



ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 68 Vol. 68	Br. 4 No. 4	145-192 145-192	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2023. 2023.
--------------------	----------------	--------------------	---------------------	------------------	----------------

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 Srđan Bulatović, dipl.ing.

Miloš Pavlović, dipl.ing.

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)

REDAKCIJA I MARKETING / EDITORIAL OFFICE AND MARKETING



Vesna Jović
Grčića Milenka 67, I sprat
11000 Beograd



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



Duzs011@gmail.com
www.duzs.org.rs

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна 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 2023.

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 UNOSA TOPLOTE NA DIMENZIJE
UGAONIH SPOJEVA PRI PULSNOM MAG
ZAVARIVANJU LIKOVA OD NELEGIRANOG
ČELIKA

INFLUENCE OF HEAT INPUT ON WELD SIZE OF
PULSED GMAW FILLET WELDS OF UNALLOYED
STEEL

Petar Tasić, Ismar Hajro



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

157

UTICAJA PARAMETARA REŽIMA HIBRIDNOG
LASERSKOG ELEKTROLUČNOG ZAVARIVANJE
KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA – PREGLED STANJA

IMPACT ANALYSIS OF THE HYBRID LASER ARC
WELDING PARAMETERS OF STRUCTURAL STEELS –
STATE OF THE ART

Martin Petreski, Dobro Runchev, Gligorche Vrtanoski



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

169

ZNAČAJ VIZUELNOG ISPITIVANJA ZAVARENIH
SPOJEVA ZA EKSPLOATACIJSKU SIGURNOST
OPREME POD PRITISKOM

SIGNIFICANCE OF VISUAL TESTING OF WELDED
JOINTS ON EXPLOITATION SAFETY OF PRESSURE
EQUIPMENT

Radomir Jovičić, Mihajlo Aranđelović, Simon Sedmak, Dejan Jovičić, Jernej Markež, Maja Marković



PRAKSA

PRACTICE

179

ODRŽAVANJA ŽELEZNIČKIH KOMPONENTI
PRIMENOM PROCESA ELEKTROLUČNOG
NAVARIVANJA

ARC WELDING MAINTENANCE OF RAILWAY
COMPONENTS

Milo Dumović



VESTI

NEWS

156

VESTI – YPIC 2024 - PRVA ONLAJN MEĐUNARODNA KONFERENCIJA MLADIH PROFESIONALACA

156

VESTI – 77. GODIŠNJA SKUPŠTINA MIZ (IIW) 2024

156

VESTI – IIW 2024 MEĐUNARODNA KONFERENCIJA

156

VESTI - MEĐUNARODNA IZLOŽBA IIW 2024

168

VESTI - 2. MEĐUNARODNO NAUČNO-STRUČNO SAVJETOVANJE ZAVARIVANJE SPAJA

“ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 2023”

190

VESTI - TAKMIČENJE MLADIH ZAVARIVAČA INTERNATIONAL WELDING COMPETITION - 2023

192

MARKETING



Petar Tasić^{1,a}, Ismar Hajro¹

UTICAJ UNOSA TOPLOTE NA DIMENZIJE UGAONIH SPOJEVA PRI PULSNOM MAG ZAVARIVANJU LIMOVA OD NELEGIRANOG ČELIKA

INFLUENCE OF HEAT INPUT ON WELD SIZE OF PULSED GMAW FILLET WELDS OF UNALLOYED STEEL

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Jun 2023.

Ključne reči: unos toplote, pulsni MAG, ugaoni spoj, nelegirani čelik, kateta

Rezime

Ovaj rad opisuje uticaj unosa toplote na vrijednost kateta ugaonih spojeva pri pulsnom MAG zavarivanju limova od nelegiranog čelika debljine 4 mm u položenoj i nadglavnoj poziciji. Parametri koji su varirani su jačina struje i brzina zavarivanja, dok su napon i profili struje bili predefinisani uređajem za zavarivanje. Uticaj je predstavljen pomoću modela koji se baziraju na linearnoj regresionoj analizi. Izvršeno je međusobno poređenje razvijenih modela, kao i poređenje sa modelima dostupnim u literaturi.

Adresa autora / Author's address:

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

email: ^a tasic@mef.unsa.ba

Keywords: heat input, pulsed GMAW, fillet weld, unalloyed steel, leg size

Abstract

This paper describes influences of heat input on leg size of pulsed GMAW fillet welds of unalloyed steel with thicknesses of 4 mm, in horizontal and overhead position. Varied parameters were welding current and speed, while voltage and current profile were predefined by welding equipment manufacturer. Influence is described through models based on linear regression analysis. Comparison is made between developed models, as well as with those available in literature.



1. Uvod

Za zavarivanje konstrukcionih čelika pogodni su svi postupci zavarivanja topljenjem [1]. Najčešće korišten postupak je MAG/MIG, pri čemu su obje varijante suštinski iste, samo je zaštitni gas različit [2]. Ovaj postupak ima veliku brzinu deponovanja i može se jednostavno mehanizovati ili robotizovati [3]. Ipak, još uvijek se značajnim dijelom izvodi kao ručni proces [4]. U prilog njegovoj često upotrebi ide i to da 85% proizvoda koji se izrađuju zavarivanjem ima masu do 40 kg, da je 70% spojeva izvedeno na limovima debljine između 3 i 5 mm, te da je 80% spojeva izvedeno kao ugaoni [5].

Kriteriji prihvatljivosti za različite klase kvaliteta spojeva se definišu odgovarajućim standardima koji propisuju zahtjeve u pogledu geometrijskih karakteristika spojeva, kao što je na primjer EN ISO 5817. Neke od njih se mogu utvrditi bez razaranja (vizuelni pregled i mjerenje), a neke sa razaranjem (rezanje zavara, nagrizanje i mjerenje na presjeku). Kako bi se ostvarile potrebne dimenzije zavarenog spoja na raspolaganju su preporuke i smjernice za izbor esencijalnih parametara zavarivanja koje daju proizvođači osnovnog i dodatnog materijala, a u nekim slučajevima i proizvođači opreme za zavarivanje [6].

Ispravno i pažljivo odabrani parametri zavarivanja mogu spriječiti prevelik unos toplote, deformacije predmeta i druge nedostatke spojeva, što smanjuje potrebu za popravkama u vidu brušenja i ponovnog zavarivanja ili termičke obrade [7].

Posebna varijanta je pulsni MAG, odnosno varijanta kada struja pulsira tokom zavarivanja [8]. Pulsiranje je uvedeno da bi se omogućio prenos metala izazivanjem skokovitog rasta jačine struje tokom veoma kratkih vremenskih perioda. Pulsni MAG omogućava dodatnu kontrolu procesa zavarivanja upotrebom profila struje koji se sastoji od pozadinske struje, koja održava električni luk i pulsne (vršne) struje, koji je namijenjen odvajanju kapljice dodatnog materijala. Pri tome jedan puls mora osigurati toplotu potrebnu da istopi samo onoliko dodatnog materijala koliko je dovoljno za jednu kap [7].

Proizvođači uređaja za zavarivanje su razvili i patentirali vlastite profile pulsne struje namijenjene za specifične namjene, kao što je zavarivanje veoma tankih limova ili provara korijena. Primjeri su CMT (Fronius), STT (Lincoln), CBT (Daihen), RMD (Miller), FastROOT (Kempfi) i QSet (ESAB) [9].

2. Modeli veze parametara zavarivanja i geometrije

Da bi zavareni spojevi bili izvedeni bez prekida kroz nekoliko različitih pozicija i pri tome ispunjavali traženu klasu kvaliteta, potrebno je imati precizno vođenje pištolja. Ovo je slučaj, na primjer, kada se zavareni spoj pruža duž trodimenzionalne konture, jer se u općem slučaju za svaku poziciju preporučuju drugačije vrijednosti parametara. Prelazi između pozicija trebaju biti bez greške, a dimenzije šava potpuno iste duž cijelog zavarenog spoja [7].

Ono što bi olakšalo uspješno izvođenje ovakvog zavarenog spoja je postojanje veze između parametara procesa i geometrije zavarenog spoja. Koncept kontrole u realnom vremenu je suštinski veoma jednostavan, a njegova osnova bi bio pouzdan i tačan odnos ulaza (parametri zavarivanja) i izlaza (oblik i dimenzije zavarenog spoja) pri datim uslovima zavarivanja (osnovni i dodatni materijal i pozicija zavarivanja) [10, 11]. Za kontrolu oblika i dimenzija se može iskoristiti vještački vid (na primjer baziran na laseru) da bi se utvrdio oblik zavarenog spoja i izmjerile njegove dimenzije [12].

Model koji povezuje navedene ulaze i izlaze bi bio osnova kontrolne petlje koja bi omogućila korekciju parametara zavarivanja (odnosno unosa toplote) s ciljem ostvarivanja potrebne geometrije šava. Onda bi se tokom samog zavarivanja moglo vršiti podešavanje parametara (ukoliko je potrebno) i to nakon poređenja stvarnog oblika i dimenzija sa referentnim. Ovo je koncept koji je uspješno iskorišten za neke specifične slučajeve zavarivanja i navarivanja elektrolučnim i nekonvencionalnim postupcima [13, 14]. U najvećem broju slučajeva uslovi zavarivanja nisu podudarni sa uslovima u kojima je vršeno istraživanje izloženo u ovom radu. Međutim, dva rada se izdvajaju. To su radovi u kojima su rezultati dobijeni zavarivanjem u uslovima istim ili dovoljno sličnim kao u ovom istraživanju.

Prvi je rad Millera i Funderbruka iz 2001. godine, koji nije baziran na direktnom eksperimentalnom istraživanju, već na analizi 270 specifikacija procedura zavarivanja [15]. Iz njih su preuzeti podaci o parametrima zavarivanja i geometrijskim karakteristikama spojeva. U ovom radu vezu između katete i unosa toplote daje izraz:

$$z = 5,5\sqrt{Q} \quad (1)$$



gdje je z (mm) kateta ugaonog spoja, a Q (kJ/mm) unos toplote. Dalje je preko katete moguće izračunati ostale geometrijske karakteristike, kao što su debljina spoja a ili širina lica šava b . Izraz (1) vrijedi za ručni MAG/MIG postupak zavarivanja, jednoproložne ugaone spojeve, nezavisno od pozicije, tehnike, prečnika žice i vrste i protoka zaštitnog gasa.

Drugi rad je rad Yaakuba i drugih iz 2013. godine, koji je baziran na eksperimentalnom istraživanju jednoproložnih ugaonih zavarenih spojeva izvedenih u nadglavnoj poziciji, na limovima od konstrukcionog čelika [3]. Nakon zavarivanja, izvršeno je presijecanje uzoraka, brušenje, poliranje i nagrizanje, te mjerenje katete, širine lica šava, stvarne debljine šava i penetracije. Sve geometrijske karakteristike su izražene kao funkcija unosa toplote Q , a njihova zavisnost je opisana funkcijom *trendline* u aplikaciji Microsoft Excel.

3. Eksperiment

Eksperimentalna ispitivanja su izvršena u Laboratorijama za zavarivanje na Mašinskom

fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Uzorci su napravljeni od čelika P355NL2 (prema EN 10028-3) u obliku pločica veličine 100×100 mm. Kao dodatni materijal je korištena puna žica prečnika 1,2 mm, oznake G46 3 C 4Si1 prema EN 14341. Zaštitni gas za izradu svih uzoraka je bio M21 prema EN ISO 14175, trgovačkog naziva Messer Ferroline C18, koji se sastoji od 82% Ar i 18% CO₂. Protok zaštitnog gasa je pratio jačinu struje i kretao se u rasponu od 13 do 20 l/min. Svi spojevi su izvedeni kao jednostrani jednoproložni. Zavarivanje je izvršeno upotrebom digitalno kontrolisanog inverterskog uređaja proizvođača OTC Daihen, model Welbee P500L. Iskorišteni su profili struje i napona predefinisani od strane proizvođača.

Glavni parametar koji je podešavan prilikom zavarivanja je srednja jačina struje. Napon i brzina dotura žice su automatski podešeni prema proizvođačkoj specifikaciji, a u skladu sa srednjom jačinom struje, odabranim osnovnim i dodatnim materijalom i vrstom zaštitnog gasa. Pregled esencijalnih parametara zavarivanja korištenih u eksperimentu daje tabela 1.

Tabela 1. Parametri zavarivanja korišteni u eksperimentu

Table 1. Welding parameters used in the experiment

Pozicija	Jačina struje I (A)	Napon U (V)	Brzina zavarivanja w (cm/min)	Unos toplote Q (kJ/mm)
Položena	100 – 180	16,7 – 24,6	12,8 – 36,7	0,4 – 1,0
Nadglavna	100 – 180	18,8 – 24,6	16,4 – 32,2	0,4 – 1,0

Pri ovome je unos toplote izračunat izrazom

$$Q = \frac{60 \cdot P}{1.000 \cdot w} \cdot \eta \quad (2)$$

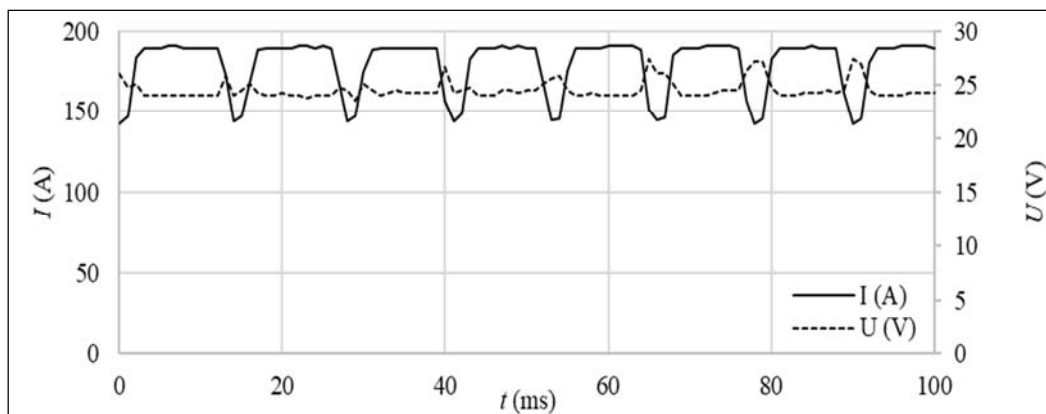
gdje je P (W) snaga električnog luka, w (cm/min) srednja brzina zavarivanja, a η termički stepen iskorištenja postupka koji iznosi između 0,80 i 0,85 [1]. Obzirom da kod pulsno MAG zavarivanja izvor struje daje specifične, promjenjive profile struje i napona, razvijeno je više modela za određivanje snage električnog luka i unosa toplote. U ovom radu je iskorišten model srednje trenutne snage (engl. *Average Instantaneous Power*, AIP) [16, 17].

Prema njemu se snaga električnog luka računa prema izrazu:

$$P_{AIP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \cdot U_i \quad (3)$$

gdje su I_i i U_i trenutne vrijednosti struje i napona i i -tom momentu mjerenja.

Primjer profila struje i napona za uzorak zavaren u položenoj poziciji strujom srednje jačine 180 A je prikazan na slici 1. Slični profili su dobijeni na osnovu zapisa za sve uzorke.



Slika 1. Primjer profila struje i napona za uzorak u položenoj poziciji i srednju struju 180A

Figure 1. Example of a current and voltage profile for a sample in a horizontal position and an average current of 180A

Stvarni profili struje i napona su zabilježeni sa rezolucijom 1 ms upotrebom strujnih kliješta i digitalnog osciloskopa, kako je prikazano na slici 2.



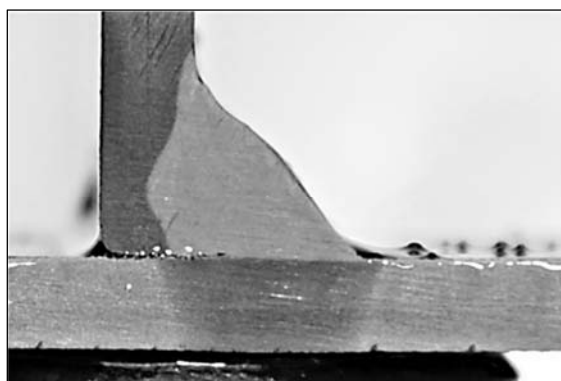
Slika 2. Mjerenje jačine struje i snimanje profila struje i napona pri zavarivanju

Figure 2. Current measurement and recording of current and voltage profiles during welding

4. Rezultati i diskusija

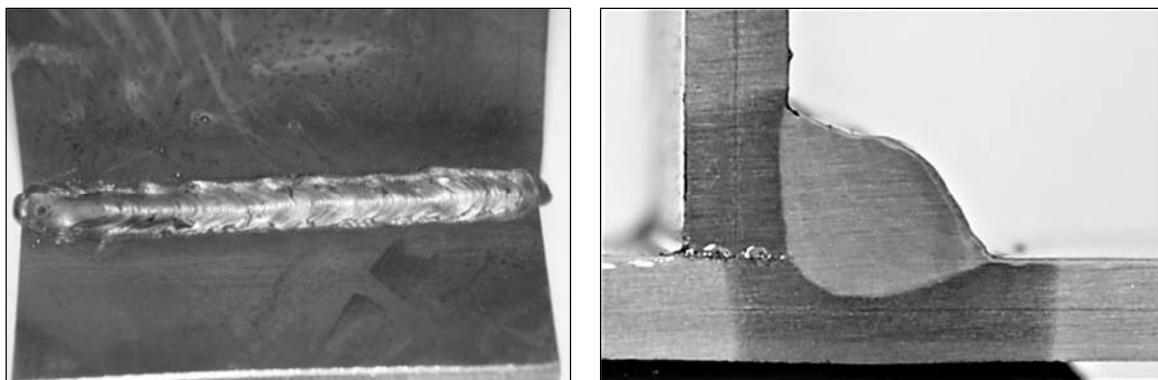
Nakon zavarivanja su svi uzorci vizuelno ispitani. Izvršeno je presijecanje spojeva, te njihovo brušenje, poliranje i nagrivanje presjeka nitalom,

nakon čega je slijedilo makroskopsko ispitivanje u skladu sa standardom ISO 17639. Primjeri tako pripremljenih uzoraka za položenu i nadglavnu poziciju su prikazani na slikama 3 i 4, respektivno.



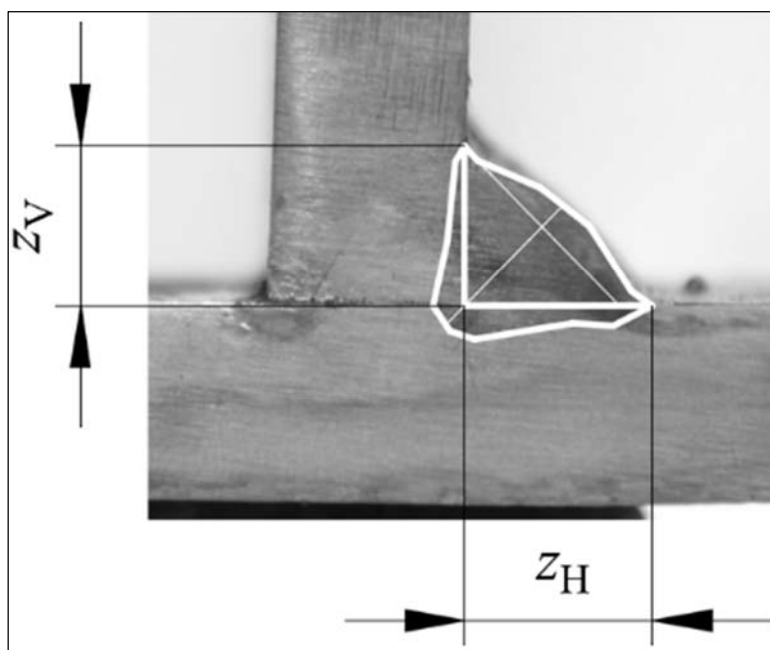
Slika 3. Izgled i presjek zavara za uzorak u položenoj poziciji ($Q=0,82$ kJ/mm)

Figure 3. Appearance and cross-section of the weld for the sample in the horizontal position ($Q=0,82$ kJ/mm)



Slika 4. Izgled i presjek zavara za uzorak u nadglavnoj poziciji ($Q=0,91$ kJ/mm)
Figure 4. Appearance and cross-section of the weld for the sample in the overhead position ($Q=0,91$ kJ/mm)

Nakon fotografisanja tako pripremljenih spojeva, upotrebom aplikacije AutoCAD je izvršeno mjerenje kateta (z_H i z_V), kako je prikazano na slici 5.



Slika 5. Mjerenje kateta na pripremljenim uzorcima
Figure 5. Measurement of the cathetus on prepared samples

S ciljem pojednostavljenja uspostave veze parametara i geometrije, prvo je izvršeno poređenje rezultata mjerenja kateta u dvije različite pozicije (položenoj i nadglavnoj). Za ovo je iskorišten t -test dva uzorka sa pretpostavkom da su varijanse osnovnih skupova jednake (engl. *t-Test Two-Sample Assuming Equal Variances*) koristeći Microsoft Excel. Na ovaj način je utvrđeno da nema statistički značajne razlike između vrijednosti kateta ostvarenih u dvije navedene pozicije. Stoga su se svi podaci mjerenja u nastavku koristili kao jedinstven skup.

Nakon ovoga, izvršena je višestruka linearna regresiona analiza i uspostava veze ulaznih (jačina struje i brzina zavarivanja) sa izlaznim parametrima (veličina katete spoja). I ovo je izvršeno koristeći Microsoft Excel. Glavni pokazatelji regresionog modela su dati u tabeli 2, i prema njima se ovaj model može ocijeniti kao adekvatan, a njima je moguće objasniti 61,11% varijabiliteta (R^2). Ovo nije visoka vrijednost, ali treba imati na umu da je u pitanju ručno zavarivanje i da je to vrlo vjerovatno uticalo na ovu vrijednost.



Tabela 2. Pregled ključnih parametara regresionog modela $z=f(l, w)$

Table 2. Review of the key parameters of the regression model $z=f(l, w)$

Koeficijent determinacije R^2	0,6111
Značajnost F	$2,05 \cdot 10^{-12}$
Standardna greška	0,6102
Broj opservacija	60

Jednačina koja opisuje promjenu z je data preko odgovarajućih koeficijenata navedenim u tabeli 3. Uzevši u obzir P -vrijednost pojedinih ulaznih parametara, može se zaključiti da su u ovom slučaju relevantna oba ulaza (l i w).

