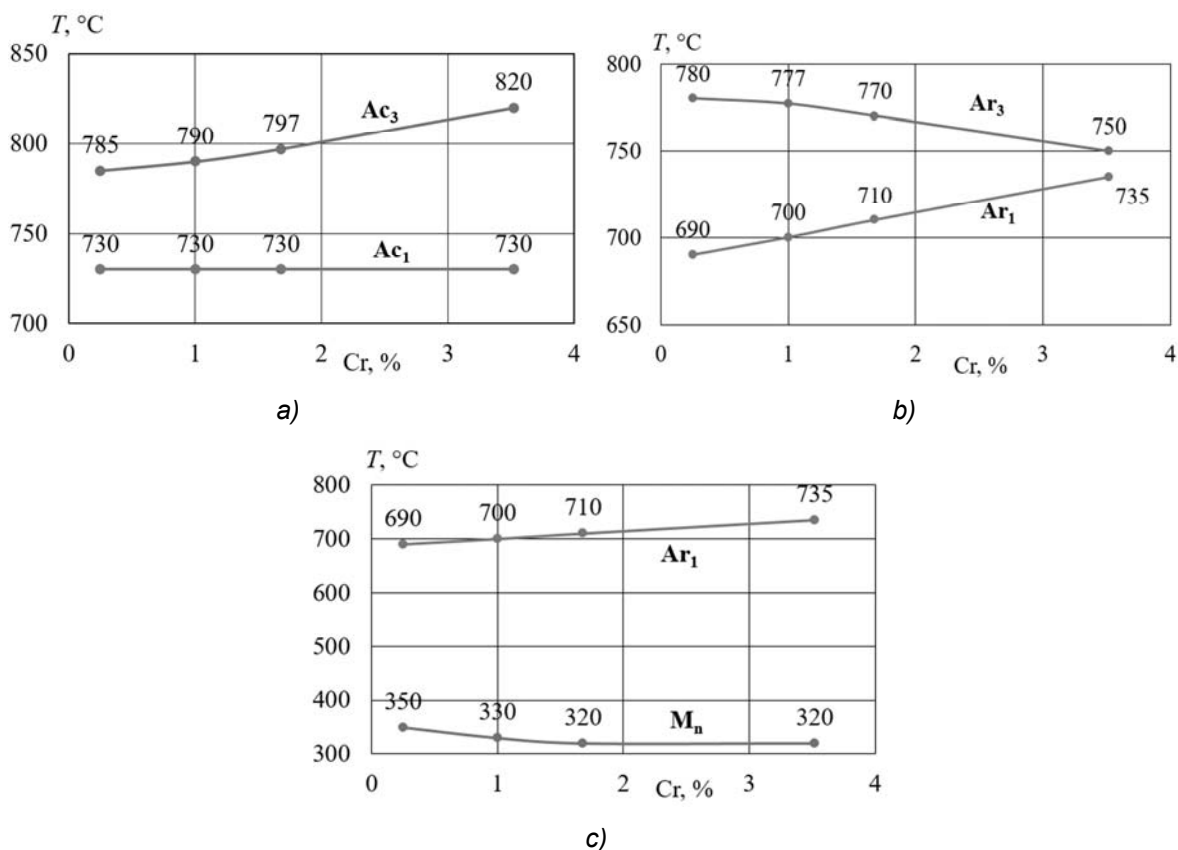
Kada su u pitanju drugi oblici transformacija pothlađenog austenita, uticaj ugljenika na iste se potkrepljuju rezultatima ispitivanja prikazanim na slici 1c [7-10]. Povišen sadržaj ugljenika u čeliku prati sniženje temperature martenzitne transformacije. Jednovremeno povećanje temperature Ar<sub>1</sub> i smanjenje M<sub>n</sub> sa povećanjem sadržaja ugljenika u čeliku dovodi do povećanja temperaturnog intervala intermedijalne transformacije koji je ograničen datim kritičnim tačkama (sl.1c). Slijedi logičan zaključak, sa povećanjem sadržaja ugljenika intermedijalna transformacija se kod čelika postepeno usporava.



Uticaj drugih legirajućih elemenata na temperature kritičnih tačaka faznih transformacija u čeliku nije jednoznačan i značajno je slabiji nego što je uticaj ugljenika. Ovi elementi mogu uticati na jačanje ili slabljenje uticaja ugljenika, ali nisu u stanju da promijene tendenciju koja mu je svojstvena.

Karakter uticaja elemenata koji formiraju karbide na temperaturama kritičnih tačaka strukturnih

transformacija pri zagrijavanju i hlađenju ugljeničnih čelika može se ocijeniti na primjeru hroma (sl.2) [7-9]. Poznato je da ovaj element, s jedne strane intenzivno formira karbide, a s druge strane je dobar austenizator [13]. Prisustvo hroma u čeliku, po pravilu, potpomaže povećanju temperature tačke  $Ac_3$  (sl.2a). Shodno tome, mijenja se i temperaturni interval austenizacije koji se širi.



**Slika 2.** Uticaj hroma na temperature kritičnih tačaka i ravnotežnih međukritičnih intervala bliskih izotermičkim uslovima: a) austenitna transformacija, b) perlitna transformacija pothlađenog austenita, c) beinitna transformacija pothlađenog austenita;  $Ac_1$ ,  $Ac_3$  – temperature početka i kraja austenitne transformacije,  $Ar_3$ ,  $Ar_1$  – temperature početka i kraja perlitne transformacije pothlađenog austenita,  $M_n$  – temperatura martenzitne transformacije pothlađenog austenita

**Figure 2.** Influence of chromium on the temperatures of critical points and equilibrium intercritical intervals close to isothermal conditions: a) austenitic transformation, b) pearlitic transformation of undercooled austenite, c) bainite transformation of undercooled austenite;  $Ac_1$ ,  $Ac_3$  – temperatures of the beginning and end of austenite transformation,  $Ar_3$ ,  $Ar_1$  – temperatures of the beginning and end of pearlite transformation of undercooled austenite,  $M_n$  – temperature of martensitic transformation of undercooled austenite

Prisustvo hroma u čeliku usporava difuzione procese pri njegovom zagrijavanju o čemu svjedoči proširenje temperaturnog intervala austenizacije, uglavnom, u oblasti visokih temperatura na račun intenzivnijeg rasta temperature  $Ac_3$ . To doprinosi skraćenju temperaturnog intervala rasta zrna i homogenizaciju austenita, a takođe skraćuje vrijeme boravka metala u istom. Mehanizam takvog uticaja hroma objašnjava u svom radu Šoršorov [14]. Karbidi hroma imaju visok nivo postojanosti i

raspoređuju se po granici zrna, te na taj način predstavljaju mehaničku barijeru za njihov rast. Dok se karbidi ne raspadnu intenzivni rast zrna i homogenizacija austenita u čeliku se ne uočavaju.

Bazirajući se na ove podatke i njihovim upoređenjem sa podacima o uticaju ugljenika na vrijednosti temperatura kritičnih tačaka strukturnih transformacija, možemo pretpostaviti da se transformacija pothlađenog austenita kod čelika sa



povišenim sadržajem hroma nalazi u oblasti viših temperatura, s obzirom na smanjenje nivoa homogenizacije austenita. Međutim, sve se dešava suprotno (sl.2b). Povećanje sadržaja hroma doprinosi smanjenju temperature  $Ar_3$  pri istovremenom povećanju temperature  $Ar_1$ .

Intenzitet uticaja hroma na intermedijalne i martenzitne transformacije ilustruje Slika 2c. Povećanje sadržaja hroma doprinosi neznatnom sniženju temperature martenzitne tačke. S obzirom na to da se temperatura  $M_n$  smanjuje, a temperatura  $Ar_1$  povećava, srazmjerno povećanju sadržaja hroma u čeliku širi se temperaturni interval beinitne transformacije, pa se može zaključiti da se transformacija usporava. Analogna tendencija se dobija i kod drugih čelika legiranih hromom ili drugim elementima koji formiraju karbide.

Povoljan uticaj hroma na kinetiku formiranja strukture čelika posledica je njegovog austenizujućeg djelovanja na metal. S jedne strane, legiranje čelika hromom doprinosi stabilizaciji austenita i povećava se njegova postojanost pri hlađenju [13, 14]. S druge strane, ubrzavaju se procesi u oblasti difuzione transformacije austenita, o čemu svjedoči još veće, u poređenju s ugljenikom, skraćivanje intervala  $Ar_3$ - $Ar_1$ .

Uticaj ostalih legirajućih elemenata u osnovi se manifestuje pomjeranjem međukristalnog temperaturnog intervala strukturnih transformacija u oblast nižih temperatura [7-10].

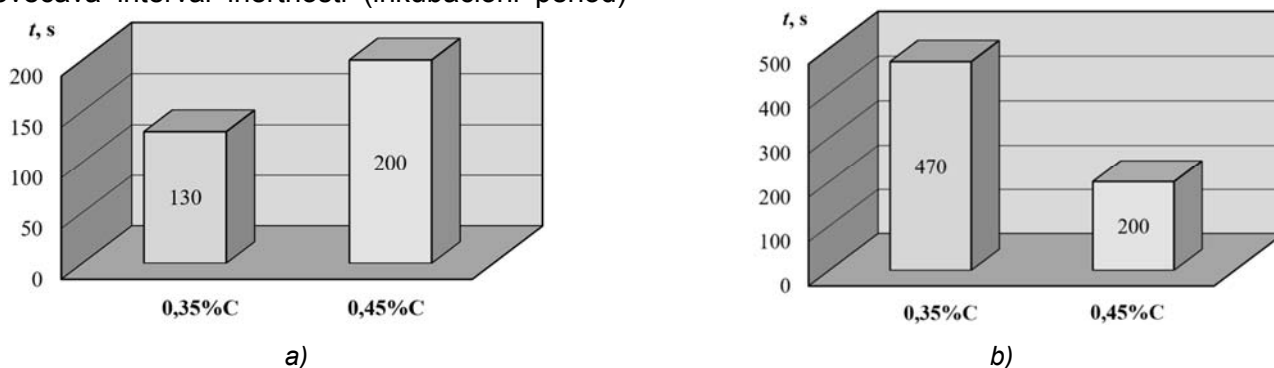
Prethodno navedeni podaci svjedoče, da se taj uticaj intenzivno manifestuje u svim stadijumima termičkog uticaja na čelik: pri zagrijavanju, hlađenju i zadržavanju čelika u definisanim temperaturnim intervalima. Pri tom, uticaj ugljenika na kinetiku formiranja strukture u čeliku nije jednoznačno. S jedne strane ugljenik doprinosi stabilizaciji austenita i povećava interval inertnosti (inkubacioni period)

njegovog raspada. Ovo pojačava tendenciju ka prokaljivosti, posebno tokom procesa koji su zasnovani na lokalnom termičkom uticaju na čelik, kao što je proces zavarivanja. S druge strane, povećanje sadržaja ugljenika u čeliku može dovesti do ubrzanja difuzionih procesa pri raspadu austenita, što omogućava da se u čeliku gore navedenim procesima stvore plastične strukture, koje se karakterišu povišenom stabilnošću i otpornošću na formiranje hladnih prslina.

Na osnovu prethodno izloženog možemo zaključiti da pri zavarivanju ugljeničnih čelika možemo svrsishodno upravljati procesom formiranja struktura metala zavarenog spoja, a samim tim i njegovim svojstvima. Međutim, sve prethodno izloženo se odnosi na uslove termičke ravnoteže, blisko izotermičkim.

Pri zavarivanju praktično je nemoguće obezbijediti uslove hlađenja identične ili približno identične uslovima termičke ravnoteže. U uslovima kontinualnog hlađenja, što je karakteristika procesa zavarivanja, uticaj ugljenika i legirajućih elemenata na kinetiku raspada pothlađenog austenita, kao što su rezultati ispitivanja pokazali (Slike 3-5), razlikuju se od uslova termičke ravnoteže. Rezultati ispitivanja ukazuju da povećanje sadržaja ugljenika u čeliku uslovljava usporenje difuzione transformacije pothlađenog austenita.

Na Slici 3 data je kinetika difuzionog raspada pothlađenog austenita u uslovima kontinualnog hlađenja u temperaturnom intervalu 700-600°C kod čelika sa sadržajem ugljenika 0,35% i 0,45%. Sa povećanjem sadržaja ugljenika u čeliku period inertnosti difuzionog raspada austenita se povećava ~50% (sl.3a). Pri tom, trajanje njegovog difuzionog raspada se skraćuje za više od dva puta (sl.3b), tj. transformacija se ubrzava saglasno povećanju sadržaja ugljenika u čeliku.



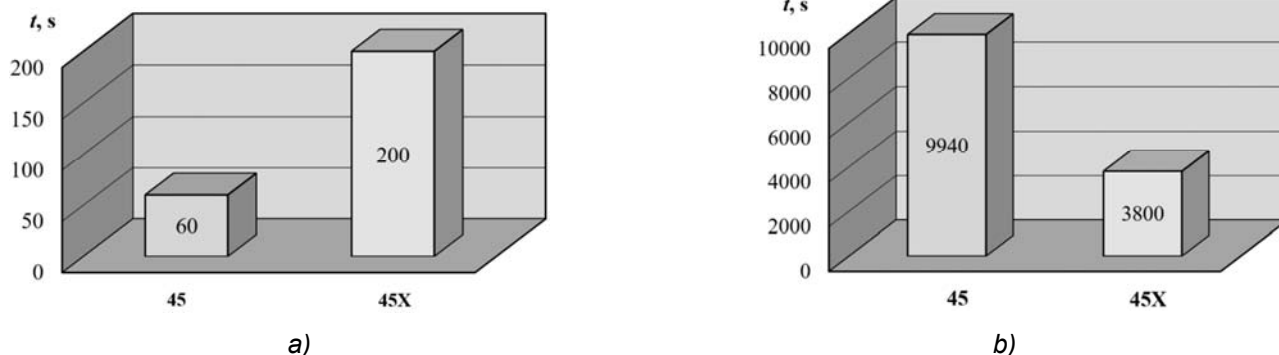
**Slika 3.** Uticaj ugljenika na kinetiku difuzionog raspada pothlađenog austenita ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) u uslovima kontinualnog hlađenja (700-600°C): a) period inertnosti raspada; b) trajanje raspada

**Figure 3.** The influence of carbon on the kinetics of diffusion decomposition of undercooled austenite ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) under continuous cooling conditions (700-600°C): a) decomposition inert period; b) duration of decomposition



Karakter uticaja hroma na kinetiku raspada pothlađenog austenita u difuzionoj oblasti u uslovima kontinualnog pothlađenja pokazuju čelici 45 i 45X (GOST) (sl.4). Njihov hemijski sastav je dat u Tabeli 1. Upoređujući podatke uočava se da

čelici legirani hromom uvećavaju interval inertnosti difuzione transformacije pothlađenog austenita više od 3 puta (sl.4a). U ovom slučaju, ista difuziona transformacija pothlađenog austenita se ubrzava za ~2,6 puta (sl.4b).



**Slika 4.** Uticaj hroma na kinetiku difuzionog raspada pothlađenog austenita ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) u uslovima kontinualnog hlađenja ( $700-680^{\circ}\text{C}$ ): a) period inertnosti raspada; b) trajanje raspada

**Figure 4.** The influence of chromium on the kinetics of diffusion decomposition of undercooled austenite ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) under continuous cooling conditions ( $700-680^{\circ}\text{C}$ ): a) decomposition inert period; b) duration of decomposition

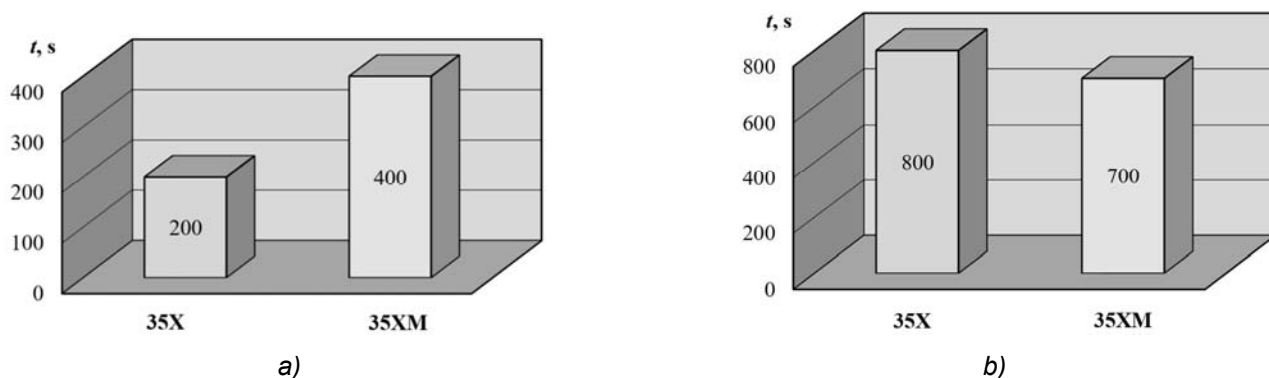
Analogni uticaj na kinetiku raspada pothlađenog austenita u difuzionoj oblasti pokazuju i drugi legirajući elementi tvorci karbida, kao što je molibden. Oni doprinose povećanju perioda

inertnosti transformacija, ali pri tom ubrzavaju sam raspad. Primjer - čelik 35X i 35XM (GOST) (sl.5), čiji su hemijski sastavi dati u Tabeli 1.

**Tabela 1.** Hemijski sastav čelika [9]

**Table 1.** Chemical composition of steel [9]

Čelik (GOST)	Sadržaj elemenata, %									
	C	Cr	Mo	Ni	Mn	Si	P	S	Cu	As
45	0,45-0,50	≤0,25	-	≤0,25	0,50-0,80	0,17-0,37	0,035	0,04	0,25	0,08
45X	0,41-0,49	0,80-1,10	-	≤0,30	0,50-0,80	0,17-0,37	0,035	0,035	0,30	-
35X	0,31-0,39	0,80-1,10	-	≤0,30	0,50-0,80	0,17-0,37	0,035	0,035	0,30	-
35XM	0,32-0,40	0,80-1,10	0,15-0,25	≤0,30	0,40-0,70	0,17-0,37	0,035	0,035	0,30	-
40XH	0,36-0,44	0,45-0,75	-	1,00-1,40	0,50-0,80	0,17-0,37	0,035	0,035	0,30	-
35ГC	0,30-0,37	≤0,30	-	≤0,30	0,80-1,20	0,60-0,90	0,40	0,45	0,30	-



**Slika 5** Uticaj molibdena na kinetiku difuzionog raspada pothlađenog austenita ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) u uslovima kontinualnog hlađenja ( $700-650^{\circ}\text{C}$ ): a) period inertnosti raspada; b) trajanje raspada

**Figure 5** The influence of molybdenum on the kinetics of diffusion decomposition of undercooled austenite ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) under continuous cooling conditions ( $700-650^{\circ}\text{C}$ ): a) decomposition inert period; b) duration of decomposition

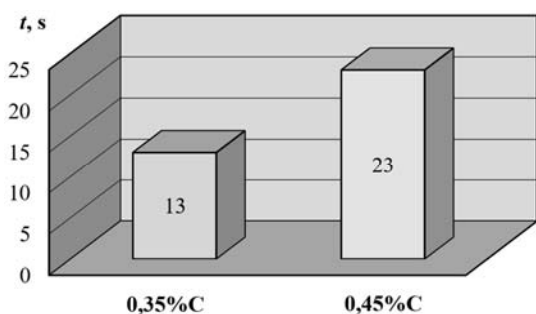


Karakter uticaja ugljenika i legirajućih elemenata tvoraca karbida na raspada pothlađenog austenita u intermedijalnoj oblasti pokazuju podaci prikazani na Slici 6-8.

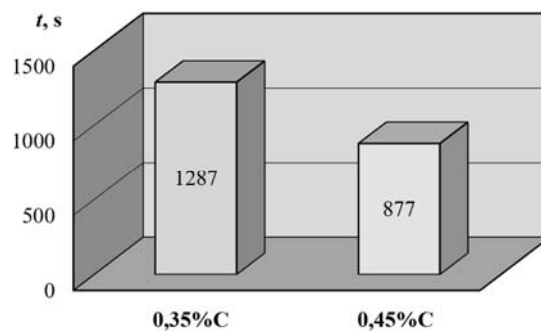
Povećanje sadržaja C u čeliku na intermedijalni raspada austenita ima isti efekat kao i u difuzionoj oblasti. Upoređujući čelike sa sadržajem ugljenika 0,35% i 0,45% uočava se da sa povećanjem sadržaja C period inertnosti intermedijalnog

raspada pothlađenog austenita se povećava ~80% (sl.6a). Istovremeno se interval njegovog poluraspada u temperaturnom intervalu 500-300°C skraćuje za ~32% (sl.6b).