Tabela 3. Pregled koeficijenata regresionog modela $z=f(l, w)$

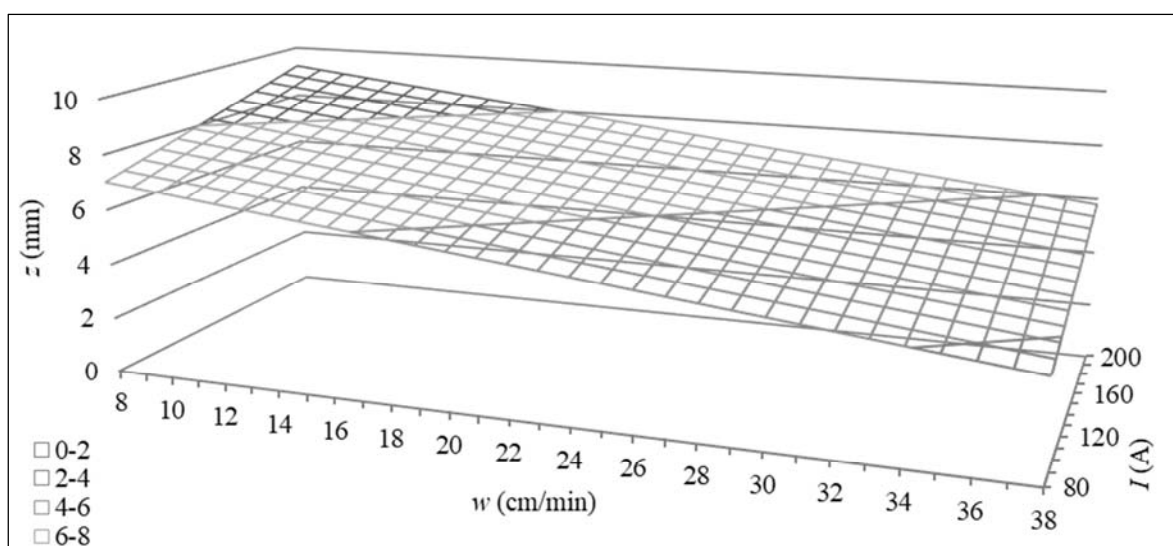
Table 3. Review of the coefficients of the regression model $z=f(l, w)$

	Koeficijent	Standardna greška	P -vrijednost
Odsječak	6,4454	0,4957	$1,07 \cdot 10^{-18}$
l (A)	0,0186	0,0028	$1,34 \cdot 10^{-08}$
w (cm/min)	-0,1150	0,0149	$1,98 \cdot 10^{-10}$

Na osnovu ovoga, jednačina koja opisuje kako se z mijenja u funkciji l i w je

$$z=6,4454+0,0186 \cdot l-0,1150 \cdot w. \quad (4)$$

Grafički prikaz ove jednačine je dat na slici 6.



Slika 6. Grafički prikaz zavisnosti $z=f(l, w)$

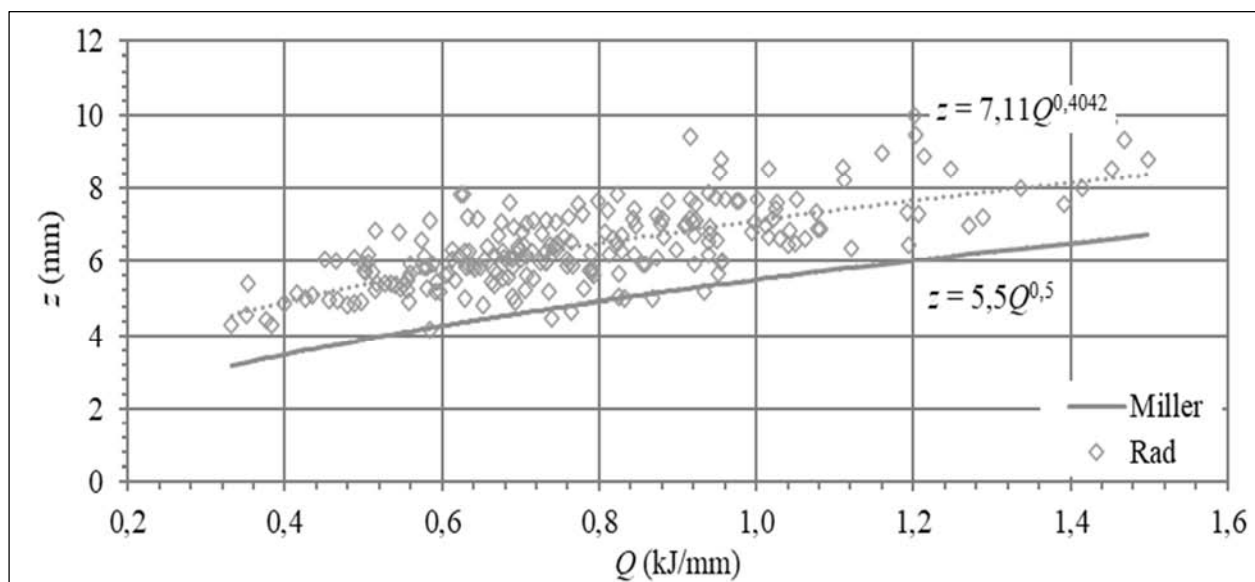
Figure 6. Graphic representation of dependence $z=f(l, w)$



Sa druge strane, radovi navedeni u poglavlju 2 koji su ponudili uspostavu veze između parametara zavarivanja i katete nisu koristili regresionu analizu, već funkciju *trendline*. Kako bi izvršili poređenje rezultata dobijenih u ovom istraživanju sa navedenim, izvršena je uspostava veze između

ulaza (unos toplote) i izlaza (veličina katete) na isti način, bez obzira na postojanje razvijenog regresionog modela (4).

Na slici 7 je dato poređenje sa radom Millera i Funderbruka u kojem je z dato izrazom (1).



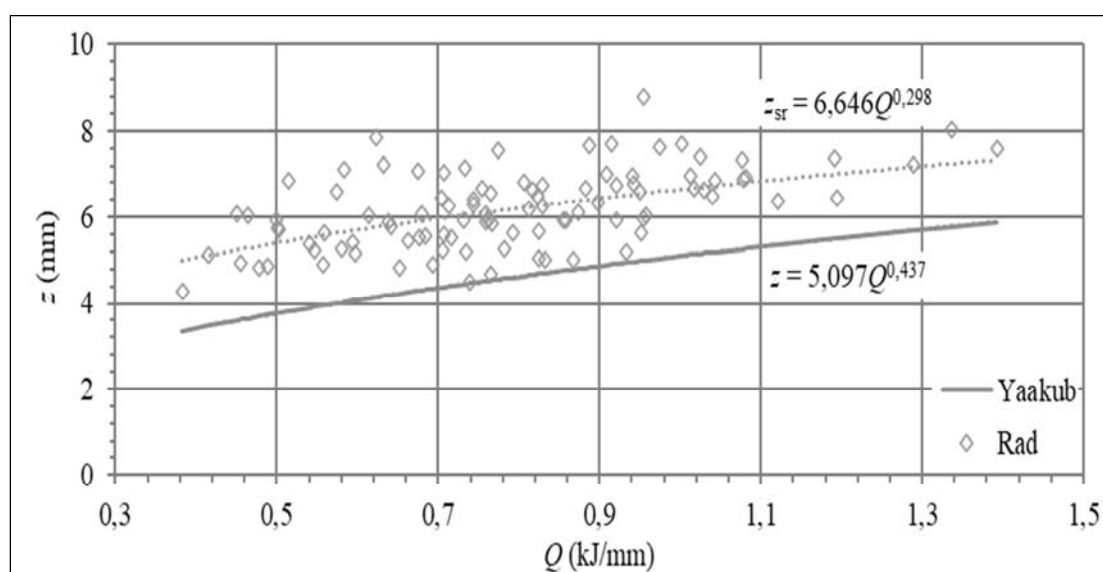
Slika 7. Poređenje s radom Millera i Funderbruka

Figure 7. Comparison with the work of Miller and Funderbruka

Kako se vidi, trend je isti, kao i zakrivljenost krive. Razlika je u tome što su vrijednosti katete dobijene u ovom istraživanju za oko 1,7 mm veće od onih koje daje model (1). Ovo se može objasniti time da model Millera uključuje i druge elektrolučne postupke (REL, FCAW i EPP) i različite debljine osnovnog metala, dok model u ovom radu uključuje

samo pulsni MAG izveden na limovima debljine 4 mm.

Prilikom poređenja rezultata ovog istraživanja sa onim od Yaakuba, uključeni su samo rezultati za nadglavnu poziciju (radi uporedivosti). Rezultat poređenja daje slika 8.



Slika 8. Poređenje s radom Yaakuba

Figure 8. Comparison with the work of Yaakub



Kako se vidi, i ovdje postoji određena razlika, ali je nešto manja i iznosi između 1,2 i 1,5 mm. Trend i zakrivljenost je opet podudarna. Razlika se može objasniti time da je u radu Yaakuba izvršeno

robotsko zavarivanje na limovima debljine 6 mm, za razliku od ovog rada, kod kojeg je to bilo ručno i na limovima debljine 4 mm.

5. Zaključak

U ovom radu su predstavljeni rezultati istraživanja koje je imalo za cilj pokazati kako se mijenja veličina katete u funkciji unosa toplote pri pulsnom MAG zavarivanju ploča nelegiranog čelika debljine 4 mm. Zavarivanje je izvršeno ručno, u dvije pozicije, položenoj i nadglavnoj. Veličina katete je utvrđena mjerenjem na presjecima zavarenih spojeva, dok je unos toplote izračunat preko AIP modela nakon snimanja profila jačine struje i napona rezolucijom 1 ms. Nakon toga je pristupljeno analizi rezultata i pokazalo se da nema statistički značajne razlike između vrijednosti katete dobijene u položenoj i nadglavnoj poziciji. Razvijen je model veze katete, jačine struje i brzine zavarivanja, i to upotrebom višestruke linearne regresije, i on je u stanju objasniti 61% promjene katete promjenom unosa toplote. Relativno niska vrijednost je posljedica toga što je u pitanju ručno zavarivanje.

Izvršeno je i poređenje rezultata dobijenih tokom ovog istraživanja sa uporedivim rezultatima dostupnih istraživanja. Ustanovljeno je da postoji podudarnost u trendovima i oblicima krivih koje prikazuju zavisnost katete od unosa toplote. U ovom istraživanju se dobijaju nešto veće vrijednosti katete, ali to može biti posljedica razlika uslova u kojima je vršeno zavarivanje.

Interesantno je da je *t*-test pokazao da nema statistički značajne razlike između vrijednosti kateta dobijenih u položenoj i u nadglavnoj poziciji, bazirano na rezultatima mjerenja u ovom istraživanju. Ovo bi bilo dobro detaljnije istražiti, po mogućnosti uz upotrebu robota kako bi se izbjegao uticaja zavarivača na rezultate.

5. Conclusion

This paper presents the results of research aimed at showing how the size of the cathetus changes as a function of heat input during pulsed GMAW welding of 4 mm thick unalloyed steel plates. The welding was done manually, in two positions, horizontal and overhead. The size of the cathetus was determined by measuring the cross sections of the welded joints, while the heat input was calculated using the AIP model after recording the current and voltage profiles with a resolution of 1 ms. After that, the results were analyzed and it was shown that there is no statistically significant difference between the values of the cathetus obtained in the horizontal and overhead positions. A model of the connection of the cathetus, amperage and welding speed was developed, using multiple linear regression, and it is able to explain 61% of the change in the cathetus with the change in heat input. The relatively low value is a consequence of manual welding.

A comparison of the results obtained during this research with comparable results of available research was also carried out. It was found that there is a matching in the trends and shapes of the curves that show the dependence of the catheter on the heat input. In this research, slightly higher values of the leg are obtained, but this may be a consequence of the differences in the conditions in which the welding was performed.

It is interesting that the *t*-test showed that there is no statistically significant difference between the values of the catheters obtained in the horizontal and overhead positions, based on the results of the measurements in this research. This would be good to investigate further, preferably with the use of a robot to avoid the influence of the welder on the results.



Literatura / References

- [1] Pašić, O., Zavarivanje, *Svjetlost*, Sarajevo, 1998.
- [2] Kejžar, R., Grum, J., Klobčar, D. (2007), New findings in welding of structural steels, *Int. J. Materials and Product Technology*, 29, 1, 311-326.
- [3] Yaakub, M. Y., et al. (2013), Prediction of Welding Parameters and Weld Bead Geometry for GMAW Process in Overhead T-Fillet Welding Position (4F), *Advanced Materials Research*, 686, 320-324.
- [4] Czifra, J., Vicikova, J., Szabo, P., Automated production system for pipelines of vessels, *Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium*, Vol. 21, No. 1, 2010
- [5] Åstrand, E., Öberg, A. E., Jonsson, B. (2013), Cost Affecting Factors Related to Fillet Joints, in: Design, Fabrication and Economy of Metal Structures, Springer.
- [6] Hajro, I., Tasic, P. (2020), Influence of heat input and welding position on geometrical properties of GMAW fillet welds of unalloyed steel, *TEM Journal*, 9, 2, 496-500.
- [7] Mvola, B., Kah, P., Martikainen, J., Hiltunen, E. (2013), Applications and benefits of adaptive pulsed GMAW, *Mechanika*, 19, 6, 694-701
- [8] Horvat, M., Kondić, V. (2012), The examples of modified procedures of MIG/MAG welding, *Tehnički glasnik*, 6, 2, 137-140.
- [9] MIG/MAG – developments in low heat input transfer modes, TWI, dostupno na <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/mig-mag-developments-in-low-heat-input-transfer-modes-133> (25.08.2022.)
- [10] Sharma, A., Arora, N. (2016), A scheme of comprehensive assessment of weld bead geometry, *Intl. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 82, 1507-1515.
- [11] Yao, P., Zhou, K., Huang, S. (2019), Process and Parameter Optimization of the Double-Pulsed GMAW Process, *Metals*, 9, 9
- [12] Reddy, G. A., Raman A., Reddy H., Kumar G. S. (2008), Laser Vision Based Seam Tracking System for Welding Automation, Proceedings of the 2008 International Conference on Image Processing, Computer Vision, & Pattern Recognition, July 14-17, 2008, Las Vegas, USA
- [13] Sen, M., Mukherjee, M., Pal, T. K., Prediction of Weld Bead Geometry for Double Pulse Gas Metal Arc Welding Process by Regression Analysis, *Proceedings of 5th International Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, December 12th-14th, 2014, IIT Guwahati, Assam, India
- [14] Benyounis, K. Y., Prediction and optimization of residual stresses, weld-bead profile and mechanical properties of laser welded components, Ph. D. thesis, Dublin City University, Ireland, 2006
- [15] Miller, D. K. (2001), Funderburk R. S., Tools for reviewing Welding Procedures, *Welding Journal*, 80, 7, 40-43.
- [16] Joseph, A., Harwig, D. D., Farson, D., Richardson, R. (2002), Assessing the effects of GMAW-P parameters on arc power and weld heat input, *Proceedings of 6th International conference Trends in Welding Research*,
- [17] Joseph, A., Harwig, D., Farson, D. F., Richardson, R. (2003), Measurement and calculation of arc power and heat transfer efficiency in pulsed gas metal arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 8, 6, 400-406.



YPIC 2024 - prva onlajn Međunarodna konferencija mladih profesionalaca

Međunarodna konferencija mladih profesionalaca (YPIC) će se održati onlajn od 8. do 9. februara 2024. Pozivaju se mladi stručnjaci, mladi istraživači i studenti do 35 godina da učestvuju na Konferenciji. Svi učesnici koji su se prijavili sa prezentacijom ili bez prezentacije, kao i gosti studenti, doktorski kandidati, mladi istraživači, predstavnici industrijskih preduzeća i naučnih organizacija, dobiće sertifikat o učešću od strane MIZa (IIW). Izuzetne prezentacije će biti pozvane da budu izložene na tehničkim komisijama na godišnjoj skupštini MIZa (IIW) i biće nominovane za YPIC nagradu u julu 2024.

YPIC konferencije imaju za cilj:

- okupljanje mladih profesionalaca širom sveta koji su zainteresovani za zavarivanje i srodne tehnologije,
- razmenu i povezivanje profesionalnih znanja i iskustava sa drugim mladim profesionalcima u ovoj oblasti,
- obezbeđivanje mesta za profesionalne diskusije u cilju razmene i usaglašavanja ideja,
- da omogućava mesto za međusobno povezivanje.

Učesnici će biti organizovani u različitim sesijama tokom dvodnevne konferencije:

- Sesije dobrodošlice i upoznavanja i razgovora među učesnicima
- Akademske prezentacije
- Industrijske prezentacije
- Poster prezentacije
- Kviz i grupne aktivnosti

Više informacija može se dobiti kontaktiranjem preko e-mail adrese helpdesk@iiwelding.net

77. Godišnja skupština MIZ (IIW) 2024 i Međunarodna konferencija

U Grčkoj se od 7. do 12. jula 2024. godine održava 77. Godišnja skupština MIZ (IIW) uz učešće predstavnika iz pedeset jedne zemlje širom sveta. Godišnja skupština IIW daje priliku za godišnje okupljanje tehničkih radnih grupa i administrativnih radnih grupa, za razmenu znanja i umrežavanje naučnika, inženjera, istraživača i stručnjaka iz industrije u oblasti zavarivanja i spajanja. Ovo je prilika da se uputi zahvalnost svim budućim posetiocima, predsedavajućima, govornicima, delegatima i sponzorima za njihovo aktivno učešće u 77. Godišnjoj skupštini IIW. Velika je čast i zadovoljstvo za Grčki institut za zavarivanje da ima mogućnost da poželi dobrodošlicu Globalnoj IIW zajednici i predstavnicima na ostrvu Rodos - mestu održavanja skupa u Grčkoj, na ovako važnom događaju uz učešće predstavnika iz pedeset jedne zemlje.

IIW 2024 Međunarodna konferencija

Međunarodna konferencija „Energetski projekti u oblasti Sredozemnog mora” se održava paralelno sa Generalnom skupštinom IIW. Konferencija, koju organizuje Grčki institut za zavarivanje, ima za cilj da pokrije najnoviji razvoj u industrijskom i tehničkom sektoru, akademska istraživanja, aktivnosti obuke i obrazovanja, kvalifikacije i sertifikacije lica. Očekuje se više od 1.100 učesnika, koji će demonstrirati značaj direktnih ličnih sastanaka nakon COVID-19 ere. Sastanci uživo u aktivnostima Konferencije, promovisaće poslovno umrežavanje između učesnika.

Tehnički, naučni i društveni događaji će se takođe održavati tokom Godišnje skupštine IIW 2024 i Međunarodne konferencije.

Međunarodna izložba IIW 2024

Poslovne aktivnosti vezane za zavarivanje su od velikog značaja u građevinskoj industriji, utičući na kvalitet i životni vek projekata. Međunarodna izložba IIW 2024 koja će biti u okviru 77. Godišnje skupštine MIZ (IIW), pružiće mogućnost međunarodnoj poslovnoj zajednici i učesnicima skupa širi prodor na tržišta.

Više informacija se može naći na sledećem linku: <https://www.iiw2024.com/>



Martin Petreski^{1,a}, Dobre Runchev^{1,b}, Gligorche Vrtanoski^{1,c}

IMPACT ANALYSIS OF THE HYBRID LASER ARC WELDING PARAMETERS OF STRUCTURAL STEELS – STATE OF THE ART

UTICAJA PARAMETARA REŽIMA HIBRIDNOG LASERSKOG ELEKTROLUČNOG ZAVARIVANJE KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA – PREGLED STANJA

Review / Pregledni rad

Paper received / Rad primljen:

August 2022.

Paper accepted / Rad prihvaćen:

May 2023.

Author's address / Adresa autora:

¹ University „Ss. Cyril and Methodius“, Faculty of Mechanical Engineering, Karposh II bb, 1000 Skopje, Republic of North Macedonia

email: ^a martin.petreski@mf.edu.mk

^b dobre.runchev@mf.edu.mk

^c gligorche.vrtanoski@mf.edu.mk

Keywords: hybrid welding, laser beam, arc welding, welding parameters

Ključne reči: hibridno zavarivanje, laserski snop, električni luk, parametri režima zavarivanja

Abstract

The effectiveness of the hybrid laser arc welding is based on the combination of two heat sources in a single welding process, resulting in welding process that is characterized with higher welding speed, increased productivity, deeper penetration, stable process, better gap bridging ability, less heat input to the welding material and high flexibility. The physical complexity of the process is a main disadvantage, i.e. an increased number of parameters that need to be synchronized and optimized in order to obtain a perfect weld. In this paper, based on the previous experimental research, a complete analysis of the primary hybrid laser arc welding parameters was performed, and general conclusions were drawn regarding their impact on the welding process stability, the weld shape and its mechanical characteristics. The introduction part contains a general analysis of previous research. In the second part, characteristics of the performed hybrid welds in structural steels and detailed analysis are presented. In the final part, general conclusions are made regarding the influence of the primary hybrid laser arc welding parameters on the structural steel.

Rezime

Efikasnost hibridnog zavarivanja na bazi laserskog zraka i električnog luka zasniva se na kombinaciji dva izvora toplote u jednom procesu zavarivanja, šta dovodi do procesom zavarivanja koji se odlikuje većom brzinom zavarivanja, povećanom produktivnošću i penetracijom, boljom sposobnošću premošćavanje zazoru, stabilnim procesom, manji unos toplote u radni materijal i velika felksibilnost. Međutim, fizička složenost procesa je glavni nedostatak, odnosno povećan broj parametara koji bi treba da se sinhronizuju i optimizuju da bi se dobio kvalitetan zavareni spoj. U ovom radu, na osnovu dosadašnjih eksperimentalnih istraživanja, izvršena je kompletna analiza na primarnih parametara hibridnog laserskog elektrolučnog zavarivanja, i izvedeni su opšti zaključci o njihovom uticaju na stabilnost procesa zavarivanja, oblik zavarenog spoja i njegove mehaničke karakteristike. Uvodni deo sadrži opštu analizu dosadašnjih istraživanja. U drugom delu su prikazane detaljne analize i karakteristike izvedenih hibridnih zavara u konstrukcijskih čelika, a u završnom delu se donose opšti zaključci o uticaju primarnih parametara hibridnog laserskog elektrolučnog zavarivanja konstrukcijskih čelika.

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



1. Introduction

The conventional joining process Gas Metal Arc Welding – GMAW is widely used process for welding of structural steel in a number of engineering fields such as shipbuilding, civil construction, mining equipment and metallurgy [1]. Consequently, several innovations appear in this welding process that contributes for its improvement [2]. One of the improvements is automated hybrid laser arc welding, whereby combining the advantages of two different processes, Laser Beam Welding – LBW and semi-automatic welding processes such as Gas Metal Arc Welding – GMAW and Flux-Cored Arc Welding – FCAW represents an excellent substitute for conventional welding processes [17].

Hybrid Laser Arc Welding – HLAW combines the advantages of both welding processes, LBW and GMAW or FCAW, resulting in welding process that is characterized with high welding speed [4], low heat input, high penetration depth into the welding material, and the possibility of controlling the chemical composition of the weld bead [5]. According to Pekarska and Bunaziv [6, 7] HLAW gains increasing focus because it compensates the limitations of the individual LBW and GMAW processes, reduces the heat transfer out of the weld zone and increases the dimensional tolerances of the welding joints. Additionally, HLAW enables higher welding speeds [6], fewer numbers of welding passes, increased penetration depth [7], and narrow weld seam with a small heat affected zones and a stable welding process [8].

Although the hybrid laser arc welding process has numerous process advantages, the process has certain limitations too, such as: controlling large numbers of process welding parameters,

requirement of accurate positioning and proper fit-up of the welding material, higher initial investment, and additional safety measures. Consequently, a precise study of all the parameters used in the hybrid welding is the basis for the stability and repeatability of the process and obtaining a weld with suitable mechanical and dimensional characteristics at the lowest possible operational cost.

Moreover, the values of the parameters that are ideal for each process separately are likely not to be optimal for successful welding with HLAW due to mutual influence.

Current research and experience have shown that, the parameters of the hybrid laser arc welding are not specified enough to replicate the conditions for a particular operation. Consequently, the user has to optimize the welding parameters before welding in order to get the best results. Generally, these parameters are dependent on the ratio between the two heat sources, which is calculated by dividing the laser power with the arc power [16, 17].

The flow chart [Figure 1] clearly shows, as with any other welding process, the capabilities of hybrid welding are essentially determined by appropriate selection of the system set-up and the parameter configuration.

Therefore, in this paper, a detailed analysis regarding the influence of the hybrid welding parameters for welding of construction steel is performed, such as: laser power, arc power, welding speed, the distance and set-up between both heat sources, laser focal positions, the angle of electrode, shielding gas composition and the gap configuration and edge preparation.

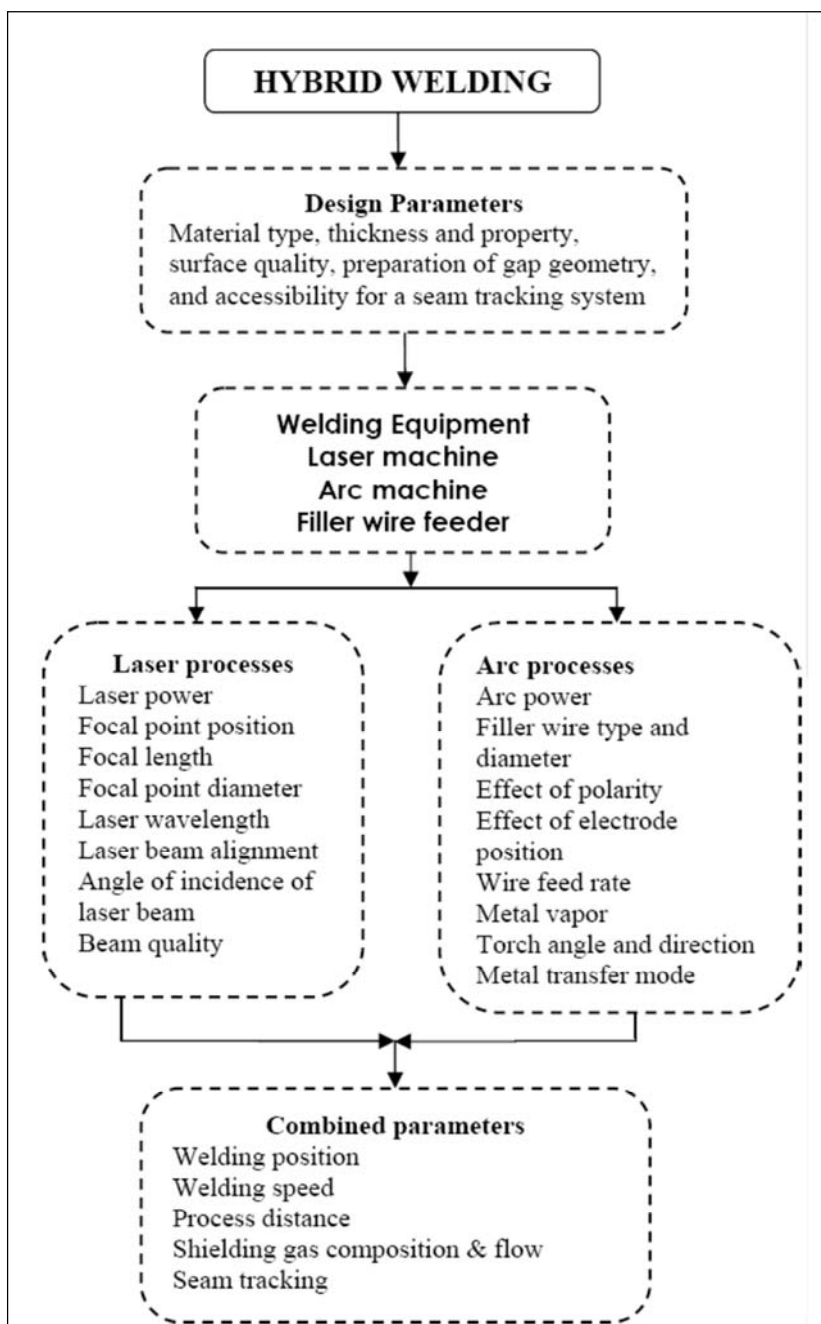


Figure 1. Flow chart of process parameters in laser arc welding [12]

Slika 1. Dijagram toka parametara procesa pri laserskom elektrolučnom zavarivanju [12]

2. Hybrid laser arc welding parameters

A detailed understanding of hybrid laser arc welding parameters is needed in order to understand their overall influence on the welding process. In HLAW, the laser power is the main heat source which determines the penetration depth, while the arc power influences the weld width and the weld gap fill [8, 20]. Hybrid laser arc welding

has a higher melting efficiency compared to the individual LBW and GMAW welding processes based on weld cross-section area (Figure 2). Generally, the HLAW parameters are set up according to the type and thickness of the base material, the heat sources power, the joint geometry and the welding tolerances.

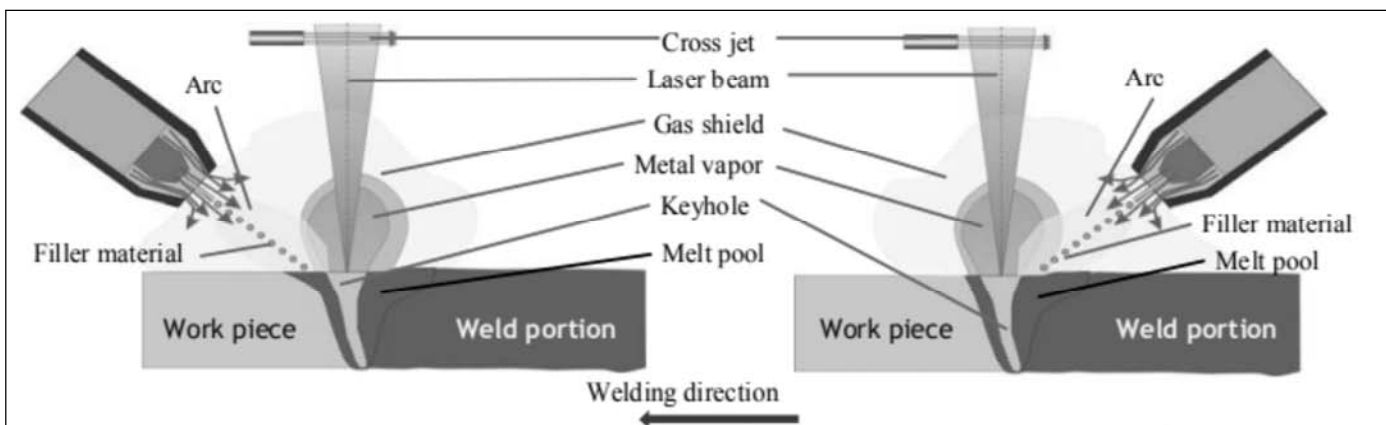


Figure 2. Schematic representation of laser hybrid welding with leading arc and leading laser arrangements [14]

Slika 2. Šematski prikaz lasersko hibridnog zavarivanja sa vodećim električnim lukom i vodećim laserskim snopom [14]

2.1 Laser type and power

The focused laser beam is one of the densest energy sources for welding. The output power $P_L(W)$, the wavelength of the emitted light (λ) as well as the specific power output are the characteristics that should be taken into consideration for laser beam quality assessment [15].

The selection of the laser type is very important because it is the primary heat source that defines the efficiency of the whole process [13]. The total heat input in the workpiece material is a sum of laser beam as a primary heat source and the electric arc. This correlation is given in the equation:

$$Q_H = Q_L + Q_A = \frac{P_L \times \eta_L \times 60}{1000 \times V_t} + \frac{P_A \times \eta_A \times 60}{1000 \times V_t}$$

Where, P_L (kW) is the laser source power, P_A (kW) is the electric source power, V_t (mm/min) is the welding speed, while η_L and η_A are efficiency coefficients with a value of 0,7 for the laser beam and 0,8 for the electric arc [16].

Currently, the most often used high power lasers are the CO₂ lasers with continues-wave or solid state Nd:YAG lasers with pulsed operation. In addition to these, different types of solid state lasers such as Yb:YAG disc and Yb laser fiber are used nowadays which provide high output power and excellent laser beam quality (Table 1). The fifth type of laser recommended for welding is a high-power diode laser.

Table 1. Characteristics comparison of different types of lasers

Tabela 1. Poređenje karakteristika različitih tipova lasera

	CO ₂ laser	Nd:YAG laser (lamp-pumped)	Nd:YAG laser (diode-pumped)	Disc laser	Fibre laser	Diode laser (fibre-coupled)
Lasing medium	Gas mixture	Crystalline rod	Crystalline rod	Crystalline disc	Doped fibre	Semiconductor
Emitted wavelength (µm)	10.6	1.06	1.06	1.03	1.07	0.808-0.98
Power efficiency (%)	10-15	1-3	10-30	10-20	20-30	35-55
Maximum output power (kW)	20	6	6	8	50	8
BPP at 4 kW (mm mrad)	4	25	12	2	0.35	44
M ² at 4 kW	1.2	75	35	6	1.1	150
Fibre beam delivery	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Typical fibre diameter at 4 kW (mm)	-	0.6	0.4	0.1-0.2	0.03-0.1	0.4
Mobility	low	low	low	low	high	high
Maintenance interval (h)	1000	500	10000	>25000	>30000	>25000



The output power and wavelength are the most important parameters for choosing the laser type. The penetration is directly proportional to the laser output power and therefore it represents the main parameter in the selection of the type of laser. Other parameters to consider when choosing the type of laser are welding speed, heat flux density, workpiece material and reflectivity, and joint geometry [15].

2.2 Relative positioning of the laser beam and the electric arc

The HLAW process can be oriented in two directions: arc leading or laser leading despite the fact that they act on the same point. The GMAW process can be positioned in front or behind of the travelling laser keyhole. If the GMAW process travels behind the laser beam, the HLAW process orientation is referred to as laser leading. If the GMAW process travels ahead of the laser, the HLAW process orientation is referred to as arc leading [3].

The selection of the orientation of the heat sources is based on multiple factors, such as; work piece material characteristics, the output power of the laser source and the electric arc [18]. The distance between the laser source and the arc is an important parameter to control the penetration in

hybrid laser arc welding and normally is consisted of few millimetres value, separation distance is in the range of 0 to 5 mm [18]. Increasing the distance between the heat sources might result in loss of hybridization effects, i.e. to reduce the interaction between the laser beam and the electric arc [18]. When heat sources are placed in parallel or at a very short distance might lead to a problem of absorption of the laser energy by the electric arc, which partially blocks the laser beam resulting in less penetration [17, 27].

2.3 Focal positioning

Laser heat sources use a focusing system to focus the energy on a single point, thus increasing the heat flux. This is achieved using reflective or transmissive optics made of different materials depending on the wavelength. The distance to this focal point is called focal length and directly affects penetration (Table 2) [20, 21]. The focal point of the laser beam changes when it enters the weld pool. Furthermore, the convex shape of the weld face formed by the filler material affects the laser beam focus. According to the several experiments, the focus distance of hybrid welding using CO₂ laser is reduced by 0.7mm compared to an autogenously laser welding without filler material.

Table 2. Power density at varying focal positioning and laser output power [21]

Tabela 2. Gustina snage pri promenljivoj fokusnoj pozicioniranju i izlaznoj snazi lasera [21]

Defocused distance		Power density (kW/mm ²)					
		-12 mm	-9 mm	-6 mm	-3 mm	0 mm	6 mm
Laser power	8 kW	4	8	16	47	113	14
	10 kW	5	10	20	59	141	18
	12 kW	7	11	24	71	169	22
	14 kW	8	13	28	83	197	25

2.4 Work angle of the electrode

The electrode to work angle is a parameter that affects the penetration of the weld provided by HLAW, this angle is related with the shielding gas flow and thus directly affecting the laser energy absorption [22]. Generally, the laser beam is directed normal to the welding material surface for better penetration. The angle of electrode is typically set around 45° – 65° from the welding material surface, which reduces the arc length, and the laser beam is focused on the welding pool [23]. However, during the welding of highly reflective materials the laser beam is tilted at an angle in

order to avoid any damages of the laser head due to the reflected beam that must be different from the electrode's angle [24].

2.5 Shielding gas and flow rate

In order to protect the weld pool from surrounding atmosphere the shielding gases are mainly used. The use of shielding gases and their compositions also influence the arc characteristics, formation of weld profile, and mode of metal transfer. In HLAW the shielding gas has a fundamental role of stabilizing the arc, and in turn, the stability of the welding process, and the weld quality [9]. Generally, the shielding gas used in HLAW is



mostly composed of an inert gas such as Argon (Ar) and Helium (He) [3], but, according to the material, laser type and arc parameters, carbon monoxide (CO) or carbon dioxide (CO₂) can also be used [26]. During hybrid laser arc welding with CO₂ laser, absorption of the laser energy by the laser induced plasma and reduction of the laser intensity that reaching the weld pool is often occurred, due to longer wavelength [19]. The use of high ionization potential shielding gas like helium reduces the effect of plasma absorption, therefore during hybrid laser arc welding with CO₂ laser, a mixture of argon, helium and CO₂ is used [19]. The use of helium ensures deeper penetration, the argon improves the arc stability, while a small percentage of oxygen less than 5% reduces the spatter formation and improves metal transfer during the welding process [3]. The mode of metal transfer is an influential parameter for stable and repeatable welding process, for hybrid laser arc welding pulsed/spray-arc is recommended in relation to short/globular-arc [25, 30].

In addition to shielding gas, the gas flow is also an important parameter of HLAW. In order to achieve the deepest penetration and the greatest efficiency, an optimal flow rate should be adjusted for different shielding gases. If the gas flowrate is too low, it cannot produce sufficient plasma suppression from the laser beam, while if it is too strong can produce turbulence on the weld pool surface reducing the protection of the weld pool [9].

2.6 Welding speed

One of the fundamental advantages of hybrid laser arc welding is the high welding speed and it is strictly related to the weld penetration. If we keep all the other parameters constant, the welding speed significantly influences the weld quality, the electric arc behavior, and the process stability [3]. The weld penetration and weld width are inversely affected by the welding speed [5]. The weld penetration increases when the welding speed decreases as a result of the higher heat input per unit length of weld [28]. The gap filling capability is improved at lower welding speeds, at constant filler wire feed rate [29]. The welding speed to filler wire feeding ratio is an important factor for the stability of the keyhole and the stability of the entire welding process. On the other hand, a too high welding speed leads to a fast heating and cooling cycle in the workpiece, which may result in metallurgical defects. However, increasing the welding speed can effectively reduce the residual thermal stress concentration [10].

2.7 Wire feed rate

The crucial factor in avoiding a lack of deposited or increased filler material is the correct choice of wire feed rate. A higher wire feed rate allows a bigger cross-section geometry of the weld and helps to increase the welding speed [3]. Additionally, for an increased wire feed rate, a higher current is required in order to increase the rate of deposition and to maintain a constant arc length [20].

According to Guen [5], the shape of the bead is dependent on the deposited material, or the ratio between the welding speed and the wire feed rate. Consequently, the weld width and penetration are decreased with the increase of the welding speed, while the dimensions of the weld pool – width, length and depth are increasing with the increase of the wire feed rate.

2.8 The effects of Gas Metal Arc Welding Current, Voltage, and Polarity

HLAW brings challenges that are not common for GMAW mainly due to the high welding speeds. Consequently, the metal transfer mode is crucial to obtaining a stable and repeatable welding process. Therefore, spray transfer or pulsed GMAW are typically used instead of short-circuiting or globular transfer [3].

The effect of the electric arc voltage in HLAW is identical as in GMAW, i.e. arc voltage can be adjusted to increase or decrease the arc length. A longer arc length generally produces a wider melt width at the top surface of the weld and vice versa.

The type of the current and its polarity is a parameter that affects the process stability, it can be changed to affect the heat balance between the electrode and the work. The hybrid laser arc welding use direct current electrode positive polarity, resulting in good arc stability and low spatter generation.

2.9 Joint gap width and edge preparation

Compared to laser beam welding which can weld parts without visible defects with a gap up to 0.2-0.25 mm, HLAW can easily achieve acceptable welds with joint gaps of 1 mm. The main parameters which affect the deposition of the filler material to fill the joint gaps are the laser to arc energy ratio, laser arc distance, welding speed and the wire feed rate [26].

In HLAW the welding speed can be easily increased while welding parts with a joint gap up to 1mm, due to a smaller joint gap that simplifies the



weld penetration as more filler material reaches the root of the joint [26]. On the other hand, an increase of the joint gap by more than 1 mm, requires a

reduction of the welding speed and a proper selection of the other process parameters (Figure 3) [11].

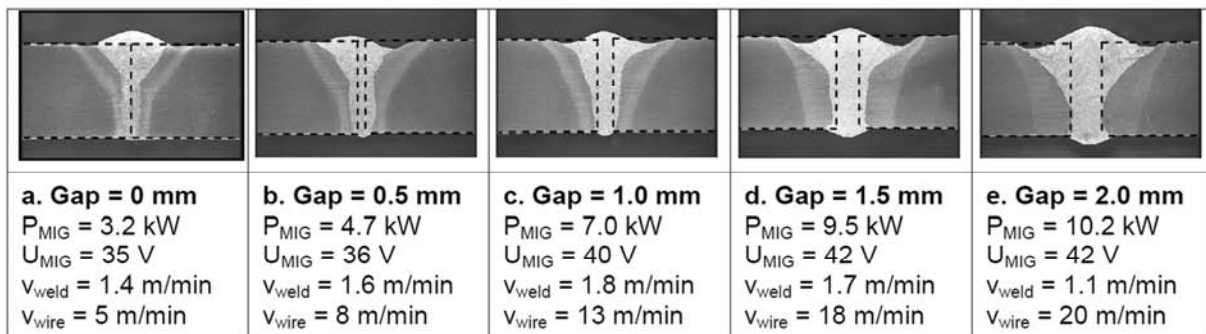


Figure 3. Cross-section of the weld performed with HLAW at different part gaps [11]

Slika 3. Poprečni presek zavara izveden sa HLAW sa različitim zazorima kod delova [11]

Additionally, HLAW requires proper edge preparation which mostly depends on the base material characteristics and its thickness. For hybrid welding of thin steel sheet metal with a thickness up to 8 mm no edge preparation is needed, whilst, for larger thicknesses, edge preparation is needed in accordance with the material thickness [31]. The edge preparations for HLAW are characterized by narrower angles,

smaller gaps and higher roots compared to conventional arc welding [31].

3. Analysis of HLAW process parameters

Hybrid laser arc welding is suitable for joining materials with thicknesses in the range of 0.7-50 mm. According to Bunaziv [16], with a 16 kW disc laser, hybrid welding of 12 to 15 mm thick structural steel can be performed in a single pass.

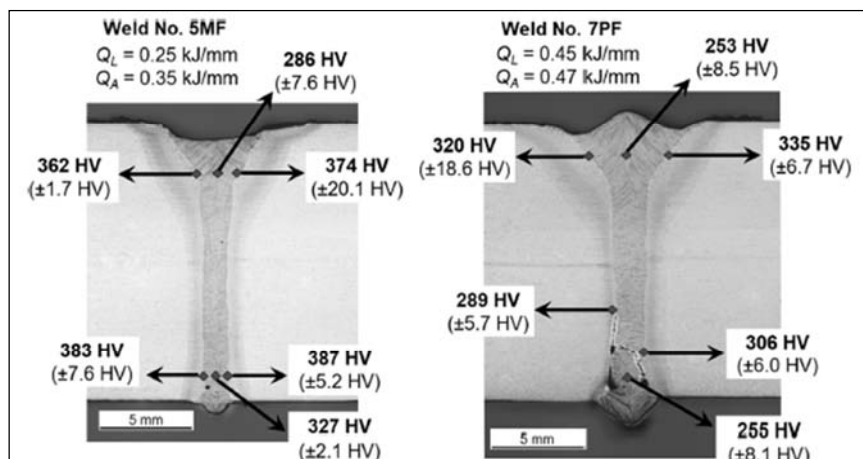


Figure 4. Cross-section of 15mm hybrid weld performed with a different output power of the heat sources [11]

Slika 4. Poprečni presek hibridnog zavara od 15 mm izveden sa različitom izlaznom snagom izvora toplote [11]

In both cases, a fine-grained structure appears in the upper area of the weld, which constitutes more than 60% of the weld, due to the influence of the filler material and the intense heat input from laser and arc sources. In the root, the weld microstructure is a mixture of bainite and martensite due to faster cooling rates. The weld with lower heat input 0,60kJ/mm, has higher hardness >325 HV in the weld and heat affected zone, that exceeds the limit values for acceptable quality (Figure 4) [11]. The mechanical

characteristics and geometry of the weld are directly related to the position of the heat sources. According to Bunaziv, the laser leading process leads to insignificantly high heat input and welds with a conical shape, with increased tensile strength and decreased toughness.