Legiranje čelika elementima tvorcima karbida praćeno je usporenim intermedijalnim transformacijama i povećanjem perioda njegove inertnosti.



a)



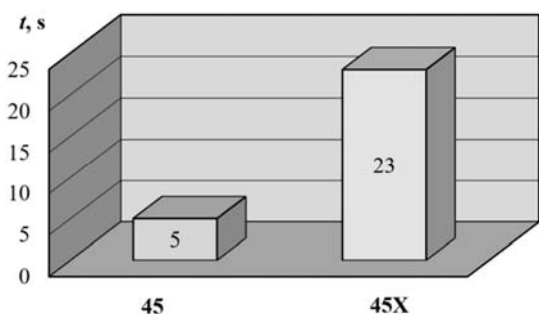
b)

**Slika 6.** Uticaj ugljenika na kinetiku intermedijalnog raspada pothlađenog austenita ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) u uslovima kontinualnog hlađenja (500-300°C): a) period inertnosti raspada; b) trajanje raspada

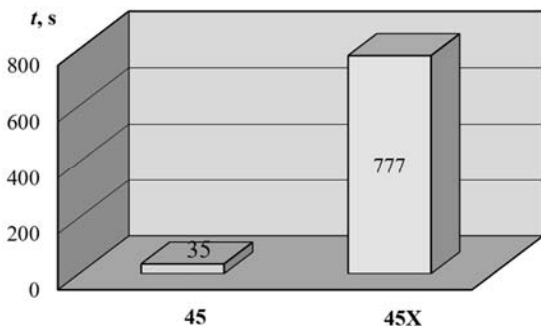
**Figure 6.** Influence of carbon on the kinetics of intermediate decomposition of undercooled austenite ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) under continuous cooling conditions (500-300°C): a) period of inertness of decomposition; b) duration of decomposition

Intermedijalni raspada austenita kod čelika 45 pri temperaturi 550°C započinje nakon perioda inertnosti koji traje 5 s (sl.7a) i traje 35 s u temperaturnom intervalu 550-350°C (sl.7b). U slučaju legiranja čelika hromom (45X) za početak intermedijalne transformacije pothlađenog austenita neophodan je period inertnosti od 23 s, što je ~5 puta više nego kod čelika 45 (sl.7a). Beinitna transformacija u čeliku 45X u temperaturnom intervalu 550- 350°C traje 777 s, što je ~22 puta više nego kod čelika 45 (sl.7b).

Legiranjem čelika sa nekoliko elemenata tvorcima karbida doprinosi daljem povećanju perioda inertnosti i produžetak raspada austenita u beinitnoj oblasti (sl.8). Za inicijaciju beinitne transformacije pri temperaturi 500°C, za čelik 35XM neophodan je period inertnosti veći za ~30% nego za čelik 35X (sl.8a). Beinitni raspada austenita u čeliku 35X u temperaturnom intervalu 500-400°C je za ~20% manji nego kod čelika 35XM (sl.8b).



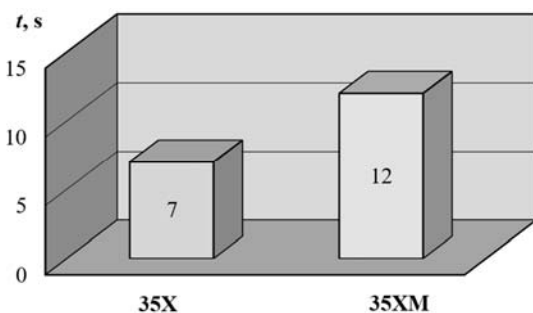
a)



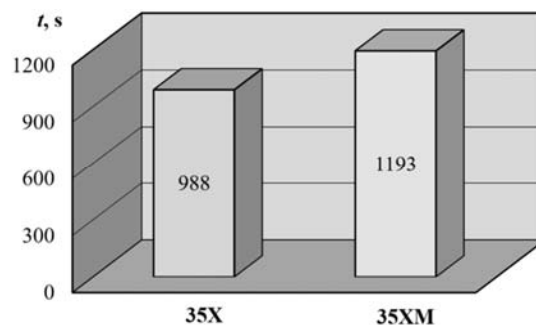
b)

**Slika 7.** Uticaj hroma na kinetiku intermedijalnog raspada pothlađenog austenita ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) u uslovima kontinualnog hlađenja (550-350°C): a) period inertnosti raspada; b) trajanje raspada

**Figure 7.** The influence of chromium on the kinetics of intermediate decomposition of undercooled austenite ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) under continuous cooling conditions (550-350°C): a) decomposition inert period; b) duration of decomposition



a)



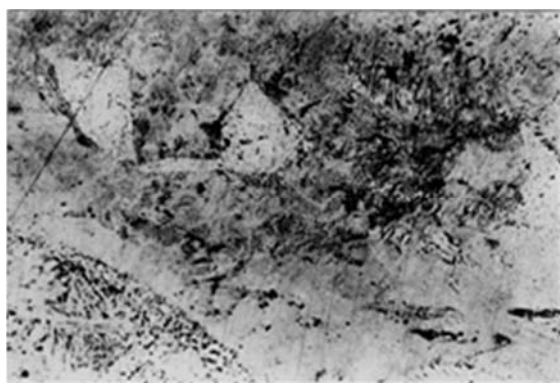
b)

**Slika 8.** Uticaj molibdena na kinetiku intermedijalnog raspada pothlađenog austenita ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) u uslovima kontinualnog hlađenja (500-400°C): a) period inertnosti raspada; b) trajanje raspada

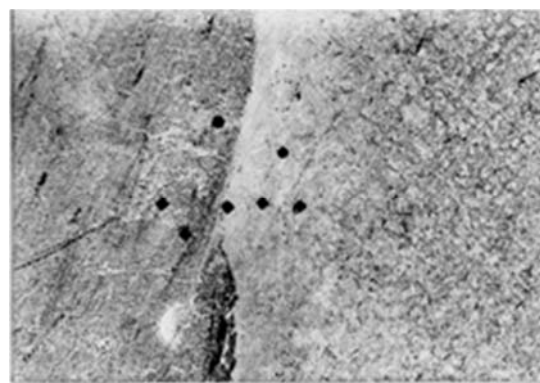
**Figure 8.** The influence of molybdenum on the kinetics of intermediate decomposition of undercooled austenite ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) under continuous cooling conditions (500-400°C): a) decomposition inert period; b) duration of decomposition

Svi drugi legirajući elementi u uslovima kontinualnog hlađenja usporavaju raspad pothlađenog austenita u difuzionoj i intermedijalnoj oblasti i povećavaju period inertnosti, neophodnog za njegov početak.

Primjena rezultata ovih ispitivanja pri zavarivanju u zaštitnoj atmosferi čelika 40XH i 35ГC (GOST) (tab.1), sklonih prokaljivosti omogućilo je formiranje u metalu ZUT-a zavarenog spoja čelika 40XH beinitno-perlitnu strukturu (sl.9a), a u čeliku 35ГC – beinitnu (sl.9b).



a)



b)

**Slika 9.** Mikrostrukture metala u ZUT-u zavarenih spojeva čelika: a) 40XH – beinitno-perlitna (uvećnje x400); b) 35ГC – beinit (uvećanje x120)

**Figure 9.** Metal microstructures in HAZ of welded steel joints: a) 40XH – bainite-pearlite (magnification 400 times); b) 35GS – beinit (magnification 120 times)

Zavarivanje je izvršeno pri istim uslovima: ista pogonska energija bez predgrijavanja i naknadne termičke obrade zavarenih spojeva, dodatni materijal puna žica feritno-perlitne klase. Dobijeni rezultati govore da u pomenutim uslovima zavarivanja, u metalu zavarenog spoja čelika s visokim sadržajem ugljenika, legiranog hromom, raspad austenita je započeo u difuzionoj oblasti i završio se u intermedijalnoj. U zavarenim spojevima čelika s niskim sadržajem ugljenika i koji u svom sastavu nemaju elemente tvorce karbida, raspad austenita se desio u intermedijalnoj oblasti. Dakle, u zavarenim spojevima čelika s višim sadržajem ugljenika formirana je povoljnija

struktura s višim pokazateljima duktilnosti, plastičnosti i otpornosti na prsline.

Analiza dobijenih rezultata ispitivanja pokazuju da u uslovima kontinualnog hlađenja, koji odgovaraju termičkim ciklusima zavarivanja, povišeni sadržaj ugljenika kod čelika izaziva ubrzanje raspada pothlađenog austenita u difuzionoj i intermedijalnoj oblasti. Ovo stvara preduslove za rješenje zadatka razvoja difuzione i intermedijalne transformacije pothlađenog austenita u metalu zavarenih spojeva čelika, sklonih prokaljivosti i upravljanjem kinetikom formiranja njihovih struktura i svojstava.



#### 4. Zaključak

Analiza prikazanih zakonitosti potvrđuje da se kinetika transformacije pothlađenog austenita u uslovima kontinualnog hlađenja značajno razlikuje od uslova termičke ravnoteže.

U uslovima neprekidnog hlađenja, koji odgovaraju uslovima termičkog ciklusa, povišeni sadržaj ugljenika u čeliku doprinosi ubrzanju raspada pothlađenog austenita u difuzionoj i intermedijalnoj oblasti. Legirajući elementi tvorci karbida inteziviraju ovu tendenciju u difuzionoj oblasti i slabe u intermedijalnoj oblasti, usporavajući beinitni raspad austenita. Ostali legirajući elementi usporavaju raspad austenita u svim temperaturnim oblastima. U uslovima kontinualnog hlađenja povećani sadržaj ugljenika stvara preduslove za rješavanje problema razvoja difuzione i intermedijalne transformacije pothlađenog austenita u metalu zavarenih spojeva i ciljanog upravljanja procesom formiranja struktura i svojstava zavarenih spojeva ugljeničnih čelika.

Negativni uticaj ugljenika izražen je u njegovom uticaju na povećanje perioda inertnosti difuzionog i intermedijalnog raspada austenita. Zbog toga za ciljano iniciranje navedenih vrsta transformacija neophodan je efektivni postupak snižavanja postojanosti austenita i skraćenje perioda inertnosti njegovog raspada.

#### Literatura / References

- [1] Макара, А.М., Мосендз, Н.А., Сварка высокопрочных сталей, К. Техніка, Кієво, 1971.
- [2] Шоршоров, М.Х., Смирнов, Б.А., Белов, В.В., Об особенностях превращения аустенита при сварке плавлением, Сварочное производство, 11 (1959), pp. 12-15.
- [3] Патон, Б.Е., Технология электрической сварки плавлением, М.: Машиностроение, Moskva, 1974.
- [4] Davidson, J.A., Konkol P.j., Sovak, J.F., Assessing fracture toughness and cracking susceptibility of steels weldments - A review, Welding Research Council, New York, 1989.
- [5] Рыкалин, Н.Н., Пугин, А.И., Тепловые процессы при сварке плавлением. М.: Профиздат, Moskva, 1959.
- [6] Волченко, В.Н., Ямпольский, В.М., Винокуров, В.А., Парахин, В.А., Ермолаева, В.И., Макаров, Э.Л., Григорьянц, А.Г., Гаврилюк, В.С., Шип, В.В., Теория сварочных процессов: учебник, под ред. В.В. Фролова. М.: Высшая школа, Moskva, 1988.
- [7] Марочник стали для машиностроения, М.: Науч. исслед. ин-т. информации по машиностроению, Moskva, 1968, p.600.

#### 4. Conclusion

The analysis of the presented lawfulness confirms that the kinetics of the transformation of undercooled austenite under conditions of continuous cooling is significantly different from conditions of thermal equilibrium. In the conditions of continuous cooling, which correspond to the conditions of the thermal cycle, the increased carbon content in the steel contributes to the acceleration of the decomposition of undercooled austenite in the diffuse and intermediate regions. Carbide-forming alloying elements intensify this tendency in the diffusion region and weaken it in the intermediate region, slowing down the bainite decomposition of austenite. Other alloying elements slow down the breakdown of austenite in all temperature ranges. In the conditions of continuous cooling, the increased carbon content creates prerequisites for solving the problem of the development of diffusion and intermediate transformation of undercooled austenite in the metal of welded joints and targeted management of the process of forming structures and properties of welded joints of carbon steels. The negative influence of carbon is expressed in its influence on increasing the period of inertness of diffusion and intermediate decomposition of austenite. Therefore, for the targeted initiation of the mentioned types of transformations, an effective procedure for lowering the durability of austenite and shortening the period of inertness of its decomposition is necessary.

- [8] Марочник стали для машиностроения. М.: Науч. исслед. ин-т. информации по машиностроению, Moskva, 1965, p.594.
- [9] Сорокин, В.Г., Волосникова, А.В., Вяткин, С.А., Марочник сталей и сплавов, под ред. В.Г. Сорокина, М.: Машиностроение, Moskva, 1989.
- [10] Савицький, О.М., Шкрабалюк, Ю.М., Особливості впливу вуглецю на кінетику перетворення переохолодженого аустеніту в дифузійній і проміжній областях, Металознавство та обробка металів, 4(2013), pp. 28-34.
- [11] Садовский, В.Д., Превращения переохлажденного аустенита. М.: Металлургиздат, Moskva, 1947.
- [12] Садовский, В.Д., Структурные превращения при закалке и отпуске конструкционных сталей, Свердловск: Издательство уральского филиала АН СССР, 1945.
- [13] Гуляев, А.П., Металловедение, М.: Металлургия, Moskva, 1966.
- [14] Шоршоров, М.Х., Белов, В.В., Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке. М.: Наука, Moskva, 1972.



## Savetovanje sa međunarodnim učešćem Zavarivanje 2022

U periodu od 12 - 15. oktobra 2022. u hotelu Omorika na Tari, održano je 32. Savetovanje sa međunarodnim učešćem ZAVARIVANJE 2022 / WELDING 2022 u organizaciji DUZS i tehničkoj organizaciji agencije BBN Congress Management.



Zajednička fotografije učesnika savetovanja „Zavarivanje 2022“

Savetovanje je pokazalo je da su u stalnom porastu aktivnosti iz oblasti zavarivanja, kako u Srbiji tako i u regionu jugoistočne Evrope, odakle su bili praktično svi učesnici. U prilog ovome idu činjenice da je bilo preko 90 učesnika i/ili autora i koautora iz 9 zemalja: Srbije, Bosne i Hercegovine, Severne Makedonije, Hrvatske, Crne Gore, Nemačke, Slovenije, Ukrajine i Australije.

Kao prvi i verovatno najvažniji zaključak je da je Savetovanje bilo veoma uspešno i uz prisustvo eminentnih stručnjaka iz Srbije i regiona. Izloženo je preko 20 radova. Izloženi radovi su pokazali da su praktično svi segmenti i tematske celine Skupa bili predmet interesovanja i rada ne samo mašinske i metaloprerađivačke industrije, već i da su postignuti izuzetni rezultati u proizvodnom i tehnološkom delu. Posebno treba istaći da su u okviru Savetovanja prikazani rezultati istraživanja i razvoja novih tehnologija i fenomena, koji su bili predmet izloženih radova. Zaključeno je da je kvalitet radova na visokom nivou, što je i ranije bio slučaj kod Savetovanja "ZAVARIVANJE".

Značajno je napomenuti da je ovo Savetovanje bilo u duhu obeležavanja 70 godina od osnivanja i uspešnog rada Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji. Podsećanje na godine zajedničkog rada i saradnje sa Društvima iz bivših republika Jugoslavije je izazvalo i pozitivne emocije, pri čemu nisu izostale i čestitke od strane predstavnika zavarivačkih udruženja iz svih zemalja bivše zajedničke države.



Fotografije sa savetovanja „Zavarivanje 2022“

Nastavak na strani 166



Nikola Šibalić<sup>1,a</sup>, Darko Bajić<sup>1</sup>, Marko Mumović<sup>1</sup>

# STUDIJA ZAVARIVANJA SUČEONIH I UGAONIH SPOJEVA KORIŠĆENJEM POSTUPKA ZAVARIVANJA TRENJEM SA MEŠANJEM (FSW)

## STUDY OF WELDING OF BUTT AND FILLET WELDS USING THE FSW METHOD

### Originalni naučni rad / Original scientific paper

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

### Rad primljen / Paper received:

Oktobar 2021.

### Rad prihvaćen / Paper accepted:

Jun 2022.

**Ključne reči:** FSW, legura aluminijuma 6082-T6, sučeoni spoj, ugaoni spoj

### Rezime

Poslednjih godina, nekonvencionalni postupak zavarivanja trenjem sa mehaničkim mešanjem (FSW), se sve više primjenjuje u industrijskoj proizvodnji, prvenstveno za zavarivanje legura aluminijuma, odnosno limova, velike dužine i debljine. Zbog svojih specifičnosti u odnosu na konvencionalne postupke, koje se prvenstveno odnose na rotacioni alat koji ima veliku proizvodnost, odnosno vijek trajanja, ovim postupkom je moguće dobiti zavarene spojeve i do 1000 m dužine sa jednim alatom. Ovaj postupak se može koristiti i za dobijanje konstrukcionih profila kao npr. „L” profila. U radu je izvršeno zavarivanje flaha od legure aluminijuma 6082-T6 debljine 7.8 mm, sučeono i u obliku ugaonog spoja, tako da je moguće izvršiti komparativnu analizu zavarenih spojeva. Tokom odvijanja procesa izvršeno je mjerenje komponenti sila kod sučeonog spoja u tri normalna pravca ( $F_z$ ,  $F_x$  i  $F_y$ ). FSW je u poređenju sa konvencionalnim postupcima ekološki čista tehnologija, jer se tokom odvijanja procesa, materijal se ne topi, ne javljaju se štetna isparenja, štetna zračenja, svjetlosni bljesak, nema atmosfere zaštitnih gasova ni dodatnog materijla, što karakteriše sve konvencionalne postupke. Za potrebe ovog istraživanja konstruisani su i urađeni specijalni pomoćni pribori, kao i specijalni oblici konusnog alata.

### Adresa autora / Author's address:

<sup>1</sup>Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Podgorica, Crna Gora

E mail: <sup>a</sup>nikola@ucg.ac.me

**Keywords:** FSW, aluminium alloy 6082-T6, butt joint, corner joint

### Abstract

In recent years, the unconventional FSW method has been increasingly used in industrial production, primarily for welding aluminium alloys or sheets of large length and thickness. Due to its specifics in relation to conventional methods, which primarily refer to rotating tools that have high productivity, i.e. service life, these methods allow us to obtain welded joints up to 1000 m in length with one tool. This procedure can also be used to obtain construction profiles such as "L" profile. In this paper, welding of a sheet of aluminium alloy 6082-T6 with a thickness of 7.8 mm is conducted with a butt and fillet welds, so that it is possible to perform a comparative analysis of welded joints. During the process, the components of the forces on the butt joint were measured in three normal directions ( $F_z$ ,  $F_x$ , and  $F_y$ ). FSW is an environmentally clean technology when compared to conventional processes because during the process the material does not melt, there are no harmful fumes, harmful radiation, light flash, no atmosphere of shielding gases or additional material, which characterizes all conventional processes. For the needs of this research, special auxiliary accessories were constructed and manufactured, as well as special shapes of conical tools.

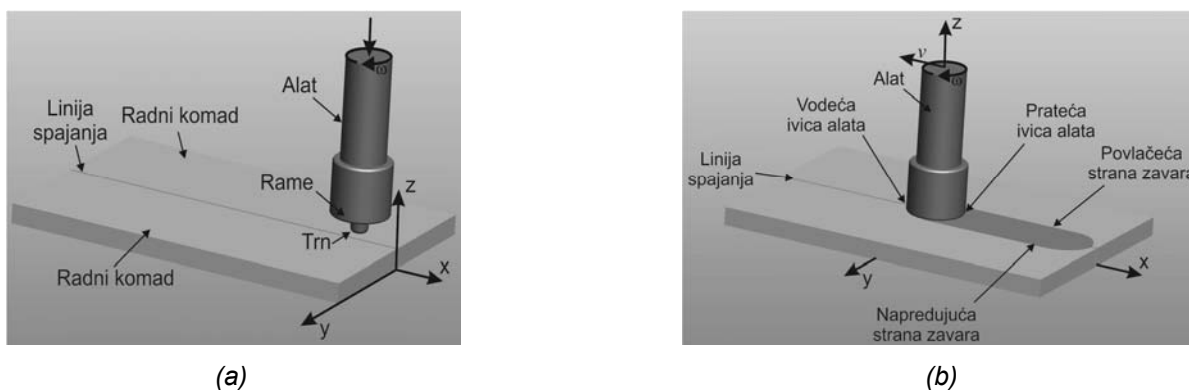


## 1. Uvod

Devedesetih godina prošlog vijeka razvijen je novi metod spajanja istorodnih i raznorodnih materijala koji se izvodi u čvrstom stanju bez topljenja materijala poznatiji pod imenom zavarivanje trenjem sa miješanjem (*Friction Stir Welding* - FSW), ali i pod imenom zavarivanje trenjem alatom. Proces je patentiran od strane Instituta za zavarivanje (*The Welding Institute* –

TWI) iz Engleske 1991. godine, gdje je Wayne M. Thomas uspješno spojio limove legure aluminijuma [1-3].

Alat koji se koristi u procesu zavarivanja je cilindričnog oblika i sastoji se iz dva koncentrična dijela koja rotiraju velikom brzinom. Dio alata većeg prečnika naziva se rame (*shoulder*) dok se dio manjeg prečnika naziva trn (*pin*) [4]. Proces odvijanja postupka prikazan je na Slici 1.



**Slika 1.** Postupak FSW: (a) Početak postupka FSW; (b) Odvijanje postupka FSW

**Figure 1.** FSW process: (a) beginning of the FSW process; (b) execution of FSW process

Rotirajući alat prilazi liniji spoja i zariva se u materijal (Slika 1a), pri čemu se generiše toplota. Na ovaj način se povećava temperatura do tople plastične obrade kada se vrši mahaničko miješanje i spajanje materijala, a pri tome se omogućava da se alat kreće u longitudinalnom pravcu odnosno duž linije spajanja (Slika 1b). Nakon prolaska alata duž linije spajanja ostaje čvrsta faza šava (spoja), gdje gornja ravan ostaje glatka i ravna zahvaljujući ramenu alata, dok se donja ravan radnog predmeta formira od podloge na koju se radni komad oslanja i ona je takođe glatka i ravna [1-3].

## 2. Primjena postupka

Metoda spajanja materijala trenjem je vrlo brzo pronašla svoju primjenu u brodogradnji, avio i svemirskoj industriji, željezničkoj i drugim industrijama. Prvenstveno se koristi za spajanje limova veće debljine.