The maximum weld penetration is achieved when the focal point is positioned below the material surface, in the focal point the laser beam diameter is the smallest and the energy density is



the highest [21]. When the focal point has a negative value, the heat input in the work material is higher. On the other hand, a positive value causes insufficient weld penetration and increased volume in the upper part of the weld.

The weld penetration directly correlates to the angle of electrode. According to Ghazvinloo's results, an increased electrode angle corresponds with an increased weld penetration, which means that the root of the weld is directly exposed to the electric arc heat and vice versa (Figure 5).

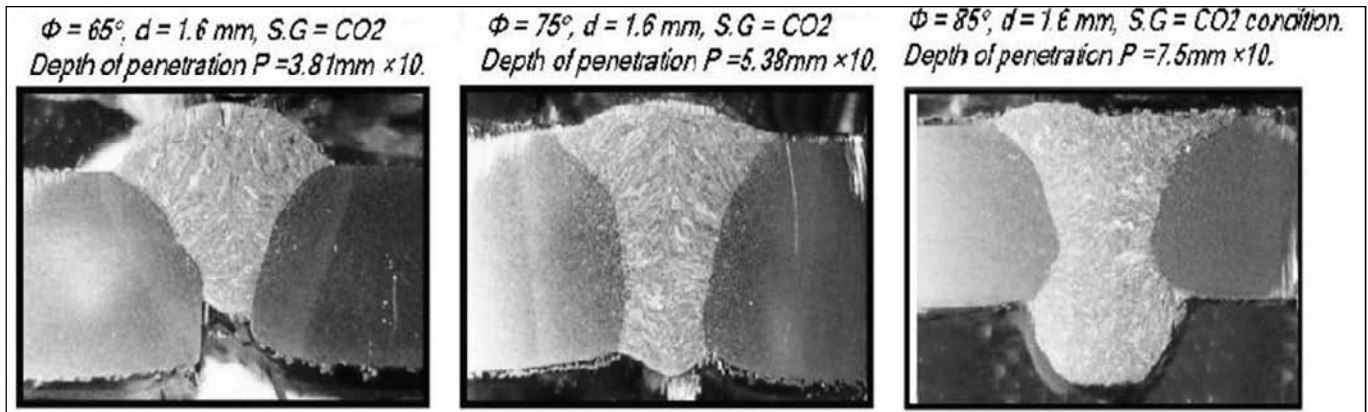


Figure 5. Cross-section of hybrid weld performed with a different electrode angle [25]

Slika 5. Poprečni presek hibridnog zavara izvedenog sa različitim uglom elektrode [25]

According to Kah [9], a surface hybrid weld has been made on 8mm thick structural steel using a 12kW CO₂ gas laser, in order to test the effects of the different ratios of an inert shielding gas of Argon (Ar) and Helium (He) (Figure 6). The results show that the laser penetration depth is significantly reduced by reducing the helium below 40%.

Consequently, at least 50% of helium is required in the shielding gas to suppress the laser absorption while welding with CO₂ laser. Additionally, the composition of the shielding gas affects the optimal gas flow rate, with a shielding gas of at least 50% helium and a flow rate of 20 l/mm the best hybrid welding results can be achieved [27].

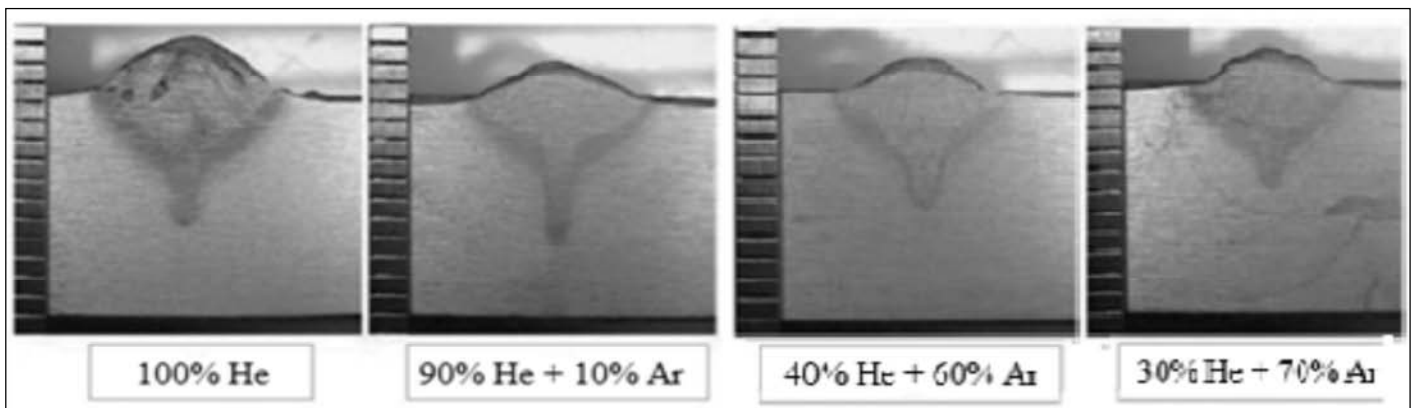


Figure 6. Cross-section of hybrid weld performed with different ratios of inert shielding gas [9]

Slika 6. Poprečni presek hibridnog zavara izvedenog sa različitim odnosima inertnog zaštitnog gasa [9]

In terms of welding speed, it can be concluded that, in HLAW, by increasing the welding speed, other welding parameters should be adjusted, especially the wire feed speed, thus obtaining the required welding geometry [5]. Moreover, increasing the welding speed decreases the amount of heat input, resulting in increased weld hardness, decreased weld ductility and weld penetration [30].

Salminen's results [30] clearly show the influence of the wire feed rate on the geometric characteristics of the weld, such as the size of the weld bead the amount of deposited material, and the occurrence of defects. During the hybrid welding of structural steel in quality AH36, increasing the wire feed rate results in increased weld penetration until a full penetration is achieved,



and then the higher wire feed rate contributes to a larger weld width in the top and bottom zones.

The laser source power is the primary heat source in HLAW that influences the efficiency of the whole process [3]. Therefore, the ratio of the power of the two heat sources should be considered and obtained by dividing the laser power with the arc

power [16, 17]. In HLAW increasing of the power ratio leads to a narrow weld width, reducing the tendency of grain growth and modifies the microstructure of fusion zone, while with its reduction, we have a larger heat affected zone of heat, due to a wider distribution of the heat flux (Table3) [17].

Table 3. Influence of the HLAW parameters on the weld bead

Tabela 3. Uticaj parametara HLAW na metal šava

Welding parameters	Penetration		Deposition		Face bead width		Root bead width	
	Increase	Decrease	Increase	Decrease	Increase	Decrease	Increase	Decrease
Welding speed	Decrease	Increase	Decrease	Increase	Decrease	Increase	Decrease	Increase
Laser power	Increase	Decrease	No effect	No effect	Minor effect	Minor effect	Minor effect	Minor effect
Arc current	Increase	Decrease	Minor effect	Minor effect	Decrease	Increase	Increase	Decrease
Wire feed rate	Minor effect	Minor effect	Increase	Decrease	Minor effect	Minor effect	No effect	No effect
Arc voltage	No effect	No effect	No effect	No effect	Increase	Decrease	No effect	No effect
Process orientation	Minor effect	Minor effect	No effect	No effect	Laser leading	Arc leading	Minor effect	Minor effect

According to Nielsen's research [31] in the previous point presented, it can be concluded that the proper gap width selection and edge preparations directly affect the effectiveness and

efficiency of the entire welding process. Special consideration should be given to laser beam power, wire feed rate, and welding speed in the selection of joint gap and edge preparation.

4. Conclusions

The effectiveness of hybrid laser arc welding in contrast of the individual LBW and GMAW processes is based on the combination of their advantages, such as: higher welding speed, increased productivity, deeper penetration, stable process, better gap bridging ability, less heat input and high flexibility. However, there are drawbacks, due to combination of two heat sources in a single welding process leads to an increased number of parameters that need to be synchronized and optimized to obtain a perfect weld.

According to the performed analysis, it can be concluded that primary parameters of hybrid laser arc welding of structural steel are the laser power, arc power, welding speed, layout of the heat sources, focal positioning, working angle of electrode, shielding gas type, wire feed rate and preparation of the weld joint.

In HLAW, the efficiency and weld penetration depend on the laser source that directly affects the heat sources distance and the type of shielding gas and subsequently affects the process stability and weld geometry and its mechanical properties. In addition, the laser beam focal positioning should be considered, with a negative value just below the work material surface, the best results can be achieved. The arc power and the electrode's angle directly affect the process stability, droplet transfer mood and weld bead geometry. It is recommended

4. Zaključci

Efikasnost hibridnog laserskog zavarivanja za razliku od pojedinačnih LBW i GMAW procesa zasniva se na kombinaciji njihovih prednosti, kao što su: veća brzina zavarivanja, povećana produktivnost, dublje prodiranje, stabilan proces, bolja sposobnost premošćavanja zazoru, manji unos toplote i visoka fleksibilnost. Međutim, postoje nedostaci, jer kombinacija dva izvora toplote u jednom procesu zavarivanja dovodi do povećanog broja parametara koje je potrebno sinhronizovati i optimizovati da bi se dobio savršen zavareni spoj.

Na osnovu izvršene analize, može se zaključiti da su primarni parametri hibridnog laserskog zavarivanja konstrukcionog čelika su snaga lasera, snaga luka, brzina zavarivanja, raspored izvora toplote, fokusno pozicioniranje, radni ugao elektrode, vrsta zaštitnog gasa, brzina dodavanja žice i priprema zavarenog spoja.

U HLAW, efikasnost i penetracija šava zavise od izvora lasera, koji direktno utiče na udaljenost izvora toplote i vrstu zaštitnog gasa i posledično utiče na stabilnost procesa i geometriju zavara i njegove mehaničke osobine. Pored toga, treba uzeti u obzir i fokusno pozicioniranje laserskog zraka, sa negativnom vrednošću neposredno ispod površine radnog materijala, mogu se postići najbolji rezultati. Snaga luka i ugao elektrode direktno utiču na stabilnost procesa, način prenosa kapljica i geometriju zrna zavarivanja. Preporučuje se da



the electrode's angle to be greater than $>70^\circ$, and pulsed/spray-arc is preferred in relation to short/globular-arc due to the lower turbulence of the molten droplets. The shielding gas should be an inert gas mixture with a high percentage of helium more than 50% with the aim to reduce the effect of plasma absorption and small amounts of oxygen less than 5% to improve the metal transfer mode. The ratio between the welding speed and filler wire feeding is another parameter that affects the entire process stability as well as on the weld shape. Higher welding speed with the constant wire feed rate cause faster heat up and cooling cycle of the work material which may result in metallurgical defects in the weld and HAZ. The main advantage of HLAW is the better gap bridging ability for thicknesses up to 10mm in one pass, without additional preparation of the weld joint preparation.

Based on the presented, the general influence of the HLAW parameters on the structural steel can be concluded, while for the detailed influence, especially for welding of thicker structural steel elements, additional experiment research should be performed.

References / Literatura

[1] Pal K. and Pal S.K. (2011), Effect of pulse parameters on weld quality in pulsed gas metal arc welding: a review. *J. Mater. Eng. Perform.*, 20, 918–931.

[2] Petring D. (2013), Developments in hybridization and combined laser beam welding technologies. In: S Katayama (ed.) Handbook of laser welding technologies. Cambridge: Woodhead Publishing, 478–504.

[3] Petreski M., Runchev D., Vrtanoski G. (2021), Hybrid laser arc welding – State of the art in technology. *Welding and welded structures*, 66 (3), 115-124.

[4] Rao Z.H., et al. (2011), Modelling of hybrid laser–GMA welding: review and challenges. *Sci. Technol. Weld Join*, 16, 300–305.

[5] Le Guen E., et al. (2011), Analysis of hybrid Nd:Yag laser–MAG arc welding processes. *Opt. Laser Technol*, 43, 1155–1166.

[6] Bagger C., et al. (2003), Closing the weld gap with laser/MIG hybrid welding process. *The 9th Nordic Laser Mat. Pro. Con.*, 113–124.

ugao elektrode bude veći od $>70^\circ$, a pulsni/sprej-luk je poželjniji u odnosu na kratki/globularni luk zbog niže turbulencije rastopljenih kapljica. Zaštitni gas treba da bude mešavina inertnog gasa sa visokim procentom helijuma više od 50% sa ciljem da se smanji efekat apsorpcije plazme i male količine kiseonika manje od 5% radi poboljšanja načina prenosa metala. Odnos između brzine zavarivanja i dodavanja žice za punjenje je još jedan parametar koji utiče na stabilnost celokupnog procesa kao i na oblik šava. Veća brzina zavarivanja sa konstantnom brzinom dodavanja žice uzrokuje brži ciklus zagrevanja i hlađenja radnog materijala što može dovesti do metalurških defekata u šavu i ZUTu. Glavna prednost HLAW-a je bolja sposobnost premošćavanja zazora za debljine do 10 mm u jednom prolazu, bez dodatne pripreme žljeba zavarenog spoja.

Na osnovu prikazanog može se zaključiti opšti uticaj parametara HLAW na konstrukcioni čelik, dok za detaljniji uticaj, posebno za zavarivanje debljih čeličnih konstrukcionih elemenata, treba izvršiti dodatna eksperimentalna istraživanja.

[7] Gu X., et al. (2013), Coupling mechanism of laser and arcs of laser-twin-arc hybrid welding and its effect on welding process. *Optics & Laser Tec.*, 48, 246–253.

[8] Pan Q., et al. (2016), Effect of shielding gas on laser–MAG arc hybrid welding results of thick high-tensile-strength steel plates. *Weld World* 60, 4, 653–664.

[9] Kah P., et al. (2011), The analysis of shielding gases in laser-arc hybrid welding processes. *Proc IMechE, Part B: J Eng. Man.*, 225, 1073–1082

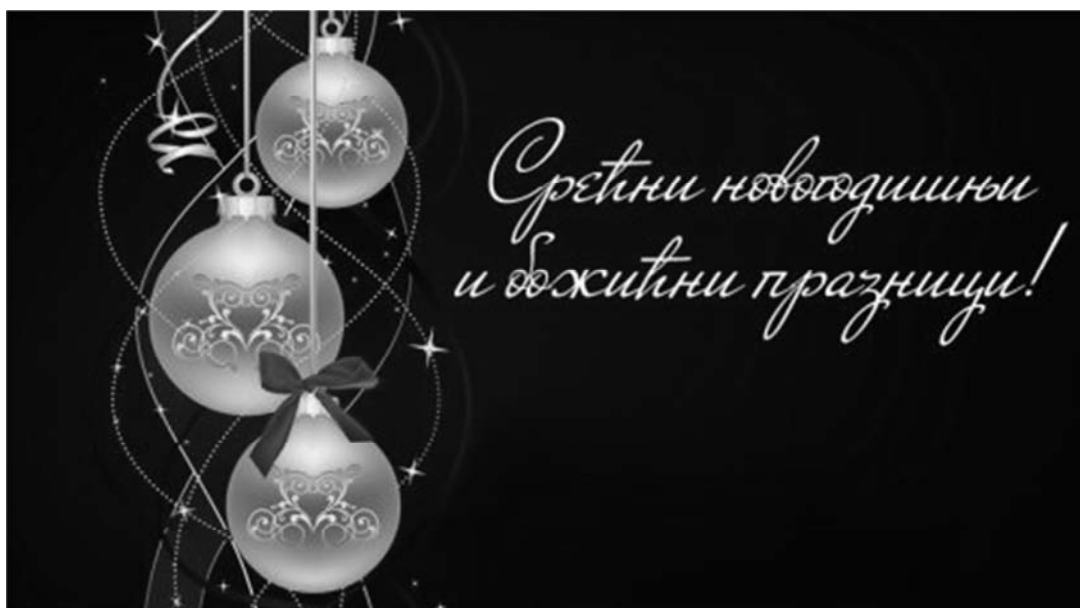
[10] Kong F., et al. (2011), Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser–GMA welding process. *J. of Ma. Pro. Tec.*, 211, 1102–1111.

[11] Nilsson K., et al. (2003), Parameter Influence in CO₂- laser/MIG Hybrid Welding. *Proc. of 56th Annual Assembly of the Int. Ins. of Welding*. IIW Doc. IV-843-03, Bucharest, Romania.

[12] Kah P. (2012), Overview of the exploration status of laser-arc hybrid welding processes. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 30, 112–132.



- [13] Turichin G., et al., (2018) Influence of heat input and preheating on the cooling rate, microstructure and mechanical properties at the hybrid laser-arc welding of API 5L X80 steel. *Procedia CIRP*, 74, 748–751.
- [14] Olsen F.O., Hybrid laser-arc welding. Elsevier Science:Technology & Engineering.
- [15] Bunaziv I., et al. (2020), Laser-arc hybrid welding of 12- and 15-mm thick structural steel. *The Int. J of Adv. Man. Tec.*, 107, 2649-2669.
- [16] Wallerstein D., et al. (2020), Influence of welding gases and filler metals on hybrid laser-GMAW and Laser-FCAW welds. *Mech Eng. Sci. 0(0)*, pp.3-14.
- [17] Farhang F., et al. (2017), Single-pass hybrid laser welding of 25mm thick steel. *Physics Procedia.*, 89, 49-57.
- [18] Liu S., et al. (2012), Analysis of droplet transfer mode and forming process of weld bead in CO₂ laser–MAG hybrid welding process. *Optics & Laser Tec.*, 44, 1019–1025.
- [19] Brain V.M. (2011), Hybrid Laser Arc Welding. *ASM Handbook Volume 6, Welding fundamentals and Processes*, ASM International
- [20] Ishida K., et al. (2020), Effect of focal position on laser – MAG arc hybrid weld bead of thick high – strength steel plate. 38(2), 131–134.
- [21] Wei H.L., et al. (2015), Fusion zone microstructure and geometry in complete-joint – penetration laser-arc hybrid welding of low-alloy steel. *Weld J.*, 94, 135–144.
- [22] Liu L., et al. (2006), A new laser-arc hybrid welding technique based on energy conservation. *Mat. Transactions*, 47 (6), 1611-1614.
- [23] Liu T., et al. (2016), Microstructure and mechanical properties of laser-arc hybrid welding joint of GH909 alloy. *Optics & Laser Tec.*, 80, 56–66.
- [24] Ghazvinloul H.R., et al. (2010), Effect of the electrode to work angle, filler diameter and shielding gas type on weld geometry of HQ130 steel joints produced by robotic GMAW. *Indian Journal of Science and Technology.*, 3(1).
- [25] Jokar M., et al. (2014), Influence of shielding gas composition on weld profile in pulsed Nd:YAG laser welding of low carbon steel. *Iran J. Phys. Res.*, 14, 41–46.
- [26] Sathiya P., et al. (2013), Shielding gas effect on weld characteristics in arc-augmented laser welding process of super austenitic stainless steel. *Optics & Laser Tec.*, 45, 46–55.
- [27] Bidi L., et al. (2011), The use of exploratory experimental designs combined with thermal numerical modeling to obtain a predictive tool for hybrid laser/MIG welding and coating processes. *Optics & Laser Tec.*, 43, 537–545.
- [28] El Rayes M., et al. (2004), The influence of various hybrid welding parameters on bead geometry. *Weld J*, 147-153.
- [29] Seyffarth P., Krivtsun I.V. (2002), Laser-arc processes and their applications in welding and material treatment. London: Taylor & Francis
- [30] Unt A., et al. (2015), Influence of filler wire feed rate in laser-arc hybrid welding of T-butt joint in shipbuilding steel with different optical setups. *Phys Proc*, 78,45–52.
- [31] Nielsen S.E. (2015), High power laser hybrid welding – challenges and perspectives. 15th *Nordic Laser Materials Processing Conference*, 15(1).





2. Međunarodno naučno-stručno savjetovanje ZAVARIVANJE SPAJA “ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 2023”

Sarajevo, 25 - 27.10.2023. godine

U organizaciji BH Društva za zavarivanje, u periodu od 25 - 27. oktobra ove godine održano je 2. Međunarodno naučno-stručno savetovanje pod geslom ZAVARIVANJE SPAJA, a po temi “ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE”. Savetovanje je održano u hotelu Holiday, koji pored smeštajnih kapaciteta raspolaže i kongresnim Centrom sa izložbenim prostorom.

Ova, rekli bi, dugo očekivana manifestacija nazvana “Zavarivanje spaja 2” uspešno je spojila akademsku i privrednu zavarivačku zajednicu iz svih zemalja regiona: Bosne i Hercegovine, Srbije, Hrvatske, Crne Gore, Severne Makedonije i Slovenije, kao i iz Ukrajine i Nemačke.

Podsećanja radi, prva naučno - stručna manifestacija iz oblasti zavarivanja pod imenom “Zavarivanje spaja” je održana daleke 2005. godine, simbolično na istom mestu, a povodom 50 godina od osnivanja Društva za zavarivanje Bosne i Hercegovine. Organizatori ove manifestacije, pre svega predsednik BH Društva za zavarivanje Namik Džibrić, predsednik Skupštine Društva i direktor Instituta za zavarivanje – Tuzla, inače partnera BH Društva za zavarivanje, prof. dr. Sead Avdić uz pomoć mnogih aktivista, pre svega zaposlenih u Institutu za zavarivanje d.o.o. - Tuzla i ostalih članova zavarivačke zajednice, su uprkos mnogim poteškoćama uspeali da odaberu 22 naučno - stručna rada koji su prezentovani na Savetovanju u okviru 10 tematskih celina. Ako ovome dodamo da je Savetovanju prisustvovalo preko 110 učesnika onda je jasan i nedvosmislen zaključak da sa ponosom možemo reći da je Savetovanje bilo izuzetno uspešno.

Pored posećenosti, treba istaći da je manifestacija protekla u izlaganju i diskusijama veoma zanimljivih radova. Time je doprinos Savetovanja bio još veći, jer je ponudilo mogućnost svim učesnicima da prošire svoja saznanja iz oblasti zavarivanja.

Tokom otvaranja Savetovanja, organizatori su u ime BH Društva za zavarivanje dodelili zahvalnice pojedincima “za ostvarenu saradnju, podršku i nesebičan doprinos unapređenju zavarivanja u Bosni i Hercegovini”.

Zahvalnica je posthumno dodeljena i kolegici Milici Antić, kako bi rekli “našoj Milici”.



Savetovanje je održano u sklopu hotela Holiday Sarajevo gde su tokom prvog i drugog dana učesnici imali priliku čuti i videti aktuelna dešavanja u zavarivanju. Pored izloženih radova ističemo i prateću izložbu opreme za zavarivanje i kontrolu zavarenih konstrukcija – spojeva.

Naravno, bila je organizovana i zajednička večera koja je poslužila da se još više potencira ono zbog čega se i organizuju ovakva savetovanja, a to je spajanje i druženje učesnika

Treći dan je obuhvatio obilazak Sarajeva, grada u srcu Balkana gde se susreću, kako pesnici kažu Istok i Zapad, sa dugom i bogatom istorijom verskih i kulturnih raznolikosti. Učesnici su pored verskih znamenitosti imali priliku da posete i Gradsku većnicu koja je arhitektonski spoj Istoka i Zapada i trg Sebilj sa fontanom. Ovo divno druženje se završilo šetnjom i ručkom na Baščaršiji.

Nastavak na strani 178



Radomir Jovičić ^{1,a}, Mihajlo Arandjelović ¹, Simon Sedmak ¹, Dejan Jovičić ², Jernej Markež ³, Maja Marković ⁴

ZNAČAJ VIZUELNOG ISPITIVANJA ZAVARENIH SPOJEVA ZA EKSPLOATACIJSKU SIGURNOST OPREME POD PRITISKOM

SIGNIFICANCE OF VISUAL TESTING OF WELDED JOINTS ON EXPLOITATION SAFETY OF PRESSURE EQUIPMENT

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Jul 2023.

Adresa autora / Author's address:

¹ Inovacioni centar Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Srbija

² SchwingStetter doo, Smederevo, Srbija;

³ Metalweld, Sosnowiec, Poljska

⁴ Minel Enim, Smederevo, Srbija

email: ^a jovicicrad@gmail.com

Ključne reči: oprema pod pritiskom, zavareni spoj, greške, otkaz.

Keywords: pressure equipment, welded joint, defects, failure.

Rezime

Često se u dokumentaciji o izradi zavarenih konstrukcija, izveštaji o vizuelnom ispitivanju ne mogu naći ili nisu izrađeni u skladu sa odgovarajućim standardom. Lom zavarenih konstrukcija izazivaju prslina, koje se prevashodno javljaju na greškama u zavarenim spojevima. Neke od ovih grešaka se mogu otkriti samo vizuelnim ispitivanjem. Takođe, vizuelnim ispitivanjem se, u odnosu na ostale metode ispitivanja bez razaranja, lakše i pouzdanije otkrivaju delovi zavarenih spojeva sa povećanom verovatnoćom nastanka prslina, npr. mesta reparatura tokom izrade ili eksploatacije konstrukcije. Delovi zavarenih spojeva sa povećanom verovatnoćom nastanka prslina, otkriveni vizuelnim ispitivanjem, moraju da budu predmet ispitivanja ostalim metodama ispitivanja bez razaranja. Na taj način smanjuje se verovatnoća otkaza tj. povećava se sigurnost zavarene konstrukcije. Ovo je posebno važno kod opreme pod pritiskom. U ovom radu je prikazan lom jednog rezervoara za skladištenje tečnog kiseonika tokom eksploatacije. Pri izradi rezervoara napravljen je veći broj grešaka u zavarenim spojevima. Jedna od grešaka, oblika zarez, nakon višegodišnje eksploatacije rezervoara je dovela do njegovog razaranja.

Abstract

More often than not, documentation about making and testing of welded structures does not include visual test reports, or includes such reports which are not in accordance with relevant standards. Welded structure failure is caused by cracks, which typically occur in welded joint defects. Some of these defects can only be detected using visual testing. In addition, visual testing is a reliable method for determining which parts of a welded joint have increased risk of crack initiation, i.e., repair locations during fabrication or exploitation, which also need to be subjected to other non-destructive test methods. In this way, probability of failure is decreased, i.e., welded structure safety is improved. This is of particular importance for pressure equipment. This paper shows the failure of a tank used for storage of liquid oxygen during exploitation. During tank fabrication, a number of defects were made in the welded joint. One of these defects, in the form of a notch, lead to the destruction of the tank after years of exploitation.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku radova sa 32. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2022“ održanog na Tari, Srbija od 12. do 15. oktobra 2022. godine



1. Uvod

Često se u dokumentacijama o izradi zavarenih konstrukcija, izveštaji o vizuelnom ispitivanju zavarenih spojeva ne nalaze ili nisu usklađeni sa odgovarajućim standardom [1]. Standardi za ispitivanja i kontrolu zavarenih konstrukcija predviđaju ovo ispitivanje kao obavezno. Pod vizuelnim ispitivanjem, pored pregleda metala šava (MŠ), podrazumeva se i njegova dimenziona kontrola, kao i pregled zona sa obe strane šava.

Da bi zavarena konstrukcija bila bezbedna za eksploataciju izvedeni nivo kvaliteta zavarenih spojeva mora biti veći od projektovanog ili bar jednak njemu [2]. Pod izvedenim nivoom kvaliteta podrazumeva se da greške u izvedenim spojevima svojom prirodom, veličinom, brojem i učestalošću ne slabe spojeve više nego što je to projektom dozvoljeno. Sve greške, u zavisnosti od prirode, veličine i učestalosti, izazivaju lokalna povećanja napona, što povećava verovatnoću nastanka ili rasta postojećih prslina ili eventualno otkaza tj. mesta sa greškama u zavarenim spojevima predstavljaju slaba mesta na zavarenim konstrukcijama. Na spojeve na konstrukcijama deluju naponi izazvani opterećenjem, koji su na različitim delovima konstrukcija, različiti po vrsti, smeru i intenzitetu, npr. podužni i kružni spojevi i njihova ukrasna mesta na opremi pod pritiskom. Ovo znači da u delovima nekih spojeva do nastanka ili rasta prslina ili eventualno loma, može doći pri manjim naponima izazvanim opterećenjem konstrukcije tj. da neki delovi zavarenih spojeva na konstrukciji predstavljaju slaba tj. kritična mesta [3]. Načelno, zavarena konstrukcija je bezbedna za eksploataciju onoliko koliko je bezbedno najslabije mesto na njoj.

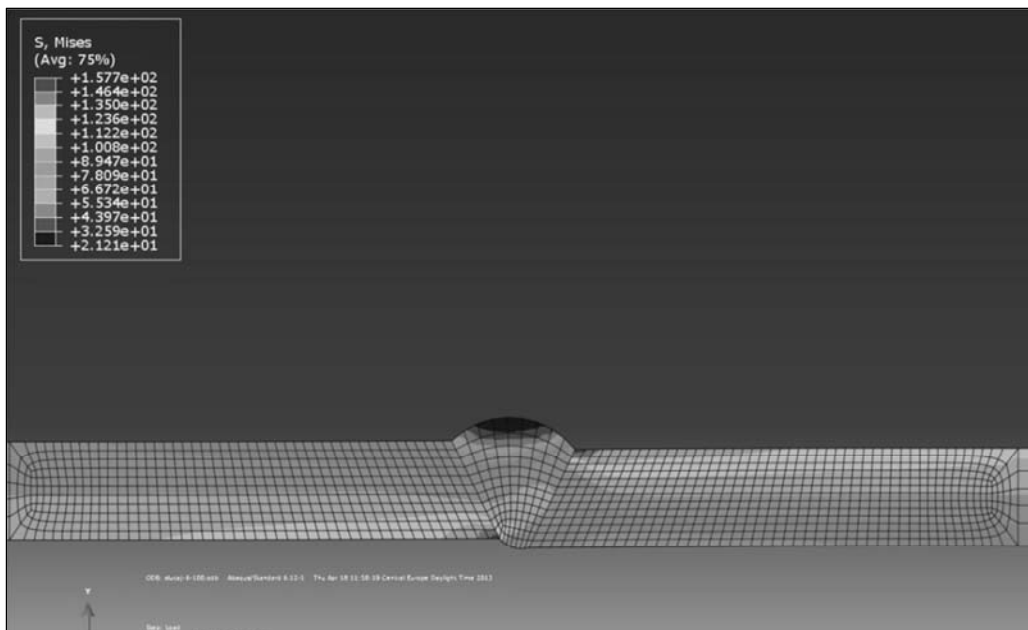
Da bi se otkrilo najslabije mesto na zavarenoj konstrukciji i utvrdile njegove osobine tj. procenio rizik od loma tokom eksploatacije konstrukcije, potrebno je prvo definisati proceduru ispitivanja zavarenih spojeva metodama bez razaranja [4]. Definisanje ove procedure podrazumeva analizu proizvođačke dokumentacije konstrukcije, analizu rezultata prethodnih ispitivanja metodama bez

razaranja (IBR) i analizu uslova eksploatacije konstrukcije, zbog eventualnih prekoračenja projektnih parametara koja mogu dovesti do oštećenja zavarenih spojeva. Na osnovu toga i na osnovu relevantnih standarda definišu se metode, obim i mesta primene metoda IBR na pojedinim zavarenim spojevima.

2. Značaj vizuelnog ispitivanja zavarenih spojeva

Standardi za ispitivanja zavarenih spojeva, samo u slučaju VT ispitivanja predviđaju, bez izuzetka, obim ispitivanja 100%. Ovo je posebno važno kod opreme pod pritiskom kod koje verovatnoću nastanka i rasta prslina tj. verovatnoću otkaza povećava energija akumulisana u zidu opreme tj. u zavarenim spojevima, a koja je posledica unutrašnjeg pritiska. Ostale konvencionalne metode IBR se u najvećem broju slučajeva, prema standardima, primenjuju i u manjem obimu. U tim slučajevima, ukoliko se i VT ispitivanje ne primeni ili ne primeni u obimu 100%, pojedini delovi zavarenih spojeva ostaju neispitani, zbog čega u njima mogu ostati neuočena kritična mesta. Ta mesta su mesta sa greškama koje se osim VT ispitivanjem ne mogu otkriti drugim metodama IBR, neodgovarajuće dimenzije spojeva, greške koje se mogu otkriti VT ispitivanjem, a koje mogu da budu da uzrok nastanka drugih grešaka, mesta sa višestrukim greškama u spoju, mesta predhodnih reparatura zavarenih spojeva, eksploatacijska oštećenja kao i greške u osnovnom materijalu (OM) pored zavarenih spojeva.

Slike 1., 2. i 3. prikazuju pojednostavljene modele spojeva zavarenih na čeliku S 235, debljine 10 mm, MAG postupkom sa dodatnim materijalom SG2. Modeli su izrađeni metodom konačnih elemenata. Spojevi su poprečno opterećeni silom koja u OM izaziva napon od 100 MPa. Na slikama 1. i 2. su prikazane greške koje se, osim VT ispitivanjem, ne mogu otkriti drugima metodama IBR. To su smaknuće i neodgovarajući ugao prelaza sa lica šava na OM. Na slici 1. prikazano je smaknuće veličine 1 mm, koje je u ovom slučaju prihvatljivo za nivo kvaliteta B prema standardu [5].

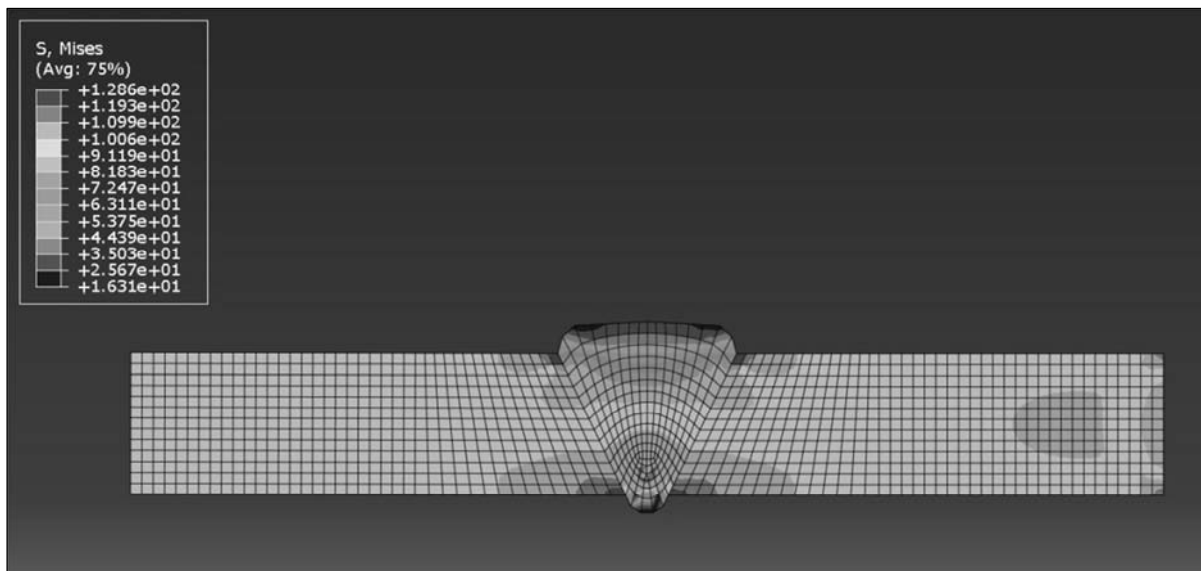


Slika 1. Povećanje napona u zavarenom spoju izazvano smaknućem

Figure 1. Stress increase in the welded joint caused by the misalignment

Sa slike se vidi da ova greška izaziva povećanje napona od skoro 58% na prelazu sa lica i naličija šava na OM. Pri istom naponu u OM, lokalno povećanje napona, definisano kao faktor koncentracije napona, povećava se sa povećanjem

veličine smaknuća. Na slici 2. prikazan je spoj sa uglom prelaza sa lica šava na OM od 90° i nešto većim uglom prelaza sa strane korena šava. Ovaj ugao je prihvatljiv za spojeve nivoa kvaliteta D prema standardu [5].



Slika 2. Povećanje napona u zavarenom spoju izazvano oštrim uglom prelaza sa šava na osnovni materijal

Figure 2. Stress increase in a welded joint caused by a sharp angle transitions from the weld metal to the base metal

Sa slike se vidi da ova greška izaziva lokalno povećanje napona - faktor koncentracije napona od skoro 29%, kako u zoni lica tako i u zoni korena šava. Ovo povećanje napona tj. faktor koncentracije napona se smanjuje sa povećanjem ugla prelaza. Navedeni primeri pokazuju da se napon izazvan prisustvom greške u zavarenom spoju može odrediti ako su poznati faktor

koncentracije napona na grešci i veličina delujućeg zateznog napona. Faktor koncentracije napona zavisi od oblika i dimenzija greške.

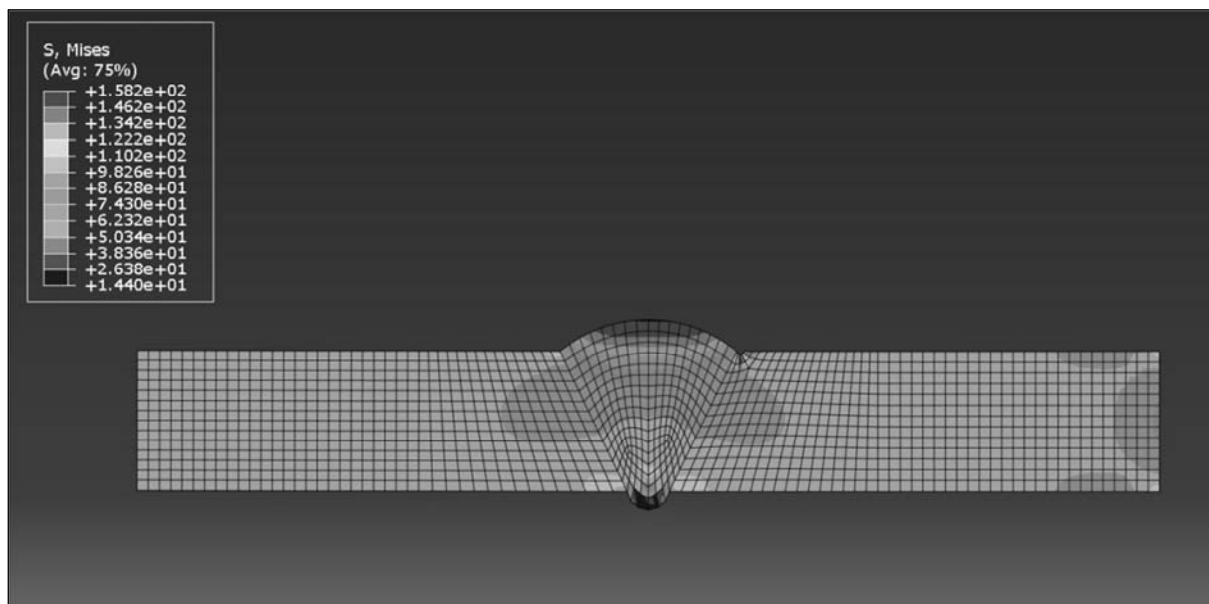
Izvedeni kvalitet zavarenih spojeva se utvrđuje i na osnovu širine i visine metala šava sa strane lica i korena i na osnovu ujednačenosti ovih veličina duž šava. Kod ugaonih spojeva ove veličine nije



moguće odrediti na drugi način osim VT ispitivanjem. Takođe, samo je VT ispitivanjem, kod ugaonih spojeva, moguće otkriti greške kao što su nedovoljna visina ili prevelika ispupčenost tj. mali ugao prelaza sa lica spoja na OM. Kod sučeonih spojeva širinu je moguće odrediti i RT metodom. Međutim, ovom metodom se teško, sa dovoljnom tačnošću, mogu odrediti visine pojedinih delova spoja npr. na mestima prevelikog nadvišenja ili prokapina, što je uslov za određivanje njihove prihvatljivosti. Neujednačene visine i širine spojeva ukazuju na odstupanja od zadatih parametara zavarivanja duž spoja. Usled ovih odstupanja povećava se broj grešaka u spojevima i time i broj kritičnih mesta na zavarenoj konstrukciji. Zbog ovoga je važno da se VT ispitivanje uradi u obimu

100% čime se obezbeđuje da eventualna kritična mesta budu predmet ispitivanja i ostalim metodama IBR.

Greške kao što su npr. ivični zajed i smaknuća mogu biti uzrok nastanka prslina ili nedostatka stapanja. Ivični zajed i smaknuća su greške koje se lako otkrivaju VT ispitivanjem. Međutim, prsline i nedostatak stapanja se uglavnom ne mogu otkriti ovim ispitivanjem. Zbog toga je, nakon VT ispitivanja ova mesta potrebno ispitati drugim metodama IBR. Na slici 3. prikazan je ivični zajed dubine 0,5 mm na spoju opisnih karakteristika. Ivični zajed ove dubine je prihvatljiv za nivo kvaliteta B prema standardu [5].



Slika 3. Povećanje napona u zavarenom spoju izazvano ivičnim zajedom

Figure 3. Stress increase in the welded joint caused by edge undercut

Sa slike 3. se vidi da ivični zajed, u ovom slučaju, izaziva lokalno povećanje napona - faktor koncentracije napona od 58%. Povećanje napona se javlja u delu ZUT koji najčešće ima najtvrdju i najnepovoljniju mikrostruturu sa aspekta otpora na nastanak i rast prslina.

Smaknuće, takođe, izaziva povećanje napona u delovima ZUT sa nepovoljnom mikrostrukturom, ali ne samo sa strane lica nego i sa strane korena spoja, slika 1. Slika 4.a) pokazuje makrostrukturu jednostrano zavarenog spoja sa smaknućem veličine 2 mm. Spoj je zavaren na čeliku S 235 debljine 12 mm, MAG postupkom sa dodatnim materijalom SG2. U korenom delu niže strane spoja uočava se nedostatak stapanja. Kod spojeva kod kojih je jedna strana smaknuta u odnosu na drugu

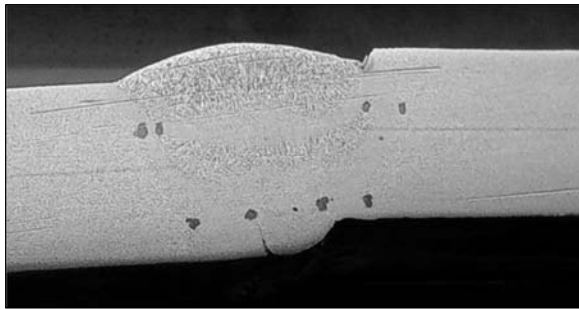
nedostatak stapanja je vrlo verovatna greška. U slučajevima većih smaknuća pojavljuje se i greška nedostatka uvarivanja. Ove greške su posledica neravnomernog zagrevanja strana žleba električnim lukom.