Zbog svojih osobenosti, postupak FSW se u brodogradnji najviše koristi za zavarivanje bokova broda, podova, pregrada, konstrukcije broda, jarbola, čamaca za jedrenje itd., jednostavnih platformi od aluminijuma zaključno sa platformama za slijetanje helikoptera na brodovima. Posljednjih godina postupak FSW intenzivno se koristi u proizvodnji željezničkih vagona, vagona cistijerni, putničkih vagona, tramvaja, teretnih vagona, tijela

kontejnera, itd. Pri izradi vozova nove generacije postupak FSW se koristi pri zavarivanju: noseće konstrukcije, stranica voza, krovova, kao i mnogih drugih elementa koji se izrađuju od legura aluminijuma. Umjesto tradicionalnih elektro-lučnih postupaka zavarivanja, sada se u željezničkoj industriji prvenstveno koristi postupak FSW [5- 8].

Dobre karakteristike i visoka pouzdanost zavarenih spojeva dobijenih postupkom FSW došle su do izražaja u izradi velikog broja različitih djelova u avio i svemirskoj industriji. Kod Space Shuttle-a spojevi spoljašnjih rezervoara za gorivo od nedavno se rade isključivo postupkom FSW. Ovo omogućuje da se ovi rezervoari rade od specijalnih legura *Al-Li* 2195, čime se njihova masa značajno smanjila. U avio industriji preko 40.000 zakivaka zamijenjeno je spojevima izvedenim postupkom FSW, sa tendencijom daljeg rasta. Kada su u pitanju visoko odgovorni spojevi, obično se koristi postupak FSW. Kako je postupak FSW visoko produktivan, vrijeme izrade rezervoara za gorivo kod Delta programa u fabrikama Boing je skraćeno sa 23 na 6 dana, a ukupni troškovi su smanjeni za 60% [7].

Zavarivanje postupkom FSW, koristi se i u nekoliko vodećih svjetskih automobilskih kompanija. Cilj je da se proizvedu vozila manje



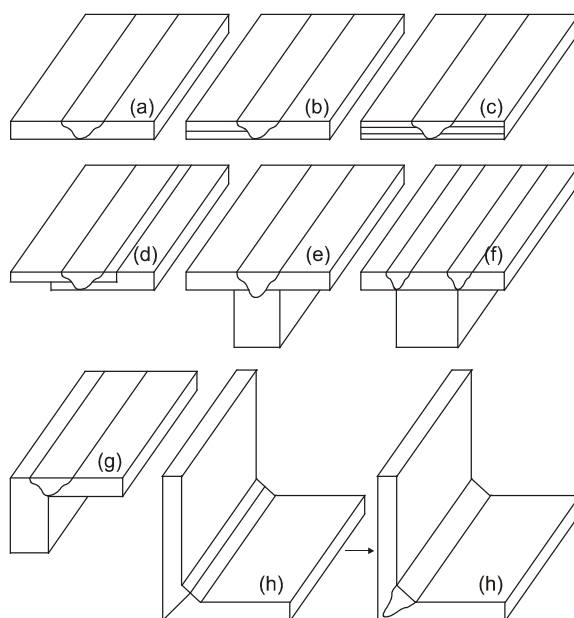
težine, čime se povećava njihova nosivost i smanjuje potrošnja goriva, pa se i smanjuje zagađenje životne sredine. Ovaj postupak zavarivanja se koristi pri izradi: motora i šasija, veze sa hidrauličnim cijevima, karoserija, tijela kamiona, cistijerni za gorivo, prikolica, autobusa i vozila za prevoz na aerodromima, okvira motocikala i bicikala itd. U firmi Shoma Aluminium & Rubber (Japan) zavarene su vulkanizirane cijevi prečnika od 20 mm do 30 mm. Ove cijevi se koriste kod izrade amortizera za putničke automobile [5]. Zavarivanja postupkom FSW, koristi se i pri proizvodnji: kućišta elektromotora, rashladnih ploča, kuhinjske opreme, bijele tehnike, benzinskih rezervoara i plinskih boca, namještaja itd.

Pored zavarivanja legura aluminijuma, FSW postupak se uspješno primjenjuje i za zavarivanje

legura bakra, legura magnezijuma, legura titanijuma, cink, olovo, plastika, ugljeničnih čelika, nisko legiranih čelika, austenitnih, martenzitnih i dupleks čelika, kao i legura nikla [7]. Takođe, postupak FSW se koristi i za spjanje materijala koji se konvencionalnim elektro-lučnim postupcima ne mogu zavarivati, kao što je aluminijum i bakar, aluminijum i određene vrste čelika, čelika i titanijuma [3].

### 3. Vrste zavarenih spojeva

Postupkom FSW mogu se spajati limovi i pločasti djelovi praktično u svim položajima, u dijapazonu debljina od 0.5 mm do 75 mm od legura aluminijuma i do 25 mm od legura *Ti* i čelika. Ovim postupkom najčešće se izrađuju sučeoni i preklopni, a mnogo ređe ugaoni spojevi (šavovi) koji su prikazani na Slici 2 [3, 7].



**Slika 2.** Vrste zavarenih spojeva dobijenih postupkom FSW (a) sučeoni spoj; (b) kombinovani sučeoni i preklopni spoj; (c) višestruki preklopni spoj; (d) upušteni preklopni spoj; (e) T spoj dva elementa; (f) T spoj tri elementa; (g) ugaoni-sučeoni spoj; (h) ugaoni spoj [3, 7]

**Figure 2.** Types of welded joints obtained by the FSW process (a) butt joint; (b) combined butt and lap joint; (c) multiple lap joint; (d) recessed lap joint; (e) T junction of two elements; (f) T junction of three elements; (g) fillet-butt joint; (h) fillet joint [3, 7]

Najčešće se sučeono spajaju radni komadi debljine od 1.2 mm do 50 mm. Zavarivanje može da se izvede jednostrano ili dvostrano. Najoptimalnije je zavarivanje sučeonih spojeva debljine 1.6 mm do 10 mm, a preklopnih, debljine 1.2 mm do 6.4 mm [5]. Zavarivanje može da se izvodi sa jednim ili sa više alata istovremeno, sa jedne ili sa obje strane limova, tako da se u jednom prolazu dobija veći broj spojeva. Pomoću postupka FSW mogu da se realizuju ne samo ravni

pravolinijski, već i krivolinijski spojevi različite konfiguracije u različitim položajima, uključujući i tzv. nad glavom. U tom pogledu, praktično nema velikih ograničenja. Pored toga, razvoj tačkastog zavarivanja trenjem FSW omogućava još širu njegovu primjenu, čak i u uslovima montaže specifičnih djelova. Dužina spoja može da bude ograničena jedino veličinom postolja i za sada se kreće do približno 20 m. Pored visokih mehaničkih svojstava, zavareni spoj ima glatku površinu i



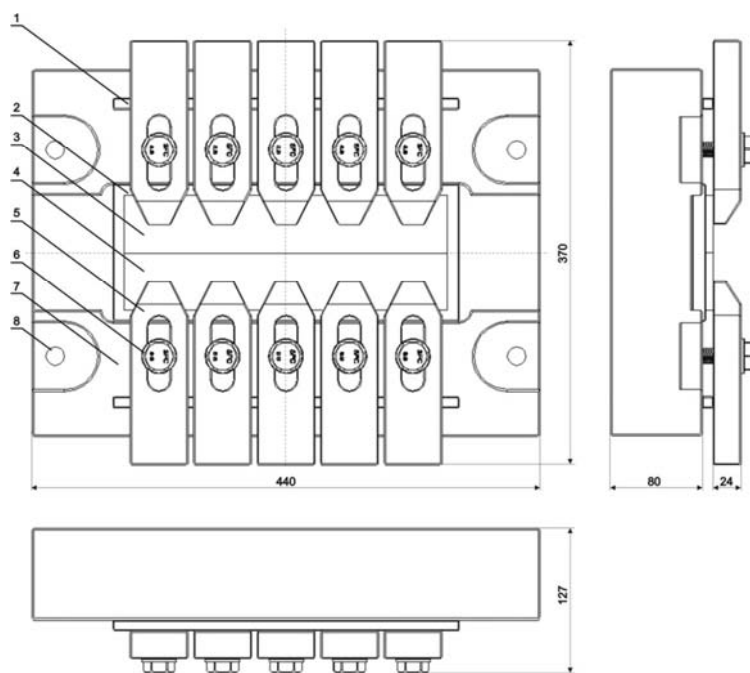
dodatna mehanička obrada u velikom broju slučajeva nije potrebna. Istovremeno, kod postupka FSW gubitka materijala je izuzetno mali, što je važna karakteristika i prednost u odnosu na mnoge druge postupke zavarivanja. Sa tog aspekta je postupak FSW izuzetno ekonomičan. Postupak FSW je najprije testiran na aluminijumu kao materijalu koji se u savremenoj industriji veoma mnogo koristi ali kod koga se konvencionalnim elektrolučnim postupcima otežano dobijaju kvalitetni spojevi zbog izražene pojave poroznosti šava i distorzije djelova. Obje pojave su veoma štetne, zahtijevaju skupu dodatnu obradu kojom ne mogu potpuno da se otklone, a posebno su izražene kod limova [7].

#### 4. Eksperimentalna zavarivanja sučeonih spojeva

Kako se ovaj postupak u osnovi najviše koristi za zavarivanje sučeonih spojeva, u ovom radu su izvršena eksperimentalna istraživanja i mjerenje komponenti sila kod zavarivanja legure aluminijuma

6082-T6 debljine 7.8 mm, koja su preduslov za dobijanje nekog konstrukcionog profila, odnosno „L” profila ili ugaonog spoja. Kod postupka FSW, za izvođenje eksperimentalnih istraživanja neophodna je mašina velike krutosti, sa radnim stolom koji ima mogućnost pomjeranja u prostoru u tri normalna pravca, ili sa „automatskom pokretnom glavom” na kojoj se nalazi alat za zavarivanje, a radni komadi miruju. Usled specifičnosti procesa FSW i da bi se izvršila predviđena ispitivanja u ovom radu, zbog pogodnosti mjerenja komponenti sila (vertikalne sile  $F_z$ , uzdužne sile  $F_x$ , bočne sile  $F_y$ ), u eksperimentu je korišćena mašina za obradu metala rezanjem - horizontalna glodalica [6].

Za izvođenje postupka FSW, kao i za mjerenje traženih parametara, bilo je neophodno napraviti pomoćni pribor, na koji će se montirati mjerna oprema kao i sprovesti sam proces zavarivanja. Na radni sto vertikalne glodalice postavljen je, pomoćni pribor koji se sastoji od noseće ploče, oslone ploče i stezača radnih komada (Slika 3) [6].

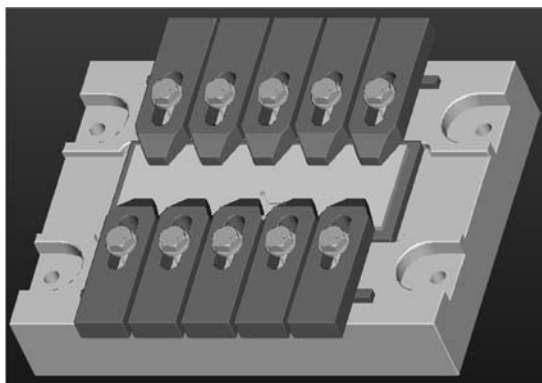


**Slika 3.** Pomoćni pribor za FSW: 1 - odstojnik, 2 - oslona ploča, 3 i 4 - radni komad, 5 - stezač radnih komada, 6 - zavrtanj sa podloškom, 7 - noseća ploča, 8 - otvor za specijalne nosače

**Figure 3.** Auxiliary accessories for FSW: 1 - spacer, 2 - support plate, 3 and 4 - workpiece, 5 - workpiece clamp, 6 - screw with washer, 7 - carrier plate, 8 - hole for special supports

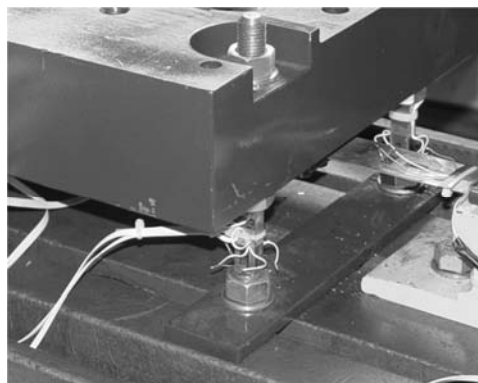
Kompletan sklop pomoćnog pribora dizajniran je u softveru CREO (Slika 4). Da bi se moglo izvršiti mjerenje komponenti sila, napravljena su četiri specijalna nosača noseće ploče, na koje su postavljeni davači za mjerenje sila (tenziometrijske mjerne trake). Na mjestu postavljanja mjernih traka, specijalni nosači noseće ploče su pravougaonog poprečnog presjeka. To omogućava mjerenje

savijanja specijalnih nosača u x - longitudinalnom pravcu i y - bočnom pravcu. Za mjerenje sile u z - aksijalnom pravcu, takođe se koriste mjerne trake koje su opterećene na pritisak. Dimenzionisanje specijalnog nosača je vršeno na osnovu očekivanih opterećenja u x, y i z pravcu. Na Slici 5, prikazane su postavljene mjerne trake za mjerenje komponenti sila.



**Slika 4.** 3D prikaz pomoćnog pribora

**Figure 4.** 3D view of auxiliary equipment



**Slika 5.** Specijalni nosači noseće ploče

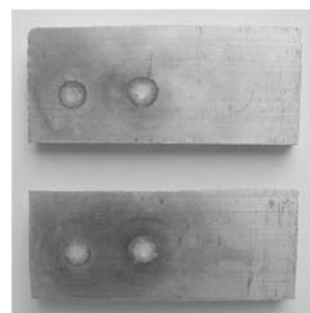
**Figure 5.** Special carriers for the bearing plate

Materijal koji se koristi u eksperimentalnim istraživanjima je lim legure aluminijuma po evropskom standardu EN-573-3 numeričke oznake 6082-T6 ili alfanumeričke AlSi1MgMn [9]. Ova legura ima veliku industrijsku primjenu i proizvedena je u Kombinat aluminijuma Podgorica - „KAP”, gdje je u sektoru Kontrole kvaliteta i ispitivan

hemijski sastav pomoću kvantometra. Analiza je izvršena na dva uzorka (Slika 6), a hemijski sastav je dat u Tabeli 1. Ova legura aluminijuma 6082-T6 uglavnom se koristi tamo gdje su potrebne poboljšane mehaničke osobine: šipke, veliki djelovi za transportnu industriju, za razne konstrukcije, za podove i platforme, kao i za opštu upotrebu [6].



(a)



(b)

**Slika 6.** Uzorci za izvršene hemijske analize: (a) pogled sa prednje strane, (b) pogled sa zadnje strane

**Figure 6.** Samples for chemical analysis: (a) front view, (b) rear view

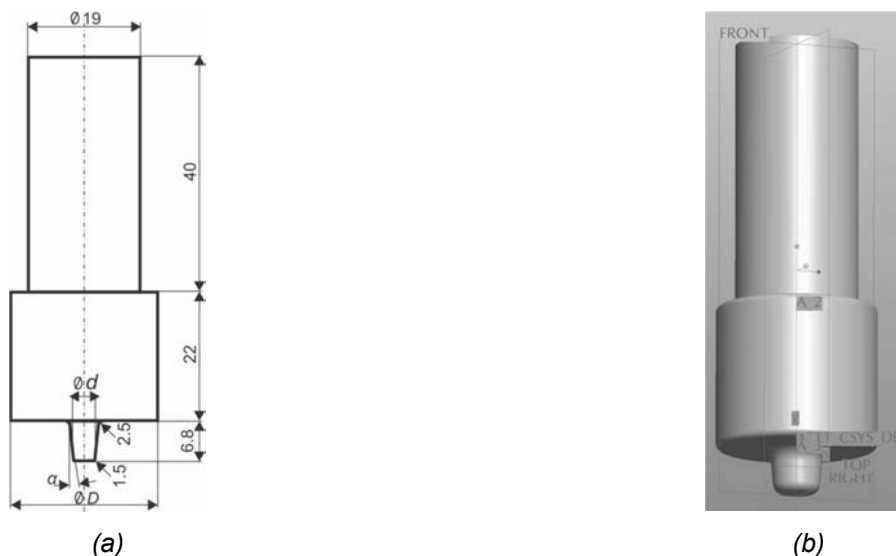
**Tabela 1.** Hemijski sastav legure 6082-T6 (AlSi1MgMn)

**Table 1.** Chemical composition of alloy 6082-T6 (AlSi1MgMn)

Šarža	Kvalitet % Al	Hemijski sastav u %									
		% Fe	% Si	% Ti	% Cu	% Zn	% V	% Cr	% Mn	% Mg	% Na
Uzorak 1.	98.25	0.22	0.85	0.01	0.002	0.062	0.006	0.001	0.16	0.43	0.002
Uzorak 2.	98.29	0.21	0.83	0.01	0.002	0.060	0.006	0.001	0.15	0.43	0.001

Za potrebe eksperimentalnih istraživanja napravljen je alat od čelika za rad u toplom stanju. Nakon mašinske obrade alati su termički obrađeni. Alata za zavarivanje sučeonog spoja dizajniran je u

softveru CREO i prikazan na Slici 7 [4]. Geometrijske dimenzije korišćenog alat kao što su: prečnik ramena alata  $D$ , prečnik trna alata  $d$  i ugao nagiba trna alata  $\alpha$  su definisane planom eksperimenta [6].

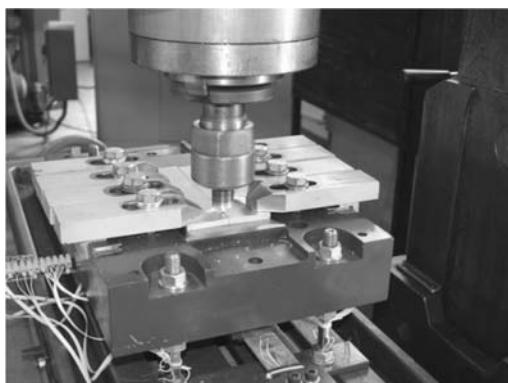


**Slika 7.** Alat za postupak FSW: (a) alat sa usvojenim dimenzijama,  
(b) 3D prikaz alata za FSW postupak

**Figure 7.** Tool for FSW process: (a) tool with adopted dimensions, (b) 3D view of the tool for the FSW process

U okviru eksperimentalnih istraživanja izvršena su mjerenja komponenti sila zavarivanja: aksijalne sile  $F_z$ , longitudinalne sile  $F_x$  i bočne sile  $F_y$ . Mjerenje sila je izvršeno korišćenjem precizne analogno-digitalne mjerne opreme, povezane u informacioni mjerni sistem. Izvođenje procesa u odnosu na kretanje alata podijeljeno je u tri etape. U prvoj etapi rotirajući alat brzim hodom dolazi do linije spajanja, nakon čega se alat sa svojim trnom ukopava u materijal. Kada je rame alata dohvatilo radni komad, započinje proces zavarivanja trenjem, odnosno proces deformisanja materijala u čvrstom stanju. Druga etapa počinje puštanjem u rad longitudinalnog kretanja radnog stola glodalice, gdje u stvari počinje spajanje materijala radnih komada. Dužina zavarenog spoja iznosi 166 mm. Treća etapa počinje kada se započne izvlačenje alata iz radnog komada, gdje se i završava proces

FSW. Signali otporničkih davača sa specijalnih nosača se preko mjernog mosta konvertuju u digitalne, gdje dobijamo dijagrame u funkciji napona struje ( $V$ ) i vremena ( $s$ ), iz kojih se na osnovu poznatih relacija i vrijednosti baždarenja mjerne opreme dobijaju dijagrami sila ( $N$ ) u funkciji vremena ( $s$ ). Zavarivanje radnih komada je vršeno u jednom prolazu. Na Slici 8, prikazan je početak procesa FSW kada je alat prišao liniji spajanja, dok je na Slici 9, prikazan završetak procesa FSW kada je alat izašao iz materijala zavarenih radnih komada. Sa slike se jasno vidi otisak od alata i zavareni spoj dobijen postupkom FSW, kao i rupa „keyhole” koju ostavlja otisak trna alata. Na Slici 10, dati su dobijeni dijagrami komponenti sila u funkciji vremena, dok je na Slici 11, dat prikaz zavarenih radnih komada sa čeonu i korijensku stranu [6].



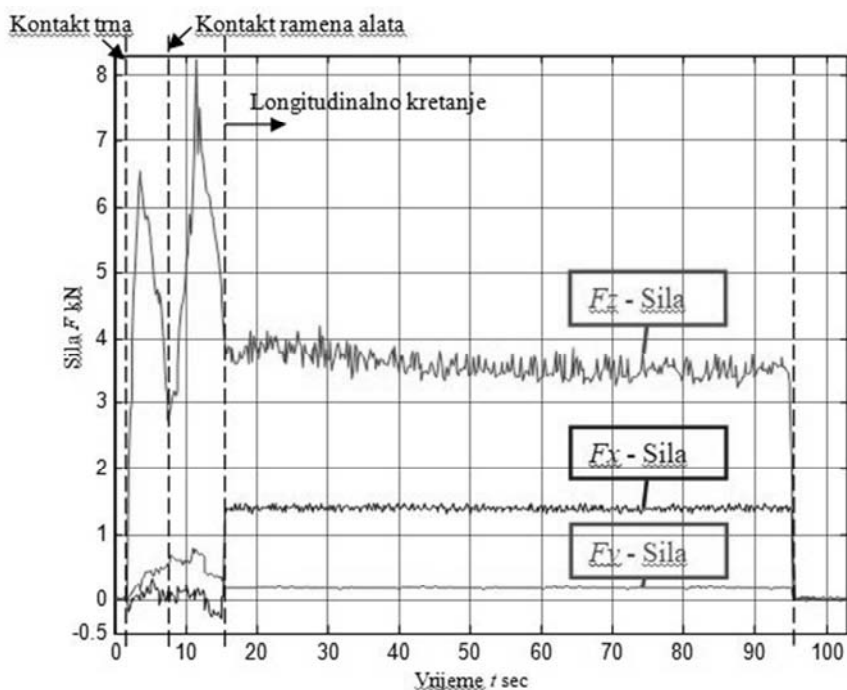
**Slika 8.** Prikaz početka procesa FSW

**Figure 8.** View of the beginning of the FSW process



**Slika 9.** Prikaz završetka procesa FSW

**Figure 9.** View of the completion of the FSW process



**Slika 10.** Dijagram komponenti sila dobijen korišćenjem otporničkih davača (mjernih traka)  
**Figure 10.** Diagram of force components obtained using resistance transducers (measuring tapes)



(a)



(b)

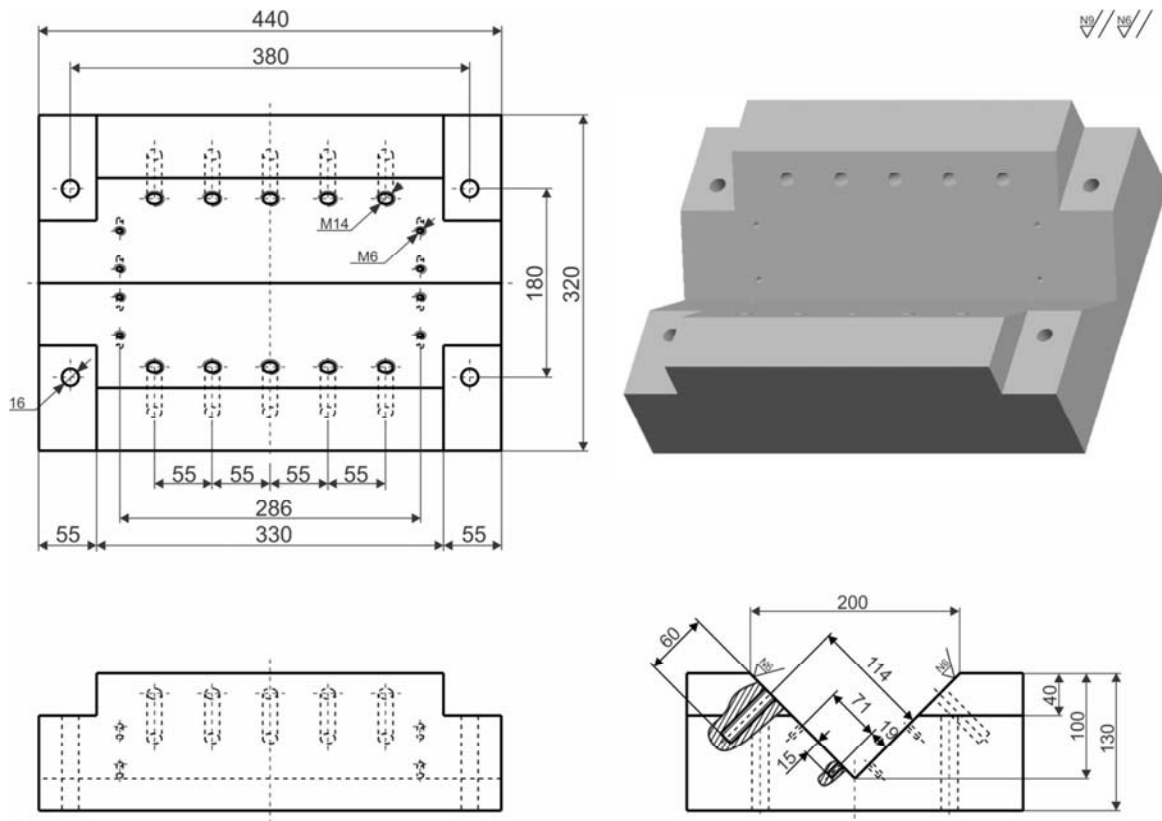
**Slika 11.** Izgled dobijenog zavara: (a) sa čeone strane, (b) sa korijenske strane

**Figure 11.** Appearance of the obtained weld: (a) from the front side, (b) from the root side

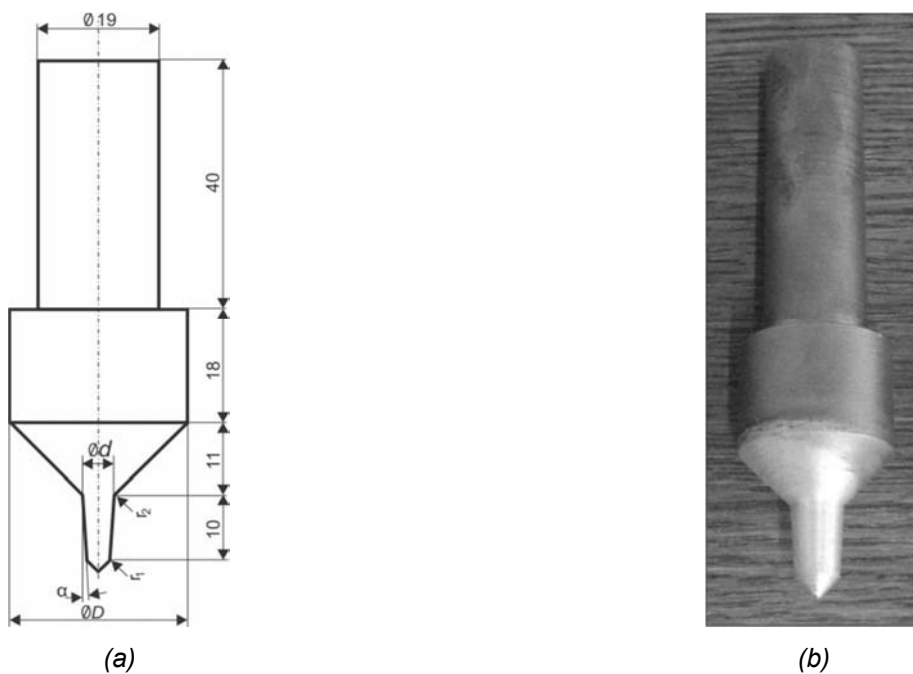
## 5. Eksperimentalna zavarivanja ugaonog spoja

Za potrebe dobijanja konstrukcionog profila u ovom slučaju „L” profila ili zavarivanja ugaonog spoja, bilo je potrebno napraviti specijalne pomoćne pribore za stezanje radnih komada (Slika 12), kao i oboriti ivice na pripremcima pod uglom od  $45^\circ$ . Takođe, urađen je set specijalnih konusnih alata, gdje su površine ramena alata i vrha trna alata zbog geometrijske specifičnosti ugaonog

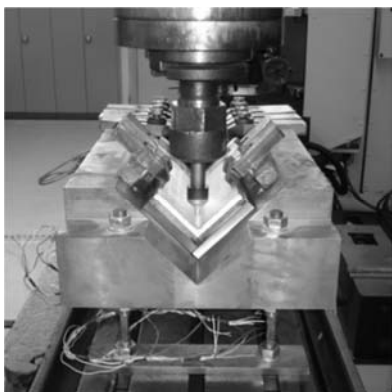
spoja, oborene za ugao od  $45^\circ$  (Slika 13a). Eksperiment je urađen na horizontalnoj glodalici (Slika 13b). Nosaća polača je postavljena na specijalne nosače, na kojima su postavljeni davači za mjerenje komponenti sila u tri normalna pravca. Istraživačko mjesto za zavarivanje ugaonih spojeva je prikazano na Slici 14, dok je dobijeni konstrukcioni profil, odnosno ugaoni spoj prikazan na Slici 15.



**Slika 12. Pomoćni pribor - Noseća ploča**  
**Figure 12. Auxiliary equipment - Bearing plate**



**Slika 13. Konusni alat za zavarivanje: (a) alat sa usvojenim dimenzijama, (b) korišćeni alat**  
**Figure 13. Conical welding tool: (a) tool with adopted dimensions, (b) used tool**



**Slika 14.** Istraživačko mjesto za zavarivanje ugaonog spoja

**Figure 14.** Research site for welding fillet weld



**Slika 15.** Zavareni ugaoni spoj

**Figure 15.** Welded fillet weld

## 6. Zaključak

Postupak FSW zadnjih godina postaje sve više standardan koji se širom svijeta koristi kao napredna tehnologija zavarivanja u smislu kvaliteta zavarenog spoja, energetske efikasnosti i zaštite životne sredine.

U radu je predstavljen postupak spajanja sučeonog spoja i postupak ugaonog spoja, sa tendencijom daljih istraživanja u određivanju fizikalnih veličina koje karakterišu proces. Poznavanje sile zavarivanja je izuzetno važna u određivanju tehnoloških parametara za odvijanje postupka FSW. Povezanost dobijanja sučeonog i ugaonog spoja, doprinosi razvoju procesnog pristupa kao ključnom međusobno povezanom procesu za uspješno odvijanje procesa zavarivanja legure aluminijuma postupkom FSW i njegove primjene u dobijanju konstrukcionih profila.

## Literatura / References

[1] Thomas, W., Threadgill, P., Nicholas, E., Feasibility of Friction Stir Welding Steel, Science and Technology of Welding and Joining, 4 (1999), 6, pp. 365-372.

[2] Thomas, W., Nicholas, E., Needham, J., Murch, M., Temple-Smith, P., Dawes, C., Patent - Friction Stir Butt Welding, International Patent No. PCT/GB92/02203, Editor. 1995: GB Patent No. 9125978.8 (1991), US Patent No. 5.460.317.

[3] Mishra, S.R., Mahoney, W.M., Friction Stir Welding and Processing, ASM International, Ohio, 2007.

[4] Sibalic N., Vukcevic M., Damjanovic M., Koprivica A., Examination of Microstructure of Welded Joint of Similar Materials, Obtained by FSW Method, Proceedings of the International Conference on Materials Processing Technology

## 6. Conclusion

In recent years, the FSW process has become as a standard welding process, and it is used worldwide as an advanced welding technology in terms of the quality of the welded joint, energy efficiency and environmental protection.

The paper presents the joining procedure of the butt and the fillet welds, with the tendency of further research in determining the physical quantities that characterize the process. Knowing the welding force is extremely important in determining the technological parameters for the FSW process. The connection between obtaining a butt and the fillet welds, contributes to the development of a process approach as a key interconnected process for the successful development of the aluminium alloy welding technology by the FSW process and its application in obtaining structural profiles.

(MAPT 2017), Bangkok, Thailand, 30.11.-01.12.2017. str. 164-169, ISBN 978-974-454-785-7.

[5] Runčev D., Friction Welding of Aluminium and Aluminium Alloys, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 1 (2002), str. 11-14.

[6] Šibalić N., Modeling and Simulation of the Process of Joining by Deformation-FSW. Ph.D. Thesis, University of Montenegro, Podgorica, Montenegro, 2010.

[7] Stamenković D., Đurđanović M., Mitić D., Zavarivanje postupkom "FSW", Zavarivanje i zavarene konstrukcije 2 (2006), str. 59-66.

[8] Klobcar D., Kosec L., Pietras A., Smolej A., Friction-stir welding of aluminium alloy 5083, Materials and Technology, 46 (2012) 5, pp.483-488.

[9] Standard: MEST EN 573-1:2008. Aluminijum i legure aluminijuma - Hemijski sastav i oblik plastično prerađenih proizvoda - Dio 1: Sistem brožčanog označavanja.



Nastavak sa strane 156

## Savetovanje sa međunarodnim učešćem Zavarivanje 2022



Našlo se vremena i za slobodne aktivnosti...

Povodom 70 godina DUZS-a dodeljene su zahvalnice za dugogodišnju uspešnu saradnju Društvima iz bivših republika Jugoslavije. Zahvalnice su primili Društvo za zavarivanje Crne Gore, Društvo za zavarivanje Bosne i Hercegovine, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Društvo za tehniku zavarivanja Slavonski Brod, Slovensko društvo za varilno tehniku i Društvo za unapređivanje zavarivanja Makedonije - Заварување Македонија. Zahvalnica je ovom prilikom dodeljena i Vencislavu Grabulovu za dugogodišnje angažovanje, posvećenost i veliki doprinos u očuvanju i jačanju veza DUZS sa zavarivačkom zajednicom u regionu.



Veoma cenimo doprinos naših sponzora, donatora i izlagača, abecednim redom: CCC Industrial Engineering doo Beograd, ELIMP doo MM, EWM Hightec Welding GmbH Austria, GEM Trade doo Novi Sad, ICI doo Beograd, Institut IMS ad Beograd, KONMAT doo Beograd, Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, MESSER TEHNOGAS ad Beograd i DOO REFIT Inženjering, Beograd. Organizacija ovakvog događaja ne bi bila moguća bez njihove podrške.

Jedinstven zaključak je da je Savetovanje "ZAVARIVANJE 2022" bilo veoma uspešno sa svih aspekata, imajući u vidu spektar i kvalitet prikazanih radova kao i izbalansiranost primenjenih tehnologija, aplikacije rezultata istraživačko-razvojnih aktivnosti i projekata podržanih od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Takođe, neposredno prisustvo eminentnih stručnjaka i naučnih radnika iz oblasti zavarivanja je jedno od obeležja Savetovanja.

Većina radova sa savetovanja „Zavarivanje 2022“ biće sukcesivno objavljivana u narednim brojevima časopisa „Zavarivanje i zavarene konstrukcije“.

*Vencislav Grabulov*

Preostale fotografije mogu se pogledati na sajtu DUZS: [www.duzs.org.rs](http://www.duzs.org.rs)



Maja B. Poser<sup>1,a</sup>, Dobro Runchev<sup>1</sup>, Filip Zdraveski<sup>1</sup>

## WELDING TECHNOLOGY FOR STEEL P460NL2 TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA ČELIKA P460NL2

### Original scientific paper / Originalni naučni rad

The work was published in its original form in the Proceedings of the 32nd Conference with international participation "Welding 2022" held on Tara, Serbia from October 12 to 15, 2022.

### Paper received / Rad primljen:

August 2022.

### Paper accepted / Rad prihvaćen:

September 2022.

**Keywords:** P460NL2, GMAW, SAW, critical hardness, NACE MR0103, MR0175

### Abstract

This paper presents the development of welding technology for P460NL2 steel with a thickness of 30 mm. The technology was developed for the purpose of producing housings in which the device PIG-Pipeline Inspection/Intervention Gauge intended for testing and maintenance of pipelines is installed. In this particular case, the housings were intended for cleaning pipelines for the transport of acid-aggressive gases. The material was selected in accordance with NACE MR0175/ISO 15156 and ASME BPVC IKS standards. The welding technology is made for butt joint, root pass with GMAW, and other layers filled with SAW. Preheating and heat treatment after welding were performed to restore the structure. Standard tests are conducted such as: metallography, hardness test, tensile test and toughness, and the results are presented and commented in this paper. In conclusion, the welding technology gives satisfactory results, but, in terms of meeting the specifics of the NACE MR0103 and MR0175 standards, it shows increased hardness in the transition zone, in the HAZ.

### 1. Introduction

The housings for test and cleaning devices „PIG“ are used in environment of H<sub>2</sub>S which is hydrogen promoter, thus later induction of hydrogen in the metal is supported. Therefore the high values of hardness after welding pose a problem. As it is known, high hardness is always associated with increased risk of cold crack failure [1, 2]. The construction of the housings should comply with the relevant NACE standards.

### Author's address / Adresa autora:

<sup>1</sup> Ss. Cyril and Methodius University in Skopje, Faculty of Mechanical Engineering, Rugjer Boskovic 18, 1000 Skopje, Republic of Macedonia

E mail: <sup>a</sup>majablazeska@gmail.com

**Ključne reči:** P460NL2, MAG, EPP, tvrdoća, NACE MR0103, MR0175

### Rezime

U ovom radu je prikazan razvoj tehnologije zavarivanja čelika P460NL2 debljine 30 mm. Tehnologija je razvijena u svrhu proizvodnje kućišta u kojima se postavlja uređaj PIG-Pipeline Inspection/Intervention Gauge namenjen za ispitivanje i održavanje cevovoda. U konkretnom slučaju, kućišta su bile predviđena za čišćenje cevovoda za transport kiselo-agresivnih gasova. Materijal je odabran u skladu sa standardima NACE MR0175/ISO 15156 i ASME BPVC IKS. Tehnologija zavarivanja je izrađena za sučeoni spoj, korenskim prelazom sa GMAW-om, a ispunjena sa EPP-om. Za povrat strukture izvršeno je predgrevanje i termička obrada nakon zavarivanja. U radu su prikazani rezultati sprovedenih standardnih ispitivanja: metalografije, tvrdoće, zatezanja i žilavosti. Zaključno, tehnologija zavarivanja daje zadovoljavajuće rezultate, ali, u smislu ispunjavanja specifičnosti standarda NACE MR0103 i MR0175, pokazuje povećanu tvrdoću u prelaznoj zoni, u ZUT-u.

The adsorption and absorption of harmful amounts of hydrogen atoms in the steel after welding can be expected, when promoters such as H<sub>2</sub>S acidic water solutions (pH <3) or clean active surfaces, support hydrogen absorption. Absorbed corrosive hydrogen can cause cracks even without external loads. Therefore, the problem with the high values of hardness is doubling dangerous. First, due to the fact that the high values of hardness depend on the wrong heat input, which already supports the absorption of carbon and hydrogen



when welding, and as a result of the environment in which the material is used. Reducing sulphur content can be used in the fight against hydrogen induced cracks (HIC) [3, 4].

Adequate welding conditions should limit the absorption of hydrogen and allow its effusion. However, the optimization should include: 2

- Preparation of the welding environment, taking into account the thickness of the elements,
- Preheating,
- Type of welding and type of welded joint,
- Selection of suitable additional materials for welding and shielding gases,
- Welding mode, selection of optimal welding parameters,
- Heat treatment, annealing after welding.

Formulas for determining the equivalent carbon [5] content are used as a starting point to assess

**Table 1.** Chemical composition in (% wt.) of P460NL2 steel

**Tabela 1.** Hemijski sastav u (% tež.) čelika P460NL2

C max	Si max	Mn	P max	S max	Al min	N max	Cr max	Cu max	Mo max	Nb max	Ni max	Ti max	V max
0.20	0.60	1.1÷1.7	0.02	0.01	0.020	0.025	0.3	0.7	0.1	0.05	0.80	0.03	0.20

**Table 2.** Mechanical properties of P460NL2 steel at room temperature

**Tabela 2.** Mehanička svojstva čelika P460NL2 na sobnoj temperaturi

t (mm)	R <sub>eHmin</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	R <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	A <sub>min</sub> (%)
16 < t ≤ 40	445	570 ÷ 720	17

Steel P460NL2 is developed on the basis of normalized constructive S460N steel [6]. By reducing carbon content, effective methods are used to increase strength and reduce grain size such as micro alloying and additional thermo-mechanical processing. The result is a particularly fine-grained structure, which further enhances the tensile strength and improves the impact toughness at the same time. Furthermore, steel is easier to transform through a fine-grained structure, thereby significantly reducing the danger of increasing the hardness in the transitional zone of the welded joint. Further improvements, especially strength features (ReH and Rm), can be achieved through special thermal processing.

Particularly favourable values for impact toughness are achieved down to -40°C (ML1, QL1), -50°C (NL1, NL2, ML2) and -60°C (QL2). This is

the sensitivity to the appearance of cracks and to optimize the preparations of the welding itself, but also to calculate the preheating temperature. There are numerous formulas for determining the equivalent carbon content, whereby the influence - the share of the content of individual alloying elements is taken into account differently. It is necessary to go into it in detail, because the hardness also encourages the appearance of cracks and needs to be analyzed, and if conclusions can be drawn and which welding parameters should be taken into account, due to the danger of the appearance of cracks based on the formulas for determination of equivalent carbon content.

## 2. Properties of fine-grain steel P460NL2

The chemical composition and mechanical properties of the steel P460NL2 are given in Table 1 and 2 according to DIN EN 10028-3.

group of steels for low temperature application where P460NL2 belongs [7].

## 3. Weldability of P460NL2

The formula for calculating the equivalent carbon content CET [8] was formulated in 1991 by Uwer and Höhne and is currently the most comprehensive formula for calculating the equivalent carbon content for cold cracking prevention.

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} (\%) \quad (1)$$

Weldability of steel is good or satisfactory when  $CE \leq 0.4\%$ . The CET value of the test series is found at 0.33255%. This means that the steel has good weldability.