U praksi su česti slučajevi da se na istom mestu u spoju nađe više grešaka. Tokom eksploatacijskog ispitivanja rezervoara za skladištenje tečnog ugljendioksida, na spoju omotača i danca, otkrivena je višestruka greška, smaknuće i oštar prelaz sa lica šava na OM. Rezervoar je horizontalan, zapremine 50 m³ i izrađen je od mikrolegiranog čelika P460NL1, debljine 17 mm. Ostali podaci o rezervoaru su: maksimalni radni pritisak 20 bara, ispitni pritisak 26 bara, najniža radna temperatura - 50°C i spoljni prečnik 3000 mm [6]. Spoj sa višestrukom greškom je zavaren dvostrano u X

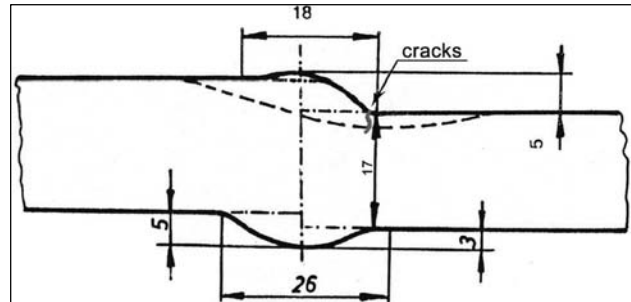


žlebu, EPP postupkom, dodatnim materijalom S2NiMo. Potrebni nivo kvaliteta zavarenog spoja je nivo B [5]. Na osnovu toga zaključeno je da je, u ovom slučaju, prihvatljiva veličina smaknuća od 1,7 mm, dok je VT ispitivanjem izmereno 5 mm, a da je prihvatljiva veličina ugla prelaza sa lica šava na OM

minimalno 150° , dok je izmereno 120° . Prema tome otkrivene greške su neprihvatljive za zahtevani nivo kvaliteta zavarenog spoja. Slika 4.b) prikazuje poprečni presek kroz spoj na mestu višestruke greške.



a)



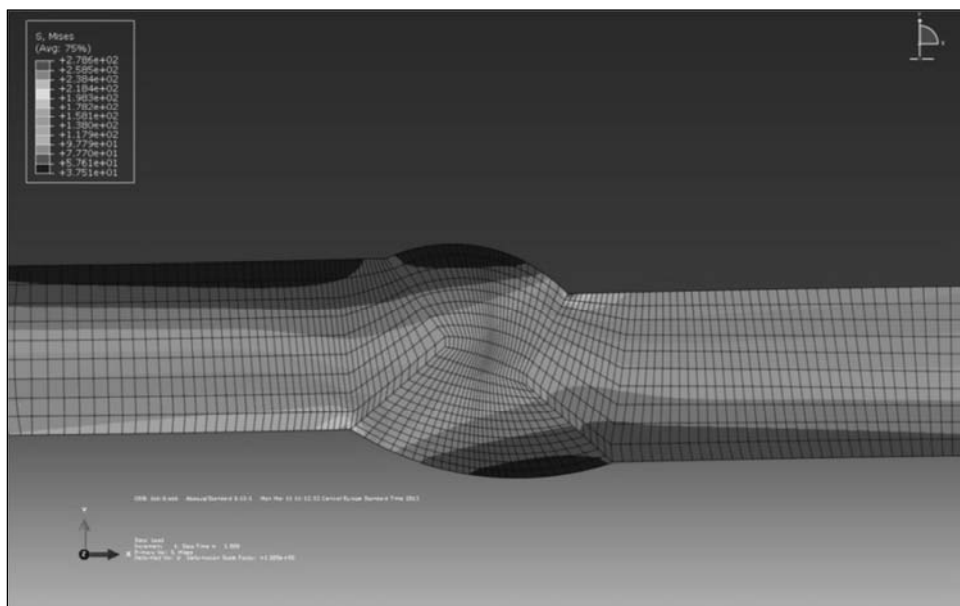
b)

Slika 4. Makrostruktura spoja sa smaknućem, nedovoljnom popunjenošću žleba i nedostatkom stapanja u korenu a), b) presek kroz spoj na mestu višestruke greške, smaknuće i mali ugao prelaza sa lica šava na osnovni materijal i položaj i veličina njima izazvane prsline

Figure 4. Macrostructure of the joint with misalignment, underfill of the groove and a lack of root fusion a), b) section through the joint at the place of multiple defects, misalignment and a small angle of transition from the weld metal to the base metal and the position and size of the crack caused by them

Metodom konačnih elemenata analizirano je naponsko stanje oko ove višestruke greške pri radnim i ispitnim uslovima u rezervoaru [6]. Cilj analize je utvrđivanje mogućnosti nastanka prsline. Utvrđeno je da su za nastanak prsline kritični uslovi pri ispitivanju rezervoara unutrašnjim pritiskom.

Slika 5. prikazuje raspodelu i veličine napona oko mesta sa višestrukom greškom pri ispitnom pritisku. Sa slike se vidi da se najveći napon od 279 MPa (crvena oblast), javlja u zoni smaknuća na prelazu sa lica šava na OM.



Slika 5. Povećanje napona u zavarenom spoju izazvano višestrukom greškom, smaknuće i mali ugao prelaza sa lica šava na osnovni materijal

Figure 5. Stress increase in the welded joint caused by a multiple defects, misalignment and a small angle of transition from the weld metal to the base metal



Na osnovu proizvođačke dokumentacije rezervoara zaključeno je da on nije naponski žaren, da je zavaren dodatnim materijalom čvrstoće praktično jednake čvrstoći OM i da je zavaren EPP postupkom. Na osnovu toga procenjeno je da zaostali napon u zavarenom spoju sa greškom iznosi oko 85% napona tečenja MŠ tj. da iznosi oko 383 MPa [6]. Ovaj napon sabran sa naponom koji izaziva višestruka greška iznosi 662 MPa što prevazlazi zateznu čvrstoću OM. Moguće je da je ovaj napon veći i od zatezne čvrstoće OM u ZUT što može dovesti do pojave prslina na prelazu sa lica šava na OM. Zbog toga je predviđeno da se nakon VT ispitivanja ovo mesto ispita magnetnim česticama i ultrazvukom. Ovim ispitivanjima su, na mestu višestruke greške, otkrivene prslinae, slika 4.b) dubine do 3 mm.

Mesta naknadnih popravki tj. reparatura treba obavezno da budu predmet ispitivanja metodama IBR. Ona se, po pravilu, zavaruju pod nepovoljnijim uslovima u odnosu na ostatak zavarenih spojeva. U tom smislu najuticajniji faktor je omoteno skupljanje MŠ zbog čega se na mestima reparatura javljaju veliki zaostali naponi koji pogoduju nastanku prslina. Zbog toga tokom VT ispitivanja ova mesta obavezno treba ispitati i drugim metodama IBR.

Greške u OM pored zavarenih spojeva koje se mogu otkriti VT ispitivanjem, a koje mogu da budu uzrok nastanka prslina ili otkaza su npr. trag uspostavljanja luka, oštećenja od privremenih spojeva, tragovi brušenja i oštećenja od pomoćnih alata. Uspostavljanje luka i privremeni spojevi u OM su greške koje su posebno opasne kod čelika povišene i visoke čvrstoće, jer pogoduju pojavi hladnih prslina. Tragovi brušenja i oštećenja od pomoćnih alata povećavaju sklonost ka pojavi prslina kroz efekat zarezata.

3. Analiza otkaza rezervoara za tečni kiseonik

Rezervoar je vertikalna, dvostruka, vakum izolovana posuda pod pritiskom, zapremine 11m³ [7]. Rezervoar se sastojao se od spoljne posude izrađene od niskougleničnog čelika u koju je smeštena unutrašnja posuda izrađena od visokolegiranog austenitnog čelika X5CrNi18.10, debljine 5,7 mm. Rezervoar je korišćen za skladištenje utečnjene kiseonika. Pri otkazu spoljni rezervoar je potpuno uništen, a unutrašnji

rezervoar je u značajnoj meri oštećen i deformisan. Na jednom od podužnih spojeva na omotaču uočena je zona dužine oko 300 mm sa više prslina, slika 6. Ostali podaci o rezervoaru su radni pritisak 15 bara, ispitni pritisak 23 bara, najniža radna temperatura - 196°C.

Nakon otkaza, zavareni spojevi na unutrašnjem rezervoaru su ispitani metodama bez razaranja i razaranjem. Ispitivanje VT metodom je urađeno sa spoljne i unutrašnje strane rezervoara u obimu 100%. Svi spojevi na rezervoaru su zavareni E postupkom, dvostrano, austenitnim dodatnim materijalom. Ispitivanjem su otkriveni ivični zajednički (slika 7.a), mestimične popravke lica šava brušenjem, oštećenja OM od brušenja (slika 7.b), smaknuća, mestimično nedovoljna visina šava – lice šava niže od nivoa OM (slika 7.a) i duboka oštećenja OM od brušenja. Prihvatljivost otkrivenih grešaka je ocenjena na osnovu propisa koji su važili u momentu puštanja rezervoara u eksploataciju [8, 9, 10]. Iz literature [10] se vidi da na podužnim spojevima rezervoara nisu dozvoljeni ivični zajednički i oštećenja površina OM uz spoj, a da su dozvoljena manja udubljenja lica šava. Na kružnim spojevima dozvoljeni su manji ivični zajednički i manja udubljenja lica šava, dok oštećenja OM uz spoj nisu dozvoljena. Poredeći rezultate ispitivanja sa kriterijumima prihvatljivosti zaključuje se da izvedeni kvalitet zavarenih spojeva nije zadovoljavajući. Navedene greške nisu posledica eksploatacijskih oštećenja i nastale su pri izradi rezervoara. Pregledom proizvođačke dokumentacije utvrđeno je da izveštaji o VT ispitivanjima u njoj ne postoje.

Pregledom površina OM u zoni loma, neposredno uz spoj su uočeni učestali i duboki tragovi brušenja, koji su približno normalni na osu spoja. Ovi tragovi brušenja imaju oblik zarezata i, na slici 6.b), se vide kao veći broj crnih linija pored spoja. Najveće dubine ovih zarezata se kreću od 1,1 do 1,5 mm, što čini 18 do 25% debljine OM. Vizuelnim pregledom prelomne površine uočeno je da se jedna od prslina prostire kroz dublji od ovih zarezata. Analizom ostalih površina prslina nisu uočene greške koje bi mogle biti uzrok loma. Na osnovu toga i rezultata ostalih ispitivanja zaključeno je da su zarezati, kao koncentratori napona, bili uzrok nastanka ove prslinae i na kraju otkaza rezervoara.



a)



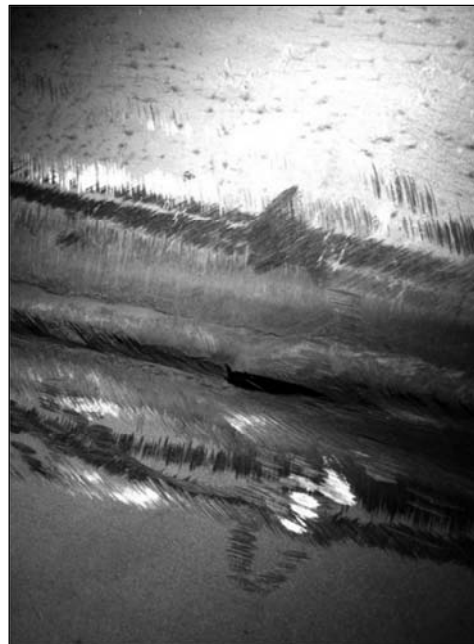
b)

Slika 6. Položaj i izgled oštećene zone na podužnom spoju na omotaču unutrašnjeg rezervoara a), b) oštećena zona, tamne linije u OM pored spoja su oštećenja brušenjem

Figure 6. Position and appearance of the damaged zone in the longitudinal joint on the inner tank cover a), b) damaged zone, and dark lines in the BM next to the joint are damaged by grinding



a)



b)

Slika 7. Podužni spoj, spoljna strana, ivični zajed i mesto sa nedovoljnom visinom šava a), b) spoj dna i omotača, unutrašnja strana rezervoara, oštećenja OM i lica šava brušenjem

Figure 7. Longitudinal joint, outer side, edge undercut and a place with underfill a), b) joint of the bottom and cover, inner side of the tank, damage to the OM and the face of the seam by grinding



4. Zaključci

Vizuelno ispitivanje, pri oceni izvedenog kvaliteta zavarenih konstrukcija, u značajnom broju slučajeva nije primenjeno ili nije primenjeno na odgovarajući način. Ovo se zaključuje na osnovu pregleda dokumentacija konstrukcija i izveštaja o eksploatacijskim ispitivanjima u kojima izveštaji o VT ispitivanjima nedostaju ili nisu izrađeni u skladu sa propisima.

Vizuelno ispitivanje zavarenih spojeva je nužno sprovesti iz sledećih razloga. Neki tipovi grešaka u zavarenim spojevima se mogu otkriti samo ovim ispitivanjem. Izvedene dimenzije zavarenih spojeva, npr. ugaonih, nije moguće utvrditi drugima metodama IBR. Dimenzije nekih tipova grešaka nije moguće dovoljno precizno utvrditi drugima metodama da bi se ocenila njihova prihvatljivost. VT ispitivanjem se otkrivaju greške koje mogu da iniciraju nastanak drugih grešaka, zatim višestruke greške u spoju, mesta predhodnih reparatura, eksploatacijska oštećenja kao i greške osnovnom materijalu pored zavarenih spojeva. Navedene greške, osim VT ispitivanjem, moraju da budu predmet ispitivanja i drugim metodama IBR, jer mogu da budu uzrok nastanka ili rasta prslina i time i otkaza konstrukcije. Ovo je posebno važno kod opreme pod pritiskom.

U praksi se, u zavarenim spojevima, često otkrivaju višestruke greške tj. dve ili više pojedinačnih grešaka na istom mestu u spoju. Ocena prihvatljivosti ovakvih grešaka je složena. U standardima za nivo kvaliteta zavarenih spojeva postoje kriterijumi prihvatljivosti za manji broj višestrukih grešaka. Međutim, zbog velikog broja mogućih kombinacija pojedinačnih grešaka u višestruke, ovi standardi, u praksi nisu uvek od koristi. Zbog toga, višestruke greške treba detaljno analizirati i ispitati ostalim metodama IBR.

Otkaz rezervoara za skladištenje tečnog kiseonika je uzrokovan prslinom koja je nastala, u osnovnom materijalu, pored spoja na zarezu od brušenja. Zarez je nastao pri izradi rezervoara. Pregledom proizvođačke dokumentacije rezervoara je utvrđeno da izveštaji o VT ispitivanjima u njoj ne postoje. Može se zaključiti da VT ispitivanje zavarenih spojeva nije urađeno ili nije urađeno dovoljno detaljno, zbog čega su ostali neuočeni tragovi brušenja u OM, koji su doveli do loma rezervoara.

4. Conclusions

Visual test, when evaluate the quality of welded constructions, was not applied in a significant number of cases or was not applied in an appropriate manner. This is concluded on the basis of a review of construction documents and reports on exploitation tests in which VT tests reports are missing or not prepared in accordance with regulations.

Visual inspection of welded joints must be carried out for the following reasons. Some types of weld defects can only be detected by this test. Derived dimensions of welded joints, e.g. angular, it is not possible to determine with other NDT methods. The dimensions of some types of errors cannot be determined precisely enough by other methods to assess their acceptability. VT testing reveals errors that can initiate the occurrence of other faults, then multiple faults in the joint, places of previous repairs, operational damage as well as errors in the base material next to welded joints. The mentioned errors, apart from VT testing, must also be subject to testing by other IBR methods, because they can be the cause of the formation or growth of cracks and thus the failure of the structure. This is especially important with pressure equipment.

In practice, multiple faults are often detected in welded joints, i.e. two or more individual faults in the same place in the joint. The assessment of the acceptability of such faults is complex. In the standards for quality levels of welded joints, there are acceptance criteria for a smaller number of multiple defects. However, due to the large number of possible combinations of individual faults into multiple ones, these standards are not always useful in practice. Therefore, multiple faults should be thoroughly analyzed and investigated by other NDT methods.

The failure of the liquid oxygen storage tank was caused by a crack in the base material next to the joint on the notch from grinding. The notch was created during the manufacture of the tank. A review of the manufacturer's documentation of the tank revealed that there are no reports on visual tests in it. It can be concluded that the VT examination of the welded joints was not done or was not done in sufficient detail, which is reason that the grinding marks in the BM remained unobserved, which led to the breakage of the tank.



Literatura / References

[1] SRPS EN ISO 17637/2017 - Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Vizuelno ispitivanje spojeva zavarenih topljenjem

[2] S. Sedmak, (1991), Eksploatacijske prsline u zavarenim spojevima posuda pod pritiskom, 6. Međunarodna letnja škola Mehanike loma, Eksploatacijske prsline u posudama pod pritiskom u rezervoarima, Vrdnik, Srbija, 293-308

[3] A. Radović, (1982), Zavareni spoj kao kritično konstrukciono mesto na posudi pod pritiskom, 2. Međunarodna letnja škola Mehanike loma, Savremeni aspekti projektovanja i izrade sudova i cevovoda pod pritiskom, Velika Plana, Srbija, 171-177

[4] R. Jovičić, (1997), Procena sigurnosti zavarenih posuda pod pritiskom ispitivanjem u toku eksploatacije, Magistarski rad, Tehnološko metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

[5] Standard EN ISO 5817/2008: Elektrolučno zavarivanje čelika, nikla, titana i njihovih legura – Nivoi kvaliteta za nepravilnosti

[6] R. Jovičić, S. Sedmak, U. Tatić, U. Lukić, M. Walid, (2015), Stress State Around Imperfections in Welded Joints, Structural Integrity and Life, 15, 1, 27-29

[7] R. Jovičić, (2019), Ispitivanje i uzroci otkaza zavarenog spoja na rezervoaru za skladištenje utečnog kiseonika, Elaborat br. 01.19, Inovacioni centar mašinskog fakulteta u Beogradu, Beograd, Srbija

[8] Pravilnik o tehničkim normativima za stabilne posude pod pritiskom, Sl. SFRJ 16/83

[9] SRPS M.E2.159 Posude pod pritiskom, Kontrola i ispitivanje zavarenih spojeva

[10] SRPS C.T3.010 Zavarivanje – Klase kvaliteta zavarenih spojeva izvedenih topljenjem na čeliku



Ispitivanje Materijala & Zavarenih Spojeva



Nastavak sa strane 168

Na kraju, organizatori su se zahvalili svim učesnicima uz poziv za narednu konferenciju koja će se održati u jesen 2025. godine pod nazivom "Zavarivanje spaja 3". Ovogodišnja manifestacija je ispunila sva očekivanja učesnika i još jednom dokazala da ZAVARIVANJE SPAJA.

Uz čestitke organizatorima treba istaći i posebnu zahvalnost sponzorima bez kojih sve ovo ne bi bilo moguće ostvariti: Institut za zavarivanje d.o.o. - Tuzla, AX-SOLING d.o.o. - Grude, Južni Prolaz d.o.o. - Zagreb, Idef d.o.o. - Zagreb, Frontline d.o.o. - Sarajevo, Schweißtechnische Lehranstalt Magdeburg GmbH i svim fizičkim i pravnim licima članovima BH Društva za zavarivanje.

Fotogalerija



Predsednik BH Društva za zavarivanje Namik Džibrić i Direktor Instituta za zavarivanje –Tuzla, Prof. dr Sead Avdić otvaraju Savetovanje



Vencislav Grabulov prima Zahvalnicu BH Društva za zavarivanje



Za vreme izlaganje radova



Grupna fotografija pre završetka radnog dela



Deo atmosfere sa svečane večere



Poseta Gradskoj Većnici

Autori vesti: Namik Džibrić, Vencislav Grabulov



Milo Dumović^{1,a}

ARC WELDING MAINTENANCE OF RAILWAY COMPONENTS

ODRŽAVANJA ŽELEZNIČKIH KOMPONENTI PRIMENOM PROCESA ELEKTROLUČNOG NAVARIVANJA

Professional paper / Stručni rad

Paper received / Rad primljen:

August 2022.

Paper accepted / Rad prihvaćen:

April 2023.

Keywords: flux cored arc welding, rail components, productivity, maintenance, welding procedures.

Abstract

The service performance and life of rail components are subjected to the following wear mechanisms: metal to metal or adhesive wear; fatigue; plastic flow and defects in rail and welds. Standard and head hardened rail grades made of high carbon steel as well as crossing made of austenitic manganese steels require permanent in field as well as workshop maintenance. Arc welding has been widely used for the repair and maintenance of rail components. This paper focuses on repairs of railway components using flux cored arc welding as a process with higher productivity, reliability, quality and increased service life of the repaired components. The paper addresses metallurgical aspects of the rail components welding, development of welding procedures, welding filler materials selection, heat input and temperature control, dilution and distortion control, weld, heat affected zone and parent material properties.

Author's address / Adresa autora:

¹ Solid Technologies Pty. Ltd. Australia

email: ^a milo.dumovic@gmail.com

Ključne reči: elektrolučno zavarivanje/navarivanje, železničke komponente, produktivnost, održavanje, procedure zavarivanja

Rezime

Performanse i vek železničkih komponenti su diktirane sledećim mehanizmima: adhesivno i abrazivno habanje; zamor (kotrljajući); plastična deformacija i nedostaci/defekti u šinama i varovima. Standardne (normalizovane) i površinski kaljenje/očvrsle železničke šine napravljene su od visoko ugljeničnog čelika kao i razdvojnice uglavnom su napravljene od austenitičkih manganskih čelika i zahtevaju trajno održavanje na terenu, kao i u radionicama. Zavarivanje električnim lukom je široko korišćeno za popravku i održavanje železničkih komponenti. Ovaj rad se fokusira na popravke železničkih komponenti koristeći elektrolučno zavarivanje/navarivanje korištenjem žice punjene praškom, kao proces sa većom produktivnošću, pouzdanošću, kvalitetom i povećanim radnim vekom popravljenih komponenti. Rad se bavi metalurškim aspektima zavarivanja železničkih komponenti, razvojem procedura zavarivanja, izborom dodatnih materijala za zavarivanje, unosom toplote i kontrolom temperature, faznim transformacijama, kontrolom vitoperenja i razlučivanja, zonom uticaja toplote i svojstvima osnovnog materijala.

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



1. Introduction

The service performance and life of rails in track (carbon manganese as well as austenitic manganese rail steels) is determined primarily by:

- Metal to Metal Wear;
- Fatigue;
- Plastic Flow and
- Defects in rail and welds.

Tables 1 and 2 are providing summary information regarding the causes of the rail defects and failures, and Figures 1 to 4 are illustrating some of the defects.

Table 1. Causes of rail defects [1]

Tabela 1. Uzroci oštećenja šina [1].

Railway	First	Second	Third	Fourth
Rail track (99/00)	Squats 21.7%	Vertical/transverse 20.1%	Horiz./longitudinal 12.5%	Bolt holes 9.6%
SNCF (1999)	Squats 23.4%	Internal fatigue 11.5%	Shells 8.4%	Thermite welds 4.7%
HSPC (1999)	Thermite welds 31.5%	Wheel burns 17.2%	Horizontal split webs 13.3%	Bolt holes 11.3%
NS (1997)	Insulated Joints 59.4%	Transverse defects 18%	Thermite welds 15%	Fatigue Failure 5.2%
DB (1996)	Thermite welds 29%	Sudden fracture 18%	Fatigue Failure 16%	Electric bonds 4%
Banverket* (1998)	Transverse fracture 55.1%	Welded joint 32.7%	Horizontal defect 6.1%	Vertical split 2.0%
HH1 (1999)	Vertical split heads 34.7%	Thermite welds 20.3%	Detail fractures 13.1%	Bolt holes 12.2%
HH2 (1999)	Transverse defects 23.6%	Thermite welds 15.5%	Wheel burns 13.2%	Shells 9.6%

Table 2. Causes of rail fractures [1]

Tabela 2. Uzroci loma šina [1].