The occurrence of cold cracks in welded joints is not limited to the chemical composition of the base material and the weld metal, among other things it is largely determined by:

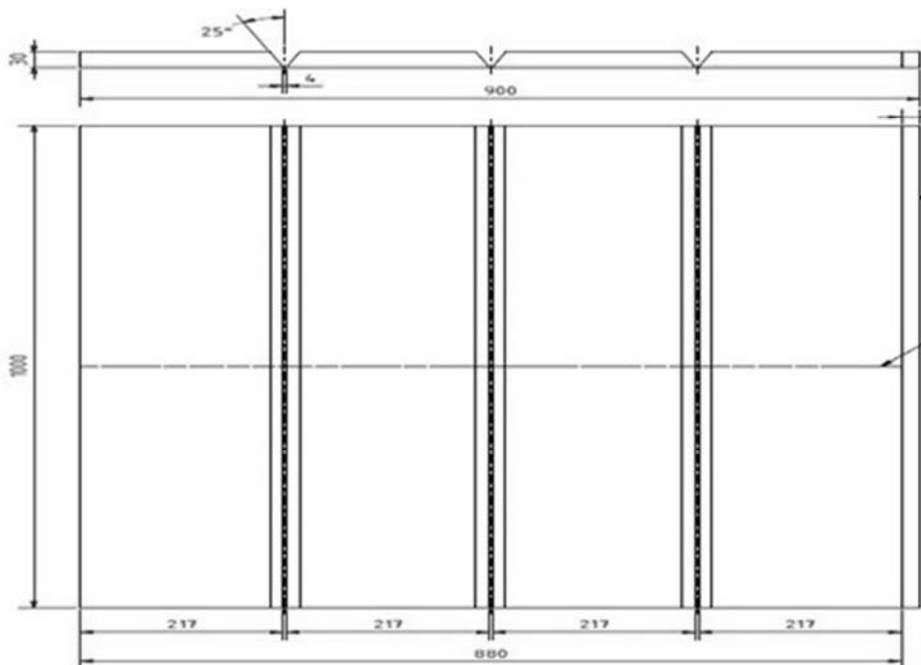
- thickness  $d$  (mm),
- the hydrogen content in the weld metal  $HD$  (ml/g),
- heat input into the material during welding  $Q$  (J/mm),
- the magnitude and distribution of residual stresses in the welded joint.

Very important influence on the structure in HAZ of weld has its chemical composition, the virgin microstructure and the cooling time in the temperature interval when the austenite unstable, which is between 800-500°C [9]. The cooling time

is determined by the physical properties of the steel, the thermal conductivity and specific heat, the thickness of the base metal, the type of joint and the welding parameters. Lowering the base metal temperature along the groove edge, accelerates the cooling of the HAZ and shortens  $t_{8/5}$ . Therefore, in the HAZ, the possibility to form structures that are prone to martensite increases and capturing gases inside metal weld and HAZ.

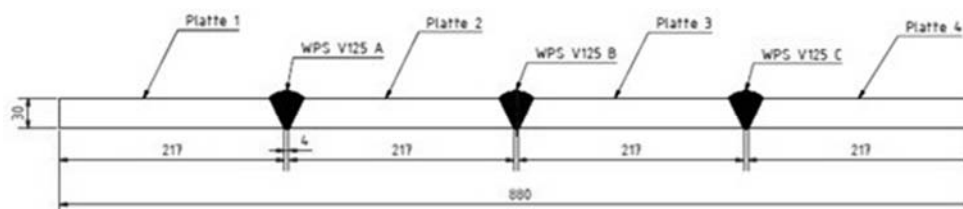
#### 4. Determination of welding technology

Determination of welding technology, especially pre-heating temperature, inter-pass temperature, cooling time  $t_{8/5}$  which have significant impact on the microstructure are determined according to EN 1011-2, guidelines for arc welding of ferritic steels [10,11].



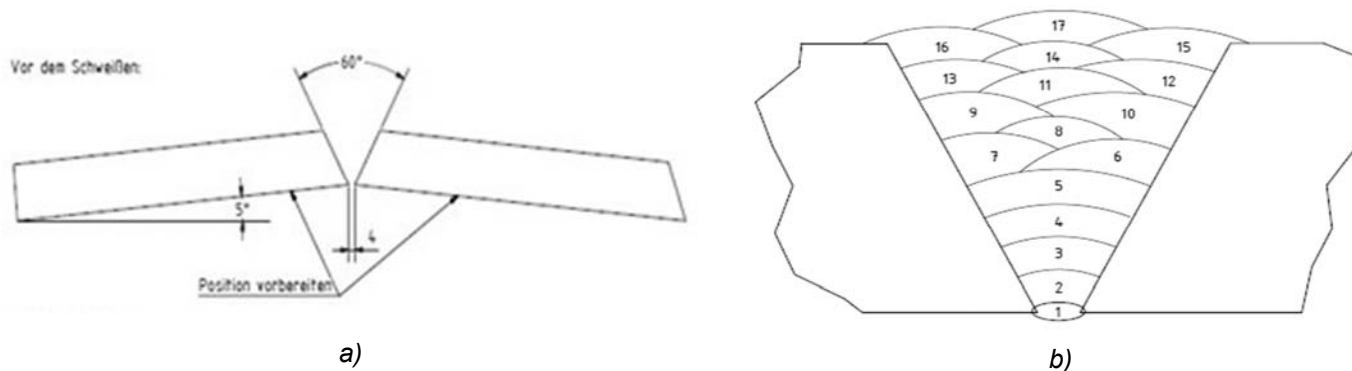
**Figure 1.** Test plates and joint preparation

*Slika 1.* Ispitne ploče i priprema spoja



**Figure 2.** Butt weld test joints

*Slika 2.* Ispitni spojevi sučeonog zavarivanja



**Figure 3.** a) predeformation angle of 5°; b) welding sequence 1-3 with GMAW, 4-17 with SAW

**Slika 3.** a) ugao preddeformacije od 5°; b) sekvence zavarivanja 1-3 sa MAG, 4-17 sa EPP

The tests were performed on three welds (Fig.2). Certain parameters of the welding mode are identical in the three welded samples, in the three WPSs:

- thickness of the basic welded materials 30 (mm),
- type of weld BW,
- welding position horizontal PA,
- width of the weld groove 4 (mm),
- bevel angle of the groove 50°,
- preheating temperature 120 °C,
- interpass temperature 220 °C,
- $t_{8/5}$  is adopted 25 sec.,
- number of layers during welding 17,
- root and layers 2 and 3, made with GMAW,
- filling layers from 4 to 17, made with SAW,
- filler metal for GMAW, wire: G50 6 M Z3Ni1 / G46 4 C Z3Ni1 (Union K52 Ni),
- shielding gas for GMAW: M21 (ArCO<sub>2</sub>-18),
- GMAW wire diameter: Ø 1.0 (mm),
- filler metal for SAW, wire: EN ISO 14171-A/ SZ 2 Ni1Mo (Union S 2 NiMo1),

- shielding powder for SAW: SZ 2 Ni1Mo (UV 418 TT),

- diameter of SAW wire: Ø 4.0 (mm).

After welding, the elements should be wrapped in mineral wool, in order to reduce the cooling speed.

During the GMAW welding of the first three layers, the root layer is performed with a short arc, and the filling of the second and third layer is performed with a spray arc.

Values for the variable parameters of the welding mode, such as:

- welding current,
- welding voltage,
- wire feed speed,
- welding speed,

are determined experientially and with the help of a graphical selector guide table.

Tables 3, 4 and 5 show some of the WPSs according to which the three experimental welds were performed, namely: WPS V125 A, WPS V125 B and WPS V125 C.



Ort: WPQR-Nr.:	Kehl - Marlen V125 A	Prüfer oder Prüfstelle: Art der Vorbereitung und Reinigung:	Autogen Brennschneiden / Beschleifen
Schweißer-qualifikation:	EN 287-1; Bediener nach EN 1418	Bearbeitung der Wurzellage:	Schleifen
Schweißprozess:	(MAG), (UP)	Spezifikation Grundwerkstoff(e):	Gruppennr. ISO 15608:
Nahtart:	Stumpfnah	1) [1.8918] P460NL2	1.3
Kunde:	Masterarbeit	2) [1.8918] P460NL2	1.3
Auftrags-Nr.:	28491	Werkstoffdicke:	30 mm
Zeichnungs-Nr.:	28941_Masterarbeit Schweißen	Außendurchmesser:	
Teile-Nr.:	1, 2	Schweißposition:	PA

<b>Maße:</b> $\alpha = 50^\circ$ $b = 4 \text{ mm}$ $t = 30 \text{ mm}$	<b>Gestaltung der Verbindung</b> 	<b>Schweißfolge</b> 
<b>Bemerkung:</b>		

Einzelheiten für das Schweißen									
	Schweißlage	Prozess	Ø Schweiß-zusatz [mm]	Strom	Spannung [V]	Stromart / Polung	Draht-vorschub-geschw.	Schweiß-geschwindig-keit [cm/min]	Wärme-einbringung [kJ/mm]
A)	Wurzellage	135	1,0	88-90 A	17-19	= / +	3,5 m/min	15-18	0,399 - 0,547
B)	Fülllage 2	135	1,0	165 - 180 A	20-22	= / +	7,4 m/min	??????	
C)	Fülllage 3	135	1,0	240 - 250 A	24-26	= / +	13,5 m/min	36	0,768 - 0,867
D)	Fülllage 4	135	1,0	245 - 255 A	24-26	= / +	13,6 m/min	30	0,941 - 1,061
E)	Füll/Decklage 4-17	121	4,0	550-650 A	29 -31	= / +	1.3 m/min	38 -48	1,994 - 3,182

Schweißzusatz / Schweißpulver				Sondervorschriften für Trocknung	
Bezeichnung	Markenname	Hersteller	Zeit [h]	Temperatur [°C]	
A) G 50 6 M Z3Ni1 / G46 4 C Z3Ni1	Union K52 Ni	Böhler (t-put)			
B) G 50 6 M Z3Ni1 / G46 4 C Z3Ni1	Union K52 Ni	Böhler (t-put)			
C) G 50 6 M Z3Ni1 / G46 4 C Z3Ni1	Union K52 Ni	Böhler (t-put)			
D) G 50 6 M Z3Ni1 / G46 4 C Z3Ni1	Union K52 Ni	Böhler (t-put)			
E) S 50 6 FB SZ	Union S 2 NiMo 1/UJ 418 TT	Böhler (t-put)	2	300 - 350	

Schutzgas						
Typ	Markenname	Hersteller	Durchfluss [l/min]	Vorström-zeit [s]	Nachström-zeit [s]	
A) Schweißen: M21-ArC-18	ARCAL 5	Air Liquide	15			
B) Schweißen: M21-ArC-18	ARCAL 5	Air Liquide	15			
C) Schweißen: M21-ArC-18	ARCAL 5	Air Liquide	15			
D) Schweißen: M21-ArC-18	ARCAL 5	Air Liquide	15			

Weitere Informationen		
Parameter / Wert		
A) Gaskappengröße: 15 Werkstoffübergang: Kurzlichtbogen Kontaktrohrabstand: 8 - 12 mm	Pendeln:	Strichraupe
B) Gaskappengröße: 15 Werkstoffübergang: Mischlichtbogen Kontaktrohrabstand: 8 - 12 mm	Vorwärmtemperatur[°C]:	120
C) Gaskappengröße: 15 Werkstoffübergang: Mischlichtbogen Kontaktrohrabstand: 8 - 12 mm	Zwischenlagentemperatur [°C]:	220
D) Gaskappengröße: 15 Werkstoffübergang: Mischlichtbogen Kontaktrohrabstand: 8 - 12 mm	Verfahren	Glühen
E) Gaskappengröße: 18 - 22 mm	Art der Erwärmung	Ofen
	Aufheizrate	< 373 K/h
	Haltezeit	621 +/- 5 °C
	Abkühlung	40 min
		Ofen bis 200 ° C, ruhender
		Luft
	Abkühlrate	< 124 K/h

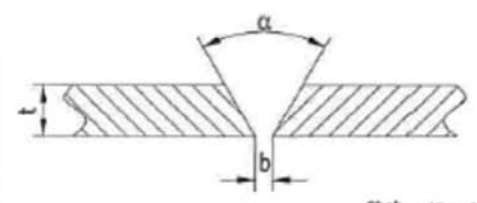
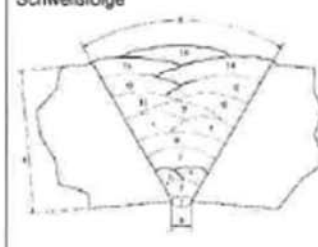
Datum / Erstellt: 08.04.2013 M.Blazeska Poser	Datum / Geprüft: 08.04.2013 A. Schulz	Datum / Freigegeben:
Unterschrift	Unterschrift	Unterschrift

Table 3. WPS V125 A

Tabela 3. WPS V 125 A



Ort: WPQR-Nr.:	Kehl - Marlen V125 B-1	Prüfer oder Prüfstelle: Art der Vorbereitung und Reinigung:	Autogen Brennschneiden / Beschleifen
Schweißer-qualifikation:	EN 287-1; Bediener nach EN 1418	Bearbeitung der Wurzellage:	Schleifen
Schweißprozess:	(MAG), (UP)	Spezifikation Grundwerkstoff(e):	Gruppennr, ISO 15608:
Nahtart:	Stumpfnah	1) [1.8918] P460NL2	1.3
Kunde:	Masterarbeit	2) [1.8918] P460NL2	1.3
Auftrags-Nr.:	28491	Werkstoffdicke:	30 mm
Zeichnungs-Nr.:	28941_Masterarbeit Schweißen	Außendurchmesser:	
Teile-Nr.:	3, 4	Schweißposition:	PA

Maße:  $\alpha = 50^\circ$ $b = 4 \text{ mm}$ $t = 30 \text{ mm}$	Gestaltung der Verbindung  	Schweißfolge  
---	--	--

Bemerkung:

Einzelheiten für das Schweißen

	Schweißlage	Prozess	Ø Schweißzusatz [mm]	Strom	Spannung [V]	Stromart / Polung	Drahtvorschubgeschw.	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	Wärmebringung [kJ/mm]
A)	Wurzellage	135	1,0	84 - 92 A	16 - 17	= / +	3,8 m/min	18 (30)	0,215 - 0,417
B)	Fülllage 2	135	1,0	145 - 155 A	19 - 20	= / +	6, 8 m/min	30	0,441 - 0,496
C)	Fülllage 3	135	1,0	200 - 210 A	22 - 25	= / +	10,2 m/min	33	0,640 - 0,764
D)	Fülllage 4	135	1,0	200 - 210 A	22 - 25	= / +	9,8 m/min	33	0,640 - 0,764
E)	Füll/Decklage 5-16	121	4,0	500-600 A	29 - 31	= / +	1-1,1 m/min	45	1,933 - 3,189

Schweißzusatz / Schweißpulver

Bezeichnung	Markenname	Hersteller	Sondervorschriften für Trocknung	
			Zeit [h]	Temperatur [°C]
A) G 50 6 M Z3Ni1 / G46 4 C Z3Ni1	Union K52 Ni	Böhler (t-put)		
B) G 50 6 M Z3Ni1 / G46 4 C Z3Ni1	Union K52 Ni	Böhler (t-put)		
C) G 50 6 M Z3Ni1 / G46 4 C Z3Ni1	Union K52 Ni	Böhler		
D) G 50 6 M Z3Ni1 / G46 4 C Z3Ni1	Union K52 Ni	Böhler		
E) S 50 6 FB SZ	Union S 2 NiMo 1/UV 418 TT	Böhler (t-put)	2	300 - 350

Schutzgas

Typ	Markenname	Hersteller	Durchfluss [l/min]	Vorströmzeit [s]	Nachströmzeit [s]
A) Schweißen: M21-ArC-18	ARCAL 5	Air Liquide	15		
B) Schweißen: M21-ArC-18	ARCAL 5	Air Liquide	15		
C) Schweißen: M21-ArC-18	ARCAL 5	Air Liquide	15		
D) Schweißen: M21-ArC-18	ARCAL 5	Air Liquide	15		

Weitere Informationen

Parameter / Wert	
A) Gaskappengröße: 15 Werkstoffübergang: Kurzlichtbogen Kontaktrohrabstand: 8 - 12 mm	Pendeln: Vorwärmtemperatur[°C]: 120 Zwischenlagentemperatur [°C]: 180
B) Gaskappengröße: 15 Werkstoffübergang: Mischlichtbogen Kontaktrohrabstand: 8 - 12 mm	Verfahren Art der Erwärmung Aufheizrate Haltezeit Abkühlung
C) Gaskappengröße: 15 Werkstoffübergang: Mischlichtbogen Kontaktrohrabstand: 8 - 12 mm	Strichraupe Glühen Ofen < 373 K/h 621 +/- 10 °C 45 min Ofen bis 200 ° C, ruhender Luft < 124 K/h
D) Gaskappengröße: 15 Werkstoffübergang: Mischlichtbogen Kontaktrohrabstand: 8 - 12 mm	Abkühlrate
E) Kontaktrohrabstand: 18 - 22 mm	

Table 4. WPS V125 B

Tabela 4. WPS V125 B



Ort: WPQR-Nr.:	Kehl - Marien V125 B-1	Prüfer oder Prüfstelle: Art der Vorbereitung und Reinigung:	Autogen Brennschneiden / Beschleifen
Schweißer-qualifikation:	EN 287-1; Bediener nach EN 1418	Bearbeitung der Wurzellage:	Schleifen
Schweißprozess:	(MAG), (UP)	Spezifikation Grundwerkstoff(e):	Gruppennr. ISO 15608:
Nahtart:	Stumpfnah	1) [1.8918] P460NL2	1.3
Kunde:	Masterarbeit	2) [1.8918] P460NL2	1.3
Auftrags-Nr.:	28491	Werkstoffdicke:	30 mm
Zeichnungs-Nr.:	28941_Masterarbeit Schweißen	Außendurchmesser:	
Teile-Nr.:	2,3	Schweißposition:	PA

Maße: $\alpha = 50^\circ$ $b = 4 \text{ mm}$ $t = 30 \text{ mm}$	Gestaltung der Verbindung  Chsk • weiting solutions	Schweißfolge 
Bemerkung:		

Einzelheiten für das Schweißen									
	Schweißlage	Prozess	Ø Schweißzusatz [mm]	Strom	Spannung [V]	Stromart / Polung	Drahtvorschubgeschw.	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	Wärmeeinbringung [kJ/mm]
A)	Wurzellage	135	1,0	86 - 90 A	17 - 18	= / +	3,7 - 3,8 m/min	48	0,146 - 0,162
B)	Füllage 2	135	1,0	180 - 190 A	22-23	= / +	8,9 - 9,0 m/min	25	0,760 - 0,839
C)	Füllage 3	135	1,0	250-265 A	28 - 29	= / +	14,9 - 15 m/min	29	1,159 - 1,272
D)	Füll/Decklage 5-16	121	4,0	550 - 600 A	29-31	= / +	1-1,1 m/min	40-50	1,914 - 2,790

Schweißzusatz / Schweißpulver				Sondervorschriften für Trocknung	
Bezeichnung	Markenname	Hersteller	Zeit [h]	Temperatur [°C]	
A) G 50 6 M Z3Ni1 / G46 4 C Z3Ni1	Union K52 Ni	Böhler (t-put)			
B) G 50 6 M Z3Ni1 / G46 4 C Z3Ni1	Union K52 Ni	Böhler (t-put)			
C) G 50 6 M Z3Ni1 / G46 4 C Z3Ni1	Union K52 Ni	Böhler			
D) S 50 6 FB SZ	Union S 2 NiMo 1/UV 418 TT	Böhler (t-put)	2	300 - 350	

Schutzgas						
Typ	Markenname	Hersteller	Durchfluss [l/min]	Vorströmzeit [s]	Nachströmzeit [s]	
A) Schweißen: M21-ArC-18	ARCAL 5	Air Liquide	13			
B) Schweißen: M21-ArC-18	ARCAL 5	Air Liquide	13			
C) Schweißen: M21-ArC-18	ARCAL 5	Air Liquide	13			

Weitere Informationen				
Parameter / Wert				
A) Gaskappengröße: 15 Werkstoffübergang: Kurzlichtbogen Kontaktrohrabstand: 8 - 12 mm	Pendeln: Vorwärmtemperatur [°C]: 120 Zwischenlagentemperatur [°C]: 220 180	Strichraupe 120		
B) Gaskappengröße: 15 Werkstoffübergang: Mischlichtbogen Kontaktrohrabstand: 8 - 12 mm	Verfahren Art der Erwärmung Aufheizrate Haltezeit Haltezeit Abkühlung	Glühen Ofen < 373 K/h 621 +/- 10 °C 45 min Ofen bis 200 ° C, ruhender		
C) Gaskappengröße: 15 Werkstoffübergang: Mischlichtbogen Kontaktrohrabstand: 8 - 12 mm	Abkühlrate	Luft < 124 K/h		
D) Kontaktrohrabstand: 18 - 22 mm				

Table 5. WPS V125 C

Tabela 5. WPS V 125 C



## 5. Post weld heat treatment

The welded samples, after the radiographic tests and determination of the quality of the weld, were subjected to additional heat treatment, annealing in order to reduce residual stresses from welding.

The heat treatment was carried out in a vacuum furnace, for duration of 11 hours and 44 minutes.

The annealing process is performed in accordance with the requirements of ASME VIII Div.1: heating rate from max. 100 °C/h (<373 K/h), up to an annealing temperature of 611 °C to 631 °C, with a holding time depending on the thickness of the base material, 1.0 min/mm, but not shorter than 45 min, by slow cooling in a furnace.

Pos. Item	Stück Qty.	Typ Type	Abmessung Dimension	Werkstoff Material	Schmelze Nr./ Probe Nr. Heat No./ Sample No.	Hersteller Manufacturer
1	4	Blech	30 x 217 x 1000	P460NL2/ P460NH	38313	Ilsenburger Grobblech (TÜV11)

<b>Anforderungen / requirements:</b>	acc. to ASME VIII Div. 1
<b>Glühobjekt / Object of Heat Treatment:</b>	Längsnaht Probenplatte / longitudinal weld test plate
<b>Aufheizzeit / Time of heating on:</b>	≤ 100 °C / h (< 373 K / h)
<b>Glühtemperatur / Annealing temperature:</b>	621 °C +/- 10 °C
<b>Haltezeit / Holding time:</b>	1,0 Min. / mm Wanddicke / mm wall thickness (45 min)
<b>Abkühlung / Cooling:</b>	An ruhender Luft / by air in closed furnace

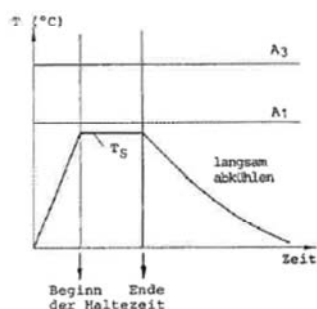


Figure 4. PWHT parameters

Slika 4. Parametri termičke obrade posle zavarivanja

## 6. Examination results

Tests on mechanical properties were performed on the welded samples: tensile tests, bending tests,

impact toughness tests and hardness measurement. The tests are conducted in accordance with EN and DIN standards.

Table 6. Results of tensile test of welded joint at 20°C according to EN ISO 6892 A4 and DIN EN ISO 4136

Tabela 6. Rezultati ispitivanja zatezanjem zavarenog spoja na 20°C prema EN ISO 6892 A4 i DIN EN ISO 4136

WPS	Sample No.	Dimensions			Force	Tensile strength	Location of failure
		a mm	b mm	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	F <sub>m</sub> kN	R <sub>m</sub> MPa	
A	1	24.90	25.08	624.49	364	583	BM
A	2	24.83	25.10	623.23	364	584	BM
B	1	24.90	25.08	624.49	363	581	BM
B	2	24.85	25.06	622.74	361	580	BM
C	1	24.83	25.06	622.24	361	580	BM
C	2	24.89	25.04	623.25	363	582	BM



**Table 7.** Results of tensile test of all metal weld at 20°C according to EN ISO 6892 A4 and DIN EN ISO 5178

**Tabela 7.** Rezultati ispitivanja zatezanjm svih metalnih šavova na 20°C prema EN ISO 6892 A4 i DIN EN ISO 5178

WPS	Dimensions			Force	Yield stress	Force	Tensile strength	Elongation
	d <sub>0</sub> mm	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	l <sub>0</sub> mm	F <sub>eH</sub> /F <sub>0,2</sub> N	R <sub>eH</sub> /R <sub>0,2</sub> MPa	F <sub>m</sub> N	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>5</sub> %
A	9.98	78.23	50	40390	516	46220	591	28.8
B	9.98	78.23	50	42540	544	47895	612	36.6
C	9.97	78.07	50	42540	545	47882	613	38.0

The bending test was performed according to DIN EN ISO 7438 and DIN EN ISO 5173 standards. 4 samples of the three welded joints were tested, with a cylindrical pusher with Ø 48 mm. The samples were placed on supports at a distance of 75 mm. All 12 test samples are bent to an angle of 180° without the appearance of cracks.

The toughness test was performed according to DIN EN ISO 148-1 and DIN EN ISO 9016

standards, according to the Charpy method with a V groove at -50°C.

For each WPS, tests were carried out in two series, on three test samples. In the first series, the groove is in the weld metal, and in the second series, the groove is in the HAZ. The results of the impact toughness are given in table 8.

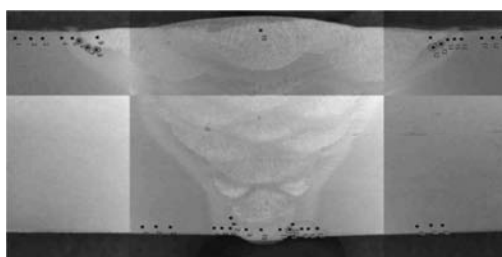
**Table 8.** Results from Charpy toughness

**Tabela 8.** Rezultati ispitivanja energije udara po Charpi ju

Samples	Groove location	WPS A KV <sub>2</sub> (J)	WPS B KV <sub>2</sub> (J)	WPS C KV <sub>2</sub> (J)
1	WM	110	122	96
2	WM	158	104	164
3	WM	131	96	91
Average		<b>133</b>	<b>107</b>	<b>117</b>
4	HAZ	76	98	100
5	HAZ	80	104	96
6	HAZ	41	78	76
Average		<b>66</b>	<b>93</b>	<b>91</b>

The results of the measured Vickers hardness of the welded samples are shown in tables and with macroscopic images of the welded samples with marked measurement points on the weld and HAZ. The values which are higher than the requirements

(248HV) set by NACE MR0103 and MR0175 for the maximum allowable values in the weld metal and HAZ are marked with red colour in the macroscopic image.

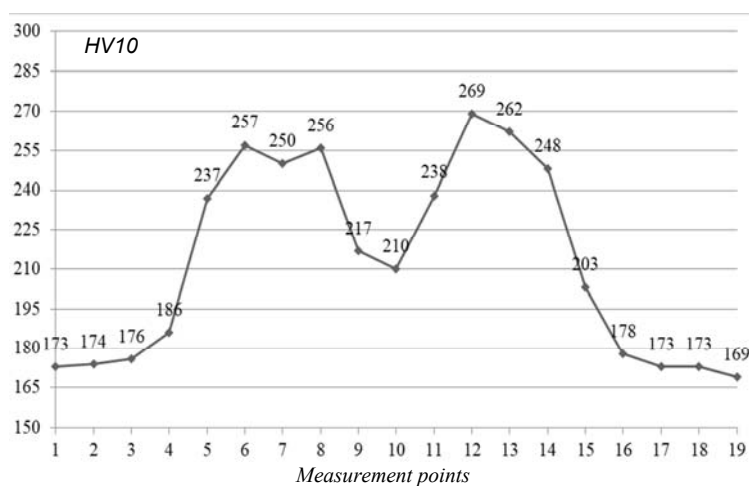


**Figure 5.** Weld sample WPS V125A

**Slika 5.** Zavareni uzorak WPS V125A

**Table 9.** HV values-WPS V125A top layer**Tabela 9.** HV vrednosti-WPS V125A gornji sloj**Table 10.** HV values-WPS V125A bottom layer**Tabela 10.** HV vrednosti-WPS V125A donji sloj

Measuring point	Location	Hardness HV10	Measuring point	Location	Hardness HV10
1	Base Metal	173	1	OM	174
2	Base Metal	174	2	OM	172
3	Base Metal	176	3	OM	175
4	HAZ	186	4	3BT	192
5	HAZ	237	5	3BT	211
6	HAZ	257x	6	3BT	243
7	HAZ	250x	7	3BT	222
8	HAZ	256x	8	3BT	215
9	Weld Metal	217	9	M3	191
10	Weld Metal	210	10	M3	197
11	Weld Metal	238	11	M3	190
12	HAZ	269x	12	3BT	247
13	HAZ	262x	13	3BT	258x
14	HAZ	248	14	3BT	215
15	HAZ	203	15	3BT	194
16	HAZ	178	16	3BT	172
17	Base Metal	173	17	OM	172
18	Base Metal	173	18	OM	174
19	Base Metal	169	19	OM	172

**Figure 6.** Diagram for HV-WPS V125A top layer**Slika 6.** Dijagram za gornji sloj HV-WPS V125A

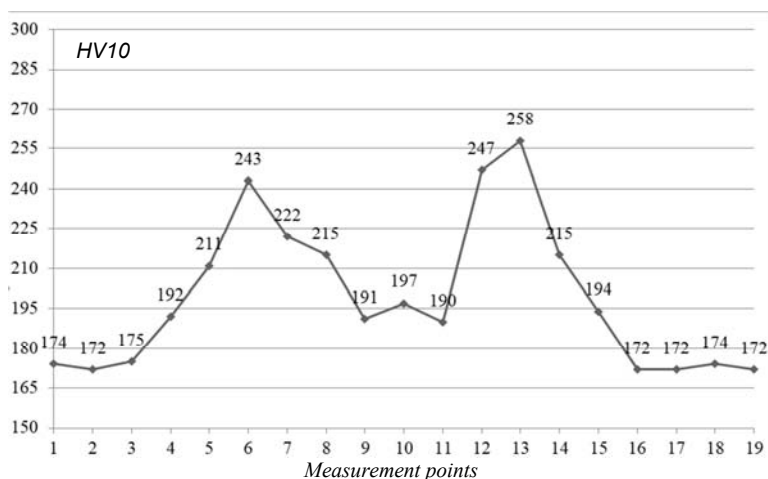


Figure 7. Diagram for HV-WPS V125A bottom layer

Slika 7. Dijagram za donji sloj HV-WPS V125A

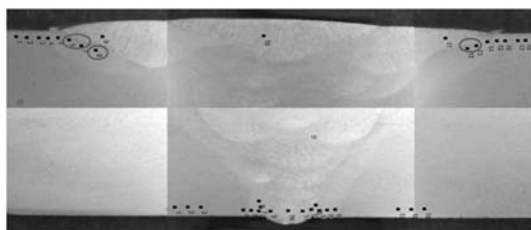


Figure 8. Weld sample WPS V125B

Slika 8. Zavareni uzorak WPS V125B

Table 11. HV values-WPS V125B top layer

Table 12. HV values-WPS V125B bottom layer

Tabela 11. HV vrednosti-WPS V125B gornji slo

Tabela 12. HV vrednosti-WPS V125B donji sloj

Measuring point	Location	Hardness HV10	Measuring point	Location	Hardness HV10
1	Base Metal	169	1	Base Metal	175
2	Base Metal	171	2	Base Metal	179
3	Base Metal	170	3	Base Metal	178
4	HAZ	185	4	HAZ	180
5	HAZ	241	5	HAZ	195
6	HAZ	259x	6	HAZ	219
7	HAZ	259x	7	HAZ	218
8	HAZ	255x	8	HAZ	202
9	Metal Weld	237	9	Metal Weld	196
10	Metal Weld	206	10	Metal Weld	192
11	Metal Weld	217	11	Metal Weld	192
12	HAZ	258x	12	HAZ	213
13	HAZ	253x	13	HAZ	202
14	HAZ	241	14	HAZ	196
15	HAZ	191	15	HAZ	184
16	HAZ	173	16	HAZ	183
17	Base Metal	175	17	Base Metal	178
18	Base Metal	175	18	Base Metal	178
19	Base Metal	177	19	Base Metal	176

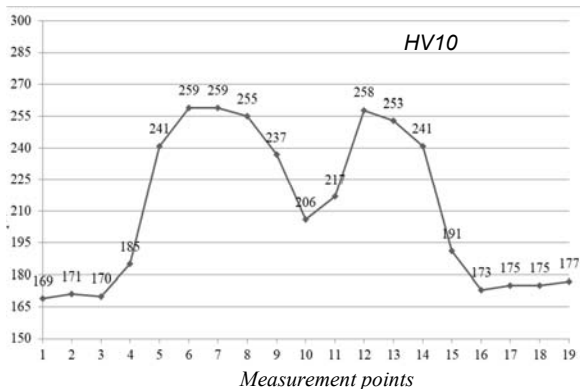


Figure 9. Diagram for HV-WPS V125B top layer

Slika 9. Dijagram za gornji sloj HV-WPS V125B

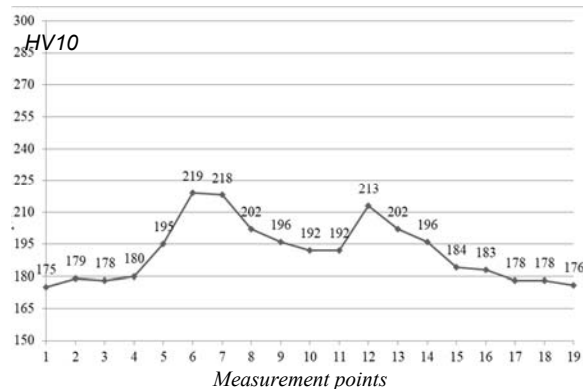


Figure 10. Diagram for HV-WPS V125B bottom layer

Slika 10. Dijagram za donji sloj HV-WPS V125B

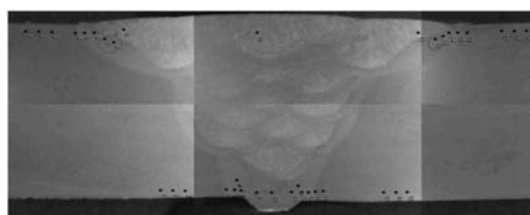


Figure 11. Weld sample WPS V125C

Slika 11. Zavareni uzorak WPS V125C

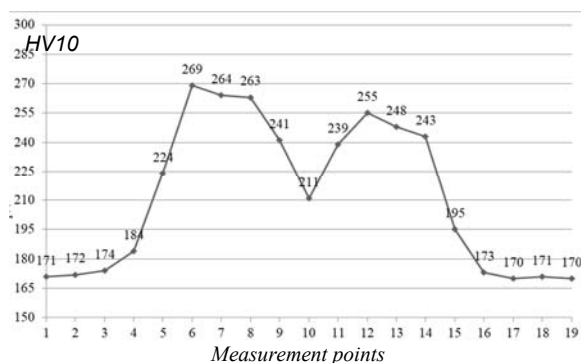
Table 13. HV values-WPS V125C top layer

Tabela 13. HV vrednosti-WPS V125C gornji sloj

Table 14. HV values-WPS V125C bottom layer

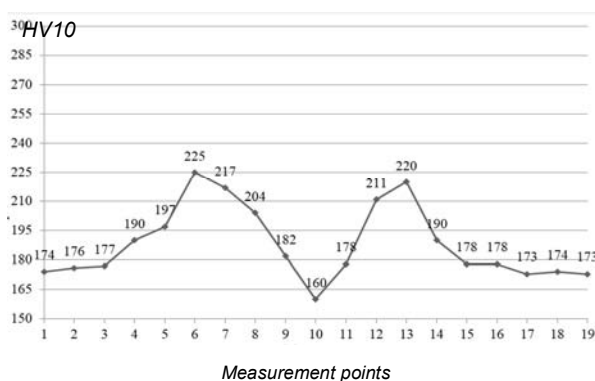
Tabela 14. HV vrednosti-WPS V125C donji sloj

Measuring point	Location	Hardness HV10	Measuring point	Location	Hardness HV10
1	Base Metal	171	1	Base Metal	174
2	Base Metal	172	2	Base Metal	176
3	Base Metal	174	3	Base Metal	177
4	HAZ	184	4	HAZ	190
5	HAZ	224	5	HAZ	197
6	HAZ	269 x	6	HAZ	225
7	HAZ	264 x	7	HAZ	217
8	HAZ	263 x	8	HAZ	204
9	Metal Weld	241	9	Metal Weld	182
10	Metal Weld	211	10	Metal Weld	160
11	Metal Weld	239	11	Metal Weld	178
12	HAZ	255 x	12	HAZ	211
13	HAZ	248	13	HAZ	220
14	HAZ	243	14	HAZ	190
15	HAZ	195	15	HAZ	178
16	HAZ	173	16	HAZ	178
17	Base Metal	170	17	Base Metal	173
18	Base Metal	171	18	Base Metal	174
19	Base Metal	170	19	Base Metal	173



**Figure 12.** Diagram for HV-WPS V125C top layer

**Slika 12.** Dijagram za gornji sloj HV-WPS V125C



**Figure 13.** Diagram for HV-WPS V125C bottom layer

**Slika 13.** Dijagram za donji sloj HV-WPS V125C

## 7. Conclusion

In general, the results obtained from the tests of the welded samples are within permissible limits and are satisfactory. The maximal measured hardness is below the allowable value given in EN ISO 15614-1:2004+A2:2012.

Specifically speaking, considering standards NACE MR0103 and MR0175, some of the measured hardness values are higher than the max. value of 248 HV set in the standards. From this point of view, the welded joint and the prescribed welding technology does not meet the initial requirement. The requirements are partially met.

Although the highest measured hardness in the top layer of the weld is 269HV and is slightly higher than 248HV, given the importance of the welded housing for „PIG“ device and the hostile working environment inside (H<sub>2</sub>S), the request for reliability in terms of cold cracks, especially hydrogen induced cracks is very important. Thus, NACE MR0103 and MR0175 need to be fully met.

From the analysis, it can be concluded that the increased hardness occurs dominantly near the surface layers of the joint, which is due to the

## 7. Zaključak

Generalno, dobijeni rezultati ispitivanja zavarenih uzoraka su u dozvoljenim granicama i zadovoljavajući su. Maksimalna izmerena tvrdoća je ispod dozvoljene vrednosti date u EN ISO 15614-1:2004+A2:2012.

Konkretno, s obzirom na standarde NACE MR0103 i MR0175, neke od izmerenih vrednosti tvrdoće su veće od maksimalnih vrednost od 248 HV prema standardima. Sa ove tačke gledišta, zavareni spoj i propisana tehnologija zavarivanja ne ispunjavaju početni zahtev. Uslovi su samo delimično ispunjeni.

Iako je najveća izmerena tvrdoća u gornjem sloju šava 269HV i nešto je veća od 248HV, s obzirom na značaj zavarenog kućišta za „PIG“ uređaj i agresivno radno okruženje u njemu (H<sub>2</sub>S), veoma su važni zahtevi za pouzdanost u odnosu na pojavu hladnih prslina, posebno prslina izazvanih vodonikom. Prema tome NACE MR0103 i MR0175 moraju biti u potpunosti ispunjeni.

Iz analize se može zaključiti da se povećana tvrdoća javlja prvenstveno u blizini površinskih slojeva zavarenog spoja, što je posledica povećane brzine hlađenja spoja u odnosu na koren žleba. Na



increased cooling rate of the joint towards the ends of the groove. At these end welds, the cooling time between 800 and 500°C is greater, relative to the groove centre. Highest hardness is measured in HAZ, in the coarse zones of end runs.

Finally, welding technology can be improved to be fully satisfactory, if the critical cooling time is corrected, by shortening the  $t_{8/5}$  of the end layers of the welded joint through a lower heat input, thus avoiding increasing the width of the microstructure with coarse grain size.

## References / Literatura

[1] Sindo Kou, *Welding Metallurgy*, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2003

[2] K. Harting; Abwasserdruckleitungen - Möglichkeiten und Verfahren zur Reinigung, Kurzbericht, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, S. 1-31, Dezember 2006

[3] R. Jovicic, et al, The impact of groove edge temperature and heat input on the structure and hardness of the HAZ of steel P460NL1 welded joint, *Journal of welding and welded structures*, vol.63 (3), 2018

[4] U.Dilthey: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2: Verhalten Der Werkstoffe Beim Schweißen, 3. Aufl. VDI Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, S. 1-122, 2004

[5] J.Wilden, D.Bartout: Lichtbogenfügeprozesse, Stand der Technik und Zukunftspotenziale, DVS-Berichte Band 249, 2008

ovim mestima zavarenih spojeva, vreme hlađenja između 800 i 500°C je veće u odnosu na centar žljeba. Najveća tvrdoća je izmerena u ZUTu, u grubozrnim zonama završnih prolaza pri zavarivanju.

Konačno, tehnologija zavarivanja se može poboljšati tako da bude u potpunosti zadovoljavajuća, ako se koriguje kritično vreme hlađenja, skraćivanjem vremena  $t_{8/5}$  završnih prolaza zavarenog spoja kroz manji unos toplote, čime se izbegava povećanje širine grubozrne mikrostrukture.

[6] N.N.; NACE MR0175/ISO 15156-1, Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H<sub>2</sub>S-containing, Environments in oil and gas production, Part 1: General principles for selection of cracking-resistant materials, pp. 1-149, 2001

[7] N.N.; EN ISO 3183:2012: Petroleum and natural gas industries - Steel pipe for pipeline transportation systems, pp. 1-192, 2012

[8] J.Hans, V. Schuler: Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, Kapitel 2.2.4, S. 43, 4. Aufl. Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2011

[9] ASME, BPVC Section VIII-Rules for Construction Pressure Vessels, Division 1, 2013

[10] EN 1011-2:2001, Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 2: Arc welding of ferritic steels

[11] J. Norbert; Moderne Feinkornbaustähle und ihre schweißtechnische Verarbeitung, GRIN Verlag GmbH, S.1-30, 2008



Sebastian Baloš<sup>1</sup>, Miroslav Dramićanin<sup>1,a</sup>, Petar Janjatović<sup>1</sup>, Ivan Zabunov<sup>2</sup>, Nenad Kulundžić<sup>1</sup>, Slobodan Tabaković<sup>1</sup>, Vencislav Grabulov<sup>3</sup>

# UTICAJ SADRŽAJA OKSIDA NA ZAVARIVANJE U ZAŠTITNOM GASU SA NETOPLJIVOM ELEKTRODOM SA AKTIVNIM TOPITELJEM

## INFLUENCE OF OXIDE CONTENT IN ACTIVATED TUNGSTEN INERT GAS WELDING

### Originalni naučni rad / Original scientific paper

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

### Rad primljen / Paper received:

Oktobar 2021.

### Rad prihvaćen / Paper accepted:

Maj 2022.

**Ključne reči:** aktivni topitelj, TIG zavarivanje, nerđajući čelik, dubina uvara, sadržaj nano čestica

### Rezime

U ovom radu, izvršeno je zavarivanje – pretapanje uzoraka od austenitnog nerđajućeg čelika AISI 304L (X2CrNi19-11) postupkom TIG, sa aktivnim topiteljem, odnosno, A-TIG postupkom. Topitelji su pripremljeni mešanjem 5, 10, 20, 30 i 40 % nanočestica SiO<sub>2</sub> sa acetonom kao rastvaračem, dok je nanošenje na osnovni materijal izvršeno četkicom, neposredno pre uspostavljanja električnog luka. Izvršena je vizuelna kontrola i makro ispitivanje, pri čemu je najveći akcenat stavljen na merenje dubine uvara, kao dominantnog parametra na osnovu kojeg je procenjena efikasnost topitelja. Ustanovljeno je da najveću dubinu uvara obezbeđuje primena 5 i 40 % nano čestica, s tim da je širina šava veća kod uzorka zavarenog sadržajem nano čestica od 40 %. Međutim, sa gledišta tehnologije zavarivanja, ocenjeno je da je ovo od sekundarnog značaja i da je optimalni sadržaj 5 % nano čestica, pre svega zbog niže cene, jednostavnijeg mešanja, manje viskoznosti i lakšeg nanošenja topitelja na osnovni materijal.