Railway	First	Second	Third	Fourth
Rail track (99/2000)	Vertical/transverse 39.5%	Thermite welds 22.4%	Bolt holes 14.9%	Horiz./longitudinal 7.4%
SNCF (1999)	Thermite welds 35.3%	Internal fatigue 18.6%	Squats 8.8%	Rail manufacture 6.1%
Banverket* (1998)	Transverse fracture 44.1%	Vertical split 19.4%	Welded joint 19.4%	Horizontal defect 17.2%
HH2 (1999)	Transverse defects 37.9%	Thermite welds 35.6%	Bolt holes 5.8%	Flash welds 5.6%



Figure 3. Rail shell development

Slika 3. Oštećenja glave šine u obliku "školjki"



Figure 4. Rail squat

Slika 4. Oštećenja uzrokovana zamorom metala usled kontakta pri kotrljanju



Figure 5. Thermit weld defect

Slika 5. Oštećenja aluminotermijski zavarenog spoja

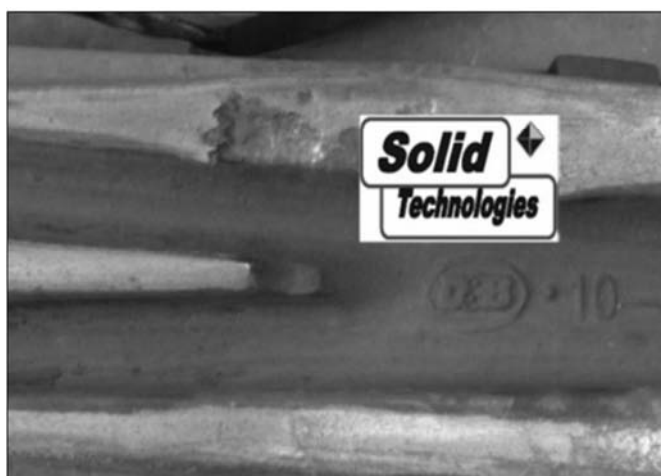


Figure 6. Rail crossing defect

Slika 6. Oštećenja na železničkom prelazu



2. Steels used in railroads

The main railroad steels are carbon manganese alloys with main alloying elements in the range of 0.6 to 0.8% carbon and 0.65 -1.3% Mn. The

hypereutectoid grade steels are also used with the chemical composition consisting of carbon in the range of 0.85-1.00 % and Manganese 0.95-1,35% (Tables 3 and 4).

Table 3. Rail mechanical properties [4]

Tabela 3. Mehanička svojstva šina [4]

Nominal rail size		0.2% Proof stress MPa, Min.	Tensile strength MPa, Min.	Elongation %, Min.	Surface hardness HB
All rail	31 kg, 41 kg	—	700	8	—
	50 kg, 60 kg, 68 kg	420	880	8	260
Head-hardened rail	50 kg, 60 kg, 68 kg	780	1130	9	340

Tabela 4. Hemijski sastav ugljenično - manganskih čelika [5-6]

Table 4. Chemical compositions of carbon manganese steels [5-6]

	C	Mn	Si	P	S	Cr	AL	V	N	Mo	Sn
UIC 860 Classification	%	%	%	%max	%max	%max	%max	%max	%max	%max	%max
700	0.40-0.60	0.80-1.30	0.10-0.40	0.050	0.050					680	
800	0.45-0.65	0.80-1.20	<0.50	0.045	0.045					770	
900A	0.60-0.80	0.80-1.30	0.10-0.50	0.040	0.040					880	
900B	0.55-0.75	1.30-1.70	0.10-0.50	0.040	0.040					880	
1100	0.60-0.82	0.80-1.30	0.30-0.90	0.030	0.030	0.80-1.30				1080	
EN13674-1 Classification											
R200	0.38-0.62	0.65-1.25	0.13-0.6	0.040	0.040	0.15	0.004	0.03	0.01	680	200-240
R220	0.50-0.60	0.65-1.25	0.20-0.60	0.025	0.030	0.15	0.004	0.03	0.08	770	220-260
R260	0.60-0.82	1.00-1.25	0.13-0.60	0.030	0.030	0.15	0.004	0.03	0.01	880	260-300
R260Mn	0.5-0.77	0.65-1.25	0.13-0.62	0.025	0.030	0.15	0.004	0.03	0.01	880	260-300
R320Cr	0.58-0.82	1.25-1.75	0.48-1.12	0.025	0.025	0.75-1.25	0.004	0.02	0.01	1080	320-360
R350HT	0.70-0.82	0.65-1.25	0.13-0.60	0.025	0.025	0.15	0.004	0.03	0.01	1175	350-390
R350LHT	0.70-0.82	0.65-1.25	0.13-0.60	0.025	0.025	0.3	0.004	0.03	0.01	1175	350-390
R370CrHT	0.68-0.84	0.65-1.15	0.38-1.02	0.025	0.025	0.35-0.65	0.004	0.03	0.030	1280	370-400
R400HT	0.88-1.07	0.65-1.35	0.18-0.62	0.025	0.025	0.30	0.004	0.030	0.030	1280	400-440

Austenitic Manganese Steels (AMS) are usually used in the form of castings for crossings applications with typical chemistry of 0.9 -1.4% C

and 10 -14% Mn. A numerous variety of Hadfield's original compositions are available. Key chemical elements are listed in Table 5. [7].

Table 5. Key alloying elements of austenitic manganese steels in (mass. %).

Tabela 5. Osnovni legirajući elementi austenitnih manganskih čelika u (mas. %)

C	Mn	Si	P	Fe
1-1.3	min. 12	max. 1	0.07	rest

Increased cooling rate in the range from 871 °C to 315 °C during quenching is important to surpass detrimental carbides precipitation from austenite. This is very important for manufacturing as well as welding repair of AMS.

3. Arc welding repair maintenance of railtrack defects

Flux Cored Arc Welding (FCAW) is a semi-automatic process where a continuous flux/powder-filled tubular electrode is used. The consumable electrode is usually made of a low carbon steel or



stainless steel tubular sheath with the core filled with fluxing and alloying materials (Figure 8.). Flux cored arc welding consumables are available in two forms tubular consumable - gas shielded and

tubular consumable – self shielded (FCAWSS). The FCAWSS process offers considerable flexibility and is more economical than the MMAW process.

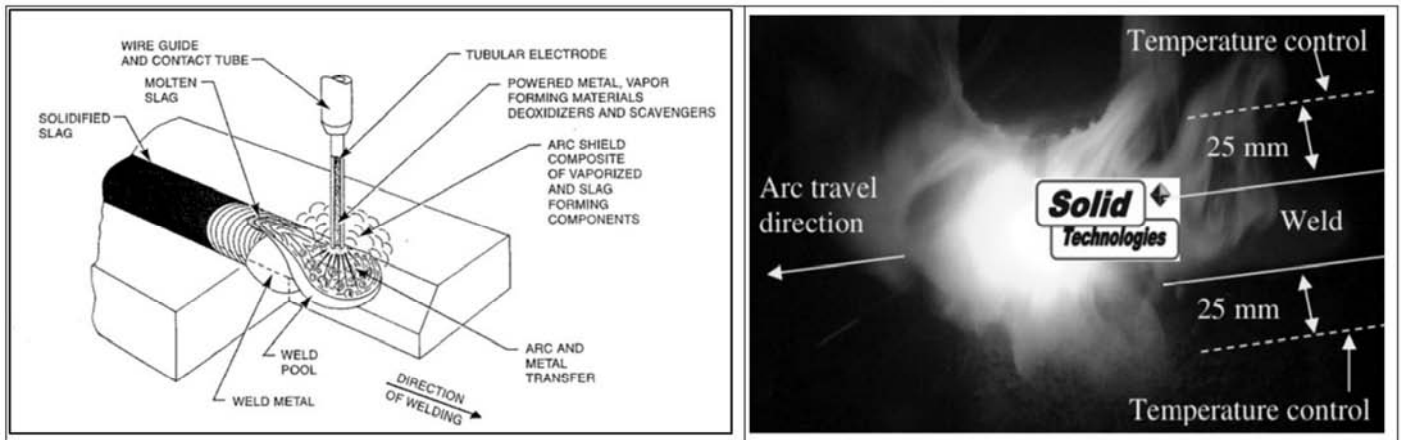


Figure 8. Semi automatic Flux Cored Arc Welding Self Shielded (FCAWSS) process
Slika 8. Poluautomatski proces zavarivanja punjenom žicom sa samozaštitom (FCAVSS)

Filler metals - consumables for the repair of rail components

Filler metals for repairing railway defects are listed in Table 6. and Table 7. for carbon manganese and austenitic manganese steels, respectively.

Table 6. Chemical composition of the filler materials suitable for repairing defects on carbon manganese steels in (mass. %)

Tabela 6. Hemijski sastav dodatnih materijala koji su pogodni za popravku oštećenja na ugljenično manganskim čelicima u (mas. %)

Weld Alloy description	Weld developed Microstructure	C	Mn	Ni	Mo	W	Cr	Fe	Applicable to
Pearlitic/ Ferritic steel	Predominantly acicular ferrite. Minor proportions of grain boundary ferrite and bainite may be present	0-0.3	Total of these elements: 5% max					rest	All rail standard rail surface hardness 260 HB (Table 3)
Low carbon bainitic steel	Predominantly low carbon bainite	0-0.4	Total of these elements: 6% max.					rest	Head hardened rail; surface hardness 340 HB (Table 3)



Table 7. Chemical composition of the filler materials suitable for repairing defects on austenitic manganese steels in (mass. %)

Tabela 7. Hemijski sastav dodatnih materijala koji su pogodni za popravku oštećenja na austenitno manganskim čelicima u (mas. %)

Weld alloy description	Weld developed microstructure	C	Mn	Ni	Mo	W	Cr	Fe	Applicable to
Austenitic manganese	Austenite with isolated particles of carbide at grain boundaries	0.6-1.3	10-20	-	-	-	-	rest	Austenitic Manganese Crossings
High carbon austenitic steel	Complete or incomplete networks of carbide and austenite eutectic in austenite	0.9-1.7	1-4	-	-	-	3-10	rest	
		0.4-0.9	10-18	-	-	-	19-18	rest	

Reviewing the as welded microstructures of Flux Cored Self Shielded Arc Welding weld deposit and development of Al and C equivalents Dumovic and Dunne [8] developed diagram as illustrated in

Figure 9., for prediction of the weld metal microstructures/phase fields relative to the relevant wear resistance mechanisms.

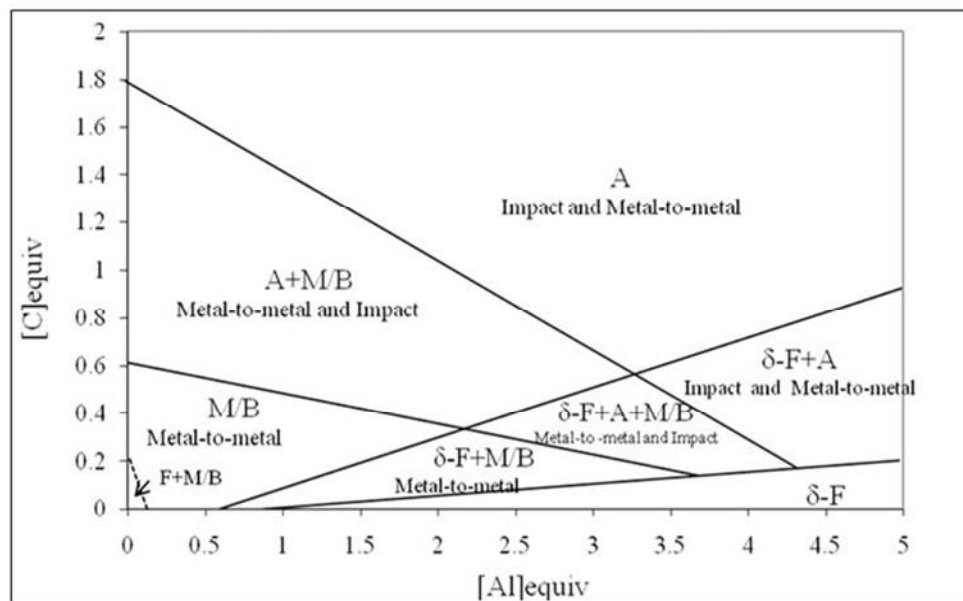


Figure 9. Diagram for predicting the weld metal microstructures/phase fields for FCAWSS weld deposits, and the corresponding wear resistance mechanisms. A represents austenite, M is martensite, F refers to α ferrite, and δ -F is ferrite that forms at high temperatures and B is bainite [8]

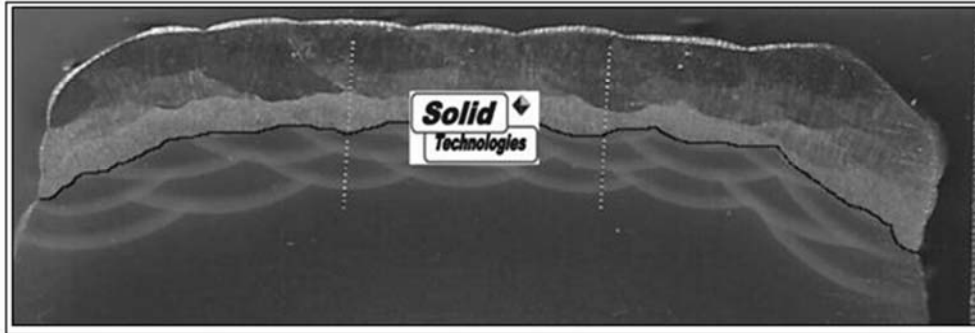
Slika 9. Dijagram za predviđanje mikrostrukture metala šava/faznih polja za FCAVSS prolaze šava i odgovarajući mehanizmi otpornosti na habanje. A predstavlja austenit, M je martenzit, F se odnosi na α ferit, a δ -F je ferit koji se formira na visokim temperaturama, a B je bainit [8].

Equivalents of Al and C were calculated according to equations:

$$[Al]_{eq} = wt\% Al + 0.5wt\% Mo + 0.43wt\% Si + 0.075wt\% Cr + 0.016wt\% W + 0.625wt\% V + 0.79wt\% Ti \quad (1)$$

$$[C]_{eq} = wt\% C + 0.018wt\% Mn + 0.04wt\% Ni \quad (2)$$

Cross-section of one welded joint with characteristic transformation temperatures, measured line hardness and welding conditions for material R35L3 on the first welded layer are presented in Figure 10.



R35L3	A ₁ [°C]	A ₃ [°C]	Ms [°C]	Mf [°C]	B _s [°C]	CE IIW	Hardness [HV]	WFS ["/min]	I [A]	U [V]	TS [mm/min]	HI [KJ/mm]
Lay. 1.	735	873	379	164	451	1.04	425 p4	350	130	28	345	0.51

Figure 10. R35 weld deposit Layer 1 phase transformations.

$$HV_{10} (\text{Preheat} > Ms) = 353.1 \times CE(\text{IIW}) - 2.051 \quad (3)$$

$$HV_{10} (\text{Preheat} < Ms) = 291.6 \times CE(\text{IIW}) + 81.24 \quad (4)$$

Slika 10. Makro izgled navara sa karakterističnim temperaturama transformacije, uslovima navarivanja i izmerenim tvrdoćama

$$HV_{10} (\text{predgrevanje} > Ms) = 353.1 \times CE(\text{IIW}) - 2.051 \quad (3)$$

$$HV_{10} (\text{predgrevanje} < Ms) = 291.6 \times CE(\text{IIW}) + 81.24 \quad (4)$$

In Figure 11. the martensitic start temperature (MS) as function of carbon equivalent CE(IIW) and in dependence of welding layer is presented [9].

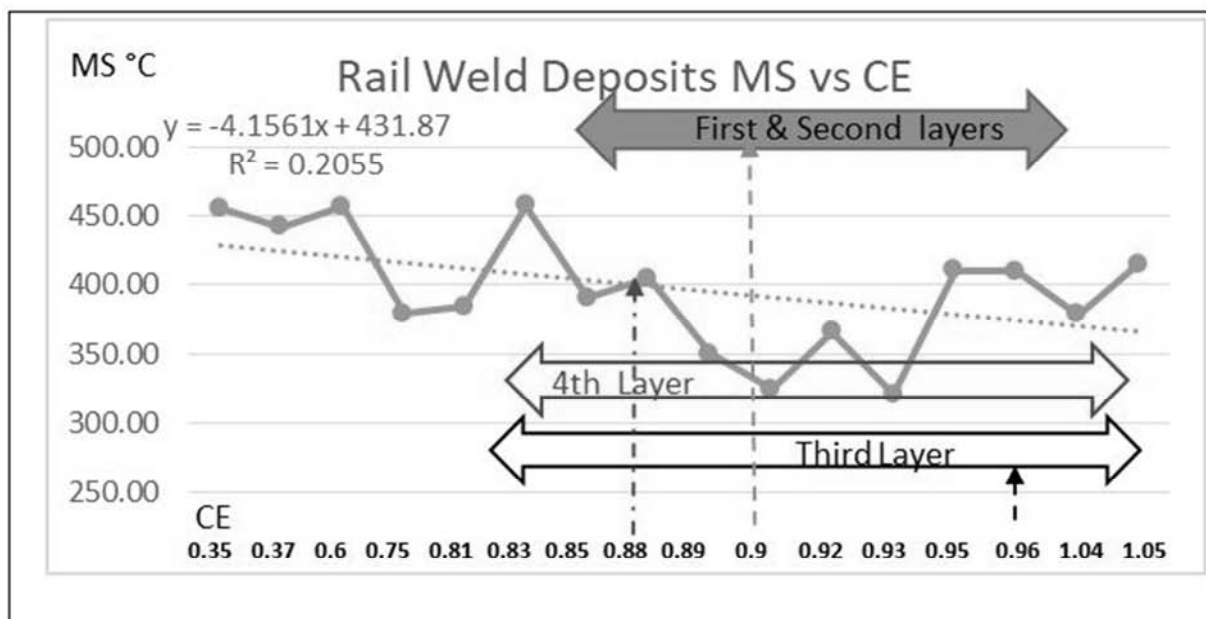


Figure 11. Martensitic Start temperature as function of CE(IIW) [9]

Slika 11. Temperatura početka martenzitne transformacije MS u funkcija CE(IIW) [9]

An example of the austenitic manganese weld with grain boundaries carbides and degradation of crossing in service along grain boundaries of weld repair is presented in Figure 12. [13]. In Figure 13,

a failure analysis of broken rail revealed development of undesired martensitic phase in the weld overlay on high carbon head hardened rail [10].

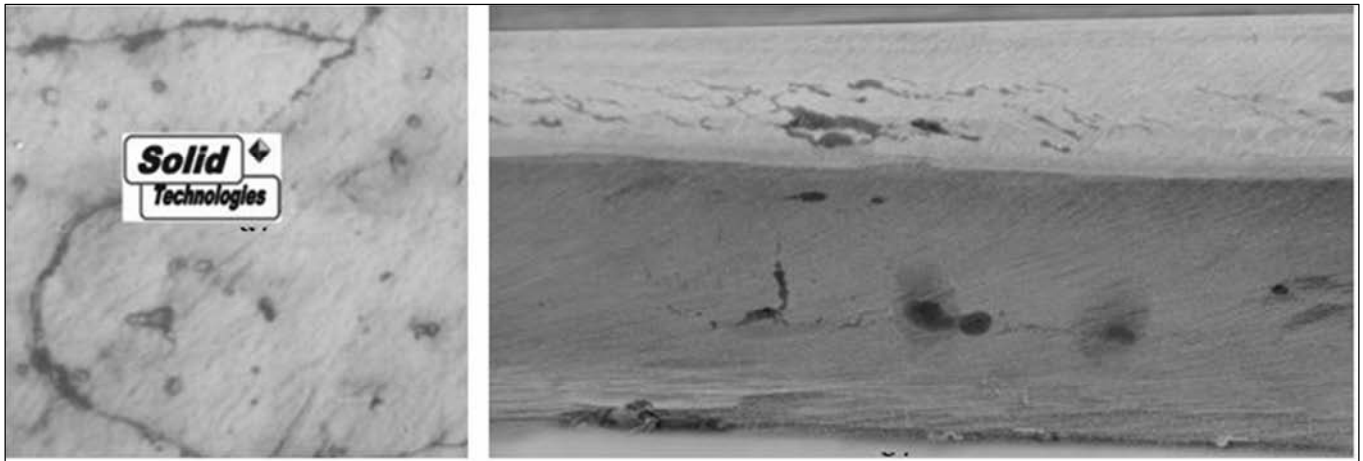


Figure 12. Austenitic manganese weld with grain boundaries carbides a) and degradation of crossing in service along grain boundaries of weld repair b)[13]

Slika 12. Austenitno manganski var sa karbidima po granicama zrna a) i oštećenja duž granica zrna na repariranom šavu nastala tokom eksploatacije b) [13]

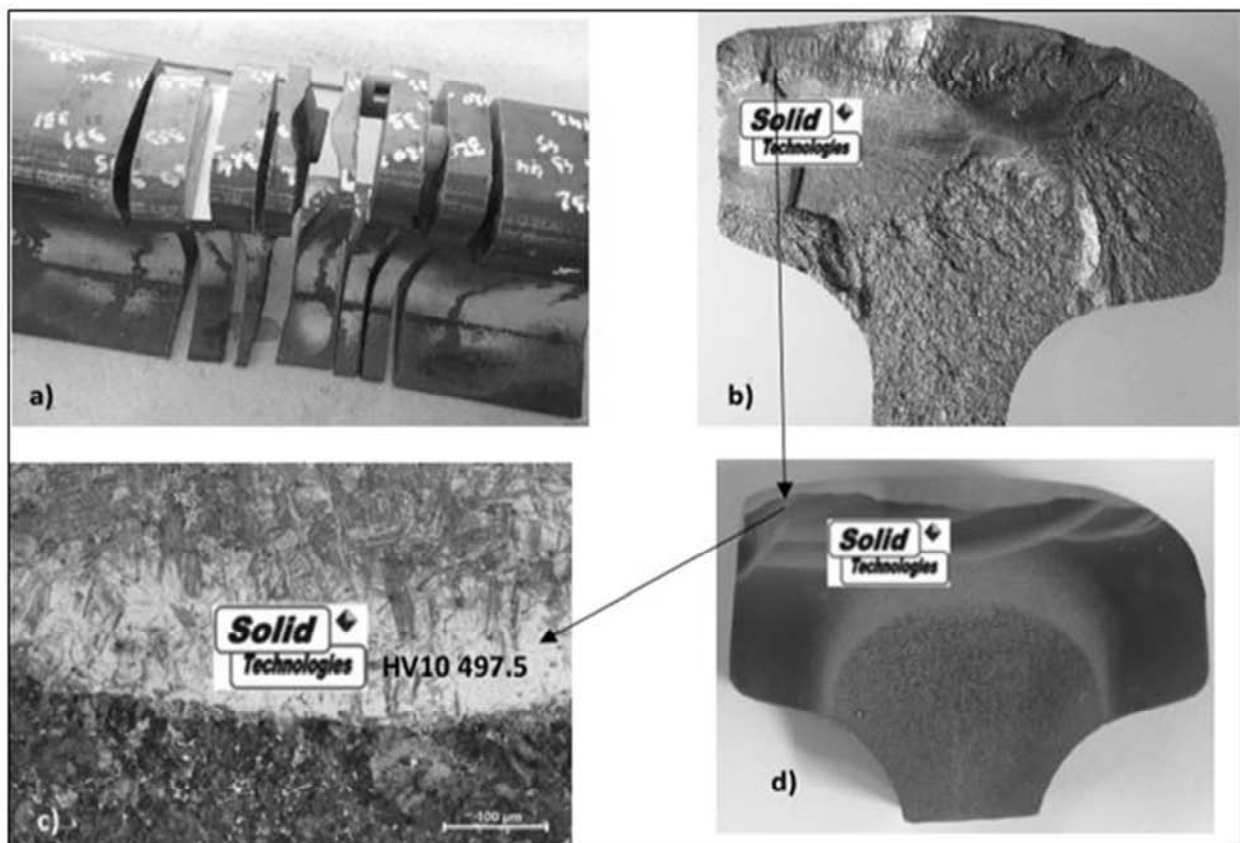


Figure 13. Failure analysis of broken rail revealed development of undesired martensitic phase in the weld overlay on high carbon head hardened rail [10]

Slika 13. Analiza loma slomljene šine pokazala je nastanak i razvoj neželjene martenzitne faze u navarenom sloju šava kod otvrdnute glave visokouglične šine [10]

Welding procedure specification (WPS) for repair welding of carbon steel rail by the Flux Cored Self Shielded Arc (FCAWSS) welding process in Figure 14 is presented, and in Figure 15, another sample of the weld repairing is presented for the

case of Termit weld which was overlaid with Solid Rail 30 weld deposit. Based on hardness measurements it is evident that HAZ is softened zone.



WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) [11]

PROJECT: Weld Surfacing Repair of Wheel Burns, Squats, Thermit/Flush but dips, Rail Ends	WPS #: ST-RHC-1408-12	DATE :
CLIENT:	WELDING CODE/ Applicable standards:	N/A guidelines AS/NZS 2576, DIN 8555, EN 14700, AS 1085.20, AWS D15.2
RAIL. MAT. SPEC.: Carbon Steel Rail AS 1085.1, Standard and H. H. Rail	MATERIAL THICKNESS MAX 170 mm; THICKNESS RANGE: All	
REFERENCE: NATA: LS14-0530-03- VT; LS14-0530-03 MPI; LS14-0530-02 and	PREHEAT/MIN. INTERPASS TEMP.:350 °C; DON'T WELD BELOW 350 °C; Temp Verification: Infrared Thermometer and crayons. Temperature control 75-100 mm from the end of weld prep.	
PWHT: NA; PREHEAT METHOD: Oxy-fuel.	MAX. INTERPASS TEMPERATURE:450 °C; DO NOT EXCEED 450 °C	
JOINT TYPE/ POSITION: Flat weld overlay; 1G	Soaking Time at preheating temperature of 350 °C: 10 minutes	
WELDING PROCESS: Flux Cored Arc Welding Self Shielded	Welding wire: Solid RAIL 30; P.N.: 1430B7D1205	
OPERATORS: Solid Technologies:	POWER SOURCE, WIRE FEEDER: CV or CC; CV; WELDING GUN:	

NOTICE Prior to welding remove grease, rust and dirt. 100% NDT inspection dye-penetrants or magnetic particle inspection. For thermit weld dips prepare app. 90 mm each side from the centre of the thermit weld. Use grinding or air arc/plasma gouging. Establish defects (squats, wheel burns etc.) wear, defect pattern, size and estimate reference points for the surfacing depth, width and length (200 mm length and max 20 mm deep).

Layer No.	Weld Bead (max. 10 weld beads per layer)		WIRE RAIL 30		a	CV or CC	WFS (mm/min)	Current (Amps)	VOLTS	TRAVEL SPEED (mm/min)	Heat Input kJ/mm
			SIZE (mm)	ESO (mm)							
1 to 7	1.1	1.8	1.2 mm	25	DC+	CV	200-450	80-300	15-35	150-400	0.6-0.93
	7.1	7.8									

Rail surface preparation details

Temp. control min 350 Max 450 °C

Bead sequence placement. Overlapping weld bead to commence in the toe of previous weld bead. Stringer Weld bead technique. Weld bead 1 is placed on one edge and weld bead 2 is placed on the opposite edge of the rail head, providing deposited metal and rail hat affected zone crack free and desired structure and properties.

Stringer weld bead technique

Stringer Bead

75 to 90°, drag angle, pull technique. To minimise spatter use 90° angle.

Weld Bead 1.1

Weld Bead 1.2

INTER-RUN CLEANING: remove slag by chip/wire brush;

DRESSING AND GRINDING AFTER WELDING: After welding, excess metal shall be removed and the running surface finished by grinding.

VISUAL INSPECTION AFTER WELDING: No regions of under-fill, cracking, slag inclusions, lack of fusion, roll over, gas prosody, crater porosity, grinding burns or arc-strike, melted edges.

AUTHORISED AND APPROVED BY: Dr Milo Dumovic, Managing Director
Solid Technologies Pty. Ltd.
ABOVE PROCEDURE DETAILS ARE GUIDE ONLY

Figure 14. Welding procedure specification (WPS) for repair welding of carbon steel rail by the Flux Cored Self Shielded Arc Welding process

Slika 14. Specifikacija postupka zavarivanja (WPS) za reparaturno zavarivanje šine od ugljeničnog čelika postupkom sa punjenom žicom sa samozaštitom

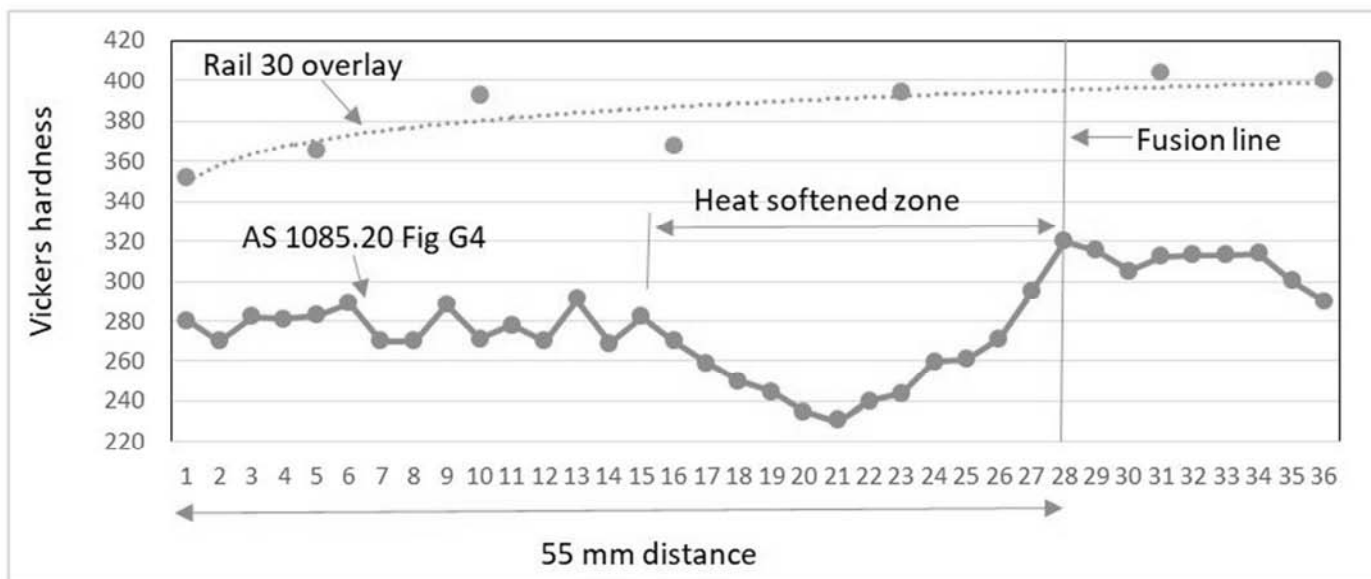


Figure 15. Soft HAZ of thermite weld overlaid with Solid Rail 30 weld deposit [12]

Slika 15. Omekšana zona uticaja toplote (ZUT) aluminotermijski zavarenog spoja šine koji je navaren sa slojem Solid Rail 30 dodatnim materijalom [12]

4. Conclusions

Flux cored semi-automatic arc welding maintenance of railroads and its components require complex metallurgical approach and solutions. High Carbon Rail steels require use of consumables which will develop pearlitic/ferritic weld deposits for standard rail; and bainitic weld deposits for head hardened rail. Dilution, distortion and phase transformations must be considered in order to avoid developments of undesired microstructures that could lead to catastrophic failure. While most of the standards are focused on the HAZ and its cracking, particular attention needs to be made to the first layer of weld deposit and in particular close to the fusion line up to 0.5 mm where carbon pick up from the rail parent material can cause formation of brittle structures. With austenitic manganese steels maximum weld interpass temperature is established at 260°C in order to avoid brittle carbide formation that could cause disintegration of the casting components. Wide varieties of alloys are available and development of proper Welding Procedure Specifications is essential to successful repair of the rail defects.

4. Zaključci

Održavanje pruga i njenih komponenti poluautomatskim elektrolučnim zavarivanjem sa punjenom žicom zahteva kompleksan metalurški pristup i rešenja. Čelici za šine sa visokim sadržajem ugljenika zahtevaju upotrebu dodatnog materijala koji će razviti perlitno/feritne slojeve navarivanja za standardnu šinu; i bainitne slojeve navara za glavu kaljene šine. Rastvaranje, distorzija i fazne transformacije moraju se uzeti u obzir kako bi se izbeglo stvaranje neželjenih mikrostruktura koje bi mogle dovesti do katastrofalnog kvara. Dok je većina standarda fokusirana na zonu uticaja toplote (ZUT) i njeno pucanje, međutim posebna pažnja treba da se posveti prvom sloju navara, a posebno blizu linije spoja do 0,5 mm gde porast sadržaja ugljenika iz osnovnog materijala šine može prouzrokovati formiranje krtih struktura. Kod austenititno manganskih čelika maksimalna temperatura međuprolaza pri zavarivanju je preporučena na 260°C, kako bi se izbeglo stvaranje krtih karbida koji bi mogli izazvati dezintegraciju komponenti spajanja. Veliki broj različitih dostupnih varijanti dodatnih materijala i razvoj odgovarajućih specifikacija procedura zavarivanja (WPS) je od suštinskog značaja za uspešnu popravku defekata šine.



References / Literatura

- [1] Causes of Rail Defects and Fractures (Sawley and Reiff 2000), (2000), Rail Failure Assess. for the Off. of the Rail Regulator, An assessment of Rail track's methods for managing broken and defective rails. P-00-070. Transp. Techn. Cen., Inc. A subsidiary of the Ass. of American Railroads, Pueblo, Col. USA.
- [2] Frederick V. Lawrence, Eric T. Ross Christopher P. L. Barkan, (2004), Reliability of Improved Thermite Welds, Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 41 University of Illinois at Urbana Champaign
- [3] Railroad Welding Demands Specialized Processes, Brian Meade, AWS WJ Sept 1999;
- [4] AS 1085, Railway Track Material, Part 1: Steel Rails
- [5] European Standard EN 13674-1, Railway Application Track Rail Part 1, Vignoles Railway Rails
- [6] International Union of Railways (UIC) Leaflet 860, "Tech. Specification for the Supply of Rails.
- [7] AWS D15.2, Welding Of Rails And Related Rail Components For Use By Rail Vehicles.
- [8] M. Dumovic & D. Dunne, (2014), Prediction of weld metal microstructure of self-shielded arc hardfacing welds resistant to metal-to-metal wear. IIW, Welding in the World, 58:831–837
- [9] Solid Technologies R&D WeldHCRSteel test results (2016).
- [10] Solid Technologies Broken rail failure analysis: Kooragang Down Branch 170.524 7 11 14 (2014)
- [11] Solid Technologies Rail Welding Procedure Specification; WPS #: ST-RHC-1408-12
- [12] Solid Technologies; WPS TW-30-16 T4-1408 Test Result; 2014
- [13] Solid Technologies; WPS AUMn-1408-24-2616; 2014

Članstvo u strukovnoj asocijaciji DUZS

je referenca za Vaš profesionalni status

Članarina za 2023. godinu je 3500,00 dinara

Uplatom članarine stičete pravo na beneficirane cene
pretplate časopisa (strana MARKETING)

Tekući račun DUZS: 325-9500600002588-46

Informacije



+ 381 (11) 2420-652 (10-16 h)



duzs011@gmail.com

www.duzs.org.rs



TAKMIČENJE MLADIH ZAVARIVAČA International Welding Competition - 2023

Od 11 - 15. septembra 2023. godine, u nemačkom gradu Essen-u, održan je Sajam zavarivanja i rezanja.

U okviru sajma, od 13. do 15. septembra, održano je međunarodno takmičenje mladih zavarivača službenog naziva „International Welding Competition 2023“. Pravo učešća imali su mladi zavarivači rođeni u periodu 01.01.2000-31.12.2007. Učestvovalo je ukupno 11 zemalja: Nemačka, Švajcarska, Italija, Grčka, Rumunija, Bugarska, Češka, Španija, Kina, Bosna i Hercegovina i Srbija. Ukupna broj takmičara 39.

Ekipo koja je, u organizaciji Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji (DUZS), predstavljala našu zemlju na takmičenju činili su takmičari:

Lazar Adamović 2005. god. (postupak 141) učenik tehničke škole iz Obrenovca,

Lazar Popov 2005. god. (postupak 135) radnik preduzeća Utva Milan Premasunac iz Kačareva,

Dimitrije Marković 2001. god. (postupak 111) radnik preduzeća FMI iz Obrenovca.

Pored takmičara, naš tim činili su i Branislav Lukić-član upravnog odbora DUZS, član žirija za ocenjivanje spojeva za postupke 111 (REL) i 135 (MAG),

Vencislav Grabulov-član upravnog odbora DUZS, vođa ekipe.

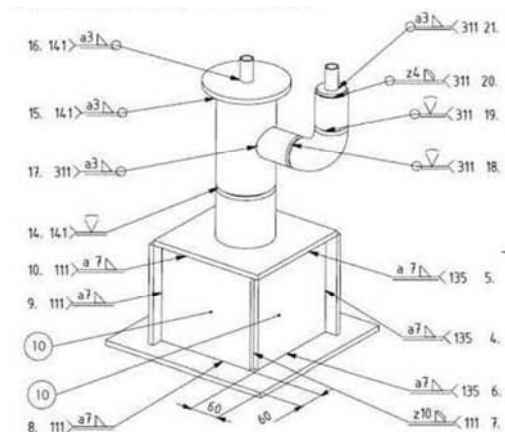


Takmičenje je organizovano u 5 kategorija: u postupcima 311, 111, 135, 141 i zavarivanje gotovog proizvoda (sklop koji je trebalo završiti u kombinaciji postupaka 111, 141, 135 i 311)

Osnova za izradu zavarenih spojeva: standard ISO 9606-1.

Uzorci koje je trebalo uraditi u pojedinačnim takmičenjima: cevi dimenzija $\varnothing 76 \times 3$ za postupke 311 i 141, a za postupke 111 i 135 trebalo je zavariti ploče debljine 12mm. Svi zavareni spojevi su ocenjivani vizuelnom kontrolom

Sklop je činila kombinacija zavarenih ploča i cevi. Po završetku izrade sklopa svi zavareni spojevi na sklopu su ocenjivani vizuelnom kontrolom a nakon toga je sklop ispitivan pritskom, sukcesivno od 10, 30 do maksimalnih 50bara



Pojedinačno za svaki postupak takmičar je imao zadatak da za 60 minuta zavari sledeći uzorak: cevi sučeono u položaju PH i ploče ugaono u položaju PD. Za zavarivanje sklopa ekipa je imala na raspolaganju 480 minuta



Zvanični rezultati takmičenja "International Welding Competition - 2023"

Ekipno:

International Welding Competition 2023 - Team							
Ranking	LV	TN E	TN G	TN MAG	TN WIG	Gesamt	Team Comp.
1	Land 10 Switzerland	1	1	1	1	4	879,000
2	Land 7 Romania	1	0	1	1	3	876,250
3	Land 3 China	1	0	1	1	3	863,250
4	Land 6 Italia	1	0	1	1	4	811,500
5	Land 4 Germany	1	1	1	1	4	753,000
6	Land 9 Spain	1	1	1	1	4	688,000
7	Land 1 Bosnia Herzegovina	1	1	1	1	4	651,000
8	Land 8 Serbia	1	0	1	1	3	650,500
9	Land 2 Bulgaria	1	1	1	1	4	522,000
10	Land 5 Greece	1	0	1	1	3	511,250
11	Land 11 Czech Republic	1	0	1	1	3	413,000

TIG (141)

Ranking	No.	Pre Name	Name	Process	Country	Total
1	46	Gabriel	Constandache	TIG	Land 7 Romania	99,412
2	43	Robin	Kaufmann	TIG	Land 4 Germany	87,647
3	42	Zhihu	Wei	TIG	Land 3 China	87,059
4	48	Axel	Ramirez Betanco	TIG	Land 9 Spain	85,294
5	45	Davide	Romano	TIG	Land 6 Italia	84,118
6	49	Jonas	Keller	TIG	Land 10 Switzerland	84,118
7	40	Miladin	Vujić	TIG	Land 1 Bosnia Herzegovina	78,235
8	41	Martin	Mihnev	TIG	Land 2 Bulgaria	58,824
9	50	Daniel	Šemberk	TIG	Land 11 Tschechische Republik	53,529
10	44	Antonios	Koskinas	TIG	Land 5 Greece	41,765
11	47	Lazar	Adamovic	TIG	Land 8 Serbia	41,176

MAG (135)

Ranking	No.	Pre Name	Name	Process	Country	Total
1	36	Manuel	Ulmann	GMAW	Land 10 Switzerland	96,875
2	32	Mattia	Galian	GMAW	Land 6 Italia	91,875
3	30	Paul	Räubig	GMAW	Land 4 Germany	78,125
4	33	Ionut Florin	Lupascu	GMAW	Land 7 Romania	73,125
5	35	Mihai	Petre	GMAW	Land 9 Spain	70,625
6	29	Rui	Ma	GMAW	Land 3 China	66,875
7	34	Lazar	Popov	GMAW	Land 8 Serbia	63,125
8	27	Alija	Meščić	GMAW	Land 1 Bosnia Herzegovina	53,750
9	37	Jan	Marcisz	GMAW	Land 11 Tschechische Republik	48,750
10	28	Katrin	Eftimova	GMAW	Land 2 Bulgaria	40,000
11	31	Evangelos	Goga	GMAW	Land 5 Greece	31,875

GASNO (311)

Ranking	No.	Pre Name	Name	Process	Country	Total
1	23	Joel	Plank	Gas	Land 10 Switzerland	66,471
2	17	Leon	Buck	Gas	Land 4 Germany	59,412
3	22	Igor	Garmendia Hergue	Gas	Land 9 Spain	48,235
4	14	Aldin	Nišić	Gas	Land 1 Bosnia Herzegovina	42,353
5	15	Stanislav	Yordanov	Gas	Land 2 Bulgaria	22,353

REL (111)

Ranking	No.	Pre Name	Name	Process	Country	Total
1	10	Mattia	Ferrara	MMAW	Land 10 Switzerland	96,250
2	4	Marc	Bendig	MMAW	Land 4 Germany	72,500
3	7	Paul Doinas	Ticu	MMAW	Land 7 Romania	66,875
4	6	Alessandro	Arnozzi	MMAW	Land 6 Italia	66,250
5	1	Miladin	Vujić	MMAW	Land 1 Bosnia Herzegovina	65,000
6	3	Guanghui	Tian	MMAW	Land 3 China	65,000
7	8	Dimitrije	Markovic	MMAW	Land 8 Serbia	62,500
8	5	Christos	Pantos	MMAW	Land 5 Greece	54,375
9	11	Jakub	Gřonka	MMAW	Land 11 Czech Republic	52,500
10	2	Anatoli	Ivanov	MMAW	Land 2 Bulgaria	50,000
11	9	Arturo	Herráez Herrera	MMAW	Land 9 Spain	45,625

Branislav Lukić dipl.ing.IWE

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2023**

	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%.
- Objavljivanje 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), 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 2023

	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
REFIT INŽENJERING
YASKAWA SLOVENIJA
HONEX
ELIMP
NEMINIK
SIGMA LAB
EDC D.O.O. HRVATSKA

1. ČLANARINA DUZS za 2023. godinu **3.500 dinara**
Članovima DUZS **GRATIS** godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"
2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2023. 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 2021. godinu 500 dinara
 - cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... 250 dinara
 - b) beneficirane cene za članove DUZS:
 - cena pojedinačnog broja za 2022. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) 400 dinara
 - cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) Gratis
4. Knjiga Organizacija i ekonomika zavarivačkih radova – autor: prof. dr Zoran Radojević (uračunat PDV 10%) 1.045 dinara
5. Zbirke standarda OBEZBEĐENJE KVALITETA U ZAVARIVANJU, komplet 4 toma 6.750 dinara