### 1. Uvod

Upotreba hemijskih supstanci čiji je cilj povećanje efikasnosti i produktivnosti zavarivanja dobro su se pokazale u praksi, odnosno praktičnoj industrijskoj primeni. Najznačajniji proizvodi od

### Adresa autora / Author's address:

<sup>1</sup> Department of Production Engineering, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia

<sup>2</sup> Faculty of Special Technology, Alexander Dubcek University of Trencin, Studentska 2, 911 50 Trencin, Slovakia

<sup>3</sup> Institute IMS, Bulevar Vojvode Misica 43, 11000 Belgrade, Serbia

E mail: <sup>a</sup>dramicanin@uns.ac.rs

**Keywords:** activated flux, TIG welding, stainless steel, penetration depth, nanoparticle content

### Abstract

In this paper, welding-remelting of AISI 304L (X2CrNi19-11) austenitic stainless steel was performed by using TIG process with activating flux, that is, A-TIG process. Fluxes were prepared by mixing 5, 10, 20, 30 and 40 % SiO<sub>2</sub> nano particles with acetone solvent, while the application of the flux was done by a brush, prior to electric arc engagement. Characterization was done by visual testing and macro section analysis, with the main stress aimed at penetration depth as the dominant parameter used to assess the effectiveness of the flux. It was found that the highest penetration was obtained with 5 and 40 % of nano particles, with the wider weld obtained with 40 % of nano particles. However, from the point of welding technology, it was assessed that this is of secondary importance and that the optimal flux contains 5 % nano particles, primarily due to a lower cost, simpler mixing, lower viscosity and an easier flux application on the base metal.

hemijskih supstanci su topitelji (fluks) za zavarivanje koji se koriste kako bi zaštitili metal šava od uticaja atmosferskih gasova (vodonik, azot, kiseonik), smanjuju energiju jonizacije (potencijala) kako bi se omogućila stabilizacija električnog luka i izazvale hemijske reakcije u metalu šava. Ovi efekti



nastaju dezoksidacijom i dodavanjem legirajućih elemenata [1]. Od 1960. godine postoje topitelji, odnosno aktivni premazi za povećanje dubine uvara kod zavarivanja netopljivom elektrodom u zaštiti inertnog gasa (TIG) ili zavarivanja topljivom elektrodom u zaštiti gasa (MIG/MAG) [2]. Kod TIG postupka se topitelj retko koristi, jer sam zaštitni inertni gas pruža dovoljnu zaštitu od atmosferskih gasova i dovoljnu stabilizaciju električnog luka [3], međutim topitelj se koristi u tehnološke svrhe kao katalizator procesa zavarivanja i tada se topitelj nanosi na površinu osnovnog metala četkom ili rasprskavanjem [4–6]. Topitelj sadrži metalne okside ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CuO}$ ) u lako isparljivom rastvaraču kao što su aceton, metanol ili etanol, kako bi se moglo vršiti zavarivanje u što kraćem roku od nanošenja [7, 8].

Ovaj postupak TIG zavarivanja potpomognut topiteljem naziva se A-TIG (activated tungsten inert gas welding) [9]. Upotrebom topitelja izdvajaju se dva efekta koji imaju najveći uticaj na povećanje produktivnosti: suženje električnog luka i izazivanje obrnutog Marangonijevog efekta u metalnoj kupki. Suženje električnog luka je rezultat elektronegativnosti isparenja topitelja, gde vrsta oksida igra glavnu ulogu [10].

Tseng i Chen objavili su da je  $\text{SiO}_2$  efikasniji od  $\text{TiO}_2$  zato što je silicijum ima veću elektronegativnost u odnosu na titanijum (Pauling skala: Si 1.9, Ti 1.54) [11]. Međutim obrnuti Marangonijev efekat, odnosno uticaj površinskih napona u metalnoj kupki ima veći uticaj na povećanje dubine. Naime, rastop se kreće iz područja niskog površinskog napona ka području visokog površinskog napona [12]. Kod konvencionalnog TIG zavarivanja čistih metala, čelika i drugih železnih legura koji imaju nizak sadržaj sumpora i kiseonika, površinski napon opada sa povećanjem temperature. Na taj način pospešuje se tok rastopljenog metala ka spoljašnjim ivicama, što rezultira relativno plitkom i širokom metalu šava. Sa druge strana, u prisustvu kiseonika menja se površinski napon, a samim tim i tok kretanja rastopa, odnosno tečni metal sa ivica rastopa se kreće ka sredini metala šava i u dubinu. Kao rezultat dobijamo uzak metal šava sa većom dubinom uvara. [13–15]. Ovo praktično znači da topitelj nije neophodan, međutim povišen sadržaj sumpora je povoljan sa stanovništva dubine uvara, ali sumpor uzrokuje smanjenu duktilnost i povećanu krtoš, zbog toga se i smatra nečistoćom u materijalu [16]. Stoga kiseonik predstavlja mnogo bolju alternativu. Kiseonik se u metal šava osim upotrebom topitelja može uneti i tokom procesa

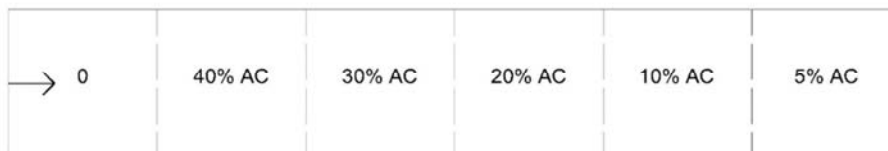
zavarivanja upotrebom modifikovanih gorionika [17]. Međutim bolji odnos dubine uvara i širine metala šava se dobija upotrebom topitelja [14, 18].

Postoje mnoga istraživanja o efikasnosti topitelja na osnovu njegovog sastava. U radu Vora and Badheka [19] ispitivani su različiti oksidi ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{HgO}$ ,  $\text{MoO}_3$  and  $\text{NiO}$ ), otkrivajući da su  $\text{Co}_3\text{O}_4$  i  $\text{CuO}$  najefikasniji. Drugi autori [20–22] ispitivali su topitelje sa oksidima  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$  i ustanovili da pored hemijskog sastava fluksa značajan uticaj imaju i veličine oksidnih čestica. Upotrebom jednokomponentnih topitelja na bazi nanočestica dobijeni su odnosi dubine i širine metala šava od 1.08. Utvrđeno je da topitelji na bazi nano čestica  $\text{SiO}_2$  imaju veću efikasnost u odnosu na čestice mikronske veličine, dok je kod čestica  $\text{Al}_2\text{O}_3$  uočena obrnuta zavisnost [20]. U istraživanju [6] ustanovljeno je da topitelj od mešavina mikro i nano čestica  $\text{TiO}_2$  da ima veću efikasnost nego topitelji od tih komponenti samostalno. Međutim u naučnim istraživanjima ima vrlo malo rezultata koja je to optimalna količina aktivnih čestica, odnosno oksida potrebna u topitelju. Tseng i Wang su dobili pozitivne rezultate sa topiteljem na bazi 40% oksida (30%  $\text{SiO}_2$ , 25%  $\text{TiO}_2$ , 20%  $\text{ZnO}$ , 12%  $\text{NiO}$ , 5%  $\text{MgO}$ , 3%  $\text{Cu}_2\text{O}$ , 5%  $\text{FeF}_2$ ) sa prosečnom veličinom čestica od 0.74  $\mu\text{m}$  prilikom TIG i Plazma zavarivanja nerđajućeg čelika AISI 316L [23]. Huang je napravio topitelj koji je sadržao čestice veličine 70 – 80  $\mu\text{m}$   $\text{TiO}_2$  (30%, 98.5 % čistoće),  $\text{SiO}_2$  (25%, 99 % čistoće),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (25%, 99 % čistoće), and  $\text{MoO}_3$  (20%, 99.5 % čistoće) za zavarivanje austenitnog nerđajućeg čelika AISI 304 [24].

## 2. Eksperiment

Zavarivanje, odnosno pretapanje je izvršeno na austenitnom nerđajućem čeliku AISI 304L (<0.03% C; 0.51% Si; 1.28% Mn; <0.007% S; 17.88% Cr; 0.0025% P; 0.008% Al; 0.36% Cu; 9.62% Ni; 0.011% Sn; 0.05% V, ostatak Fe), u obliku ploča debljine 10 mm.

Pripremljeno je pet različitih topitelja, mešanjem 5, 10, 20, 30 i 40 % nano čestica  $\text{SiO}_2$  nominalnog prečnika 20 nm sa acetonom ( $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$ ). Za merenje mase oksidnih čestica, korišćena je analitička vaga Železniki Tip 2615. Mešanje je izvršeno magnetnim mešačem Tehnica MM530 u trajanju od 10 minuta. Topitelji su naneti na površinu osnovnog materijala korišćenjem četkice širine 10 mm, na širini od oko 20 mm. Za utvrđivanje dubine penetracije (uvara), uzorci su upoređeni sa uzorkom koji je dobijen bez topitelja, označenim sa 0.



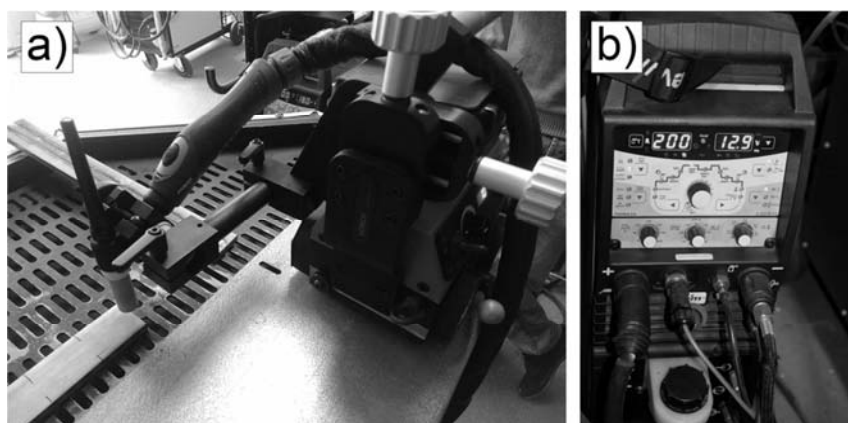
**Slika 1.** Plan nanošenja topitelja

**Figure 1.** Fluxes application plan

Zavarivanje, odnosno pretapanje je izvršeno uređajem EWM Tetrix 300 (slika 2b), jednosmernom strujom direktne polarnosti od 200 A, sa keramičkom mlaznicom prečnika 12,7 mm. Korišćena je elektroda prečnika 2,4 mm, sa 2 % ThO<sub>2</sub> i vrhom pod 30°. Rastojanje od vrha elektrode do osnovnog materijala bila je 2 mm. Zavarivanje je izvršeno traktorom tipa Lorch Trac WL (slika 2a), sa brzinom zavarivanja 100 mm/min.

Dobijeni uzorci su vizuelno pregledani i napravljeni su makro preseći, sa indikovanom

dubinom uvara, širinom, odnosom dubine i širine zavara, tačnije, pretopljenog materijala. Priprema uzoraka je izvršena standardnom metalografskom procedurom, korišćenjem opreme Struers. Izvršeno je isecanje, montiranje uzoraka, brušenje brusnim papirima (granulacije 150 do 2000), poliranja dijamantskim suspenzijama (6, 3, 1 i ¼ µm) i nagrizanjem carskom vodom (1/3 azotne kiseline HNO<sub>3</sub> i 2/3 hlorovodonične kiseline HCl).



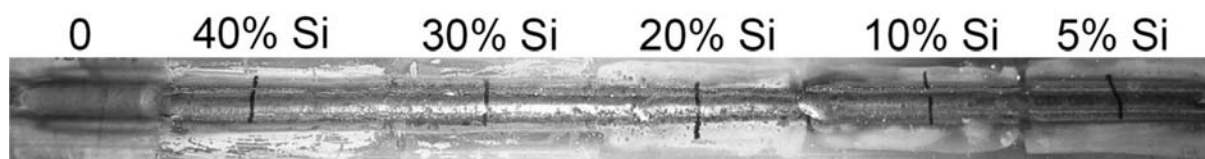
**Slika 2.** Oprema za zavarivanje a) Traktor za zavarivanje sa montiranim gorionikom b) Aparat sa parametrima nakon zavarivanja

**Figure 2.** Welding equipment a) Welding tractor with mounted torch b) Apparatus with parameters after welding

### 3. Rezultati i diskusija

Izgled lica šava prikazan je na slici 3, sa indikovanim uzorkom, odnosno mestom isecanja uzorka za makro ispitivanje. Površina šavova je relativno glatka i morfološki se ne razlikuje značajno od uzorka do uzorka. Pored šava se jasno vidi ostatak premaza, koji nije odreagovao tokom procesa dejstva električnog luka sa netopljive elektrode. Pri višim sadržajima oksida u

topitelju (preko 20 %), boja premaza je izraženija, ali su ujedno jasniji znaci ljuštenja topitelja. Osnovni razlog leži u oduvavanju relativno debelog sloja oksida, čija je athezija za osnovu niža nego u slučaju tankov sloja kod manjeg sadržaja oksida. Naime, zavarivanju se pristupilo tek nakon sušenja rastvarača, što je relativno brzo, posle nekoliko sekundi, s obzirom na veliku brzinu isparavanja acetona.



**Slika 3.** Lice šava sa označenim uzorcima i mestima isecanja uzoraka za makro

**Figure 3.** Weld metal face with marked samples and cut locations for macro examination samples



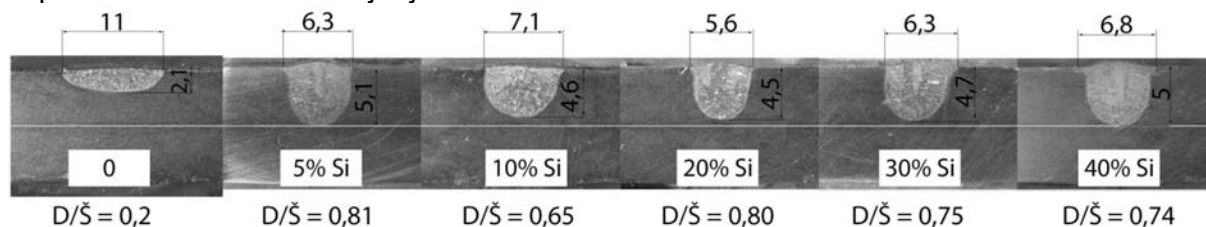
Makro preseći, sa dubinama uvara, širinama, odnosima dubine i širine šava prikazani su na slici 4. Svi šavovi imaju stubastu strukturu, sa kristalinitima usmerenim od linije stapanja prema sredini šava, što je tipično za zavarene spojeve. Osim toga, u odnosu na kontrolni uzorak, svi šavovi imaju značajno veću dubinu uvara, uz manju širinu i veći odnos dubine i širine. Dubina uvara, kao dominantni parametar, odnosno najvažniji rezultat nanošenja aktivacionog topitelja i ključ povećanja produktivnosti TIG postupka, ima najveću vrednost pri sadržaju nanočestica u rastvaraču od 5 i 40 %.

S druge strane, širina šava kod sadržaja 5 % je manja u odnosu na širinu šava kod sadržaja nanočestica 40 %. Treba reći, da je i širina zavara od sekundarnog značaja u odnosu na dubinu uvara, odnosno, dok god je širina veća u odnosu na hrapavost osnovnog materijala, može se reći da navedena širina zadovoljava tehnološke zahteve pretapanja kontaktnih površina, a to je ovde zadovoljeno. Najmanja dubina uvara je dobijena kod sadržaja nano čestica od 20 %. Na osnovu iznetog, može se reći da je sa gledišta dubine uvara, efikasnost sadržaja 5 i 40 % jednaka. Međutim, sa gledišta mešanja, odnosno utroška nano čestica, značajnu prednost ima sadržaj 5 %. Naime, treba reći da je mešanje sadržaja 40 % značajno otežano zbog velike viskoznosti smeše, koja se povećava tokom mešanja jer dolazi do

isparavanja rastvarača. Osim toga, nanošenje premaza sa 40 % nano čestica je otežano i treba ga izvesti znatno brže s obzirom na povećanje viskoznosti. Postoje dva moguća razloga zašto efikasnost smeše nije proporcionalna sadržaju čestica:

1. prekidanje nanetog filma aktivne supstance, tj. nano čestica i razduvanje odvojenih čestica zaštitnim gasom, čime se količina čestica zahvaćenih električnim lukom znatno smanjuje.
2. veća količina nano čestica u rastvoru negativno utiče na stvaranje aglomerata i agregata, odnosno, na spajanje nano čestica [25–27]. Tokom zavarivanja, sitnije čestice znatno brže reaguju, raspadaju se i brže se oslobađa kiseonik iz oksida koji igra ključnu ulogu u ostvarivanju obrnutog Marangonijevog efekta.
3. povećan utrošak energije električnog luka na topljenje veće količine topitelja, čime se smanjuje energija koja se troši na postizanje dovoljno velike dubine uvara.

Dalje istraživanja treba da daju odgovor koji od gore navedenih efekata je ključan, odnosno dominantan za smanjenje efikasnosti veće količine nano čestica, a nije isključeno da su efekti kombinovani, tj. da za smanjenje efikasnosti nije odgovoran samo jedan.



**Slika 4.** Makro strukture poprečnog preseka sa dubinom uvara, širinom šava, odnosom dubine i širine šava

**Figure 4.** Macro structures of cross-section with weld depth, seam width, seam depth-to-width ratio

Gore navedeni efekti su značajni s obzirom i na efekat sužavanja električnog luka, koji se postiže elektronegativnošću metala koji stvara metalni oksid, u ovom slučaju,  $\text{SiO}_2$ . Konačno, može se reći

#### 4. Zaključak

Na osnovu prikazanih rezultata i u okviru ograničenja koja su prisutna u pogledu eksperimentalnog ispitivanja, mogu se izvući sledeći zaključci:

- Najveća dubina uvara je dobijena aktivacionim topiteljima koji sadrže 5 i 40 % nano čestica
- Širina zavara nisu u direktnoj vezi sa sadržajem nano čestica u aktivacionom topitelju.

da je sa gledišta ekonomičnosti, znatno povoljnije koristiti niži sadržaj nanočestica, s obzirom na troškove nabavke i proizvodnje aktivacionog topitelja.

#### 4. Conclusion

Based on the presented results and within the limitations of the experimental test, the following could be concluded:

- The greatest weld depth was obtained with activation fluxes containing 5 and 40% nano particles
- The width of the weld is not directly related to the content of nano particles in the activation flux.



- Pri većim sadržajima oksida u aktivacionom topitelju dolazi do odvajanja topitelja od osnovnog materijala i razduvanja od strane zaštitnog gasa.
- Smanjena efikasnost topitelja sa većim sadržajima nano čestica može biti rezultat odvajanja topitelja i razduvanja, stvaranja aglomerata i agregata pri većim sadržajima nano čestica, ali i povećane energije za topljenje veće količine oksida, čime se smanjuje efikasnost topitelja.
- Optimalni sadržaj nano čestica sa gledišta dubine uvara i ekonomičnosti, kao i tehnološki dobijanja i nanošenja aktivacionog topitelja je 5 %.
- At higher oxide contents in the activation flux, the flux separates from the base material and is blown by the shielding gas.
- Reduced efficiency of fluxes with higher contents of nano particles can be the result of separation of the flux and blowing, formation of agglomerates and aggregates with higher contents of nano particles, but also increased energy for melting a larger amount of oxide, which reduces the efficiency of the fluxes.
- The optimal content of nano particles from the point of view of weld depth and economy, as well as the technology of obtaining and applying the activation fluxes is content of 5%.

### Zahvalnica

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja kroz projekat broj 451-03-68/2020-14/200156: "Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN-a"

### Literatura / References

[1] Messler, R. W., Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy, Wiley-VCH, (2004).

[2] Gurevich, S. M., Zamkov, V. N., Kushnirenko, N. A., Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by argon tungsten arc process, *Automat Weld*, 18 (1965), no. 9, pp. 1–5.

[3] Timings, R., Fabrication and Welding Engineering, *Fabrication and Welding Engineering*, (2008).

[4] Balos, S., Dramicanin, M., Janjatovic, P., Zabunov, I., Klobcar, D., Busic, M., Grilli, M. L., Metal oxide nanoparticle-based coating as a catalyzer for A-TIG welding: Critical raw material perspective, *Metals*, 9 (2019), no. 5.

[5] Balos, S., Janjatovic, P., Zabunov, I., Grabulov, V., Dramicanin, M., ACTIVATED FLUX TIG WELDING OF STAINLESS-STEEL PIPES, *Chem. Ind. Chem. Eng. Q*, 25 (2019), no. 4.

[6] Balos, S., Dramicanin, M., Janjatovic, P., Zabunov, I., Pilic, B., Goel, S., Szutkowska, M., Suppressing the Use of Critical Raw Materials in Joining of AISI 304 Stainless Steel Using Activated Tungsten Inert Gas Welding, *Metals* 2019, Vol. 9, Page 1187, 9 (2019), no. 11, p. 1187.

### Acknowledgment

This research is supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development through the project number 451-03-68/2020-14/200156: "Innovative scientific and artistic research in the field of activities of FTN"

[7] Howse, D. S., Lucas, W., Investigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 5 (2000), no. 3, pp. 189–193.

[8] Manabu Tanaka;Hidenori Terasaki;Masao Ushio;John J. Lowke;Yang, C.-L., A MECHANISM OF DEEP WELD PENETRATION IN GAS TUNGSTEN ARC WELDING WITH ACTIVATING FLUX, *Proceedings of the KWS Conference*, (2002), pp. 76–81.

[9] Arivazhagan, B., Vasudevan, M., Studies on A-TIG welding of 2.25Cr-1Mo (P22) steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 18 (2015), pp. 55–59.

[10] Vidyarthi, R. S., Dwivedi, D. K., Activating flux tungsten inert gas welding for enhanced weld penetration, *Journal of Manufacturing Processes*, 22 (2016), pp. 211–228.

[11] Tseng, K.-H., Chen, K.-L., Comparisons Between TiO<sub>2</sub> - and SiO<sub>2</sub> -Flux Assisted TIG Welding Processes, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12 (2012), no. 8, pp. 6359–6367.

[12] Thomson, J., XLII. On certain curious motions observable at the surfaces of wine and other alcoholic liquors, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 10 (1855), no. 67, pp. 330–333.



- [13] Modenesi, P. J., Apolinário, E. R., Pereira, I. M., TIG welding with single-component fluxes, *Journal of Materials Processing Technology*, 99 (2000), nos. 1–3, pp. 260–265.
- [14] Tanaka, M., Shimizu, T., Terasaki, H., Ushio, M., Koshi-Ishi, F., Yang, C. L., Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 5 (2000), no. 6, pp. 397–402.
- [15] Dong, C., Zhu, Y., Chai, G., Zhang, H., Katayama, S., Preliminary study on the mechanism of arc welding with the activating flux, In *Aeronautical Manufacturing Technology, Supplement 2004 Paper Presented At International Symposium High Energy Density Beam Processing Technology*, (2004), pp. 271–278.
- [16] Llewellyn, D. ., *Steels: Metallurgy and Applications*, Butterworth Heinemann, Woburn, 1992.
- [17] Zou, Y., Ueji, R., Fujii, H., Effect of oxygen on weld shape and crystallographic orientation of duplex stainless steel weld using advanced A-TIG (AA-TIG) welding method, *Materials Characterization, Complete* (2014), no. 91, pp. 42–49.
- [18] Skvortsov, E. A., Role of electronegative elements in contraction of the arc discharge, *Welding International*, 12 (1998), no. 6, pp. 471–475.
- [19] Vora, J. J., Badheka, V. J., Experimental investigation on mechanism and weld morphology of activated TIG welded bead-on-plate weldments of reduced activation ferritic/martensitic steel using oxide fluxes, *Journal of Manufacturing Processes*, P1 (2015), no. 20, pp. 224–233.
- [20] Tseng, K.-H., Lin, P.-Y., UNS S31603 Stainless Steel Tungsten Inert Gas Welds Made with Microparticle and Nanoparticle Oxides, *Materials*, 7 (2014), no. 6, pp. 4755–4772.
- [21] Venkatesan, G., George, J., Sowmyasri, M., Muthupandi, V., Effect of Ternary Fluxes on Depth of Penetration in A-TIG Welding of AISI 409 Ferritic Stainless Steel, *Procedia Materials Science*, 5 (2014), pp. 2402–2410.
- [22] Venkatesan, G., Muthupandi, V., Justine, J., Activated TIG welding of AISI 304L using mono- and tri-component fluxes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2016 93:1, 93 (2016), no. 1, pp. 329–336.
- [23] Tseng, K.-H., Wang, N.-S., Research on bead width and penetration depth of multicomponent flux-aided arc welding of grade 316 L stainless steel, *Powder Technology*, 311 (2017), pp. 514–521.
- [24] Huang, H. Y., Argon-hydrogen shielding gas mixtures for activating flux-assisted gas tungsten arc welding, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 41 (2010), no. 11, pp. 2829–2835.
- [25] Balos, S., Pilic, B., Petronijevic, B., Markovic, D., Mirkovic, S., Šarčev, I., Improving mechanical properties of flowable dental composite resin by adding silica nanoparticles, *Vojnosanitetski Pregled*, 70 (2013), no. 5, pp. 477–483.
- [26] Balos, S., Pilic, B., Petrovic, D., Petronijevic, B., Šarčev, I., Flexural strength and modulus of autopolimerized poly(Methyl methacrylate) with nanosilica, *Vojnosanitetski Pregled*, 75 (2018), no. 6, pp. 564–569.
- [27] Balos, S., Pilic, B., Markovic, D., Pavlicevic, J., Luzanin, O., Poly(methyl-methacrylate) nanocomposites with low silica addition, *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 111 (2014), no. 4, pp. 327–334.



Mersida Manjgo<sup>1,a</sup>, Tomaž Vuhere<sup>2</sup>, Mirza Manjgo<sup>2</sup>, Meri Buzić<sup>3</sup>

## EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE ZAOSTALIH NAPONA U KONSTRUKCIJI METODOM BUŠENJA RUPE

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN STRUCTURE BY HOLE DRILLING METHOD

### Stručni rad / Professional paper

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

### Rad primljen / Paper received:

Septembar 2021.

### Rad prihvaćen / Paper accepted:

Jun 2022

**Ključne reči:** deformacija, zaostali naponi, rozeta

### Rezime

Vrlo bitan segment, a koji se javlja kao posljedica zavarivanja, je pojava zaostalih napona u zavarenim konstrukcijama. Efekti zaostalih napona mogu biti korisni ili štetni po konstrukciju, zavisno od njihove veličine, znaka, raspodjele napona u odnosu na napone koji su izazvani samim spoljnim opterećenjem. Samim tim, ispitivanje zaostalih napona je veoma važno jer oni bitno utiču na stvaranje i rast prslina, pojavu krto g loma, zamora materijala, itd. U radu je prikazana procedura ispitivanja mjerenje zaostalih napona metodom "zabušivanja rupe" i mogućnost praktične primjene saznanja o zaostalim naponima u cilju poboljšanja kvaliteta mašinskih dijelova i same konstrukcije.

### 1. Uvod

U zavarenim spojevima uvijek su prisutni zaostali naponi, kao posljedica neravnotežnog hlađenja metala šava i osnovnog metala. U slučaju kada zaostali naponi premašuje napon tečenja materijala, dolazi do plastične deformacije, pa se zaostali naponi opuštaju za premašeno naprezanje naprezanja materijala [1]. U zavarenim spojevima ta naprezanja najčešće negativno utječu na samu zavarenu konstrukciju i zavarene spojeve. Budući da smanjuju nosivost zavarene konstrukcije, utiču na čvrstoću zamora kod zamora, uzrokuju elastičnu deformaciju zavara kao i rast prslina.

### Adresa autora / Author's address:

<sup>1</sup> Univerzitet "Džemal Bijedić" u Mostaru Mašinski fakultet, BiH

<sup>2</sup> Univerza u Mariboru, Fakultet za strojništvo, Slovenija

<sup>3</sup> Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Srbija

E mail: <sup>a</sup>mersida.manjgo@unmo.ba

**Keywords:** deformation, residual stresses, rosette

### Abstract

A very important segment, which occurs as a result of welding, is the occurrence of residual stresses in welded structures. The effects of residual stresses can be beneficial or harmful to the structure, depending on their size, sign, and stress distribution in relation to the stresses caused by the external load itself. Therefore, the examination of residual stresses is very important because they significantly affect the formation and growth of cracks, the appearance of brittle fractures, material fatigue, etc. The paper presents the test procedure for measuring residual stresses by the method of "hole drilling" and the possibility of practical application of knowledge about residual stresses in order to improve the quality of machine parts and the structure itself.

Mjerenje zaostalih napona nije moguće sprovesti uobičajenim postupcima za eksperimentalnu analizu naponskog stanja, pošto je senzor deformacije (mjerna traka, fotoelastični premaz, krti lakovi, itd.) potpuno neosjetljiv na napone prisutne u materijalu i mjeri samo promjenu deformacije nakon instalisanja senzora. Da bi se zaostali naponi izmjerili ovim standardnim senzorima, moraju se na neki način "osloboditi" iz materijala, tako da senzor može registrovati promjene deformacije izazvane oslobađanjem napona [2].



Danas, najpouzdanija savremena tehnika za mjerenje zaostalih napona je metoda "zabušivanja rupe". Eksperimentalno je dokazana tačnost i pouzdanost ove metode (tačnost ove metode je  $\pm 5\%$ ), ona je kao takva i standardizovana, Standard ASTM E837 [3] iz 2015 godine i danas predstavlja jedinu verifikovanu metodu za mjerenje zaostalih napona u konstrukcijama.

## 2. Eksperimentalno određivanje zaostalih napona

Ispitivanja zaostalih napona u eksploatacionim uslovima su rađena sa ciljem da se odredi stvarno naponsko i deformacijsko stanje u eksploataciji, definišu eventualne promjene, a koje treba da budu podloga za procjenu integriteta i preostalog vijeka posude. Za eksperimentalna ispitivanja korišten je mikrolegirani čelik SA 387 Gr. 91 koji spada u grupu Cr-Mo čelika, ima napon tečenja min 450MPa i garantovanu energiju udara na sobnoj temperaturi minimum 41J. Hemijski sastav ispitivanog čelika je dat u tabeli 1 [4].

**Tabela 1.** Hemijski sastav ispitivanog čelika SA 387 Gr. 91

**Table 1.** Chemical composition of the tested steel SA 387 Gr. 91

Šarža	Hemijski sastav, mas. %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Nb	Cu
	0.129	0.277	0.443	0.001	0.001	8.25	0.874	0.01	0.198	0.056	0.068

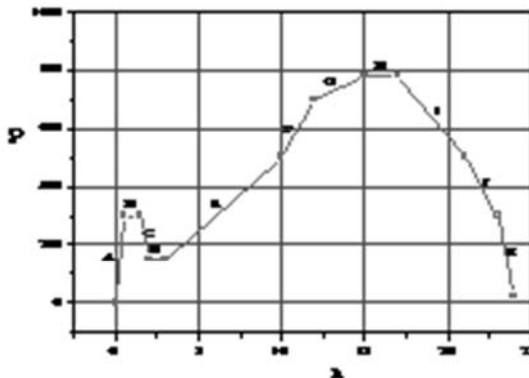
Zavarivanje čeličnih limova je urađeno sa dva postupka zavarivanja i dva dodatna materijala:

1. Korjenski zavar - TIG zavarivanje (postupak 141 prema EN ISO 6947), 4 (četiri) prolaza. Korišteni dodatni materijal za TIG je žica oznake BOEHLER C 9 MV-IG, prečnika 2,4mm.

2. Ispuna - REL zavarivanje (postupak 111 prema EN ISO), ostali prolazi. Korišteni dodatni

materijal za REL je elektroda oznake BOEHLER FOX C9 MV, prečnika 3,50 i 4,00mm

Termička obrada je urađena radi preraspodjele zaostalih napona neposredno nakon završenog zavarivanja. Propisani režim termičke obrade za zavareni spoj je dat na Slici 1.



**Slika 1.** Dijagram termičke obrade zavarenog spoja [4]

**Figure 1.** Heat treatment diagram of a welded joint [4]

Temperatura predgrijavanja se kontrolisala pomoću termoparova. Za limove debljine veće od 50 mm obavezno se zahtjeva elektrootporno ili elektroindukcijsko zagrijavanje.

Načelno, termička obrada se obavlja na 720 - 780°C, sa brzinom zagrijavanja do 220°C/h i brzinom hlađenja do 150°C/h. Vrijeme zadržavanja

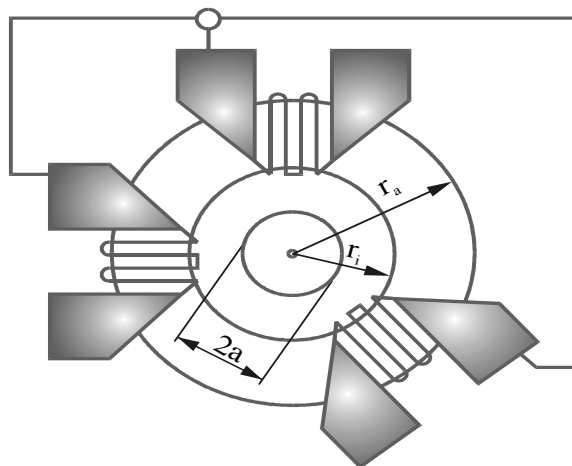
na temperaturi termičke obrade je 5min/1mm debljine zida, a najmanje 2 časa. Širina zone termičke obrade je najmanje jednaka trostrukoj debljini lima, ali nikako ispod 100 mm. Hlađenje se izvodi propisanim brzinom do temperature 300°C, a zatim se zavareni spoj hladi na mirnom vazduhu



## Merenje zaostalih napona metodom "zabušivanja rupe"

Najšire korištena i najpouzdanija savremena tehnika za mjerenje zaostalih napona je metoda "zabušivanja rupe". Kod ove metode, poslije instaliranja senzora deformacije (rozeta sa rupom),

Slika 2, na površini ispitivanog dijela, izbuši se mala plitka rupa u površini. Poslije bušenja, mjeri se promjena deformacije u neposrednoj okolini rupe i iz ovako izmjerenih deformacija izračunava oslobođeni zaostali naponi.



**Slika 2.** Shematski prikaz rozete sa rupom

**Figure 2.** Schematic representation of a rosette with a hole

Metod zabušivanja rupe spada u kategoriju polu razarajućih metoda, pošto mala rupa ne može u većini slučajeva primjetno oslabiti integritet konstrukcije. Rupa je obično prečnika 1.5 - 3.0 mm i iste je dubine. Izbušena rupa može biti začepljena, nakon mjerenja zaostalih napona. Bušenje rupe u materijal koji ima zaostale napone, oslobađa napon u zoni mjerenja, na osnovu činjenice da napon normalan na neku slobodnu površinu (u ovom slučaju površina rupe) mora biti nula [5]. Eliminisanje normalnog napona na granici rupe, redukuje napon u neposrednoj okružujućoj oblasti, uzrokujući da se deformacija lokalne površine promjeni. Mjerenje deformacija proizvedenih oslobađanjem napona daje potrebne podatke za izračunavanje stanja prvobitnih zaostalih napona u zoni mjerenja.

Nakon zabušivanja rupe očitavaju se pojedinačne mjerne vrijednosti za sve tri mjerne trake u rozeti. Izmjerene vrijednosti koriste se za kasniju matematičku obradu, određivanja glavnog normalnog napona.

$$\sigma_{1,2} = -A^*(\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c) \pm B^* \sqrt{(\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c - 2 \cdot \Delta\varepsilon_b)^2 + (\Delta\varepsilon_c - \Delta\varepsilon_a)^2} \quad (1)$$

Pored izmjerenih vrijednosti, neophodno je da se odrede konstante A i B. Konstante A i B uzimaju u obzir geometriju traka i prečnik izbušene rupe, a određuju se po formulama:

$$A^* = \frac{a^2 \cdot (1+\nu)}{2 \cdot r_a \cdot r_i} \quad (2)$$

$$B^* = \frac{2 \cdot a^2}{r_a \cdot r_i} \left[ 1 - \frac{a^2(1+\nu) \cdot (r_a^2 + r_a \cdot r_i + r_i^2)}{4 \cdot r_a^2 \cdot r_i^2} \right] \quad (3)$$

gdje je:

- $\nu$  - Poasonov koeficijent
- $r_a$  - spoljni radijus mrežice mjerne trake
- $r_i$  - unutrašnji radijus mrežice mjerne trake
- $a$  - poluprečnik izbušene rupe

Orijentacioni ugao  $\theta$  se izračunava po obrascu:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c - 2 \cdot \Delta\varepsilon_b}{\Delta\varepsilon_c - \Delta\varepsilon_a} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c - 2 \cdot \Delta\varepsilon_b}{\Delta\varepsilon_c - \Delta\varepsilon_a} \quad (5)$$

U cilju određivanja zaostalog (sopstvenog) deformacijskog, a samim tim i naponskog stanja korišteni su tenzometri – rozete sa rupom 1,5/120 RY 61. Kompenzacija temperaturnih promjena je izvršena sa mjernom trakom 6/120 LY 11. Mjerna mjesta su tako izabrana da daju uvid u raspodjelu zaostalih napona u zoni posude gdje su rađene sanacije.

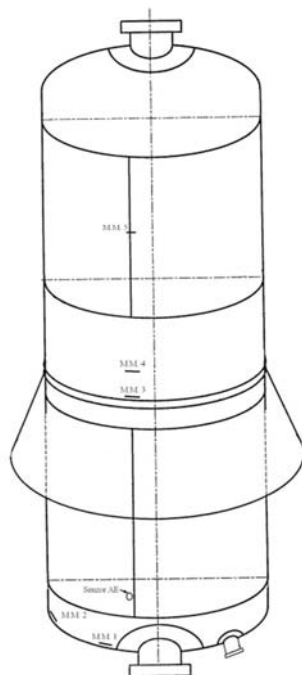
Mjerno mjesto 1 - Zona uticaja toplote, ZUT, saniranog mjesta na dancu posude,

Mjerno mjesto 2 - Zona uticaja toplote, ZUT, zavarenog spoja veze danca,

Mjerno mjesto 3 - Zona neoštećenog dijela osnovnog materijala.



Mjerne trake (rozete sa rupom) su zaljepljene prema shemi kako je to prikazano na slici 3.



**Slika 3.** Pozicija mjernih mjesta: 1, 2 i 3

**Figure 3.** Position of measuring points: 1, 2 and 3

Nakon lepljenja rozeta sa rupom i povezivanja sa elektronskim uređajem SPIDER-8 izvršeno je bušenje rupa u cilju registrovanja zaostalih (sopstvenih) deformacija. Prvo je postavljen alat kojim se vrši centriranje specijalne burgije, a nakon toga se vrši zabušivanje rupe. Nakon zabušivanja rupe, izvršeno je registrovanje deformacijskog stanja elektronskim uređajem UPM 40 i dobijene su

vrijednosti deformacija na svakoj rozeti:  $\Delta\epsilon_a$ ,  $\Delta\epsilon_b$ ,  $\Delta\epsilon_c$ . Iz ovih vrijednosti je omogućeno da se izračunaju glavni normalni naponi  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  i orijentacioni ugao  $\theta$ .

Rezultati mjerenja su dati u tabeli 2. gde je sa  $\theta$  obilježen ugao maksimalnog glavnog zaostalog napona.

**Tabela 2.** Rezultati mjerenja zaostalih (sopstvenih) napona na posudi

**Table 2.** Results of measurement of residual (own) voltages on the vessel

Mjerno mjesto	Mjerna traka 1	Mjerna traka 2	Mjerna traka 3	Napon $\sigma_1$	Napon $\sigma_2$	Ugao $\theta_1$
1	-44	-32	-22	63,1	49,5	-2,6
2	-65	-48	-15	84,5	52,0	8,9
3	-38	-42	-24	60,9	44,8	28,8

Izmjerene mikrodeformacije na mjernim trakama i izračunati stvarni glavni naponi ukazuju na to da ni na jednom mjernom mjestu nije prekoračen napon tečenja, odnosno naponi su u linearno elastičnom području.

### 3. Zaključak

Mjerenje parametara trenutnog stanja napona u postojećim konstrukcijama i elementima ne može se sprovesti konvencionalnim procedurama eksperimentalne analize napona.

Najveći izmjereni glavni napon je na dijelu ZUT, zavarenog spoja veze dance - plašt posude mjerno mjesto 2, odnosno zoni uticaja toplote (ZUT).

### 3. Conclusion

Measurement of parameters of the current state of stress in existing structures and elements cannot be carried out by conventional procedures of experimental stress analysis.



U radu je predstavljena metoda koja omogućava da se takvo ispitivanje sprovede. Metoda je zasnovana je na činjenici da se neposredno na mjestu gdje se u konstrukciji formira otvor, dolazi do relaksacije napona koja je po svojoj veličina uporediva sa stanjem napona prije početka eksperimenta.

Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja i izračunatih vrijednosti dobijene su relativno niske vrijednosti zaostalih (sopstvenih) napona u mjernoj zoni, te ne predstavljaju potencijalnu opasnost za eventualne neželjene posljedice.

### Literatura / References

[1] T. Vuherer, D. Rojko, V. Gliha, „Uticaj reparature na nivo i raspodjelu zaostalih napona u sučeono zavarenom spoju mikrolegiranog čelika“ Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 2/2004, str. 61-65

[2] Mirza Manjgo, Tomaž Vuherer, Darko Bajić, Mjerenje zaostalih napona, 12<sup>th</sup> International Scientific Conference on Production Engineering Development and Modernization of Production, RIM 2019, Sarajevo, BiH, 2019

The paper presents a method that enables such an examination to be carried out. The method is based on the fact that directly at the place where an opening is formed in the structure, there is a stress relaxation, which is comparable in magnitude to the state of stress before the start of the experiment.

On the basis of experimental tests and calculated values, relatively low values of residual (own) voltages in the measuring zone were obtained, and they do not represent a potential danger for possible unwanted consequences.

[3] ASTM E 837 – 01, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, Annual Book of ASTM Standards

[4] Mersida Manjgo, Meri Burzić, Elaborat po projektu EUREKA, Mostar, Beograd, 2018

[5] M. Manjgo, M. Burzic, L.J. Milović; "Merenje zaostalih napona u zavarenim konstrukcijama", 8th International Scientific Conference on Production Engineering, RIM 2011, str. 39-43, 2011



**ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE****Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2022**

	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 2022**

	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

- |   |                     |
|---|---------------------|
| 1. ČLANARINA DUZS za 2022. godinu .....   | <b>3.500 dinara</b> |
| Članovima DUZS <b>GRATIS</b> godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"                      |                     |
| 2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2022. 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 2020. godinu .....   | 500 dinara          |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine.....  | 250 dinara          |
| b) beneficirane cene za članove DUZS:   |                     |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2021. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) .....                                       | 400 dinara          |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) .....                                   | <u>Gratis</u>       |
| 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        |